

WT

WerkstattsTechnik



Foto: PantherMedia_Nataliya Hora

MONTAGE

Simulativer
Vergleich tubularer
Peltierelemente

HANDBABUNG

Seilrobotergelenk
für automatisiertes
Hämmern

AUTOMATISIERUNG

Assistenzsystem
zur Verbesserung
der Ergonomie

Inhalte der Online-Ausgabe 9-2022

TITELTHEMEN: MONTAGE – HANDHABUNG – AUTOMATISIERUNG – INDUSTRIEROBOTER

B. Kuhlenkötter; J. Krüger – Ruhr-Universität Bochum und Forschungszentrum für das Engineering Smarter Produkt-Service Systeme; Technische Universität Berlin und Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Innovative Lösungen für die industrielle Robotik

Diese Ausgabe mit dem Schwerpunkt „Montage – Handhabung – Automatisierung – Industrieroboter“ stellt innovative Lösungen vor, mit denen die vorangehend genannten Potenziale zu einer Erweiterung der Anwendungsfelder industrieller Robotik wie auch zur verbesserten Anpassung an wechselnde Anwendungsbedingungen erschlossen werden können.

S. 533

L. N. Josler, S. Börzel, M. Miro, F. Töberich, B. Kuhlenkötter – Lehrstuhl für Produktionsysteme, Ruhr-Universität Bochum; Breuckmann GmbH & Co. KG, Heiligenhaus

Herausforderungen der Druckgussautomatisierung*

Dieser Beitrag ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts „HiRoCast“. Es werden mögliche Herausforderungen bei der Automatisierung von Dosier- und Reinigungsprozessen im Rahmen des Druckgusses von Hochtemperaturschmelzen beschrieben. Hierfür wird das Konzept einer roboterbasierten Automatisierungslösung vorgestellt, welches trotz der enorm herausfordernden thermischen und chemischen Umgebungsbedingungen eine sichere Gussvorbereitung erlaubt.

S. 534

A. Bastidas-Cruz, T. Jaya, K. Haninger, J. Krüger – Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin

Industrielle kraftgeregelte Schraubprozesse*

Manuelle Schraubmontagen profitieren von menschlichen feinmotorischen Fähigkeiten für die flexible Positionierung der Werkzeuge und Bauteile. Solche Prozesse lassen sich mithilfe eines kooperativen Robotersystems automatisieren, welches flexibel in einer dynamischen Umgebung agiert und insbesondere die Fähigkeit mitbringt, hohe Prozesskräfte aufzunehmen. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Automatisierung von kraftgeregelten Schraubvorgängen beschrieben und die sich dabei ergebenden Herausforderungen erläutert.

S. 540

A. Zych, S. Lauer, S. Dryba – Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Rostock

Einsatz von Schweißrobotern im Spezialschiffbau*

Bei der Fertigung schiffbaulicher Unterbaugruppen werden im Universalschiffbau bereits meist Schweißroboter eingesetzt. Dagegen ist im Spezialschiffbau der Anteil automatisierter Produktionsanlagen deutlich geringer. Gründe hierfür sind unter anderem die Verarbeitung alternativer Materialien sowie die höhere Komplexität der Bauteile. Für solche Szenarien bietet die sensorbasierte Roboterprogrammierung in Verbindung mit spezieller 3D-Sensortechnik neue Chancen zum wirtschaftlichen Einsatz von Robotern.

S. 547

D. Littfinski, A. Verl – Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Uni Stuttgart

Virtual Reality in der Steuerungstechnik*

Dieser Beitrag stellt ein Konzept für die Integration von interaktiven Simulationsmodellen in einer Virtual-Reality (VR)-Simulations-

umgebung vor. Dabei werden die Simulationsmodelle aus der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) von Produktionsanlagen betrachtet. Ein Ziel der erweiterten VIBN mithilfe von einer VR besteht darin, die Lücke zwischen VIBN und der realen Inbetriebnahme zu schließen. Damit das vorhandene VIBN-Modell möglichst einfach in der VR-Visualisierung integriert werden kann, ist es essenziell, eine Durchgängigkeit des Simulationsmodells im Engineering zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird auf das bestehende Austauschdatenformat „AutomationML“ eingegangen.

S. 552

S. Krusche, I. Al Naser, M. Bdiwi, S. Ihlenfeldt – Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz

Effiziente Anlagenlayouts durch intelligente Simulation*

Das Softwaretool „SafeZone“ erlaubt die effiziente und zuverlässige Berechnung von Sicherheitsbereichen (Safe Bereichen) für komplexe schutzaulose Roboteranlagen, zum Beispiel im Karosseriebau und der Endmontage. Unter Berücksichtigung der realen Bewegungsbahnen und Geschwindigkeiten werden – im Gegensatz zum Status Quo – nur dort Gefahrenbereiche berechnet, wo auch Gefahren entstehen können. Das spart Platz und lässt Mensch sowie Roboter sicher näher zusammenrücken.

S. 559

M. Trinh, O. Petrovic, C. Brecher, M. Behery, G. Lakemeyer – Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen; Knowledge-Based Systems Group (KBSG) der RWTH Aachen

Kollaborative Montageprozesse mit Behavior Trees*

Die kollaborative Montage vereint die Vorteile der manuellen Montage, wie Flexibilität und Fingerfertigkeit des Menschen, sowie der automatisierten Fertigung durch die Präzision und Effizienz des Roboters. Kleinen und mittleren Unternehmen fehlt oft die Expertise, um solche Prozesse – vor allem bei einer hohen Produktvarianz – zu planen und durchzuführen. Dieser Beitrag stellt ein Framework mit Behavior Trees vor, um das Problem unter Einhaltung der Sicherheitsstandards zu vereinfachen.

S. 565

S. Wurm, S. Storms, W. Herfs – WZL, RWTH Aachen

Automatisierte, robotergestützte hybride Fertigung*

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend in kleinen und mittleren Serien eingesetzt, was zu höheren Qualitätsanforderungen zum Beispiel an Oberflächeneigenschaften oder Maßhaltigkeit führen kann. Um komplexe Geometrien effizient fertigen zu können, wurde eine durchgängige roboterbasierte, hybride Fertigungskette entwickelt. Diese vereint den additiven Fertigungsprozess mit einer adaptiven spanenden Nachbearbeitung. Der Prozess wird über ein entwickeltes Softwareframework geplant und gesteuert.

S. 569

A. Ahrens, L. Oberfichtner, V. Richter-Trummer, R. Fritzsche, M. Todtermuschke, U. Frieß, S. Ihlenfeldt – Fraunhofer IWU, Chemnitz

Automatisierter Greiferalentwurf*

Die langwierige manuelle Entwicklung von Greifsystemen wird durch das im Beitrag vorgestellte Softwaresystem automatisiert. Basierend auf dem Anforderungsprofil werden die einzelnen Bereiche der Softwarelösung vorgestellt und deren Funktionsweise erläutert. Am Beispiel der Gruppierung von Spannpunkten für Türmontagesysteme durch multikriterielle Optimierung wird das Potenzial für die breitere Anwendung der Softwarelösung in flexiblen und modularen Anlagen gezeigt.

S. 574

G. Schuh, G. Bergweiler, L. Dworog, F. Fiedler – WZL, RWTH Aachen

Die Karosserie aus dem Aluminium-Druckguss*

Der Elektroautohersteller Tesla hat 2018 ein Patent zum Mega-Casting angemeldet. Mit dieser neuen Fertigungsmethode soll es zukünftig möglich sein, eine Karosserie in einem Fertigungsschritt im Aluminium-Druckguss ohne nachfolgende Wärmebehandlung zu fertigen. Der Ansatz steht der etablierten Karosseriebauweise konträr gegenüber.

Was bedeutet Mega-Casting für die Automobilindustrie? Ein Expert*innen-Team des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen University hat die Chancen und Risiken des Mega-Castings in einer SWOT-Analyse untersucht.

S. 580

S. Sauer, D. Berndt – Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

AR-Assistenz für die modulare Spannmittelmontage

In der CNC-Bearbeitung ist es zur Kollisionsvermeidung sehr wichtig, dass real aufgebaute Spannsysteme exakt der Vorgabe aus der CAD/CAM-Simulation entsprechen. In diesem Beitrag wird ein industrietaugliches Assistenzsystem präsentiert, mit dem per Augmented Reality (AR) die manuelle Montage von modularen Spannsystemen unterstützt wird und so Fehler vermieden werden können. Es wird aufgezeigt, dass die Kamera-Monitor-basierte AR geeignet ist, um unter rauen Bedingungen intuitive Montageanleitungen zu visualisieren. Dadurch lassen sich Bearbeitungszeiten in der CNC-Maschine verkürzen und die Montage beschleunigen.

S. 591

L. Eversberg, C. Sohst, J. Lambrecht – Technische Universität Berlin, Fachgebiet Industry Grade Networks and Cloud

Assistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie*

Zur Vermeidung von Muskel-Skelett-Erkrankungen am Arbeitsplatz, zum Beispiel während der manuellen Montage oder Reparatur, lassen sich mittels Künstlicher Intelligenz automatisierte Ergonomieanalysen basierend auf Kameradaten erstellen. Darauf aufbauend kann ein Assistenzsystem die Fachkräfte während der Arbeit bei unergonomischen Körperhaltungen warnen. Zur Vermeidung von fehlerhaften Warnungen sollte die Konfidenz der Körpererkennung mit in die Bewertung einfließen.

S. 596

M. Lahres, H. Hofele, D. Krun; L.-A. Mathis, M. Bues, H. Widlroither; R. Wechner; K. Frey, R. Hahn; T. Schneider, A. Braun, A. Gerlicher; N. Reusch – Mercedes-Benz AG, Böblingen; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart; Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart; Hochschule für Medien, Stuttgart; Ingenieurbüro Reusch

Die Forschungsplattform von morgen



Interieurkonzept für „Peoplemover“ Use Case. Grafik: HdM Stuttgart

Das FlexCAR besteht aus einer autonom gesteuerten Fahrzeugplattform für die Mobilität von morgen, welche Use-Case-gesteuert als Forschungsmonitor fungiert, um neue technologische Features unmittelbar aus dem Forschungsstadium nach dem Plug-and-Play-Prinzip gezielt zu implementieren. Damit kann eine frühzeitige Validierung im Hinblick auf ein künftiges Anwendungspotenzial ermöglicht werden. Offene Soft- und Hardwareschnittstellen sind hier berücksichtigt oder werden weiterentwickelt.

S. 601

M. Schalk, I. Schalk, M. Holl, V. Kopp, T. Bauernhansl, J. Siegert, U. Schneider – Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart; Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF, Uni Stuttgart

Exoskelette reduzieren die subjektive Belastung*

Um die Nachfrage nach herstellerunabhängigen Erkenntnissen über die Wirkung und Effekte von industriell eingesetzten Exoskeletten zur Prävention von körperlicher Überlastung und physischen Schäden zu bedienen, wurde in einer Studie das subjektive Belastungsempfinden von 72 Probanden während drei unterschiedlichen standardisierten Tätigkeiten untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduktion der wahrgenommenen Belastung bei der Verwendung eines Exoskeletts im Vergleich zur Durchführung ohne Exoskelett, welche konstant über alle definierten Tätigkeiten auftritt.

S. 607

F. Hörstel, F. Kähler, T. Schüppstuhl – Technische Universität Hamburg, Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT)

KI-Auswertung von Reparaturdaten in der Luftfahrt*

Während der Flugzeug-MRO (maintenance, repair, and overhaul) werden Strukturbauenteile auf Oberflächendefekte geprüft und etwaige Defekte lokal entfernt. Die Position und Ausdehnung der Reparaturstellen bestimmen maßgeblich den Wiedereinsatz des Bauteils. Die Zustandsbewertung erfolgt dabei manuell und auf Basis von Expertenwissen. In diesem Beitrag wird ein datengetriebener Auswertearansatz zur Bewertung der Reparatur vorgestellt, welcher auf Basis historischer Reparaturen eine fundierte sowie objektive Zustandsbewertung erlaubt.

S. 613

S. Schmidt, A. J. Martin, T. Bauernhansl – Fraunhofer IPA und IFF, Universität Stuttgart

DMM – Systematische datenbasierte Geschäftsmodelle*

In produzierenden Unternehmen der Stückgutindustrie fallen durch die digitale Transformation immer mehr Daten an. Aufgrund zunehmend volatiler Umgebungsbedingungen sowie stetig wachsenden Kosten drucks werden Unternehmen zu alternativen, meist datenbasierten Geschäftsmodellen gedrängt. Aufbauend auf einer bestehenden Datenkategorisierung (siehe Teil 1, wt Werkstattstechnik online Ausgabe 7/8-2022, S. 501) wird in diesem Aufsatz ein Modell zur Monetarisierung von Daten produzierender Unternehmen vorgestellt und mit bekannten Geschäftsmodellmustern verknüpft.

S. 619

J. Walter, S. Reitelshöfer, J. Franke; T. Nemoto, C. Bachmann, M. Gerlich – Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsaufbereitung und Produktionssystematik (FAPS); Siemens AG, München

Seilrobotergelenk für automatisiertes Hämmern*

Herkömmliche Roboter sind aufgrund der Konfiguration rigider Gelenke und empfindlicher Getriebe anfällig für Stoßbelastungen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass ein Robotergelenk, basierend auf einer neuartigen Topologie mit drei aktiven und drei passiven Seilen, Stoß-

belastungen bewältigen kann, die bei Bearbeitungsaufgaben wie dem
Hämmern auftreten können. **S. 625**

*M. Friedmann, S. Schabel, J. Gerber, A. Döhring, L. Meschter, J. Fleischer;
M. May – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Pro-
duktionstechnik; Schunk GmbH, Lauffen/Neckar*

Greiferfinger für eine schnelle Rekonfiguration*

Handhabungsprozesse sind Teil nahezu jedes automatisierten Prozes-
ses. Während das Handhabungsgerät verhältnismäßig einfach an neue

Handhabungsaufgaben angepasst werden kann, erfolgt die Gestaltung
der Greiferfinger als Schnittstelle zwischen Handhabungssystem und
Objekt meist händisch und basierend auf Erfahrungswissen. Dieser
Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Greiferfingerbaukastens, der
für eine automatisierte Konfiguration anwendungsspezifischer Greifer-
finger genutzt werden kann. **S. 629**

Innovative Lösungen für die industrielle Robotik

Der Trend zur robotergestützten Automatisierung ist nach wie vor ungebrochen. So wurden beispielsweise auf dem nordamerikanischen Markt im ersten Quartal diesen Jahres 28 % mehr Roboter verkauft als im Vergleichszeitraum des Vorjahrs. Dies spiegelt den weltweit positiven Trend wider (ifr.org). In der Montage- und Handhabung von Bauteilen gibt es noch immer eine große Anzahl manueller Tätigkeiten mit großem Potenzial für eine roboterbasierte Automatisierung. Aktuelle Herausforderungen zu deren Umsetzung sind bekannt, beispielsweise hohe Anforderungen an die Variantenflexibilität bei gleichzeitigem Mangel an Expertise zur Roboterprogrammierung. Die kollaborative Robotik hat in der Vergangenheit bereits ihr hohes Potenzial zur Flexibilisierung der robotergestützten Automatisierung gezeigt. Doch in diesem vergleichsweise jungen Feld der Robotik gibt es noch großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um deren Anwendung in der betrieblichen Praxis zu vereinfachen. Insbesondere bei der Planung und Optimierung der Verzahnung von Mensch und Roboter unter Berücksichtigung der hohen Anforderungen für die Sicherheit des Workers.

Und auch jenseits der Möglichkeiten der Mensch-Roboter-Kollaboration bedarf es in den klassischen Feldern der robotergestützten Automatisierung neuer Lösungen zur vereinfachten Adaption an wechselnde Anforderungen von Produkt oder Prozess. Die zunehmende Integration von Sensorik in der Roboterzelle wie auch im Greifer bildet hierzu eine weitere Grundlage, beispielsweise durch Verfahren der Kraftregelung und Bildverarbeitung. Darüber hinaus bilden Methoden der sensorbasierten Führung des Roboters einen aussichtsreichen Ansatz, die zeitaufwendige Programmierung des Roboters maßgeblich zu vereinfachen und zu automatisieren. Unterstützt werden diese Ansätze zunehmend durch Methoden des maschinellen Lernens, von deren rasantem Fortschritt auch die Automatisierung und Robotik zunehmend profitiert. Bekannte Anwendungsfelder, wie beispielhaft das robotergestützte Schweißen, profitieren von solchen Entwicklungen. Zur Erschließung neuer Anwendungen der industriellen Robotik, bei denen beispielsweise stoßartige Belastungen auftreten, bedarf es neben der Erweiterung der Sensorik und Intelligenz des Roboters auch neuer konstruktiver Prinzipien zu Kraftübertragung.

Diese Ausgabe mit dem Schwerpunkt „Montage – Handhabung – Automatisierung – Industrieroboter“ stellt innovative Lösungen vor, mit denen die vorangehend genannten Potenziale zu einer Erweiterung der Anwendungsfelder industrieller Robotik wie auch zur verbesserten Anpassung an wechselnde Anwendungsbedingungen erschlossen werden können.

Wir wünschen viel Spaß bei der Lektüre.



Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter ist Leiter des Lehrstuhls für Produktionsysteme der Ruhr-Universität Bochum und Direktor des Forschungszentrums für das Engineering Smarter Produkt-Service Systeme. Foto: Ruhr-Universität Bochum



Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger ist Fachgebietsleiter Industrielle Automatisierungstechnik der TU Berlin und Geschäftsfeldsleiter Automatisierungstechnik des Fraunhofer Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktions-technik IPK. Foto: Fraunhofer IPK



Ein Ansatz zur robotergestützten Automatisierung bei hochschmelzenden Kupferbasislegierungen

Herausforderungen der Druckgussautomatisierung

L. N. Josler, S. Börzel, M. Miro, F. Töberich, B. Kuhlenkötter

Dieser Beitrag ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts „HiRo-Cast“. Es werden mögliche Herausforderungen bei der Automatisierung von Dosier- und Reinigungsprozessen im Rahmen des Druckgusses von Hochtemperaturschmelzen beschrieben. Hierfür wird das Konzept einer roboterbasierten Automatisierungslösung vorgestellt, welches trotz der enorm herausfordernden thermischen und chemischen Umgebungsbedingungen eine sichere Gussvorbereitung erlaubt.

STICHWÖRTER

Industrieroboter, Automatisierung, Gießen

1 Einführung

Der Druckguss ist ein etabliertes umformendes Verfahren für die wirtschaftliche Herstellung von Serienbauteilen aus Schwer- und Leichtmetalllegierungen. Durch seine kurzen Zykluszeiten von häufig unter zwei Minuten weist der Druckguss gegenüber anderen Gussverfahren eine hohe Produktivität auf. Außerdem erzielt das Verfahren eine hohe Oberflächenqualität, was zu maßgenauen Gussteilen führt.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf mögliche Herausforderungen bei der Automatisierung der Gussvorbereitung von Hochtemperaturschmelzen in Mengen von bis zu 4 kg. Beim Druckgussprozess wird die Schmelze für jeden Gießzyklus in eine Gießkammer portioniert und mittels eines beweglichen Gießkolbens unter hohen Geschwindigkeiten in die Gussform gedrückt (auch „Schuss“ genannt). Es wird das Kaltkammerverfahren verwendet, bei dem die Hochtemperaturschmelze mithilfe eines Gießlöffels in einen nicht beheizten Druckgusskolben gegeben wird, da beim gegensätzlichen Warmkammerverfahren bei Temperaturen über 800 °C eine Gefahr der Zerstörung der metallischen Dauerform durch die unkontrollierbare Diffusion von Metallionen besteht [1].

Derzeit werden in diesem Bereich alle Prozessschritte zur Gussvorbereitung ausschließlich händisch vorgenommen. Der Gießprozess ist für den Gießer aufgrund der enormen Wärmebelastung und der repetitiven Bewegungen auf Dauer ermüdend. Zudem stehen deutsche Gießereien unter enormen Preis- und Qualitätsdruck, was Anlass zur Entwicklung eines roboterbasierten Automatisierungssystems im Rahmen des Forschungsprojekts „HiRoCast“ ist. Dieser Beitrag fasst die Konzepte und Ideen

Challenges in die casting automation

This paper is part of the „HiRoCast“ research project funded by the German Federal Ministry of Economics and Climate Protection. It describes the challenges involved in automating the metering and cleaning processes in the die casting of high-temperature melts. For this purpose, a basic concept of a robot-based automation solution is presented to enable safe casting preparation in the face of extremely challenging thermal and chemical ambient conditions.

des Forschungsprojektes zusammen, welches insbesondere die Druckgussvorbereitung von Hochtemperaturschmelzen, wie Siliziumtombak, adressiert.

2 Herausforderungen beim Verguss niedrig-dosierter Hochtemperaturschmelzen

Die händische Gussvorbereitung des Druckgusses im Kaltkammerverfahren ist für den Gießer eine risikobehaftete und körperlich fordernde Tätigkeit. Beim Portionieren der Schmelze wird bewusst mit einem einfachen, offenen Gießlöffel gearbeitet, um ein leichtes, robustes und schnelles Befüllen der Gießkammer zu gewährleisten. Das beim Portionieren der Schmelze erforderliche Prozessfenster von maximal fünf Sekunden ergibt sich aus den hohen Energieverlusten der relativ kleinen Dosiermenge, wobei sich eine Abkühlgeschwindigkeit innerhalb des Gießlöffels von circa 10 °C pro Sekunde ergibt.

Auch bringen die hohen Temperaturen einen starken Anstieg der Oxidation der Schmelze mit sich und beschleunigen Diffusionsprozesse. Die Diffusion von Metallionen aus der Schmelze in die Legierungsstruktur des Gießlöffels führt zu einem hohen Materialverschleiß an Gießlöffel und Tiegelofen. Durch Oxidationsprozesse an der Oberfläche der Schmelze wächst der zylindrische Querschnitt des keramischen Tiegs im Ofen mit einer porösen Ablagerung (Krätze) zu. Um diesen Prozess zu verlangsamen, werden diese Verunreinigungen regelmäßig mit einem Tiegelkratzer durch eine stoßartige Bewegung entfernt und anschließend mit einem Metallsieb der Schmelzoberfläche entnommen. Diese Verunreinigungen lagern sich auch am Gießlöffel, Metallsieb und Tiegelkratzer ab und müssen regelmäßig entfernt

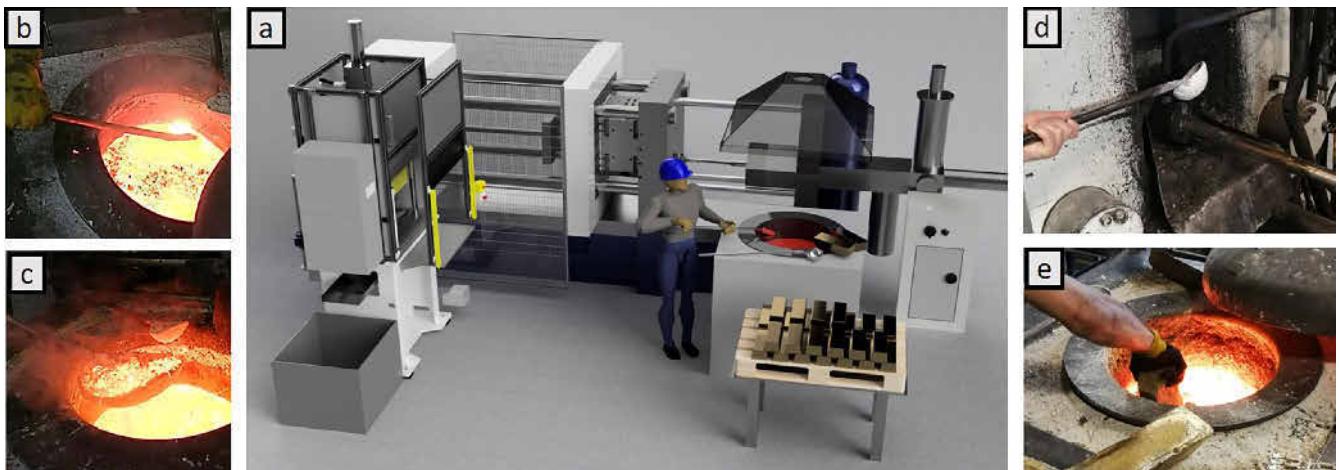


Bild 1. Schematische Darstellung Anlagenaufbau bei manueller Druckgussvorbereitung der Firma Breuckmann GmbH (a) und Bilder aus dem Betrieb beim Abkrätzvorgang des keramischen Tiegels mit einem Tiegelkrätzer (b), der Entnahme der Kräze mit einem Metallsieb (c), dem Abguss in der Druckgussanlage (d) und dem Chargieren(e). Foto: Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

werden. Mit einer stoßartigen Kraftaufbringung wird ein Abplatzen der Verunreinigungen erzwungen, was jedoch zur Verformung der Werkzeuge und somit zu höherem Verschleiß führt, **Bild 1**.

Der Gießprozess unterliegt unterschiedlichsten Einflussfaktoren, wie der Qualität der zugeführten Barren, den unterschiedlichen Temperaturgradienten im Tiegelofen (je nach Füllstand und Chargierzeitpunkt) und der Temperatur und Menge der portionierten Schmelze beim Auslösen des Schusses. Daher sind die Prozessqualität und die Taktzeit im erhöhten Maße von der Erfahrung und Verfassung des gießenden Mitarbeiters abhängig.

3 Stand der Technik in der Druckgussautomatisierung

Grundsätzlich lassen sich die in der Literatur und auf dem Markt vorhandenen Automatisierungssysteme im Bereich der Druckgussautomatisierung in drei Funktionsprinzipien unterteilen: Gießsysteme, die nach dem Siphon-Effekt, dem Ansaug-Dosierkonzept oder dem Gießlöffeldosierprinzip arbeiten.

Bei den Gießsystemen die nach dem Siphon-Effekt arbeiten, werden elektrisch beheizte Dosieröfen eingesetzt, welche durch ihre geschlossene Form besonders energieeffizient sind. Hier wird mittels Pneumatik oder Überdruck die Schmelze am unteren Ende des Ofens entleert, sodass die Portionierung der Schmelze unterhalb der mit Schlacke besetzten Badoberfläche erfolgt. Solche auf dem Markt verfügbaren Dosieröfen sind meist für große Mengen an Schmelze ausgelegt [2] und bieten in erster Linie durch Anhaftungen am Auslass eine nicht hinreichende genaue Dosiergenauigkeit von ± 30 g für den im Projekt HiRoCast betrachteten Druckgussvorgang.

Grundlage des Ansaug-Dosierkonzeptes ist eine Dosiereinheit, welche Schmelze aus dem Tiegelofen in einen Vakuumtransportbehälter saugt und mit einem mehrachsigen Schwenkarm zu der gewünschten Dosierposition transportiert [1]. Die Firma Meltec bietet hier ein marktfähiges System an. Dieses ist für Aluminiumschmelzen mit einem Dosiergewicht von bis zu 5 kg bei einer Dosiergenauigkeit von ± 20 g ausgelegt [3]. Im Rahmen dieses Beitrags führte die Firma Breuckmann GmbH mit diesem System Voruntersuchungen zum Dosieren von Siliziumtombak, einer

Sonder-Messinglegierung, die bei über 1100 °C vergossen wird, durch. Aufgrund von hohen Anhaftungen von Schlacke an dem Vakuumtransportbehälter waren häufige Reinigungszyklen notwendig. Durch diese Anhaftungen wurde die Dosiergenauigkeit mit jedem Zyklus stärker beeinflusst und der Transportbehälter-Auslass setzte sich bereits nach 394 Dosierzyklen so zu, dass ein Dosieren nicht mehr möglich war.

Die meisten am Markt angebotenen Systeme zum automatisierten Dosieren arbeiten mit einer Gießlöffeldosiervorrichtung. Dabei wird ein Gießlöffel mit einer einfachen zweidimensionalen Kinematik bewegt und durch Eintauchen in die Schmelze im Tiegelofen gefüllt. Die in der Literatur erwähnten Systeme [4–7] bieten kostengünstige und platzsparende Lösungen, sind jedoch in Handhabung und Arbeitsgeschwindigkeit sehr beschränkt.

Einen größeren Handhabungsspielraum bieten Systeme, die aus einem Industrieroboter als Führungskinematik und einer Zusatzkinematik zur Rotation des Gießlöffels bestehen [4, 8, 9]. Diese Systeme sind jedoch für den Einsatz bei Hochtemperaturschmelzen ungeeignet, da die Zusatzkinematik zu sperrig für die Öffnung des Tiegelofens ist und ihre Lebensdauer sich aufgrund der hohen Temperaturen und Verunreinigungen enorm verringert. Darüber hinaus werden bei allen Systemen großvolumige Gießlöffel aus einfachen Stahlwänden eingesetzt, die hohe Energieverluste beim Transport der Schmelze und eine nicht optimale Zugänglichkeit beim Abgießen der Schmelze an der Druckgussanlage mit sich bringen.

Alle oben beschriebenen Automatisierungslösungen sind nur für größere Dosiermengen oder für niedrigschmelzende Legierungen (< 800 °C) geeignet. Auch sind die verfügbaren Lösungen empfindlich gegenüber fest anhaftenden Oxiden oder erzielen nicht die erforderlichen Dosiergenauigkeiten.

4 Automatisierungsansatz

Das Ziel des Forschungsprojektes HiRoCast ist es, die Prozessschritte in der Gussvorbereitung zu automatisieren. In den folgenden Unterkapiteln sind die Herausforderungen bei der Automatisierung dieser Prozessschritte und eine Methodik zur Bewältigung der sich daraus ergebenen Probleme beschrieben. Den schematischen Aufbau der entwickelten Anlage zeigt **Bild 2**.

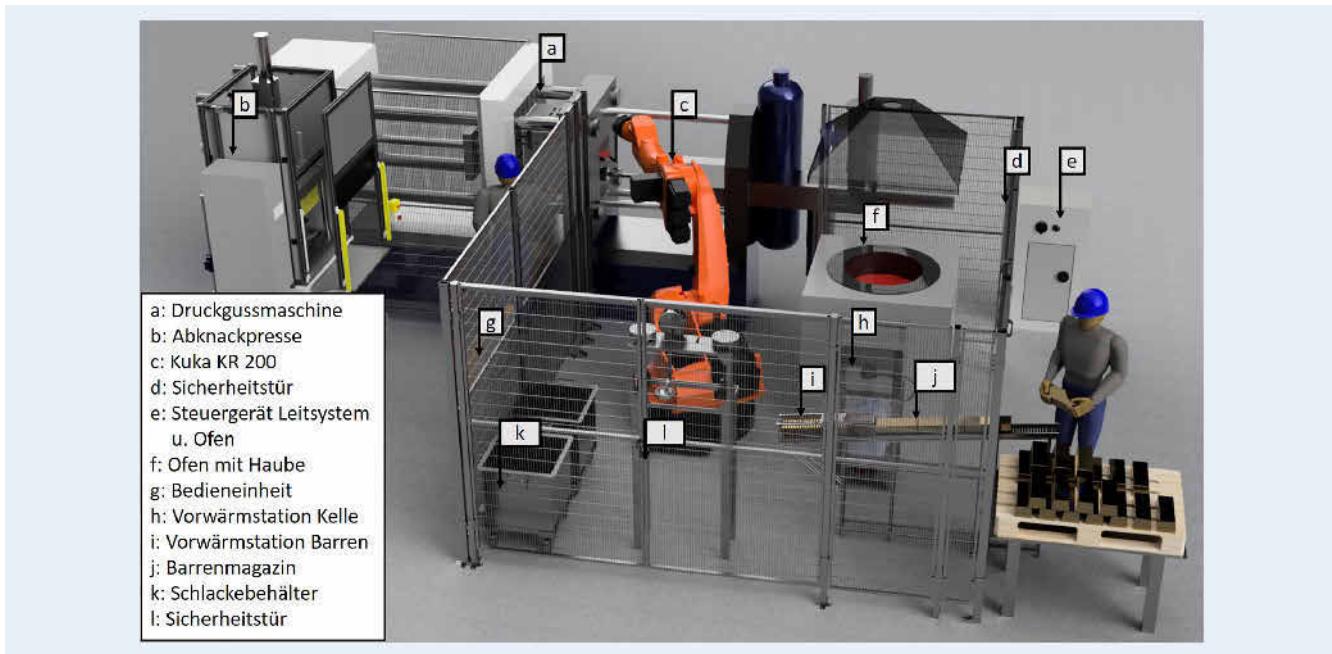


Bild 2. Schematische Darstellung des Anlagenmodells zur automatisierten Druckgussvorbereitung im Forschungsprojekt HiRoCast.

Grafik: Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

4.1 Aufbau des Automatisierungssystems

Die Basis für das entwickelte Automatisierungssystem bildet ein Vertikal-Knickarmroboter, der als Führungskinematik für die Werkzeuge eingesetzt wird. Als Werkzeuge stehen ein Meißel zum Reinigen des Ofens, ein Sieb zum Abkratzen der Schlacke, eine Schaufel zum Abtragen der Schlackeschicht und ein Löffel zum Dosieren der Schmelze zur Verfügung. Bei der Entwicklung dieser Werkzeuge wurde vor allem auf eine schmale Silhouette zur guten Erreichbarkeit innerhalb des Tiegelofens und auf eine robuste Bauform geachtet.

Bei der Entwicklung des Endeffektors zur Dosierung wurde im Gegensatz zu anderen bereits zitierten Lösungen auf eine Zusatzkinematik zur Rotation des Gießlöffels verzichtet, um die erforderliche Robustheit des Systems zu gewährleisten. Bei der Entwicklung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheit beim Transport der Schmelze vom Tiegelofen hin zur Druckgussmaschine gelegt. Da im Notfall der Roboter mit einem Nothalt der Stoppkategorie 1 anhält, muss in diesem Fall ein minimales Austreten der Schmelze garantiert werden. Dafür ist ein hydraulischer Schutzdeckel auf dem Gießlöffel vorgesehen, der während des gesamten Transportvorgangs den Gießlöffel verdeckt und nur bei der Aufnahme der Schmelze und beim Abgießen zurückgefahren wird. Um ein Zusetzen des Deckels zu vermeiden, wurde zwischen Deckel und Gießlöffel ein Spalt von 4 mm sicher gestellt, sodass diese sich nicht direkt berühren. Um die für die Bewegung des Deckels vorgesehene Aktorik und den zur Messung des Füllstandes angebrachten Kraft-Momenten-Sensor (KMS) vor der Temperaturbeaufschlagung durch die Schmelze zu schützen, wurde ein 40 mm dicker Schutzmantel aus Wärmedämmformteilen entwickelt. Dadurch wird an der Aktorik und Sensorik eine Temperatur von unter 70 °C garantiert. Um thermische Verluste beim Transport der Schmelze zu minimieren, wurde die Wand des Gießlöffels nach dem Vorbild eines Dewargefäßes mit einem verspiegelten, doppelwandigen und evakuier-

ten Aufbau versehen. Zudem wurde die Bauform dahingehend optimiert, dass eine minimale Anhaftung von Schlacke, gute Transporteigenschaften und eine gute Erreichbarkeit der Gießkammer und des Tiegelofens gewährleistet sind. Eine Schnittansicht des Endeffektors und die Temperaturbeaufschlagung bei der Entnahme der Schmelze sind in **Bild 3** zu sehen.

Durch die enorme Hitzebeaufschlagung auf den Gießlöffel ist mit einer Anhaftung von Verunreinigungen an dem Gießlöffel und mit Verformungen des Gießlöffels selbst zu rechnen. Daraus resultiert das Problem, dass keine zuverlässig konstante Referenzgröße für die Messung des Füllstands innerhalb des Gießlöffels vorhanden ist. Darüber hinaus wäre eine optische Messung des Füllstandes aufgrund der hohen Temperaturen in der Nähe des Ofens mit hohen Kosten und hohem Aufwand verbunden. Eine Alternative bietet die Messung des Gewichts der Dosiermenge durch einen KMS, welcher an dem Endeffektor des Roboters angebracht wird. Für die Dosiergenauigkeit ergibt sich aus dem Druckgussprozess eine zulässige Toleranz von ± 30 g bei einer Dosiermenge von 1,3 kg. Durch die erhöhte Messabweichung des KMS (des Typs „ME-Systeme K6D130“) von bis zu 6 % bei Temperaturen um die 70 °C kann der Messwert des KMS nur als Relativwert und nicht als Absolutwert des Gewichtes des Gießlöffels angesehen werden.

Um eine genauere Aussage über die Dosiermenge machen zu können, wird das aufgenommene Messsignal des KMS mit einer Vergleichsgröße nach dem Vergießen der Schmelze interpretiert. Die Vergleichsgröße ergibt sich aus dem gemessenen Pressrest des Gussteils, welcher in der Druckgussmaschine zuverlässig erfasst wird. Dieser Pressrest ist somit eine Größe, mit der auf die abgegossene Dosiermenge rückgeschlossen werden kann. So kann der Messwert des KMS für den folgenden Druckgussvorgang interpretiert und die Dosiermenge bereits vor dem Abgießen zuverlässig ermittelt werden. Diese Daten werden bei jedem Gussvorgang in einem Leitsystem erfasst, wodurch über die

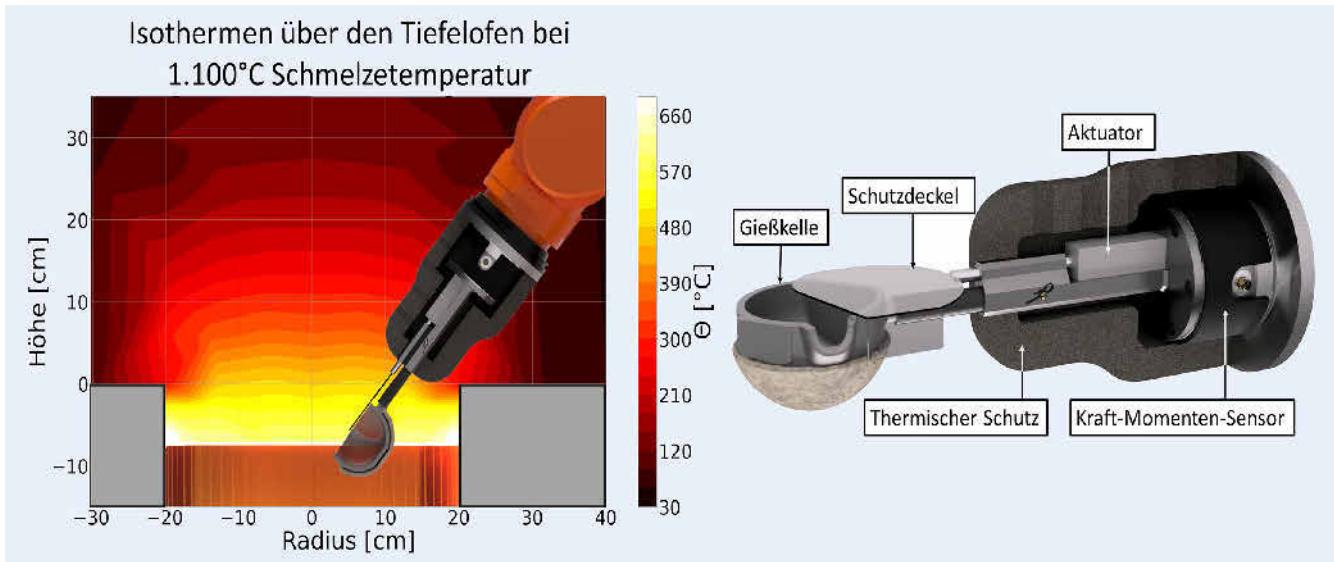


Bild 3. Schematische Darstellung der Hitzebeaufschlagung auf den Endeffektor gemessen von der Oberkante des Tiegelofens (links) und 3D-Darstellung des entwickelten Endeffektors zum Dosieren der Schmelze (rechts). *Grafik: Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum*

Datenhistorie eine hinreichend genaue Aussage über die aufgenommene Dosiermenge getroffen werden kann.

Das beschriebene Leitsystem basiert auf einer Steuerung vom Typ „Beckhoff CX9020“ und dient als zentrales System zur Erfassung und Steuerung aller Prozesse. Dazu sind alle Anlagenkomponenten über ein Feldbusssystem mit dem Leitsystem verbunden. Der Druckgussprozess und alle Roboterprozesse werden, basierend auf einem internen Modell des Tiegelofens und der Werkzeugzustände, zentral freigegeben. Die Prozesse in der Anlage umfassen das Vorwärmen der Werkzeuge und der Barren, das Chargieren und das Reinigen des Tiegelofens und das Dosieren der Schmelze.

Beim Vorwärmen wird die Restfeuchtigkeit auf der Oberfläche der Werkzeuge zum Verdampfen gebracht, um eine mögliche Explosion des Tiegelofens beim Eintauchen auszuschließen. Dabei steht eine auf einem Gasbrennring basierte Vorwärmstation zur Verfügung, zu der die Werkzeuge beziehungsweise der Barren vom Roboter geführt werden. Dies garantiert ein Vorwärmen innerhalb weniger Sekunden. Für jedes Werkzeug und jeden Barren ist im Leitsystem je eine digitale Entität hinterlegt, um deren Feuchtigkeit und aktuelle Temperatur zu erfassen. Zum Chargieren stehen die Barren auf einem Werkzeugträger bereit und werden mit einer eigens entwickelten Schaufel sanft in den Ofen geführt. Die Reinigung des Tiegelofens wird durch den Roboter mit einem Meißel durchgeführt. Dieser Prozess wird durch den Grad der Verschlackung an dem im Leitsystem hinterlegten Ofenmodell angestoßen. Dieses Ofenmodell wurde basierend auf empirisch ermittelten Verschlackungsstudien entwickelt.

4.2 Bahnplanung

Beim Transport der Schmelze außerhalb des Tiegelofens ergeben sich enorme Temperaturverluste, hervorgerufen durch den hohen Temperaturunterschied zwischen Umgebungsluft und Oberfläche der Schmelze in Kombination mit einer relativ geringen Dosiermenge. Um die hiermit im Zusammenhang stehende Abkühlung der Schmelze zu minimieren, wurde für diesen Anwendungsfall, neben konstruktiven Maßnahmen, eine die

Transportzeit und Fluktuation der Schmelze minimierende Bahnplanung entwickelt.

In der Literatur lassen sich zur Generierung von Trajektorien zur Vermeidung von Schwappen zwei unterschiedliche Ansätze finden. Der eine Ansatz basiert auf Rückkopplung [10–12]: Hier werden mittels Sensorik die Zustandsänderungen an der Flüssigkeitsoberfläche ermittelt und als Eingangsgröße für den Regler verwendet. Der Nachteil an dieser Methodik ist die Notwendigkeit von zusätzlicher Sensorik am Endeffektor, was sich bei den gegebenen Prozessparametern als schwierig erweist.

Der andere Ansatz basiert auf Vorwärtskopplung: Hier wird auf eine zusätzliche Sensorik verzichtet, indem die Bahn offline unter Zuhilfenahme eines Fluidersatzmodells generiert wird. Dazu wird mit der Input-Shaping-Methode [13–15] die Bewegung des Roboters in zwei oder mehr Impulse zerlegt und mit einer Zeitverschiebung eingefügt, sodass die infolge eines ersten Impulses auftretenden Schwingungen durch den darauffolgenden Impuls neutralisiert werden. Die nötigen Prozessparameter, wie die Amplituden und zeitlichen Positionen der Impulse, lassen sich durch die Kenntnis von Systemeigenfrequenz und Dämpfungsverhalten des Fluids ableiten. Ein erweiterter Ansatz lässt sich in [16] finden, wo durch zusätzliches Umorientieren des Transportbehälters das Schwappen der Flüssigkeit noch weiter reduziert wird. Die Auslenkung der Fluidoberfläche wird als Eingangssignal für die Umorientierung der Gießkelle verwendet. Dies bewirkt eine Minimierung von translatorischer Beschleunigung der Flüssigkeit in Richtung der Behälterwand und somit eine Auslösung der Auslenkung der Fluidoberfläche im Transportbehältnis.

Darüber hinaus wurden in [17–19] die vorgestellten Ansätze in Kombination mit verschiedenen Filtermethoden untersucht. Lediglich der von Aribowo entwickelte Ansatz [13] beschäftigt sich gleichzeitig mit einer Minimierung des Schwappens und der Zeitoptimierung der Bahn. Hierbei wird jedoch eine konstante Orientierung des Gießlöffels vorausgesetzt. Dies führt zu keiner optimalen Ausnutzung aller sechs Achsen, da nur die ersten drei Achsen zur Zeitoptimierung der translatorischen Bewegung und die Achsen vier bis sechs zur vertikalen Ausrichtung des Transportbehälters genutzt werden.

Der in diesem Beitrag entwickelte Ansatz kombiniert eine Unterdrückung des Schwappens mit der Generierung einer zeitminimalen Bahn. Die Zeitminimierung wurde in ein Optimalsteuerungsproblem überführt, wobei die fixen Start- und Endpositionen der Bahn als Randbedingungen für die Trajektorie dienen. Zwischen diesen Punkten wird eine initial geschätzte Bahn in diskrete Schritte aufgeteilt. Als Optimierungsvariablen werden die Achswinkelstellungen an jedem Punkt und das Zeitintervall zwischen den Punkten gewählt. Dies ermöglicht eine Optimierung mit freien Bahnpunkten im Arbeitsraum und einer freien Orientierung des Gießlöffels und somit eine optimale Ausnutzung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen aller sechs Achsen.

Als Einschränkungen bei der Optimierung werden folgende Vorgaben berücksichtigt: die Grenzen der Achswinkelstellungen, die maximal zulässigen Achsgeschwindigkeiten, die maximal zulässigen Achsbeschleunigungen, der maximal zulässige Ruck, die Kollisionsüberprüfung und die Grenzen, in denen das Schwappen in Abhängigkeit vom Beschleunigungsvektor und der Gießlöffelorientierung zulässig ist. Zur Überprüfung des Schwappens wird für jeden Punkt eine Vorwärtstransformation im Konfigurationsraum vorgenommen, um die Orientierung und den vorhandenen Beschleunigungsvektor des Gießlöffels zu ermitteln. Durch eine Fluidsimulation mit einem Finite-Volumen-Verfahren (FVM) in der Software „OpenFOAM“ wird das Schwappverhalten bei den gegebenen Parametern simuliert und auf ein unzulässiges Maß überprüft. Zur Umsetzung der optimalen Steuerung wurde die in „Matlab“ verfügbare „Global Optimization Toolbox“ unter Verwendung eines genetischen Algorithmus verwendet. In ersten Untersuchungen mit einem Roboter vom Typ „KUKA KR 600“ konnte die Bewegungsdauer einer Bahn mit fixen Start- ($x = -902$, $y = -2107$, $z = +1228$) und Endpunkten ($x = 123$, $y = -1907$, $z = +1228$) bei einem maximal zulässigen Schwappen von 5 mm über die Ausgangslage der Flüssigkeit hinaus, von 4,92 auf 3,23 Sekunden minimiert werden.

5 Zusammenfassung

Für das Druckgießen von hochtemperaturbeständigen Legierungen wie Siliziumtombak wird die Gussvorbereitung, besonders bei kleinen Dosiermengen von bis zu 4 kg, überwiegend händisch durchgeführt. Die derzeitigen Ansätze zur Automatisierung der Gussvorbereitung von Hochtemperaturschmelzen sind aufgrund von hohen Anhaftungen von Verunreinigungen, der zu geringen Temperaturbeständigkeit und der hohen Temperaturverluste während des Transports für diesen Anwendungsfall nicht geeignet.

Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz sieht daher die Entwicklung eines roboterbasierten Automatisierungssystems vor, welches auf jegliche zusätzliche Kinematik zur Umorientierung des Endeffektors verzichtet und die Dosierung mit einem offenen Gießlöffel vornimmt. Hierbei werden eine zeitoptimierte Bahnplanung des Dosiervorgangs, ein wärmeverlustarmer Gießlöffel, das automatisierte Vorwärmung der Werkzeuge und der Barren, das automatisierte Chargieren und das Reinigen des Tiegelofens umgesetzt. Darüber hinaus wurde zur Erreichung der erforderlichen Dosiergenauigkeit eine Regelschleife zwischen dem KMS am Roboter und der Messung des Pressrestes an der Druckgussanlage vorgestellt.

Durch die Automatisierung dieser Prozessschritte wird eine Erhöhung der Bauteilqualität, eine Verbesserung der Fertigungs- und Energieeffizienz und eine Entlastung des Mitarbeiters in der körperlich anspruchsvollen Tätigkeit erwartet. Im Rahmen des Forschungsprojektes HiRoCast werden diese Technologien umgesetzt und auf Ihre Standzeit und Taktzeitreduktion hin evaluiert.

L iteratur

- [1] Hellmer, E.; Rathner, T.; Plank, K. H.: Neues, innovatives Gießverfahren zur Herstellung von Hochleistungskomponenten aus Aluminium sowie dessen fertigungstechnische Applikation. Giesserei Rundschau 61 (2014) 1/2, S. 2–11
- [2] Kaiser, R. W.: Pressgießen hochfester, duktiler Gusseisenbauteile. Giesserei-Institut: Forschung, Entwicklung, Ergebnisse, Band 43. Aachen: Shaker Verlag 2004, S. 145
- [3] Hofer-Hauser, P.; Gschwandtner, R.; Schindelbacher, G.: Gussoptimierung durch Prozesskenntnis CONAN. Giesserei Special Heft 2/2018, S. 72–81
- [4] ItalPressGauss: Robotic Automation Equipment and Tools. Stand: 2022. Internet: www.italpressegauss.com/en-us/robotic-automation. Zugriff am 02.08.2022
- [5] Bühler Group: Metalldosiergerät BRL Servo. Stand: 31.03.2022. Internet: www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/de/products/brl_servo_ecolineladdingdevice.html. Zugriff am 02.08.2022
- [6] Terashima, K.; Yano, K.; Sugimoto, Y. et al.: Position Control of Ladle Tip and Sloshing Suppression During Tilting Motion in Automatic Pouring Machine. IFAC Proceedings Volumes 34 (2001) 18, pp. 229–234
- [7] Noda, Y.; Sueki, Y.: Implementation and Experimental Verification of Flow Rate Control Based on Differential Flatness in a Tilting-Ladle-Type Automatic Pouring Machine. Applied Sciences 9 (2019) 10. #1978. doi. org/10.3390/app9101978
- [8] iRobotics GmbH: Foundry. Stand: 2022. Internet: www.irobotics.de/en/portfolio/foundry.html. Zugriff am 02.08.2022
- [9] Priya, V.; Raj, V. J. A.; Chethanasai, K. V. et al.: Design and Simulation of a Robotic Manipulator for Ladle with PLC. International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2022, pp. 752–765
- [10] Yano, K.; Terashima, K.: Robust liquid container transfer control for complete sloshing suppression. IEEE Transactions on Control Systems Technology 9 (2001) 3, pp. 483–493
- [11] Sira-Ramirez, H.: A flatness based generalized PI control approach to liquid sloshing regulation in a moving container. Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301) 4, (2002), pp. 2909–2914
- [12] Bandyopadhyay, B.; Gandhi, P. S.; Kurode, S.: Sliding Mode Observer Based Sliding Mode Controller for Slosh-Free Motion Through PID Scheme. IEEE Transactions on Industrial Electronics 56 (2009) 9, pp. 3432–3442
- [13] Aribowo, W.; Yamashita, T.; Terashima, K.: Integrated Trajectory Planning and Sloshing Suppression for Three-Dimensional Motion of Liquid Container Transfer Robot Arm. Journal of Robotics 2015 (2015), pp. 1–15. doi.org/10.1155/2015/279460
- [14] B. Pridgen; K. Bai; W. Singhose: Slosh suppression by robust input shaping. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, pp. 2316–2321
- [15] Zang, Q.; Huang, J.; Liang, Z.: Slosh Suppression for Infinite Modes in a Moving Liquid Container. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 20 (2015) 1, pp. 217–225
- [16] Reinhold, J.; Amersdorfer, M.; Meurer, T.: A Dynamic Optimization Approach for Sloshing Free Transport of Liquid Filled Containers using an Industrial Robot. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019, pp. 2336–2341
- [17] Consolini, L.; Piazzesi, A.: Generalized bang-bang control for feedforward constrained regulation. Automatica 45 (2009) 10, pp. 2234–2243
- [18] Biagiotti, L.; Melchiorri, C.; Moriello, L.: Optimal Trajectories for Vibration Reduction Based on Exponential Filters. IEEE Transactions on Control Systems Technology 24 (2015) 2, p. 1
- [19] Moriello, L.; Biagiotti, L.; Melchiorri, C. et al.: Manipulating liquids with robots: A sloshing-free solution. Control Engineering Practice 78 (2018), pp. 129–141



Lars Niklas Josler, M.Sc.
Foto: Autor

Michael Miro, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Lehrstuhl für Produktionssysteme

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Tel. +49 234 / 32-26295

josler@ips.rub.de

www.ips.ruhr-uni-bochum.de

Stefan Börzel, B.Eng.

Dipl.-Ing. Felix Töberich

Breuckmann GmbH & Co. KG

Dieselstr. 26–28, 42579 Heiligenhaus

Tel +49 2056 / 5801-24

stefan.boerzel@breuckmann.de

www.breuckmann.de



Robotikbasierte industrielle Verschraubung über Kraftregelung

Industrielle kraftgeregelte Schraubprozesse

A. Bastidas-Cruz, T. Jaya, K. Haninger, J. Krüger

Manuelle Schraubmontagen profitieren von menschlichen feinmotorischen Fähigkeiten für die flexible Positionierung der Werkzeuge und Bauteile. Solche Prozesse lassen sich mithilfe eines kooperativen Robotersystems automatisieren, welches flexibel in einer dynamischen Umgebung agiert und insbesondere die Fähigkeit mitbringt, hohe Prozesskräfte aufzunehmen. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Automatisierung von kraftgeregelten Schraubvorgängen beschrieben und die sich dabei ergebenden Herausforderungen erläutert.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Industrieroboter, Fügetechnik

Industrial force-controlled screw fastening – Robot-based industrial screw fastening with force control

Manual screw assemblies rely on the fine-motor skills of workers to accurately position tools and workpieces. Such processes can be automated using a collaborative robotic system. To achieve this, the robot must flexibly react to a dynamic environment and be able to apply higher forces. This paper describes a method for automating force-controlled screw operations, and clarify the requirements on the automation of such tasks.

1 Einleitung

Industrielle Verschraubungen erfordern eine hohe Robustheit. Bei manuellen Montageprozessen ist der Werker in der Lage, eine hohe Geschwindigkeit trotz Störungen im Montageprozess bei gleichzeitiger Einhaltung der Sicherheit zu handhaben, was vom Robotersystem auch gewährleistet werden soll [1]. Diese Anforderung kann im Falle einer Schraubmontage im Fließbetrieb noch komplexer werden.

Einige industrielle Schraubvorgänge sind heute vollständig automatisiert [2], meist mit wiederholbaren Werkstückpositionen und positionsgesteuerten Systemen. Einige Systeme verwenden eine Kamera zur Bauteilerkennung, um eine größere Variation der Werkstücke zu ermöglichen [3]. Allerdings kann auch eine Kamera nicht auf dynamische Teile eingehen, die sich zu unbestimmten Zeiten unvorhersehbar bewegen können, zum Beispiel wenn die Teile auf einem Förderband transportiert werden oder die Teilvorrichtung Spiel hat. Kamerabasierte Lösungen sind auch in ihrer Genauigkeit begrenzt und erfordern teilespezifische Erkennungsmethoden. Die Reproduktion der haptischen Sensibilität des Menschen bei Schraubaufgaben bleibt ein offenes Forschungsproblem [4].

Die Kraftregelung von Robotern ermöglicht die Kompensation kleinerer Positionierungsfehler, wobei versucht wird, eine vorgegebene Kraft aufzubringen, anstatt eine vorgegebene Position zu erreichen [5]. Sie führt jedoch häufig zu einer langsameren Bewegung, erfordert eine Kalibrierung der Nutzlast und die Einstellung bestimmter Parameter. Physikalische Nachgiebigkeit kann die physikalische Kompensation von Ausrichtungsfehlern

oder Schwankungen der Kontaktposition ermöglichen, ist aber in Bezug auf Art und Größe der Fehler, die sie kompensieren kann, begrenzt.

In der Produktion von Motorrädern sind aufgrund des hoch-dynamischen Aufgabenbereichs des Werkers übergreifende und schwer zu automatisierende Montageaufgaben zu berücksichtigen. Hierbei müssen vor allem kleine Teile mit geringem Platzbedarf in einer dynamischen Umgebung teils manuell montiert werden. Daher ist eine reine Automatisierung, die eine vollständig geschlossene Zelle unabhängig von menschlichen Mitarbeitern erfordert, nicht möglich. Stattdessen wird der Einsatz eines kooperativen Roboters notwendig [6].

Viele kollaborierende Roboter sind Leichtbauroboter mit begrenzter Drehmomentkapazität, sodass die Einsatzfähigkeit höherer Drehmomente in Frage gestellt ist [7, 8]. In den meisten Fällen ist die Automatisierung der Schraubvorgänge für Anwendungen entworfen, in denen die Anlagen einen hohen Raumbedarf erfordern und die Montageprozesse stark automatisiert sind [9]. Zusätzlich sind die meisten automatisierten Schraubvorgänge für Anwendungen im kleinen Drehmomentbereich konzipiert [10–12].

Dieser Beitrag stellt eine industrielle, interaktive Mensch-Roboter-Schraubstrategie vor, die für industrielle Verschraubung mit großem Drehmoment implementierbar ist. Diese Schraubstrategie eignet sich auch für Applikationen in kleinen Bereichen, in denen Menschen und Roboter gleichzeitig am selben Werkstück arbeiten. Zunächst wird die Verschraubungsstrategie mit einem drehmomentgesteuerten Schraubsystem (electronically commutated (EC)-Schrauber), dargestellt, dann die Integration in einen

kompletten Roboterprozess. Es werden Experimente erläutert, die die Strategie bewerten und wichtige Parameter identifizieren.

2 Schraubstrategie

2.1 Anforderungen an die Schraubmontage

Manuelle Schraubmontagen, deren Anwendung in der Einleitung beschrieben wird, sind bisher aufgrund folgender Aspekte schwierig vollständig zu automatisieren (**Tabelle 1**):

Vor allem die Handhabung und Positionierung des Bauteils sowie dessen Zuführung und der erste Vorgang des Einschraubens der Schrauben sind aufgrund der Faktoren (Tabelle 1) schwer zu automatisieren. Stattdessen werden die Feinmotorik und Flexibilität des Werkers genutzt. Nur die letzte Phase des Einschraubens und des Anziehens wird im aktuellen Stand der Technik mit EC-Schraubern automatisiert, wobei der Schrauber durch den Werker festgehalten wird.

In diesem Beitrag wird spezifisch das Anzugsdrehmoment beim Prüfverfahren betrachtet. Bei sicherheitsrelevanten Schraubmontagen müssen außerdem bestimmte Qualitätskriterien und Toleranzklassen erfüllt werden. Hierfür werden in der Regel EC-Schraubsysteme eingesetzt, die mithilfe kraftgeregelter Schraubprogramme einen Teil des Fügeprozesses und der Qualitätsüberwachung automatisieren können [13].

Die Aufteilung der Schraubmontage zwischen dem Werker und dem automatisierten Schraubsystem ist in **Bild 1** zu sehen.

Sobald der Werker das Bauteil mit den erforderlichen Schrauben positioniert hat, wird der Schrauvorgang von einem Robotersystem automatisch durchgeführt. Dieser Vorgang beschreibt den automatisierten Prozessschritt „Schrauben anziehen“ und lässt sich in vier Phasen zerlegen (**Bild 2**).

Die Tatsache, dass ein Teil der Schraubmontage manuell und ein Teil automatisch durchgeführt wird, erfordert den Einsatz von Robotiktechnologien, die unter Arbeitsbedingungen arbeiten können, die ursprünglich für Menschen vorgesehen sind.

2.2 Mensch-Roboter-Kooperation (MRK)

Kleine kooperative Roboter, auch Cobots genannt, sind für den Einsatz in Arbeitsumgebungen vorgesehen, in denen auch Menschen anwesend sind [14]. Cobots werden bevorzugt, um die Notwendigkeit von Sicherheitszäunen zu vermeiden. Durch ihre kompakte Größe und die Verwendung interner Sensorik zur Kollisionserkennung können sie die erforderlichen Sicherheitsnormen für kollaborierende Roboter (ISO 10218 und DIN ISO/TS 15066) leichter erfüllen. Abhängig von den implementierten Sicherheitsmaßnahmen kann sogar eine enge Interaktion zwischen Mensch und Cobot stattfinden, ohne dass der Roboter zum Stillstand kommen muss. Dies ermöglicht einen flexiblen Arbeitsraum, der von Mensch und Roboter gemeinsam genutzt werden kann (Anforderungen 6 und 7 der Tabelle 1).

2.3 Kraftgeregelte Schraubmontage

Die Sensorik des Cobots kann zur Kraftauswertung verwendet werden. Entweder durch einen Kraft-/Drehmomentsensor am Endeffektor, über Drehmomentsensoren im Gelenk oder durch Überwachung des elektrischen Stroms der Motoren. So kann der Roboter auf externe Kräfte reagieren, um kleine Fehler bei der Kontaktherstellung auszugleichen [15]. Die Implementierung

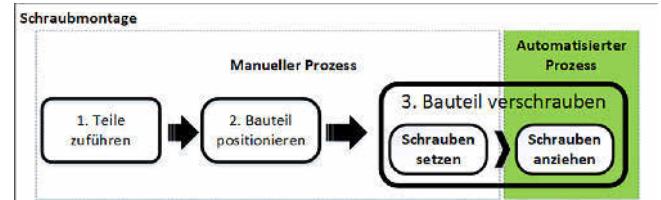


Bild 1. Beschreibung der Schraubmontage. Grafik: Fraunhofer IPK

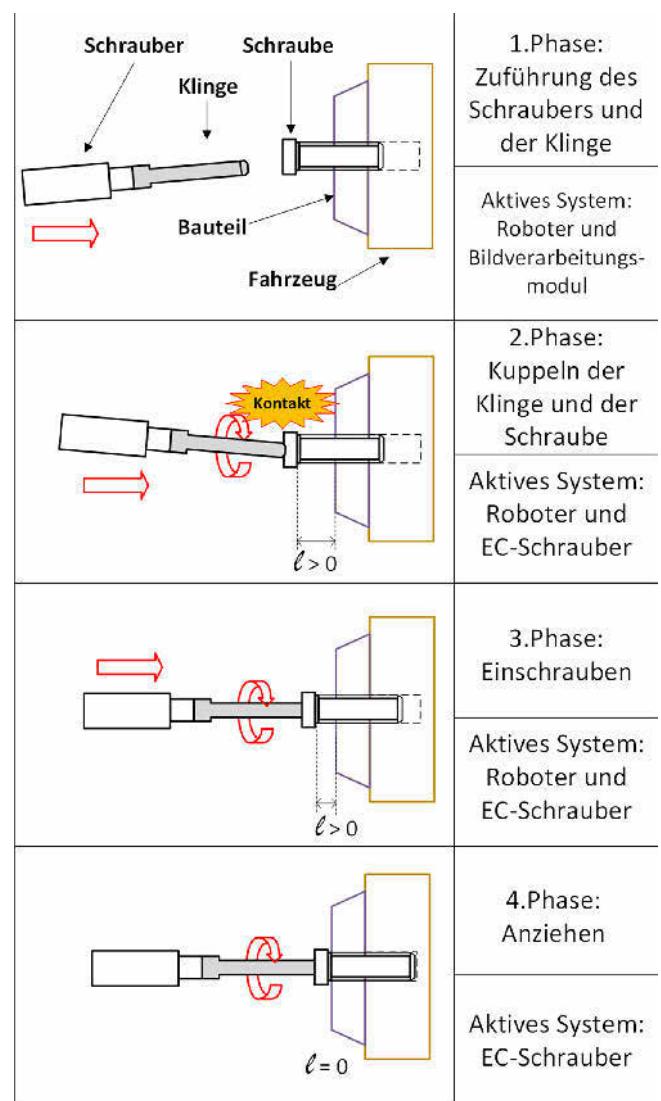


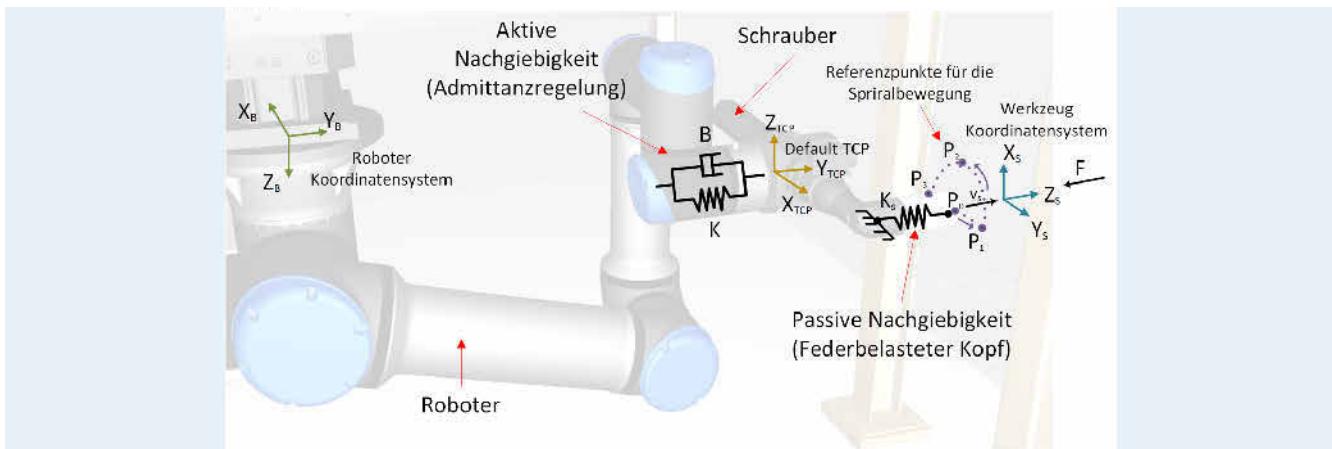
Bild 2. Phasen des Schraubvorgangs. Grafik: Fraunhofer IPK

einer aktiven Nachgiebigkeit oder Admittanzregelung in der Robotersteuerung kann die Gesamtrobustheit der Fügeprozesse erhöhen [16, 17].

Eine Verschraubungsstrategie anhand von Admittanzregelung, auch bekannt als Kraftregelung, erlaubt es, dass der Roboter sich nachgiebig verhalten kann, um während der Annäherung des Werkzeugs an die Schraube den Kontakt mit der Schraube zu erkennen und um den Kontakt zwischen Werkzeug und Schraube während des Schrauvorgangs aufrechtzuerhalten. Dieser Ansatz kann verwendet werden, um die Anforderungen 2, 3, 4, 5 und 7 aus Tabelle 1 zu erfüllen.

Tabelle 1. Anforderungen an die Schraubmontage.

Anforderung	Nr.	Beschreibung
Schraubtechnik	1	Automatisches/r Drehmoment-/Drehwinkel-Überwachung bei Verschraubung und automatische Erfassung der Daten des Prozesses.
	2	Fließbetrieb: Das Werkstück (zum Beispiel Fahrzeug) kann über ein Fördermittel angeliefert werden. Die Nutzung solcher Förderanlagen führt zu Variationen in der Position des Werkstücks.
	3	Dynamische Umgebung: Die Position des Werkstücks auf dem Fördermittel ist nicht festgelegt und kann variieren.
	4	Flexibilität: Hohe Produktvielfalt in einer gemeinsamen Montagelinie.
Infrastruktur	5	Große Schwankungen der Form- und Lagetoleranz bei der Konstruktion der Förderanlagen: Die Werkstücke (Fahrzeuge) können mit größeren Positionsschwankungen versehen sein. Die Vorrichtungen können Spiel haben oder eine größere Abweichung zwischen den Exemplaren aufweisen.
Umgebung	6	Platzbedarf: Die Arbeitsplätze sind eng angeordnet, was den Platzbedarf zu einem kritischen Punkt macht. Das macht den Einsatz von großen Robotern besonders schwierig.
	7	Mensch-Roboter-Kooperation: Der Werker soll während des Schraubvorgangs am selben Werkstück arbeiten können.

**Bild 3.** Implementierung der Nachgiebigkeit. Grafik: Fraunhofer IPK

2.3.1 Kraftregelung für die Erkennung des Kontakts zwischen Werkzeug und Schrauber (Phase 2)

Um das Werkzeug auf der Schraube zu setzen, wird eine spiralförmige Suchstrategie angewandt, bei der die Kraftsteuerung versucht, eine konstante Kraft in die Z-Richtung des Werkzeugs zu bringen (**Bild 3**). Das heißt, die Kraftregelung erzeugt eine lineare Bewegung des Werkzeugs in Z-Richtung, solange die gezielte Kraft nicht erreicht wird, während ein Kreis in der X-Y-Ebene abgefahren wird. Diese Spiralbewegung erlaubt, dass das Werkzeug den Schraubenkopf in einem größeren Bereich treffen kann. Die Spiralbewegung wird beendet, sobald das Werkzeug mit dem Schraubenkopf verkuppelt ist.

2.3.2 Kraftregelung für die Verschraubung (Phase 3)

Die Kraftregelung bleibt während des Schraubvorgangs aktiv, um den Sitz der Klinge auf dem Schraubenkopf zu gewährleisten, solange die Schraube noch nicht komplett eingeschraubt ist. Das heißt, die Kraftregelung erzeugt weiter eine lineare Bewegung des Werkzeugs in Z-Richtung bis die Sollkraft erreicht wird.

2.3.3 Passive Nachgiebigkeit

Die Kraftregelung ist jedoch nur begrenzt in der Lage, schnelle Kontakte zu bewältigen, was die Annäherungsgeschwindigkeit des

Roboters an die Schraube einschränkt [16]. Um dem entgegenzuwirken, wird am Kopf des Schraubers eine physische Nachgiebigkeit (federbelasteter Kopf) implementiert. Dadurch wird der Kontakt geglättet und ein passiver Ausgleich eines Fehlers von einigen Zentimetern ermöglicht, sogar bei hohen Geschwindigkeiten.

2.4 Automatisierte Verschraubung

Einen kurzen Überblick über die automatisierte Verschraubungsstrategie gibt **Tabelle 2**. In jeder Phase wird der technische Ansatz spezifiziert und die zu erfüllenden Anforderungen zugeordnet (aus Tabelle 1).

Der Prozess fängt mit der Übermittlung der Referenzposition der Schraube im Raum an (**Bild 4**). Dies kann durch unterschiedliche Bildverarbeitungsverfahren erfolgen [18]. Danach wird die Roboter-Bahnplanung anhand der Referenzposition berechnet. Sobald das Roboterwerkzeug sich der Schraube nähert, startet die kraftgeregelte Schraubstrategie.

Die Nutzung der Kraftregelung in der Robotersteuerung hat zur Konsequenz, dass die Steifigkeit der Robotergelenke reduziert wird. Diese Änderung wird als Vorteil bei der Durchführung von Phase 2 und 3 der Verschraubung genutzt. Diese Reduktion der Steifigkeit kann für die letzte Phase „Anziehen“ kritisch sein, vor allem wenn die Prozesskräfte (etwa das Anzugsdrehmoment) so hoch sind, dass die Hardware potenziell beschädigt werden kann.

Tabelle 2. Technische Ansätze für die Automatisierung des Schraubvorgangs.

Phase	Technischer Ansatz	Erfüllung der Anforderung (Tabelle 1)
1. Zuführung des Schraubers und der Klinge	Bildverarbeitung Robotersteuerung: Dynamische Bahnplanung	2, 3, 4, 5, 7
2. Kuppeln der Klinge und der Schraube	Robotersteuerung: Kraftregelung (Kapitel 2.3.1.) Schraubtechnik: EC-Schraubsystem mit federbelastetem Kopf	2, 3, 4, 5, 7
3. Einschrauben	Robotersteuerung: Kraftregelung (Kapitel 2.3.2.) Schraubtechnik: EC-Schraubsystem mit federbelastetem Kopf	1, 2, 3, 5
4. Anziehen	Schraubtechnik: EC-Schraubsystem mit federbelastetem Kopf	1, 2, 3

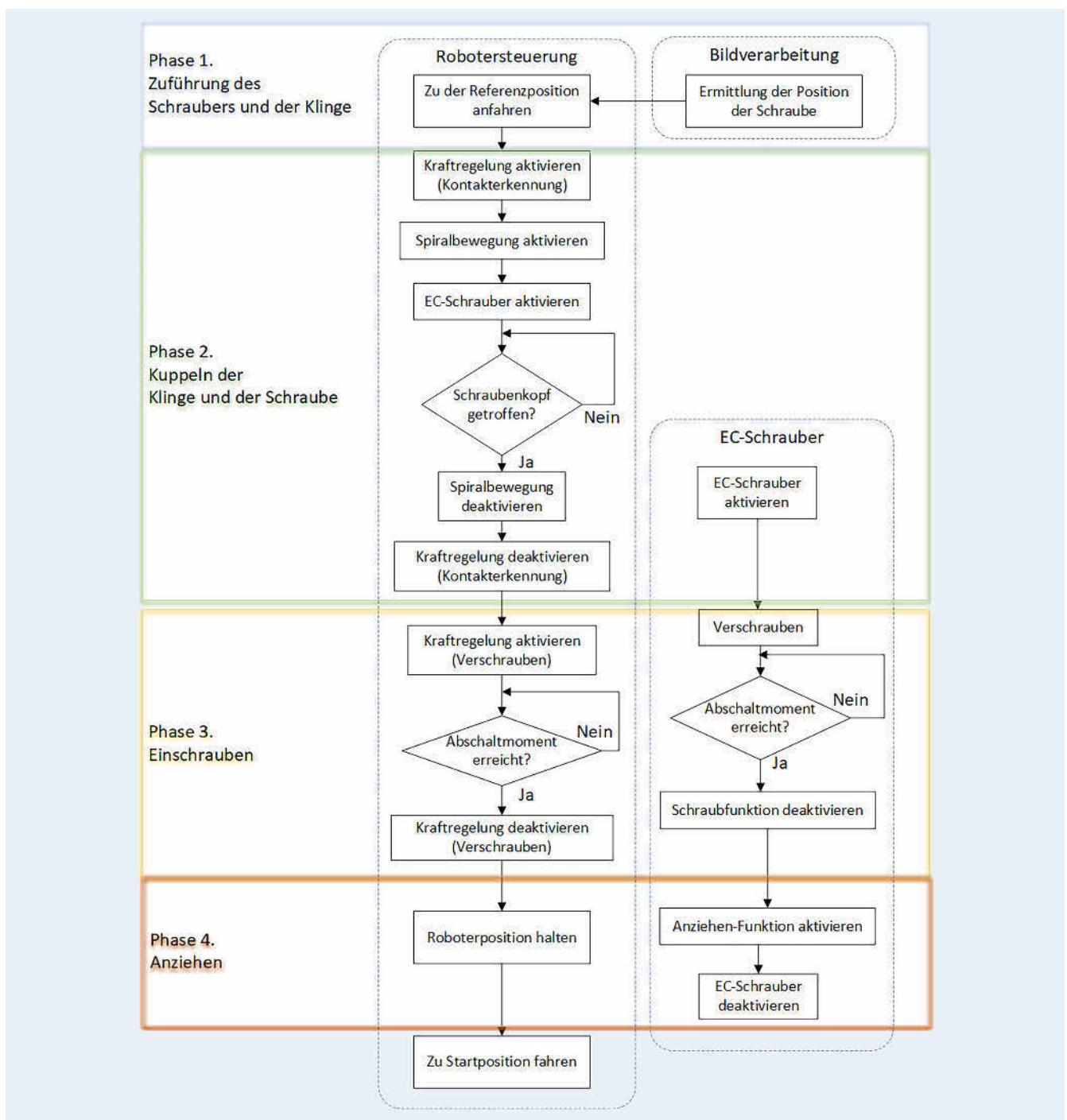


Bild 4. Schraubstrategie. Grafik: Fraunhofer IPK

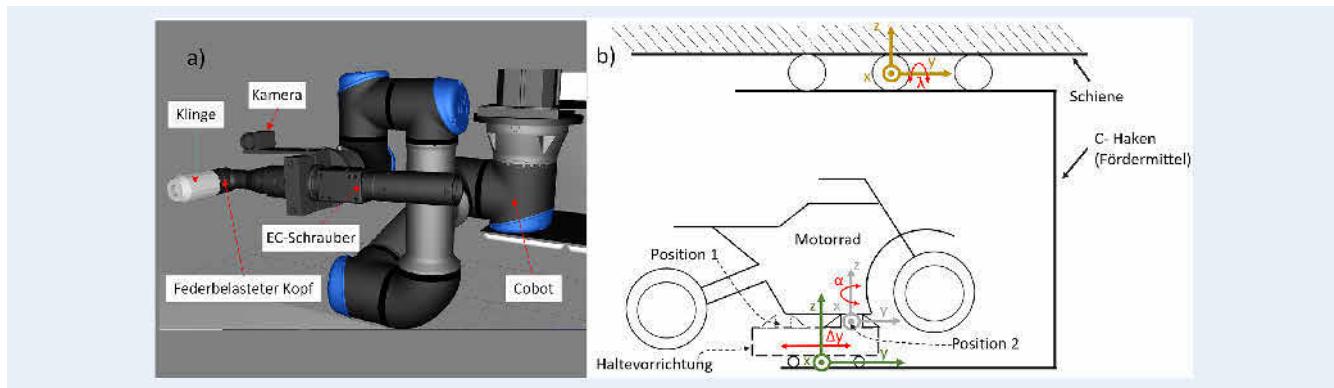


Bild 5. Versuchsstand: a) Roboter, b) Fördermittel. Grafik: Fraunhofer IPK

Daher soll die Kraftsteuerung nur aktiv bleiben, um den Kontakt des Werkzeugs mit der Schraube zu erkennen und das Werkzeug in Kontakt mit der Schraube während des Einschraubens zu halten. Für das Anziehen soll die Kraftregelung deaktiviert werden, sodass die allgemeine Steifigkeit des Roboters wieder erhöht wird, um die Prozesskräfte besser aufnehmen zu können.

3 Experimente

Das Ziel der Tests ist die Prüfung der technischen Machbarkeit der in Kapitel 2 beschriebenen Schraubstrategie, wobei der erfolgreiche Kontakt zwischen Schrauber und Kopfschraube (Phase 3 „Kuppeln der Klinge und der Schraube“) als kritisch betrachtet wird.

3.1 Versuchsstand

Die Schraubstrategie wird mit folgenden Bestandteilen getestet (**Bild 5**):

- Kooperativer Roboter
 - Roboterarm: Universal Robotics UR 16e mit integriertem Kraft-/Drehmomentsensor
 - Roboter Endeffektor:
 - Schraubtechnik: Cleco EC 50EAN89JA4 Winkelschrauber mit federnden Schlüsselkopf (30 mm Federweg)
 - Sensorik: Kamerasystem und Kraft-/Drehmomentsensor
 - Schrauben: Torx-Zylinderschraube M10x60
 - Fördermittel: Angetriebener C-Haken, der mit einem Drehtischschlitten (Werkstückhalter) ausgestattet ist, welcher die Position des Motorrads in zwei Stellungen ermöglicht.
- Bild 5 b) zeigt die wichtigen Spieldiagramme für Fördermittel (λ) und Werkstückträger (α).

3.2 Planung der Tests

Zwei Schraubfälle werden an unterschiedlichen Stellen auf dem Motorrad getestet. Jeder Schraubfall wird in zwei unterschiedlichen Positionen des Schlittens des Werkstückhalters (Bild 5 b) fünf Mal getestet. Die Kraftregelung wird mit einer internen Funktion des Cobots UR16e "Kraftmodus" implementiert. Jedes Schraubprogramm besteht aus mehreren Parametern (**Tabelle 3**).

Der Übergang zwischen den kraftgesteuerten Phasen (Phase 2 und 3) soll automatisch erfolgen, daher sollte im Vorfeld eine passende Bedingung implementiert werden. Für den ersten Kraft-

Tabelle 3. Parameter des Schraubprogramms.

Verschraubung	V1	V2
Anzugsdrehmoment [Nm]	55	55
Kraftmodus 1 (FM1), Schraube treffen:		
Geschwindigkeit der Kreisbewegung [mm/s]	25	25
Durchmesser der Kreisbewegung [mm]	5	5
Maximale Geschwindigkeit FM1 [mm/s]	4	4
Kraft Z [N]	17	17
Überwachungszeit FM1 [s]	7	6
Kraftmodus 2 (FM2), verschrauben:		
Maximale Geschwindigkeit FM2 [mm/s]	6	6
Kraft Z [N]	20	20
Überwachungszeit FM2 [s]	8	5,5
Verschraubungsweg [mm]	30	12

modus (Kuppeln von Klinge und Schraube) ist die Implementierung eines Abschaltmoments nicht trivial, da die Prozesskräfte beim Kontakt zwischen Werkzeug und Schraube stark variieren. Hier wird ein Timer (Überwachungszeit) implementiert, der den Kraftmodus nach einer bestimmten Zeit automatisch deaktiviert, wenn die Kraft-Schwellwerte zwischen Phase 2 und 3 nicht korrekt erreicht werden. Der Timer hat den Nachteil, dass damit eine Abschätzung der Phasendauer verbunden ist. Die Implementierung der Phasen 3 und 4 erfolgt mithilfe der Abschaltfunktion der EC-Schraubersteuerung.

4 Ergebnisse

Bild 6 beschreibt den Verlauf von Prozesskräften im Werkzeugkoordinatensystem während einer Verschraubung.

Bei zehn Versuchen werden alle Schraubvorgänge erfolgreich durchgeführt, wobei der automatische Übergang zwischen Phase 2 und 3 durch den Timer und nicht durch die implementierten Schwellwerte ($F_x = 15 \text{ N}$, $F_y = 20 \text{ N}$) ausgelöst wird. Die Schwingung des Fördermittels stellt eine Störquelle beim Verschraubungsprozess dar, was zum frühzeitigen Übergang von Phase 2 zu 3 führt. In diesem Fall ist eine Kraftschwelle nicht implementierbar. Allerdings zeigen alle Kontaktarbeiten ein ähnliches Verhalten, wenn der Kontakt zwischen Werkzeug und Schraubkopf eintritt, da die in x- und y-Richtung ermittelten Kräfte in diesem Fall eine größere Variation aufweisen (**Tabelle 4**).

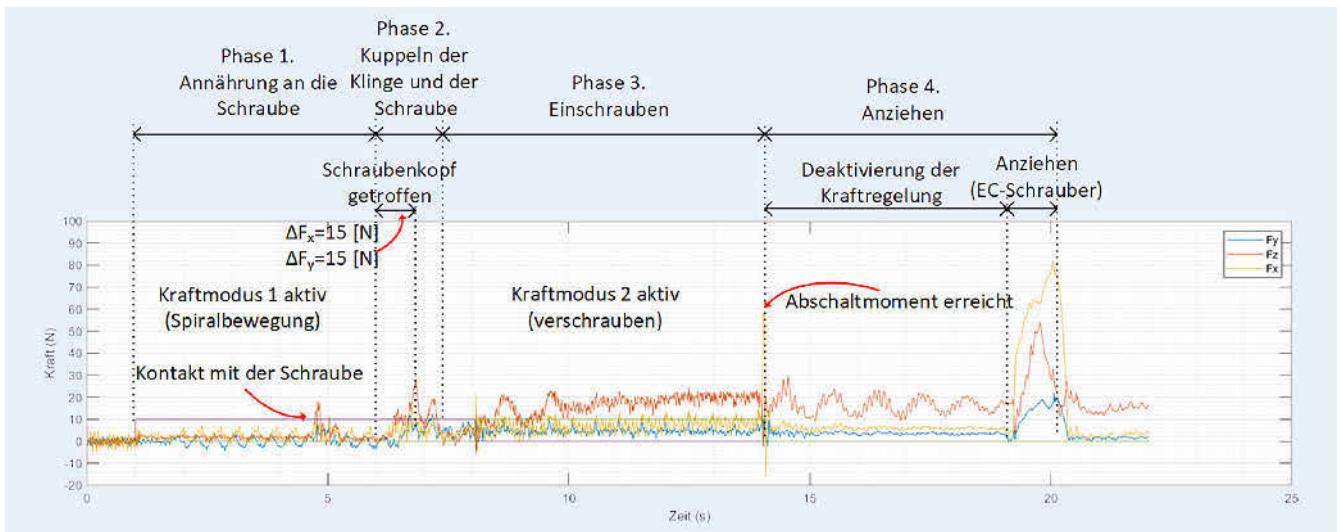


Bild 6. Verschraubungsprozess. Grafik: Fraunhofer IPK

Tabelle 4. Erkennung der Prozesskräfte während Phase 2.

Position des Schlittens	Test	Verschraubung 1							Verschraubung 2						
		F_{1x} [N]	F_{2x} [N]	ΔF_x [N]	F_{1y} [N]	F_{2y} [N]	ΔF_y [N]	F_{1x} [N]	F_{2x} [N]	ΔF_x [N]	F_{1y} [N]	F_{2y} [N]	ΔF_y [N]		
1	1	10	-1	11	1	-10	11	-6	7	13	-5	6	11		
1	2	-4	8	12	1	-9	10	7	-6	13	-6	5	11		
1	3	-5	10	15	7	-7	14	-6	5	11	-7	2	9		
1	4	-5	11	16	-6	7	13	-5	8	13	-6	7	13		
1	5	-1	12	13	-6	2	8	-7	7	14	2	-10	12		
2	6	0	15	15	-3	12	15	-5	8	13	-6	7	13		
2	7	2	15	13	3	17	14	-5	7	12	-6	6	12		
2	8	-3	10	13	0	14	14	-3	9	12	-5	7	12		
2	9	-1	11	12	-1	13	14	-5	8	13	-5	8	13		
2	10	0	11	11	-1	12	13	-7	6	13	-5	6	11		

Diese Kraftänderung, die in einem Zeitraum von 1 s aufgenommen wird, kann in Zukunft berücksichtigt werden, um die Phase 2 „Kuppeln der Klinge und des Schraubenkopfs“ zu erkennen. Damit kann eine robuste Abschaltung der Spiralbewegung und des Kraftmodus 1 implementiert werden.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert eine Automatisierung von Verschraubungen für MRK-Anwendungen, die auf passiver und aktiver Nachgiebigkeit basiert. Diese Kombination erlaubt einen optimalen Ausgleich von großen Positionsabweichungen des Werkstücks.

Die präsentierte erfolgreiche Schraubstrategie birgt folgende Herausforderungen:

- Schlechte Transparenz bei der Erfassung der Kontaktkräfte aufgrund der Verwendung des passiven Elements (federbelasteter Kopf des Schraubers).

- Die Kontaktkräfte sind stark von der relativen Ausrichtung und Position des Werkzeugs zur Schraube abhängig.

Eine Methode, die den zeitlichen Kraftverlauf während der Verschraubung überwacht, soll entwickelt werden, um den automatischen Übergang zwischen Phase 2 und 3 robuster zu gestalten, um auf eine Implementierung des Timers zu verzichten.

Die vorgestellte Arbeit ist ein Beispiel für die Verwendung von Cobots für industrielle Schraubprozesse. Dabei sind folgende Punkte weiterhin eine Herausforderung für den Einsatz von MRK-Anlagen:

- Die Implementierung automatisierter Montageaufgaben, die auf aktiver Nachgiebigkeit (Admittanzregelung) basieren, ist für den Systemintegrator immer noch komplex.
- Die Verfügbarkeit der MRK-Anlage wird beeinträchtigt durch die im Vergleich zu Industrierobotern geringere Zuverlässigkeit des Cobots und die Anwesenheit von Menschen, die viel Unsicherheit in die Umgebung bringen.

L i t e r a t u r

- [1] Liu, S.; Xing, D.; Li, Y. et al.: Robust Insertion Control for Precision Assembly with Passive Compliance Combining Vision and Force Information. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 24 (2019) 5, pp. 1974–1985
- [2] Nieoczym, A.; Longwic, R.: Control of the Process of Screwing in the Industrial Screwdriver. *Advances in Science and Technology* 10 (2016) 30, pp. 202–206
- [3] Mangold, S.; Steiner, C.; Friedmann, M. et al.: Vision-based screw head detection for automated disassembly for remanufacturing. The 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Leuven/Belgium, 2022, pp. 1–6
- [4] Mironov, D.; Altamirano, M.; Zabihiifar, H. et al.: Haptics of Screwing and unscrewing for its application in smart factories for disassembly. *eurohaptics*, Pisa/Italy, 2018, pp. 428–439
- [5] Villani, L.; Schutter, J. de: Force Control. In: Siciliano, B., Khatib, O. (eds.): *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing 2016
- [6] Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58 (2009) 2, pp. 628–646
- [7] Li, R.; Pham, D. T.; Huang, J. et al.: Unfastening of Hexagonal Headed Screws by a Collaborative Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 17 (2020) 3, pp. 1455–1468
- [8] Gautam, M.; Fagerlund, H.; Greicevci, B. et al.: Collaborative Robotics in Construction: A Test Case on Screwing Gypsum Boards on Ceiling. 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City/Vietnam, 2020, pp. 88–93
- [9] Scholer, M.: Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering. Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2018
- [10] Cheng, X.: Towards Automatic Assembly of Small Screws: Failure Detection and Stage Classification. Master's dissertation, Carnegie Mellon University, 2019
- [11] Weber: MRK Schraubensystem für die Mensch-Roboter-Kollaboration. Stand: 2019. Internet: www.weber-online.com/mrk-schraubensystem. Zugriff am 17.08.2022
- [12] Stöger: Schraubautomaten für die Mensch-Roboter-Kollaboration. Stand: 2019. Internet: www.stoeger.com/de/schraubautomaten-fuer-mensch-roboter-kollaboration-mrk.html. Zugriff am 17.08.2022
- [13] Jia, Z.; Bhatia, A.; Aronson, R. et al.: A Survey of Automated Threaded Fastening. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 16 (2018) 1, pp. 298–310
- [14] Wang, X. V.; Kemeny, Z.; Vancza, J. et al.: Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 66 (2017) 1, pp. 5–8
- [15] Siciliano, B.; Villani, L.: *Robot Force Control*. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers 1999
- [16] Calanca, A.; Muradore, R.; Fiorini, P.: A Review of Algorithms for Compliant Control of Stiff and Fixed-Compliance Robots 21 (2015) 2, pp. 613–624
- [17] Cruz, A. B.; Radke, M.; Haninger, K. et al.: How can the programming of impedance control be simplified? 8th CIRP Conference of Assembly Technology and Systems, Athens/Greece, 2020, pp. 266–271
- [18] Szeliski, R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Cham: Springer International Publishing 2011



A r t u r o B a s t i d a s - C r u z , M . S c .
Foto: Autor

T a n u r e z a J a y a , B . S c .

D r . K e v i n H a n i n g e r

Prof. Dr.-Ing. J ö r g K r ü g e r
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
Tel. +49 30 / 39006-142
arturo.bastidas-cruz@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

Wirtschaftliche Roboterprogrammierung trotz Unikatfertigung und hoch reflektivem Werkstoff

Einsatz von Schweißrobotern im Spezialschiffbau

A. Zych, S. Lauer, S. Dryba

Bei der Fertigung schiffbaulicher Unterbaugruppen werden im Universalschiffbau bereits meist Schweißroboter eingesetzt. Dagegen ist im Spezialschiffbau der Anteil automatisierter Produktionsanlagen deutlich geringer. Gründe hierfür sind unter anderem die Verarbeitung alternativer Materialien sowie die höhere Komplexität der Bauteile. Für solche Szenarien bietet die sensorbasierte Roboterprogrammierung in Verbindung mit spezieller 3D-Sensortechnik neue Chancen zum wirtschaftlichen Einsatz von Robotern.

STICHWÖRTER

Roboterprogrammierung, Schweißroboter, Schiffbau

Economic robot programming despite one-off production and highly reflective materials – Application of welding robots in shipbuilding

In production of naval subassemblies the general shipbuilding industry usually uses welding robots. By contrast the proportion of automated production facilities in specialty shipbuilding is low. The reasons for this are the processing of alternative materials as well as higher complexity of component parts. Precisely for such scenarios, sensor-based robot programming in conjunction with special 3D-sensor technology offers new opportunities for the economical use of welding robots.

1 Einleitung

Auf dem Gebiet der Robotik war in den letzten Jahren ein rasantes Wachstum zu verzeichnen. Dies lässt sich sowohl aus den Zahlen der installierten Robotersysteme (mehr als 3 Millionen Roboter weltweit) als auch anhand der Roboterdichte (310 Roboter auf 10 000 Beschäftigte in Deutschland) ablesen. Das Wachstum geht insbesondere auf Anwendungen im Bereich des Fahrzeugbaus und der Elektronik zurück. Dieser Trend ist nicht zuletzt auf die sinkenden Kosten entsprechender Roboteranlagen bei gleichzeitig steigenden Personalkosten zurückzuführen [1]. Auf der anderen Seite ist trotz umfangreicher Bestrebungen von Roboterherstellern und Systemintegratoren die Einführung der Robotik in Anwendungsfelder abseits der Serienproduktion bisher nur in Teilbereichen der industriellen Produktion gelungen. Am Beispiel des europäischen Schiffbaus mit seiner Fokussierung auf den Bau von Spezialschiffen, wo seit den 90er Jahren die Installation von Roboteranlagen weitgehend stagniert, lässt sich die Problematik gut nachvollziehen. Zum einen führt der im Schiffbau anzutreffende Unikatbau im Hinblick auf den Einsatz von Robotern mit konventioneller Off-line-Programmierung zu einem ungünstigen Verhältnis von Programmierzeit zu Programmlaufzeit und damit zu hohen Programmierkosten. Zum anderen treten im Schiffbau immer noch relativ hohe Fertigungs- und Montagetoleranzen sowie Lagetoleranzen bei der Positionierung der Bauteile auf, die eine aufwendige Anpassung von Off-line erstellten Roboterprogrammen erforderlich machen. [2–4]

Ein weiterer Grund sind die im Bereich der Robotik noch häufig anzutreffenden starren Sicherheitskonzepte, welche nicht mit den Anforderungen des Schiffbaus bezüglich variierender

Bauteilgrößen und hochflexiblen Fertigungsabläufen korrespondieren. Und nicht zuletzt handelt es sich bei Roboteranlagen für den Schiffbau mit ihrer umfangreichen Peripherie oftmals um kostenintensive Individuallösungen, die besonders für kleinere und mittlere Werften oftmals unattraktiv sind. Auf der anderen Seite stehen die europäischen Werften vor großen Herausforderungen. So ist heute schon ein sich beschleunigender Fachkräftemangel auf dem Gebiet qualifizierter Schweißer zu beobachten. Weiterhin zwingt die Forderung des Weltmarktes hin zu immer kürzeren Lieferzeiten von Spezialschiffen, bei gleichzeitig sinkenden Preisen, die Werften zur Steigerung der Produktivität und Prozessoptimierung.

Insbesondere der Spezialschiffbau stellt Anlagenhersteller hinsichtlich der Automatisierung des Fügeprozesses von schiffbaulichen Paneelen vor erhebliche Herausforderungen. Bei den Materialien kommen neben geprimerten Schiffbaustahl auch nichtrostende Stähle sowie Aluminium zum Einsatz. Auch ist die geometrische Gestaltung der Paneele erheblich komplexer. Während im klassischen Containerschiffbau vor allem einfache Grundbleche mit orthogonal aufgesetzten Profilen verschweißt werden, steigt im Bereich des Spezialschiffbaus der Anteil der Paneele sowohl mit nicht orthogonal angeordneten Profilen als auch mit zusätzlichen Konstruktionselementen (Kniebleche, Schubbleche, Dichtblenden) und konstruktiven Ausführungen (Profile in Schmiege das heißt nicht orthogonal zur Grundplatte, verschiedene Anbindungsvarianten für Kniebleche...). Ein möglicher Lösungsansatz zur Berücksichtigung dieser speziellen Anforderungen stellt die Entwicklung von intelligenten Roboteranlagen zum Schweißen von schiffbaulichen Konstruktionen dar. Kennzeichnende Merkmale dieser Anlagenkonzepte sind neben der Modularisierung der

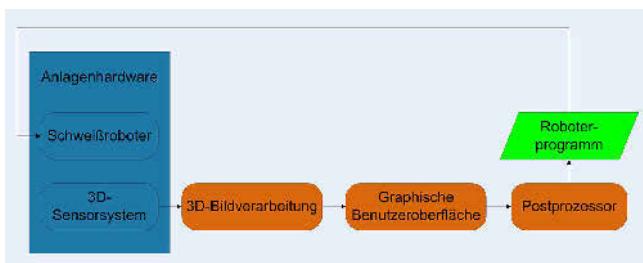


Bild 1. Systemkomponenten zur sensorbasierten Roboterprogrammierung.
Grafik: Fraunhofer IGP

Anlagen und der Flexibilisierung der Sicherheitskonzepte insbesondere die Minimierung des Aufwands zur Programmierung der Schweißroboter für die Betreiber entsprechender Anlagen. Dieser Ansatz wird beim Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP seit mehreren Jahren durch den Einsatz von 3D-Sensorik sowie automatischer 3D-Sensordatenauswertung in Verbindung mit neuartigen Bedienkonzepten als Alternative zur zeitaufwendigen und unflexiblen Off-line-Programmierung verfolgt [5–7].

2 Sensorbasierte Roboterprogrammierung für Schweißanwendungen im Schiffbau

Der bisherige Entwicklungsstand zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Roboterprogrammierung im Vergleich zur klassischen Off-line-Programmierung unabhängig von technologischen Vorarbeiten und somit von Konstruktionsdaten durchgeführt wird [5]. Dies ist bei der Fertigung von schiffbaulichen Paneelen für Spezialschiffe von besonders großer Bedeutung, da die Bauteilvarianz erheblich größer ist im Vergleich zu klassischen Containerschiffen und somit die zu erwartende Produktivitätssteigerung durch die effizientere Programmierung für die Werften sehr interessant ist. Der Ablauf gestaltet sich dabei folgendermaßen (**Bild 1**): Nach dem Aufbauen und Heften der Bauteile werden die zu schweißenden Strukturen (Paneele) mithilfe eines Sensors dreidimensional erfasst. Zum Einsatz kommen dabei überwiegend 3D-Laserscanner. Die als Punktwolke vorliegenden Sensordaten werden daraufhin automatisch ausgewertet, um die Parameter der zu schweißenden Nähte sowie eine vereinfachte geometrische Beschreibung der einzelnen Bauteile zu ermitteln. Diese Daten werden dem Anlagenbediener anschließend anhand einer grafischen Benutzeroberfläche dargestellt. Der Bediener kann daraufhin einzelne Arbeitsaufträge starten, die dann mithilfe eines Postprozessors in ein kollisionsfreies, anlagenspezifisches Roboterprogramm umgewandelt und auf die jeweilige Robotersteuerung übertragen werden.

Die Roboterprogramme enthalten neben den Roboterbahnen zum Schweißen der Bauteile ebenfalls Bewegungsstrategien zur Nahtsuche. Die Nahtsuche ist erforderlich, um eine exakte Positionierung des Brenners am Nahtstart zu gewährleisten und auftretende Abweichungen der Bauteillage (Anlagengenauigkeit sowie Schweißdeformationen) auszugleichen. Um während des Schweißprozesses dem Verlauf der Schweißnaht zu folgen, werden Nahtverfolgungssysteme (Lichtbogensensor, optische Nahtverfolgungssysteme) eingesetzt.

Das Verfahren zur sensorbasierten Roboterprogrammierung hat sich beim Kunden bereits über mehrere Jahre bewährt. Es funktioniert für konventionelle Stahl-Paneele, aber auch große

Volumenstrukturen aus Schiffbaustahl sehr effizient und prozesssicher. Im Bereich der Spezialschiffe ist aber insbesondere das Auftreten von Werkstoffen mit hohem Reflexionsgrad (Al / CrNi) und der allgemein komplexere Aufbau der Paneele im Hinblick auf die Bauteilerkennung eine Herausforderung. So ist eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Programmierung die möglichst lückenlose Digitalisierung des vorliegenden schiffbaulichen Bauteiles, um zum Beispiel konstruktive Details wie Freischnitte, Wasserlauflöcher oder Schubleiche erfassen zu können. Mit dem bisher verfolgten Konzept von Sensorhardware und Digitalisierungsstrategie ist dies jedoch für das beschriebene Anforderungsprofil nicht möglich. Zum einen liefern konventionelle 3D-Sensorsysteme (Laserscanner / Musterprojektionssysteme) abhängig vom Winkel der Bauteilloberfläche auf Bauteilen mit hohem Reflexionsgrad große Datenlücken. Zum anderen erfordert die komplexe Bauteilstruktur eine adaptive Digitalisierungsstrategie, wobei die Sensorpositionen abhängig von der Lage der einzelnen Bauteile bestimmt werden, um Abschattungen bei der Datenerfassung möglichst zu minimieren und alle relevanten konstruktiven Details zu erfassen.

3 3D-Sensorik und Digitalisierungsstrategie

Um den Einsatz der sensorbasierten Roboterprogrammierung im Spezialschiffbau zu ermöglichen, wurde ein neues Verfahren zur 3D-Datenerfassung bestehend aus Sensorhardware sowie Digitalisierungsstrategie entwickelt. Als Sensor kommt dabei ein dynamisch messender 3D-Sensor zum Einsatz, welcher es ermöglicht 3D-Punktwolken während der Bewegung des Werkstücks oder des Sensors aufzuzeichnen (zum Beispiel „Faro DMVS / Photoneo MotionCam-3D“). Durch den Einsatz eines dynamischen 3D-Sensors kann zum einen der Zeitbedarf zur Ermittlung der Sensordaten reduziert werden. Zum anderen wird durch die ausgewählte Sensortechnologie in Verbindung mit der entwickelten Digitalisierungsstrategie gewährleistet, dass sämtliche Bereiche der Bauteilloberfläche mit geeigneten Aufnahmewinkeln digitalisiert werden können. Bisher verfügbare 3D-Sensoren eignen sich aufgrund der niedrigen Erfassungsgeschwindigkeit nicht für den dynamischen Einsatz (zum Beispiel 3D-Laserscanner beziehungsweise Systeme basierend auf Musterprojektion mit strukturiertem Licht) beziehungsweise liefern lediglich linienhafte und nicht flächenhafte Informationen (zum Beispiel Zeilenscanner) und erlauben damit nicht die bei stark reflektierenden Materialien notwendige Erfassung von Bauteilloberflächen aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln (beziehungsweise nur mit erheblichen Mehraufwand bei der Ermittlung der Scanbahnen).

Die entwickelte Digitalisierungsstrategie besteht aus einem zweistufigen Verfahren, dem Grobscan sowie dem Feinscan. Im Rahmen des Grobscans wird der Sensor auf einer Sicherheitshöhe meanderförmig über dem Arbeitsbereich bewegt. Bei der automatischen Auswertung des Grobscans werden dann die Hauptstrukturelemente der Bauteile (Grundplatte, Profile sowie Kniebleche) identifiziert (**Bild 2**). Basierend auf der Position und Geometrie der identifizierten Hauptstrukturelemente erfolgt dann die Planung der Sensorbewegungen für den Feinscan. Die grundlegende Strategie des Feinscans sieht dabei eine beidseitige Erfassung der Profile sowie Kniebleche mittels Bewegung des Sensors in Längsrichtung der Bauteile vor, so dass auch Schubleiche und Dichtblenden zuverlässig identifiziert werden können. Der Aufnahmewinkel sowie die Höhe des Sensors werden dabei abhängig

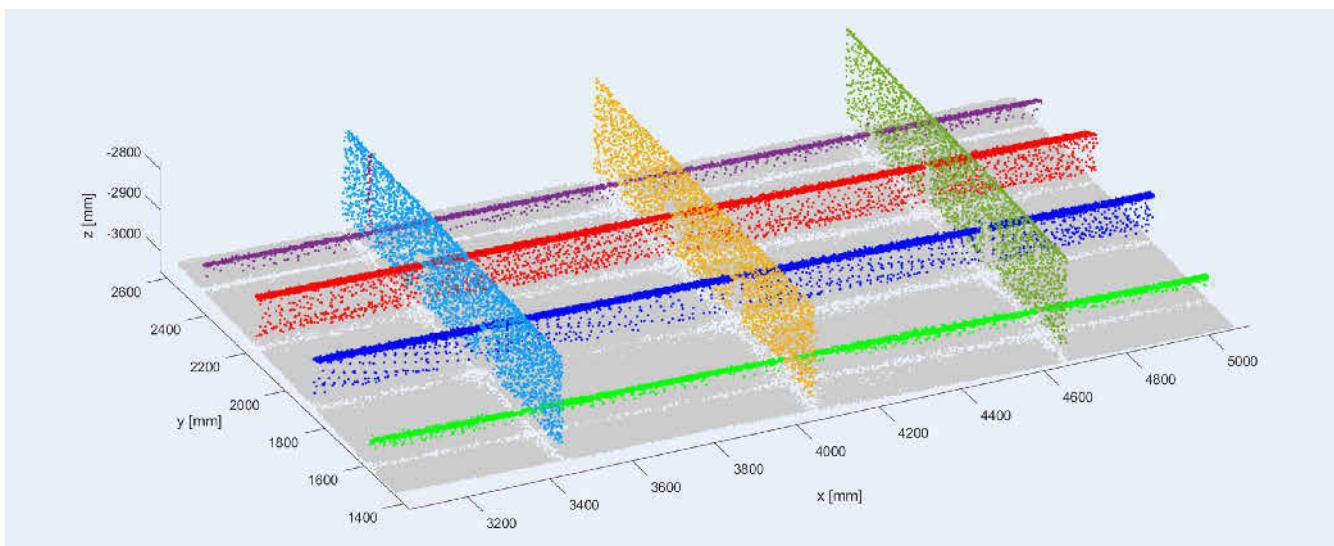


Bild 2. Segmentierter Grobscan eines Musterpaneels. Grafik: Fraunhofer IGP

von der Gesamtstruktur der Bauteile (Vermeidung von Abschätzungen) sowie der Erreichbarkeit der gewünschten Scanbahn adaptiv berechnet (Bild 3). Zur Reduzierung von Nebenzeiten wird nach Ermittlung der notwendigen Scanbahnen deren Reihenfolge hinsichtlich minimaler Verfahrbewegungen zwischen den einzelnen Scanbahnen optimiert.

4 Automatische Auswertung der 3D-Sensordaten

Wesentlicher Bestandteil der Auswertung der 3D-Sensordaten des Feinscans ist die Segmentierung der Gesamtpunktwolke in Teilpunktwolken der einzelnen Bauteile. In einem iterativen Prozess werden hierbei Fehlpunkte entfernt sowie Bauteile und Bau teilverbündungen identifiziert und diesen Bauteilen die zugehörigen Datenpunkte zugeordnet. Zu den identifizierbaren Bauteilen zählen neben den Profilen und Knieblechen auch weitere Anbauteile wie Schubleche oder Dichtblenden. Als Ergebnis der Segmentierung steht eine hierarchisch geordnete Bauteilstruktur mit den zugehörigen Teilpunktwolken zur Verfügung (Bild 4).

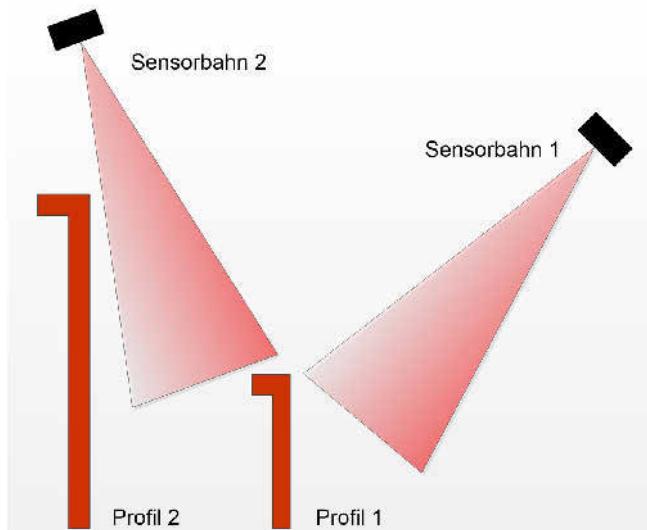


Bild 3. Digitalisierungsstrategie beim Feinscan. Grafik: Fraunhofer IGP

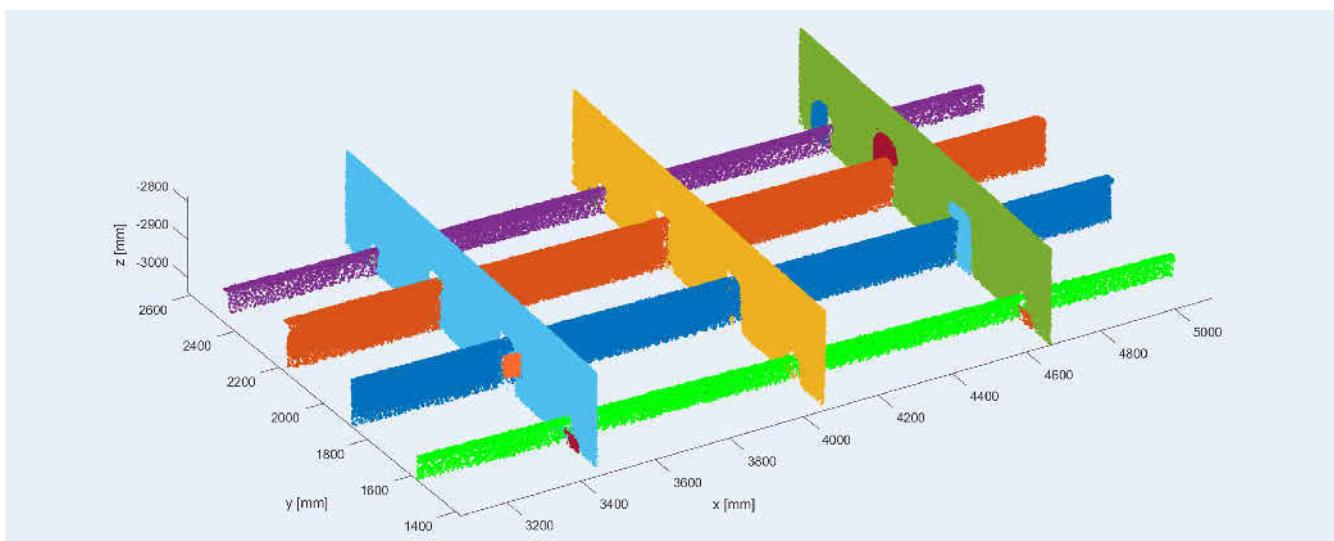


Bild 4. Segmentierter Feinscan eines Musterpaneels. Grafik: Fraunhofer IGP



Bild 5. Anbindungsvarianten Kniebleche. Foto: Fraunhofer IGP

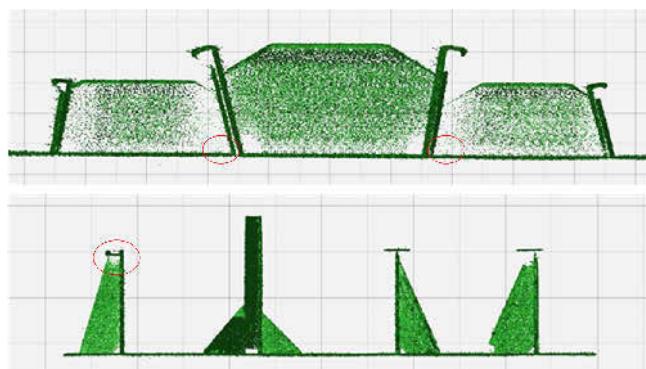


Bild 6. Abschattungen von Bauteilbereichen. Grafik: Fraunhofer IGP

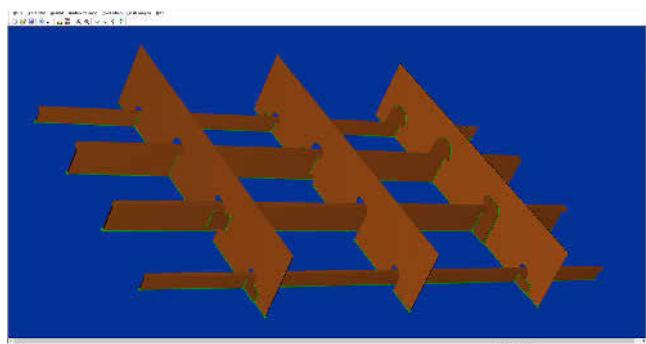


Bild 7. Bauteilgeometrie sowie Nahtdaten eines Musterpaneels.
Grafik: Fraunhofer IGP

In der Folge werden die identifizierten Bauteile klassifiziert. Dies enthält unter anderem die Ermittlung von Freischnitten und Wasserlaufflöchern sowie die Bestimmung von Anbindungsvarianten zum Beispiel für Kniebleche (**Bild 5**). Diese können sowohl bündig, mittig als auch überlappend angebracht sein. Trotz adaptiver Digitalisierungsstrategie können abhängig von der Bauteilstruktur in einzelnen Bauteilbereichen noch Abschattungen auftreten, welche die Identifizierung von Bauteilmerkmalen wie zum Beispiel Freischnitten erschweren beziehungsweise verhindern.

Solche Abschattungen können beispielsweise bei engen Bauteilabständen unter in Schmiege aufgesetzten Profilen beziehungsweise unter horizontalen Profilen oder der Gurtung auftreten (**Bild 6**). In diesem Fall muss die Bauteilgeometrie mittels der graphischen Benutzeroberfläche kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden (zum Beispiel Anpassung von Freischnitten).

Im abschließenden Teilschritt der Sensordatenauswertung werden die Bauteildaten in eine vereinfachte geometrische Beschreibung überführt (zum Beispiel STL-Format). Dies dient sowohl zur Visualisierung der Bauteile innerhalb der graphischen Benutzeroberfläche als auch als Ist-Geometrie zur späteren Berechnung der kollisionsfreien Roboterbewegungen zum Schweißen der Bauteile (mittels Postprozessor). Außerdem werden die zu schweißenden Nähte identifiziert und diesen Nähten abhängig von der Bauteilstruktur zusätzliche Parameter zugeordnet. Diese Daten werden an die graphische Benutzeroberfläche übergeben und dort visualisiert (siehe Bild 7). Innerhalb der Benutzeroberfläche können durch den Anwender notwendige Anpassungen des aktuellen Schweißauftrages vorgenommen werden (zum Beispiel Änderung der Schweißreihenfolge oder Anpassung von Freischnitten). Nach Freigabe durch den Bediener wird das Schweißprogramm abschließend mittels Postprozessor in ein anlagenspezifischen Roboterprogramm umgewandelt.

5 Ausblick

Mit dem neu entwickelten System zur 3D-Datenerfassung von schiffbaulichen Strukturen wurden die Voraussetzungen für die erfolgreiche Implementierung einer sensorbasierten Roboterprogrammierung für Schweißanwendungen im Spezialschiffbau geschaffen. Die durchgeföhrten Untersuchungen an Musterbaugruppen aus Aluminium und Edelstahl haben gezeigt, dass mit Hilfe des entwickelten Systems die zum Schweißen der Bauteile benötigten Informationen aus den 3D-Sensordaten automatisch ermittelt werden können. Notwendige manuelle Anpassungen, zum Beispiel aufgrund von verbleibenden Abschattungen, können durch den Bediener mithilfe der graphischen Benutzeroberfläche ergänzt werden.



Die aktuellen Forschungsaktivitäten des Fraunhofer IGP liegen unter anderem in der Erweiterung des Funktionsumfangs des Postprozessors, um den Anteil der mit Roboter schweißbaren Nähte im Spezialschiffbau zu erhöhen. Dies betrifft insbesondere die Einbeziehung und Nutzung der Funktionalität von optischen Nahtsensoren zum Beispiel zum Schweißen von HV-Nähten sowie Nähten im Bereich von Schubblechen und Dichtblenden. Die bisher erzielten Ergebnisse haben bereits gezeigt, dass mit der Weiterentwicklung der sensorbasierten Roboterprogrammierung insbesondere für kleinere und mittlere Werften eine Technologie zur Verfügung gestellt wird, die den wirtschaftlichen Einsatz von Schweißrobotern im Bereich der Fertigung von Paneelen für Spezialschiffe ermöglicht.

DANKSAGUNG

Das Projekt „IntRobAS – Intelligente Roboteranlagen in der Unikatfertigung im Schiffbau“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert (FKZ: 03SX502C).

L iteratur

- [1] Tilley, J.: Automation, Robotics, And The Factory Of The Future., McKinsey&Company; 2017, <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future#>.
- [2] Holamo, O. P.; Ruottu K.: Machine Vision System-Aided Robot Welding of Micropanels. In: DVS-Berichte 237, Düsseldorf: DVS-Verlag; 2005, p. 516–519

- [3] Galindo, P. L. et al.: Development of a Customized Interface for a Robotic Welding Application at Navantia Shipbuilding Company. In: Ollero, A. et al., editors. ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing 694. Springer; 2018
- [4] Larkin, N. et al.: Automated Programming for Robotic Welding. In: Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Singapore: Springer, 2018, p. 48–59
- [5] Zych, A.: Programming of Welding Robots in Shipbuilding. Procedia CIRP, Jg. 99, 2021, p. 478–483, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.107.
- [6] Harmel, A.; Zych, A.: Sensor-Based Robot Programming for Automated Manufacturing of High Orthogonal Volume Structures. In Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 2018-04-05, Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 93–101, doi: 10.1007/978-3-662-56714-2_11
- [7] Wanner, M. C.; Zych, A.; Pfletscher U.: Method and device for controlling robots for welding workpieces. Internationale Patentanmeldung WO2008101737 (A1), 2008



Dr.-Ing. A l e x a n d e r Z y c h
Foto: Autor

S a s c h a L a u e r , M. Sc.

Dipl.-Ing. S t e f f e n D r y b a
Fraunhofer-Institut für Großstrukturen
in der Produktionstechnik IGP
A.-Einstein-Str. 30, 18059 Rostock
Tel. +49 381 / 49682-43
automatisierung@igp.fraunhofer.de
www.igp.fraunhofer.de



Von der virtuellen Inbetriebnahme zur echtzeitnahen Virtual Reality mithilfe neutraler Austauschformate

Virtual Reality in der Steuerungstechnik

D. Littfinski, A. Verl

Dieser Beitrag stellt ein Konzept für die Integration von interaktiven Simulationsmodellen in einer Virtual-Reality (VR)-Simulationsumgebung vor. Dabei werden die Simulationsmodelle aus der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) von Produktionsanlagen betrachtet. Ein Ziel der erweiterten VIBN mithilfe von einer VR besteht darin, die Lücke zwischen VIBN und der realen Inbetriebnahme zu schließen. Damit das vorhandene VIBN-Modell möglichst einfach in der VR-Visualisierung integriert werden kann, ist es essenziell, eine Durchgängigkeit des Simulationsmodells im Engineering zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird auf das bestehende Austauschdatenformat „AutomationML“ eingegangen.

STICHWÖRTER

Virtual Reality, Produktionstechnik, Mensch und Technik

Virtual reality in control engineering

This paper presents a method for integrating interactive simulation models into a virtual reality (VR) simulation environment. To this end, simulation models from virtual commissioning (VIBN) of production plants are considered. One goal of enhanced VIBN using VR is to close the gap between VIBN and real commissioning. To integrate the existing VIBN model as easily as possible into the VR visualization, it is essential to ensure engineering continuity for the simulation model. For this reason, the existing exchange data format AutomationML will be discussed.

1 Konzept der Virtual Reality in der VIBN

Durch den steigenden Automatisierungs- und Komplexitätsgrad von Produktionssystemen in der Industrie steigt der Zeit- und Kostenaufwand für die Inbetriebnahme signifikant an. Aus diesen Gründen gewinnt die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) immer mehr an Bedeutung. Der Vorteil der VIBN besteht darin, dass die Validierung von kritischen Zuständen zwischen Steuerung und Produktionsanlage an einem virtuellen Modell, vor dem Aufbau der physischen Anlage, durchgeführt werden kann. [1]

Die Simulationsumgebungen der VIBN fokussieren auf die Echtzeitanforderungen zum Koppeln von Steuerungen oder dem einfachen Programmieren von Ablauflogiken nach der Definition von [2]. Die Interaktionsmöglichkeiten mit der 3D-Visualisierung der Produktionsanlage wird aber teilweise vernachlässigt. Grund dafür ist die exozentrische Ansicht mit zweidimensionalen Computermonitoren, welche meist eine eingeschränkte Sicht auf das Simulationsmodell mit sich bringt sowie die Interaktionsfähigkeit limitiert. Unter Interaktionsmöglichkeiten in der Simulation wird beispielsweise eine Interaktion mit dem Materialfluss verstanden, um so einen Materialstau zu simulieren und zu testen.

Um diese Interaktionsmöglichkeiten zu verbessern, bietet sich eine Abbildung des VIBN-Modells in einer Virtual Reality (VR) an. Zusätzlich zu den Vorteilen, die eine VIBN gewährt, entstehen durch eine Implementierung des Simulationsmodells in einer VR-Umgebung weitere entscheidende Vorteile. Durch die realitätsnahe VR-Visualisierung der Produktionsanlage in einer frühen

Engineeringphase, können Fehlverhalten und Konstruktionsfehler früher entdeckt werden als bei einer Visualisierung mit Computermonitoren. Dadurch kann der Änderungsaufwand in der frühen Entwicklungsphase reduziert werden. [3]

Ein weiterer Vorteil der Erweiterung durch eine VR ist, dass in der VIBN zu den bestehenden Interaktionsmöglichkeiten neue entwickelt werden können, da die VR neue Interaktionsschnittstellen bereitstellt. So kann beispielsweise eine Interaktionsschnittstelle mit Werkstücken in einer VR-Umgebung entwickelt werden, die das gezielte Einbringen von Fehlerfällen als Test in der VIBN vereinfacht. Ein Vorteil der VR-Visualisierung ist, dass bei einer guten Immersion, die abhängig vom Detaillierungsgrad des Simulationsmodells und der Simulationsumgebung ist, ein geringer Unterschied zur Realität besteht. Dies ermöglicht eine präzisere Analyse des Anlagen- und Prozessverhaltens. Zudem erlaubt eine direkte Einbindung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) in die VR-Visualisierung eine Validierung der Steuerungslogik und der HMI wie in der realen Inbetriebnahme. Dadurch wird die Fehleranalyse von Simulationsmodell und Steuerung signifikant vereinfacht. Außerdem kann die in der VR visualisierte Produktionsanlage zusammen mit dem Kunden zielführender diskutiert und validiert werden, da neue Interaktions- und Visualisierungsmöglichkeiten geboten werden. Auch kann in Bezug auf Wartung und Instandhaltung der Produktionsanlage die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit von Bauteilen geprüft werden. [4]

Um diese Vorteile nutzen zu können, wird im Folgenden ein Konzept zur Anbindung des Verhaltensmodell sowie der Steue-

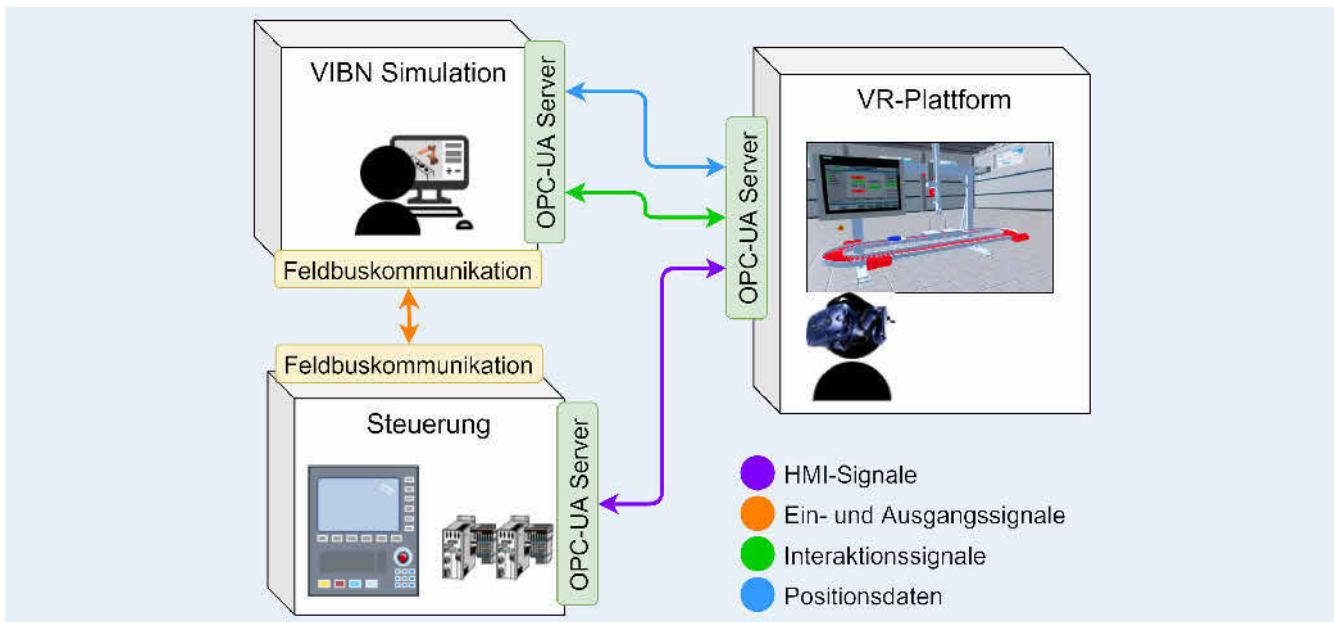


Bild 1. Konzept für die Anbindung einer VR (Virtual Reality)-Umgebung. *Grafik: ISW*

rung an eine VR-Umgebung vorgestellt. Die Anbindung soll über eine Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) umgesetzt werden [5]. MRiLS ist eine Erweiterung der bekannten X-in-the-Loop-Simulationskreisläufe um eine interaktive Mixed-Reality-Umgebung. Damit ein VIBN-Modell in eine Mixed-Reality-Visualisierung integrierbar ist, werden unterschiedliche Signale und Schnittstellen benötigt, wie in **Bild 1** zu erkennen ist.

Für eine Anbindung des VR-Modells muss die Übertragung des Maschinen- und Anlagenverhaltens auf die VR-Umgebung betrachtet werden. Dazu müssen alle Positionsdaten zyklisch über definierte Schnittstellen an das VR-Modell übermittelt werden. Umgekehrt soll die VR-Umgebung unterschiedliche Interaktionssignale an das VIBN-Modell übermitteln können. Als Kommunikationschnittstelle wird in der Konzeption für die Übertragung von Daten „OPC-UA“ betrachtet. Das Kommunikationsprotokoll OPC-UA findet weite Anwendungsbereiche in der industriellen Kommunikationstechnik. Dies ermöglicht eine echtzeitnahe VR-Visualisierung sowie eine Interaktion zwischen dem VIBN- und VR-Simulationsmodell. [6]

Die Herausforderung, die bei der Erweiterung der VIBN um eine VR besteht, ist die Durchgängigkeit des Simulationsmodells. Die Durchgängigkeit des Simulationsmodells bezieht sich dabei auf den Austausch von Geometrie- und Kinematikbeschreibung sowie der Interaktionsvariablen zwischen dem VIBN-Werkzeug und der VR-Umgebung. All diese Informationen sind in digitalisierten Engineeringprozessen grundsätzlich vorhanden, können aber meist aufgrund fehlender Interoperabilität der Programme nicht untereinander ausgetauscht werden. Das hat zur Folge, dass viele Daten manuell und über Umwege in die spezifischen Engineeringwerkzeuge integriert werden müssen.

2 Durchgängigkeit eines VIBN-Modells durch neutrale Austauschformate

Ein vollständiges VIBN-Modell besitzt unterschiedliche Informationen aus den verschiedenen Teilbereichen einer Engineeringphase. Die wichtigsten Teilbereiche sind die Mechanik, Elek-

trik und Softwareentwicklung der Produktionsanlage. Die durchgängige Übergabe dieser Planungsdaten, die in jedem spezifischen Engineeringbereich generiert werden, kann in der Praxis meist nicht umgesetzt werden. Dies führt zur zeitaufwendigen und fehleranfälligen Neuerstellung in den einzelnen Untergruppen der Engineeringphase.

Für die Erstellung eines VIBN-Modells werden beispielsweise die Geometriedaten sowie Ein- und Ausgangsvariablen der Steuerung benötigt. Die Geometriedaten werden aus den erstellten CAD-Dateien überwiegend in Form von Mesh-Dateien generiert und beschreiben die Visualisierung der Anlage. Außerdem enthält das VIBN-Modell Daten über die Kinematisierung des gesamten Modells. Jedes bewegliche Gelenk sowie jede verfahrbare Achse ist also kinematisch definiert. Diese Informationen ergeben zusammen eine wichtige Beschreibung für die Visualisierung des Simulationsmodells und werden in der späteren Konzeption genauer untersucht.

Diese Daten sind nötig, um das Modell in unterschiedlichen Visualisierungsplattformen zu integrieren. Es sind jedoch meist keine geeigneten Import- und Exportfunktionen in den unterschiedlichen Engineeringwerkzeugen vorhanden. Die Herausforderung liegt vor allem darin, dass die visuelle und kinematische Beschreibung des Simulationsmodells in einem gemeinsamen Datenformat integriert werden muss. Damit diese Informationen zwischen den unterschiedlichen Programmen, beispielsweise der Mechanik und Visualisierung, ausgetauscht werden können, sind unterschiedliche Lösungsansätze vorhanden. [1]

In der Praxis werden meistens proprietäre Datenformate verwendet, wie **Bild 2** aufzeigt. Das hat den Nachteil, dass jedes Programm eine separate Import- und Exportfunktion für jede andere Plattform benötigt, damit ein Datenaustausch stattfinden kann. Außerdem müssen diese Schnittstellen bei Versionsänderungen angepasst und überarbeitet werden, um einen fehlerfreien Datentransfer zu gewährleisten [7].

So hat ein Steuerungsprogramm, wie in Bild 2, mehrere Export-/Importfunktionen, um die Steuerungsdaten in den unterschiedlichen VIBN-Programmen integrieren zu können.

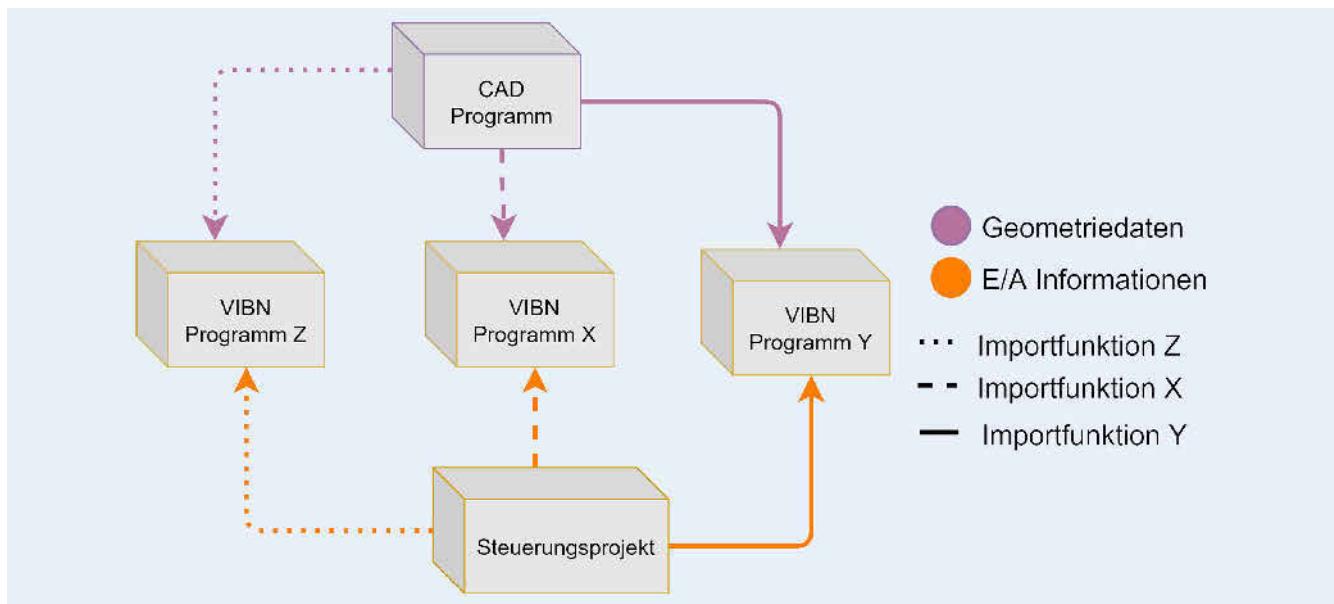


Bild 2. Ansatz für einen proprietären Datenaustausch. Grafik: ISW

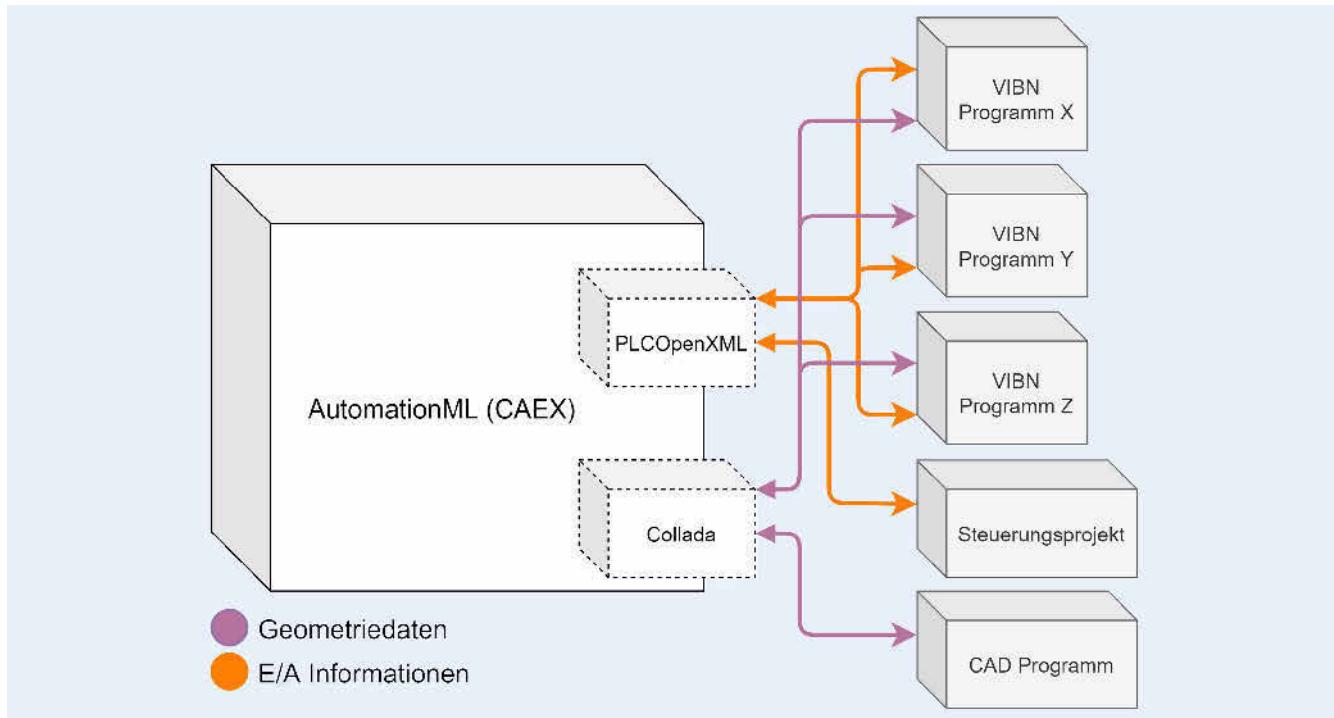


Bild 3. Ansatz für neutrales Austauschformat. Grafik: ISW

Bei einem Datenaustausch über ein neutrales Datenformat (**Bild 3**) genügt es, in den entsprechenden Engineeringwerkzeugen eine einzige Schnittstelle zu integrieren, die spezifische Import- und Exportfunktionen zur Verfügung stellt.

Außerdem ist die Entwicklung der Schnittstellen bei unterschiedlichen Frameworks sehr ähnlich und kann mit minimalen Anpassungen wiederverwendet werden [7]. Ist das Austauschformat dazu noch ein offener Standard, wird die Lesbarkeit der Daten über einen großen Zeitraum gewährleistet und ist werkzeugunabhängig. [8]

Ein weiterer Ansatz für einen durchgängigen Datenaustausch von Planungsdaten bietet eine Tool-Suite. Eine Tool-Suite erlaubt

es, unterschiedliche Engineeringwerkzeuge in einem übergeordneten Werkzeug zu integrieren und so einen Datentransfer über eine gemeinsame Datenbank zu gewährleisten. Ein Nachteil des Ansatzes ist, dass bei jeder Anpassung der Engineeringwerkzeuge eine Abstimmung mit dem Datenmodell sowie den anderen Engineeringwerkzeugen stattfinden muss. Des Weiteren besteht das Problem der Lizenzierung der unterschiedlichen Engineeringwerkzeuge. Dadurch entstehen hohe Kosten für eine universelle Tool-Suite. [8]

Aus den genannten Gründen ist ein neutrales Austauschformat dem proprietären Ansatz und der Tool-Suite vorzuziehen. Hier bietet sich „Automation Markup Language“ (AutomationML) als

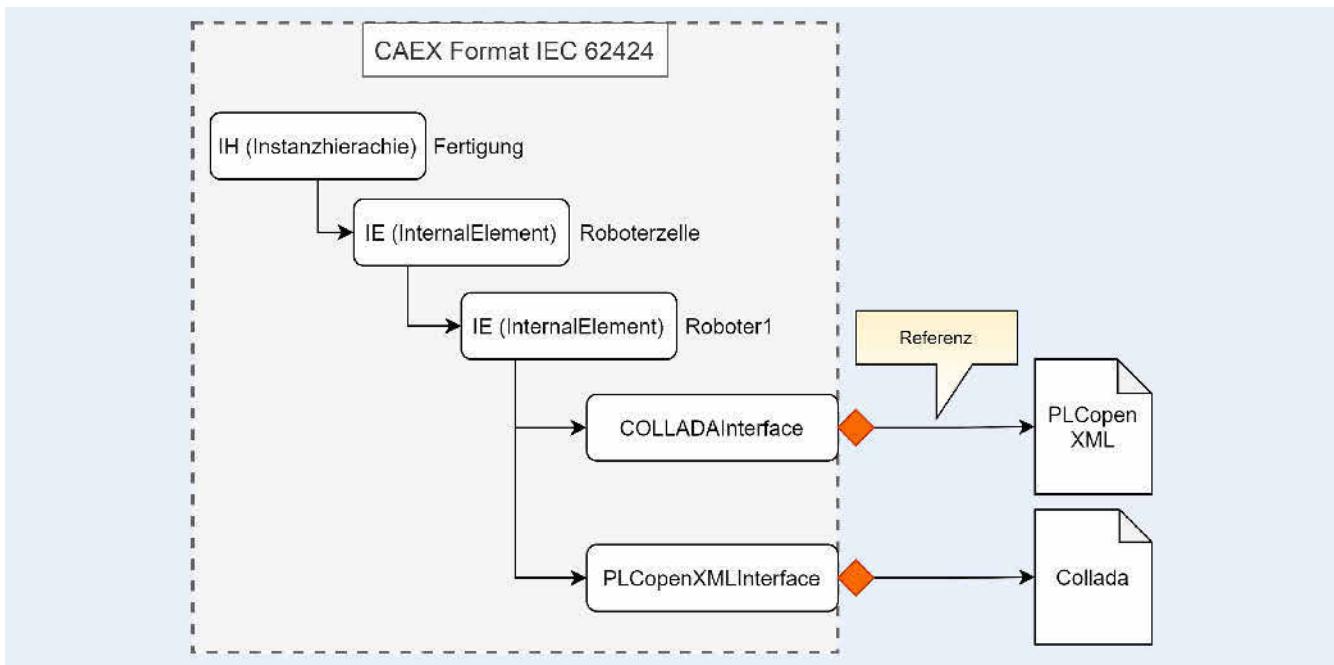


Bild 4. Beispiel für eine AutomationML-Beschreibung. *Grafik: ISW*

Austauschformat für verschiedene Engineeringwerkzeuge an, das ein anerkanntes Austauschformat in der Industrie ist. Ziel von AutomationML ist, dass mechatronische Modelle bis hin zur fertigen Fertigungsanlage vollständig in ihrem Engineeringprozess begleitet und dokumentiert werden. AutomationML stellt dafür die Grundvoraussetzung über die Darstellung der Strukturinformation durch das standardisierte Datenformat „CAEX“ (Computer Aided Engineering Exchange) bereit. Das CAEX-Datenformat ist ein Beschreibungsformat auf XML-Basis und dient zur übersichtlichen Beschreibung vollständiger Produktionsanlagen. Über die Unterteilung in Instanzhierarchien kann die Verknüpfung von unterschiedlichen Modellen und Daten verwirklicht werden. Das Datenformat wird über den Standard IEC 62424 definiert.

Zur Entwicklung neuer Integrationsschnittstellen zwischen Engineeringwerkzeugen und AutomationML, muss eine Export- und Importfunktion für die vorhandenen AutomationML-Dateien entwickelt werden. Diese Funktion wird meist für jedes Engineeringwerkzeug individuell definiert, da jedes Werkzeug unterschiedliche Daten aus dem AutomationML-Projekt benötigt und verwendet. Des Weiteren ist bei der Export-Funktion der Engineeringwerkzeuge zu beachten, dass die Daten auf standardisierte neutrale Austauschformate abgebildet werden, da sonst die Daten verloren gehen oder unlesbar werden. Nachdem die Daten in einem neutralen Austauschformat gespeichert sind, können die Daten einem AutomationML-Objekt im CAEX-Format zugeordnet werden. [9]

Ein Beispiel für ein neutrales Austauschformat von Geometrie- und Kinematikinformationen ist „Collada“. Dies ist ein XML-Format, das ebenfalls in AutomationML durch ein Interface implementiert ist. Zudem können mit Collada nicht nur einzelne Modelle beschrieben werden, sondern auch ganze Simulationsumgebungen [9]. Ein weiteres Austauschformat, das über eine Schnittstelle in AutomationML eingebunden werden kann, ist „PLCopen XML“. Das Format PLCopen XML ermöglicht das Speichern von Daten des Steuerungsaufbaus in Bezug auf Funk-

tionsbausteine und Variablen. Diese standardisierten Formate können über die AutomationML-Datei (CAEX) instanziert und referenziert werden. Das heißt, die CAEX-Datei verknüpft etwa eine PLCopen XML-Datei mit einem bestimmten Roboter und die Geometriebeschreibung in Collada ebenfalls, wie in **Bild 4** zu erkennen.

Über ein neutrales 3D-Austauschformat, wie etwa Collada, das in AutomationML verwendet wird und ein XML-basiertes Beschreibungsformat ist, können die Geometriedaten sowie kinematischen Eigenschaften in der Theorie von jeder Visualisierungssoftware mit einer geeigneten Schnittstelle ausgelesen werden. [10]

3 Konzeption für eine Integration von VIBN-Modellen in einer VR-Plattform

Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt (FuE) „MRiLS“ wird untersucht, wie eine Mensch-Maschine-Interaktion für Schulungsinhalte von industriellen Produktionsanlagen in einer VR umgesetzt werden kann [11]. Angelehnt an dieses Forschungsprojekt wird als VIBN Werkzeug in diesem Konzeptentwurf das Programm „ISG-virtuos“ betrachtet. Dabei wird die Schnittstelle für den Datenaustausch mit neutralen Datenformaten konzeptionell analysiert. Das Programm ISG-virtuos ermöglicht eine Echtzeitsimulation des Verhaltensmodells von einer Produktionsanlage sowie einer Kopplung der realen Steuerung. Für die Steuerung wird das Programm „TwinCAT“ von Beckhoff verwendet. Dieses besitzt bereits eine implementierte Schnittstelle für den Import und Export von Steuerungsdaten in dem neutralen Austauschformat PLCopen XML.

Des Weiteren soll aus den vorhandenen Daten eine Modellgenerierung in der VR-Plattform betrachtet werden. Dafür wird die Digital-Twin-as-a-Service-Plattform (DTaaSP) der Hochschule Esslingen verwendet, die es ermöglicht das Simulationsmodell in einer VR abzubilden [12]. Es wird ermittelt wie die Schnittstelle für den Datenaustausch von Modelldaten definiert

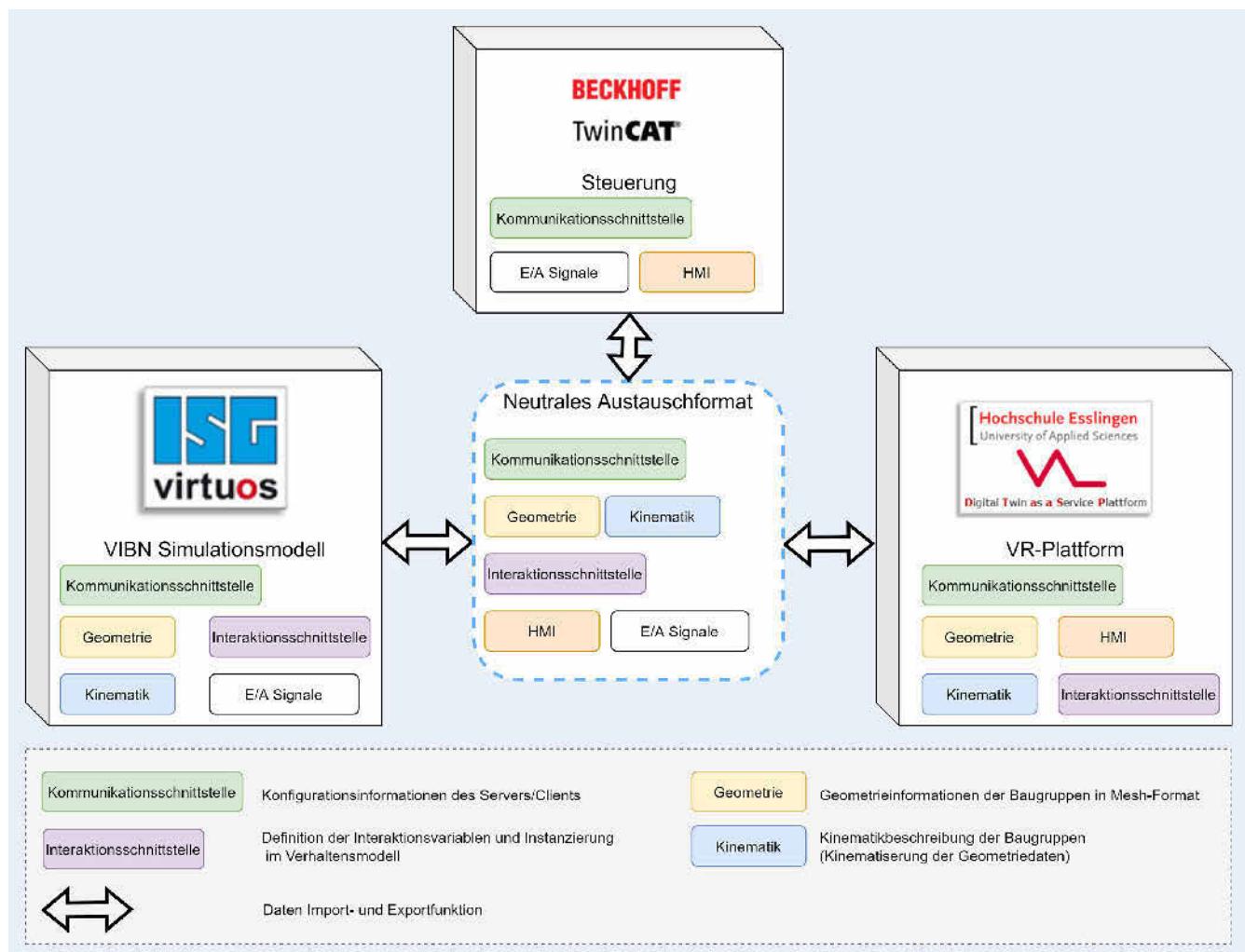


Bild 5. Definition der Austauschdaten für die Erweiterung einer VIBN (virtuellen Inbetriebnahme) um eine VR. Grafik: ISW

werden kann. Bei der Auslegung der Konzeption werden die notwendigen Schnittstellen der unterschiedlichen Engineeringwerkzeuge (Steuerung und VIBN-Programm) für eine automatische Modellgenerierung in einer VR-Plattform untersucht. Außerdem wird analysiert, wie die bereits vorhandenen Austauschformate von AutomationML im Konzept integriert werden können. Zuerst gilt es die Austauschdaten, die für die Umsetzung der oben beschriebenen Konzeptarchitektur (Bild 1) für eine VR-Erweiterung benötigt werden, zu identifizieren. Es werden die folgenden Daten, die in Bild 5 abgebildet sind, für die Generierung eines Simulationsmodells mit Interaktionsschnittstelle in einer VR-Umgebung benötigt:

- Geometrie- und Kinematikbeschreibung
- Konfiguration der Kommunikationsschnittstellen
- Variableninformationen der Eingangs- und Ausgangssignale
- HMI-Daten und Anbindungsschnittstelle
- Interaktionssignale und Schnittstellen

3.1 Austauschdaten der Steuerung

Um die Daten aus dem TwinCAT-Steuerungsprojekt in diesem Konzept in einem neutralen Austauschformat abbilden zu können, wird PLCopen XML verwendet. Dabei ist das XML-Format von PLCopen XML nach dem IEC-61131-Standard defi-

niert und über ein Interface mit AutomationML verknüpfbar [13]. In dem Format PLCopen XML können beispielsweise die Logik und die Variablen der SPS abgebildet werden. Dadurch ist es möglich, Daten der SPS, die in Steuerungssoftware erstellt wurden, in das PLCopen-XML-Format zu exportieren.

Die exportierten Daten, die sich in einer PLCopen-XML-Datei befinden, werden mit einem spezifischen AutomationML-Objekt verknüpft. Danach kann ein Engineeringwerkzeug mit geeigneter Importfunktion definierte Daten aus der PLCopen XML lesen und beispielsweise die Ein- und Ausgangsvariablen der SPS ermitteln. Die Auswahl der Daten wird durch die Anforderungen der Engineeringwerkzeuge definiert. Für den Anwendungsfall der Integration des Simulationsmodells in einer VR-Plattform sind die Information der Ein- und Ausgangsvariablen sowie die dazugehörigen Schnittstelleninformationen ausreichend.

3.2 Austauschdaten der HMI

Damit die standardmäßige Interaktion der VIBN in der VR umsetzbar ist, wird eine HMI benötigt, die mit der Steuerung verknüpft ist und einen Datenaustausch bereitstellt. Diese HMI umfasst alle Funktionen der realen HMI und wird in der VR-Umgebung integriert. Dies ermöglicht eine realitätsnahe Interaktion mit der HMI und der Produktionsanlage.

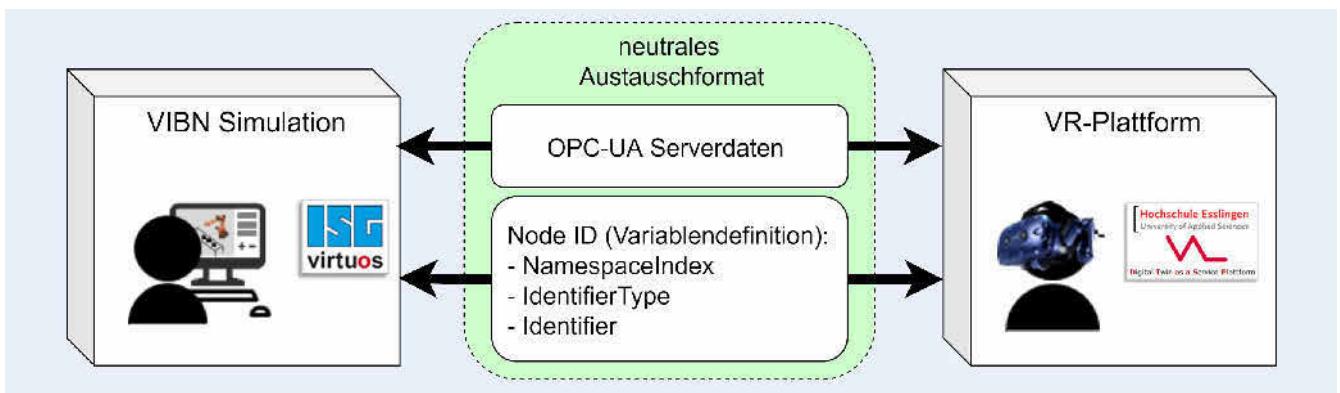


Bild 6. Definition der OPC-UA-Interaktionsvariablen. Grafik: ISW

In diesem Konzept wird davon ausgegangen, dass die HMI über einen Webserver in die VR-Simulation eingebunden wird und kein expliziter Austausch von Daten bezüglich der HMI notwendig ist. Eine andere Lösungsmöglichkeit wäre, die auf der Steuerung hinterlegten HMI-Variablen ebenfalls über das Austauschformat PLCopen XML den anderen Programmen für den Austausch zur Verfügung zu stellen. Dies hätte den Nachteil, dass die HMI-Visualisierung und -Logik in der VR-Simulation nachgebaut werden müsste.

3.3 Definition der Interaktionssignale und Kommunikationsschnittstellen

Ziel ist es, die aktuellen Positionen aus dem Verhaltensmodell aus ISG-virtuos an das VR-Modell zu übermitteln sowie eine Interaktionsschnittstelle zwischen VIBN-Modell und VR-Modell zu definieren. Dafür wird eine direkte Kommunikation zwischen VIBN- und VR-Modell notwendig. In dieser Konzeption wird von einer Kommunikation über eine OPC-UA-Schnittstelle zwischen ISG-virtuos und der DTaaSP der Hochschule Esslingen ausgegangen. Um die Informationen der Variablen automatisch in der VR-Umgebung und der VIBN-Simulation implementieren zu können, werden die Schnittstellendefinitionen in einem Austauschformat abgebildet. Die notwendigen Daten zeigt Bild 6 auf.

Damit die Interaktionsvariable zwischen den beiden Programmen automatisch verknüpft werden, wird die Konfiguration des OPC-UA-Servers sowie die Node-ID der Interaktionsvariablen benötigt. Durch den NamespaceIndex, IdentifierType und einen Identifier kann eine Node-ID definiert werden [6].

Der Datenaustausch bezüglich der OPC-UA-Variablen ist bidirektional und kann sowohl von der VIBN-Software als auch von der VR-Plattform initiiert werden. Für die Umsetzung könnte das neutrale Austauschformat PLCopen XML genutzt werden, da in diesem Format Definitionsmöglichkeiten für Variablen hinterlegt sind. Außerdem kann ebenfalls eine Serverkonfiguration in der XML-Struktur gespeichert werden.

3.4 Austauschdaten der Geometrie und Kinematik

Damit das Simulationsmodell aus ISG-virtuos in die VR-Umgebung integriert werden kann, werden die visuellen Geometriedaten in Form von CAD-Dateien oder Mesh-Dateien benötigt. Des Weiteren werden die kinematischen Informationen aus dem VIBN-Programm erforderlich, um entkoppelte Bewegungsabläufe

in der VR-Visualisierung darstellen zu können. Die folgenden Daten (Bild 7) sind notwendig, damit ein Austauschformat alle relevanten Informationen für die Visualisierung und Kinematisierung speichern kann:

Für jedes Bauteil muss eine 3D-Mesh-Datei im neutralen Austauschformat hinterlegt sein. Diese Mesh-Dateien werden über eine kinematische Beschreibung in Bezug zueinander gesetzt. Daraus ergibt sich eine kinematische Kette des Modells.

- Definition des Gelenktyps (rotierend, linear, prismatisch)
- Achsbegrenzung (Winkelangabe oder Achswerte)
- Position und Orientierung des Gelenks (Ursprungsbeschreibung)
- Verknüpfung von Variablen mit Gelenkwerten (PositionsvARIABLEN)
- Abhängigkeiten der verschiedenen Bauteile zueinander (kinematische Kette)

Diese Informationen werden in Form eines neutralen Austauschformats, wie beispielsweise Collada oder URDF (Unified Robot Description Format), für den Datenimport und -export zwischen den beiden Programmen bereitgestellt.

4 Ausblick

Für die Realisierung einer Virtual Reality an der VIBN ist eine automatische Generierung unverzichtbar, da die manuelle Implementierung bezüglich des Zeit- und Kostenaufwands den Nutzen der Erweiterung übersteigen. Durch die Ergänzung einer VR in der VIBN kann eine wesentliche Verbesserung im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion geschaffen werden.

In diesem Beitrag wurde ein Konzept für den Austausch der wesentlichen Daten für eine vereinfachte Modellgenerierung aufgezeigt. Dafür wurde vor allem auf die Kommunikationsschnittstelle für die Interaktionsmöglichkeiten und die Geometriebeschreibung mit Kinematisierung eingegangen. Die Erweiterung um eine VR-Visualisierung ist nur eine von wenigen Anwendungsfällen, in denen neutrale Austauschformate zwischen den Engineeringwerkzeugen wesentliche Vorteile bietet. Der komplette Engineeringprozess kann von einem neutralen Austauschformat profitieren.

Im Rahmen des FuE Projekts „MRiLS“ wird im weiteren Verlauf eine Umsetzung des betrachteten Konzepts zwischen den Forschungspartnern verfolgt, um gegebenenfalls zusätzliche Problemstellungen zu identifizieren.

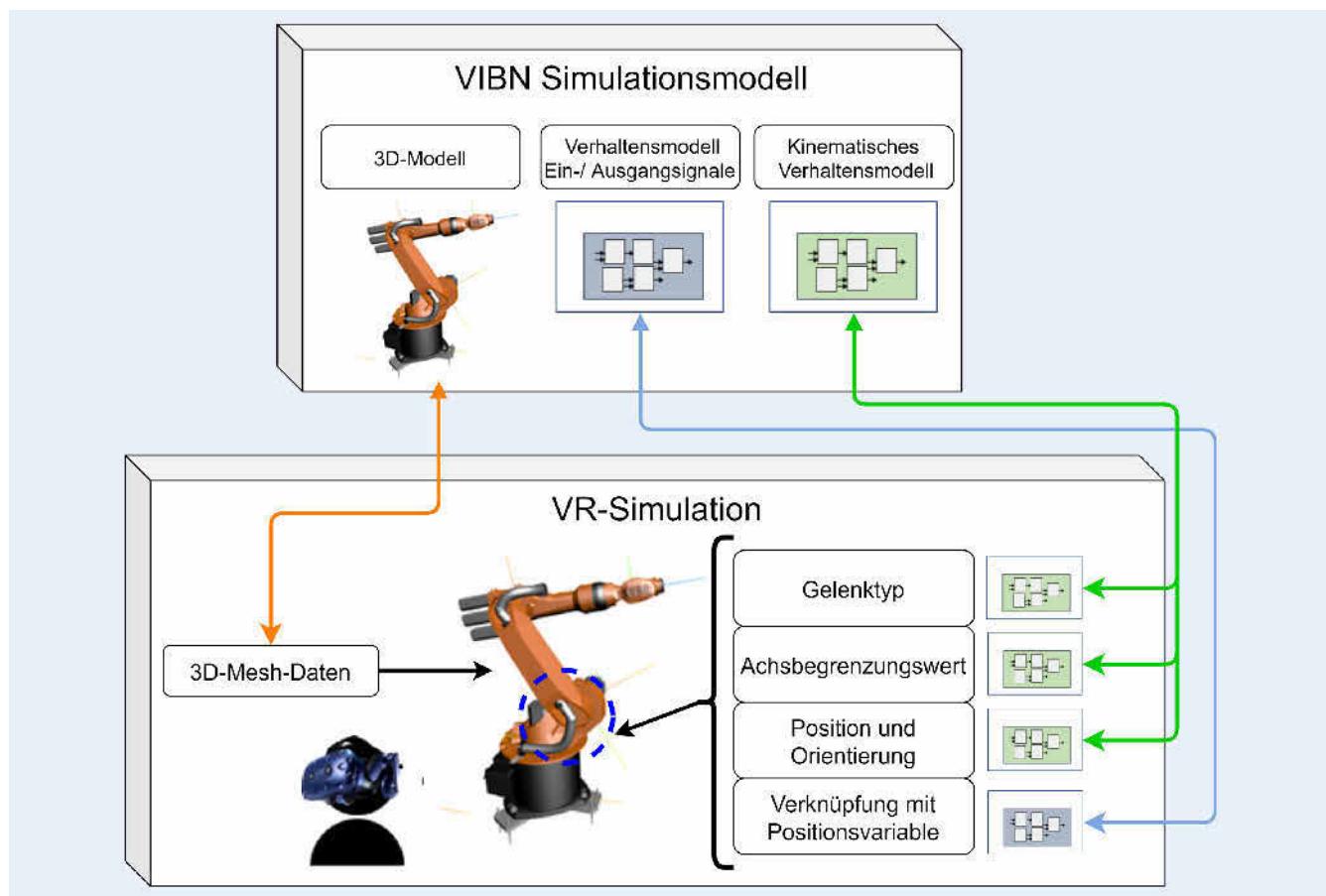


Bild 7. Definition Geometrie- und Kinematikinformationen am Beispiel eines Roboters. Grafik: ISW

DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16SV8344 – 16SV8348 gefördert.

L iteratur

- [1] Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Dissertation, Technische Universität München, 2007
- [2] Röck, S.: Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [3] Stark, R.; Damerau, T.; Lindow, K.: Industrie 4.0 – Digitale Neugestaltung der Produktentstehung und Produktion am Standort Berlin. In: Sendler, U. (Hrsg.): Industrie 4.0 grenzenlos. Heidelberg: Springer-Verlag 2016, S. 169–184
- [4] Buchholz, C. et al.: Hybrid Prototype-in-the-Loop: Frühzeitige Absicherung von Montageprozessen in der Anlagenplanung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 4, S. 240–245
- [5] Höning, J.; Schnierle, M.; Scheifele, C. et al.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation: Von Produktionssystemen zur Aus- und Weiterbildung. atp magazin 63 (2021) 6–7, doi.org/10.17560/atp.v63i6–7.2538
- [6] Jänicke, L.; Förder, T.: OPC UA: Kommunikation und Security. atp magazin 62 (2020) 3, doi.org/10.17560/atp.v62i3.2457
- [7] AshtariTalkhestani, B.: Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillingen automatisierter Systeme. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020
- [8] Weidemann, D.; Draht, R.: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. In: Draht, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Heidelberg: Springer-Verlag 2010, S. 1–43
- [9] Hundt, L.; Lüder, A.; Draht, R.; Grimm, B.: Verhaltensbeschreibung mit PLCopen XML. In: Draht, R. (Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Heidelberg: Springer-Verlag 2010, S. 135–193
- [10] Barnes, M.; Levy Finch, E. (eds): COLLADA-Digital Asset Schema Release 1.5.0. Stand: 2008. Internet: www.khronos.org/files/colla_da_spec_1_5.pdf. Zugriff am 18.08.2022
- [11] N. N.: Hybrides Interaktionskonzept für Schulungen mittels Mixed Reality in the Loop Simulation (MRiLS): Projektinformationen. Stand: 2022. Internet: www.mrls.de. Zugriff am 18.08.2022
- [12] Schnierle, M.; Polak, C.; Röck, S.: Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer Digital-Twin-as-a-Service-Plattform. atp magazin 61 (2019) 5, doi.org/10.17560/atp.v61i5.2415
- [13] IEC 61131-10:2019: Programmable controllers, Part 10: PLC open XML exchange format. Berlin: VDE Verlag 2019



Daniel Littfinski, M.Sc.
Foto: ISW

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
Universität Stuttgart
Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart
Tel. +49 711 / 685-82533
daniel.littfinski@isw.uni-stuttgart.de
www.isw.uni-stuttgart.de

Optimale Berechnung kompakter Sicherheitsbereiche für die Schutzaunlose Produktion

Effiziente Anlagenlayouts durch intelligente Simulation

S. Krusche, I. Al Naser, M. Bdiwi, S. Ihlenfeldt

Das Softwaretool „SafeZone“ erlaubt die effiziente und zuverlässige Berechnung von Sicherheitsbereichen (Safe Bereichen) für komplexe schutzaunlose Roboteranlagen, zum Beispiel im Karosseriebau und der Endmontage. Unter Berücksichtigung der realen Bewegungsbahnen und Geschwindigkeiten werden – im Gegensatz zum Status Quo – nur dort Gefahrenbereiche berechnet, wo auch Gefahren entstehen können. Das spart Platz und lässt Mensch sowie Roboter sicher näher zusammenrücken.

STICHWÖRTER

Simulation, Sicherheit, Industrieroboter

Optimal calculation of compact safety areas for fenceless production – Efficient Plant Layouts through intelligent Simulation

The „SafeZone“ software tool enables the efficient and reliable calculation of safety areas (safe zones) for complex robot systems without protective fences, such as car body construction and final assembly. Considering real motion paths and speeds, safe zones are calculated – in contrast to the status quo – only where hazards can occur. This saves space and allows humans and robots to move closer together safely.

1 Ausgangssituation

Moderne Fertigungskonzepte im Karosseriebau oder der Endmontage der Automobilindustrie erfordern schutzaunlose Roboterzellen, die eine flexible Zuführung von Material und Bauteilen ohne physische Barrieren wie Schutztore oder Zuführsysteme ermöglichen [1]. Um einen maximalen Schutz für Mensch und Maschine zu gewährleisten beziehungsweise Produktionsflächen effizient zu gestalten, bedarf es schon während der Planung und Konstruktion eine Abschätzung, welche Sicherheitsabstände zwischen Gefahrenquelle und Schutzeinrichtung einzuhalten sind beziehungsweise wie groß der benötigte Flächenbedarf ist. Für die Berechnung werden in den Normen unterschiedliche Formeln empfohlen, deren Anwendung meist nur für sehr einfache Anwendungsfälle vorgesehen ist oder ihre Komplexität zu Worst-Case-Annahmen führen. So basiert der Sicherheitsabstand in der DIN EN ISO 13855 rein auf dem möglich zurückgelegten Weg des Menschen innerhalb der Gesamtreaktionszeit des Systems [2]. Die Bewegung der Gefahrenquelle in Richtung Mensch wird dabei nicht miteinbezogen, was die Formel für die Anwendung hinsichtlich Roboterapplikationen unbrauchbar macht. In der DIN EN ISO 15066 [3] hingegen wird der Sicherheitsabstand als Summe des menschlichen Laufweges und der zurückgelegten Roboterbahn innerhalb der vorliegenden Reaktionszeit sowie der Anhalteweg des Roboters definiert, wie aus der Gleichung (1) entnommen werden kann:

$$S_p(t_0) = \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_h(t) dt + \int_{t_0}^{t_0+T_r} v_r(t) dt + \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt + C + Z_d + Z_r$$

(Gleichung zur Berechnung des Sicherheitsabstandes nach ISO/TS 15066 [3]).

Mit dieser Formel werden alle Faktoren berücksichtigt und die Berechnung des Sicherheitsabstandes entsprechend der Roboterbewegung ist möglich, dennoch ist der Umgang viel zu komplex. Bereits in der Planungsphase muss der Sicherheitsexperte die maximalen Geschwindigkeiten für die spätere Roboterbewegung festlegen, um eine Abschätzung in Bezug des benötigten Flächenbedarfs zu treffen. Im Falle eines Nichteinhaltens des Sicherheitsabstandes beziehungsweise eines zu großen Sicherheitsabstandes wird in vielen Fällen die Geschwindigkeit so reduziert, dass die Roboterapplikation ineffizient ist und Einhausung des Roboters wieder vorgenommen wird. Für eine einfache Applikation mit einem Roboter gestaltet sich die Berechnung des Sicherheitsabstandes sehr übersichtlich. Steigt jedoch die Anzahl der Roboter und die Komplexität der Prozessschritte wie im Karosseriebau der Automobilindustrie, wird es sehr schnell unübersichtlich.

2 Stand der Technik

Der Großteil der Literatur befasst sich mit der Erkennung und Vermeidung potenziellen Kollisionen. In [4] geben *Marvel* und *Bostelman* einen umfassenden Überblick über Metriken, die zur Modellierung und Bewertung von Kollisionen in verschiedenen Bereichen, einschließlich Robotik und Logistik, verwendet werden. Die Forschung umfasst Themen wie die Vorhersage der Bewegung des Bedieners und der zukünftigen Arbeitsraumbelegung des Roboters [5–8] sowie die Schätzung des Roboterbremsverhaltens [9–11], die für die Geschwindigkeits- und Abstandüberwachung von großer Bedeutung sind. Simulations-



Bild 1. Vorgehensweise zur Berechnung applicationsspezifischer kompakter Sicherheitsbereiche. *Grafik: IWU*

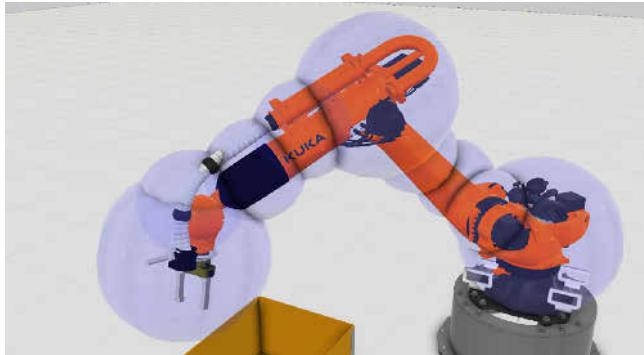


Bild 2. Robotermodell mit kugelförmigen Kollisionskörpern. *Grafik: IWU*

werkzeuge ermöglichen eine individuelle Bewertung (zum Beispiel hinsichtlich wirtschaftlicher Faktoren) und unterstützen damit die Auswahl einer geeigneten Methode zur Absicherung einer bestimmten Anwendung, wie die beispielsweise von *Lehment* und *Boca* [12]. Die in [13] vorgestellte Software zur Simulation von komplexen Szenarien der Mensch-Roboter-Kollaboration umfasst die Beschreibung und das Verständnis von interdisziplinären Zusammenhängen der Sicherheit. Neben der Generierung von Roboterbahnen mittels virtueller Robotersteuerung werden die menschlichen Bewegungen durch das Abspielen von realen Sensordaten repräsentiert, welche nur eine spezifische Handlung für begrenzten Zeitraum wiedergeben. Weiterhin gibt es verschiedene Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit aktiver Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, die Bereiche abdecken wie Sensorik, Methoden zur Bestimmung des Mindestabstands [14–16] und der zulässigen Robotergeschwindigkeit [14, 17]. Nach dem heutigen Stand gibt es noch keine intelligenten Softwaretools am Markt, die es ermöglichen, im Rahmen der Anlagenplanung die Sicherheitsbereiche bezüglich der applicationsspezifischen Roboterbewegung, des roboterspezifischen Bremsverhaltens und der sicherheitstechnischen Anforderungen auszulegen [18]. Aufgrund der dargestellten Vorgaben bedarf es eines intelligenten Softwaretools wie „Safe-Zone“ zur Berechnung von präzisen kompakten Sicherheitsbereichen, die es schon während der Planungsphase ermöglichen, das Anlagenlayout sowie das Sicherheitskonzept unter wirtschaftlichen Aspekten wie Taktzeit und Flächenbedarf effizient zu optimieren.

3 Lösungsansatz

Zur Gewährleistung der Nutzerfreundlichkeit und Integration in die Planungskette ist das Softwaretool Safe-Zone so konzipiert, dass dieses als Plug-In in verfügbare Robotersimulationen integrierbar ist. Somit kann sehr schnell auf bereits bestehende CAD-Daten, Anlagen- und Prozessmodelle zugegriffen werden beziehungsweise steht dem Sicherheitsexperten immer der aktuelle Stand der Planung zur Verfügung. Hinsichtlich des Robotertyps

ist das Softwaretool herstellerunabhängig, es kann aufgrund des generischen RobotermodeLLS im Hintergrund alle marktverfüglichen Varianten an Industrierobotern und Cobots abbilden. Aktuell ist das Softwaretool Safe-Zone in die Simulationsumgebung „Visual Components“ [19] integriert, wodurch auf eine umfangreiche Bibliothek an Robotern zugegriffen werden kann.

3.1 Modellierung und Konfiguration

Anhand der dargestellten Vorgehensweise in **Bild 1** werden die notwendigen Schritte zur Vorbereitung beziehungsweise Konfiguration der Sicherheitsbereichsberechnung beschrieben.

1. Zuerst gilt es, die komplette Roboteranlage mit all seinen Komponenten wie Betriebsmitteln, Anlagenteilen und Robotern in der Simulationsumgebung mittels CAD-Daten aufzubauen. Hauptfokus hierbei liegt auf dem Roboter mit seiner kinematischen Kette und den genutzten Endeffektoren wie Bauteilgreifern oder Fügewerkzeugen, deren Störkonturen in Form von 3D-Kollisionskörpern abzubilden sind, wie in **Bild 2** ersichtlich ist. Das dynamische Kollisionsmodell des gesamten Roboters inklusive Endeffektors bildet die Grundlage zur Berechnung der kompakten Sicherheitsbereiche. Im Bild 2 wird ersichtlich, dass die gesamte Kontur des Roboters inklusive des Werkzeuges durch die kugelförmigen Kollisionskörper abgedeckt ist. Somit ist gewährleistet, dass neben dem Endeffektor des Roboters auch weitere Teilkörper des Roboters bei Berechnung des Sicherheitsbereiches betrachtet werden.
2. Im zweiten Schritt sind die Roboterbewegungen der einzelnen Prozessequenzen zu programmieren und zu simulieren. Anhand der entstehenden Roboterbahnen mit den entsprechenden Geschwindigkeiten wird ersichtlich, wie sich die Bewegung durch den Raum beziehungsweise durch das Anlagenmodell im Dreidimensionalen gestaltet. Voraussetzung hierfür ist, dass die Simulationsumgebung über einen virtuellen Robotercontroller verfügt, welche es ermöglicht, herstellerspezifische Roboterprogramme realitätsnah zu simulieren.
3. Als Abschluss sind die sicherheitsbezogenen Parameter entsprechend normativen Vorgaben anzugeben. Neben den Reaktionszeiten der Sicherheitssensorik und Sicherheitssteuerung ist die menschliche Annäherungsgeschwindigkeit zu definieren. Bei der Berechnung der kompakten Sicherheitsbereiche wird von einer konstanten Geschwindigkeit des Menschen ausgegangen. Je nach Use-Case können die normativen Werte [2] angegeben werden, wie zum Beispiel Ganzkörperbewegungen (i.d.R. 1,6 m/s) oder Teilkörperbewegungen (Hand-, Arm-, Fuß-, Beinbewegung, i.d.R. 2,0 m/s). Weiterhin kann zusätzlich das Gewicht des Endeffektors (Ausladung in %) und ein Eindringabstand C, welche abhängig von der Auflösung der Sicherheitssensorik ist, angegeben werden [20]. Nach Definition der normativen Parameter ist die Konfiguration abgeschlossen und die Daten zur Berechnung der kompakten

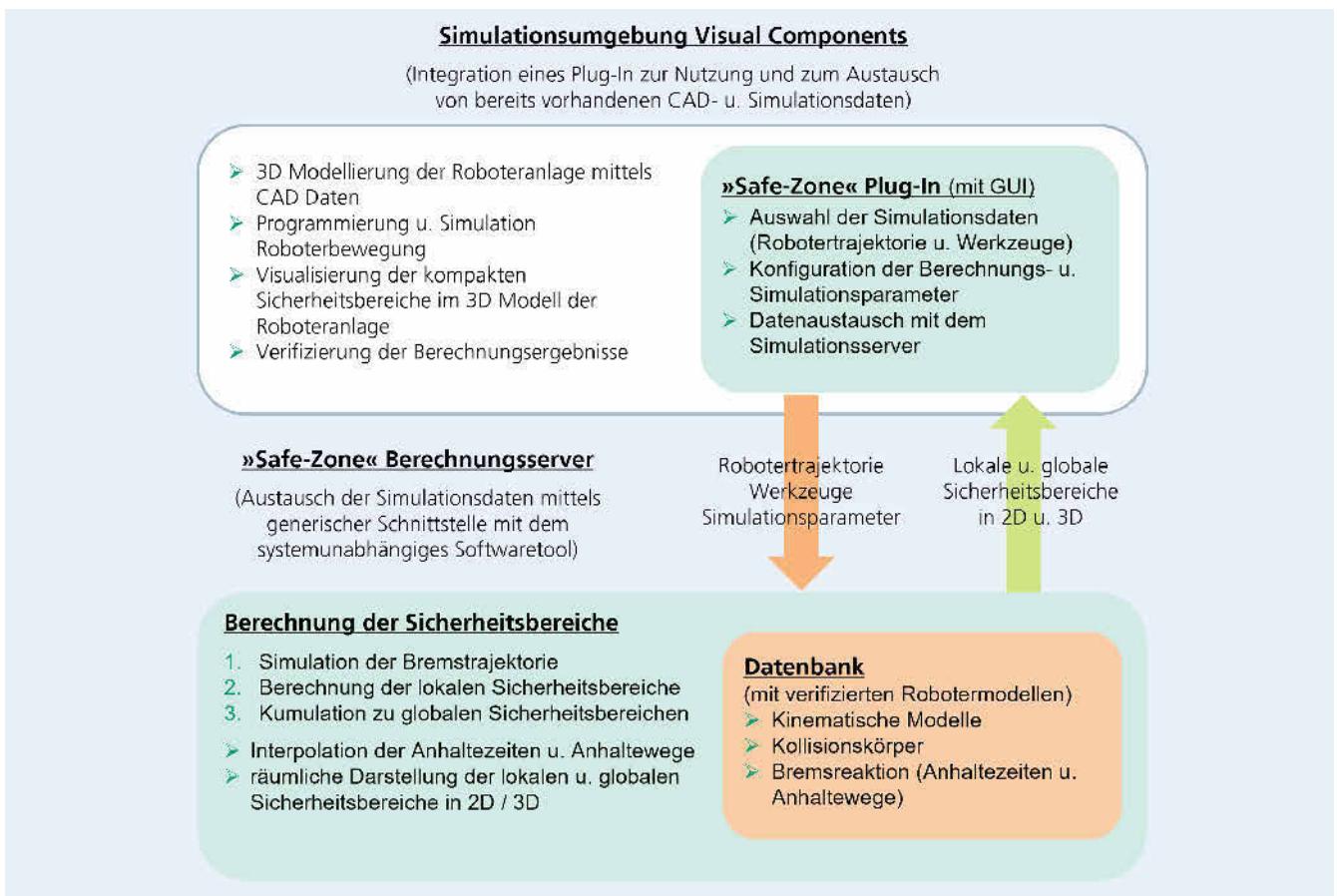


Bild 3. Zusammenwirken zwischen der Simulationsumgebung „Visual Components“ dem Plug-In und dem Berechnungsserver. *Grafik: IWU*

Sicherheitsbereiche werden an das Softwaretool Safe-Zone übergeben. In **Bild 3** ist das Zusammenwirken zwischen der Simulationsumgebung, dem Plug-In und dem Berechnungsserver schematisch dargestellt. Für die Übergabe ist eine generische roboterunabhängige Schnittstelle vorgesehen, welche es ermöglicht, das Softwaretool als Berechnungsserver an jede beliebige Robotersimulationssoftware wie „Visual Components“, „RoboDK“, „Kuka.Sim“ oder „Process Simulate“ anzubinden [19, 21–23]. Voraussetzung für eine Integration sind offene Schnittstellen zum Auslesen der Anlagen- und Prozessdaten für die Berechnung der kompakten Sicherheitsbereiche.

3.2 Berechnung der kompakten Sicherheitsbereiche

Anschließend werden auf Basis der Angaben bezüglich des Robotertyps intern im Berechnungsserver die zugehörigen digitalisierten Anhaltezeiten und Anhaltewinkel für die Stoppkategorie 1 aus einer Datenbank ausgewählt und interpoliert. Die Angaben bezüglich des Bremsverhaltens der Roboter werden aus den Datenblättern der Roboterhersteller entnommen und entsprechen den Vorgaben der EN ISO 10218-1 [24]. Auf Basis der digitalisierten Herstellerangaben werden die Anhaltezeiten und -winkel zwischen den Hauptgeschwindigkeitsintervallen ($POV = 33\%, 66\%, 100\%$) für die vorliegende Auslenkung (Entfernung des Roboter Tool Center Points zur Roboterbasis in %) und die Ausladung (Gewicht des Endeffektors in %) interpoliert. Durch die Interpolation des Bremsverhaltens ist es möglich, die tatsächli-

chen erforderlichen Anhaltezeiten und Anhaltewinkel für den jeweiligen Bahnpunkt zu ermitteln.

Nach Interpolation der Bremskennlinien für den vorliegenden Robotertyp startet die Berechnung der Sicherheitsbereiche, welche sich in die im **Bild 4** dargestellten Stufen unterteilt:

1. Im ersten Schritt wird für jeden Bahnpunkt der Roboterrajektorie die entsprechende Bremstrajektorie im Gelenkkraum auf Basis der aktuellen Gelenkgeschwindigkeiten und dem sich daraus ergebenden interpolierten Anhaltewinkel simuliert. Aufgrund der erforderlichen Bahntreue durch die Stoppkategorie 1 verlaufen die Bahnwinkel der Bremstrajektorie entlang der eigentlichen Roboterrajektorie. Zur Veranschaulichung ist in der linken Abbildung des Bildes 4 das Simulationsergebnis im kartesischen Raum für einen Kollisionskörper dargestellt.
2. Mithilfe der simulierten Bremstrajektorie im Gelenkkraum werden jetzt die richtungs- und geschwindigkeitsbezogenen lokalen Sicherheitsbereiche als 3D-Hüllkurve im kartesischen Raum berechnet. Hierfür wird das kinematische Modell inklusive Kollisionsmodell auf Basis der Gelenkwinkel für jeden Bahnpunkt der Bremstrajektorie aktualisiert und zu einem lokalen Sicherheitsbereich kumuliert. Das Ergebnis für einen Kollisionskörper ist in der mittleren Abbildung von Bild 4 zu sehen.
3. Die berechneten lokalen Sicherheitsbereiche werden am Ende über die gesamte Roboterrajektorie kumuliert, wodurch ein globaler Sicherheitsbereich für die gesamte Roboterbewegung entsteht. Das Ergebnis der globalen Kumulation in Bezug auf

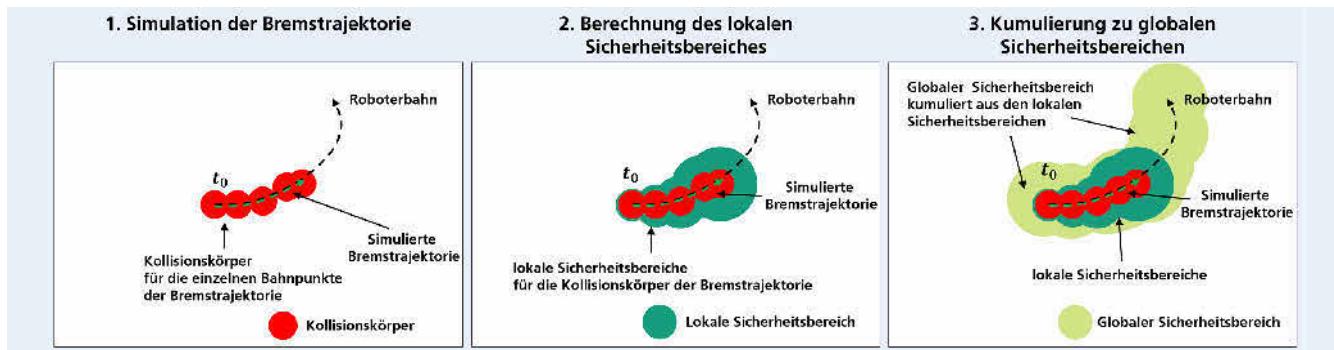


Bild 4. Stufenweise Berechnung des Sicherheitsbereiches für einen Kollisionskörper des Roboters zum Zeitpunkt. Grafik: IWU

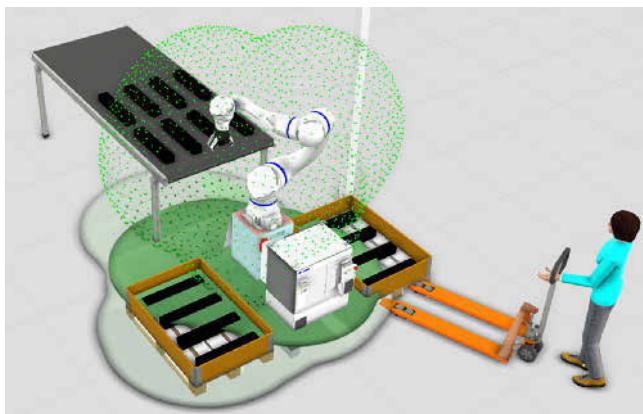


Bild 5. Berechnete 3D-Hüllkurve für die gesamte Roboterkontur zu einem Zeitpunkt der Roboterbahn im CAD-Anlagenmodell. Grafik: IWU

einen lokalen Sicherheitsbereich ist in der linken Abbildung im Bild 4 ist dargestellt.

Anhand der lokalen und globalen Sicherheitsbereiche können optimal die räumlichen Ausprägungen und mögliche Engstellen erfasst werden. Die Ergebnisse werden nach Ende der Berechnung vom Softwaretool Safe-Zone mittels generischer Schnittstelle wieder an die Simulationsumgebung Visual Components übergeben und in Form von 2D-Sicherheitsbereichen und

3D-Hüllkurven im Anlagenmodell visualisiert, wie aus Bild 5 ersichtlich wird. Mithilfe der lokalen Sicherheitsbereiche im zweidimensionalen Raum kann der Anlagenplaner beziehungsweise Sicherheitsexperte gut abschätzen, in welchem Abschnitt der Roboterbewegung sich die größten Sicherheitsabstände ergeben und kann gegebenenfalls durch Anpassung der Roboterbahn (Bahnpunkte, Geschwindigkeit und Beschleunigung) die Sicherheitsbereiche optimieren.

Das Softwaretool Safe-Zone ermöglicht während der Planungsphase eine präzise Abschätzung des Flächenbedarfs der Sicherheitsbereiche und eine Optimierung des Sicherheitskonzeptes durch iteratives Anpassen der normativen Parameter sowie der Roboterbahn.

4 Zusammenfassung

Mithilfe der innovativen Methode zur automatisierten Berechnung von kompakten Sicherheitsbereichen für eine schutzaulose Produktion ergeben sich nicht nur viele Vorteile für den Nutzer in seiner Tätigkeit als Planer und Sicherheitsexperte, sondern auch in Bezug von Kosteneffizienz.

- Durch die roboterbahnbezogene hochgenaue Bestimmung der Schutzfeldbereiche ergeben sich erhebliche Flächeneinsparungen für die Roboteranlage im Gegensatz zu der Auslegung mittels konventioneller Methodiken, wie im Bild 6 qualitativ dargestellt.

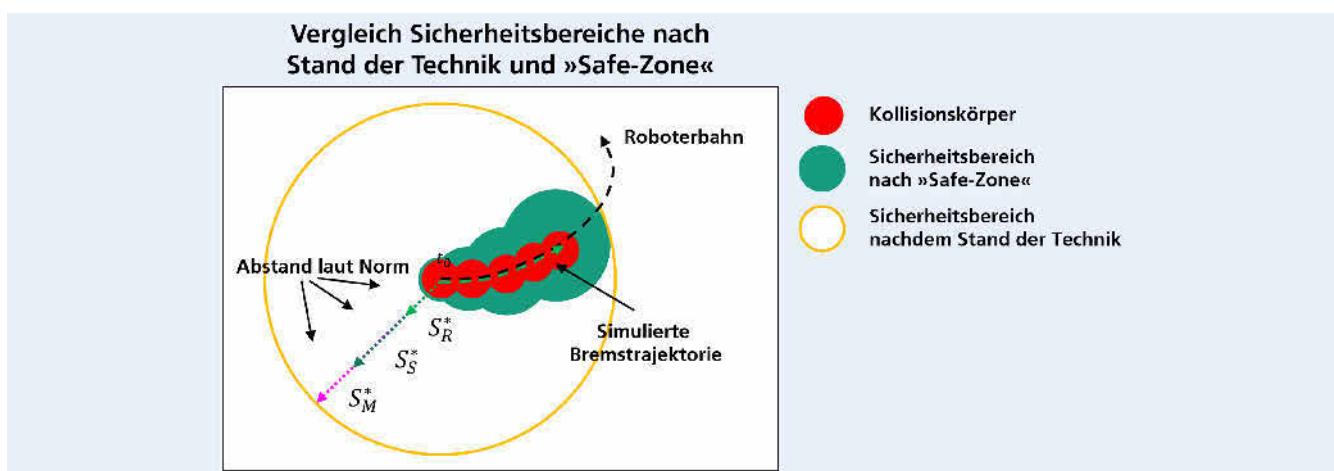


Bild 6. Qualitative Darstellung der Flächeneinsparung durch das Softwaretool „Safe-Zone“ gegenüber der Berechnung nach dem Stand der Technik für einen Kollisionskörper. Grafik: IWU

Tabelle. Beschreibung der Variablen zur Berechnung des Sicherheitsabstandes nach ISO/TS 15066.

$S_v(t_0)$	Sicherheitsabstand zum Zeitpunkt t_0	v_r	Geschwindigkeit des Roboters
T_r	Ansprechzeit des Robotersystems (Sensorreaktionszeit, Signalverarbeitungszeit und Reaktionszeit der Robotersteuerung)	v_s	Geschwindigkeit des Roboters beim Abbremsen
T_s	Anhaltezeit des Roboters (von der Aktivierung des Stoppbefehls bis zum Stillstand)	v_h	gerichtete Geschwindigkeit einer Bedienperson
C	Eindringabstand in das Schutzfeld bis zur Erkennung einer Person		
Z_d	Positionsunsicherheit der Bedienperson	Z_r	Positionsunsicherheit des Robotersystems

- Die Methode ermöglicht eine schutzaunlose Gestaltung von Roboteranlagen und damit die Gewährleistung einer schnellen Zugänglichkeit, wodurch zum Beispiel der Wechsel von Bereitstellungskomponenten für Material beschleunigt werden kann.
- Weiterhin verringern sich die Aufwände in der Planungsphase erheblich durch die realitätsnahe roboterbahnbezogene Simulation und die Ergebnisse können direkt für die Inbetriebnahme der Anlage genutzt werden, was zur Reduzierung der Aufwände in der Anlaufphase führt.

Abschließend können die Berechnungsergebnisse direkt als Sicherheitsnachweis verwendet werden. Das Softwaretool erstellt automatisch eine Zusammenfassung, welche in die Gesamtdokumentation der Anlage integrierbar ist.

5 Ausblick

Das Softwaretool Safe-Zone ist ein Baustein für die gesamtheitliche Simulation beziehungsweise Planung von Roboteranlagen für die schutzaunlose Fertigung. Auf Basis der Ergebnisse ist es möglich, weitere Schutzeinrichtungen der Roboteranlagen auszulegen beziehungsweise lassen sich die Ergebnisse direkt zur Realisierung verwenden.

- Ableitung des optimalen Sensorlayouts: Anhand der berechneten globalen Sicherheitsbereiche wird ersichtlich, welche Flächen es durch berührungsloswirkende Sicherheitssensoren wie Bodenscanner oder Lichtgitter abzusichern gilt.
- Auslegung von durchschlagsfesten Einhausungen: Durch Berechnung des Nachlaufweges und der Restenergie bei Kollision sind notwendige konstruktive Eigenschaften der trennenden Schutzeinrichtung ableitbar.
- Konfiguration von Arbeits- und Schutträumen: Mithilfe der 3D-Hüllkurve lassen sich quadratische Bereiche ableiten, die direkt in der Sicherheitskonfiguration der Robotersteuerung implementierbar sind.

Sicherheit ist die oberste Maxime bei der Gestaltung von schutzaunlosen Roboteranlagen. Daher ist die Methode durch einen vereidigten Sachverständigen für Maschinensicherheit geprüft und als normkonform bestätigt. Das Softwaretool Safe-Zone ist nicht nur für die Planung von Roboteranlagen mit konventionellen Industrierobotern geeignet, es können auch moderne kollaborierende Systeme nach ISO/TS 15066 verwirklicht werden [20, 25].

L i t e r a t u r

- [1] Vogel, C.; Fritzsche, M.; Elkemann, N.: Safe human-robot cooperation with high-payload robots in industrial applications, 2016, p. 529–530
- [2] DIN EN ISO 13855:2010-10: Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen. International Organization for Standardization, 2010
- [3] DIN ISO/TS 15066:2017-04: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter. International Organization for Standardization, 2017
- [4] Marvel, J. A.; Bostelman, R.: A Cross-Domain Survey of Metrics for Modelling and Evaluating Collisions. International Journal of Advanced Robotic Systems, 11 (2014) 9, p. 142
- [5] Ragaglia, M.; Zanchettin, A. M.; Rocco, P.: Trajectory generation algorithm for safe human-robot collaboration based on multiple depth sensor measurements. Mechatronics, 55 (2018), p. 267–281
- [6] Balan, L.; Bone, G. M.: „real-time 3D Collision Avoidance Method for Safe Human and Robot Coexistence, 2006, p. 276–282
- [7] Mainprice, J.; Berenson, D.: Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion, 2013, p. 299–306
- [8] Pereira, A.; Althoff, M.: Overapproximative arm occupancy prediction for human-robot co-existence built from archetypal movements, 2016, p. 1394–1401
- [9] Dietz, T.; Verl, A.: Simulation of the stopping behavior of industrial robots using a complementarity-based approach, 2011, p. 428–433
- [10] Salmi, T.; Vaeaetaineen, O.; Malm, T.; Montonen, J.: Safety Challenges of Transferable Robotic Systems, 2012, p. 1–6
- [11] Lange, F.; Suppa, M.: Trajectory generation for immediate path-accurate jerk-limited stopping of industrial robots, 2015, p. 2021–2026
- [12] Vicentini, F.; Pedrocchi, N.; Giussani, M.; Molinari Tosatti, L.: Dynamic safety in collaborative robot workspaces through a network of devices fulfilling functional safety requirements, 2014, p. 1–7
- [13] Bobka, P.; Germann, T.; Heyn, J. K.; Gerbers, R.; Dietrich, F.; Dröder, K.: Simulation Platform to Investigate Safe Operation of Human-Robot Collaboration Systems. Procedia CIRP, 44 (2016), p. 187–192
- [14] Marvel, J. A.: Performance Metrics of Speed and Separation Monitoring in Shared Workspaces. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 10 (2013) 2, p. 405–414, 2013
- [15] Chen, M.; Zalzala, A. M. S.: A genetic approach to motion planning of redundant mobile manipulator systems considering safety and configuration. Journal of Robotic Systems, 14 (1997) 7, p. 529–544
- [16] Trautman, P.; Krause, A.: Unfreezing the robot: Navigation in dense, interacting crowds, 2010, p. 797–803
- [17] Lazevic, B.; Rocco, P.: Kinetostatic danger field – a novel safety assessment for human-robot interaction, 2010, p. 2169–2174
- [18] Zhang, P.; Hornig, D.; Deemann, D.; Bauer, S.: Digitale Planung für schutzaunlosen Robotereinsatz. wt Werkstattstechnik online, 108 (2018) 09, p. 568–573
- [19] Visual Components, 2022. Internet: <https://www.visualcomponents.com/de/>. Zugriff am 20.5.2022
- [20] DIN EN ISO 13857:2020-04, Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen. International Organization for Standardization, 2020
- [21] RoboDK, 2022. Internet: <https://robodk.com/simulation>. Zugriff am 20.5.2022
- [22] Kuka Software „Kuka.Sim“ 2022. Internet: www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/planung-projektierung-service-sicherheit/kuka_sim. Zugriff am 20.5.2022
- [23] Siemens PLM 2022. Internet: www.plm.automation.siemens.com/de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/robotics/process-simulate.shtml. Zugriff am 20.5.2022



- [24] DIN EN ISO 10218-1:2012-01: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter. International Organization for Standardization, 2012
- [25] Colgate, E.; Wannasuphoprasit, W.; Peshkin, M.: Cobots: robots for collaboration with human operators. In: Cobots: robots for collaboration with human operators, 1996



Sebastian Krusche, M.Sc.
Foto: Autor

Ibrahim Al Naser, M.Sc.

Dr.-Ing. Mohammad Bdwi

Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz
Tel. +49 371 / 5397-1105
sebastian.krusche@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Flexibilität und Sicherheit bei Planung und Durchführung von Mensch-Roboter-Kollaboration

Kollaborative Montageprozesse mit Behavior Trees

M. Trinh, M. Behery, O. Petrovic, C. Brecher, G. Lakemeyer

Die kollaborative Montage vereint die Vorteile der manuellen Montage, wie Flexibilität und Fingerfertigkeit des Menschen, sowie der automatisierten Fertigung durch die Präzision und Effizienz des Roboters. Kleinen und mittleren Unternehmen fehlt oft die Expertise, um solche Prozesse – vor allem bei einer hohen Produktvarianz – zu planen und durchzuführen. Dieser Beitrag stellt ein Framework mit Behavior Trees vor, um das Problem unter Einhaltung der Sicherheitsstandards zu vereinfachen.

STICHWÖRTER

Montage, Automatisierung, Industrieroboter

Collaborative Assembly Processes using Behavior Trees

Collaborative assembly combines the advantages of manual assembly, e.g. flexibility and dexterity of the human, as well as of automated manufacturing using the precision and efficiency of robots. Small and medium-sized businesses often lack the expertise to plan and execute such processes, especially in case of high product variances. This paper introduces a framework using behavior trees in order to simplify the problem while complying with safety standards at the same time.

1 Überblick

Der Trend zu variantenreichen und kundenindividuellen Produkten sowie zur Verkürzung der Time-To-Market erfordert eine erhöhte Flexibilität des Produktionsprozesses. Die Montage wird aufgrund ihrer Marktnähe als letzter Produktionsschritt besonders davon beeinflusst. Ein Optimierungspotenzial bietet die kollaborative Montage, welche die Vorteile der manuellen (Flexibilität und Fingerfertigkeit) und automatisierten (Effizienz und Qualitätsvorteile) Montage vereint. Nachteilig an der Automatisierung ist die notwendige Expertise, woran es kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) häufig mangelt.

Bei der Planung und Durchführung von kollaborativen Montageprozessen sind besonders zwei Aspekte relevant: Flexibilität und Sicherheit. Zum einen muss eine unkomplizierte Anpassung des Prozesses bei Veränderungen möglich sein, ohne die Notwendigkeit eines Robotik-Experten. Die Mehrheit der Roboterhersteller wie die Franka Emika GmbH oder Rethink Robotics Inc. bieten grafische Benutzeroberflächen an, welche die codebasierte Programmierung ersetzen. Die Prozessplanung wurde in [1] mit Hilfe eines simulationsbasierten Frameworks weiter vereinfacht und beispielsweise in [2] eine Methode zur automatisierten Planung basierend auf Reinforcement Learning (RL) entwickelt. Die Kollaboration als höchstes Level der Interaktion zwischen Mensch und Roboter (gemeinsamer Arbeitsraum sowie Tätigkeit) erfordert strenge Sicherheitsstandards, welche in [3] und [4] festgelegt sind und beispielsweise Geschwindigkeitsgrenzen für Cobots festlegen. In [5] werden die internen Sicherheitsfunktionen eines Cobots mit externen Sensoren und Kamerasystemen erweitert, um Kollisionen zwischen Mensch und Roboter unter

Beibehaltung der Prozesseffizienz zu verhindern. Ein Algorithmus wurde zum Beispiel in [6] entwickelt, welcher in Echtzeit Trajektorien zur Vermeidung von Hindernissen berechnen kann.

Die derzeit entwickelten Methoden stellen oft Insells Lösungen dar, welche nicht unmittelbar auf jede Roboterart anwendbar sind. Weiterhin ist in den meisten Fällen eine Erweiterung um weitere Funktionen mit einer aufwendigen Anpassung des Gesamtsystems verbunden. Dieser Beitrag stellt daher eine ganzheitliche Lösung mithilfe von Behavior Trees (BT) vor, welche das Verhalten eines Systems in einer anschaulichen Baumstruktur modellieren. Sie sind leicht modifizier- sowie erweiterbar und können durch ihre Reaktivität sichere Prozesse gewährleisten. Im Projekt „CoboTrees“ innerhalb des Exzellenzclusters „Internet of Production“ [7], werden BT zur herstellerunabhängigen Optimierung von kollaborativen Montageprozessen entwickelt. Innerhalb des Clusters wird die digitale Transformation der Produktionstechnik, vor dem Hintergrund von disruptiven Veränderungen durch die Globalisierung, erforscht. Dies betrifft vor allem KMUs, welche durch Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen können. Im Folgenden werden BT sowie das Konzept CoboTrees zur flexiblen und sichereren Prozessplanung / -durchführung mithilfe von neuartigen BT-Erweiterungen vorgestellt.

2 Behavior Trees

BT sind mathematische Modelle, die das Verhalten eines Systems oder einen Prozess in einer hierarchischen Baumstruktur abbilden, [8, 9]. Sie sind mit Zustandsautomaten vergleichbar mit

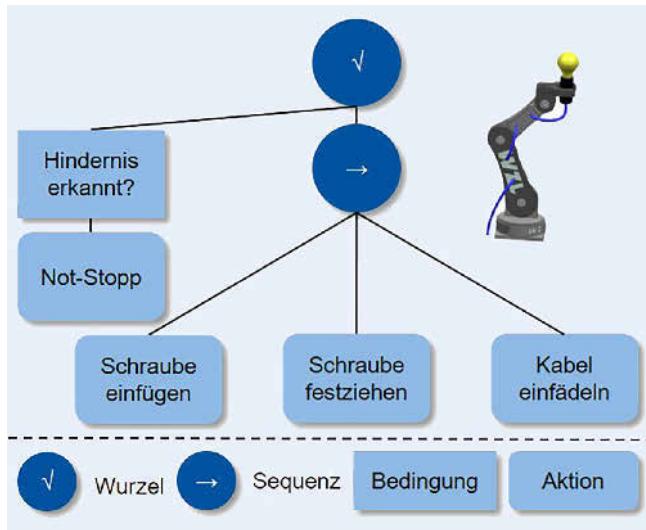


Bild 1. Behavior Tree für den Montageprozess einer Lampe.

Grafik: WZL der RWTH Aachen



Bild 2. „CoboTrees“ Demonstrator im Smart Automation Lab.

Foto: WZL der RWTH Aachen

dem Hauptunterschied, dass sie aus Aufgaben und nicht aus Zuständen bestehen.

Ein beispielhafter BT ist in **Bild 1** für den einfachen Montageprozess einer Lampe dargestellt. BT bestehen aus verschiedenen Knoten, allen voran dem Wurzelknoten, die durch Kanten miteinander verbunden sind. Daneben gibt es zwei Arten von Ausführungsknoten: Aktion und Bedingung. Aktionsknoten bilden ein unabhängiges, zielorientiertes und reaktives Verhalten beziehungsweise eine Aufgabe ab, während Bedingungsknoten überprüfen, ob eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. Im Montagebeispiel kontrolliert der BT, ob sich ein Hindernis im Arbeitsraum des Roboters befindet und führt den Not-Stopp aus, sofern dies der Fall ist. Ist dies nicht der Fall, so führt der BT eine Sequenz von drei Teilaufgaben aus, um die Lampe zu verschrauben und zu verkabeln. Mit Knoten zur Flusskontrolle ist eine sequentielle, parallele oder benutzerdefinierte Anordnung von Ausführungsknoten möglich. Ein weiterer Knoten dieser Art ist der Selektor, welcher eine Aufgabensequenz bis zur ersten erfolgreichen Teilaufgabe ausführt. Das Durchlaufen des Baums wird durch Ticks geregelt, die in regelmäßigen Abständen (zum Beispiel im Millisekundentakt) von der Wurzel beginnend von oben nach unten

sowie links nach rechts an die folgenden Knoten weitergegeben werden. Ein Knoten wird dabei nur ausgeführt, wenn er einen Tick erhält und gibt einen der drei Werte aus: „Running“ – die Aufgabe wird gerade ausgeführt, „Success“ – die Ausführung der Aufgabe war ein Erfolg und „Failure“ – die Aufgabe war ein Misserfolg. Bedingungsknoten geben nur Success oder Failure zurück, je nachdem, ob eine Bedingung erfüllt ist oder nicht.

BT können komplexe Prozesse mithilfe von einfachen Teilaufgaben modellieren. Sie dienen zugleich als Ausführungsmodul, indem spezifische Arbeitsanweisungen zum Beispiel für den Roboter in den Knoten programmiert werden. Eigenständige Unterbäume können hinzugefügt oder entfernt werden, je nachdem, ob ein Montageschritt dazu kommt oder entfällt. Durch die Bedingungsknoten sind BT reaktiv, denn diese werden permanent getickt und lösen unmittelbar eine Aktion bei Erfüllung der Bedingung aus. Im Montagebeispiel, wird der Knoten „Hindernis erkannt“ kontinuierlich evaluiert, unabhängig davon, welche Aktion die anderen Knoten ausführen. BT werden in der industriellen Robotik zum Beispiel für simple Greifaufgaben verwendet [8, 9]. Dieses Paper beschreibt einen Ansatz, mit dem BT weiterentwickelt und für komplexe Anwendungen wie die MRK optimiert werden können.

3 CoboTrees-Framework

Um eine herstellerunabhängige Lösung zu entwickeln, wird im Projekt CoboTrees das Robot Operating System (ROS) verwendet, welches von den meisten Roboterherstellern unterstützt wird. Für die Programmierung der BT wird auf die Python-basierte Bibliothek „py_trees_ros“ [10] zurückgegriffen, welche mit ROS kompatibel ist. Der Demonstrator zur experimentellen Evaluation des CoboTrees-Frameworks besteht aus dem Cobot „M1013“ von Doosan Robotics, einer Arbeitszelle sowie einer Intel RealSense „D435“ Kamera (siehe **Bild 2**). Im weiteren Verlauf des Projektes wird das entwickelte Framework auf einen „Panda“ Cobot von Franka Emika für eine textiltechnische MRK-Anwendung übertragen.

In Bild 1 ist eine starre Sequenz von drei Teilaufgaben vorgegeben (einfügen → festziehen → einfädeln), da die einzelnen Teilaufgaben aufeinander aufbauen. Ist allerdings keine feste Reihenfolge der Aufgaben notwendig (zum Beispiel ob eine Schraube vor der anderen eingefügt wird), kann eine veränderte Art von Sequenzknoten angewendet werden. Die dynamischen Sequenzknoten („dynamics sequence nodes“ – DSN) sind eine neuartige Entwicklung, um eine automatische Anordnung von Teilaufgaben während der Bearbeitung vorzunehmen. Die DSN berechnen anhand einer spezifizierten Kostenfunktion eine optimale Reihenfolge der Teilaufgaben. Die DSN wurden zunächst in der simulativen Overcooked Umgebung [12] anhand der Ausführungszeit und Aktionsqualität, welche unter anderem von der Anzahl der erfüllten Prädikate zur Ausführung einer bestimmten Aktion abhängt, optimiert. Weitere mögliche Kriterien sind die Minimierung der benötigten Ressourcen oder des Energieverbrauchs. Verschiedene Strategien wie Bayesian Delegation [12] oder der Greedy-Algorithmus können für die Berechnung der optimalen Reihenfolge verwendet werden. Vergleichbare Ansätze mittels RL [2] oder Bienenalgorithmus [12] sind ebenfalls in die DSN integrierbar. Hier wird die Flexibilität des CoboTrees-Frameworks ersichtlich, denn bestehende Lösungen können einfach eingebettet werden. Durch die DSN wird der menschliche Auf-

wand für den Entwurf eines BT bei gleichzeitiger Erhöhung der Robustheit verringert. DSN können auf dynamische Änderungen reagieren, beispielsweise falls das benötigte Werkzeug im Gebrauch ist, indem sie die Aufgabenfolge zur Laufzeit verändern. Dabei kann zum Beispiel ein Bearbeitungsschritt zur Überbrückung vorgezogen werden, um unnötige Stillzeiten zu vermeiden und die Effizienz zu steigern. Im nächsten Schritt sollen die DSN in einer simulativen MRK-Umgebung und anschließend am Demonstrator evaluiert werden.

In [13] und [14] wurden Ansätze zur fähigkeitsbasierten Zuordnung von Teilaufgaben zu der geeigneten Ressource, die beispielsweise ein Mensch oder eine Maschine sein kann, entwickelt. Da die Ressource Mensch mit einer gewissen Fingerfertigkeit ausgestattet ist, eignet sie sich zum Beispiel eher für die Handhabung von biegeschlaffen Materialien als ein Roboter. Die Ansätze vereinfachen die Aufgabenzuordnung und sollen im CoboTrees-Framework integriert werden. Der sogenannte Knoten für menschliche Aktionen oder „human action node“ (HAN) soll nach [14] bestimmte Teilaufgaben aufgrund ihrer Anforderung dem Menschen zuweisen. Der HAN gibt entweder den Wert Success oder Failure zurück, je nachdem ob eine Aufgabe gelungen ist oder nicht und signalisiert damit dem Roboter, wann er den nächsten Schritt ausführen soll. Dadurch ermöglichen HAN einen fließenden Übergang zwischen Mensch und Roboter. Die Rückmeldung durch den HAN kann mittels Computer Vision (CV) erfolgen. Mit der im Framework integrierten Bibliothek „Detectron2“ [15] zur Objekterkennung ist es zurzeit möglich Bauteile wie zum Beispiel Schrauben zu erkennen und anzufahren. Diese Funktion soll erweitert werden, damit der Roboter erkennt ob der menschliche Arbeiter seine Aufgabe erfolgreich beendet hat.

Eine weitere Komponente des Frameworks ist der „Sicherheitsknoten“ („safety node“), welcher interne sowie externe Sensorsdaten, beispielsweise von einer Kamera erfasst. Die Signale des Kamerasystems sowie der Sensoren des Roboters werden zu jeder Zeit ausgewertet. Dabei wird die inhärente Reaktivität von BT verwendet, um auf unerwartete Vorfälle zu reagieren. Im Falle einer Zustandsverletzung, zum Beispiel wenn ein unerwartetes Objekt in den Arbeitsbereich des Roboters eindringt, wird der Roboter unmittelbar angehalten oder in eine sichere Ausgangsposition gefahren. Die Funktion kann dadurch erweitert werden, dass Hindernisse im Arbeitsraum des Roboters mithilfe von CV erkannt werden. Aktuell wird die Bibliothek „OpenCV“ [16] genutzt um menschliche Hände zu erkennen. Gemeinsam mit dem Lehrstuhl Embedded Systems der RWTH Aachen unter Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski wurde zudem eine Methodik zur Verifikation von BT entwickelt. Mithilfe von linear beschränkten Horn-Klauseln aus der Prädikatenlogik ist ein automatischer Sicherheitsnachweis von BT möglich. Dabei wird der BT durch die Horn-Klauseln encodiert und mit Sovern der Erfüllbarkeits-Modulo-Theorien geprüft, ob die Sicherheit des BT (beschrieben durch die Bedingungen des Sicherheitsknotens) zu jedem Tick gegeben sind. Dadurch ist auch bei flexiblen Prozessänderungen eine effiziente Verifikation der Sicherheit möglich.

Zuletzt sieht das CoboTrees-Framework die Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche vor, mit der BT visualisiert und per Drag and Drop verändert werden können. Außerdem soll es möglich sein, neue benutzerspezifische Knoten, zu generieren. Somit können Änderungen im Montageprozess schnell umgesetzt werden. In Bild 3 ist das gesamte CoboTrees-Framework dargestellt.

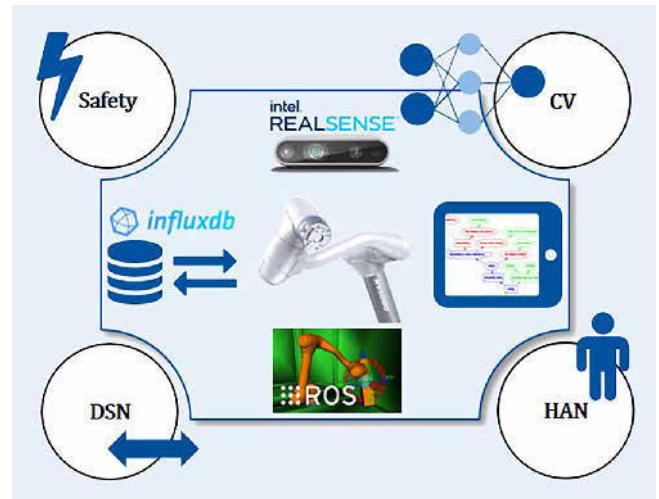


Bild 3. CoboTrees-Framework mit vier spezifischen Knoten.
Grafik: WZL der RWTH Aachen

4 Ausblick

Dieser Beitrag hat ein Framework vorgestellt, welches mithilfe von Behavior Trees und neuartigen Erweiterungen eine ganzheitliche und vereinfachte Lösung für kollaborative Montageprozesse darstellt. Zukünftig sollen Zeit- und Ereignisdaten des Roboters genutzt werden, um mögliche Optimierungsschritte, wie die Reduzierung von Stillstandzeiten, durchzuführen. Außerdem ist ein Umstieg auf ROS2 Industrial geplant, um ein echtzeitfähiges Framework zu entwickeln.

DANKSAGUNG

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder
– EXC2023 Internet of Production.

L iteratur

- [1] Land, N. et al.: A Framework for Realizing Industrial Human-Robot Collaboration through Virtual Simulation. Procedia CIRP, 2020, pp. 1194–1199
- [2] Yu, T; Huang, J; Chang, Q.: Mastering the Working Sequence in Human-Robot Collaborative Assembly Based on Reinforcement Learning. IEEE Access, 2020
- [3] DIN EN ISO 10218: Robotik – Sicherheitsanforderungen (ISO/DIS 10218:2021). Deutsche Fassung
- [4] DIN ISO/TS 15066:2017-04: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016). Deutsche Fassung
- [5] Liu, H; Wang, L.: Collision-Free Human-Robot Collaboration Based on Context Awareness. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021
- [6] Scimmi, L. S. et al.: A Practical and Effective Layout for a Safe Human-Robot Collaborative Assembly Task. Applied Sciences, 2021
- [7] Pennekamp, J. et al.: Towards an infrastructure enabling the internet of production. IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems, 2019, pp. 31–37 Iovino, M.; Sculkins, E.; Styrud, J. et al: A survey of behavior trees in robotics and AI. CoRR 2020, 2020
- [8] Colledanchise, M.; Ögren, P.: Behavior trees in robotics and AI. Boca-Wang, R. et al.: Too many cooks: Bayesian inference for coordinating



- multi-agent collaboration. Topics in Cognitive Science, 2021, pp. 414–432
- [9] Çil, Z. et al.: Mathematical Model and Bee Algorithms for Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Physical Human–Robot Collaboration. Applied Soft Computing, 2020
- [10] Liau, L.; Ryu, K.: Task Allocation in Human-Robot Collaboration (HRC) Based on Task Characteristics and Agent Capability for Mold Assembly. Procedia Manufacturing, 2020, pp. 179–186
- [11] Herfs, W.; Storms, S.; Roggendorf, S. et al.: Aufgabenorientierte Zuordnung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter. Projektatlas Kompetenz Montage, 2019, pp. 92–97
- [12] Wu, Y. et al.: Detectron2. <https://github.com/facebookresearch/detectron2>. 2019
- [13] Bradski G.: The OpenCV Library. Dr Dobb's Journal of Software Tools. 2000

**Minh Trinh**, M. Sc.*Foto: Autorin***Oliver Petrovic**, M. Sc.**Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher**

Werkzeugmaschinenlabor (WZL)

der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Tel. +49 241 / 80-27457

m.trinh@wzl.rwth-aachen.de

www.wzl.rwth-aachen.de**Mohamed Behery**, M. Sc.**Prof. Gerhard Lakemeyer**

Knowledge-Based Systems Group (KBSG)

der RWTH Aachen

Ahornstr. 55, 52056 Aachen

Tel. +49 241 / 80-21534

behery@kbsg.rwth-aachen.de

www.kbsg.rwth-aachen.de

Befähigung additiver Fertigungssysteme zur seriennahen Produktion

Automatisierte, roboter-gestützte hybride Fertigung

S. Wurm, S. Storms, W. Herfs

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend in kleinen und mittleren Serien eingesetzt, was zu höheren Qualitätsanforderungen zum Beispiel an Oberflächeneigenschaften oder Maßhaltigkeit führen kann. Um komplexe Geometrien effizient fertigen zu können, wurde eine durchgängige roboterbasierte, hybride Fertigungskette entwickelt. Diese vereint den additiven Fertigungsprozess mit einer adaptiven spanenden Nachbearbeitung. Der Prozess wird über ein entwickeltes Software-framework geplant und gesteuert.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Industrieroboter, Automatisierung

Automated, robotic hybrid manufacturing – Enabling additive manufacturing systems for close-to-series production

Additive manufacturing processes are increasingly being used in small and medium-sized series, which can lead to higher quality requirements, e.g. for surface properties or dimensional accuracy. To be able to manufacture complex geometries efficiently, a continuous robot-based hybrid manufacturing chain has been developed. It combines the additive manufacturing process with an adaptive form of machining post-processing. A software framework plans and controls the process.

1 Ausgangssituation

Die additive Fertigung (auch 3D-Druck genannt) hat für die produzierende Industrie in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Ursprung und Intention additiver Fertigungsverfahren liegen im Rapid Prototyping. Damit konnten erstmals in kurzer Zeit produktnahe Prototypen ohne aufwendigen Werkzeugbau gefertigt werden [1]. Auch heute wird die additive Fertigung vorrangig als Hilfsmittel zur Prototypfertigung in der Produktentwicklung eingesetzt [2]. Neben der allgemeinen Verbreitung und Etablierung additiver Fertigungsverfahren in unterschiedlichen Branchen ist in den vergangenen Jahren ein Trend zum Einsatz von additiven Fertigungssystemen in kleinen und mittleren Serien, ergänzend zur Prototypfertigung, festzustellen [3, 4]. Die Einführung und Weiterentwicklung von Richtlinien ermöglichen die Vergleichbarkeit von erreichten Qualitätsniveaus und stärken den Anspruch als Produktionsmittel [5]. Ein Drittel der Mitglieder des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) gab in einer Befragung an, dass in ihren Produkten bereits additiv gefertigte Komponenten enthalten sind [2].

Die unterschiedlichen additiven Fertigungstechnologien, wie Stereolithographie (SLA), Fused Deposition Modeling (FDM) oder Selektives Laser Sintern (SLS), haben gemein, dass stetig ein Kompromiss zwischen Fertigungsgeschwindigkeit und Produktqualität eingegangen werden muss [6]. Wird zum Beispiel beim FDM-Verfahren ein großer Düsendurchmesser ausgewählt, so steigt zwar die Fertigungsgeschwindigkeit, allerdings auch die Schichtdicke und damit die Schichtauflösung, was sich negativ auf die Oberflächeneigenschaften auswirkt. Um die hohen Qualitätsanforderungen an das additiv gefertigte Bauteil, zum Beispiel

bei Funktionsflächen, erfüllen zu können, folgt eine (spanende) Nachbearbeitung [7]. Bei komplexen Geometrien und Überhängen sind oftmals Stützstrukturen notwendig, die nach Beendigung des Druckvorgangs entfernt werden müssen. Auch hier ist eine nachträgliche Oberflächenbehandlung häufig unabdingbar [8].

Um Stützstrukturen zu eliminieren und komplexe Geometrien effizient fertigen zu können, werden unterschiedliche Ansätze zur Erhöhung der Freiheitsgrade verfolgt, etwa durch robotergeführte Fertigungsprozesse oder die Hinzunahme eines Drehschwenkisches [9]. Mit einer Erhöhung der Freiheitsgrade kann demnach ein Teil der Nachbearbeitungsschritte eingespart werden. Dennoch erfordern bauteilspezifische Funktionsflächen eine höhere Oberflächenqualität, welche nur durch ein hohes material-, maschinen- und slicer-spezifisches Expertenwissen bereitgestellt werden kann. Ein Ansatz zur Problemlösung kann die Kombination aus roboterbasierter additiver Fertigung, messtechnischer Überprüfung und subtraktiver Nachbearbeitung sein.

2 Roboterbasierte hybride Fertigung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Automatisierte roboter-gestützte Methodik zur Fertigung und Nachbearbeitung von Werkstücken auf Basis generativer Herstellungsverfahren“ (AuRoNa3D) wurde eine durchgängige Prozesskette zur hybriden Fertigung entwickelt. Um die Adaption einer solchen Lösung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) zu erleichtern, muss neben der Automatisierung der generativen beziehungsweise additiven und subtraktiven Fertigung, zudem eine Steuerungsarchitektur mit zugehörigem Softwareframework entwickelt werden, welches eine Bedienbarkeit ohne ausgiebiges Expertenwissen

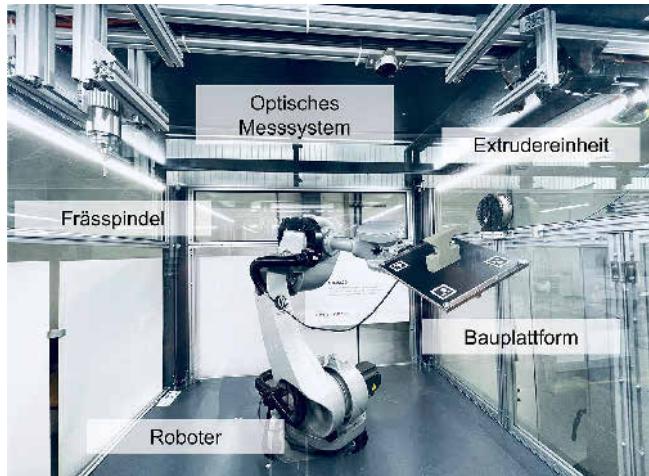


Bild 1. Demonstratoraufbau am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University. Foto: WZL

ermöglicht. In den folgenden Abschnitten wird ein Lösungsvorschlag am Beispiel eines FDM-Prozesses mit Polylactide-Kunststoff (PLA) als Werkstoff beschrieben.

2.1 Demonstratoraufbau

Die Prozesskette besteht aus den folgenden drei Hauptkomponenten: Additive Fertigung, messtechnische Überprüfung und subtraktive Nachbearbeitung. Zur praktischen Umsetzung wurde am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University (WZL) ein Demonstrator aufgebaut. Die benötigten Komponenten, wie Frässpindel, optisches Messsystem, Bauplattform, Extrudereinheit und Roboter sind in **Bild 1** dargestellt.

Zur spanenden Nachbearbeitung wird eine Frässpindel mit einer Leistung von 1,5 kW eingesetzt. Der Extruder wird über einen Servomotor der Produktlinie „Siemens Simotics“ angetrieben. Das Hotend der Druckeinheit wird über eine Heizkartusche betrieben und die Bauplattform inklusive Druckfolie über eine angebrachte Silikonheizmatte beheizt. Zur Temperaturregelung werden mehrere PT100-Sensoren eingesetzt. Als Steuerung kommt eine „Sinumerik 840D sl“ von Siemens zum Einsatz. Diese übernimmt sowohl die Steuerung der Komponenten zur additiven Fertigung und spanenden Nachbearbeitung, als auch die Steuerung des Roboters.

Der Roboter lässt sich durch „RunMyRobot“ wie eine Werkzeugmaschine bedienen und liefert für die Erzeugung der Maschinenprogramme einen entscheidenden Vorteil: Die Maschinenprogramme können in G-Code geschrieben werden, welches als Exportformat von Slicern (Software zur Generierung von 3D-Drucker-verständlichem Code) sowie CAM-Programmen etabliert ist. Die Übersetzung in eine roboterspezifische Programmiersprache entfällt somit. Während der Entwicklung und Implementierung der Prozesskette wurde zur messtechnischen Überprüfung der Bauteilqualität eine „Intel Realsense LiDAR L515“ verwendet. Diese lässt sich durch das zugehörige Softwarepaket gut in das zu implementierende Softwareframework integrieren. Zur Validierung der Ergebnisse wurde die Intel Realsense durch ein System mit höherer Messgenauigkeit ersetzt. Mithilfe des Streifenlichtmesssystems „GOM ATOS Core 300“ konnte die geforderte Genauigkeit erreicht werden und das implementierte Softwareframework hinsichtlich Modularität validiert werden.

2.2 Allgemeiner Prozessablauf

Während des Fertigungsprozesses führt der Roboter die Bauplattform zur jeweiligen Prozesskomponente (Extrudereinheit, Frässpindel oder Messsystem). Durch die Verwendung einer Druckfolie, welche beheizt hohe Adhäsionskräfte entfaltet, muss für die spanende Nachbearbeitung keine zusätzliche Spannvorrichtung eingesetzt werden. Somit haftet das Bauteil während der gesamten Fertigung an der Bauplattform und Rüstzeiten entfallen.

Der Fertigungsprozess beginnt mit der additiven Fertigung und wird bis zu einer definierten Schichthöhe ausgeführt. Ist die vorgegebene Schichthöhe erreicht, wird ein Messprozess gestartet, der lokale Abweichungen identifiziert. Dazu wird die gemessene Ist-Geometrie mit der Soll-Geometrie aus der CAD-Datei verglichen. Die spanende Nachbearbeitung erfolgt nicht pauschal, sondern adaptiv. Je nach Ausprägung der Abweichung wird eine spanende Nachbearbeitung angestoßen oder übersprungen. Dieser Prozess wird bis zur Fertigstellung iterativ wiederholt.

Bevor der beschriebene Fertigungsprozess gestartet werden kann, müssen die unterschiedlichen Programmbausteine mit dem entwickelten und implementierten Softwareframework erzeugt und zu einem Gesamtprogramm aggregiert werden. Eine detailliertere Beschreibung ist im folgenden Kapitel zu finden.

2.3 Softwareframework

Das entwickelte Softwareframework erlaubt dem Anwender den Gesamtprozess ohne spezifisches Expertenwissen auszuführen. Die Kernelemente des Softwareframeworks sind das Vorverarbeitungs- und Simulationstool sowie das Process Control Tool (**Bild 2**, [10]).

Das Process Control Tool übernimmt die Überprüfung und Anpassung des Fertigungsprozesses. Zur Maschinenprogrammerstellung müssen zunächst die einzelnen Teilprozesse geplant werden. Diese Aufgabe sowie die abschließende Aggregation zu einem Gesamtprogramm übernimmt das Vorverarbeitungs- und Simulationstool.

Das Gesamtmaschinenprogramm besteht aus drei Teilprogrammtypen: Maschinenprogramm zur additiven Fertigung, Maschinenprogramm zur messtechnischen Überprüfung und Maschinenprogramm zur spanenden Nachbearbeitung. Zunächst wird für jeden Teilprozess das vollständige Teilprogramm erstellt. Bevor diese zu einem Gesamtprogramm aggregiert werden können, wird eine relative Schichthöhe definiert, nach welcher eine messtechnische Überprüfung des aktuellen Druckfortschritts ausgeführt werden soll. Anhand dieser Größe werden die Teilprogramme in einzelne Blöcke unterteilt. Zwischen dem Programmablauf der messtechnischen Überprüfung und der spanenden Nachbearbeitung wird die Abfrage eines Rechenparameters der Sinumerik-Steuerung eingefügt. Dieser Rechenparameter wird je nach Ergebnis der Messung gesetzt und entscheidet darüber, ob die spanende Nachbearbeitung ausgeführt oder übersprungen wird.

Für die initiale Erstellung der Teilprogramme wird die CAD/CAM-Umgebung „Siemens NX 11“ verwendet, welche über die NXOpen-Schnittstelle den Zugriff auf Bauteile und die Maschinenprogrammerstellung ermöglicht. Das Tool zur Erstellung des Maschinenprogramms für die additive Fertigung integriert einen angepassten Open Source Slicer (Slic3r). Innerhalb der geometrischen Analyse werden die Aufbaurichtung und die unterschied-

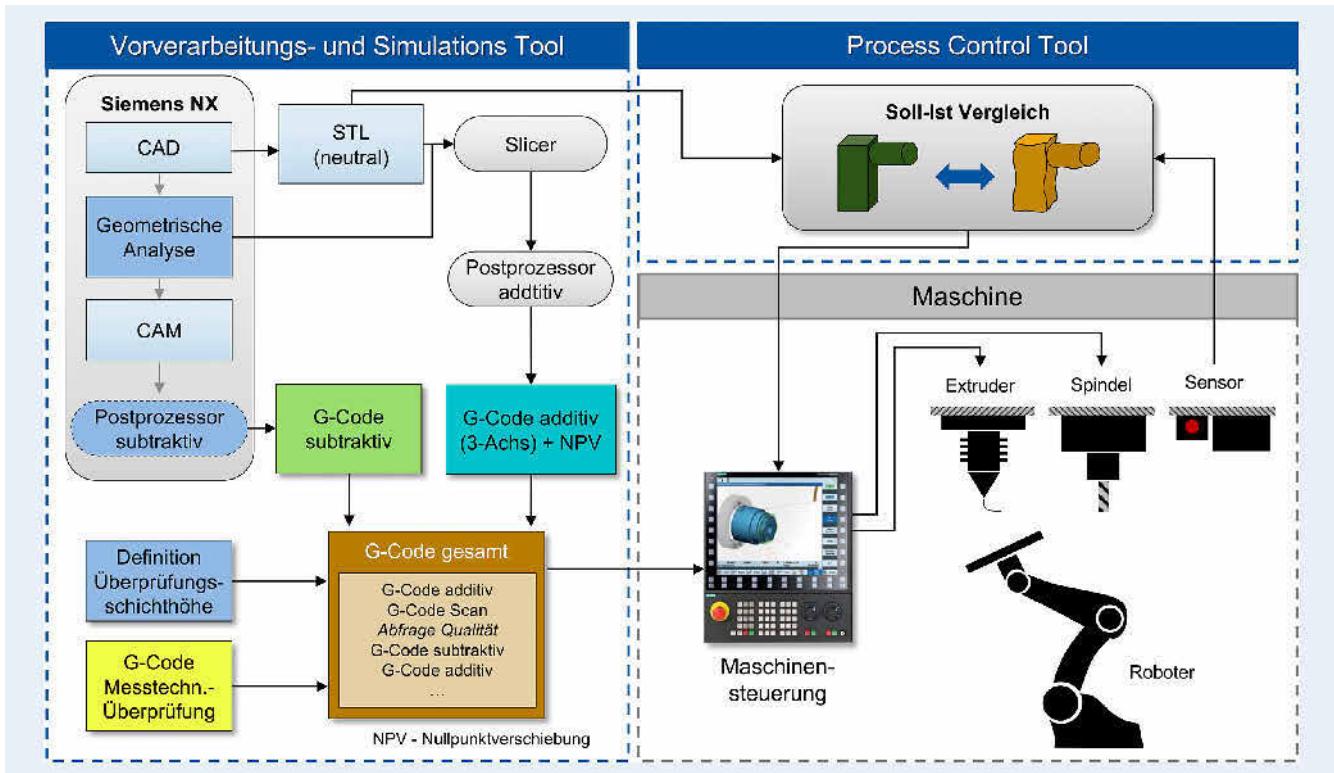


Bild 2. Module des Softwareframeworks. Grafik: WZL, in Anlehnung an [10]

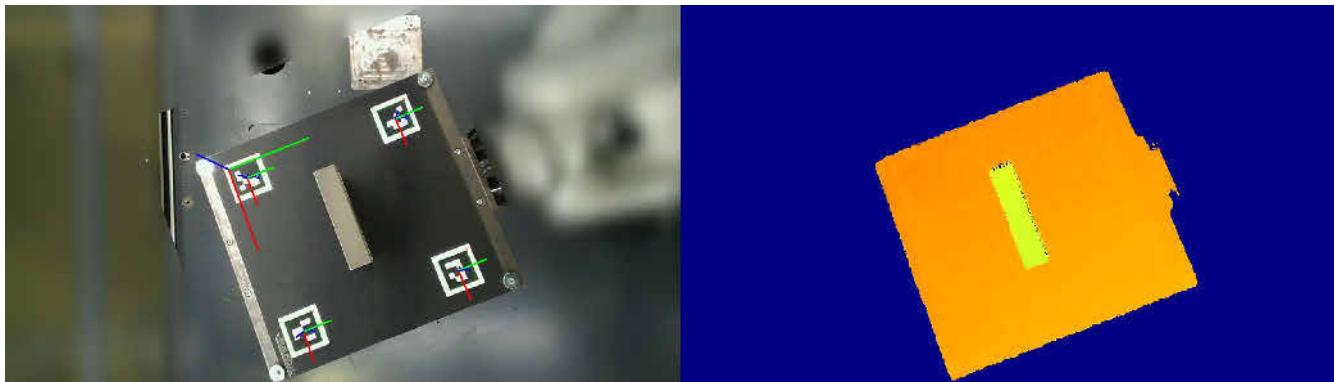


Bild 3. Isolation des Beobachtungsraums. Foto: WZL

lichen Orientierungen von Überhängen identifiziert und anstelle der Erzeugung von Stützstrukturen wird die Reorientierung des Roboters über Nullpunktverschiebungen vorgenommen.

Außerdem kann durch die iterativen Nachbearbeitungsschritte keine standardmäßige CAM-Planung durchgeführt werden, da beispielsweise zum Zeitpunkt der spanenden Nachbearbeitung ein Überhang noch nicht gedruckt wurde, der den Fräsvorgang in der CAM-Planung bei Verwendung des Fertigteils inklusive Überhang beeinträchtigen würde. Die bereits beim Slicing identifizierten Überhänge werden verwendet, um diese für die CAM-Planung zu eliminieren und so eine Planung des Fräsvorganges zur tatsächlichen Geometrie während des additiven Fertigungsprozesses zu ermöglichen.

Des weiteren können innerhalb der CAD/CAM-Umgebung Funktionsflächen definiert werden, die unabhängig von der messtechnisch erfassten Qualität spanend nachbearbeitet werden sollen.

Alternativ kann die CAM-Planung bei Verfügbarkeit einer dynamischen Programmverwaltung der Steuerung online, das heißt während des Fertigungsprozesses, durchgeführt werden. Das Maschinenprogramm wird in diesem Fall mithilfe des Soll-Ist-Vergleichs dynamisch erstellt.

Ein weiteres Softwaremodul (Process Control Tool) ist für die Prozesssteuerung und messtechnische Überprüfung zuständig. Mit Erreichen der Messposition wird das Messsystem getriggert und startet den Überprüfungsprozess. Zur Erstellung des Soll-Ist-Vergleichs muss der Istzustand des additiven Fertigungsprozesses präzise erkannt werden und exakt mit der Soll-Geometrie abgeglichen werden. Dazu muss im ersten Schritt eine Isolierung des gedruckten Bauteils auf der Bauplattform stattfinden. Durch die Systemarchitektur steht dem Messsystem die aktuelle Roboterpose zur Verfügung und erlaubt so die Positionsberechnung der Bauplattform. Durch zusätzliche Marker auf der Bauplattform kann zudem eine extrinsische Kalibrierung des Mess-

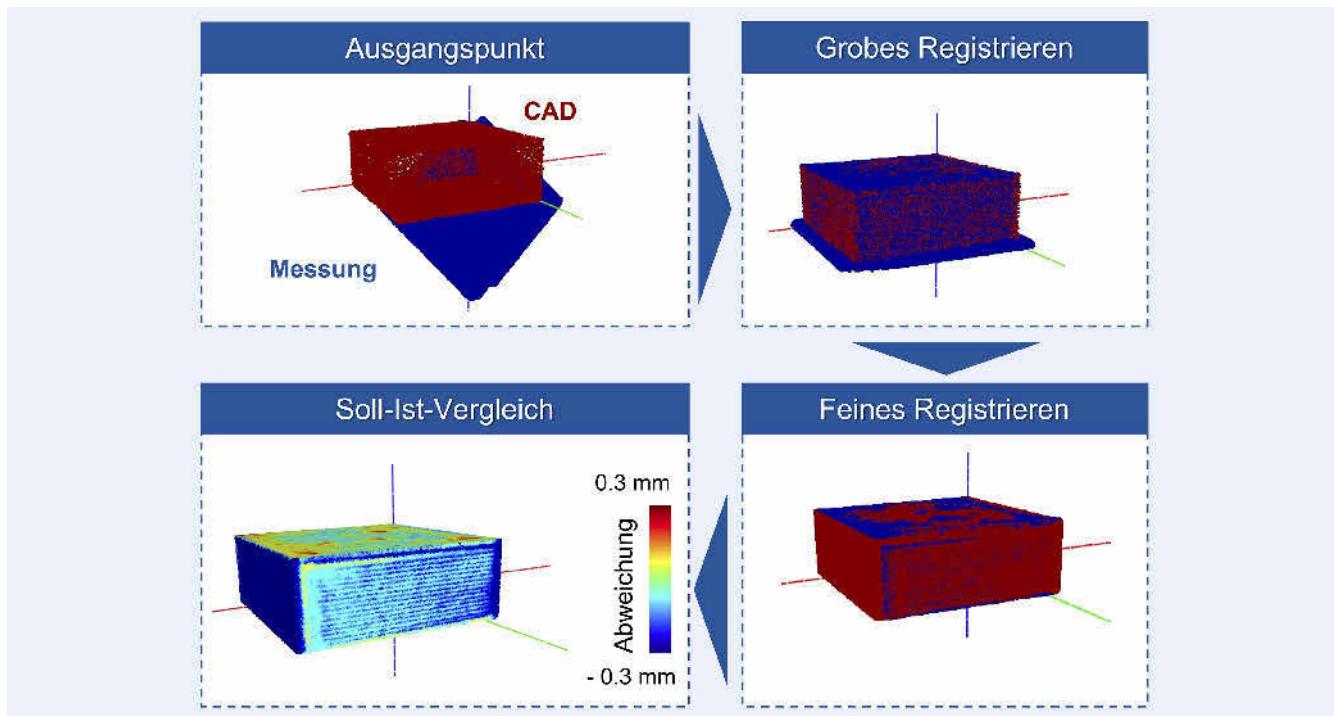


Bild 4. Registrieren bis Soll-Ist-Vergleich. Grafik: WZL

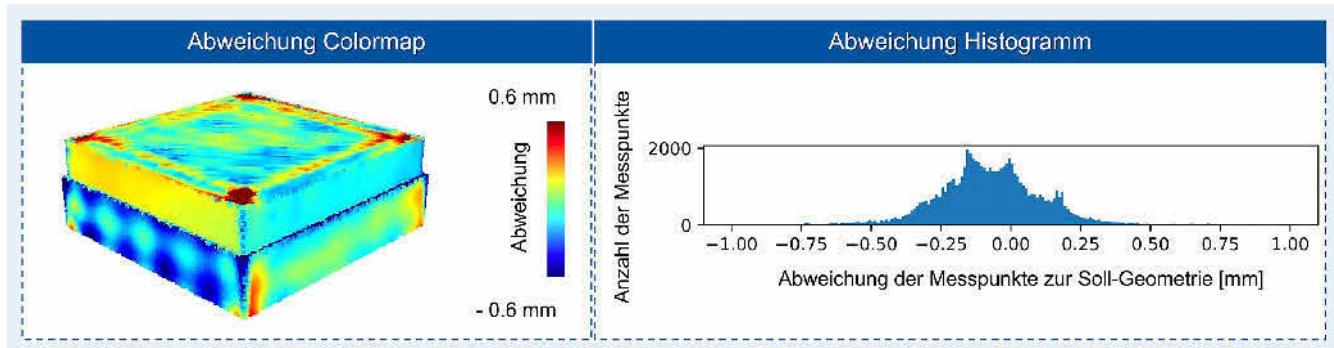


Bild 5. Evaluation Maßhaltigkeit eines Referenzkörpers. Grafik: WZL

systems und eine Optimierung der Messergebnisse vorgenommen werden. In Bild 3 sind auf der linken Seite die Bauplattform inklusive identifizierter Marker zu erkennen.

Auf der rechten Seite wurde die erzeugte 3D-Punktwolke entsprechend isoliert. Die Marker, Position des Roboters und Abmessungen der Bauplattform liefern die Informationen zur Berechnung der Grundebene. Über Prozessinformationen der aktiven additiven Fertigung kann eine Begrenzung orthogonal zur Grundebene festgelegt werden. So entsteht ein virtueller Beobachtungsraum zur Filterung der 3D-Punktwolke. Anschließend werden mittels Registrierungsalgorithmen die Punktwolke der Ist-Geometrie und eine erzeugte Punktwolke der Soll-Geometrie aufeinandergelegt. Für jeden Punkt der Messung wird die lokale Abweichung zur Soll-Geometrie ermittelt und einer Skala zugeordnet. Daraus ergibt sich die tatsächliche Abweichung, welche unten links in Bild 4 dargestellt ist.

Auf Grundlage dieser Messergebnisse manipuliert das Process Control Tool während der Laufzeit die Rechenparameter auf der Sinumerik-Steuerung, sodass ein spanender Nachbearbeitungsvorgang ausgeführt oder übersprungen wird.

3 Validierung

Zur Validierung der entwickelten Fertigungskette und des implementierten Softwareframeworks wurden mehrere Messungen anhand von einem definierten Referenzkörper durchgeführt. Der Referenzkörper hat dabei alle Module des Softwareframeworks zur Vorbereitung und Prozesssteuerung durchlaufen. Zur Beurteilung der Qualität wurde die Maßhaltigkeit mit dem Streiflichtmessgerät „GOM ATOS Core 300“ ermittelt und die Oberflächenrauheit mit einem taktilen Rauheitsmessgerät nach ISO 16610–21 gemessen.

Beim schnellstmöglichen Druck, mit einer Fördergeschwindigkeit von 70 mm/s (Filamentdurchmesser: 1,75 mm, Düsendurchmesser: 1 mm) konnte die Abweichung von circa -0,5 mm bis +0,5 mm auf circa -0,2 mm bis +0,2 mm reduziert werden (Bild 5). Zudem wurde die gemittelte Rautiefe R_Z in Druckrichtung um circa 3 μm und in Aufbaurichtung um circa 126 μm verbessert.

Die roboterbasierte Bearbeitung ermöglicht die Fertigung komplexer Geometrien und die Eliminierung von Stützstrukturen

beim additiven Prozess. Zur Validierung der Prozessfähigkeit wurden unterschiedliche Prüfkörper gedruckt und spanend nachbearbeitet. Ein Beispiel ist in **Bild 6** dargestellt.

4 Fazit und Ausblick

Aus den Ergebnissen schlussfolgert eine erhebliche Zeitsparnis durch die hybride Fertigung. Die zeitliche Aufwendung für die spanende Nachbearbeitung ist im Vergleich zur reinen additiven Fertigung wesentlich geringer, sodass die schnellstmöglichen Druckparameter zu verwenden sind und anschließend eine spanende Nachbearbeitung durchgeführt werden sollte. Die Fertigungszeit kann somit reduziert und die Produktqualität erhöht werden.

Mithilfe der hybriden Prozesskette, bestehend aus additiver Fertigung und spanender Nachbearbeitung, können komplexe Geometrien mit einer hohen Qualität und minimiertem Materialverbrauch gedruckt werden. Durch ein Inline-Messsystem und eine durchgängige Automatisierung wird zudem die Effizienz des Gesamtprozesses maßgeblich gesteigert.

Aktuell werden die Posen zur messtechnischen Überprüfung manuell erstellt. In weiteren Arbeiten wird ein Algorithmus entwickelt, welcher automatisiert Roboterposen zur vollständigen Aufnahme der Ist-Geometrie generiert. Parallel dazu werden mit Künstlicher Intelligenz (KI) Druckfehlertypen während der messtechnischen Überprüfung identifiziert und klassifiziert. Darauf aufbauend können Druckparameter gezielt optimiert werden, was sich zum aktuellen Zeitpunkt als aufwendig darstellt.

Die erreichbare Fertigungsqualität ist abhängig von der Roboterpose, welche bei komplexen Geometrien oftmals von einer statischen Z-Orientierung abweicht. Im weiteren Verlauf soll die erreichbare Qualität bei komplexen Geometrien untersucht werden, um die Robustheit der roboterbasierten hybriden Fertigung zu validieren. Dazu werden komplexe Bauteile, wie zum Beispiel Gitterstrukturen, messtechnisch untersucht.

DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 20538 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

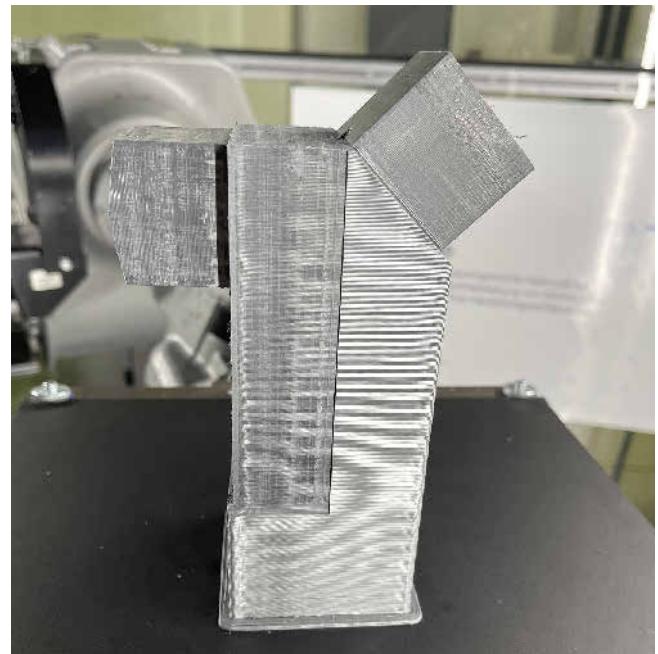


Bild 6. Prüfkörper: Stützstrukturfreie additive Fertigung und spanende Nachbearbeitung. Foto: WZL

- [4] Bierdel, M.; Pfaff, A.; Kilchert, S. et al.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands. Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion. Stand 2019. Internet: www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-additive-fertigungsverfahren/. Zugriff am 07.09.2022
- [5] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3405 Blatt 1: Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag 2014
- [6] Griffiths, C. A.; Howarth, J.; Rowbotham, G. d.-A. et al.: Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling. Procedia CIRP 49 (2016), pp. 28–32
- [7] Flynn, J. M.; Shokran, A.; Newman, S. T. et al.: Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. International Journal of Machine Tools and Manufacture 101 (2016), pp. 79–101
- [8] Morar, D.: Additive Manufacturing (AM). Entwicklung eines Informationsversorgungskonzepts zur Unterstützung des AM-Produktentstehungsprozesses. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag 2022
- [9] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaierle, S.: Additive Serienfertigung. Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [10] Werkstatt + Betrieb: Highend-CNC-Plattform Sinumerik 840D sl. Stand: 2012. Internet: www.werkstatt-betrieb.de/a/produktmeldung/highend-cnc-plattform-sinumerik-840d-sl-239061. Zugriff am 06.09.2022



Steffen Wurm, M.Sc.
Foto: WZL der RWTH Aachen

Simon Storms, M.Sc.

Dr.-Ing. Werner Herfs
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 241 / 80-26801
s.wurm@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de

L iteratur

- [1] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. Heidelberg: Springer-Verlag 2015.
- [2] van Bracht, R.; Pollok, P.; Piller, F.T. et al.: Das Potenzial der additiven Fertigung: Digitale Technologien im Unternehmenskontext. Stand: 2019. Internet: www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/ueber_uns/fachgesellschaften/GPL/dateien/Studie_Die_additive_Fertigung_ist_in_den_Unternehmen_angekommen_.pdf. Zugriff am 07.09.2022
- [3] Strategy&: Marktvolumen für gedruckte Produkte steigt bis 2030 auf 22,6 Milliarden Euro. Stand 2018. Internet: www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/3d-druck. Zugriff am 07.09.2022



DesignAssistant – multikriterielle optimierte Konstruktion mit digitalen Baukästen

Automatisierter Greifertwurf

A. Ahrens, L. Oberfichtner, V. Richter-Trummer, R. Fritzsche, M. Todtermuschke, U. Friess, S. Ihlenfeldt

Die langwierige manuelle Entwicklung von Greifsystemen wird durch das im Beitrag vorgestellte Softwaresystem automatisiert. Basierend auf dem Anforderungsprofil werden die einzelnen Bereiche der Softwarelösung vorgestellt und deren Funktionsweise erläutert. Am Beispiel der Gruppierung von Spannpunkten für Türmontagesysteme durch multikriterielle Optimierung wird das Potenzial für die breitere Anwendung der Softwarelösung in flexiblen und modularen Anlagen gezeigt.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Werkzeug-/Formenbau, Konstruktion

1 Traditioneller Konstruktionsprozess

Aufgrund steigender Modell- und Derivatezahlen – vor allem, aber nicht nur, im Automobilbau – besteht die Notwendigkeit Planungs- und Konstruktionszeiten für Produktionsanlagen zu verkürzen. Speziell die Konstruktion von Betriebsmitteln, wie etwa Greifer, die in großer Varianz und Häufigkeit vorkommen, bieten großes Einsparpotenzial, wenn diese auf Basis standardisierter Baukastensysteme konstruiert und konfiguriert werden. Allein die Marke Volkswagen konstruiert pro Jahr 2000 Greifer, mit einem durchschnittlichen Aufwand von circa 120 Arbeitsstunden pro Werkzeug. Dies ergibt einen jährlichen Gesamtaufwand von circa 120 000 Arbeitsstunden unter der Annahme, dass 1000 Greifer durch Symmetrie nahezu identisch und somit nicht zu konstruieren sind.

Somit bedeutet die Auslegung eines Greifsystems zur Werkstückhandhabung, verstanden als die Gesamtkonstruktion aus Grundkörper und Wirklementen [1, 2], aus heutiger Sicht selbst bei baukastenbasierten Systemen einen hohen manuellen Aufwand. Dasselbe gilt auch für Spannsysteme wie Vorrichtungen, die im weiteren Sinne ortfixierte Greifsysteme sind und daher nachfolgend in diesem Begriff zusammengefasst werden.

Die Hauptvorgaben für deren Entwicklungsprozesse bestehen häufig allein aus den Zielpunkten, an welchen gegriffen werden soll, sowie einem Basiselement, zum Beispiel einer Grundplatte oder einem Adapter zur Kopplung an einen Roboter. Zudem kann es Randbedingungen an die Kosten, die Festigkeit, das Gewicht oder den Bauraum geben. Anhand dieser Bedingungen ist ein Greifsystem aus bestehenden Einzelkomponenten, wie etwa dem EGT-Baukasten (EGT = Euro-Greifer-Tooling), zu entwickeln. Dabei können die zuletzt genannten Randbedingungen auch gleichzeitig mögliche Optimierungskriterien sein. Grundsätzlich lässt eine so offene Aufgabendefinition eine Viel-

Automated gripper design

The software system presented in this paper allows for automating the tedious manual development of gripping systems. Based on a requirements profile, the individual areas of the software solution are presented and their functionality is explained. The example of grouping clamping points for door assembly systems using multi-criteria optimization, points out the potential for a broader application of the software solution in flexible and modular systems.

zahl möglicher Lösungen zu, sodass die Nähe einer gefundenen zur optimalen Lösung nicht zuletzt von der Erfahrung der Konstruierenden abhängt. Außerdem führt die Komplexität der Aufgabe häufig zu einem hohen Abstimmungsaufwand, was wiederum zu erhöhtem Konstruktionsaufwand durch Einarbeitung von Änderungen führen kann.

Üblicherweise handelt es sich bei der Entwicklung um einen iterativen Prozess. Nach Definition des Anforderungskataloges entwickeln die Konstruierenden einen Entwurf und verbessern diesen anschließend sukzessive auf Erfahrungsbasis und, falls vorhanden, auf Basis von externen Rückmeldungen. Dieser Vorgang endet, wenn aus ihrer Sicht ein nicht weiter zu verbesserndes Ergebnis vorliegt oder das verfügbare Zeitkontingent für Optimierungen aufgebraucht wurde. Bedingt durch diesen Prozess und die oftmals begrenzte Zeit besteht kaum eine Möglichkeit, die theoretische Menge an verschiedenen Möglichkeiten mehr als ansatzweise zu explorieren.

Um diesen Prozess effizient und rentabel zu halten sowie Prüf- und Zulassungsaufwände zu reduzieren, gibt es zumeist die Bestrebung die nutzbaren Komponenten zur Erstellung des Greifsystems mit einem zugehörigen Regelwerk der Kombinationsmöglichkeiten firmenintern zu standardisieren. Dies kann durch Nutzung vorhandener Baukastensysteme wie dem EGT passieren oder durch die Konstruktion eigener Elemente mit entsprechenden Verbindmöglichkeiten. Im letzten Fall werden die Systeme so konzipiert, dass sie verteilt auf viele Einzelprojekte entwickelt werden können. Auch Weiterentwicklungen für Einzelprojekte werden durchgeführt, jedoch immer unter dem globalen Ziel, diese auch nachfolgend weiter nutzen zu können. Durch diese Systeme muss nicht jede Konstruktion inklusive der Einzellemente ganzheitlich neu entwickelt werden, sondern es entsteht ein Wiederverwendungseffekt, der es zum Teil auch weniger



erfahrenen Konstruierenden ermöglicht, sinnvolle Lösungen zu erarbeiten.

2 Anforderungen an ein Konstruktionsassistentensystem

An dieser Stelle setzt die Idee der automatisierten Konstruktion an, Baukastensysteme so zu formalisieren, dass automatisiert Konstruktionen erzeugt werden können. Dadurch soll die Berechnung einer hohen Anzahl von Varianten innerhalb kürzester Zeit ermöglicht werden, die anschließend unter Berücksichtigung der angesetzten Optimierungskriterien verglichen und ausgewählt werden können. Ebenfalls lassen sich so schnellere Entwicklungsinkremente bei sich veränderlichen Eingangsdaten erreichen.

Als Ausgabziel dieser Berechnung wird keine finalisierte Lösung fixiert, sondern eine semi-optimale Variante in einem anwendungsspezifischen Toleranzbereich. Dieser Zielsetzung liegt die Annahme zugrunde, dass es durch die erhöhte Variantenzahl vereinfacht wird, in einen optimalen Bereich zu gelangen, andererseits jedoch die Feinheiten einer Optimallösung den Aufwand signifikant erhöhen. Außerdem sind auch im traditionellen Prozess häufig individuelle Anpassungen notwendig, welche ein Automatismus nicht effizient abdecken kann. Für den Workflow der Konstruierenden bedeutet dieses Ziel dennoch, dass sie ihre wertvolle und kaum automatisierbare Kreativität fokussiert auf diese individuelle Finalisierung sowie beispielsweise in die Baukastenentwicklung investieren können.

Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es einer Methodenentwicklung für die Formalisierung und auch die Konstruktionserzeugung unter Nebenbedingungen. Parallel dazu ist ein Assistenzsystem nötig, durch welches ein Anwender diese Methoden nutzen kann. Im Folgenden werden daher sowohl die Anforderungen an die Methoden sowie an die Assistenz formuliert. Dabei sind drei Teilaspekte zu betrachten: die Formalisierung der Baukastensysteme, die Eingabemöglichkeiten der Voraussetzungen und Optimierungskriterien sowie die eigentliche Konstruktion.

Ziel der Formalisierung ist eine möglichst universelle Gestaltung, um beliebige Komponenten und Regelwerke abilden zu können. Dazu bedarf es im Hintergrund eines allgemeinen Datenmodells zur Speicherung der Komponenteninformationen sowie einer mathematischen Modellierung, wie die Regularien abstrakt formuliert werden können. Parallel dazu erfordert es eine Nutzerschnittstelle, in welcher die benutzenden Personen, meist mit konstruktivem statt mathematischem Hintergrund, ihrer Erfahrung folgend die Einzelemente bearbeiten können. Dazu gehört die Übersicht über die Einzelteile eines Baukastens, die beliebig ergänzt oder gelöscht werden können. Hinzu kommt die Speicherung der Parameter, die während der automatisierten Konstruktion verändert werden können, wie zum Beispiel die Länge eines Rohres. Das wichtigste Element ist jedoch die Organisation der Verbindungen zwischen den Teilen, also das Regelwerk, nach welchem Komponenten miteinander verknüpft werden können (etwa eine Schraube mit einer Mutter). Auch weitere Eigenschaften, wie etwa Gewicht oder Kosten pro Teil, müssen erfassbar sein, sofern sie in der Optimierung eine Rolle spielen sollen.

Im Gegensatz zur universellen Einsetzbarkeit der Formalisierung ist die Eingabe der Voraussetzungen häufig nur partiell zwischen verschiedenen Anwendungen übertragbar. Grund ist, dass sich diese im Prinzip ähneln, etwa durch die Vorgabe von Start und Ziel, aber im Detail unterscheiden. So ist bei einem

Greifsystem, welches an einen Roboter angebracht werden soll, das Adapterelement für den Roboterflansch ein fixes Endobjekt. Hingegen liegt für eine Vorrichtung mit Bodenmontage eine Grundplatte als Dimensionierungsobjekt vor, auf welcher die Spannelemente beliebig positioniert werden können. Ebenso kann es vorgelagerte Betrachtungen geben, welche für die Konstruktion benötigt werden, siehe Abschnitt 3.2. Demzufolge muss jeweils ein konkretes Anforderungsprofil für den spezifischen Anwendungsfall konzipiert werden. Die generelle Vorgehensweise ist dabei, dass die Definition von Start- sowie Zielbereich oder -komponente an erster Stelle steht. Danach kommt die Festlegung von Randbedingungen sowie der Optimierungskriterien. Für diese bietet es sich an, eine Ober- oder Untergrenze festzulegen, die eingehalten werden muss. Danach kann anhand einer Gewichtung der Kriterien eine Kategorisierung erfolgen, mit welcher Wertigkeit welches Kriterium in der Konstruktion beachtet werden soll.

Dritter Schritt ist die eigentliche Konstruktion oder deren Optimierung. Hauptziel ist die Erzeugung eines zulässigen und nach den ausgewählten Optimierungskriterien möglichst optimalen Konstrukts. Um einen Unterschied oder größeren Mehrwert zur manuellen Konstruktion zu generieren, ist es ebenso erforderlich, dass durch den Optimierer eine Vielzahl von Konstruktionen untersucht wird. Dies dient der Erforschung der Menge an theoretischen Möglichkeiten, was in einem händischen Prozess nicht möglich wäre. Hinzu kommt die Ausgabe dieser Lösung(en) in einer für die Konstruierenden nutzbaren Form. So wird der Teil der nicht optimalen Lösungen mathematisch ausgeschlossen und lediglich finale Anpassungen, welche die Optimalität der Lösung nicht gefährden, müssen teilweise noch manuell durchgeführt werden.

Um diese Bereiche und Prozesse für die Nutzenden greifbar zu machen, wird eine Softwarelösung mit grafischer Oberfläche (GUI = graphical user interface) benötigt. Dabei gilt auch hier, die Verwaltung des Baukastens kann als universelles Element für alle Anwendungen gleich gestaltet werden und sollte aus Elementen bestehen, welche die genannten Operationen in einen möglichst intuitiven Workflow überführt. Für die Konstruktion mit den Schritten „Vorgaben“ und „Durchführung“ ist hingegen davon auszugehen, dass die GUI an spezifische Anforderungen angepasst werden muss. Es können jeweils individuelle Eingabefelder geschaffen beziehungsweise auch vor- und nachgelagerte Prozesse integriert werden. Ein universelles Interface in diesem Bereich würde zu Lasten einer einfachen Nutzerführung gehen.

Abschließend besteht die Frage nach der Integration in den Gesamtworkflow der Anwendenden. Um diese zu gewährleisten, ist es notwendig, das zu nutzende CAD-System in die Software zu integrieren. Dadurch entfallen Konvertierungsprozesse, welche einen Informationsverlust bedeuten könnten. Außerdem wird die Handhabung und Weiterverarbeitung des Ergebnisses vereinfacht, was vor allem bei nicht finalisierten Konstruktionen notwendig ist.

3 Assistierte Konstruktion

Das Thema computergestütztes Greiferdesign ist seit Jahren ein beliebtes Forschungsthema [3]. Dennoch werden häufig nur Teilaspekte des Designs betrachtet, wie zum Beispiel die Auswahl des eigentlichen Greifers an einer Bauteilposition aus einem herstelleroffenen Katalog [4]. Ebenso wurden evolutionäre Algorith-

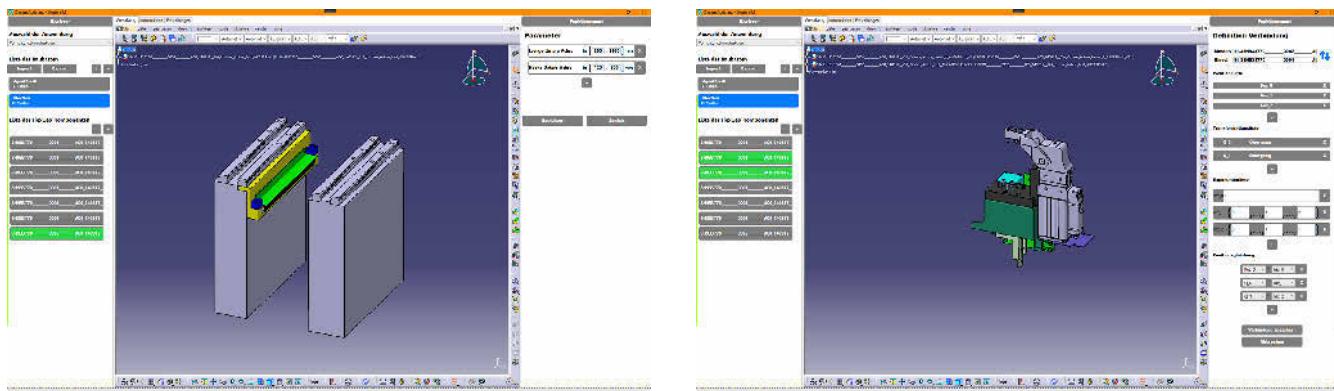


Bild 1. Layoutübersicht im (li) Parameter- und (re) Verbindungseditor. Layoutaufbau – links: Navigation (zum Beispiel Baukastenübersicht); rechts: Editorelemente (zum Beispiel Anpassung von Eigenschaften), Mitte: Catia-Einbindung. Grafik: Fraunhofer IWU

men und multikriterielle Optimierung eingesetzt [5], um sich den Teilaufgaben des Greiferdesigns rund um einen Greifpunkt zu nähern. Dennoch gibt es bislang wenig ganzheitliche Ansätze, die das volle Greifsystem betrachten, gleichzeitig systemoffen verschiedene Konstruktionskomponenten und -richtlinien zulassen und verschiedene Zielobjekte (wie Greifer, Vorrichtung) ermöglichen.

Das entwickelte Assistenzsystem setzt an diesem Punkt an und dient der automatisierten Konstruktion von komplexen Lösungen auf Basis zuvor definierter Baukästen. Sowohl das Konstruktionsziel als auch der entsprechende Baukasten können in der Software frei definiert werden. Eine konkrete Anwendung für Vorrichtungen anhand einfacher Linearkinematiken wird nachfolgend beispielhaft vorgestellt.

3.1 Baukastenlogik

Ein Baukasten wird definiert durch Komponenten, deren Eigenschaften sowie deren erlaubten Verbindungen untereinander. Das heißt, eine Komponente ist zunächst ein CAD-Modell, das verschiedene Eigenschaften und Parameter besitzt. Für die Baukastenlogik im Assistenztool ist es nicht zwingend erforderlich, alle verfügbaren Parameter des CAD-Modells in die eigene Datenbank zu übernehmen, sondern nur diejenigen, die für die spätere Konstruktion variiert werden können (im Gegensatz zu fixen Eigenschaften wie etwa der Größe eines Schraublochs). **Bild 1** links zeigt das GUI mit der Möglichkeit in CAD definierte Parameter in die Software zu übernehmen und zu definieren.

Hinzu kommt die Definition von möglichen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten. Dadurch kann ein Automatismus zur Konstruktion die einzelnen Teile erst sinnvoll verknüpfen. Diese in Bild 1 rechts dargestellten Verbindungen werden durch Transformationsmatrizen umgesetzt. Hierfür werden einzelne Positionen der Komponenten gespeichert und aus diesen die Transformationen (Verschiebung & Verdrehung) untereinander abgeleitet. Die Berechnung der Transformationen erfolgt in der Hintergrundlogik anhand der Angabe von Positionen, welche ineinander überführt werden sollen. Um eine Anpassung an die Komponenten-Parameter zu gewährleisten, können diese Transformationen in parameterabhängiger Potenz ausgeführt werden. Dies ist zum Beispiel wichtig, um zu gewährleisten, dass eine Anschlusskomponente immer am Anfang beziehungsweise am Ende einer Komponente angefügt wird, wobei das Ende

in Abhängigkeit von dessen parametrisierter Länge steht. Dabei tritt die Herausforderung auf, dass diese Potenzen nicht grundsätzlich ganzzahlig sind und nicht-ganzzahlige Potenzen von Matrizen nicht per se definiert sind. Um dies umzusetzen, werden die Transformationsmatrizen in eine Diagonalform überführt, für welche eine gebrochene Potenz berechenbar wird.

Um die Baukastenlogik formal abzudecken, wurde eine Speicherung in einer Strukturbibliothek untersucht. Dabei hat sich ein XML-Format zur Speicherung als beste Lösung herausgestellt und es wurde eine Struktur etabliert, in welcher Informationen zu Baukästen, Komponenten, Parametern und Verbindungen gespeichert werden können.

3.2 Spezialisierung am Beispiel flexibler Vorrichtungskonstruktion

Auf Grundlage eines wie in Abschnitt 3.1 beschriebenen Baukastens und der zugrunde liegenden Strukturbibliothek kann die automatisierte Konstruktion erfolgen. Wie bereits erwähnt, wird dieser Teil zumeist auf die jeweilige Anwendung individualisiert. Dies kann einerseits durch vorgelegte Schritte oder durch Anpassung oder Spezialisierung der Optimierung erfolgen.

Eine Anwendung für das Konstruktionsassistenzsystem ist die Erstellung eines stationären, aber anpassbaren Spannsystems, in welchem unterschiedliche Bauteile gespannt und automatisiert zwischen den Einstellungen für diese gewechselt werden kann. Der Gesamtlauf ist in **Bild 2** dargestellt.

Technisch realisiert wird dies hier durch die Anbringung der Spanner auf schienengesetzten Dreiachs-Kinematikkomponenten [6], womit für die Positionen der Spanner ein Bewegungsraum entsteht. Dieser ist nötig, um die Spannfähigkeit für die verschiedenen Bauteile zu gewährleisten. Damit der Wechsel reibungslos erfolgen kann, muss die Konstruktion speziell für diese Bauteile entwickelt und die relativen Positionen der Komponenten müssen schon vorab bestimmt werden.

In dieser Anwendung besteht die Eingabe in das System aus den Bauteilen (CAD-Geometrien) sowie den Positionen der jeweiligen Spannpunkte. Ziel ist es, auf einer Grundplatte höhenvariabel, aber rechtwinklig ausgerichtet, Schienen anzubringen, auf welchen die Konstruktionen inklusive Spanner aufgesetzt werden. Als Konstruktionsziel soll die Vorrichtung auf die Spannpunkte aller Bauteile einstellbar sein, dabei dürfen weder Kollisionen mit dem Bauteil noch Kollisionen beim Umstellen

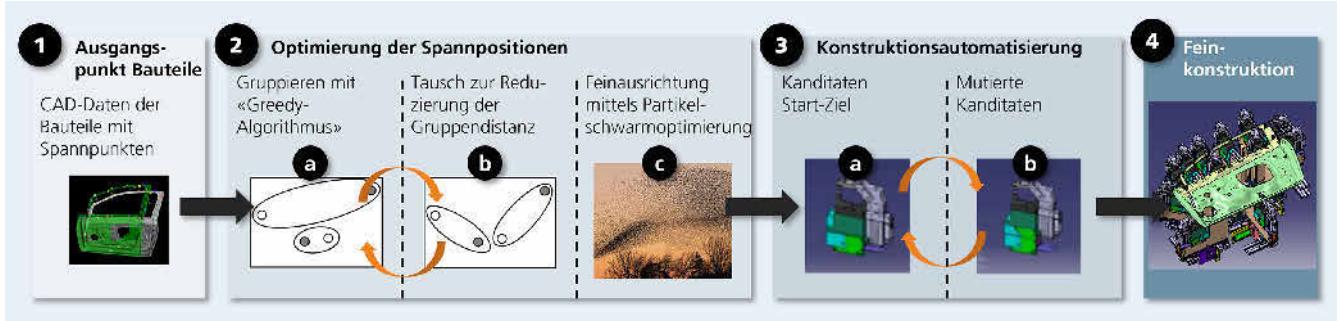


Bild 2. Vorgehen der assistierten Konstruktion am Beispiel flexibler Vorrichtungen. Grafik: Fraunhofer IWU

untereinander auftreten. Optimierungsziel ist überdies, die Verfahrwege bei der Umstellung zu minimieren.

Es ergibt sich somit zusätzlich die Aufgabe, die einzelnen Spannpunkte der Bauteile jeweils einem Spanner so zuzuordnen, dass die Spannpunkte möglichst geringe Abstände haben. Dieser Vorgang wird folgend Gruppieren genannt. Gleichzeitig können aber auch die CAD-Geometrien zueinander ausgerichtet werden, sodass die Spannpunkte in den jeweiligen Gruppen nah aneinander liegen, um die Verstellwege zu minimieren. Beide Schritte beeinflussen sich gegenseitig, denn je nach Gruppierung ändert sich die Ausrichtung, und je nach Ausrichtung eventuell die Gruppierung.

Daher fiel die Entscheidung auf einen vorgelagerten, dreistufigen Prozess aus Grobausrichtung, Gruppierung und Feinausrichtung. Die automatisierte Grobausrichtung der Bauteile erfolgt durch Zentrieren der individuellen Bounding-Boxen um die Bauteile zueinander.

Für das Gruppieren ist festzustellen, dass bei nur einem Bau teil jedem Spannpunkt ein Spanner einfach zugeordnet werden kann. Ab zwei Bauteilen liegt ein multidimensionales Zuordnungsproblem vor. Das Lösungsverfahren wird im Folgenden skizziert, eine detaillierte Erklärung inklusive Literaturverweisen findet sich in [7]. Das Verfahren erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird das Bauteil mit den meisten Spannstellen ausgewählt und jeder Spannpunkt einer Gruppe zugewiesen. Anschließend werden die anderen Bauteile betrachtet und nach dem Prinzip der kürzesten Distanzen die Spannpunkte jeweils den Gruppen zugeordnet. Dabei darf jede Gruppe nur maximal einen Spannpunkt eines Bauteils enthalten. Dieses Vorgehen ist eine Version des sogenannten Greedy-Algorithmus [8].

Ausgehend von dieser Startlösung findet im zweiten Abschnitt ein Korrekturmechanismus statt. Die Problematik der Greedy-Lösung ist, dass durch die „gierige“ Auswahl der kürzesten Distanzen am Ende Spannpunkte Gruppen zugeordnet werden müssen, zu welchen sie sehr große Distanzen haben, siehe Bild 2, Schritt 1. Ziel ist jedoch, alle Distanzen zu minimieren, um nicht nur die Erreichbarkeit aller der Gruppe zugeordneten Spannpunkte durch die Kinematik sicherzustellen, sondern auch das Risiko für Kollisionen zu minimieren. Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden Tauschoperationen definiert, sodass Spannpunkte eines Bauteils die Gruppen tauschen können, um insgesamt geringere Distanzen zu erzeugen. Dieser in Bild 2, Schritt 2 dargestellte Tausch kann zwischen zwei Gruppen erfolgen, oder in einer Kette.

Am Ende dieser Tauschoperationen kann auch festgestellt werden, dass es keinen zulässigen Tausch gibt und eine weitere Gruppe (und damit ein weiterer Spanner) notwendig ist. Dieser

Prozess wird so lange angestoßen bis sichergestellt ist, dass jeder Spanner alle ihm zugeordneten Spannpunkte erreichen kann und ohne eine neue Gruppe keine Verbesserung mehr möglich ist. Bild 3 zeigt das GUI zur Gruppierung der Spannpunkte.

Diese Gruppierung wird für eine zweite Lageoptimierung der Bauteile zueinander genutzt. Durch Partikelschwarmoptimierung findet eine finale Feinausrichtung statt. Als Kriterium für die Optimierung kann unter anderem zwischen dem Minimieren einer Bounding Box um alle Bauteile, der Minimierung der Summen aller Distanzen innerhalb der Gruppe, der Minimierung der Summe der maximalen Distanz innerhalb der Gruppen oder auch einer Kombination dieser Faktoren gewählt werden. Die Partikelschwarmoptimierung imitiert das Verhalten von Vogelschwärmen, welche alle eine individuelle Flugbahn haben, jedoch durch die Kommunikation mit den benachbarten Tieren beeinflusst werden. Im Algorithmus gibt es viele Partikel, die jeweils eine neue Positionierungsvariante der Bauteile repräsentieren und stellvertretend für einen Vogel stehen. Jedes dieser Partikel wird anhand des zuvor definierten Kriteriums mit den umliegenden Partikeln verglichen und die nächste Bewegung wird dann durch die bisher beste gefundene Lösung in der Nachbarschaft beeinflusst und mit einem Zufallsfaktor in diese Richtung gelenkt. Zusätzlich wird bei jeder Iteration die insgesamt minimale Lösung gespeichert. Das Ergebnis ist das Minimum der gespeicherten minimalen Summen über alle maximalen Distanzen jeder Gruppe. Genauer wird auf die Partikelschwarmoptimierung inklusive entsprechender Literaturverweise in [9] eingegangen.

3.3 Konstruktionsautomatisierung

Für die eigentliche Konstruktionsoptimierung wird mit einem evolutionären Algorithmus wiederum ein heuristisches Verfahren gewählt. Dieses soll ermöglichen, dass gleichzeitig ein großer Explorationsraum generiert wird und dennoch nicht jede mögliche Konstruktion gesehen wird, sondern nur diejenigen, die am erfolgversprechendsten sind. Dadurch kann es jedoch zur Findung lokaler Optima statt der angestrebten globalen Optima kommen. Durch eine modulare und möglichst abstrakte Programmierung ist es möglich, große Teile der Umsetzung universell für verschiedene Anwendungen einsetzbar zu gestalten.

Zu Beginn wird eine Anzahl an potenziellen Kandidaten erstellt, welche in der gegebenen Startposition mit der Startkomponente beginnen, die nach den Regeln des Baukastens kollisionsfrei aufgebaut sind und in einer angegebenen Zielkomponente des Baukastens enden. Im Beispiel aus 3.2.1 wäre die Startposition die Grundplatte, und der Spanner die letzte Komponente. Dabei ist die Festlegung, welche Komponente als Startposition

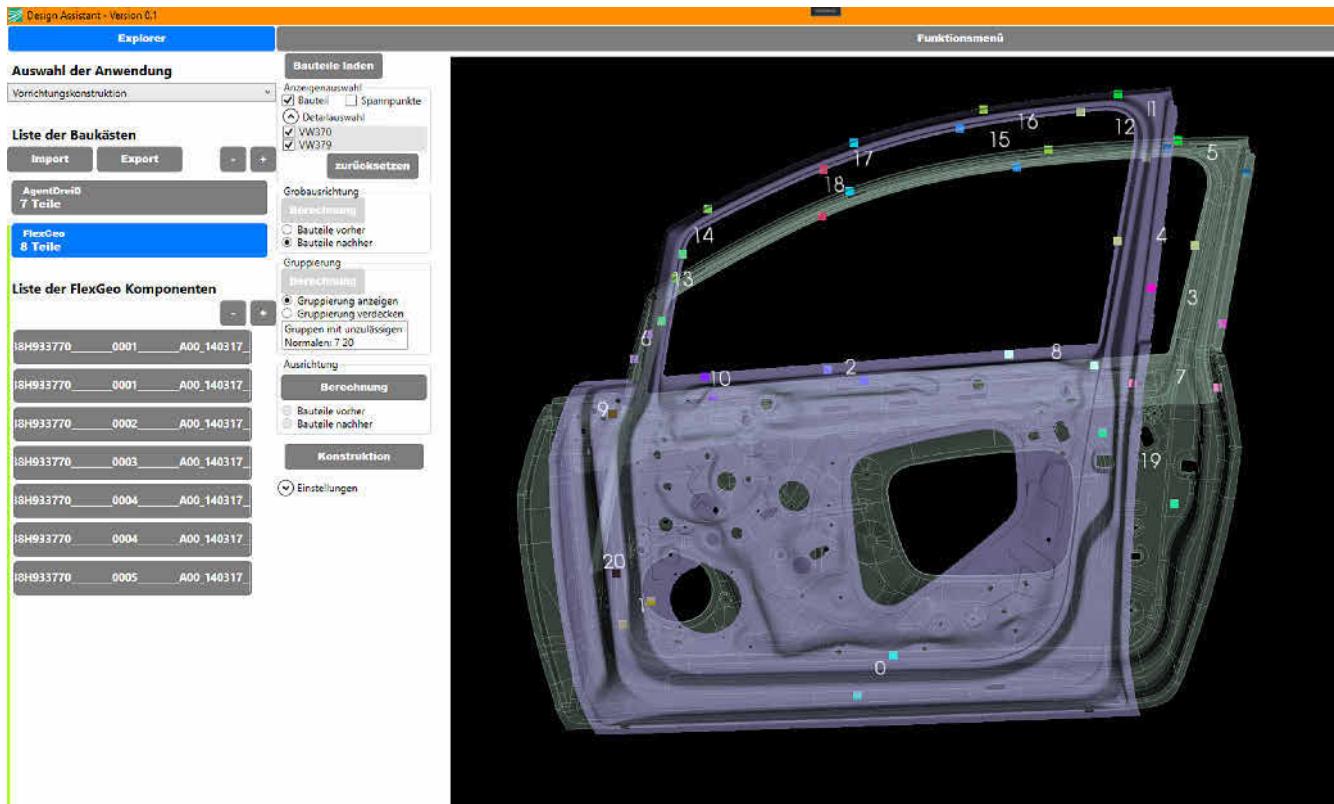


Bild 3. Oberfläche zur Gruppierung. Grafik: Fraunhofer IWU

und welche als Zielposition definiert ist flexibel austauschbar. Im vorliegenden Fall wurde diese durch weitere Bedingungen ausgewählt. Für jeden dieser Kandidaten wird die Fitness berechnet, welche die Distanz zum Ziel angibt. Um eine Vergleichbarkeit zu generieren werden diese normiert, sodass sie im Minimum bei 0 und im Maximum (perfekte Konstruktion) bei 2 liegt. Diese Metrik ergibt sich, indem ein Idealwert 1 (entspricht 100 %) für das Erreichen des translatorisch beziehungsweise rotatorisch perfekten Zustandes definiert und jede Abweichung (normiert) subtrahiert wird.

Anschließend erfolgt ein iteratives Vorgehen. Dabei werden die fittesten Kandidaten/Konstruktionen ausgewählt und zufällig oder deterministisch leicht verändert. Dies kann unter anderem durch Anpassung der Parameter, Anbau weiterer Komponenten beziehungsweise Einbau von Komponenten innerhalb des Konstrukts oder Veränderung der Verbindungseinstellungen passieren. Im Beispiel der Vorrichtung wäre dies eine Verstellung entlang der 3-Achsen-Kinematik, oder die Veränderung der Position auf der Grundplatte. Die mutierten Kandidaten werden dem Pool der Kandidaten hinzugefügt und stehen in der nächsten Iteration zur Mutation zur Verfügung. Mit diesem Verfahren können derzeit innerhalb von 10 Sekunden 200 Konstruktionen erzeugt und bewertet werden. Dies kann mit Techniken der Performancesteigerung noch weiter optimiert werden.

Dieser Vorgang endet mit dem Erreichen einer bestimmten Fitness oder nach einer festen Iterationszahl, um Endlosrechnungen zu vermeiden. Hier kommt ins Spiel, dass die Konstruktionen nicht zu 100 % perfekt sein müssen. Zwar können durch die Mutationen sehr viele Varianten durchgespielt werden, allerdings wird es im fast-optimalen Bereich zunehmend unwahrscheinlicher, durch zufällige Veränderungen einen Fortschritt zu erzielen.

Daher ist es sinnvoller, bei einer ausreichenden Güte oder bei Stagnation der Güte das fast-optimale Ergebnis auszugeben. Die genaue Festlegung der ausreichenden Güte ist anwendungsabhängig (je komplizierter die Aufgabe, desto mehr Abweichungen sollten erlaubt sein), kann jedoch als Richtwert bei einer Fitness 1.8 orientiert sein. Zuletzt wird den Konstruierenden die Möglichkeit geboten, durch gezielte, teils auch fantasievolle oder im Baukasten so ursprünglich nicht vorgesehene Veränderungen diese semi-optimale Lösung in ein optimales Ergebnis zu überführen.

3.4 Weiterentwicklungen

Es ist festzustellen, dass die Erstellung der Baukastenlogik im Wesentlichen als abgeschlossen betrachtet werden kann. Weitere Verbesserungen können erreicht werden, indem Parameter nicht nur singulär betrachtet, sondern auch Bedingungen für Parameterkombinationen eingeführt werden. Beispielhaft ist eine Komponente vorstellbar, die aus zwei Teilstücken besteht. Dabei sind die Einzelgrößen der Teilstücke unabhängig voneinander variierbar, jedoch das Gesamtmaß der Komponente beschränkt.

Für die Konstruktion selbst gibt es hingegen noch deutliche Potenziale. Zum einen, da jede Anwendung ihre individuellen, gänzlich neuen Aufgaben mit sich bringt, wie zum Beispiel die vorgestellte Gruppierung. Zum anderen kann auch die Konstruktionserstellung mithilfe des genetischen Algorithmus weiter qualifiziert werden. Zum Beispiel indem Kandidaten eine begrenzte Verfügbarkeit haben, während sie mutiert werden, sodass ab einer bestimmten Iteration nur noch neuere Kandidaten verfügbar sind.

Neben der hier beschriebenen Konstruktion für Greif-/Spannsysteme kann die Baukastenformalisierung sowie die automati-

sierte Konstruktion auch auf gänzlich andere Anwendungen übertragen werden. So wurde anhand eines Beispiels aus dem Bereich der Wärmetauscherkonstruktion mittels additiver Fertigung im Rahmen des Forschungsprojektes AutoHeat [10] gezeigt, dass die gewählte Formalisierung anwendungsoffen gestaltet ist. Dabei wurde die Baukastenlogik für ein Konstruktionstool genutzt, in dem Wärmetauscher anhand von technischen Randbedingungen ausgelegt und automatisiert konstruiert werden sollten. Da alle Eigenschaften des Wärmetauschers aus diesen Randbedingungen zu berechnen waren, konnte gänzlich von einer Optimierung wie in Abschnitt 3.3 beschrieben abgesehen werden. Stattdessen war die Dimensionierung und Positionierung der Komponenten auf rein analytische Weise möglich, was im Hinblick auf die Optimalität ein perfektes Ergebnis liefert. Da additive Fertigung auch für die Greiferauslegung interessant sein kann [11], können sich in zukünftigen Entwicklungen weitere Synergien ergeben, die beispielsweise aus den spezifischen Konstruktionsanforderungen der additiven Fertigung hervortreten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Softwarelösung erlaubt die automatisierte baukastenbasierte Konstruktion. Hierfür können Baukästen definiert und Parameter sowie Verbindungen festgelegt werden, um anschließend Konstruktionslösungen zu berechnen. Im Vergleich zur traditionellen Konstruktion kann auf diese Weise nicht nur signifikant Zeit gespart werden, es ist außerdem davon auszugehen, dass die berechneten Lösungen auf Basis der definierten Optimierungskriterien dem Optimum nahekommen. Vor allem aber erlaubt das Assistenzsystem auch die Auslegung anpassbarer Greifsysteme und Vorrichtungen für eine Vielzahl von Bauteilen, die Konstruierende ohne Assistenzsystem überfordern würde. In diesem Sinne übertrifft die entwickelte Lösung die Möglichkeiten der Konstruierenden und erlaubt diesen nun ihren nicht automatisierbaren Erfindungsgeist in gewinnbringendere Aspekte, wie zum Beispiel die Optimierung des Konstruktionsbaukastens, zu investieren. So stellt sich durch die intensive Nutzung der Softwarelösung ein signifikanter Mehrwert für Konstruierende ein.

L i t e r a t u r

- [1] Yschwab: Alles im Griff – Greifer für Roboter. Stand: 2022. Internet: automationspraxis.industrie.de/robotik/greifer-fuer-roboter-grundlagen-funktion-und-hersteller/. Zugriff am 15.08.2022
- [2] Chen, L., Wabnitz, P., Berger, I. M. et al.: Design und Konstruktion eines neuen Konzepts für Mehrteilgreifer. 5. IFToMM DA-CH Konferenz 2019, RWTH Aachen. Internet: https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00047199/IFToMM_DACH_2019_paper_04.pdf. Zugriff am 15.08.2022
- [3] Sdahl, M.; Kuhlenkoetter, B.: CAGD – Computer Aided Gripper Design for a Flexible Gripping System. International Journal of Advanced Robotic Systems 2 (2005) 2, p. 15
- [4] Cramer, J.; Demeester, E.; Kellens, K.: Development of an assistive webtool for robotic gripper selection. Procedia CIRP 106 (2022), pp. 250–257
- [5] Saravanan, R.; Ramabalan, S.; Ebenezer, N. G. R. et al.: Evolutionary multi criteria design optimization of robot grippers. Applied Soft Computing 9 (2009) 1, pp. 159–172
- [6] Fritzsche, R.; Richter, A.; Putz, M.: Product Flexible Car Body Fixtures with Position-dependent Load Balancing Based on Finite Element Method in Combination with Methods of Artificial Intelligence. Procedia CIRP 67 (2018), pp. 452–457
- [7] Oberfichtner, L.; Ahrens, A.; Fritzsche, R. et al.: Solving a multi-dimensional matching problem for grouping clamping points on car body parts. Procedia CIRP 106 (2022), pp. 126–131
- [8] Korte, B.; Vygen, J.: Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [9] Fritzsche, R.; Voigt, E.; Schaffrath, R. et al.: Automated design of product-flexible car body fixtures with software-supported part alignment using particle swarm optimization. Procedia CIRP 88 (2020), pp. 157–162
- [10] AGENT-3D e.V.: Technologievorhaben AutoHeat. Stand: 2022. Internet: agent3d.de/autoheat. Zugriff am 15.08.2022
- [11] Zmartpart: Greifarme der Zukunft – Automation, Handling, Robotik, Greifer. Stand: 2014. Internet: www.zmartpart.de/greifarme-zukunft-automation-handling-robotik-greifer/. Zugriff am 15.08.2022



A n t j e A h r e n s , M . S c .
Foto: Autorin

L e n a O b e r f i c h t n e r , M . S c .

PhD V a l e n t i n R i c h t e r - T r u m m e r

Dipl.-Ing. R a y k F r i t z s c h e

Dr.-Ing. M a r c e l T o d t e r m u s c h k e

Dr.-Ing. U w e F r i e ß

Prof. Dr.-Ing. habil. S t e f f e n I h l e n f e l d t

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen

und Umformtechnik IWU

Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz

Tel. +49 0371 / 5397-1603

antje.ahrens@iwu.fraunhofer.de

www.iwu.fraunhofer.de

DANKSAGUNG

Das Autorenteam bedankt sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Unterstützung vom Projektträger Jülich (PTJ) im Rahmen des Agent-3D Projektes „AutoHeat“, Förderkennzeichen 03ZZ0231A.



Chancen und Risiken von Mega-Casting in der Fahrzeugproduktion

Die Karosserie aus dem Aluminium-Druckguss

G. Schuh, G. Bergweiler, L. Dvorog, F. Fiedler

Der Elektroautohersteller Tesla hat 2018 ein Patent zum Mega-Casting angemeldet. Mit dieser neuen Fertigungsmethode soll es zukünftig möglich sein, eine Karosserie in einem Fertigungsschritt im Aluminium-Druckguss ohne nachfolgende Wärmebehandlung zu fertigen. Der Ansatz steht der etablierten Karosseriebauweise konträr gegenüber. Was bedeutet Mega-Casting für die Automobilindustrie? Ein Expert*innen-Team des Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University hat die Chancen und Risiken des Mega-Castings in einer SWOT-Analyse untersucht.

STICHWÖRTER

Giga-Casting, Tesla, High pressure die casting

1 Einleitung

Im Zuge der Elektromobilität müssen die etablierten Automobilhersteller, oder auch Original Equipment Manufacturer (OEM) genannt, ihre Produktion neu ausrichten und sich dem Wettbewerb mit neuen Marktteilnehmern stellen. Dabei haben neue und etablierte Marktteilnehmer die Chance, ihre Unternehmensstrukturen völlig neu zu denken und neue Fertigungsprozesse zu berücksichtigen.

In Bezug auf die Karosserie ist die selbsttragende Schalenbauweise aus Stahl die am häufigsten vertretene Karosseriebauweise, jedoch lässt sich bereits seit Jahren ein zunehmender Einsatz von Aluminium-Druckgussbauteilen im strukturellen Mischbau feststellen, da hier die Reduzierung der Teileanzahl ohne einen Mehrverbrauch an Material erfolgen kann [2, S. 15]. Zudem lassen sich durch Gussbauteile komplexe Geometrien und Formen abbilden, zum Beispiel bei der Federbeinstütze [3, S. 6]. Mit dem Mega-Casting will Tesla den nächsten Schritt bei den großformatigen Aluminium-Druckgussbauteilen einläuten. Hierbei sollen zukünftig Karosseriebauteile, beispielsweise der Vorderwagen oder sogar ganze Karosserien, in einem Guss hergestellt werden. Tesla hat mit Patentanmeldungen die Vision aufgezeigt, die Fahrzeugproduktion neu zu denken [1, S. 1; 4, S. 3].

Dieser Beitrag zeigt, wie Mega-Casting im Gesamtbild der etablierten Karosseriebauweisen einzuordnen ist, welche Mega-Casting-Konzepte denkbar sind und welche produkt- und produktionsseitigen Chancen und Risiken beim Mega-Casting vorliegen können.

Opportunities and Risks of Mega-Casting in Automotive Production – The Aluminum Die-Casted Body in White

The electric car manufacturer Tesla granted a patent for Mega-Casting in 2018. This new manufacturing method should make it possible in the future to produce a car body in one process using aluminum high pressure die casting (HPDC). The approach is contrary to the established body shop. What does Mega-Casting mean for the automotive and supplier industry? A team of experts from the Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) at RWTH Aachen University has examined the opportunities and risks of Mega-Casting in a SWOT-analysis.

2 Entwicklung der Karosseriebauweisen bis zum Mega-Casting

Historisch gesehen war die erste Karosseriebauweise die sogenannte Rahmenbauweise, die sich noch am hölzernen Fahrgestell der Kutsche orientierte. Die Weiterentwicklung für die ersten Kraftfahrzeuge war der Leiter- oder Rohrrahmen aus Stahl oder Aluminium, an dem Blechbauteile für die Außenhaut montiert werden konnten. In Bild 1 lässt sich diese Bauweise dem strukturellen und stofflichen Mischbau in beispielsweise der Form des heutigen „Al-Space-Frame“ zuordnen (zum Beispiel Audi A8, der seit 1994 so gebaut wird) [3, S. 8–14]. Bei der selbsttragenden Schalenbauweise werden tiefgezogene Blechbauteile in einem komplexen Aufbau miteinander gefügt und bilden so eine tragende Gesamtstruktur. Die Karosserie übernimmt hierbei Aufgaben, wie die Anbindung der Außenhautbauteile, des statischen und dynamischen Verhaltens der Karosserie sowie Crasheigenschaften. Die Schalenbauweise lässt sich klassisch in Stahl (Beispiel VW Golf) und in Aluminium (Honda Acura NSX aus den 90er Jahren) unterscheiden (Bild 1). Die Mischbauweise stellt die dritte prinzipielle Karosseriebauweise dar. Sie kann entweder als eine Kombination von Stahl und Leichtbauwerkstoffen (beispielsweise Aluminium) als stofflicher Mischbau (Beispiel Audi A6) zur Anwendung kommen, oder als struktureller Mischbau, bei dem die Schalenbauweise mit anderen Karosseriebauweisen (Beispiel Rahmenbauweise) kombiniert wird (Beispiel Jaguar F-Type) [3, S. 8–14]. Aufgrund der aktuell umfangreichen Entwicklungen ist die dritte Bauweise derzeit die am meisten untersuchte.

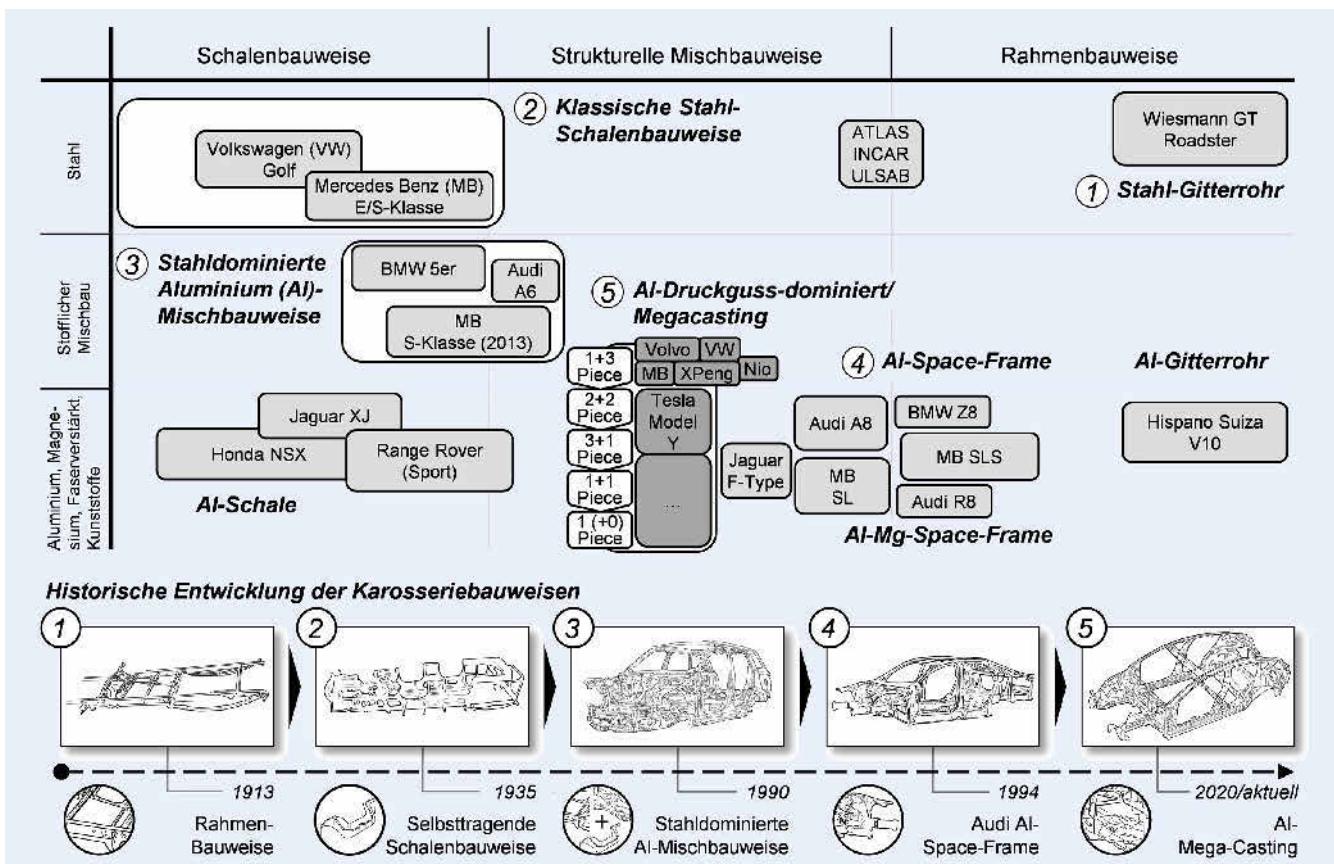


Bild 1. Einordnung der Karosseriebauweise „Mega-Casting“ und dessen Konzepte mit beispielhaften OEM und Modellen im Rahmenwerk der etablierten Karosseriebauweisen (Eigenleistung). Rahmenwerk und Teil-Darstellungen in Anlehnung an Birkert et al. [3], Stellantis [14], Land Rover [15], Tesla [5].
Grafik: WZL

wicklungen der Aluminium-Druckguss-dominierten Karosseriebauweise, wird hierauf nachfolgend der Fokus gelegt.

In dem von Tesla angemeldeten Patent zum Mega-Casting wird die Erfahrung einer optimierten Produktion komplett druckgegossener Karosserien beschrieben. Durch den Einsatz einer eigens hierfür entwickelten Druckgussmaschine mit fünfseitiger Werkzeugführung sollen die Fertigungszeit reduziert und Betriebs-, Fertigungs- und Werkzeugkosten gesenkt werden [1, S. 1]. Mit der Druckgussmaschine „Gigapress“ des italienischen Herstellers Idra wurde die Patentidee erstmalig teilweise in der Praxis umgesetzt und soll so einen neuen Standard für zukünftige Karosseriebauweisen setzen. Geht es nach Tesla, wird die Karosserie kurzfristig aus drei großformatigen Aluminium-Druckgussbauteilen bestehen: dem Vorder-, Mittel- und Heckwagen [5, min 46:56–48:54] und zukünftig aus einem einzigen Guss gefertigt [1, S. 1]. Zudem gibt es ein weiteres Patent von Tesla, das eine Aluminiumlegierung für die spezifischen Anforderungen des Mega-Castings enthält. Diese soll verbesserte Eigenschaften in den Bereichen der Festigkeit, Dehnbarkeit und Gießbarkeit für High-Performance Anwendungen ohne die Notwendigkeit einer anschließenden Wärmebehandlung aufweisen [4, S. 3]. Ein weiteres Patent von Tesla beschreibt, wie die Crashenergie in den Bereichen der Mega-Casting-Bauteile absorbiert und abgeleitet werden kann [6, S. 3].

Die Anwendung von Aluminium-Druckguss in Karosserien ist jedoch keinesfalls neu. Bereits 1994 wurden erstmalig Strukturbauteile aus Aluminium-Druckguss im Audi A8 [3, S. 9] oder

zum Beispiel auch in der Dämpferkonsole der Mercedes-Benz S-Klasse im Jahr 2013 eingesetzt [7, S. 55–61]. Die neue Karosseriebauweise „Mega-Casting“ kann aufgrund eines intensiveren Einsatzes von Aluminium-Druckguss als eine Weiterentwicklung der strukturellen Mischbauweise in die Bild 1 eingeordnet werden.

Aktuellen Nachrichten zufolge wurde Mega-Casting von Tesla in einem Struktur-Batteriepack zusätzlich zum Vorder- und Heckwagen des Tesla Model Y in der Gigafactory in Texas [8] verwendet, weshalb dieses Modell in Bild 1 in der oberen Hälfte der Mega-Casting-Konzepte eingeordnet wird. Volkswagen (VW) will das Mega-Casting für das E-Mobility Projekt „VW Trinity“ [9] nutzen. Volvo hat ebenfalls angekündigt, Mega-Casting vor allem im Heckwagen von E-Autos einzusetzen, jedoch ohne konkrete Nennung um welche Modelle es sich dabei handelt [10]. Mercedes-Benz (MB) hat den Einsatz vom Mega-Casting (MB bezeichnet es Bionic-Cast) im Hinterwagen beim EQXX angedeutet [11, S. 2]. Bei chinesischen OEM ist der Einsatz von Mega-Casting bei XPeng (auch Xiaopeng Motors genannt), Nio [12] sowie Human Horizons (Modell HiPhi) bekannt und bei Xiaomi sowie Li Auto gibt es Mutmaßungen zur Anwendung von Mega-Casting. Bei Nio soll im ET5 ein Mega-Casting-Bauteil im Hinterwagen im Bereich des Unterbodens eingesetzt werden [12, 13].

Grundsätzlich sind alle Mega-Casting-Konzepte der strukturellen Mischbauweise zuzuordnen (Vgl. 5 in der Mitte Bild 1), da sie alle großformatige Aluminium-Druckgussbauteile mit kon-

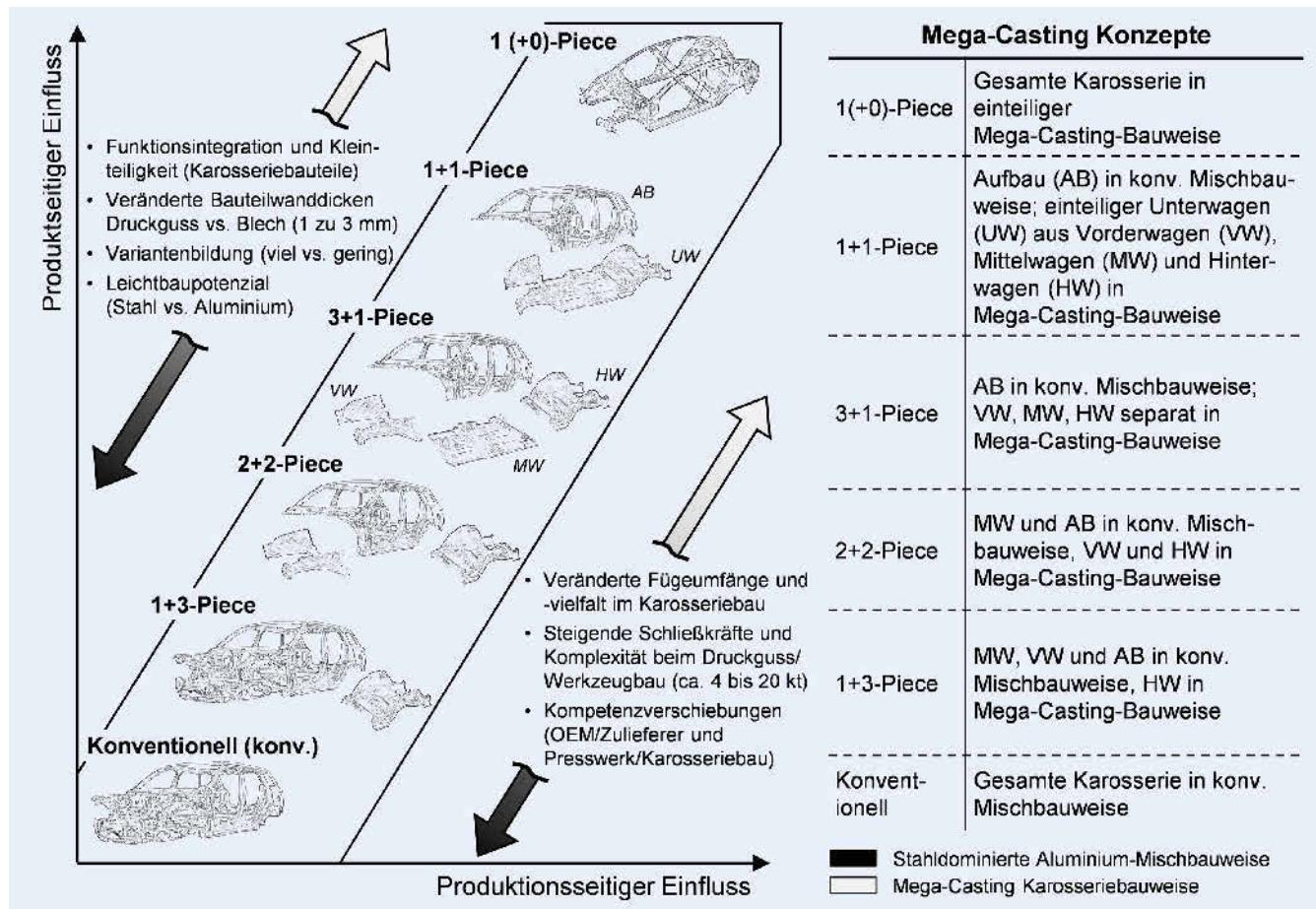


Bild 2. Einteilung der Karosseriebauweise Mega-Casting in fünf Konzepte mit steigendem Anteil des Einsatzes von Aluminium-Druckguss (1+3 Piece bis 1 (+0)-Piece). Grafik: WZL

ventioneller Schalenbauweise kombinieren. Ein wesentliches Merkmal der jeweiligen Mega-Casting-Konzepte ist der Gesamtanteil von Aluminium-Druckguss und damit das sukzessive Ersetzen der jeweilig anderen Karosseriebauweise. Zur Einordnung in die Karosseriebauweisen wurden im Rahmen der Untersuchungen am WZL mehrere Konzepte identifiziert und in **Bild 2** zusammengefasst: das 1+3-Piece, das 2+2-Piece, das 3+1-Piece, das 1+1-Piece und das 1 (+0)-Piece. Die Ziffern der Konzeptbezeichnung geben das Verhältnis zwischen der Anwendung von Mega-Casting (erste Ziffer) und der ergänzenden Karosseriebauweise, bspw. der Schalenbauweise (zweite Ziffer) in den Aufbaustufen der Karosserie an. Hierbei wird zwischen dem Vorderwagen (VW), dem Mittelwagen (MW), dem Hinterwagen (HW), dem Unterwagen (UW) und dem Aufbau (AB) differenziert. Beim 1+3-Piece wird entweder der VW oder HW und beim 2+2-Piece werden beide im Mega-Casting gefertigt, wobei der MW und der AB die Mega-Casting-Bauteile in klassischer Schalenbauweise verbindet [5, min 46:56–48:54]. Beim 3+1-Piece wird zusätzlich der MW/das Strukturbatteriepackgehäuse im Mega-Casting hergestellt, während der AB weiterhin in der Schalenbauweise gefertigt wird. Ebenso wird beim 1+1-Piece der AB in Schalenbauweise gefertigt, während der UW (inkl. VW, MW und HW) aus einem einzelnen Aluminium-Druckgussbauteil entsteht. Beim 1 (+0)-Piece soll die gesamte Karosserie im Mega-Casting gegossen werden.

Seit den Patentveröffentlichungen von Tesla beschäftigen sich zunehmend weitere Unternehmen mit dem Mega-Casting (**Bild 3**) und betrachten die neue Karosseriebauweise als eine durchaus ernstzunehmende Alternative zur konventionellen Fahrzeugproduktion. Neben den bereits erwähnten OEM, werben vor allem die Druckgussmaschinenhersteller Idra Group Ltd. („Giga-press“) [16], die Bühler AG („Carat 920“) [17] und LK Group („Dreampress 9000T“) [18] auf ihren Websites mit Druckgussmaschinen im Kaltkammerverfahren für das Mega-Casting. So hat zum Beispiel die Handtmann Gruppe [19], ein Systemkomponenten-Lieferant für die Automobilindustrie, eine Maschine von Bühler gekauft. Idra zeigt auf ihrer Webseite, dass bereits 23 Gigapress verkauft wurden [20]. Außerdem setzten sich Zulieferfirmen wie Fuchs Petrolub SE [21] bereits mit Schmiermitteln oder die Firma Magma [22] mit einer virtuellen Prozesskette für das Mega-Casting auseinander. Im Bereich der Fügetechnik geht Atlas Copco auf das mechanische Fügen mit Niet-Verbindungen ein, welche für das Fügen von Mega-Casting genutzt werden könnten [23].

3 Produkt- und Produktionsseitige Einflüsse des Mega-Castings

Mega-Casting hat als neue Karosseriebauweise potenziell Einfluss auf die Produkt- sowie Produktionsgestaltung, vom Presswerk über den Karosseriebau bis zur Montage. Wie aber genau

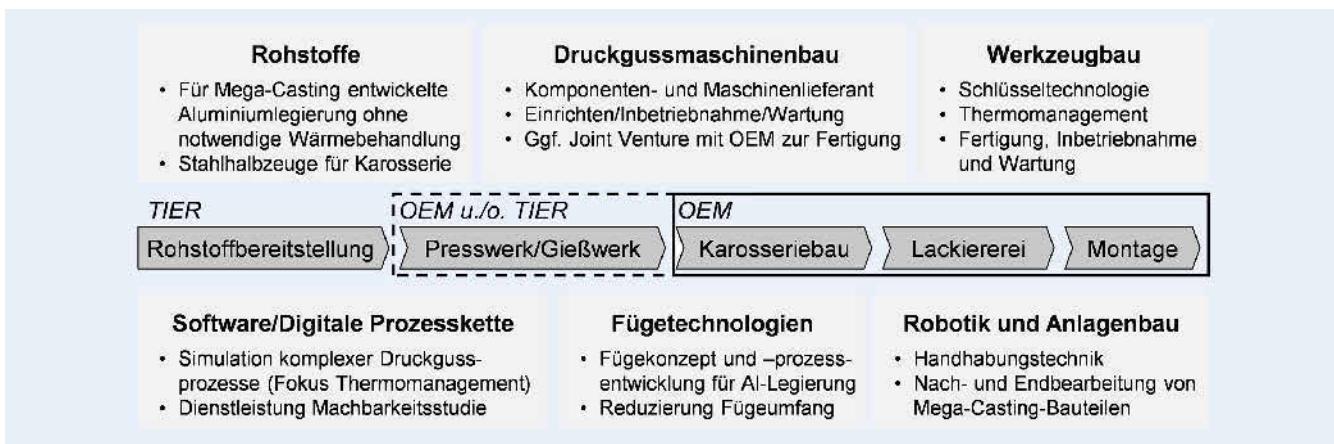


Bild 3. Unternehmensarten und Beispiele im Themenfeld Mega-Casting in der automobilen Prozesskette und Zuliefererpyramide (TIER). Grafik: WZL

kann dieser Einfluss aussehen? Die Autoren dieses Beitrags haben die Chancen und Risiken des Mega-Castings untersucht. Dazu wurde im Projektteam „Mega-Casting“ des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen University nach einem Austausch mit Expert*innen sechs SWOT-Analysen durchgeführt [24]. Jedes der sechs Mitglieder des Projektteams hat die SWOT-Analyse eigenständig durchgeführt und anschließend wurden die Ergebnisse in Bild 4 konsolidiert. Die Einteilung erfolgte nach dem Produkt „Karosserie“ sowie der Produktion „Fahrzeugproduktion“ aus Sicht des OEM.

Für Karosserien nach der konventionellen Mischbauweise eines Mittelklassewagens kann ein Gewicht von circa 260 kg angenommen werden [25]. Dabei sind Wanddicken mit mindestens 0,7 mm notwendig, wohingegen für Druckgussbauteile 2 mm bis 3 mm angenommen wurde [26]. Dies entspricht ungefähr dem Faktor drei. Das Dichtevehrhältnis unterscheidet sich ebenfalls um den Faktor drei von Stahl zu Aluminium [19], was das Leichtbaupotenzial ungefähr ausgleicht und sich damit in erster Näherung neutral bewerten lässt. Durch die größere Mindestwanddicke und die Veränderung der Struktur zu einer offenschaligen Bauweise, stehen neue Herausforderungen im Bereich der Betriebs- und Crashfestigkeit bevor [6]. Gleichzeitig kann eine Reduktion der Produktkomplexität erwartet werden, da die Kleinteiligkeit in der Karosserie durch großformatige Druckgussbauteile reduziert wird. Durch die großen und aufwendigen Druckgusswerkzeuge verringert sich vermutlich zumindest die Variantenbildung der druckgegossenen Karosseriebaugruppen.

Beim Produkt „Karosserie“ wird als Chance die Reduzierung der Bauteileanzahl gewertet, da mit ihr die Komplexität und Anzahl der Fügeoperationen zur Fertigstellung der Karosserie einhergeht. Durch den Einsatz einer neuen patentierten Aluminiumlegierung kann das Produkt ohne Wärmebehandlung auskommen [4]. Außerdem könnten Funktionen in die Karosserie, wie beispielsweise ein Batteriespeicher oder bisher durch Schweißbolzen realisierte Anbindungspunkte, eingebunden werden. Zu den Risiken zählen eine eingeschränkte Variantenvielfalt und das Änderungsmanagement des Produktes aufgrund der aufwendigen Werkzeuge. Durch Verfahrensvorteile beim Mega-Casting oder Aluminiumlegierungen ergibt sich wiederum die Chance, das Leichtbaupotenzial besser zu nutzen. Außerdem könnte eine höhere Werterhaltung durch die Kreislaufführung im Lebenszyklus leichter erlangt werden, da die Werkstoffvielfalt sowie die komplexe gefügten vielen Einzelbauteile im Vergleich zu einer

klassischen Mischbauweise (vgl. Bild 1) reduziert wird und eine lokale Kreislaufführung von fehlerhaften Mega-Casting-Bauteilen bereits im Gießwerk etabliert ist. Risiken beziehungsweise Schwächen sind unter anderem die Crash-Performance, da die Gestaltungsmöglichkeiten werkstoff- (Aluminium) und druckgussprozessseitig (beispielsweise Wanddicke oder Entformungsschrägen) eingeschränkt sind. Weiterhin sind unzureichende Reparaturlösungen im Schadensfall aufgrund des geringeren Formänderungsvermögens und der fehlenden Möglichkeit defekte Bereiche der großformatigen Druckgussbauteile zu ersetzen, als Nachteilig einzuschätzen. Bei Betrachtung von Elektrofahrzeugen folgt, zum Beispiel die Funktionsintegration des Batteriespeichers. Zusätzlich könnte die Fertigung von Batteriepackgehäuse dahingehend verändert werden, dass größere komplexe Batteriepackgehäuse gegossen werden oder dass mehrere kleinere in einem Durchlauf hergestellt werden.

Bei Betrachtung der Produktion „Fahrzeugproduktion“ verändert sich der erste Teil der Prozesskette in Bezug auf das Presswerk, Karosseriebau und die Nachbearbeitung. Zunächst muss das Ressourcen- und Logistikmanagement angepasst werden, da die Vorteilhaftigkeit vornehmlich bei der Fertigung der gesamten Karosserie an einem OEM-Standort entsteht. Dadurch werden lokal deutlich höhere Mengen von Aluminium benötigt und es resultiert ein höherer logistischer Beschaffungsaufwand. Da die Karosserie aus einem oder mehreren großformatigen Aluminium-Druckgussbauteilen besteht, verringert sich die Anzahl der Fügeoperationen deutlich. Das Fügen von Aluminium ist herausfordernder als beispielsweise das Fügen von Stahl. Außerdem muss die Zugänglichkeit zu den weiterhin benötigten Fügestellen auch bei großen Einzelbauteilen wie einem Hinterwagen gegeben sein, sodass im Konstruktionsprozess möglichst wenig Störkonturen berücksichtigt werden müssen. Allerdings verändert sich mit der Bauteilgröße auch die Handhabung (beispielsweise bei der Entnahme aus der Druckgussmaschine) und die Nachbearbeitung. Dazu zählen Fertigungsverfahren mit hoher Genauigkeit, zum Beispiel für den Beschnitt der Bauteile und Einbringung von Funktionsflächen und Anbindungspunkten. Im Bereich der Fahrzeugmontage sollte es hingegen zu keinen größeren Veränderungen kommen, jedoch sind hier neue Montagereihenfolgen, wie beispielsweise die Vormontage eines Teils der Innenraumausstattung auf dem Batteriepack denkbar. Bei Betrachtung des Konstruktionsprozesses wird das Änderungsmanagement deutlich komplexer aufgrund der großen und komplexen Werkzeuge und

	Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
Chancen (Opportunities)	<p>"Nutzen & Ausbauen"</p> <p>Im Produkt „Karosserie“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der hohen Bauteileanzahl und Fügestellen einer Karosserie (resultiert veränderte Fügefolge und Montagereihenfolge) • Funktionsintegration (Bsp. Anbindungspunkte Unterboden und Batteriespeicher) • Aluminiumlegierung ohne Wärmebehandlung <p>In der Produktion „Fahrzeugproduktion“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung komplexer Automatisierungs-, Füge-, und Vorrichtungstechnik • Erhöhung OEM-Wertschöpfungstiefe ggü. Zulieferer • Beim „Greenfield“-Ansatz reduzierte Flächen, Investitionskosten und Taktzeit möglich 	<p>"Entwickeln & Aufholen"</p> <p>Im Produkt „Karosserie“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leichtbaupotenziale ausbauen • Höherer Werterhalt nach dem Lebenszyklus durch Kreislaufführung der Karosserie zurück zum OEM <p>In der Produktion „Fahrzeugproduktion“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausschussrate beim Mega-Casting reduzieren • Bauteil- und Zusammenbauqualität für hohen OEE und Kundenzufriedenheit notwendig • Komplexer Druckgussprozess mit komplexen Druckgusswerkzeugen • Prozesswissen und hochqualifiziertes Personal beim OEM notwendig
Risiken (Threats)	<p>"Abwenden & Absichern"</p> <p>Im Produkt „Karosserie“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einschränkung bei der Variantenbildung in der Karosserie • Die Fähigkeit Änderungsanforderungen umzusetzen ist durch ein großes Druckgusswerkzeug eingeschränkt <p>In der Produktion „Fahrzeugproduktion“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abnehmende/veränderte Bauteillogistik • Kompetenzen der OEM und Zulieferer verändern sich • Skalierung der Bauteile ist möglich, stößt aber an physikalische Druckgussmaschinengrenzen • Korrosionsbeständigkeit mit wenig Aufwand 	<p>"Schützen & Vermeiden"</p> <p>Im Produkt „Karosserie“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unzulässige Bauteilqualität + Porenbildung • Crashperformance + Reparaturmöglichkeit (Schaden) <p>In der Produktion „Fahrzeugproduktion“</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abhängigkeit von einzelnen Technologien (Druckguss statt Tiefziehen+Fügen), Unternehmen, Rohstoffe (Al) • Komplexitätsverlagerung aus automatisierten Karosseriebau in hochkomplexe Druckgussmaschine • Wenig etablierte Technologie mit geringem Erfahrungswissen

Bild 4. Produkt- und Produktionsseitige SWOT-Analyse zum Mega-Casting in der Fahrzeugproduktion. Grafik: WZL

der frühen Festlegung von bisher beispielsweise im Karosseriebau abänderbaren Schweißbolzen als Anbindungspunkte. Somit können die Entwicklung und der Werkzeugbau als eine erhebliche Herausforderung beim Mega-Casting gesehen werden.

Zu den Stärken und Chancen zählt die Reduzierung aufwendiger Automations- und Prozesstechnik im Karosseriebau, die mit der Bauteilereduktion einhergeht. Außerdem werden eine Erhöhung der Wertschöpfung beim OEM sowie reduzierte Flächen, Taktzeiten und Investitionskosten beim „Green-Field Ansatz“ zu den Chancen gezählt. Als Risiko wurden die abnehmende beziehungsweise veränderte Logistik, die Veränderung der Kompetenzen bei Zulieferern und OEM sowie die Zielsetzung, die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile mit möglichst wenig Aufwand zu erreichen, gewertet. Maschinentechnisch könnten die für das Mega-Casting benötigten großen Druckgussmaschinen an ihre physikalischen Grenzen stoßen, was in der Vergangenheit jedoch bereits häufiger überholt wurde. Weitere Schwächen und Risiken sind das bis dato geringe Know-how über Mega-Casting-Bauteile, die Abhängigkeit von „einer“ Technologie, Unternehmen sowie dem Rohstoff Aluminium. Außerdem droht durch den Wechsel von seit mehreren Jahrzehnten etablierten Presswerk- und Karosseriebauprozessen zu einem hochkomplexen Druckgussprozess eine Kompetenz- und Komplexitätsverschiebung.

Daraus ergeben sich wiederum auch Chancen: Zum einen handelt es sich beim Mega-Casting um einen hochkomplexen Druckgussprozess, der hochqualifiziertes Personal benötigt und damit in Hochlohnländern wie Deutschland Arbeitsplätze erzeugen kann. Zum anderen muss eine ausreichende Bauteilqualität in Kombination mit einer geringen Ausschussrate erreicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mega-Casting ist eine neue Karosseriebauweise, die sich in der Fertigung und im Materialeinsatz von etablierten Bauweisen abgrenzen kann. Seit den Patentanmeldungen von Tesla im Jahr 2018 und der stetigen Praxisanwendung beschäftigen sich zunehmend auch andere OEM und Zulieferer mit dem Mega-Casting, unter anderem Volvo und Volkswagen haben hierzu konkrete Pläne veröffentlicht. Zukünftig hat das Mega-Casting das Potenzial, eine entscheidende Rolle in der Fahrzeugproduktion einzunehmen. Eine SWOT-Analyse zeigt: Durch den Aufbau der Karosserie als eine einzige Komponente kann vermutlich eine Reduzierung der Taktzeit und der Komplexität erreicht werden. Zugleich entstehen durch das Mega-Casting aber auch neue Herausforderungen hinsichtlich Crash-Performance und Reparaturlösungen. Für den Produktionsprozess müssen Konzepte für die Produktion, Maschinen und das Ressourcenmanagement weiterentwickelt werden. Zusätzlich müssen Druckgussmaschinen für derart große Bauteile (beispielsweise 1(+0)-Piece Konzept), mit hoher qualitativer Zuverlässigkeit, entwickelt werden.

Um die notwendigen Konzepte zu entwickeln, stehen wir im intensiven Austausch mit Expert*innen aus Forschung und Industrie, um das Potenzial zu identifizieren und das Mega-Casting zu befähigen. Konkret ist hierfür aktuell eine Konsortialstudie und eine Online-Umfragen zu Trends in der Fahrzeugproduktion mit Fokus auf Mega-Casting geplant. Die Einflussanalyse auf die Zuliefererindustrie ist ebenfalls abgeschlossen und wird zeitnah veröffentlicht.

L i t e r a t u r

- [1] Kallas M. K.: Multi-Directional Unibody Casting Machine For A Vehicle Frame And Associated Methods, US 2019/0217380 A1, 2018
- [2] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013
- [3] Birkert et al.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserie- teile, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [4] Stucki, J.; Patinson, G.; Hamill, Q.; Prabhu, A.; Palanivel, S.; Lopez-Garrity, O.: Die cast aluminium alloys for structural components, PCT/US2021/014177, 2021
- [5] Tesla, Video: Battery Day, 2020. Internet: https://tesla-cdn.thron.com/static/JIXJRM_2020-Battery-Day-2000_WBRTSS.mp4?xseo=. Zugriff am 04.07.2022
- [6] Rai, A.; Sawant, S.; Winberg, P.; Burgess, M.; Spencer, T.; Kornmayer, P.; Pattinson, G.; Edwards, P.; Rinaldi, C.; Reikher, A.; Kuehmann, C.; Moll, D.: Integrated energy absorbing castings, WO 2022/031991 A1, 2022
- [7] Verein Deutscher Ingenieure: Gießen von Fahrwerks- und Karosserie- komponenten, VDI 2318, VDI Verlag, 2018
- [8] Electrek: Tesla produces first ModelY megacast in gigafactory in Texas. Stand:2022. Internet: <https://electrek.co/2021/05/17/tesla-produces-first-model-y-megacast-gigafactory-texas/>. Zugriff am 04.07.22
- [9] Insideevs: VW's project Trinity To Use Giga-Casting & Automation to compete with Tesla. Stand 2022. Internet: <https://insideevs.com/news/577128/volkswagen-compete-tesla-gigapress-robots/>. Zugriff am 04.07.22
- [10] Volvo Car Switzerland AG: Mega casting. Stand:2022. Internet: <https://www.media.volvcars.com/ch/de-ch/media/photos/294346/me ga-casting-1>. Zugriff am 04.07.22
- [11] Rakoto, B.; Ling, L.: Mega-Casting Trends for Automotive Manufacturers, Mai 2022
- [12] YZweekly: Nios erstes Modell der ET5 mit "integrierter Druckgusstechnologie" wird in Serie produziert und ausgeliefert. Stand 2022. Internet: <http://www.yzweekly.com/xyzd/zhengche/7604.htm>. Zugriff am 02.09.2022
- [13] Phate Zhang/CnEVPost: HiPhi becomes latest Chinese EV startup to use large die-casting technology. Stand 01.03.2022. Internet: <https://cnevpost.com/2022/03/01/hiphi-becomes-latest-chinese-ev-start-up-to-use-large-die-casting-technology/>. Zugriff am 06.09.2022
- [14] Stellantis: Lambda (historisch). Stand 2022. Internet: <https://www.mediastellantis.com/de-de/lancia/gallery/1376>. Zugriff am 02.09.2022
- [15] Land Rover, Land Rover Leichtbau Strategie, 2014. Stand 2022. Internet: <https://media.landrover.com/dede/news/2014/05/land-rover-leichtbau-strategie>. Zugriff am 21.02.2022
- [16] Idra: NEO 5500 – NEO 6100 – NEO 8000 – NEO 9000. Stand 2022. Internet: <https://www.idragroup.com/de/gigapress>. Zugriff am 04.07.2022.
- [17] Bühler Group: Umfassendes Know-how rund um die Produktion von Megacasting. Stand 2022. Internet: <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/de/industries/die-casting/megacasting.html>. Zugriff am 04.07.2022.
- [18] Spotlightmetal: LK Group introduces the World's First 6000T & 9000T Giant Die Casting Machine. Stand: 2022. Internet: <https://www.spotlightmetal.com/lk-group-introduces-the-worlds-first-6000t-9000t-giant-die-casting-machine-a-1036839/>. Zugriff am 04.07.2022
- [19] Alu-Web: Handtmann investiert in Megacasting-Lösung von Bühler. Stand 2022. Internet: <https://alu-web.de/handtmann-investiert-in-mega-casting-loesung-von-buehler/>. Zugriff am 04.07.2022
- [20] Idra: The great success of Giga Press. Stand: 2022. Internet: <https://www.idragroup.com/en>. Zugriff am 04.07.2022
- [21] Fuchs: Mega-Casting: Druckgussverfahren revolutioniert Automobilbau. Stand: 2022. Internet: <https://www.fuchs.com/de/de/produkte/schmierstoffe-und-services/schmierstoffe-fuer-spezialanwendungen/umformschmierstoffe/mega-casting/>. Zugriff am 04.07.2022
- [22] Home of Foundry: Think Big...Giga-Castings. Stand: 2022. Internet: <https://www.home-of-foundry.de/news/think-biggiga-castings-1002>. Zugriff am 04.07.2022
- [23] Briskham, P.: Joining of aluminium alloys with low ductility. 2022.
- [24] Paul, H.; Wollny, V.: Instrumente des strategischen Managements, De Gruyter Oldenbourg 2014.
- [25] Pischinger, S.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021
- [26] Fuchslocher, G.: Gigacasting ist geeignet, den Karosseriebau neu zu denken, Automobil Produktion, 2022. Internet: <https://www.automobilproduktion.de/interviews-734/gigacastingistgeeignet-den-karosseriebau-neu-zu-denken-501.html>. Zugriff am 27.02.2022



F a l k o F i e d l e r , M. Sc., IWE
Foto: WZL

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G ü n t h e r S c h u h

Dr.-Ing. G e o r g B e r g w e i l e r

L e o n h a r d D w o r o g , B. Sc.

Werkzeugmaschinenlabor WZL
der RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
Tel. +49 160 91794274
f.fiedler@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de
www.anlauffabrik-aachen.de





Konzept zur hochproduktiven Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien durch hydraulische Pressen

Hochproduktive, hydraulische Batteriezellfertigung

N. Schmidgruber, D. Mayer, J. Fleischer

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Konzept zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien vorgestellt, das den Ablauf einer Pressenstraße auf die Batteriezellfertigung adaptiert. Es werden Optimierungspotenziale in den Teilprozessen analysiert und in Konzeptform ausgenutzt. Das Konzept wird anhand von Vorversuchen bewertet.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Batteriefertigung, Produktionstechnik

Highly productive, hydraulic batterycell manufacturing - Plan for the highly productive manufacturing of lithium-ion batteries using a hydraulic press

This paper presents a novel plan for the production of lithium-ion batteries that adapts the sequence of a press line to battery cell production. Opportunities for improving the sub-processes are analysed and exploited in forming a plan. The plan is evaluated on the basis of preliminary tests.

1 Einleitung und Motivation

Durch den technologischen Wandel im Energie- und Mobilitätssektor steigt das Interesse an der Herstellung leistungsfähiger, großformatiger Batterien. Daher wurden bereits Produktionskapazitäten in der Größenordnung von 300 – 400 GWh/a bis 2025 in Europa [1] angekündigt. Gerade im Assemblierungsprozess der Batteriezellen wird eine Vielzahl an Anlagen benötigt. Allerdings sind hierfür nur wenige europäische Anlagenbauer verfügbar. Um sich am Markt durchzusetzen, muss eine Verbesserung des Produktionsprozesses erreicht werden, die mit einer erhöhten Produktivität oder einer erhöhten Zellqualität einhergeht. Eine Verbesserung kann durch innovative Anlagenkonzepte oder durch die Integration neuer Technologien erreicht werden.

Die Prozesskette der Batteriezellproduktion kann in die drei Hauptgruppen Elektrodenherstellung, Zellassembly und Aktivierung unterteilt werden. Die Elektrodenherstellung endet dabei mit beschichteten, auf Rollen vorliegenden Elektrodenmaterialien. Diese Rollenmaterialien werden anschließend durch einen Schnitt- oder Stanzprozess in einzelne Elektrodenblätter überführt. Durch ein wechselseitiges Übereinanderschichten wird aus den Einzelblättern ein Stapel gebildet, der durch Verkleben oder Laminieren fixiert werden kann. Durch einen Schweißprozess werden die Ableiter der Zelle kontaktiert. Der Elektrodenstapel wird zwischen zuvor tiefgezogenen Halbschalen aus Pouchfolie platziert und durch Versiegeln verschlossen. In der Aktivierung wird die assemblede Zelle final mit Elektrolyt gefüllt und durchläuft ihre ersten Lade-/Entlade-Zyklen.

Bei der Betrachtung der Zellassemblyschritte in Bild 1 ist ein gemeinsamer Fokus auf lineare, vertikale Antriebsbewegungen zu erkennen. Die Bewegungen weisen dabei einen gleichzeitigen Ablauf und getaktete Bewegungen auf.

Solche Abläufe können auch in Pressenstraßen gefunden werden, die beispielsweise in der Herstellung von Karosseriebauteilen Anwendung finden. Im Anlagenverbund einer Pressenstraße führen die einzelnen servohydraulischen oder servoelektrischen Pressen je einen Aspekt der Herstellung getaktet durch. Es liegt daher nahe, die Idee einer Pressenstraße auf die Zellassembly zu übertragen. Es soll ein Konzept entwickelt werden, das die Produktivität klassischer Pressenstraßen und ihrer servohydraulischen Antriebstechnik in die Batterieproduktion überführt. Analog zur traditionellen Pressenstraße wird für kraftintensive, lineare Bewegungen in diesem Anlagenverbund auf servohydraulische Pressen zurückgegriffen. Der Anlagenverbund deckt die Schritte der Zellassembly, ausgehend von den jeweiligen Elektrodenmaterial-Coils bis zur versiegelten Zelle, ab.

2 Konzeptionierung

Zur Entwicklung des Anlagenkonzepts werden die Schritte gemeinsamer Taktung identifiziert. Um die komplexen Teilprozesse genauer zu verstehen und zu abstrahieren, werden diese in ihre Elementarfunktionen aufgeteilt. Dabei wird auf die VDI-Richtlinie 2860 [2] zurückgegriffen. Eine detaillierte Analyse der Teilprozesse ermöglicht zudem die Identifikation nicht produktiver Schritte, sodass diese minimiert und die Produktivität des Gesamtkonzepts erhöht werden kann.

2.1 Prozessanalyse

Die Dekomposition der Teilprozesse in ihre Elementarfunktionen wird in Bild 2 dargestellt:

Im Vergleich zu herkömmlichen Zellassemblyanlagen ergeben sich drei Optimierungsaspekte, die sich in der Analyse der Prozesskette zeigen:



Bild 1. Prozesskette der Pouchzellen-Produktion. Grafik: wbk

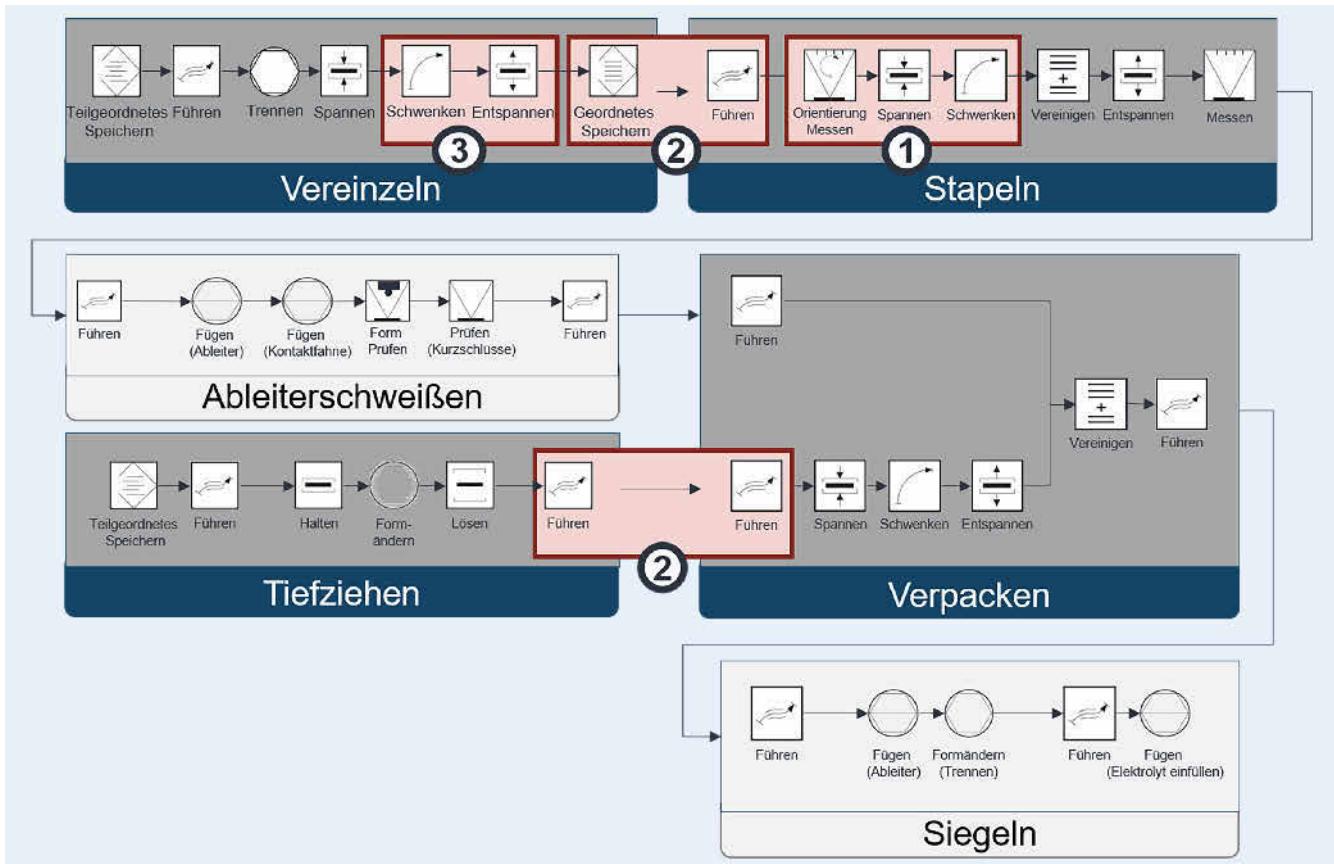


Bild 2. Dekomposition der Prozesskette. Grafik: wbk

- Wie in [3] dargestellt kann das Beibehalten des Ordnungszustandes der Elektrodenblätter aus dem Vereinzeln mehrere zeitintensive Mess- und Ausrichtungsschritte im Prozessschritt Stapeln (in Bild 2 mit ① markiert) ersetzen. Das Verfahren des Feinstanzens ermöglicht darüber hinaus eine sehr hohe Schnittkantenqualität und wird damit als Vereinzelungsverfahren des Konzepts berücksichtigt [4].
- Ein weiterer zeitkritischer Schritt in der Prozesskette ist die Handhabung der biegeschlaffen Elektrodenblätter, Zellstapel und Halbschalen sowie der Vorschub in den anschließenden

Prozess (gekennzeichnet durch ② in Bild 2). Bei einer Umsetzung als Stückgut werden diskontinuierliche Greifprozesse benötigt um einen Vorschub der Erzeugnisse zu ermöglichen. Der Einsatz der bandförmigen Materialien – Separator und Pouchfolie – als eine Art Fördereinrichtung kann diese diskontinuierlichen Prozessschritte ersetzen.

- Um die vereinzelten Elektrodenblätter auf dem kontinuierlichen Separatorband in Position zu halten, ist an Stelle ③ in Bild 2 ein Verbindungsverfahren (oftmals als Laminieren bezeichnet) nötig. Dabei bestehen zwei technologische Mög-

lichkeiten: Ein Klebeverfahren analog zu [5] oder ein Heat Pressing-Verfahren, in dem Klebestellen im Separator durch Hitze und Druck aktiviert werden. Während die lösemittelbasierten Klebeverbindungen meist zu biegeschlaffen Elektrodenverbünden führen, ermöglicht das Heat Pressing steife, handhabbare Verbünde. Im vorliegenden Konzept soll das Heat Pressing jedoch nicht nur der verbesserten Handhabbarkeit des Stapels dienen, sondern die Einzelblätter bereits von Beginn an fixieren. So kann der Einsatz zusätzlicher Klemmeinheiten und Magazine vermieden werden.

2.2 Konzeptzusammenführung

Diese Ansätze für eine produktivere Batteriezellassembly sollen in ein auskonstruiertes Konzept umgesetzt werden. Das vollständige Anlagenkonzept lässt sich in zwei kontinuierlich arbeitende Stränge unterteilen:

Die Herstellung des gesamten Zellstapels wird entlang des kontinuierlichen Separatorbandes realisiert. Dabei wird eine Stand-der-Technik-Materialzuführung für die einzelnen Bandmaterialien eingesetzt. Zur Vereinzelung der Elektroden wird das Pick-and-Place-Verfahren (vergleiche [3]) weiterentwickelt. Dabei wird das Elektrodenmaterial zum Zeitpunkt des Schnitts gegriffen und fixiert. Statt eines traversierenden Ablegetisches werden die Elektroden direkt auf ein kontinuierliches Separatorband aufgebracht. Dabei kann der Ordnungszustand der Elektrode erhalten werden. Es werden gleichzeitig Elektrodenblätter der Anode und der Kathode vereinzelt und auf übereinanderliegenden Separatorbändern aufgebracht. Ein anschließender Laminationsschritt verbindet die mit Elektroden bestückten Separatorbänder zu einem gemeinsamen Strang. Je nach gewünschter Zellkapazität (der Entwurf orientiert sich an den 50-Ah- und 20-Ah-Zellformaten des Karlsruher Instituts für Technologie) werden Monozellen von dem Strang abgetrennt. Die zugeschnittenen Monozellen werden direkt gegriffen, gestapelt und zu einem vollständigen Zellstapel laminiert. Eine kompakt unter der Stapelbildung angeordnete Einheit zur Kontaktierung des Zellstapels bildet den Abschluss des in **Bild 3** gezeigten Anlagenteils.

Über ein Zuführband wird der kontaktierte Zellstapel an den zweiten kontinuierlichen Anlagenstrang (**Bild 4**) übergeben.

Eine Tiefziehpresse formt dabei jeweils zwei nebeneinander liegende Halbschalen im kontinuierlichen Pouchfolienstrang aus. Das Tiefziehwerkzeug ist dafür mit zwei Kavitäten ausgeprägt und bringt Entlastungsschnitte in das Material ein. Der Halbschalenstrang wird durch ein Vakuumförderband zum Zuführband positioniert. Der so eingelegte Zellstapel wird durch den Formschluss mit der Halbschale in Position gehalten. Im nächsten Schritt des Konzepts wird die leere Halbschalenseite geöffnet und auf die Gegenseite gefaltet. Der hierfür nötige Schnitt wird parallel zum Faltvorgang eingebracht. Um das geschlossene Halbschalenpaar in Position zu fixieren, wird der Greifer der Falteinheit mit integrierten Siegelbalken ausgeführt. Eine abschließende Handhabungseinheit vereinzelte die Zellen vom kontinuierlichen Pouchfolienband und hält diese für anschließende Prozesse vor.

3 Validierung der Prozesse „Heat Pressing“ und „Halbschalen tiefziehen“

Für eine industrielle Umsetzung des Anlagenkonzepts muss die Funktionsfähigkeit des neu entwickelten Anlagenverbunds



Bild 3. Herstellung des Zellstapels. Foto: wbk



Bild 4. Assemblierung der Pouchzelle. Foto: wbk

nachgewiesen werden. Die Anwendung des Heat-Pressing-Laminierens wurde daher auf seine Einsetzbarkeit untersucht.

Für die Untersuchung des Heat Pressing wurde eine servohydraulische 100-kN-Presse genutzt, deren Werkzeughälften bis zu 120 °C erwärmt werden können. Als Separatormaterial wurde „R0542C“ des Herstellers Celgard gewählt, als Elektrodenmaterial wurden eine grafitbasierte Anode und eine NMC111-Kathode eingesetzt. Nach dem Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität wurden die Prozessparameter Werkzeugtemperatur (80 °C – 110 °C), Presskraft (10 kN – 100 kN) und Haltezeit (1 s – 30 s) variiert. Die Teststücke wurden visuell nach ihrer Verbundqualität bewertet. Es wurde zwischen „keine/sehr geringe Haftung“ oder „beschädigter Separator/Elektrode“, „ungleichmäßige Haftung“ und „konsistente Haftung über die gesamte Elektrodenfläche“ unterschieden. Die Ergebnisse sind in **Bild 5** dargestellt.

Es zeigt sich, dass eine hohe Pressenkraft (100 kN) und eine hohe Werkzeugtemperatur (100 °C) eine akzeptable Verbundqualität bei niedriger Haltezeit (1 s) ermöglichen. Eine ähnliche Verbundqualität wird bei niedrigeren Temperaturen oder Drücken nur bei signifikant höheren Haltezeiten erreicht. So ist bei einer Presskraft von 10 kN und gleicher Werkzeugtemperatur eine Haltezeit von 10 s für ein akzeptables Laminat notwendig. Die hohen Kräfte, die durch servohydraulische Pressen aufgebracht werden können, sind daher für die Prozesszeit besonders vorteilhaft.

Die zur Lamination eingesetzte Presse kann durch einen zweiten Kolben auch für die Herstellung tiefgezogener Halbschalen eingesetzt werden. Das Tiefziehen der Pouchfolien mit hydraulischen Pressen wurde in [6] grundsätzlich validiert. Das dort angewendete Halbschalenformat unterscheidet sich signifikant vom Format, das als Grundlage dieses Konzepts gewählt wurde.

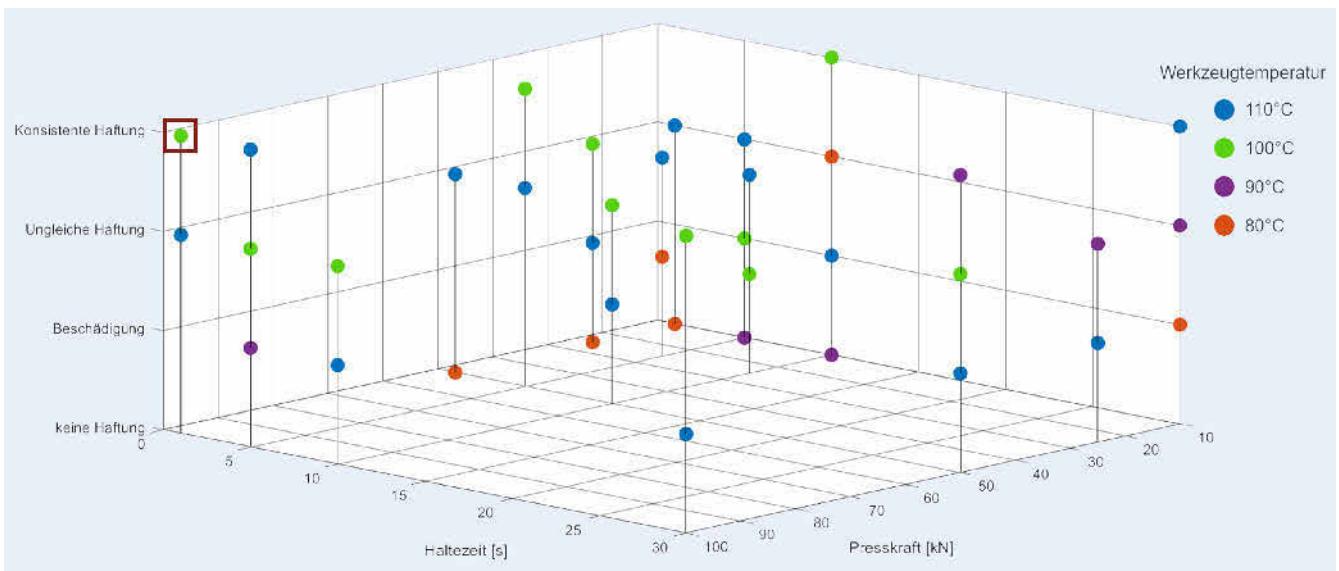


Bild 5. Ergebnisse der Heat-Pressing-Versuche. Grafik: wbk



Bild 6. Fehlerbilder beim Pouchfolie-Tiefziehen: (1) Falten, (2) Risse, (3) Einziehungen. Foto: wbk

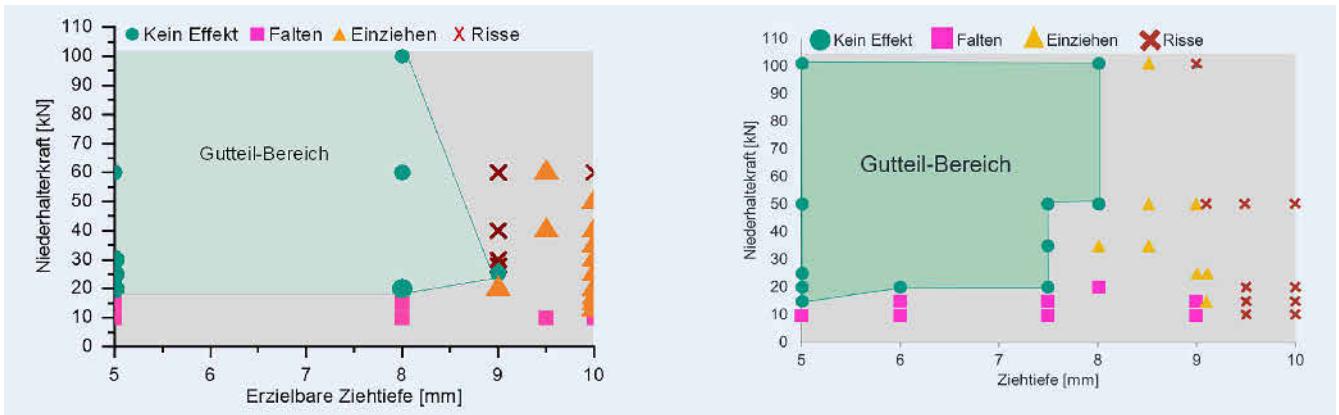


Bild 7. Gutteilbereiche beim Tiefziehen unterschiedlicher Zellformate: links aus [6], rechts für das KIT-Format. Grafik: links: [6], rechts: wbk

Es wird untersucht, welchen Einfluss ein Wechsel von einem schmäleren Zellformat mit großen Eckenradien auf ein breiteres Zellformat mit geringen Eckenradien hat. In [6] wurde die Niederhaltekraft als jener Parameter mit dem größten Einfluss auf den Pouchfolien-Tiefziehprozess identifiziert. Aus diesem Grund wird dieser Parameter auch bei der Untersuchung des neuen Zellformats variiert. Die Ziehkraft wird auf 20 kN begrenzt, die gewünschte Ziehtiefe wird durch eine Wegsteuerung erreicht. Als Haltezeit wird durchgängig 1 s verwendet, Stempel und Niederhalter verfahren mit 2 mm/s. Das umgeformte Material ist eine 153 µm dicke Pouchfolie. Dabei wird zwischen Gutteilen und

Teststücken mit den Qualitätsfehlern „Falten“, „Risse“ und „Einziehungen“ unterschieden, welche visuell klassifiziert wurden. Die Fehlerbilder sind in Bild 6 zu sehen, die Ergebnisse der Versuche in Bild 7.

Ein Wechsel des Zellformats und damit der Halbschalengeometrie führt zu einem veränderten Gutteilbereich. Dabei verringern größere Abmessungen und geringere Eckenradien die maximal erreichbare Ziehtiefe. Die im industriellen Umfeld verbreitete maximale Ziehtiefe von 7,5 mm [7] kann auch bei einer drastischen Verringerung der Eckenradien erreicht werden.



4 Ausblick

Das in dieser Veröffentlichung beschriebene Anlagenkonzept ermöglicht eine produktive Herstellung von hochwertigen Batterie-Pouchzellen. Dabei werden verschiedene neue Ansätze der kontinuierlichen Bahnverarbeitung und der Separator-Lamination angewendet. Der Einsatz der hydraulischen Antriebstechnik kann für Prozessschritte mit hohen Kraftanforderungen große Vorteile bringen. Die Ergebnisse der Validierung zeigen das große Potenzial in der Halbschalen- und Laminatherstellung auf.

Weitere Untersuchungen dieser Prozesse sind nötig, um diese Technologien für industrielle Anwendungen vorzubereiten. So ist beim Laminieren durch Heat Pressing festzustellen, ob speziell angepasste Werkzeugformen verbesserte Ergebnisse erzielen und inwieweit sich die optimalen Einstellgrößen mit der Dicke des Zellstapels verändern. Um den Trend einer agilen Batteriezellfertigung auch in der Herstellung von Halbschalen zu ermöglichen, wäre ein formatflexibles Tiefziehwerkzeug nötig. In diesem Zusammenhang muss genauer erfasst werden welchen Einfluss unterschiedliche Werkzeuggeometrien auf die Qualität der Halbschalen haben beziehungsweise wie dieser Einfluss ausgeglichen werden kann.

DANKSAGUNG

Die vorgestellten Forschungsarbeiten werden vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden Württemberg gefördert und im Rahmen des Center for Electrochemical Energy Storage Ulm | Karlsruhe (CELEST) sowie dem Batterietechnikum des KIT durchgeführt.

L i t e r a t u r

- [1] Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M.: Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2015
- [2] Verein Deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen. Berlin: Beuth-Verlag 1990
- [3] Baumeister, M.; Fleischer J.: Integrated cut and place module for high productive manufacturing of lithium-ion cells. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63 (2014) 1, pp. 5–8
- [4] Baumeister, M.: Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion, Aachen: Shaker Verlag 2017
- [5] Aydemir, M.; Mooy, R.; Glodde, A. et al.: Fügen von Elektrodenfolien in der Batteriezellherstellung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 10, S. 684–689
- [6] Pfeiffer, R.: Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen. Düren: Shaker Verlag 2020
- [7] Birke, K.; Demolli, S.: Chapter 2: Lithium-ion Cells: Discussion of Different Cell Housings. In: Birke, K. P. (ed.): Modern Battery Engineering – A Comprehensive Introduction. Singapore: World Scientific Publishing Company 2019, pp. 31–41



N i l s S c h m i d g r u b e r , M.Sc.
Foto: KIT wbk

D o m i n i k M a y e r , M.Sc.

Prof. Dr.-Ing Jürgen Fleischer
wbk Institut für Produktionstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Str. 5, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 1523 / 9502604
nils.schmidgruber@kit.edu
www.wbk.kit.edu

CNC-Spannsysteme fehlerfrei montieren

AR-Assistenz für die modulare Spannmittelmontage

S. Sauer, D. Berndt

In der CNC-Bearbeitung ist es zur Kollisionsvermeidung sehr wichtig, dass real aufgebaute Spannsysteme exakt der Vorgabe aus der CAD/CAM-Simulation entsprechen. In diesem Beitrag wird ein industrietaugliches Assistenzsystem präsentiert, mit dem per Augmented Reality (AR) die manuelle Montage von modularen Spannsystemen unterstützt wird und so Fehler vermieden werden können. Es wird aufgezeigt, dass die Kamera-Monitor-basierte AR geeignet ist, um unter rauen Bedingungen intuitive Montageanleitungen zu visualisieren. Dadurch lassen sich Bearbeitungszeiten in der CNC-Maschine verkürzen und die Montage beschleunigen.

STICHWÖRTER

Spanntechnik, Vorrichtungsbau, Bearbeitungszentren

Error-free Assembly of Clamping Systems – Assembly Assistance for Modular Clamping Systems

In CNC machining, the similarity of real assembled clamping systems compared to the constructed clampings in CAD/CAM is of critical importance. If differences are present, unintentional collisions between tool and clamping system can occur, which may lead to total breakdown. In this work we present an Augmented Reality (AR) industry-ready assistance solution, which helps workers to reduce the error rate when clamping systems are assembled manually. We will show that camera-screen-based AR is well suited to present assembly instructions in harsh environmental conditions and that by using this solution machining times can be reduced and the assembly itself can be accelerated significantly.

1 Motivation

Im Sondermaschinenbau werden verstärkt Kleinserien gefertigt. Die dafür notwendigen Einzelteile fallen daher zum Teil mit einer hohen Variantenvielfalt bei vergleichsweise geringer Losgröße aus. Daher stellen Fertigung und Montage der Teile aufgrund der sich stetig ändernden Bedingungen eine große Herausforderung für den Menschen dar.

Ein wichtiger Schritt in der Fertigung ist die spanende Verarbeitung von Rohtenilen zu Fertigteilen mittels CNC-Maschinen. Hier werden die zu bearbeitenden Bauteile in Spannvorrichtungen fixiert, damit diese automatisiert spanend bearbeitet werden können. Für den Kleinserienbereich existieren Baukastensysteme mit einer Vielzahl von Komponenten, aus denen diese Spannvorrichtungen manuell zusammengesetzt werden können. Hierbei ist es von enormer Wichtigkeit, dass die Spannvorrichtungen exakt nach Vorgabe aufgebaut werden. Werden dabei falsche Komponenten verwendet oder diese nicht lagerichtig montiert, kann es zu ungewollten Kollisionen in der Bearbeitungsmaschine kommen, wenn das Werkzeug oder die Spindel mit der Spannvorrichtung oder einem falsch fixierten Bauteil kollidiert.

Die Montage der Spannsysteme erfolgt derzeit überwiegend manuell und anhand von abgeleiteten 2D-Zeichnungen, Screenshots aus dem Konstruktionsprogramm oder Fotos von zuvor bereits montierten Spannsystemen. Zur Bearbeitung wird das Spannsystem in die CNC-Maschine eingefahren und das erste Rohteil einer Serie, das „Ersteil“ fixiert. Da nicht sichergestellt werden kann, dass das Spannsystem fehlerfrei ist, wird die Bearbeitungsgeschwindigkeit der Maschine stark gedrosselt und

der Maschinenbediener fährt dieses satzweise, das heißt Punkt für Punkt ab. Wird dabei ein Montagefehler erkannt, muss das Bearbeitungsprogramm abgebrochen, das Spannsystem aus der Maschine entfernt, korrigiert und neu getestet werden.

Der digitale Bruch, der somit bei der manuellen Spannsystemmontage entsteht, verursacht hier eine eklatante Lücke, die zu hohen Belastungen der Mitarbeiter und erhöhtem Zeitaufwand führt und im Fehlerfall zu hohen Kosten durch Maschinenschäden.

In diesem Beitrag wird ein Augmented-Reality-System vorgestellt, mit dem die modulare Spannsystemmontage sicherer und effizienter durchgeführt werden kann, s. Bild 1.

2 Augmented Reality in der Montage

Eine Vielzahl von Studien beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob und in welchem Maße AR hilft, die mentale und kognitive Arbeitsbelastung zu senken und dabei die Produktivität der Anwender zu steigern [1]. Abhängig vom Ausgabegerät wird AR mehrere Typen gegliedert, die jeweils Vor- und Nachteile haben:

- Mobile AR: Hier werden Informationen auf tragbaren Endgeräten wie Smartphones oder Tablets ausgegeben. Dabei wird typischerweise der Videostrom der integrierten Kamera mit zusätzlichen Visualisierungen angereichert, die örtlich referenziert sein können [2]. Mobile AR bietet eine hohe Flexibilität bei der Auswahl der Perspektive, jedoch muss das Gerät gehalten werden, wodurch eher für Instandhaltungs- und Wartungsaufgaben geeignet ist.

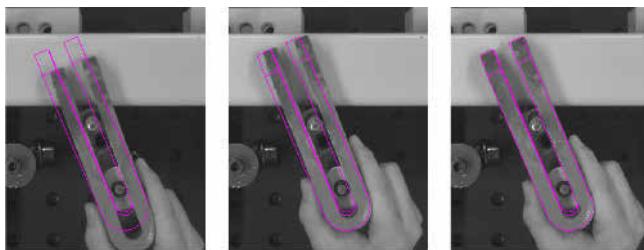


Bild 1. Assistierte Ausrichtung eines Spanneisens mittels Augmented Reality. Foto: IFF / FMA

- Optical See-Through AR: Bei dieser Variante tragen die Nutzer eine Brille, an dem ein halbtransparentes Display angeschlossen ist (Head Mounted Display, HMD). Die dargestellten Informationen können räumlich referenziert sein und werden direkt in das Sichtfeld des Anwenders eingeblendet. Verschiedene Studien zeigen bisher, dass AR per HMD generell unter Akzeptanzproblemen leidet, die hauptsächlich durch unangenehmes Tragen über einen längeren Zeitraum und das eingeschränkte Sichtfeld hervorgerufen werden [3–5].
- Projektive AR / Spatial AR: Hierbei werden die Informationen mittels eines externen Projektors direkt auf eine Arbeitsfläche oder ein Bauteil projiziert [5]. Die Nutzbarkeit dieser Form hängt stark vom Anwendungsszenario ab. Projektionen sind generell anfällig für Schwankungen in der Umgebungsbeleuchtung und für glänzende Oberflächen. Zudem sind sie bei der Darstellung 3-dimensionaler Inhalte wenig intuitiv, da die meisten Projektoren für eine Darstellung auf ebenen Flächen ausgelegt sind [6].
- Indirekte AR: Hiermit werden Systeme mit fest installierten oder frei beweglichen Kameras bezeichnet, bei denen die Ausgabe auf externen Monitoren erfolgt. Die Kameras sind zum Arbeitsplatz referenziert, wodurch Informationen zeitlich und räumlich korrekt dargestellt werden können [7]. Diese Form der AR ist aus technischer Sicht vergleichsweise einfach, findet in der Forschung aber wenig Beachtung [8]. Dennoch ist sie für Montagetätigkeiten sehr gut geeignet, da der Anwender kein zusätzliches Gerät tragen muss, die Visualisierung auf einem Bildschirm auch für 3D-Objekte geeignet ist und beide Hände stets frei bleiben.

Eine Übersicht über aktuelle kommerzielle AR-Systeme im Bereich der Montage findet sich in [9]. Hier zeigt sich, dass

Assistenzsysteme im industriellen Einsatz derzeit auf projektive und indirekte AR setzen.

3 Augmented Reality zur Montageassistenz unter industriellen Bedingungen

Basierend auf den Einschätzungen aus dem vorhergehenden Abschnitt wurde ein Assistenzsystem entwickelt, das Werker bei der Spannsystemmontage unterstützt. Es handelt sich hierbei um indirekte AR, bei der die augmentierte Ausgabe auf Monitoren erfolgt. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war, dass beide Hände bei der Montage frei sein müssen, das System auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen im 3-Schichtbetrieb zuverlässig funktionieren muss, der Überlagerungsfehler unter 0,5 mm bleibt und dass eine maximale Mitarbeiterakzeptanz erreicht wird. Das System dient als vollständiger Ersatz für alle bisherigen Montageanleitungen.

3.1. Systemaufbau

Arbeitsplätze für die assistierte, modulare Spannsystemmontage werden mit einer festen Aufnahme ausgerüstet, die für Zapfen der entsprechenden Nullpunktspannssysteme ausgelegt ist. Zur reproduzierbaren lokalen Verankerung werden die Grundplatten dort eingesetzt. Das Assistenzsystem selbst besteht aus mindestens zwei fest angeordneten Kameras, die auf den Arbeitsplatz ausgerichtet sind und kontinuierlich Videobilder aufnehmen. Eine Kamera wird typischerweise senkrecht über dem Arbeitsplatz montiert und deckt in der Aufsicht die horizontale Montageebene ab. Die zweite Kamera wird schräg ausgerichtet und deckt die vertikale Montageebene ab. Als Ausgabe- und Interaktionsgeräte stehen zwei Touch-Screens zur Verfügung, die in ergonomischer Reichweite am Arbeitsplatz montiert sind. Zur Generierung der AR wird das CAD-Modell der zu montierenden Bauteile zum korrekten Zeitpunkt perspektivisch korrekt als Konturdarstellung in das Kamerabild projiziert, s. **Bild 2**.

Der Mitarbeiter kann dann anhand der visuellen Vorgaben das korrekte Einzelteil dem Lager entnehmen und es exakt und passgenau an der vorgegebenen Position platzieren, ausrichten und fixieren. Durch eine parallele Darstellung von Auf- und Schrägsicht ist sichergestellt, dass das Einzelteil in allen drei Raumachsen korrekt positioniert und orientiert werden kann.

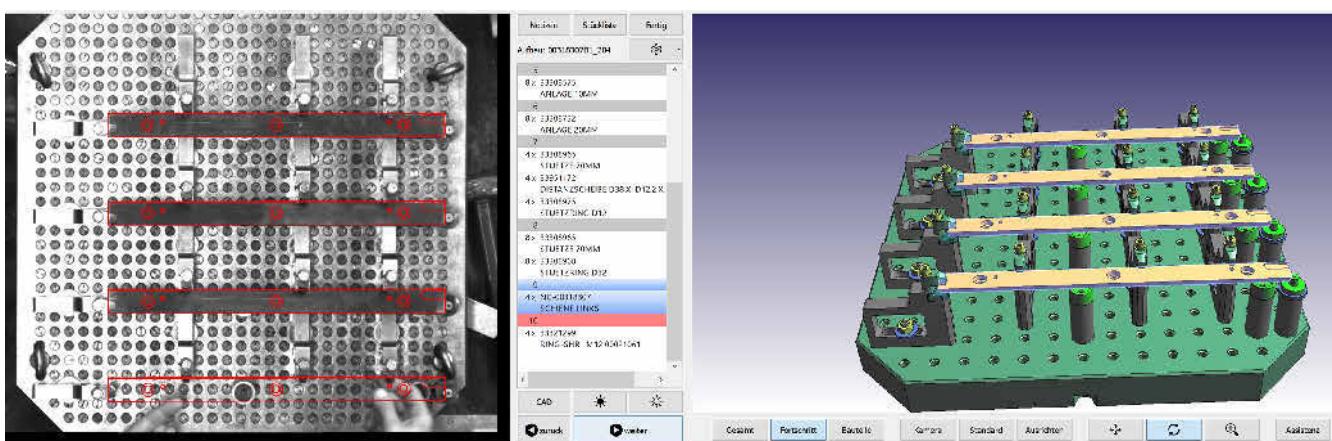


Bild 2. Assistenz-GUI zur sicheren Spannmittelmontage. Links: perspektivisch korrekte Überlagerung von Bauteilkonturen, rechts: das zugehörige CAD-Modell der gesamten Baugruppe. Grafik: IFF / FMA



Bild 3. Rüstplatz mit indirekter AR zur Montage von modularen Spannsystemen mit quadratischen Grundplatten. Links: Grundfläche $900 \times 900 \text{ mm}^2$, rechts: Grundfläche $600 \times 600 \text{ mm}^2$. Foto: IFF / FMA



Bild 4. AR-Assistenzsystem für große modulare Spannsysteme. Links: auf einer Linearachse verschiebbare Touch-Screen-Einheit. Rechts: Gesamtsystem für Grundplatten bis insgesamt $3780 \times 500 \text{ mm}^2$ (zwei von drei Grundplatten aufgelegt). Foto: IFF / FMA

Da Grundplatten von Bearbeitungszentren unterschiedliche Geometrien aufweisen, existieren mehrere Möglichkeiten, eine ergonomische Ansicht auf den Arbeitsplatz zu erreichen. Für Platten mit quadratischem Grundriss eignet sich die beschriebene senkrecht/schräg-Anordnung sehr gut. Um auch Einzelteile, die der schräg ausgerichteten Kamera abgewandt sind, in der Visualisierung darzustellen und um die Ergonomie zu steigern, kann die Grundplatte auf einem Rotationstisch mit Drehgeber abgelegt werden, s. **Bild 3**. Die Winkelstellung des Tisches wird dann ausgewertet und fließt in die AR-Darstellung mit ein. Die Einschränkung der starren Kameraansichten wird dadurch kompensiert und es entsteht eine hochgenaue, lagekorrekte AR-Überlagerung.

Für sehr große Spannsysteme besteht weiterhin die Möglichkeit, eine in sich fest verbundene Kamera-Monitoreinheit auf einer leichtgängigen Linearachse zu bewegen und so die gesamte Arbeitsfläche abzudecken, s. **Bild 4**. Hierbei sieht der Anwender die Assistenz für den Teilausschnitt, an dem sich das System gerade befindet. Sollten zu montierende Teile außerhalb des aktu-

ellen Sichtfelds liegen, wird durch einen Pfeil in der AR-Darstellung darauf hingewiesen, und der Mitarbeiter kann intuitiv das System an die erforderliche Position verschieben.

3.2. Datenfluss

Neben einer intuitiven Assistenz-Darstellung ist im Bereich der Augmented Reality auch die Vorbereitung (das Authoring) der Inhalte von entscheidender Bedeutung [10]. Für das hier vorgestellte System wurde daher eine möglichst nahtlose Integration in bestehende Infrastrukturen angestrebt, die keine Programmierkenntnisse für die Arbeitsvorbereitung erfordern.

Als Basis für die AR-Darstellung dient das CAD-Modell des modularen Spannsystems. Es enthält bereits alle notwendigen Geometrieeinformationen, um die Konturen lagegerecht und live zu erzeugen: Nachdem für ein Rohteil im CAD/CAM-System ein Spannsystem konfiguriert wurde, wird eine Montagereihenfolge festgelegt. Hierbei handelt es sich um lineare Montagevorrang-

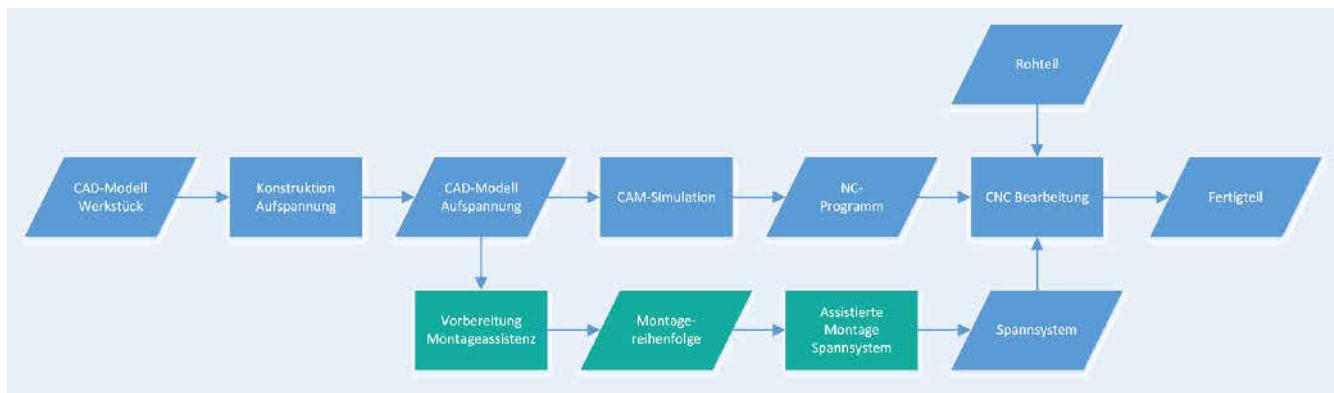


Bild 5. Datenfluss zur Vorbereitung und Ausführung der assistierten Spannmittelmontage.

Grafik: IFF / FMA

graphen mit n Arbeitsschritten, denen jeweils n_m Einzelteile der Gesamtbaugruppe zugewiesen werden. Jedem Arbeitsschritt lassen sich Hinweise in Textform, wie beispielsweise vorgegebene Drehmomente, hinzufügen. Nachdem die CAM-Simulation erfolgreich abgeschlossen ist, wird die Montagereihenfolge zusammen mit dem CAD-Modell des Spannsystems exportiert und am Rüstplatz als Assistenz für die Montage verwendet. Dort werden dem Monteur jeweils alle Elemente eines Arbeitsschritts gleichzeitig visualisiert. Existiert ein Montagehinweis, wird dieser in das Kamerabild mit eingeblendet. Beginnend mit der Grundplatte im ersten Schritt, kann der Anwender linear in der vorgegebenen Reihenfolge manövrieren und die Einzelteile sicher und entsprechend der Vorgabe verbauen. Der gesamte Datenfluss ist in **Bild 5** dargestellt.

Ein so montiertes Spannsystem ist geometrisch korrekt und entspricht der CAM-Simulation. Damit sind ungewollte Kollisionen in der Bearbeitungsmaschine ausgeschlossen.

4 Ergebnisse in der Anwendung

Die vorgestellte Lösung wird seit mehreren Jahren bei einem Pilotkunden im 3-Schichtbetrieb eingesetzt. Dabei wurden fünf Arbeitsplätze in den zuvor beschriebenen Konfigurationen ausgestattet und als separate Rüstplätze zur Bestückung von zehn Werkzeugmaschinen eingerichtet. Die Umgebungsbedingungen können als rau eingeschätzt werden, da die Maschinen in unmittelbarer Nähe im Einsatz sind.

4.1. Bewertung der Assistenzfunktionalitäten

Die Evaluation der Assistenz misst sich primär daran, ob das Ziel der Kollisionsvermeidung in der Maschine erreicht werden konnte. Seit Einführung der assistierten Montage (zwei bis neun Jahre) ist es zu keinem Zwischenfall gekommen, der auf ein fehlerhaft montiertes Spannsystem zurückgeführt werden kann. Damit wird das Hauptziel erreicht.

In [11] werden acht Richtlinien und Empfehlungen für ergonomische AR-Assistenzsystem im Bereich der Montage formuliert. Angewendet auf die hier vorgestellte Lösung ergeben sich folgende Bewertungen:

- Einfache Darstellung der Information: Es werden Objektkonturen visualisiert. Sie enthalten das Mindestmaß an Informationen, um die Bauteilgeometrie in der Darstellung zu beschreiben.

- Direkte Darstellung der Information: Die Arbeitsplätze sind so gestaltet, dass die zur Ausgabe genutzten Screens vor dem Werker angebracht sind. Nach kurzer Einarbeitung schauen die Mitarbeiter während der Montagetätigkeit direkt auf den Bildschirm. Dass Hände, Werkzeuge und Bauteile nur indirekt betrachtet werden, stellt kein Problem dar.
- Design für Freihandanwendung: Dies ist bei indirekter AR immer gegeben.
- Ausstattung der Umgebung statt des Nutzers: Bei dieser Lösung sind alle Sensoren wie Drehgeber und Linearmesssysteme fest verbaut. Der Anwender trägt kein Equipment.
- Intuitive, natürliche Interaktion: Die Interaktion erfolgt ausschließlich über die Touch-Funktion der Screens. Touch-Bedienung erfordert durch die Verbreitung von Smartphones kein separates Einlernen.
- Personalisierte Informationsdarstellung: Für Menschen, die Farbsinnstörungen leiden, besteht die Möglichkeit die Konturfarbe nach individuellen Bedürfnissen anzupassen.
- Geschwindigkeitsvorgabe durch den Nutzer: Die manuelle Vor- und Rückwärtsnavigation zwischen den Arbeitsschritten erlaubt dem Nutzer, die Geschwindigkeit vollständig selbst kontrollieren.
- Motivierenden Selbstauskünfte: Die Montagesequenz wird tabellarisch dargestellt und der Anwender sieht zu jedem Zeitpunkt den aktuellen und alle folgenden Montageschritte. Damit wird eine Einschätzung über die Restdauer der Montage deutlich erleichtert.

4.2. Ökonomische Betrachtungen

Da durch den Einsatz des Assistenzsystems von einer Kollisionsfreiheit ausgegangen werden kann, können Werkzeuge bei der Bearbeitung deutlich schneller zugestellt werden. Hier wurde eine Einsparung von 3,4 bis 11,1 Minuten pro Programm ermittelt (durchschnittlich 5,8 Minuten).

Für die aufwendige Bearbeitung von Erstteilen ergibt sich ein weiteres Einsparpotenzial: Das satzweise Anfahren eines Neuprogramms kann entfallen und das Erstteil kann mit vollem Vorschub bearbeitet werden. Durch diese Maßnahme kann die Einfahrzeit pro Programm zwischen 15 und 20 Minuten gesenkt werden (Durchschnitt 15,9 Minuten).

Weiterhin wurde die Montagezeiten an den Rüstplätzen verglichen. Die Messungen fanden unter realen Arbeitsbedingungen nach erfolgreicher Einarbeitung statt. Ohne AR wurden als Anle-



tungen ausgedruckte ISO-Darstellungen, 3D-Screenshots vom Spannsystem, Fotos von bereits erfolgten Aufbauten und zum Teil handschriftliche Notizen verwendet. Es wurde beobachtet, dass mithilfe der AR eine Zeiteinsparung von 17–22 % erreicht werden kann. Die befragten Mitarbeiter hoben hervor, dass es als mental sehr entlastend empfunden wird, anhand einer festen Montagereihenfolge zu arbeiten. Sie führt zu mehr Sicherheit, da den Monteuren bewusst ist, dass ein unter AR-Anleitung montiertes Spannsystem immer kollisionsfrei bearbeitet werden kann. Zeiteinsparungen wurden insbesondere durch die lokal referenzierte Darstellung, weniger Ablenkung und dem Wegfall von Rückbauten im Fehlerfall begründet.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass im Bereich des modularen Spannsystemaufbaus indirekte AR, deren Bilder aus fest angeordneten Kameras stammen und deren Ausgabe auf Touch-Screens stattfindet, sehr gut eignet ist. Es wurden verschiedene Arbeitsplätze mit diesen Systemen ausgestattet. In der praktischen Anwendung sank dadurch die Fehlerrate bei der Montage auf null. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die Montage beschleunigt und insbesondere in der Einzelteil- und Kleinserienfertigung die Bearbeitungszeiten deutlich verkürzt werden können.

- [3] Lampen, E.; Teuber, J.; Gaisbauer, F. et al.: Combining Simulation and Augmented Reality Methods for Enhanced Worker Assistance in Manual Assembly. Procedia CIRP 81 (2019), S. 588–593
- [4] Deshpande, A.; Kim, I.: The effects of augmented reality on improving spatial problem solving for object assembly. Advanced Engineering Informatics 38 (2018), S. 760–775
- [5] Bosch, T.; Könemann, R.; Cock, H. de et al.: The effects of projected versus display instructions on productivity, quality and workload in a simulated assembly task. PETRA ,17: 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Island of Rhodes/Greece, 2017, S. 412–415
- [6] Cortes, G.; Marchand, E.; Brincin, G. et al.: MoSART: Mobile Spatial Augmented Reality for 3D Interaction With Tangible Objects. Frontiers in robotics and AI 5 (2018), p. 93
- [7] Loch, F.; Quint, F.; Brishtel, I.: Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly. 2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE), London, United Kingdom, 2016, S. 147–150
- [8] Alves, J. B.; Marques, B.; Dias, P. et al.: Using augmented reality for industrial quality assurance: a shop floor user study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115 (2021) 1–2, S. 105–116
- [9] Bertram, P.; Birtel, M.; Quint, F. et al.: Intelligent Manual Working Station through Assistive Systems. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 170–175
- [10] Evans, G.; Miller, J.; Iglesias Pena, M. et al.: Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. SPIE Defense + Security, Anaheim, California, United States, 2017, 101970V
- [11] Funk, M.; Kosch, T.; Kettner, R. et al.: motioneap: An overview of 4 years of combining industrial assembly with augmented reality for industry 4.0. 2016

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Firma Kolbus GmbH & Co. KG für die Bereitstellung der CAD-Daten und des Bildmaterials.



Dipl.-Inf. **S t e f f e n S a u e r**
Foto: Fraunhofer IFF



Dr.-Ing. **D i r k B e r n d t**
Foto: Fraunhofer IFF
Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
Fertigungsmesstechnik und digitale Assistenzsysteme FMA
Sandtorstr. 22, 39106 Magdeburg
steffen.sauer@iff.fraunhofer.de
www.iff.fraunhofer.de/fma

L iteratur

- [1] Jeffri, N. F. S.; Awang Ramli, D. R.: A review of augmented reality systems and their effects on mental workload and task performance. Heliyon 7 (2021) 3
- [2] Havard, V.; Baudry, D.; Jeanne, B. et al.: A use case study comparing augmented reality (AR) and electronic document-based maintenance instructions considering tasks complexity and operator competency level. Virtual Reality 25 (2021) 4, S. 999–1014



Verhinderung von Muskel-Skelett-Erkrankungen in der Produktion mit Künstlicher Intelligenz

Assistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie

L. Eversberg, C. Sohst, J. Lambrecht

Zur Vermeidung von Muskel-Skelett-Erkrankungen am Arbeitsplatz, zum Beispiel während der manuellen Montage oder Reparatur, lassen sich mittels Künstlicher Intelligenz automatisierte Ergonomieanalysen basierend auf Kameradaten erstellen. Darauf aufbauend kann ein Assistenzsystem die Fachkräfte während der Arbeit bei unergonomischen Körperhaltungen warnen. Zur Vermeidung von fehlerhaften Warnungen sollte die Konfidenz der Körpererkennung mit in die Bewertung einfließen.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Mensch und Technik, Künstliche Intelligenz

1 Einleitung

Die moderne Produktion muss heutzutage mit einer hohen Variantenvielfalt und kurzen Produktlebenszyklen umgehen können. Die Vollautomatisierung sämtlicher Produktionsschritte ist dafür keine Lösung, denn sie ist zu unflexibel und kostenintensiv. Daher wird der Mensch, im Sinne einer humanzentrierten Automatisierung, auch zukünftig ein fester Bestandteil der Produktion sein [1].

Konträr zur Maschine kann der Mensch jedoch krank werden. Im direkten Vergleich der Krankheitsarten führen Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems zu den meisten Arbeitsunfähigkeitstagen in Deutschland. Rückenerkrankungen machen daran den größten Anteil aus [2]. Ein erhöhtes Risiko besteht insbesondere bei Berufen in der Produktion und im Dienstleistungssektor [3]. Ergonomisch ungünstige Körperhaltungen, welche zum Beispiel bei der manuellen Montage oder bei manuellen Reparaturarbeiten häufig vorkommen, stellen langfristig ein gesundheitliches Risiko für Fachkräfte dar.

Eine Möglichkeit, um ergonomische Risiken frühzeitig zu erkennen und dadurch Erkrankungen beim Personal zu vermeiden, bieten standardisierte Ergonomieanalysen. Diese müssen jedoch üblicherweise von Fachkräften manuell durchgeführt werden. Die Automatisierung dieser Methoden in Form eines Assistenzsystems bietet die Möglichkeit, während der Arbeit permanentes Feedback zu potentiell schädlichen Körperhaltungen zu geben. Durch das Feedback können unergonomische Körperhaltungen zeitlich verkürzt oder sogar gänzlich vermieden werden [4]. Zusätzlich lässt sich die Ergonomie des Arbeitsplatzes über eine geeignete Aktorik optimieren [5].

Assistance system to improve ergonomics – Preventing musculoskeletal disorders in manufacturing with artificial intelligence

To prevent musculoskeletal disorders at work, e.g., during manual assembly or repair, automated ergonomic postural assessment methods can be applied based on camera and artificial intelligence. Based on this, an assistance system can warn the specialists during work in the case of unergonomic postures. To avoid erroneous warnings, the confidence score of the body tracking should be included in the evaluation.

2 Automatisierung von Ergonomieanalysen

Dank moderner Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) lassen sich nunmehr Ergonomieanalysen teilweise automatisieren. In der Forschung existieren bereits erste Prototypen zur Automatisierung der Methoden OWAS, EAWS, RULA und REBA. Als Sensorik werden dafür tragbare inertiale Messeinheiten oder Kameras verwendet [6].

Bei den zur Auswahl stehenden Verfahren ist RULA (englisch: Rapid Upper Limb Assessment) am weitesten verbreitet und am besten geeignet, um Muskel-Skelett-Risiken zu erkennen [7]. RULA wurde 1993 von McAtamney und Corlett veröffentlicht und speziell für eine schnelle Analyse der oberen Gliedmaßen des Körpers am Arbeitsplatz entwickelt [8]. Dabei werden über vorgedefinierte Winkel zwischen den betrachteten Gliedmaßen Punkte zugeordnet, aus denen sich schlussendlich eine Gesamtpunktzahl ergibt. Die Gesamtpunktzahl gibt Aufschluss darüber, ob die untersuchte Körperhaltung akzeptabel oder kritisch ist. Dabei wird in vier Stufen des Handlungsbedarfs differenziert. Während bei einer RULA-Gesamtpunktzahl von eins oder zwei kein Handlungsbedarf besteht, sollten bei einer RULA-Gesamtpunktzahl von sieben sofortige Maßnahmen ergriffen werden [8]. In Bild 1 ist beispielhaft die Punktzahl für die Beugung des Oberkörpers nach RULA dargestellt.

Neben der Betrachtung der aktuellen Körperhaltung existieren in RULA Zusatzpunkte für statische und repetitive Muskelarbeit und das Heben von Lasten über 2 kg. Diese können jedoch nicht ausschließlich über die aktuellen Gelenkwinkel berechnet werden. Die Gelenke einer Person lassen sich heutzutage über Kameras mit modernen Methoden der KI erkennen. Über die Position der

Gelenke werden die benötigten Gelenkwinkel und somit eine automatisierte Gesamtpunktzahl nach RULA oder REBA berechnet.

Die aktuelle Körperpose, definiert als eine feste Anzahl von 2D- oder 3D-Gelenkpunkten, lässt sich beispielsweise mit den frei verfügbaren tiefen neuronalen Netzen „BlazePose“ [9] oder „OpenPose“ [10] ohne zusätzliche Marker im Farbbild erkennen. Für die 3D-Kamera „Azure Kinect“ liefert Microsoft das „Azure Kinect Body Tracking SDK“. Dieses gibt 3D-Koordinaten für insgesamt 32 Gelenke an. Die Erkennung der Gelenke basiert dabei auf einem Modell, welches mit einem tiefen neuronalen Netz die Gelenke im 2D-Farbbild erkennt, mit den Tiefendaten der Kamera verrechnet und dann in ein 3D-Skelettmödell transformiert [11]. Die Erkennung der Körpergelenke mit der Microsoft Azure Kinect ist in **Bild 2** an einem manuellen Arbeitsplatz beispielhaft dargestellt. Zur Bestimmung der aktuellen Körperpose wird keine extrinsische Kalibrierung der Kamera benötigt, das heißt die Kamera lässt sich im Betrieb umpositionieren.

Dass ein auf den Gelenkwinkeln basierendes, automatisches Ergonomiefeedback nach RULA möglich ist, konnte bereits in mehreren Publikationen erfolgreich gezeigt werden [12–15]. Ein Problem dieser Ansätze ist jedoch, dass verdeckte Körpergelenke beziehungsweise eine ungünstige Kameraperspektive zu deutlichen Fehlern bei der Berechnung der Gelenkwinkel und somit der Gesamtpunktzahl führen kann [14].

Die KI-Modelle zur Erkennung der Gelenke liefern üblicherweise pro Gelenk einen Wert zur Konfidenz, der zwischen Null und Eins liegt. Je unsicherer die Berechnung durch das KI-Modell, desto niedriger ist diese Konfidenz. Ein möglicher Ansatz, um unpräzise Ergonomieanalysen zu vermeiden, ist das Definieren von Konfidenz-Schwellwerten. In [13] wird zum Beispiel keine Ergonomieanalyse durchgeführt, wenn ein Gelenk mit einem zu niedrigen Konfidenzwert erkannt wurde. Wie in Bild 2 dargestellt, ist dies aber keine praktikable Methode für den industriellen Einsatz. Im Shopfloor, etwa bei der manuellen Montage oder Reparatur, muss davon ausgegangen werden, dass Verdeckungen während der Arbeit häufig auftreten.

3 Berücksichtigung von Unsicherheiten für den industriellen Einsatz automatischer Ergonomieanalysen

Um die existierenden Forschungsarbeiten zu automatischen Ergonomieanalysen für den industriellen Einsatz robuster zu gestalten, wird die Berücksichtigung der Konfidenz vorgeschlagen. Zur Berechnung der benötigten Gelenkwinkel werden in den meisten Fällen drei Gelenke nach **Bild 3** benötigt.

Jeder Gelenkpunkt hat dabei eine Konfidenz K aus dem verwendeten KI-Modell. Um eine Konfidenz für den Winkel zu berechnen, wird hier der minimale Konfidenzwert der verwendeten Gelenkpunkte eingesetzt. Dieser berechnete Wert kann als Gewicht mit der dazugehörigen Punktzahl des Körperteils nach RULA verrechnet werden, um dessen Einfluss auf die Gesamtpunktzahl bei hoher Unsicherheit zu reduzieren.

Die Konfidenz der RULA-Gesamtpunktzahl lässt sich als Mittelwert der Konfidenzen der einzelnen Körperteile angeben. Je niedriger die Konfidenz einzelner Gelenkpunkte, desto weniger stark fließen die entsprechenden Körperteile ins Endergebnis ein. So soll vermieden werden, dass die Fachkräfte aufgrund von hohen Ungenauigkeiten in der Körperposen-Erkennung fälsch-

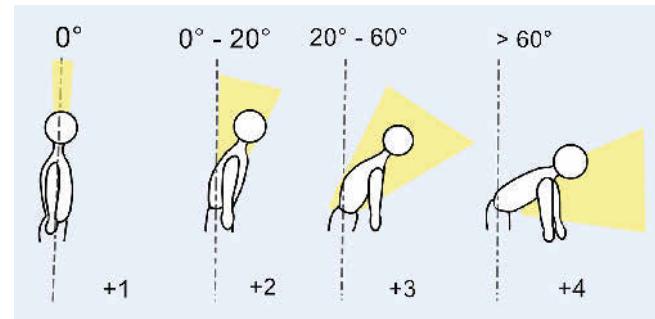


Bild 1. Punktzahl für die Haltung des Rumpfs nach RULA [8].
Grafik: eigene Darstellung

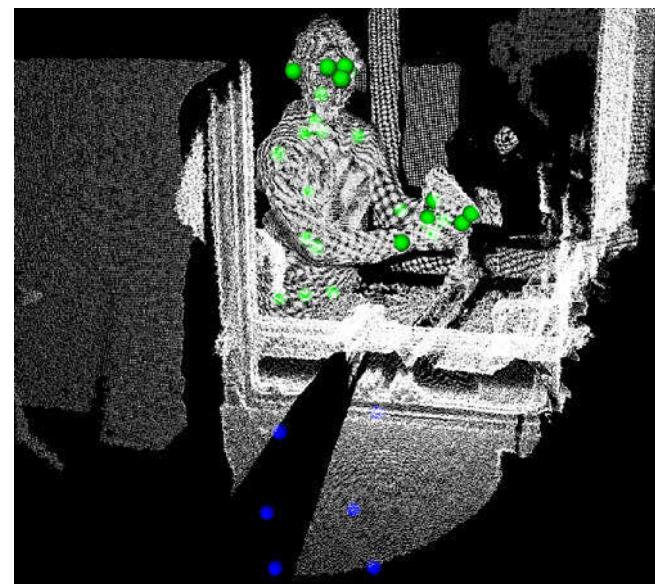


Bild 2. Körperposen-Erkennung über 32 Gelenkpunkte mit dem Microsoft „Azure Kinect Body Tracking SDK“ (grüne Punkte werden mit hoher Konfidenz erkannt, blaue Punkte aufgrund von Verdeckungen vom KI-Modell geschätzt). Foto: eigene Darstellung

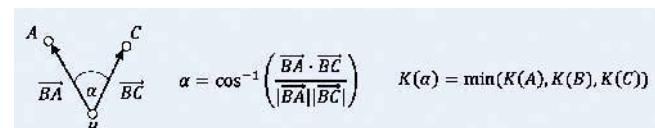


Bild 3. Berechnung des Gelenkwinkels α und dessen Konfidenz K aus den drei Gelenkpunkten A, B und C. Grafik: eigene Darstellung

licherweise vom Assistenzsystem gewarnt werden. Dies würde auf Dauer die Akzeptanz der Technologie untergraben.

Wie in Bild 3 dargestellt, hängt jeder berechnete Winkel von den verwendeten Gelenkpunkten ab. Je präziser die Gelenkpunkte erkannt werden, desto präziser ist auch der berechnete Winkel. Für eine robustere Berechnung der Gelenkwinkel wird daher zusätzlich zu den mittels KI erkannten Gelenken ein Referenzvektor verwendet, der konstant zur Decke zeigt. Wird eine Kamera mit integriertem Beschleunigungssensor benutzt, wie etwa bei der Microsoft Azure Kinect der Fall, so lässt sich dieser Vektor über den Richtungsvektor der Erdanziehungskraft zu jedem Zeitpunkt leicht messen. Der konstante Referenzvektor hat den Vorteil, dass er nach einer einmaligen Berechnung immer präzise bekannt ist.

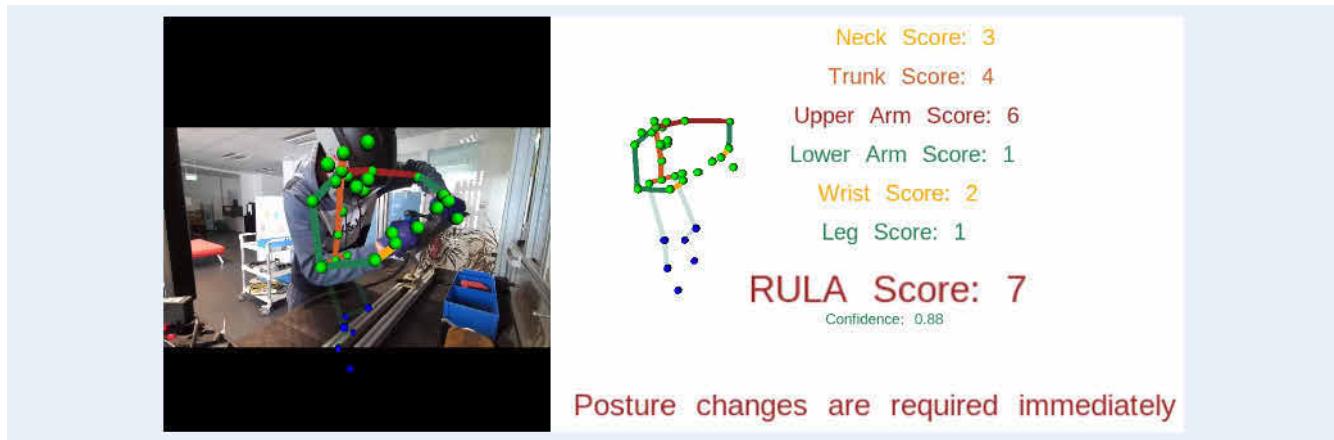


Bild 4. Assistenzsystem zur Verbesserung der Ergonomie für manuelle Schleifarbeiten basierend auf RULA, anhand der erkannten unergonomischen Körperpose wird eine sofortige Änderung der Körperhaltung empfohlen; links: Kamerabild mit überlagertem Skelettmodell; rechts: Live Ergonomiefeedback basierend auf RULA. Foto: eigene Darstellung

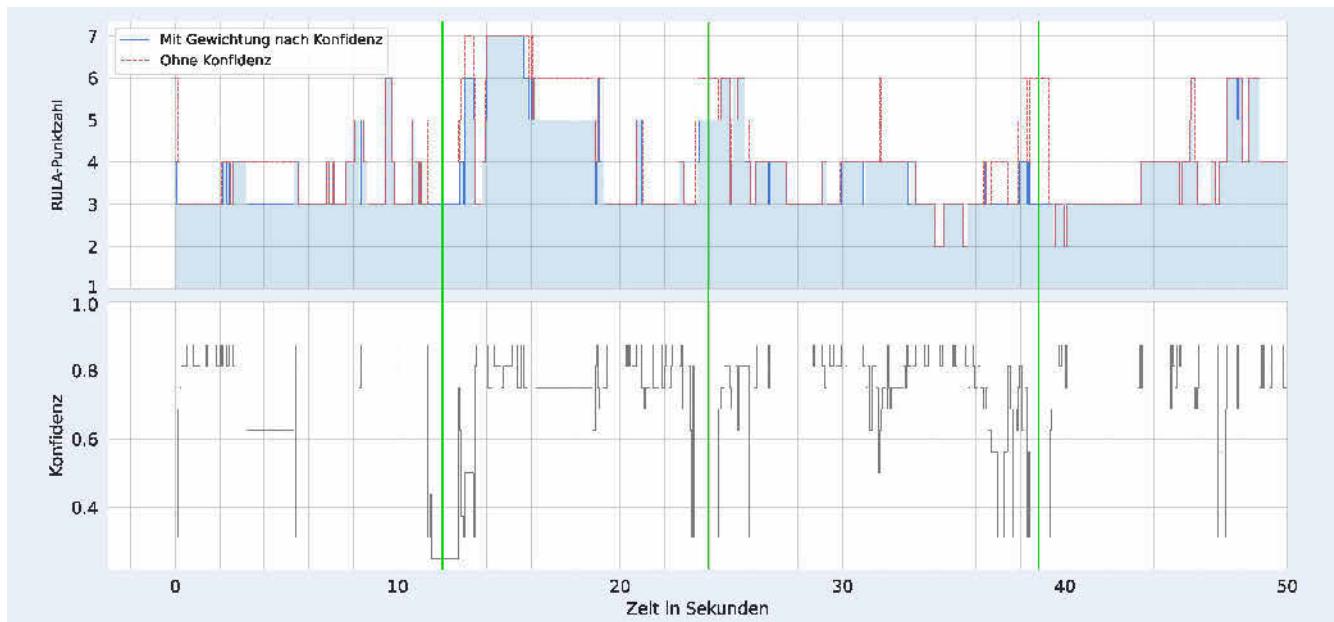


Bild 5. Aufgezeichnete Punktzahl nach RULA und deren Konfidenz während der Arbeit. Grafik: eigene Darstellung

und somit per Definition eine Konfidenz von Eins besitzt. Der Referenzvektor kann anschließend auch bei den Winkelberechnungen des Rumpfs und der Oberarme verwendet werden.

4 Robustes Ergonomiefeedback für den industriellen Einsatz am Arbeitsplatz

Das entwickelte Assistenzsystem für Ergonomiefeedback in Echtzeit basierend auf RULA ist in **Bild 4** dargestellt. Das dazugehörige Video ist auf dem YouTube-Kanal „Fachgebiet Industry Grade Networks and Clouds“ zu sehen.

Das Assistenzsystem eignet sich insbesondere für manuelle Montagetätigkeiten oder manuelle Instandhaltungstätigkeiten am Arbeitsplatz. Das Live-Ergonomiefeedback kann sowohl beim Anlernen neuer Mitarbeiter als auch im dauerhaften Produktivbetrieb verwendet werden. Die erzeugten Daten zu den unergonomischen Körperhaltungen können anonymisiert gesammelt

und anschließend für Optimierungen des Arbeitsplatzes verwendet werden.

Durch die Berücksichtigung der Konfidenz des KI-Modells kann das System auch mit erhöhten Unsicherheiten in der kamerabasierten Gelenkerkennung umgehen. Im Produktivbetrieb können bestimmte Bewegungen auftreten, durch die sich benötigte Gelenke außerhalb des Sichtfelds der Kamera bewegen. Zudem kommen oft Selbstverdeckungen vor. Auch kann das Tragen bestimmter Kleidung beziehungsweise persönlicher Schutzausrüstung die KI-Modelle in ihrer Gelenkerkennung stören.

Zur Auswertung des entwickelten Prototyps wurde ein manueller Reparaturprozess an einem Sitzarbeitsplatz simuliert. Dabei wurden sowohl die Gesamtpunkte nach RULA als auch die Konfidenz des Endergebnisses über die Zeit aufgenommen, **Bild 5**.

Wie dargestellt, erreicht die Konfidenz aufgrund der verdeckten Beine nie einen maximalen Wert von 1.0. Zu den meisten Zeitpunkten bewirkt die in Kapitel 3 beschriebene Gewichtung mit der Konfidenz nach dem Runden auf eine natürliche Zahl

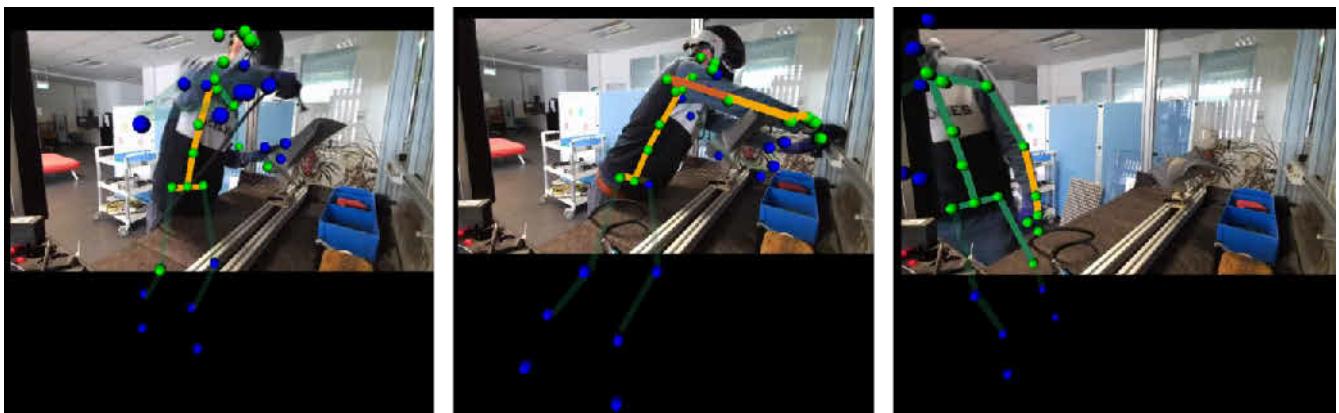


Bild 6: Drei ausgewählte Zeitpunkte mit besonders niedriger Konfidenz während der Arbeit (grüne Punkte werden mit hoher Konfidenz erkannt, blaue Punkte aufgrund von Verdeckungen vom KI-Modell geschätzt). Foto: eigene Darstellung

keinen Unterschied. In 12 % der Fälle führt die Gewichtung nach Konfidenz zu einer niedrigeren RULA-Punktzahl. Zur genaueren Betrachtung sind in Bild 5 drei markante Zeitpunkte in grün markiert, bei denen die Konfidenz erheblich einbricht. Die Kamerabilder der drei markierten Zeitpunkte sind in **Bild 6** dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass zu diesen Zeitpunkten erhebliche Unsicherheiten in der Körperposen-Erfassung existieren. Zum Beispiel ist im dritten Bild die Person nicht mehr komplett zu erkennen. Ohne Berücksichtigung der Konfidenz ergibt sich für dieses Bild eine berechnete RULA-Punktzahl von sechs, was mit einer entsprechenden Warnung verknüpft wäre. Durch die Berücksichtigung der Konfidenz werden Kopf, Beine und der rechte Arm heruntergewichtet, sodass sich eine unkritische RULA-Punktzahl von drei ergibt.

5 Ausblick

Eine Evaluation des entwickelten Assistenzsystems mittels Nutzerstudie ist für den weiteren Verlauf im Forschungsprojekt „MRO 2.0 – Upgrade statt Repair“ geplant. Dabei soll vor allem die Technologieakzeptanz der Mitarbeiter bezüglich des Assistenzsystems erforscht werden.

Neben den hier behandelten Punkten basierend auf der aktuellen Körperpose existieren in RULA Zusatzpunkte für die Muskelarbeit und die aufgewendete Kraft, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Muskelarbeit und Kraftaufwand werden in der bisherigen Literatur entweder vernachlässigt [15] oder müssen manuell ergänzt werden [13, 14]. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten die Körperposen-Erkennung um bestehende Ansätze zur KI-basierten Aktivitätserkennung erweitern [16], die neben der Körperhaltung zusätzlich relevante Objekte und deren Gewicht berücksichtigen muss.

6 Zusammenfassung

Zur Vermeidung von Muskel-Skelett-Erkrankungen können standardisierte Methoden zur Ergonomieanalyse automatisiert werden. Ein darauf basierendes Assistenzsystem kann den Fachkräften während der Arbeit Feedback zu schädlichen Körperhaltungen geben. Dies ist vor allem bei Tätigkeiten mit einem erhöhten Risiko für ergonomisch ungünstige Körperhaltungen wichtig, wie etwa der manuellen Montage oder bei manuellen Reparatur-

arbeiten. Ein Problem sind jedoch Unsicherheiten in der kamera-basierten Erkennung der Körperfugen am Arbeitsplatz.

Um automatisierte Ergonomieanalysen für den industriellen Einsatz robuster zu gestalten, wurde die Berücksichtigung der Konfidenz aus den verwendeten KI-Modellen zur Körperposen-Erkennung vorgeschlagen. Durch die Berücksichtigung der Konfidenz können unsichere Warnungen des Assistenzsystems zur aktuellen Körperhaltung verringt werden.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „MRO 2.0 – Upgrade statt Repair“, welches vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Kennzeichen ProFIT-10167454 kofinanziert wird.

L iteratur

- [1] Krüger, J.; Lambrecht, J.: Industrie 4.0 „Chancen der vierten industriellen Revolution“ In: Krüger, J.; Parthey, J.; Wink, R. (Hrsg.): Wissenschaft und Innovation: Wissenschaftsforschung Jahrbuch 2014. Berlin: Wissenschaftlicher Verlag 2015, S. 9–29
- [2] Marschall, J. et al.: Gesundheitsreport 2021. Coronakrise und Digitalisierung. In: Storm, A. (Hrsg.): Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung Band 37. Heidelberg: medhochzwei Verlag 2021, S. 15–16
- [3] Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U.: Alters- und berufsgruppenabhängige Unterschiede in der Arbeitsfähigkeit durch häufige Muskel-Skelett-Erkrankungen. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 56 (2013), S. 367–380.
- [4] Vignais, N. et al.: Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. Applied Ergonomics 44 (2013) 4, pp. 566–574
- [5] Nguyen, T. D.; Bloch, C.; Krüger, J.: The Working Posture Controller: Automated Adaptation of the Work Piece Pose to Enable a Natural Working Posture. Procedia CIRP 44 (2016), pp. 14–19
- [6] Wilhelm, M. et al.: ErgoTakt: A novel approach of human-centered balancing of manual assembly lines. Procedia CIRP 97 (2021), pp. 354–360
- [7] Kee, D.: Systematic Comparison of OWAS, RULA, and REBA Based on a Literature Review. International Journal of Environmental Research and Public Health 19 (2022) 1, #595, doi.org/10.3390/ijerph19010595
- [8] McAtamney, L.; Corlett, E. N.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics 24 (1993) 2, pp. 91–99



- [9] Bazarevsky, V. et al.: BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking. arXiv:2006.10204v1 (2020), doi.org/10.48550/arXiv.2006.10204
- [10] Cao, Z. et al: OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 43 (2021) 1, pp. 172–186
- [11] Liu, Z.: 3D Skeletal Tracking on Azure Kinect. Azure Kinect Body Tracking SDK. CVPR2019 Workshop on 3D Computer Vision in Medical Environments, CVPR 2019, Long Beach/USA. Stand: 2019. Internet: docslib.org/doc/5255523/azure-kinect-body-tracking-sdk-zicheng-liu-principal-research-manager-microsoft-azure-kinect-dk. Zugriff am 05.09.2022
- [12] Manghisi, V. M. et al.: Automatic ergonomic postural risk monitoring on the factory shopfloor - The Ergosentinel Tool. Procedia Manufacturing 42 (2020), pp. 97–103
- [13] Fernández, M. M. et al.: Ergonomic risk assessment based on computer vision and machine learning. Computers & Industrial Engineering 149 (2020) # 106816
- [14] Kim, W. et al.: Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (OpenPose). International Journal of Industrial Ergonomics 84 (2021) # 103164
- [15] Wollendorfer, M: Automatisierte Evaluierung der Ergonomie am Arbeitsplatz durch den Einsatz von Deep Learning. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2021
- [16] Eversberg, L.; Grosenick, P. Meusel M. et al.: An Industrial Assistance System with Manual Assembly Step Recognition in Virtual Reality. 2021 International Conference on Applied Artificial Intelligence (ICAPAI), 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICAPAI49758.2021.9462061



Leon Eversberg, M.Sc.
Foto: Autor

Christoph Sohst, B.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jens Lambrecht
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Industry Grade Networks and Cloud
Ernst-Reuter-Platz 7, 10587 Berlin
Tel. +49 30 835358412
leon.eversberg@tu-berlin.de
www.ignc.tu-berlin.de

**FlexCAR**

Die Forschungsplattform von morgen

Das FlexCAR besteht aus einer autonom gesteuerten Fahrzeugplattform für die Mobilität von morgen, welche Use-Case-gesteuert als Forschungsdemonstrator fungiert, um neue technologische Features unmittelbar aus dem Forschungsstadium nach dem Plug-and-Play-Prinzip gezielt zu implementieren. Damit kann eine frühzeitige Validierung im Hinblick auf ein künftiges Anwendungspotenzial ermöglicht werden. Offene Soft- und Hardwareschnittstellen sind hier berücksichtigt oder werden weiterentwickelt.

STICHWÖRTER

Forschung, Fahrzeuggbau, CAE (Computer Aided Engineering)

FlexCAR – The research platform of tomorrow

FlexCAR comprises an autonomously controlled vehicle platform for the mobility of tomorrow. Use case-guided as a research platform, it enables implementing new technological features according to the plug-and-play principle. It allows for an early validation concerning potential future applications. Open software and hardware interfaces are included and will be further developed.



Bild 1. Rolling Chassis. Grafik: www.arena2036.de

1 Einleitung und Motivation

Smartphones haben unsere Nutzung der Telefonie grundlegend geändert. Umfangreiche Büro- und Datenkommunikation ist von jedem Ort und zu jeder Zeit möglich. Standardisierte und offene Softwareschnittstellen (API) ermöglichen Drittanbietern, neue Applikationen auf Basis der bestehenden Hardware anzubieten.

Hier setzt das durch das Bundesministerium für Forschung und Bildung finanzierte Förderprojekt FlexCAR an, in welchem mit einer standardisierten autonomen Fahrzeugplattform ein Forschungsdemonstrator entwickelt wurde. Dieser erlaubt es, neue technologische Features unmittelbar aus dem Forschungsstadium nach dem Plug-and-Play-Prinzip gezielt zu implementieren und für ein künftiges Anwendungspotenzial zu validieren, **Bild 1**.

Im Förderprojekt arbeiten zwölf Verbundpartner aus Industrie und Wissenschaft zusammen, mit einer Projektlaufzeit von fünf Jahren (10/2018 – 09/2023).

Offene Soft- und Hardwareschnittstellen ermöglichen die Wandlung starrer Lieferketten hin zu flexiblen Lieferantennetzwerken. Weiterhin lassen sich mit der standardisierten FlexCAR-Plattform eine Vielzahl an Anwendungen cyberphysisch entwickeln. Die Projektarbeiten finden auf der Technikumsfläche der ARENA2036 auf dem Campus der Universität Stuttgart statt.

In diesem Beitrag wird anhand ausgewählter Schwerpunkte das Projekt FlexCAR detaillierter vorgestellt.

2 Struktur des Verbundprojekts

Vier Themenbereiche bilden den inhaltlichen Rahmen für die Schwerpunkte des FlexCAR-Projekts, **Bild 2**.

Im Themenbereich 1 „Rolling Chassis“ wird eine elektrisch angetriebene und über 5G angesteuerte Forschungsplattform mit zugänglicher und offener Soft- und Hardware entwickelt. Diese Plattform dient als gemeinsame Basis für die FlexCAR-Einzeltechnologien. Erweitert wurde diese durch eine modular aufsetzbare Bodenplatte, welche die Schnittstelle zum Interieur herstellt



Bild 2. Themenbereiche FlexCAR. Grafik: Mercedes-Benz AG

und dem Themenbereich 2 für verschiedene Anwendungsfälle und Interieurstudien zur Verfügung steht.

Der Schwerpunkt des Themenbereichs 2 „Interieur und cyberphysischer Einstieg“ baut auf dem Themenbereich 1 auf. Hier werden interieurbezogene Use Cases betrachtet, deren Fokus auf den Bereichen „Working while driving“ und „Relaxing while driving“ liegt. Bucht beispielsweise ein Kunde oder eine Kundin eine Fahrt über eine App, wird diese Anfrage über 5G gesendet und verarbeitet. Entsprechend den Kundenanforderungen wird ein FlexCAR-Fahrzeug zugewiesen und dem Kunden oder der Kundin die Angaben über Ort und Zeit übermittelt. Das Fahrzeug trifft zum vereinbarten Zeitpunkt am vereinbarten Ort ein und hält Ausschau nach dem Kunden oder der Kundin. Über nach außen gerichtete Kameras kann mit dem Fahrzeug Kontakt aufgenommen werden. Es wird nur berechtigten Personen über Smartphone, Fingerabdruck oder Eyetracking Zutritt gewährt und die Fahrt kann entsprechend abgerechnet werden.

Im Themenbereich 3 „Flexible Produkt- und Produktionskonzepte“ wird das Produktionskonzept von FlexCAR betrachtet. Drive- und Energy-Modul sollen hier in den Fokus der produktionstechnischen Betrachtung rücken: zum Beispiel die Fragestellungen nach passenden Blech- oder Strukturprofilierungen im Rahmen des Chassis. Mithilfe standardisierter Schnittstellen wird das FlexCAR-Chassis Teil eines cyberphysischen Produktionssystems und kann als weiterer Use Case während der Fertigung beispielsweise als fahrerloses Transportsystem eingesetzt werden und somit heutige Transport- und Fördertechnik im Werk ersetzen.

Der Themenbereich 4 „Offener Entwicklungsprozess modularer Fahrzeuge“ beschäftigt sich mit der Umsetzung eines der wesentlichen Kriterien von FlexCAR: dem offenen Entwicklungsprozess. Ziel ist es, offene Schnittstellen bei Hard- und Software zu entwickeln und umzusetzen, wodurch neue Geschäftsmodelle etabliert werden können. FlexCAR ist somit viel mehr als nur ein neues Fahrzeugkonzept. Es bietet eine Forschungsplattform für die zentrale Entwicklung und Fertigung modularer Fahrzeugsysteme.

3 Ausgewählte Projektschwerpunkte

3.1 Antrieb und Wechselspeichersysteme

3.1.1 Motivation

Im FlexCAR-Forschungsprojekt wurde eine fahrbare, update- und upgradefähige Plattform als ein Rolling Chassis aufgebaut, das im Wesentlichen aus drei einzelnen Modulen besteht. Diese drei Einzelmodule, die sich in zwei baugleiche Antriebsmodule (Drive-Module) vorne und hinten sowie ein Speichermodul (Energy-Modul) in der Chassismitte aufteilen, sind die Basis für das Rolling Chassis. Vorerüstet mit Antriebskomponenten und E-/E (Elektrik/Elektronik)-Umfängen in den Drive-Modulen können diese dann mit dem Energy-Modul zusammengefügt werden. Das Energy-Modul bildet mit dem integrierten Energiespeicher das Mittelstück des Chassis. In ihm lassen sich unterschiedliche Energiespeicher und dazugehörige Komponenten integrieren. Durch eine weitgehende Vereinheitlichung der Schnitt- und Kontaktierungsstellen lassen sich Drive-Module und Energy-Module kombinieren und somit eine antriebsflexible Plattform aufbauen.

3.1.2 Vorgehen

Für zukünftiges emissionsfreies Fahren sind E (Elektro)- und BZ (Brennstoffzellen)-Antriebe für die Mobilität der Zukunft im Fokus. Um diese Antriebsszenarien darstellen zu können, wurde ein Konzept für ein Wechselspeichersystem, Bild 3, welches in das Energy-Modul integriert ist, konzipiert.

Aufsetzbasis bildet die Rahmenstruktur des Energy-Moduls in Profilbauweise mit seinen definierten Schnittstellen zu den Drive-Modulen, die gleichzeitig eine Montageschnittstelle bilden. Als Energiespeicher ist ein HV (Hochvolt)-Speicherkonzept auf Basis „Cell2Pack“ inklusive der Elektronikumfänge integriert. Im zweiten Energiespeicherkonzept wurde die Integration eines F-Cell-Systems mit H2-Behältern, Typ4, dargestellt. Um eine Modulbauweise im Gesamtkonzept zu erlauben, bleibt die Grundstruktur des Energy-Moduls für beide Speichersysteme identisch.

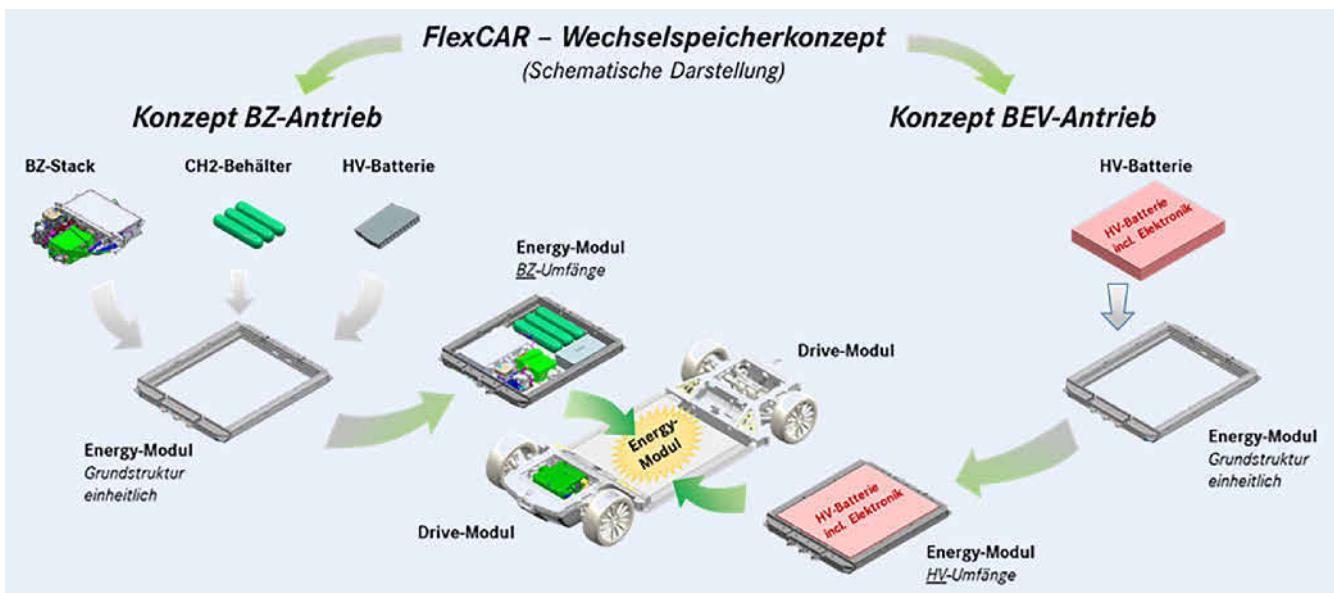


Bild 3. Prinzip des Wechselspeicherkonzeptes. Grafik: Mercedes-Benz AG

3.1.3 Aktueller Stand

Die Integration der unterschiedlichen Energiespeicher erfolgt über jeweils angepasste Tragstrukturen. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen für Elektrik- und Elektronikumfänge sind dabei über Stecksysteme und Anschlüsse weitgehend zu vereinheitlichen. Hierzu fließen Erkenntnisse aus der „Innovationsinitiative Leitungssatz“ mit ein, einem offenen Kooperationsverbund aktiv mitarbeitender Branchenvertreter, die im Rahmen des Forschungscampus ARENA2036 verschiedene vorwettbewerbliche Themenstellungen bearbeiten.

3.1.4 Ausblick

Zur Umsetzung der Wechselspeicherkonzepte werden aktuell unterschiedliche Ansätze zur Darstellung des Energy-Moduls durch beteiligte Projektpartner (Firma Trumpf beziehungsweise Firma Constellium) erarbeitet. Eine Variante ist ein Energy-Modul in reiner Blechbauweise mit einem Fügekonzept oder eine profilintensive Ausführung in Aluminium. Zusätzlich sind Konzepte in Bearbeitung, die im Rahmen der Modularisierung eine Variantenvielfalt durch Kombination von Drive- und Energy-Modul erlauben und somit verschiedene Antriebsvariationen und Aufbauten ermöglichen.

3.2 Aufbau Bodenmodul, Interieur Set-up und Use Cases

3.2.1 Motivation

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des Projekts FlexCAR ist die Konzeption, Demonstration und Evaluation neuer Interieurkonzepte für die autonome Mobilität der Zukunft. Um die Fahrzeit im automatisierten oder autonomen Fahrzeug optimal zu nutzen, kommt besonders den Use Case „Arbeiten“ eine wichtige Rolle zu [1]. Konzepte zum Arbeiten während der Fahrt wurden in Form von Skizzen, Virtual-Reality-Modellen oder Concept Cars bereits vorgestellt [2, 3]. Diese vermitteln zwar einen visuel-

len Eindruck neuer Interieurkonzepte, jedoch bedarf es Studien mit realen Prototypen, um das Erleben und die Evaluation neuer Konzeptlösungen zu ermöglichen.

3.2.2 Vorgehen

In einer Onlineumfrage mit n = 618 Teilnehmern wurden die Anforderungen der Nutzer hinsichtlich des Use Cases „mobiles Arbeiten“ erhoben [4]. Bei Infrastruktur und Ausstattung des Fahrzeugs ist aus Nutzersicht eine geeignete Arbeitsfläche für die Arbeit mit dem Laptop essenziell. Eine im Fahrzeug bereitgestellte Bildschirmfläche mit Toucheingabe zur Anzeige digitaler Inhalte wurde als attraktives Ausstattungselement bewertet.

Basierend auf den Nutzeranforderungen wurden verschiedene virtuelle Konzeptlösungen für das mobile Arbeiten im FlexCAR erstellt, unter anderem mit Ablagekonzepten für das Arbeiten mit Laptop sowie unter Berücksichtigung neuer Technologien für die Arbeitsinfrastruktur, zum Beispiel ein Touchscreen oder eine Projektionsfläche für adaptive Anzeige- und Bedienkonzepte im Fahrzeug. Anschließend wurden die Konzeptlösungen für die Realisierung eines prototypischen Hardwareaufbaus auf dem Rolling Chassis ausgearbeitet, um mit Nutzern eine empirische Evaluation für den Use Case „Mobile Work 2036“ durchzuführen.

3.2.3 Aktueller Stand

Die Hardware-Schnittstelle zwischen dem Rolling Chassis und dem Themenfeld des Interieurs ist das Interieurmodul. Dieses verfügt über eine selbsttragende Rahmenkonstruktion, in die Sitzschienen mit zusätzlichen Nebenschienen integriert wurden. Mit diesem Schienensystem lassen sich diverse Sitzkonstellationen und -positionen abbilden sowie verschiedenartige Interieurkomponenten befestigen und unabhängig zu den Sitzen positionieren.

Die Nutzerstudie „mobile work 2036“ soll unterschiedliche Technologien für den Konsum und die Bearbeitung von digitalen Inhalten untersuchen. Dafür ist das Interieurmodul mit zwei

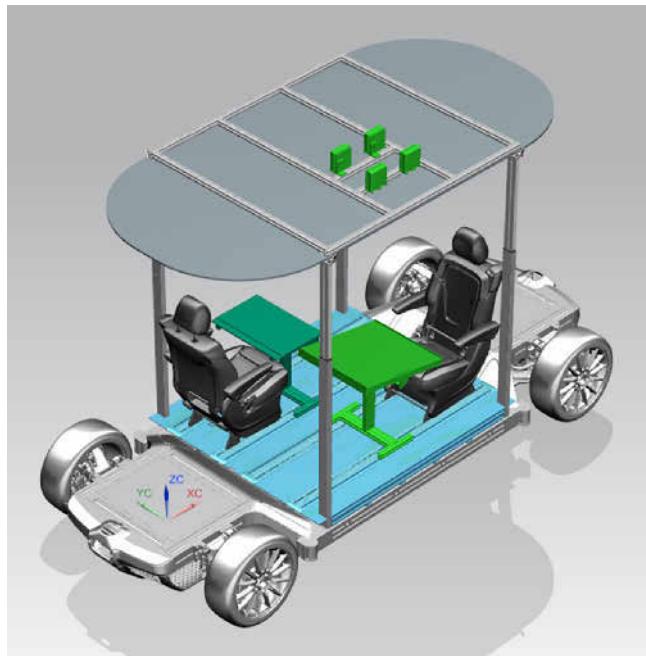


Bild 4. Rolling Chassis mit Interieurmodul und Sitzen (Komponenten aus Serienfahrzeug Mercedes-Benz V-Klasse, V447). *Grafik: Mercedes-Benz AG*



Bild 5. Interieurkonzept für „Peoplemover“ Use Case. *Grafik: HdM Stuttgart*

Sitzen und zwei interaktiven digitalen Arbeitsflächen ausgestattet, **Bild 4**.

Die erste interaktive Oberfläche besteht aus zwei HPL (High Pressure Laminate)-Platten zwischen denen eine touchsensitive Folie einlaminiert ist. Mithilfe von drei Projektoren, die aufgrund ihrer Bauform für einen Einbau im Auto realistisch in Frage kommen, wird so eine interaktive Interieuroberfläche geschaffen. Die Überschneidungen der Projektionen sowie die veränderliche Position und Rotation der Projektionsfläche werden durch speziell entwickelte Software kompensiert. Durch die Kombination von Touchfolie und Projektion erscheint die Arbeitsfläche zunächst als übliche „Ablagefläche“, kann jedoch sobald sie aktiviert ist mit digitalen Anwendungen augmentiert werden. Die zweite interaktive Oberfläche bildet ein integriertes Display mit Toucheingabe.

3.2.4 Ausblick

Die empirische Evaluation verschiedener Konzepte für das mobile Arbeiten im Fahrzeug erlaubt es, erste Rückschlüsse zu ziehen, wie eine ergonomische und nutzerzentrierte Infrastruktur zur mobilen Arbeit im Fahrzeug bereitgestellt werden kann und welches Potenzial neue Technologien, wie etwa interaktive Projektionslösungen im Fahrzeuginnenraum, hierfür bieten. Darüber hinaus erlaubt das Interieurmodul weiteren Fragestellungen zu den FlexCAR Use Cases nachzugehen. Aus Nutzersicht ist beispielsweise Privatsphäre entscheidend für das Arbeiten im Fahrzeug [4], sodass hierzu weitere Konzepte mit dem Interieurmodul des FlexCARs realisiert und im Kontext erprobt werden sollen.

3.3 Exterieur- und Interieurkonzeptentwicklungen

3.3.1 Motivation

Der Wandel der Nutzungsmodelle bei Fahrzeugen hin zum autonomen Fahren und Shared Mobility steht in direktem Zusammenhang mit der Änderung der Mobilitätsbedürfnisse sowie des Nutzungsverhaltens und stellt somit die Forderung nach mehr Flexibilität und Adaptivität an das Fahrzeug von morgen. Im Forschungsprojekt FlexCAR liegt der Fokus auf einer homogenen Forschungsplattform, mit deren Hilfe sowohl Entwicklungszeit als auch -kosten eingespart werden können. Moderne, cyberphysische Ansätze ermöglichen es, Produktionsaspekte und Produktthemen in kundenzentrierten Designs in Exterieur und Interieur umzusetzen, die verschiedene Use Cases abbilden.

3.3.2 Vorgehen

Um die Flexibilität des Rolling Chassis darzustellen und gleichzeitig Aufwand und Kosten gering zu halten, werden die Konzepte der verschiedenen Use Cases als digitale Repräsentation in Form von 3-D-Modellen erstellt und in Virtual Reality erlebbar gemacht. Die virtuelle Darstellung ermöglicht es, eine große Vielfalt unterschiedlicher Interieur- und Exterieurvarianten zu designen und diese mit Endanwendern zu testen und zu optimieren. Dabei ist eine iterative Entwicklung ohne hohe Kosten an Hardware und Zeit möglich, da eine Optimierung bereits während laufender Nutzertests möglich ist. So können zum Beispiel Materialien, Farben, Packaging und Positionierung von Bauteilen zur Laufzeit verändert und erprobt werden. Durch den Einsatz von Virtual Reality werden originale Proportionen beibehalten und ein realer Eindruck vermittelt.

3.3.3 Aktueller Stand

Aktuell liegt der Fokus auf zwei verschiedenen, wesentlichen Use Cases, welche die Flexibilität des R Chassis aufzeigen. Der „Peoplemover“ Use Case fokussiert sich auf den Transport von vier Insassen, welche das Shuttle als Kombination aus „Working While Driving“ und „Relaxing While Driving“ nutzen. Das Luxury Car Use Concept dient zur Darstellung und Untersuchung zukünftiger autonomer High-Class-Mobilität, bei der „Relaxing While Driving“ im Vordergrund steht. Diese Use Cases bedingen unterschiedliche Exterieur- und Interieur-Designs (**Bild 5** und **Bild 6**), die von uns erstellt und in Virtual Reality untersucht werden. Punktuelle Features sind in Hardware aufgebaut, der

Großteil wird jedoch digital als 3-D-Modell dargestellt und cyberphysisch untersucht. Konkrete Anwendungsfälle dieser Forschung sind die Überprüfung unterschiedlicher Einstiegskonzepte sowie die Kommunikation und Interaktion im Interieur zwischen Passagier und autonomem Shuttle.

3.3.4 Ausblick

In der Fortsetzung dieses Forschungsprojekts werden die oben beschriebenen Themenfelder iterativ weiterentwickelt. Zusätzliche Themen, wie die Darstellung eines „Cargo Mover“ Use Cases und weiterführende Untersuchungen zu möglichen Interaktionen zwischen Passagier und autonomem Fahrzeug, werden angestrebt.

3.4 Cyberphysische Visualisierungstechnik

3.4.1 Motivation

Im Rahmen des FlexCAR-Forschungsprojekts des BMBF beschäftigt sich die Hochschule der Medien mit dem Erlebnismachen von autonomen Fahrzeugen und des Fahrzeuginterieurs der Zukunft. Dabei wird fahrerloses autonomes Fahren des SAE (Society of Automotive Engineers)-Levels 5 betrachtet mit Fokus auf Erstnutzende beziehungsweise frühzeitige Nutzende. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Erschaffung von Transparenz zwischen Passagier und autonomem Fahrzeug sowie der Verknüpfung der Bereiche Explainable AI, Human-Centered Design und User Experience [5–7]. Durch die Erzeugung von KI-Transparenz, dem Aufschlüsseln der Handlungen des autonomen Fahrzeugs mittels neuartiger Human Machine Interfaces, soll versucht werden, eine positive User Experience für Endanwender beim autonomen Fahren zu erzeugen.

3.4.2 Vorgehen

Im Projekt wird auf eine cyberphysische Mixed-Reality-Simulationsumgebung – eine Kombination aus Virtual Reality und realen Fahrzeugelementen – aufgesetzt. Diese Umgebung ermöglicht eine effiziente, schnelle und kostengünstige Entwicklung von Mobilitätskonzepten und Fahrzeugen. Als Ausgangspunkt dient ein statischer Versuchsstand mit kommerziellen Kleinbussitzen, welcher um ein virtuell-autonomes Erlebnis erweitert wird. Dazu werden verschiedene VR-Brillen benutzt (wie Varjo XR-3 und HTC Vive Pro 2), Sensorik- (zum Beispiel Datenhandschuhe und 3D-Tiefenkameras) und Aktoriklösungen (zum Beispiel Vibrati-



Bild 6. Exterieurkonzeptentwurf für „Peoplemover“ Use Case.
Grafik: DLR Stuttgart

onsmotoren und Ultraschall-Virtual-Touch-Interfaces). Zusätzlich erlaubt der Einsatz von 3-D-Druck bestimmte cyberphysische Fahrzeugelemente und deren Interaktionen prototypisch schnell umzusetzen. Die Verschmelzung realer und virtueller Objekte wird dabei durch dreidimensionales Tracking des Versuchsstands im Raum (mittels HTC Vive Tracker und Lighthouse-Technologie) und der Synchronisation mit der VR-Umgebung erreicht, **Bild 7**.

Diese Elemente bilden die Basis des cyberphysischen FlexCAR-Prototypen, der sie in ein ganzheitliches Erlebnis vereint. Nutzer bekommen die Möglichkeit, ein autonomes Shuttle zu buchen, in dieses einzusteigen, mit ihm zu interagieren und eine simulierte autonome Fahrt durch eine Stadt zu erleben. Dabei ist es möglich, verschiedene Parameter einzustellen (zum Beispiel Tag/Nacht, Verkehrsaufkommen, Wetter.), um unterschiedliche Verkehrssituationen und Herausforderungen im Rahmen des autonomen Fahrzeugverhaltens und dessen transparenter KI-Kommunikation zu testen.

3.4.3 Aktueller Stand

Die Umsetzung des Trackings realer Fahrzeugelemente und deren Synchronisation mit einer virtuellen 3-D-Umgebung ist weit fortgeschritten. Eine virtuelle autonome Fahrt durch eine simulierte Stadt mit verschiedenen Parametern (zum Beispiel Wetter, Tageszeit, Verkehrsaufkommen) wurde umgesetzt.

Nächste Schritte umfassen die Fertigstellung vom Interieur und Exterieur des autonomen Shuttles sowie Probabandentests, um den Prototypen iterativ anzupassen. Zudem sind Performance-Optimierungen und die Erweiterung des aktuellen Stands um

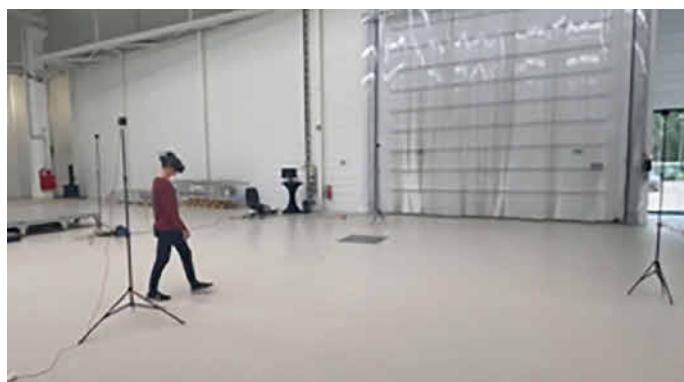


Bild 7. Statischer Versuchsstand. *Grafik: HdM Stuttgart*

- Elemente von Projektpartnern (zum Beispiel Gepäcksysteme, mobiles Arbeiten oder Einstiegskonzepte) in Arbeit.

3.4.4 Ausblick

In Zukunft soll die Entwicklung von Fahrzeug- und Mobilitätskonzepten in einer Mixed-Reality-Umgebung iterativ und agil unter Verwendung des Human-Centered-Design-Entwicklungsprozesses schneller, qualitativ hochwertiger und vor allem kostengünstiger ermöglicht werden. Die Verwendung von Virtual Reality in Kombination mit realen Objekten ermöglicht eine schnelle Entwicklung neuer Interaktionskonzepte (Rapid Prototyping) basierend auf unterschiedlichen Modalitäten.

4 Fazit und Ausblick

Die ausgewählten Schwerpunktthemen haben aufgezeigt, dass man baureihen- und wettbewerbsunabhängig mit diesen neuen innovativen Ansätzen und Methoden eine zielgerichtete, schnelle und effiziente Auslegung künftiger Mobilitätsformen für ein automatisiertes beziehungsweise autonomes Fahren darstellen und umsetzen kann.

In einem weiteren Beitrag soll auf die Forschungsarbeiten des Förderprojekts FlexCAR mit den Schwerpunktthemen

- neue Profilstrukturen für das Rolling Chassis
- Sensorintegrationen am FlexCAR
- Implementierung von RFID-Bedienfeatures
- autonomes Fahren im 5G-Netz und die Einbindung in das ARENA2036-Campusumfeld

eingegangen sowie ein Ausblick auf die Umsetzungspotenziale der daraus gewonnenen Erkenntnisse gegeben werden.

DANKSAGUNG

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „FlexCAR“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen 02P18Q640 bis 02P18Q649) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren und involvierten Verbundprojektpartner danken dem Fördergeber sowie dem Projektträger Karlsruhe PTKA für deren freundliche Unterstützung.

Literatur

- [1] Pfleging, B.; Rang, M.; Brox, N.: Investigating user needs for non-driving-related activities during automated driving. In: Häkkila, J.; Ojala, T. (Hrsg.): MUM ’16: Proceedings of the 15th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. New York/USA: ACM Press 2016, pp. 91–99
- [2] Shaer, O.; Boyle, L.N.; Sadun, R. et al.: Towards work in automated vehicles. Proceedings of CHI 2019 Workshop on Looking into the Future: Weaving the Threads of Vehicle Automation, 2019, pp. 10–16
- [3] Mercedes-Benz: The Mercedes-Benz F015 Luxury in Motion. Internet: <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/autonomous/research-vehicle-f-015-luxury-in-motion>
- [4] Mathis, L.-A.; Widlroither, H.; Traub, N.: Towards Future Interior Concepts: User Perception and Requirements for the Use Case Working in the Autonomous Car. In: Stanton, N. (Ed.): Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems 270 (2021), pp. 315–322, doi: [org/10.1007/978-3-030-80012-3_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80012-3_37)
- [5] Schneider, T.; Ghellal, S.; Love, S. et al.: Increasing the User Experience in Autonomous Driving through different Feedback Modalities. IUI ’21: Proceedings of the 26th International Conference on Intelligent User Interfaces 2021, pp. 7–10, doi: [org/10.1145/3397481.3450687](https://doi.org/10.1145/3397481.3450687)
- [6] Schneider, T.; Hois, J.; Rosenstein, A. et al.: Explain Yourself! Transparency for Positive UX in Autonomous Driving. CHI ’21: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2021, Article #161, pp. 1–12, doi: [org/10.1145/3411764.3446647](https://doi.org/10.1145/3411764.3446647)
- [7] Schneider, T.; Hois, J.; Rosenstein, A. et al.: Velocity Styles for Autonomous Vehicles affecting Control, Safety, and User Experience. SUI ’21: Symposium on Spatial User Interaction 2021, Article #29, pp. 1–2, doi: [org/10.1145/3485279.3485308](https://doi.org/10.1145/3485279.3485308)

Dr. Michael Lahres

Tel. +49 160 / 8638502
michael.lahres@mercedes-benz.com

Hans Hofele

Tel. +49 176 / 30959113
hans.hofele@mercedes-benz.com

Denis Krun, M. Sc.

denis.krun@mercedes-benz.com
Mercedes-Benz AG
RD/RTH, Hardware & Digital Technologies
Leibnizstr. 2, 71032 Böblingen
www.mercedes-benz.com

Lesley-Ann Mathis, M. Sc.

Dr.-Ing. Matthias Bues

Dipl.-Ing. Harald Widlroither
Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
lesley-ann.mathis@iao.fraunhofer.de
www.iao.fraunhofer.de

Reto Wechner, M. Sc.

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
reto.wechner@iat.uni-stuttgart.de
www.iat.uni-stuttgart.de

Katharina Frey, M. Sc.

Robert Hahn

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Pfaffenwaldring 38–40, 70569 Stuttgart
katharina.frey@dlr.de
www.dlr.de

Tobias Schneider, M. Sc.

Axel Braun, M. Sc.

Prof. Dr. Ansgar Gerlicher
Hochschule der Medien
Nobelstr. 10, 70569 Stuttgart
schneidert@hdm-stuttgart.de
www.hdm-stuttgart.de

Nadine Reusch

Ingenieurbüro Reusch
Tel. +49 176 / 67768952
info@reuschconsulting.de
www.reuschconsulting.de

Einfluss auf das Belastungsempfinden während standardisierter Arbeitsprozesse

Exoskelette reduzieren die subjektive Belastung

M. Schalk, I. Schalk, M. Holl, V. Kopp, T. Bauernhansl, J. Siegert, U. Schneider

Um die Nachfrage nach herstellerunabhängigen Erkenntnissen über die Wirkung und Effekte von industriell eingesetzten Exoskeletten zur Prävention von körperlicher Überlastung und physischen Schäden zu bedienen, wurde in einer Studie das subjektive Belastungsempfinden von 72 Probanden während drei unterschiedlichen standardisierten Tätigkeiten untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduktion der wahrgenommenen Belastung bei der Verwendung eines Exoskeletts im Vergleich zur Durchführung ohne Exoskelett, welche konstant über alle definierten Tätigkeiten auftritt.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Mensch und Technik, Arbeitsorganisation

Effect of exoskeletons used in industry on perceived exertion during standardized work tasks

To meet the demand for manufacturer-independent insights on the effects of industrial exoskeletons, this study analyzes how 72 subjects rated the perceived exertion during three different standardized work tasks. Results show a significantly reduced perceived exertion when using an exoskeleton compared to not wearing an exoskeleton. This effect was constant over all defined work tasks.

1 Einleitung

Der seit geraumer Zeit stetig wachsende Absatzmarkt für Exoskelette [1] geht im Wesentlichen auf zwei Problematiken zurück: die hohen Zahlen krankheitsbedingter Ausfälle in Berufsfeldern, in denen körperlich schwer gearbeitet wird [2], und der daraus resultierende Bruttowertschöpfungsausfall [3].

Muskel-Skelett-Erkrankungen machen prozentual den größten Anteil der gemeldeten, arbeitsbedingten Gesundheitsprobleme in Europa aus [4]. Risikofaktoren hierfür sind unter anderem das Heben und Tragen schwerer Lasten, Zwangshaltungen wie etwa Überkopfarbeit und repetitive Tätigkeiten [5]. Laut Expertenmeinungen [6] haben markterhaltliche Exoskelette das Potenzial, bei besonders belastenden Tätigkeiten Prävention zu leisten.

Wie bisherige Forschung zeigt, scheinen nicht nur die objektiv gemessene Entlastung anhand von Muskelaktivität [7], Gelenkkräften [8] oder metabolischem Energieverbrauch [9–11], sondern auch das subjektive Empfinden der Nutzer maßgeblich für den erfolgreichen Einsatz von Exoskeletten in der Praxis zu sein [12, 13]. An diesem Punkt setzt der Exoworkathlon [14] an, ein standardisiertes, modulares Aufgabenset, das berufliche Tätigkeiten abbildet und die wiederholbare Erhebung subjektiver und objektiver Daten ermöglicht.

In diesem Aufsatz werden die Ergebnisse der Exoworkathlon-Studie vorgestellt, soweit sie das subjektive Belastungsempfinden betreffen.

2 Methodik

2.1 Studiendesign

Die Studie untersucht drei unterschiedliche, standardisierte Arbeitsabläufe. Diese werden als Parcours 1, Parcours 2 und Parcours 3 definiert [14]. So wird versucht, facettenreiche, risikobehaftete Berufe in der Logistik, Montage und Schweißbranche möglichst breit zu erfassen und körperlich schwere Arbeit unspezifisch und repräsentativ abzubilden.

Der Arbeitsbereich Logistik bringt durch Zwangshaltung und externe Gewichte eine hohe Gefährdung mit sich [5]. In Produktionslinien der Automobilbranche sind Überkopfarbeiten, welche zur Überbelastung des Schulter- und Nackenbereichs sowie der oberen Extremitäten führen, häufig zu finden [15]. Auch in der Schweißbranche führen unnatürliche Körperhaltung, schweres Equipment und hohe physikalische Lasten zu Problemen des Bewegungsapparates [16].

Jeder der drei Parcours bildet eine repräsentative, abstrahierte Tätigkeit aus dem jeweiligen Bereich ab. Bei allen Parcours beträgt die Dauer eines Durchlaufes eine Stunde. Jeder Proband durchlief den jeweiligen Parcours zweimal: einmal mit und einmal ohne Exoskelett. Zwischen den beiden Durchgängen wurde eine Stunde pausiert, um die Erholung der Probanden zu gewährleisten. Die Reihenfolge, in welcher die Probanden die Durchläufe absolvierten, wurde randomisiert und erfolgte in gleichen Anteilen. Die Exoskelett-Modellauswahl wurde ebenfalls zufällig getroffen und erfolgte in gleichen Anteilen.



Bild 1. Darstellung des Parcours 1. Abstrahierte logistische Tätigkeit mit simuliertem Fließband und Gitterboxen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

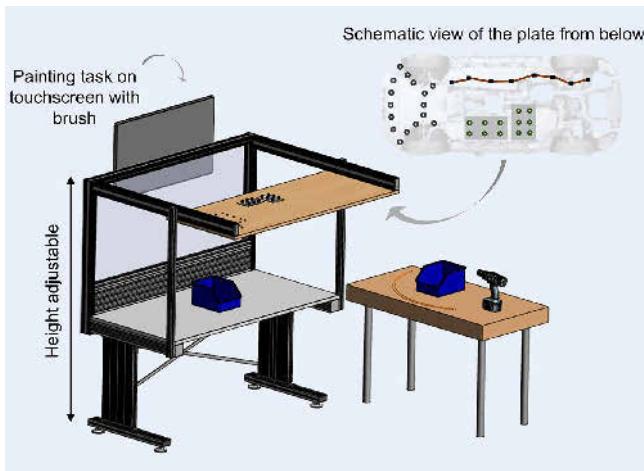


Bild 2. Darstellung des abstrahierten Arbeitsprozesses Parcours 2. *Grafik: Fraunhofer IPA*

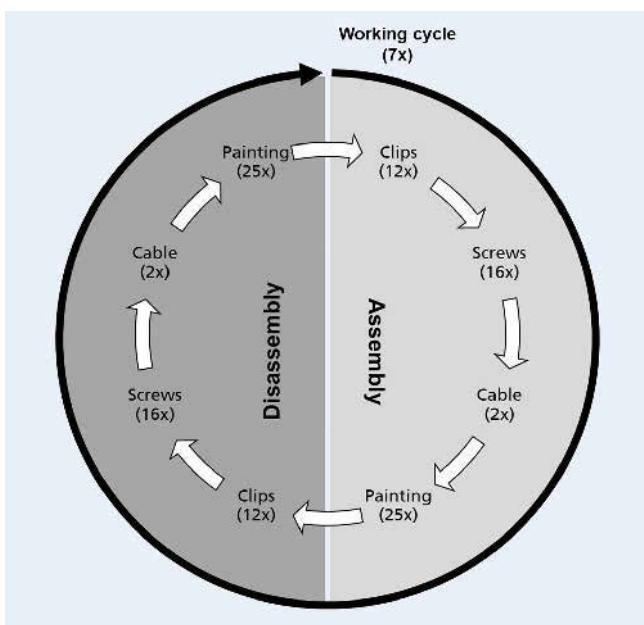


Bild 3. Arbeitszyklus des abstrahierten Arbeitsprozesses Parcours 2. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Um eine möglichst neutrale Position zu behalten und keinen Wettbewerbsvorteil zu schaffen, wurde auf eine selektive Betrachtung der Exoskelett-Hersteller bewusst verzichtet.

Parcours 1

Dieser Prozess abstrahiert eine Logistikaktivität innerhalb der Audi AG. Die arbeitende Person trägt Kisten mit einem Gewicht von 8 kg von einem abstraierten Fließband über eine Distanz von 2 m zu einer von zwei Gitterboxen und stapelt diese dort. Die Kisten werden durch zwei Farbmarkierungen unterschieden. Gemäß den beiden Farbcodes werden sie der jeweiligen Gitterbox zugeordnet. Die zeitliche Taktung der Arbeitsschritte ist nach Vorgabe des ursprünglichen Prozesses festgelegt [17]. Um die insgesamt 48 Pakete einzusortieren, sind 8 Minuten vorgegeben. Nach einer 2-minütigen Pause werden die Pakete abwechselnd wieder auf das durch einen Tisch simulierte Fließband zurückgetragen. Diese Aufgabenstellung wird dreimal hintereinander wiederholt. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 1** dargestellt.

Parcours 2

Dieser Prozess abstrahiert eine Überkopftätigkeit aus einer PKW-Produktionslinie der Audi AG. Die arbeitende Person montiert stehend Kleinteile an einem abgebildeten Kraftfahrzeugunterboden an einer in Überkopfhöhe befestigten Montageplatte. Die Arbeitsschritte umfassen das Setzen von 12 Befestigungsclips in fest vorgegebene Bohrungen, das Einschrauben von 16 M8-Schrauben in fest vorgesehene Gewindebohrungen mittels Akkuschrauber, das Verlegen von zwei abstrahierten Kabelbäumen in den dafür vorgesehenen Kabelführungen und das digital simulierte Auftragen von Korrosionsschutz mittels Pinsel-Dummy entlang 25 Falzen, mit jeweils 390 mm Länge.

Die zeitliche Taktung der Arbeitsschritte wurde durch eine MTM (Methods Time Measurement)-Analyse festgelegt. Die Arbeitsschritte werden nacheinander durchgeführt. Nachdem alle Aufgaben abgeschlossen sind, werden die Teile in umgekehrter Reihenfolge demontiert. Dieser Prozess wird siebenfach wiederholt mit jeweils 2-minütiger Pause. Der Aufbau des Parcours ist in **Bild 2** und der Arbeitszyklus in **Bild 3** dargestellt.

Parcours 3

Dieser Prozess abstrahiert eine standardisierte Schweißprüfung in Zwangshaltung nach DIN ISO 9606-1 [18]. Die Arbeitsschritte wurden in Kooperation mit der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Nord in Hamburg nachgebildet. Sie bestehen aus der Schweißposition „PF – Stumpfnaht steigend“ (Werkstück befindet sich vor dem Körper; siehe **Bild 4**) und der Schweißposition „PE – Stumpfnaht, Überkopfposition“ (Werkstück befindet sich circa 300 mm vor dem Auge; siehe **Bild 5**).

Die aufzutragenden Schweißnähte haben eine Länge von 250 mm. In jeder der beiden Schweißpositionen werden insgesamt zehn Nähte geschweißt, gestartet wird in der Position PF. Jede erfolgreich abgeschlossene Naht wird mit einem Winkelschleifer bearbeitet. Nachdem die ersten zehn Schweißnähte abwechselnd aufgetragen und bearbeitet sind, wird zur Position PE gewechselt. Anwendung findet das MAG-Verfahren (Metallschweißen mit aktiven Gasen), da es das wirtschaftlich relevanzteste industrielle Schweißverfahren darstellt [19].

Die Schweißaufgaben wurde in der Studie mit dem Schweißsimulator „Soldamatic“ der Firma Seabery Soluciones abgebildet. Die Schleiftätigkeit wurde anhand eines vom Fraunhofer IPA und der Universität Stuttgart IFF entwickelten Simulators ausgeführt, der die auf den Körper wirkende Belastung simuliert.

2.2 Ausrüstung

2.2.1 Exoskelette

1. Exoskelette zur Unterstützung der Oberkörper- und Armmuskulatur:

- Airframe – Levitate Technologies, Inc., 9540 Waples St., Suite F, San Diego, CA 92121, USA
- Hapo MS – ErgoSanté, Za De Labahou, 30140 Anduze, Frankreich
- Mate XT – Comau S.p.A., Via Rivalta, 30, 10095 Grugliasco TO, Italien
- Paexo Shoulder – Ottobock SE & Co. KGaA, Max-Näder-Str. 15, 37115 Duderstadt, Deutschland
- 360 XFR – Skel-Ex B.V., Scheepsbouwweg 8, G4, 3089 JW Rotterdam, Niederlande

Die in 1. aufgelisteten industriellen Exoskelette zielen darauf ab, den Arbeitsablauf vor dem Oberkörper und über dem Kopf durch Unterstützung der Oberarme zu erleichtern. Sie eignen sich somit für die Verwendung in Parcours 2 und Parcours 3.

2. Exoskelette zur Unterstützung der Muskulatur des unteren Rückens:

- CrayX – German Bionic System GmbH, August-Wessels-Str. 23, 86156 Augsburg, Deutschland
- Exoback – RB3D Robotiques 3 Dimensions (SA à conseil d'administration), 41 Avenue de Paris, 89470 Montereau, Frankreich
- Hapo – ErgoSanté, Za De Labahou, 30140 Anduze, Frankreich
- Japet W. – Japet Medical Devices, 12 Avenue Pierre Mauroy F3A, 59120 Loos, Frankreich
- Laevo Flex – Laevo B.V., Patrijsweg 30, 2289 EX Rijswijk, Niederlande
- Paexo Back – Ottobock SE & Co. KGaA, Max-Näder-Straße 15, 37115 Duderstadt, Deutschland
- SoftExo – Hunic GmbH, Bergerweg 51, 72270 Baiersbronn, Deutschland

Die in 2. aufgelisteten industriellen Exoskelette zielen darauf ab, den Arbeitsablauf, welcher den unteren Rücken belastet, durch Unterstützung der Oberschenkel und der Wirbelsäule zu erleichtern. Sie eignen sich somit für die Verwendung in Parcours 1. In der **Tabelle** werden die in den Parcoursen verwendeten Exoskelette dargestellt.

Alle in dieser Studie verwendeten Exoskelette sind CE-zertifiziert und werden kommerziell im industriellen Bereich eingesetzt.

2.2.2 Schweißsimulator

In dieser Untersuchung findet der Augmented-Reality-Schweißsimulator Soldamatic der Firma Seabery Soluciones Anwendung. Es wurde die Hardware-Version 3.0 und die Soft-



Bild 4. Darstellung der Schweißposition PF (Werkstück vor dem Körper) während der simulierten Schweißsequenz inclusive Augmented-Reality-Ich-Perspektive des Probanden. Der Proband trägt das Exoskelett „Levitate Airframe“. Foto: *Fraunhofer IPA*

Tabelle. Verteilung der verwendeten Exoskelette nach Arbeitsablauf (Parcours).

Arbeitsablauf	Verwendete Exoskelette
Parcours 1	CrayX – German Bionic Exoback – RB3D Hapo – ErgoSanté Japet W. – Japet Medical Devices Laevo Flex – Laevo Paexo Back- Ottobock SoftExo – Hunic
Parcours 2	Airframe® – Levitate Technologies Paexo Shoulder – Ottobock 360 XFR – Skel-Ex
Parcours 3	Airframe® – Levitate Technologies Hapo MS – ErgoSanté Mate XT – Comau Paexo Shoulder – Ottobock 360 XFR – Skel-Ex

ware-Version 4.0 verwendet. Diese Systeme werden nach internationalen Standards in der Schweißerausbildung eingesetzt [20].

Der Schweißhelm mit integrierter Kamera und Display sowie die Schweißpistole entsprechen in Form und Gewicht realem Schweißequipment. Die abstraierten Werkstücke besitzen QR-Marker, welche beim Starten des Schweißprozesses mithilfe der Augmented-Reality-Technologie aus der Perspektive des Anwenders zu einem realen Werkstück werden.

2.2.3 Schleifsimulator

Der in dieser Studie verwendete Schleifsimulator wurde entwickelt, um die auf den Körper wirkende Belastung während Schleiftätigkeiten nachzustellen. Dazu wurde zum einen ein handelsüblicher Winkelschleifer durch Isolierung des Netzsteckers untauglich gemacht. Die Belastung durch Haptik und Eigengewicht des Winkelschleifers ist somit sichergestellt. Um die Kräfte nachzustellen, welche in Z-Richtung in das Werkstück gestemmt werden müssen, wurden gemäß DIN ISO 9606-1 [18] reale Schweißnähte im Labor bearbeitet. Die wirkenden Kräfte wurden mittels Kraftaufnehmer ermittelt. Der aufgebaute Prüfstand, der in **Bild 6** zu sehen ist, besteht folglich aus einer kraftabsorbierenden, linear gelagerten Vorrichtung, die bei Erreichen einer Kraft von 35 N in Z-Richtung eine optische Rückmeldung gibt.



Bild 5. Darstellung der Schleifsequenz nach dem Auftragen einer Schweißnaht, in der Position PF (Werkstück über dem Kopf). Der Proband trägt das Exoskelett „Skel-Ex 360 XFR“. Foto: Fraunhofer IPA

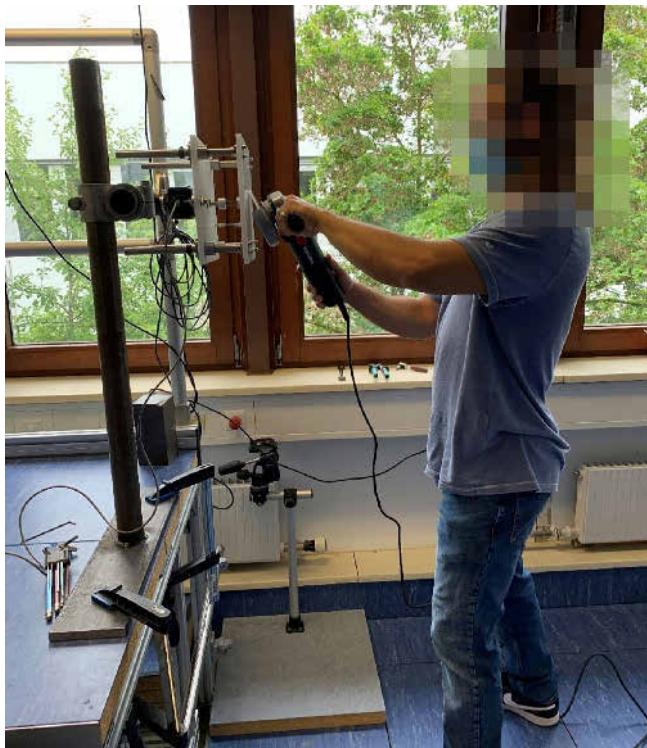


Bild 6. Aufbau des Schleifprüfstands in der Schweißposition PF: Messung der Kräfte in Z-Richtung mittels Kraftaufnehmer. Foto: Fraunhofer IPA

Eine CAD-Zeichnung des Schleifsimulators ist in **Bild 7** dargestellt. Der Arbeitspunkt, innerhalb dessen das optische Feedback arbeitet, lässt einen Spielraum von circa 5 mm. Um den Schleifprozess mit dem präparierten Winkelschleifer nachzustellen, wurde dieser mit einer 125-mm-Dummy-Schruppscheibe aus Polyoxymethylen ausgestattet.

2.3 Datenerhebung

Um das subjektive Belastungsempfinden zu erfassen, wurde ein Fragebogen verwendet, der auf der Borg-CR10-Skala basiert [21]. Die Skala reicht von „0 = sehr, sehr leicht“ bis „10 = sehr, sehr schwer“ und ist in **Bild 8** dargestellt.

Der Fragebogen wurde unmittelbar nach dem einstündigen Arbeitsablauf ausgefüllt. Es resultieren somit von jedem Studien-

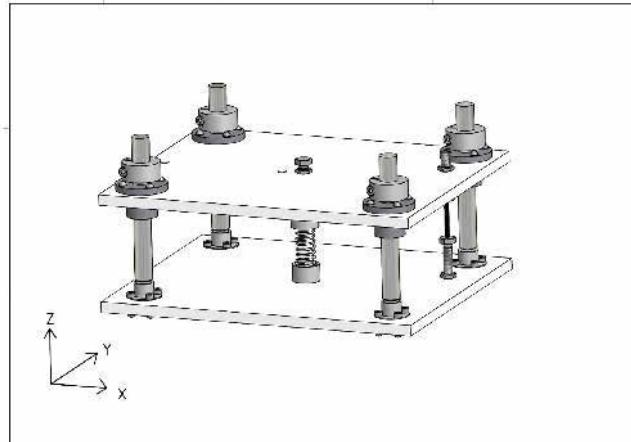


Bild 7. CAD Zeichnung des entwickelten Schleifsimulators.
Grafik: Fraunhofer IPA

Subjektives Belastungsempfinden	
Bitte bewerten Sie folgende Aussage:	
Wie anstrengend war die Tätigkeit für Sie von 0 (sehr sehr leicht) bis 10 (sehr sehr schwer)?	
<input type="checkbox"/>	0 Sehr sehr leicht
<input type="checkbox"/>	1 Sehr leicht
<input type="checkbox"/>	2 Leicht
<input type="checkbox"/>	3 Moderat
<input type="checkbox"/>	4 Etwas anstrengend
<input type="checkbox"/>	5 Anstrengend
<input type="checkbox"/>	6
<input type="checkbox"/>	7 Sehr schwer
<input type="checkbox"/>	8
<input type="checkbox"/>	9
<input type="checkbox"/>	10 Sehr sehr schwer

Bild 8. Fragebogen zum subjektiven Belastungsempfinden nach BORG-CR10-Skala. Grafik: Fraunhofer IPA

teilnehmer zwei Bewertungen: eine für den Durchlauf mit Exoskelett und eine für den Durchlauf ohne Exoskelett.

2.4 Studiengruppe

An der Studie nahmen insgesamt n=72 Personen teil. Sie waren zwischen 17 und 54 Jahren alt. Von diesen absolvierten 15 Teilnehmer den Parcours 1, 14 Teilnehmer den Parcours 2 und 43 Teilnehmer den Parcours 3 (**Bild 9**).

Das durchschnittliche Alter lag bei 23,8 Jahren. Alle Versuchspersonen waren gesund, hatten keine Kontraindikationen oder anderweitige Erkrankungen des Muskelskelettsystems oder des Herzkreislaufsystems. Die Verteilung nach Geschlecht lag bei 94,4% männlichen und 5,6% weiblichen Teilnehmern. Der durchschnittliche Body-Mass-Index (BMI) lag bei 25,83.

Die durchweg ausgebildeten Fachkräfte nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden schriftlich über den Ablauf und die erhobenen Daten aufgeklärt.

2.5 Ethikvotum

Der Ethikantrag mit der Prüfnummer „Az. 21-018“ wurde am 20. September 2021, von der zuständigen Ethikkommission

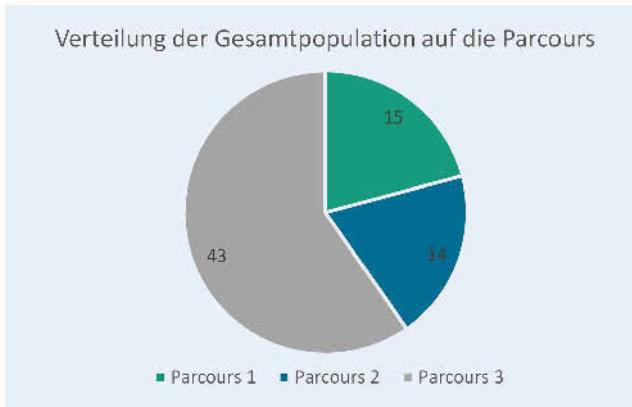


Bild 9. Verteilung der gesamten Population auf die unterschiedlichen Tätigkeitsfelder (Parcours). *Grafik: Fraunhofer IPA*

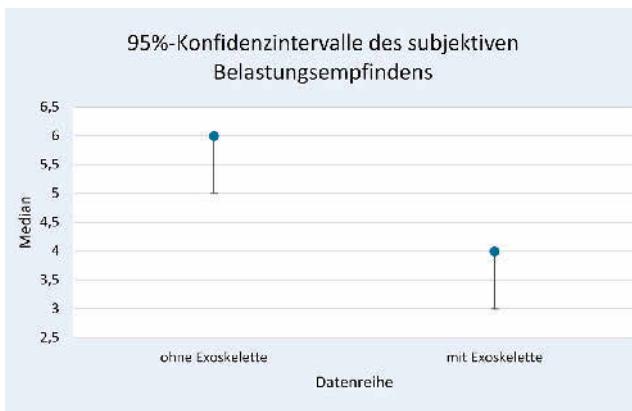


Bild 10. Vergleich der Konfidenzintervalle beider Datensätze n=72. *Grafik: Fraunhofer IPA*

„Kommission Verantwortung in der Forschung“ der Universität Stuttgart, freigegeben.

2.6 Datenanalyse

Die Daten wurden mit der Statistiksoftware Minitab, Version 20.1.2 (64 bit), analysiert. Aufgrund einer trivialen Ordinalskalierung durch die Borg-CR10-Skala und eines Anderson-Darling-Tests, der erwartungsgemäß eine nichtnormale Verteilung der Daten zeigte, wurde eine nichtparametrische statistische Analyse durchgeführt. Für alle Tests wurde ein Konfidenzniveau von 95 % gewählt.

Durch die nichtnormale Verteilung und die Ordinalskalierung wurde zur Analyse der Effekte eine Mediananalyse verwendet. Basierend auf einem Test auf gleiche Varianzen wurde ein Mann-Whitney-U-Test genutzt, um die Abweichung der Datenreihen zu untersuchen.

3 Ergebnisse

Betrachtet man die Mediane der beiden Stichproben „mit Exoskelett“ und „ohne Exoskelett“ so ist deskriptiv zu verzeichnen, dass der Wert ohne Verwendung von Exoskeletten bei 6 liegt, was auf der Borg-CR10-Skala zwischen „anstrengend“ und „sehr schwer“ liegt, während der Wert mit Verwendung eines Exoskeletts bei 4 (entspricht „etwas anstrengend“) liegt.

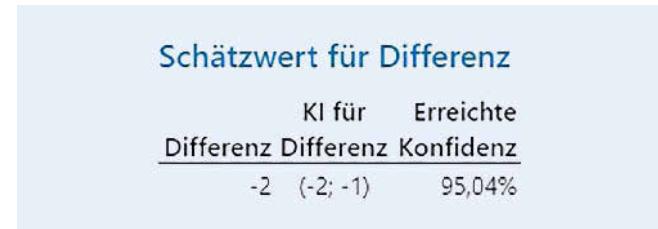


Bild 11. Geschätzte Differenz und Konfidenzintervall der Mediane nach Mann-Whitney-U; n=72. *Grafik: Fraunhofer IPA*

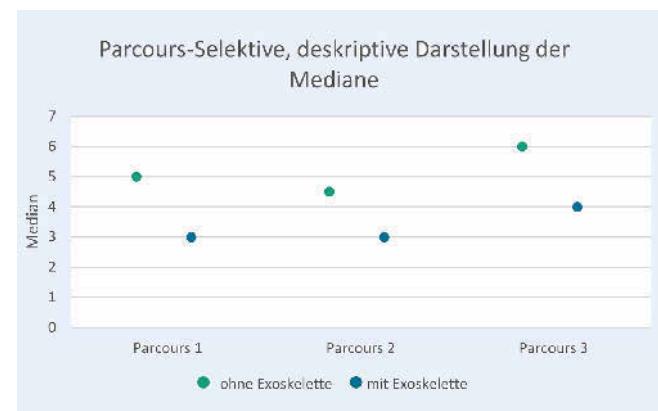


Bild 12. Deskriptive Darstellung der Parcours-Selektiven Mediane und Reduktion des subjektiven Belastungsempfindens. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Bei der Betrachtung der beiden 95 %-Konfidenzintervalle (**Bild 10**) ist somit eine Reduktion des subjektiven Belastungsempfindens unter der generellen Verwendung eines Exoskeletts während der standardisierten Arbeitsabläufe von zwei Skalenpunkten zu verzeichnen.

Die Mediananalyse nach Mann-Whitney-U ermittelt mit einem p-Wert = 0,000 eine signifikante Abweichung der beiden verbundenen Gruppen. Somit bestätigt sich ein signifikanter Effekt durch das Tragen eines Exoskeletts während den Arbeitsabläufen. Das geschätzte Konfidenzintervall für Differenzen liegt zwischen -2 und -1; die erreichte Konfidenz liegt bei 95,04 %. Die resultierende geschätzte Differenz der beiden Gruppen liegt bei -2 (**Bild 11**).

In **Bild 12** sind die Mediane der einzelnen Parcours, untergliedert in „mit Exoskelett“ und „ohne Exoskelett“, zu sehen. Auffällig ist, dass die Differenz zwischen den Medianen der Durchführung mit und ohne Exoskelett über alle Parcours konstant ist. Allerdings zeigen sich bei Parcours 3 insgesamt etwas höhere absolute Werte im Vergleich zu Parcours 1 und Parcours 2, was einer generell höheren empfundenen Belastung entspricht.

4 Diskussion und Ausblick

Die statistische Analyse zeigt eindeutig eine signifikant geringere subjektive Belastung bei Verwendung eines Exoskeletts. Dieser Effekt zeigt sich für alle hier betrachteten Parcours.

Das subjektive Belastungsempfinden ist eine individuelle, subjektive Belastungseinschätzung, die intraindividuellen Schwankungen unterliegt. Es weist jedoch eine starke Korrelation zu real gemessener körperlicher Belastung auf [22]. Daher kann davon ausgegangen werden, dass nicht nur die subjektiv empfundene Belastung, sondern auch die real messbare, physiologische Belas-

tung durch die Nutzung von Exoskeletten positiv beeinflusst wird. Um dies zu bestätigen, müssen weitere Durchführungen dieses Studienaufbaus mit physiologischen Messmethoden, welche auf den Belastungsstatus hinweisen, wie zum Beispiel Messung der Herzfrequenz, Muskelaktivität oder Atemgasaustausch, ausgeführt werden.

Eine weitere interessante Erkenntnis ist, dass der belastungsreduzierende Effekt der Exoskelette über alle drei hier betrachteten Parcours konstant ist, obwohl sich die Tätigkeiten und die verwendeten Exoskelett-Modelle unterscheiden. Gemeinsam ist ihnen, dass eine reale Arbeitstätigkeit über eine Stunde an einem abstraierten Arbeitsplatz stattfindet und die jeweilige Belastung durch ein dafür geeignetes Exoskelett unterstützt wird. Die in dieser Studie betrachteten Parcours sind Beispiele für körperlich belastende Tätigkeiten, die durch Exoskelette unterstützt werden können. Da der Effekt der Nutzung von Exoskeletten über alle drei sehr unterschiedlichen Parcours konstant ist, ist anzunehmen, dass dieser Effekt in analog aufgebauten Parcours mit gleichen Voraussetzungen (eine Stunde körperlich belastende Arbeit, welche durch ein Exoskelett unterstützt werden könnte) ebenfalls zu verzeichnen ist. Um dies zu überprüfen, müssen weitere, von realen Arbeitsplätzen abstrahierte Parcours aufgebaut werden und analoge Studie mit erfahrenen Mitarbeitern durchgeführt werden.

Insgesamt schließen diese Erkenntnisse an bestehende Studie an und bestätigen die Potenziale von modernen körpergetragenen Hilfssystemen [17, 23, 24].

L i t e r a t u r

- [1] Bogue, R.: Exoskeletons – a review of industrial applications. *Industrial Robot: An International Journal* 45 (2018) 5, pp. 585–590
- [2] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): MEGA-PHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Band 1. Stand: 2019. Internet: www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2333.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 12.09.2022
- [3] Brenscheidt, S.; Siefer, A.; Hinnenkamp, H. et al.: Arbeitswelt im Wandel: Zahlen – Daten – Fakten. Stand: 2019. Internet: www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Praxis/A100.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zugriff am 12.09.2022
- [4] EU-OSHA (eds.): Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. Stand: 2019. Internet: osha.europa.eu/sites/default/files/Work-related_MSDs_prevalence_costs_and_demographics_in_the_EU_report.pdf. Zugriff am 12.09.2022
- [5] Parent-Thirion, A.; Bileta, I.; Cabrita, J. et al.: 6th European Working Conditions Survey. Overview report. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2017
- [6] Schalk, M.; Siegert, J.; Schneider, U. et al.: Effektivität industrieller Exoskelette. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 5, S. 319–323. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [7] Bär, M.; Steinhilber, B.; Rieger, M. A. et al.: The influence of using exoskeletons during occupational tasks on acute physical stress and strain compared to no exoskeleton – A systematic review and meta-analysis. *Applied ergonomics* 94 (2021), p. 103385
- [8] Glitsch, U.; Bäuerle, I.; Hertrich, L. et al.: Biomechanische Beurteilung der Wirksamkeit von rumpfunterstützenden Exoskeletten für den industriellen Einsatz. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 74 (2020) 4, S. 294–305
- [9] Schmalz, T.; Colienne, A.; Bywater, E. et al.: A Passive Back-Support Exoskeleton for Manual Materials Handling: Reduction of Low Back Loading and Metabolic Effort during Repetitive Lifting. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* 10 (2022) 1, pp. 7–20
- [10] Baltrusch, S. J.; van Dieën, J. H.; Koopman, A. S. et al.: SPEXOR passive spinal exoskeleton decreases metabolic cost during symmetric repetitive lifting. *European Journal of Applied Physiology* 120 (2020) 2, pp. 401–412
- [11] Del Ferraro, S.; Falcone, T.; Ranavolo, A. et al.: The Effects of Upper-Body Exoskeletons on Human Metabolic Cost and Thermal Response during Work Tasks-A Systematic Review. *International journal of environmental research and public health* 17 (2020) 20, # 7374, doi: [org/10.3390/ijerph17207374](https://doi.org/10.3390/ijerph17207374)
- [12] Elprama, S. A.; Vanderborght, B.; an Jacobs: An industrial exoskeleton user acceptance framework based on a literature review of empirical studies. *Applied ergonomics* 100 (2022), p. 103615
- [13] Hoffmann, N.; Argubi-Wollesen, A.; Linnenberg, C. et al.: Towards a Framework for Evaluating Exoskeletons. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (eds.): Production at the leading edge of technology. Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), 2019. Heidelberg: Springer-Verlag 2019, pp. 441–450
- [14] Kopp, V.; Holl, M.; Schalk, M. et al.: EXOWORKATHLON: A prospective Study Approach for the Evaluation of industrial Exoskeletons. Manuscript submitted for publication (2022)
- [15] van der Molen, H. F.; Foresti, C.; Daams, J. G. et al.: Work-related risk factors for specific shoulder disorders: a systematic review and meta-analysis. *Occupational and environmental medicine* 74 (2017) 10, pp. 745–755
- [16] Herberts, P.; Kadefors, R.: A study of painful shoulder in welders. *Acta orthopaedica Scandinavica* 47 (1976) 4, pp. 381–387
- [17] Hensel, R.; Keil, M.: Subjektive Evaluation industrieller Exoskelette im Rahmen von Feldstudien an ausgewählten Arbeitsplätzen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 72 (2018) 4, S. 252–263
- [18] DIN EN ISO 9606-1:2017-12: Prüfung von Schweißern – Schmelzschweißen – Teil 1: Stähle (ISO 9606-1:2012, einschließlich Cor 1:2012 und Cor 2:2013). Deutsche Fassung, Ausgabe Dezember 2017
- [19] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien. Heidelberg: Springer-Verlag 2006
- [20] Kopplin, O.: Neue Ausbildungswege: Schweißsimulator „Soldomatic“ im Einsatz bei Gothaer Fahrzeugtechnik. *Der Praktiker* (2018) 9, S. 479–480
- [21] Borg, G.: Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt* 101 (2004) 15, A 1016–1021
- [22] Borg, G.: Borg's perceived exertion and pain scales. Champaign/ Ill.: Human Kinetics 1998
- [23] Alemi, M. M.; Madinei, S.; Kim, S. et al.: Effects of Two Passive Back-Support Exoskeletons on Muscle Activity, Energy Expenditure, and Subjective Assessments During Repetitive Lifting. *Human factors* 62 (2020) 3, pp. 458–474
- [24] Huysamen, K.; Bosch, T.; Looze, M. de et al.: Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied ergonomics* 70 (2018), pp. 148–155



M a r c o S c h a l k , M . S c .
Foto: Fraunhofer IPA

I n e s S c h a l k , M . S c .

M i r j a m H o l l , M . S c .

V e r e n a K o p p , M . S c .

Prof. Dr.-Ing. T h o m a s B a u e r n h a n s l

Dr. med. U r s S c h n e i d e r

Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Antriebssysteme und Exoskelette
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1577
marco.schalk@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Prof. Onorific Dipl.-Ing. J ö r g S i e g e r t

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
joerg.siegert@iff.uni-stuttgart.de
www.iff.uni-stuttgart.de

Datengetriebene Zustandsdiagnose von Flugzeugkomponenten

KI-Auswertung von Reparaturdaten in der Luftfahrt

F. Hörstel, F. Kähler, T. Schüppstuhl

Während der Flugzeug-MRO (maintenance, repair, and overhaul) werden Strukturauteile auf Oberflächendefekte geprüft und etwaige Defekte lokal entfernt. Die Position und Ausdehnung der Reparaturstellen bestimmen maßgeblich den Wiedereinsatz des Bauteils. Die Zustandsbewertung erfolgt dabei manuell und auf Basis von Expertenwissen. In diesem Beitrag wird ein datengetriebener Auswerteansatz zur Bewertung der Reparatur vorgestellt, welcher auf Basis historischer Reparaturen eine fundierte sowie objektive Zustandsbewertung erlaubt.

STICHWÖRTER

Künstliche Intelligenz (KI), Automatisierung, Digitalisierung

AI evaluation of repair data in the aviation industry – Data-driven condition diagnosis of aircraft components

During aircraft MRO, structural components are inspected for surface defects, removing any defects locally. The position and extent of the repair areas will largely determine the reuse of the component. In this process, the condition is manually assessed based on expert knowledge. This paper presents a data-driven evaluation approach for assessing the repair work, enabling a well-founded as well as objective condition assessment on the basis of historical repairs.

1 Einleitung

Die prognostizierte Zunahme des weltweiten Luftverkehrs [1] stellt MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul)-Prozesse von Verkehrsflugzeugen vor steigende Effizienz- und Produktivitätsanforderungen. Am Beispiel der Strukturauteile werden bei der Inspektion gefundene Oberflächendefekte durch lokale Bearbeitung entfernt, diese Reparaturstellen anschließend vermessen und tabellarisch beziehungsweise als grafische Oberflächentopografie dokumentiert. Neben der Position hat insbesondere die Tiefe der Reparatur maßgeblichen Einfluss auf die Wiedereinsatzfähigkeit des Bauteils. Überschreitet die Tiefe festgelegte Grenzwerte, wird die Reparatur einer gesonderten Prüfung unterzogen. Diese Prüfung und Bewertung erfolgt derzeit manuell auf Basis historisch aufgebauten internen oder mit Zeitverzug und Kosten verbundem externen Expertenwissens.

Um das gesamte historische Wissen für die Bewertung aktueller Reparaturen nutzbar zu machen, bieten sich datengetriebene Diagnoseansätze auf Basis von Künstlicher Intelligenz (KI) oder Machine Learning (ML) an, welche die Fähigkeit zur Generalisierung unbekannter Daten sowie zur raschen Auswertung großer Datenmengen besitzen [2, 3]. Die Nutzung historischen Wissens ermöglicht so eine objektivere und vom Experten unabhängige Zustandsbewertung.

Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur datengetriebenen Zustandsdiagnose am Beispiel eines zylindrischen Strukturauteils vor. Nachfolgend wird zunächst die bei der Instandhaltung anfallende Datenbasis und der KI-Ansatz erläutert, bevor dessen Performance und Eignung evaluiert werden.

2 Analyse der Reparaturdaten

Während der Inspektion der Strukturauteile wird die in Zonen aufgeteilte Oberfläche auf Defekte geprüft. Defekte wie etwa Korrosion werden anschließend vollständig entfernt. Im Nachgang wird die Reparaturstelle (Rework) vermessen und verortet. Am Beispiel einer zylindrischen Komponente werden die axiale beziehungsweise tangentiale Position und Ausdehnung sowie die Tiefe der Reparaturstellen tabellarisch dokumentiert. Eine beispielhafte Tabelle einer Bauteilzone zeigt Bild 1.

Anhand der Reparaturdaten wird zur internen Zustandsbewertung eine vornehmlich auf Referenzen, das heißt ähnlichen historischen Reparaturen, basierte Klassifikation durchgeführt, während die externe Zustandsbewertung nach unbekannten Kriterien erfolgt.

Für diesen Beitrag wurden insgesamt 290 Reparaturdatensätze zwischen Dezember 2007 und Januar 2021 herangezogen, die insgesamt 5142 Reworks umfassen. Diese sind ungleichmäßig auf Datensätze mit jeweils bis zu 19 Bauteilzonen (und Tabellen) verteilt. Unter den Datensätzen befinden sich 43 Reparaturen, die nachträglich als nicht wiedereinsatzfähig (Schrott-Klasse) klassifiziert wurden. Somit herrscht ein deutliches Klassen- und Verteilungsungleichgewicht zwischen Wiedereinsatz- und Schrott-Klasse (Bild 2). Zu beachten ist, dass die Datensätze als Ganzes bewertet werden.

Reparaturnummer (RN) 6		Bauteilzone (BZ) 3				
Referenzmaß [mm] 118,10						
Bearbeitungs- nummer (BN)	Tiefe [mm]	Start axial [mm]	Ende axial [mm]	Axiale Breite [mm]	Umlauflänge [mm]	Ausrichtung [°]
1	0,07	589	604	15	36	63 bis 91
2	0,10	422	439	17	42	78 bis 115
3	0,22	404	422	18	53	74 bis 115
4	0,10	389	404	15	38	80 bis 109

Bild 1. Reparaturtabelle einer Bauteilzone. Grafik: TU Hamburg



Bild 2. Aufteilung der historischen Reparaturdaten. Grafik: TU Hamburg

3 Machine-Learning-Ansatz zur Klassifikation und Ähnlichkeitsanalyse

Die aktuell manuelle Zustandsdiagnose motiviert die Teilung in zwei Subprobleme: die Klassifikation der Reparatur sowie die Suche nach ähnlichen historischen Reparaturen. Das Ziel ist, eine fundierte Prognose der Zustandsbewertung zu schaffen (Klassifikation), welche anhand von Referenzen begründet werden kann (Ähnlichkeitsanalyse). Anhand der historischen Reparaturdaten, die mit einer bereits bekannten Zustandsbewertung einer Klasse zuzuordnen sind, fokussiert sich der ML-Ansatz auf Algorithmen des überwachten Lernens.

3.1 Zustandsbewertung durch binäre Klassifikation

Eine Prognose durch ein ML-Modell setzt das Erlernen klas sencharakteristischer Merkmale durch einen Algorithmus voraus [4]. Problematisch an den Reparaturtabellen als Trainingsdaten ist, dass nicht bekannt ist, ob einzelne Reworks maßgeblich zur externen Gesamtbewertung beigetragen haben. Weiterhin sind die Zeilen einer Tabelle untereinander kommutativ und die Dimensi on des Zeilenraums variiert zwischen den Reparaturen.

Eine Lösung dieses Problems sind Feature-Vektoren [5, 6]. Diese kommunalisieren die Datensätze durch Auswahl relevanter Merkmale. Für den Wiedereinsatz nach der Reparatur ist die verbleibende Strukturfestigkeit ausschlaggebend [7]. Dabei ist anzunehmen, dass diese bestimmt wird durch das abgetragene Volumen einer Nacharbeit (Bearbeitungstiefe, tangentiale und axiale Ausdehnung). Als Features werden somit abschnittsweise die sechs statischen Maße aller in einem Bereich auftretenden Reparaturen generiert [8] und durch das Referenzmaß der Zone ergänzt. Mithin ergeben sich die Trainingsdaten für das Klassifikationsmodell (Bild 3, erster Kasten).

Eine robuste Lösung der Literatur für unausgeglichene Trainingsdaten (siehe Bild 2) verspricht der RUSBoost-Algorithmus. Der Datensatz wird dabei in Untermengen aufgeteilt, welche in sich eine ausgeglichene Repräsentation beider Klassen gewähren. Sequenziell werden für die Teilmengen gewichtete Entscheidungsbäume, sogenannte Weak Learners, algorithmisch bestimmt [9, 10]. Das Ergebnis neuer Reparaturdaten wird nach der Zerlegung in seine Features durch eine Abstimmung aller Untermen genmodelle erhoben (Bild 3, zweiter und dritter Kasten). Die Trainingsparameter des Modells wurden durch Optimierungsverfahren identifiziert [4, 9].

3.2 Referenzbestimmung durch Ähnlichkeitsanalyse

Zur Begründung der Zustandsbewertung sind vergleichbare historische Reparaturen zu finden. Diese dienen dem internen Prozesswissen sowie der Argumentation gegenüber externen Experten. Dabei ist die Erhebung vergleichbarer Daten auf mehreren Ebenen relevant. Während eine historisch ähnliche Nach arbeitsstelle detaillierte Einblicke in die vormalige Reparatur bie ten kann, ist eine Analogie des gesamten Reparaturbilds für die zu belegende Zustandsbewertung von Interesse.

Die Ähnlichkeit zweier lokaler Nacharbeiten lässt sich über das K-Nearest-Neighbor-Verfahren (KNN) bemessen [2]. Dabei wird der jeweils nächstgelegene Punkt in einem Raum der Bearbeitungsdimensionen als ähnlichste Abbildung einer Reparatur ausgewählt (Bild 4, erster und zweiter Kasten links).

Da im manuellen Auswertungsprozess eine relevante Ähnlichkeit verstärkt die Übereinstimmung der Bearbeitungstiefen voraussetzt, wird eine gewichtete Distanzfunktion gewählt [11].

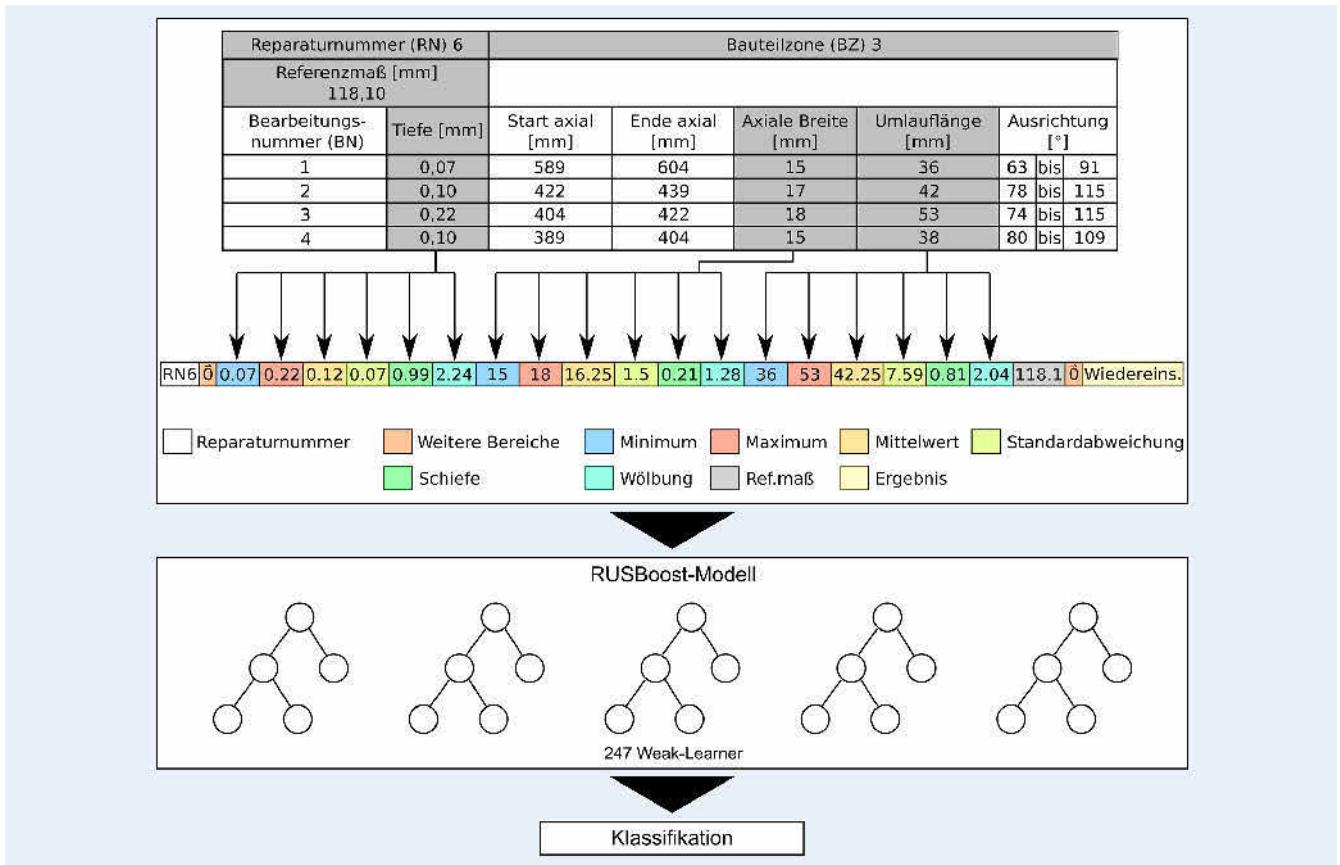


Bild 3. Schematische Darstellung des Klassifikationsmodells. Grafik: TU Hamburg

Durch Parameteroptimierungen wurde eine Bemessung von 180 % der Bearbeitungstiefe gegenüber anderen Dimensionen als sinnvoll bestimmt.

Mit den Referenzen der einzelnen lokalen Reworks wird ein hierarchischer Ähnlichkeitsbaum aufgebaut (Bild 4, zweiter Kasten rechts). Dieser abstrahiert über drei Ebenen nach dem Bottom-Up-Prinzip. Die bis hier beschriebene erste Ebene wird reduziert auf eine gemeinsame Referenz-Reparaturtabelle pro Bauteilzone. Dies geschieht durch lineare Gewichtung der Elemente erster Ebene auf Basis ihrer Bearbeitungstiefe. Die weitere Abstraktion von dieser Stufe bietet eine zu starke Generalisierung, sodass kein quantitativer Mehrwert aus einer gesamtheitlichen Referenz gezogen werden könnte. Stattdessen werden als gesamtheitliche Ähnlichkeit der Reparatur (dritte Ebene) die Ergebnisse zweiter Ebene gewählt, welche ein negatives Prüfergebnis aufweisen. Diese sind als relevantestes Abbild auf Gesamtreparsniveau zu betrachten und bieten neben der Referenz eine weitere Möglichkeit der Klassifikation.

3.3 Human-Machine-Interface (HMI)

Um die Prozessintegration zu vereinfachen, wurde ein HMI entwickelt, welches die beiden ML-Modelle in eine grafische Oberfläche integriert und dem Nutzer Eingabe- sowie diverse Interaktionsmöglichkeiten (Bild 5) bietet.

Die Ausgabe der Ergebnisse geschieht in Form der Referenzebenen mit Dokumentenverweisen sowie durch binäre Statusindikation in der oberen Anzeigebox. Die Zustandsdiagnose erfolgt durch die beiden voneinander unabhängigen, dissimilaren

Klassifikationsmöglichkeiten. Dies bietet im Falle übereinstimmender Ergebnisse ein erhöhtes Vertrauensniveau oder weist bei unterschiedlicher Klassifikation auf eine mit Vorsicht zu betrachtende Ausgabe hin. Um die Ähnlichkeiten der Referenzen zu veranschaulichen, werden diese mit den aktuellen Reparaturen korreliert auf dem Bauteil dargestellt.

4 Evaluation des KI-Ansatzes

Durch algorithmische Verfahren wurde zunächst die theoretische Performance des Klassifikationsmodells ermittelt, bevor der KI-Ansatz mit dem HMI praktisch erprobt wurde.

4.1 Algorithmische Evaluation

Das in Kapitel 3.1 vorgestellte Klassifikationsmodell wurde einer algorithmischen Evaluation unterzogen. Hierzu wurde aufgrund der limitierten Datenverfügbarkeit eine 10-fold-Cross-Validation angewendet, bei der die 290 Datensätze in 10 gleich große Teilmengen aufgeteilt und zunächst alle bis auf eine zum Training des Modells verwendet werden. Die verbleibende Teilmenge wird zum Testen zurückgehalten. Dieser Vorgang wird iterativ wiederholt bis alle Datensätze einmal zur Evaluation genutzt wurden. Das gemittelte Testergebnis der Iterationen wird zur Bewertung der Funktionsfähigkeit und Performance herangezogen [4].

Bild 6 zeigt die resultierende Konfusionsmatrix und die zugehörige ROC (Receiver Operating Characteristic)-Kurve.

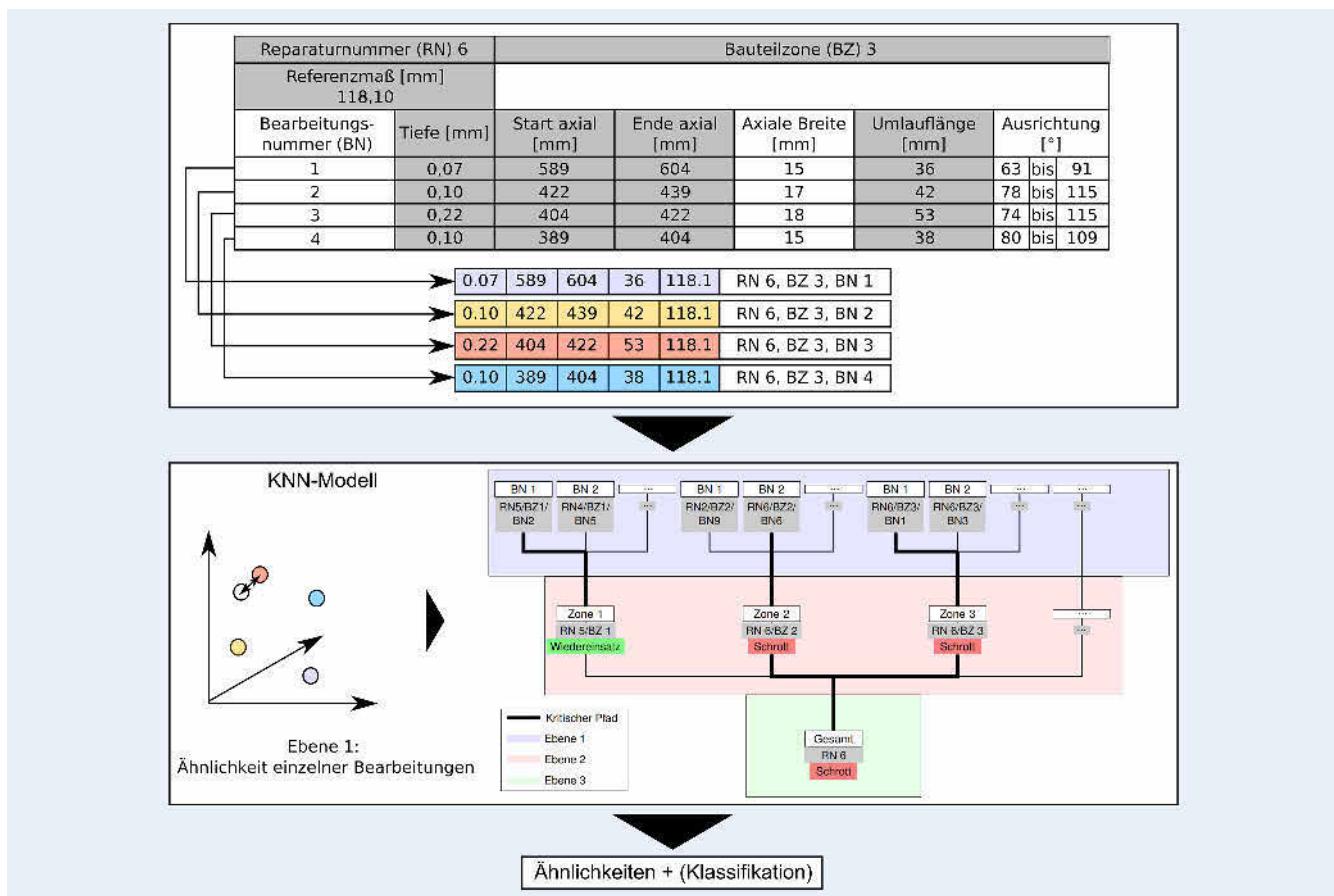


Bild 4. Schematische Darstellung des Ähnlichkeitsmodells. Grafik:TU Hamburg

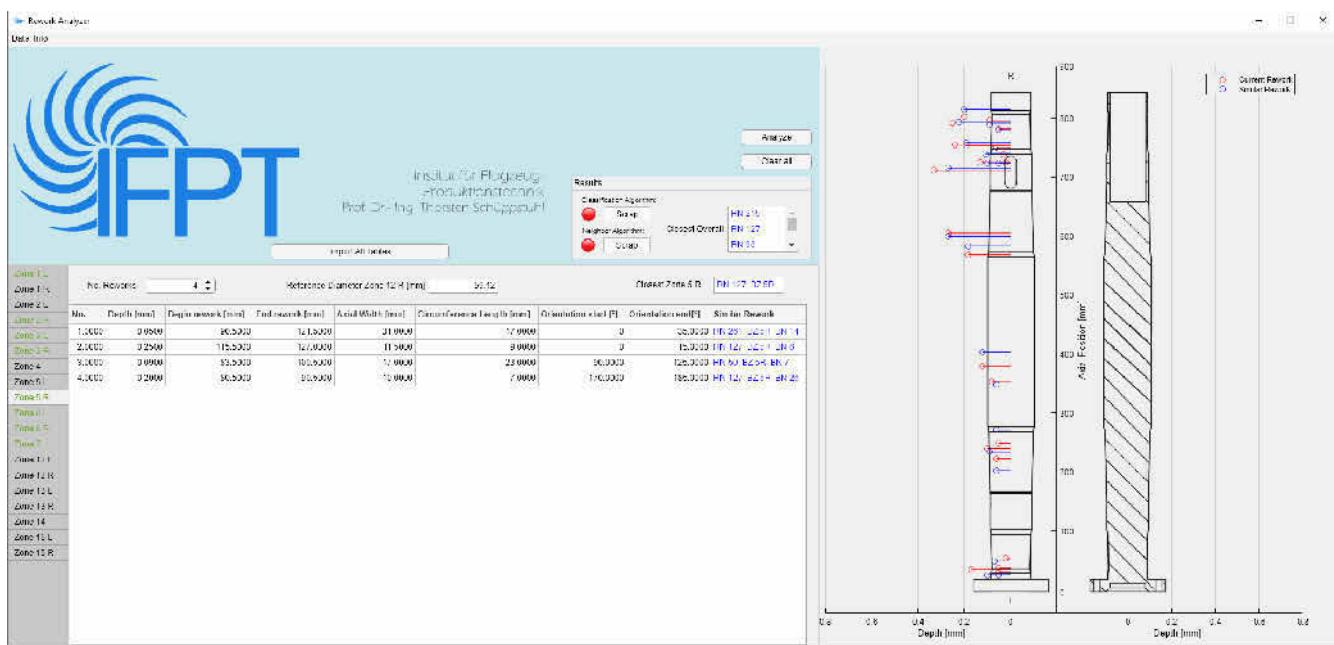


Bild 5. Grafische Benutzeroberfläche der KI. Grafik:TU Hamburg

Mit einer Richtig-Positiv-Rate von ~96 % ist ersichtlich, dass die Wiedereinsatz-Klasse sehr zuverlässig erkannt wird, während die Erkennung nicht wiedereinsatzfähiger Bauteile (Schrott-Klasse) mit einer Richtig-Negativ-Rate von ~77 % deutlich geringer

ausfällt. Dies ist auch Folge des starken Klassenungleichgewichts sowie der geringen Anzahl historischer Schrott-Datensätze.

Die ROC-Kurve (Bild 6, rechts) zeigt den Zusammenhang zwischen Richtig-Negativ- und Falsch-Negativ-Klassifikationen

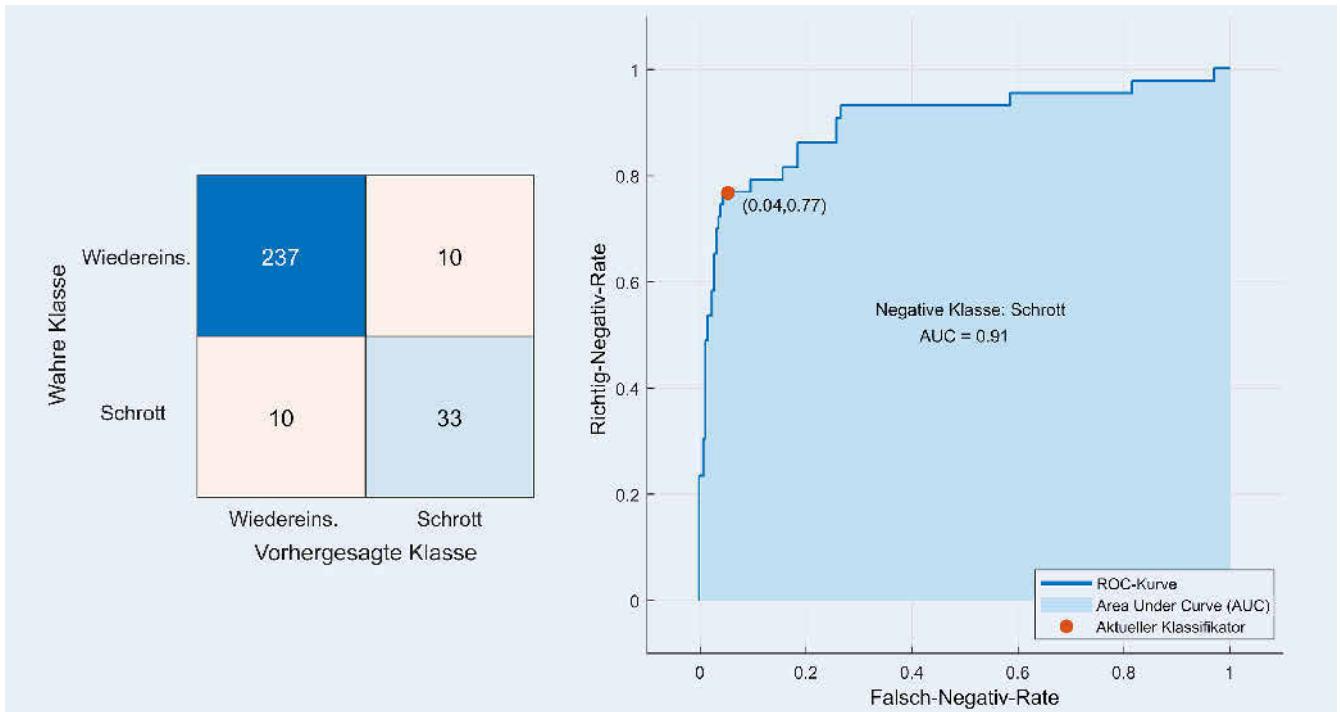


Bild 6. Konfusionsmatrix und Schrott-ROC-Kurve des Klassifikationsmodells. Grafik: TU Hamburg

für die Schrott-Klasse. Der rote Punkt markiert das Klassifikationsmodells anhand der Parameteroptimierung und verdeutlicht, dass mit einer Falsch-Negativ-Rate von ~4 % ein guter Kompromiss zwischen Erkennung der Schrott-Klasse und Fehlklassifikationen gefunden wurde. Dies bietet vor dem Hintergrund hoher Komponentenpreise und unter Betrachtung des Kurventrends den besten Ausgleich zwischen effizienzorientiertem Befund und wirtschaftlich zu vermeidender fehlerhafter Verschrottung (Falsch-Negativ-Klassifikation).

4.2 Praxistest

Der Praxistest orientiert sich am tatsächlichen Werkstattschluss und soll Probleme in der Anwendung identifizieren sowie die Arbeit mit Realdaten analysieren.

Entsprechend des aktuellen Reparaturprozesses wurde ein Nacharbeitsbild auf dem zylindrischen Strukturbau teil erstellt. Die 22 lokalen Reworks wurden mit einem Multirotationswerkzeug ausgearbeitet und vermessen (Bild 7).

Die Messwerte können am selben Arbeitsplatz in die KI überführt werden. Diese analysiert das gesamte Reparaturbild und stellt die Daten grafisch den ausgemachten Datenbankreferenzen gegenüber (siehe ebenso Bild 5).

Es wird deutlich, dass die gefundenen historischen Referenzen sehr gut mit den neuen Reparaturen übereinstimmen. Aufgrund der Gewichtung zugunsten der Bearbeitungstiefe tritt eine maximale Abweichung der axialen Position von 3,5 % der Bauteillänge auf. Die größten Abweichungen der Bearbeitungstiefe befinden sich in Zonen geringerer historischer Nacharbeitsdichte. In diesen Abschnitten muss das Ähnlichkeitsmodell stark generalisieren, da nur wenige Nachbarn im umliegenden Gebiet zur Auswahl stehen. Dieses Problem ist auf eine inhomogene Verteilung der Trainingsdaten (siehe Bild 2) zurückzuführen und könnte durch zukünftige Erweiterung der Datenbank abgeschwächt werden.



Bild 7. Vermessung der Reparaturstellen. Foto: TU Hamburg

Durch die Abstraktion auf Ebene zwei des hierarchischen Ähnlichkeitsbaums werden die 22 Referenzen auf acht (eine pro Zone) reduziert. Hiervon gehen sechs Elemente aufgrund ihres historisch abgelehnten Reparaturergebnisses in die letzte Ebene ein. Das Zustandsergebnis des Verfahrens fällt somit negativ aus und lässt sich anhand der sechs Referenzen unterster Ebene erklären. Dabei wird klar, dass die Zustandsvorhersage des Ähnlichkeitsmodells nur als zusätzliche Indikation zum Klassifikationsmodell genügt, da die Aussage eine geringere Robustheit aufweist. Das Submodell erzielt in vier der sechs Referenzen einen nachvollziehbaren Konsens mit der Experteneinschätzung. Das Ergebnis der beiden verbleibenden historischen Reparaturbilder lässt sich nicht eindeutig in Verbindung setzen. Der Grund ist die gesamtheitliche historische Expertenbewertung eines Reparaturbildes. So kann die Gesamtheit der Reworks zwar eine negative Expertendiagnose aufweisen, die darin referenzierte lokale Nach-



arbeit aber unkritisch sein. Das prinzipbedingte Defizit kann durch eine höhere Menge an Referenzen dritter Ebene minimiert werden, womit die Unsicherheit des einzelnen Ergebnisses ausgeglichen wird. Insofern kann für den betrachteten Test aufgrund der vielfachen Belege unterster Ebene von einer korrekten Zustandsbewertung ausgegangen werden.

Das Klassifikationsmodell hingegen liefert die binäre Zustandsdiagnose durch ein anderweitiges Verfahren, welches wie in Kapitel 4.1 erläutert, eine höhere Genauigkeit aufweist. Dieses kommt für das reparierte Bauteil ebenfalls zu der Vorhersage als Ausschuss.

Die Verbindung beider ML-Modelle liefert so eine korrekte Zustandsbewertung nach der Reparatur, die aufgrund dissimilarer Ergebnisfindung eine erhöhte Robustheit aufweist. Die Diagnose wird durch passende historische Reparaturen belegt, die jedoch teils infolge ungleich verteilter Trainingsdaten in ihrer Genauigkeit abweichen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur datengetriebenen Zustandsdiagnose von Reparaturen an einem zylindrischen Flugzeug-Strukturauteil vorgestellt. Der ML-Ansatz führt auf Basis historischer Reparaturdaten eine voneinander unabhängige Klassifikation sowie Ähnlichkeitsanalyse durch, sodass eine fundierte, rechnergestützte Bewertung aktueller Reparaturen und eine effizientere Steuerung von Nachfolgeprozessen ermöglicht werden. Algorithmische sowie praktische Evaluationen demonstrierten die Funktionsfähigkeit des Ansatzes.

Zukünftig wäre eine Nutzung der Konturen aus den topografischen Bilddaten denkbar, um die tatsächliche Reworkgeometrie und -fläche in die Auswertung einzubeziehen. Hiermit ließen sich (statt wie bisher als Rechteck abgebildete) auch komplexe Reworkformen analysieren. Dies verspricht eine differenziertere Bewertung auch eng benachbarter oder sich überschneidender Reworks.

In der Praxis kann die ML-gestützte Auswertung die Abhängigkeit von personengebundenem Expertenwissen, die Durchlaufzeit und den Personaleinsatz reduzieren und so zu einer kosten-effizienteren und produktiveren Flugzeug-MRO beitragen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20X1732B gefördert und in Kooperation mit der Lufthansa Technik AG umgesetzt. Die Autoren danken insbesondere *Martin Olesch* für die Unterstützung.

L i t e r a t u r

- [1] Airbus S.A.S.: Global Market Forecast 2022–2040. Internet: www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast. Zugriff am 02.08.2022
- [2] Papp, S.; Weidinger, W.; Meir-Huber, M. e. a.: Handbuch Data Science: Mit Datenanalyse und Machine Learning Wert aus Daten generieren. München: Carl Hanser Verlag 2019
- [3] Bramer, M.: Principles of Data Mining. London: Springer-Verlag 2016
- [4] Brunton, S. L.; Kutz, N. J.: Data-Driven Science and Engineering. Cambridge: Cambridge University Press 2019
- [5] Susto, G. A.; Schirru, A.; Pampuri, S. et al.: Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach. IEEE Transactions on Industrial Informatics 11 (2015) 3, pp. 812–820
- [6] Li, H.-J.; Yang, S.-H.: Using Range Profiles as Feature Vectors to Identify Aerospace Objects. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 41 (1993) 3, pp. 261–268
- [7] Urbah, A.; Banov, M.; Doroshko, S. et al.: Non-destructive inspection of aircraft landing gear during residual strength testing. Proceedings of the International Conference "Non-destructive Testing and Diagnostics" ISSN 1392–2114 ULTRAGARSAS (ULTRASOUND) 64 (2009) 1, pp. 43–45
- [8] Fahrmeier, L.; Heumann, C.; Künstler, R. e. a.: Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Heidelberg: Springer-Verlag 2016
- [9] Seiffert, C.; Khoshgoftaar, T. M.; van Hulse, J. e. a.: RUSBoost: Improving classification performance when training data is skewed. 19th International Conference on Pattern Recognition, 2008, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICPR.2008.4761297
- [10] Freund, Y.; Schapire, R. E.: A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting. Journal of Computer and System Sciences 55 (1997) 1, pp. 119–139
- [11] Michalski, R. S.; Stepp, R. E.; Diday, E.: A Recent Advance in Data Analysis: Clustering Objects into Classes Characterized by Conjunctive. In: Kanal, L. N.; Rosenfeld, A. (Hrsg.): Progress in Pattern Recognition. Amsterdam: North-Holland 1981, pp. 33–56



Finn Höristel, B.Sc.
Foto: Autor

Falko Kähler, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Technische Universität Hamburg
Institut für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT)
Denickestr. 17, 21073 Hamburg
Tel. +49 40 / 42878-3234
ifpt@tuhh.de
www.tuhh.de/ifpt

Teil 2: Vorstellung eines Datenmonetarisierungsmodells (DMM) für produzierende Unternehmen

DMM – Systematische datenbasierte Geschäftsmodelle

S. Schmidt, A. J. Martin, T. Bauernhansl

In produzierenden Unternehmen der Stückgutindustrie fallen durch die digitale Transformation immer mehr Daten an. Aufgrund zunehmend volatiler Umgebungsbedingungen sowie stetig wachsenden Kostendrucks werden Unternehmen zu alternativen, meist datenbasierten Geschäftsmodellen gedrängt. Aufbauend auf einer bestehenden Datenkategorisierung (siehe Teil 1, wt Werkstattstechnik online Ausgabe 7/8-2022, S. 501) wird in diesem Aufsatz ein Modell zur Monetarisierung von Daten produzierender Unternehmen vorgestellt und mit bekannten Geschäftsmodellmustern verknüpft.

Data monetization model for manufacturing companies

As a result of digital transformation, more and more data is being generated in manufacturing companies. In the face of increasingly volatile environmental conditions and steadily growing cost pressure, companies are forced to adopt alternative, mostly data-based business models. This paper presents a model for the monetization of production data, linking it to existing business model patterns that are based on an existing data categorization (see part 1, issue 7/8-2022, p. 501).

STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Digitalisierung, Management

1 Einleitung

Bis vor wenigen Jahren wurde ein Großteil des Umsatzes produzierender Unternehmen sowohl im B2B (business to business)- als auch im B2C (business to consumer)-Bereich durch den Verkauf von Produkten (Product Dominant Logic) generiert. Seit einigen Jahren jedoch sind alternative oder zumindest ergänzende Einnahmequellen und Geschäftsmodelle, wie Produkt-Service-Bündel, Shared Services, Shared Products oder Everything-as-a-Service [1], gefordert. Gründe sind – neben Anforderungen der Kunden zur Stückzahl 1 sowie dem Bedarf an sehr flexiblen und wandlungsfähigen Produktionssysteme [2–5] – auch immer volatilere Märkte, Nachfrageschwankungen und die sich verstärkende Rohstoffkrise.

Ziel des Beitrags ist die Entwicklung eines Datenmonetarisierungsmodells (DMM) für das produzierende Gewerbe, das je nach Datenart Monetarisierungsmöglichkeiten aufzeigt. Zudem erfolgt deren Zuordnung zu entsprechenden Geschäftsmodellmustern, um Verankerungen von Monetarisierungsmöglichkeiten in Geschäftsmodellen zu verdeutlichen.

Zum einen zeigt der Aufsatz, basierend auf bestimmten Datenkategorien, neue Monetarisierungsmöglichkeiten in Verbindung mit Geschäftsmodellmustern auf. Zum anderen gibt das Modell Anregungen, wie vorhandene Geschäftsmodelle durch den gezielten Einsatz weiterer Daten hinsichtlich ihrer Ertragsgestaltung optimiert werden können.

2 Monetarisierung der Daten von produzierenden Unternehmen – datenbasierte Geschäftsmodelle

Wenn Daten den Kern von Geschäftsmodellen bilden, wird von datenbasierten oder datengetriebenen Geschäftsmodellen gesprochen. Die Nutzung und somit Monetarisierung anfallender Daten wird von vielen Experten als essenziell für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen angesehen [6].

Unter Datenmonetarisierung wird der Prozess verstanden, auf Grundlage der Datennutzung sowie aggregierter Daten und Datendiensten einen messbaren wirtschaftlichen Nutzen zu generieren [7]. Die dabei entstehenden monetären Vorteile können als Kosteneinsparung, Maßnahme zur Umsatzerhöhung oder als direkter Verkauf von materiellen und immateriellen Produkten und Services generiert werden [8].

Hartmann et al. [9] legen dar, dass Daten zur inkrementellen Verbesserung und Optimierung aktueller Geschäftspraktiken und Dienstleistungen genutzt werden können. Durch Effizienzsteigerung und Minimierung von Verschwendungen können Unternehmen dabei sowohl Ausgaben reduzieren als auch Einnahmen generieren [10]. Man spricht in diesem Fall von interner Datenmonetarisierung, da der Wert der Daten ausschließlich intern generiert wird [11]. Zudem entspricht dieses Beispiel einer indirekten Monetarisierung, da die Daten ausschließlich über indirekt erzielte Effekte genutzt werden [11]. Die bei der internen Datenmonetarisierung entstehenden Mehrwerte können etwa die Erschließung von neuen Erkenntnissen über Produktions- oder Geschäftsprozesse, die Minimierung von Risiken, die Optimie-

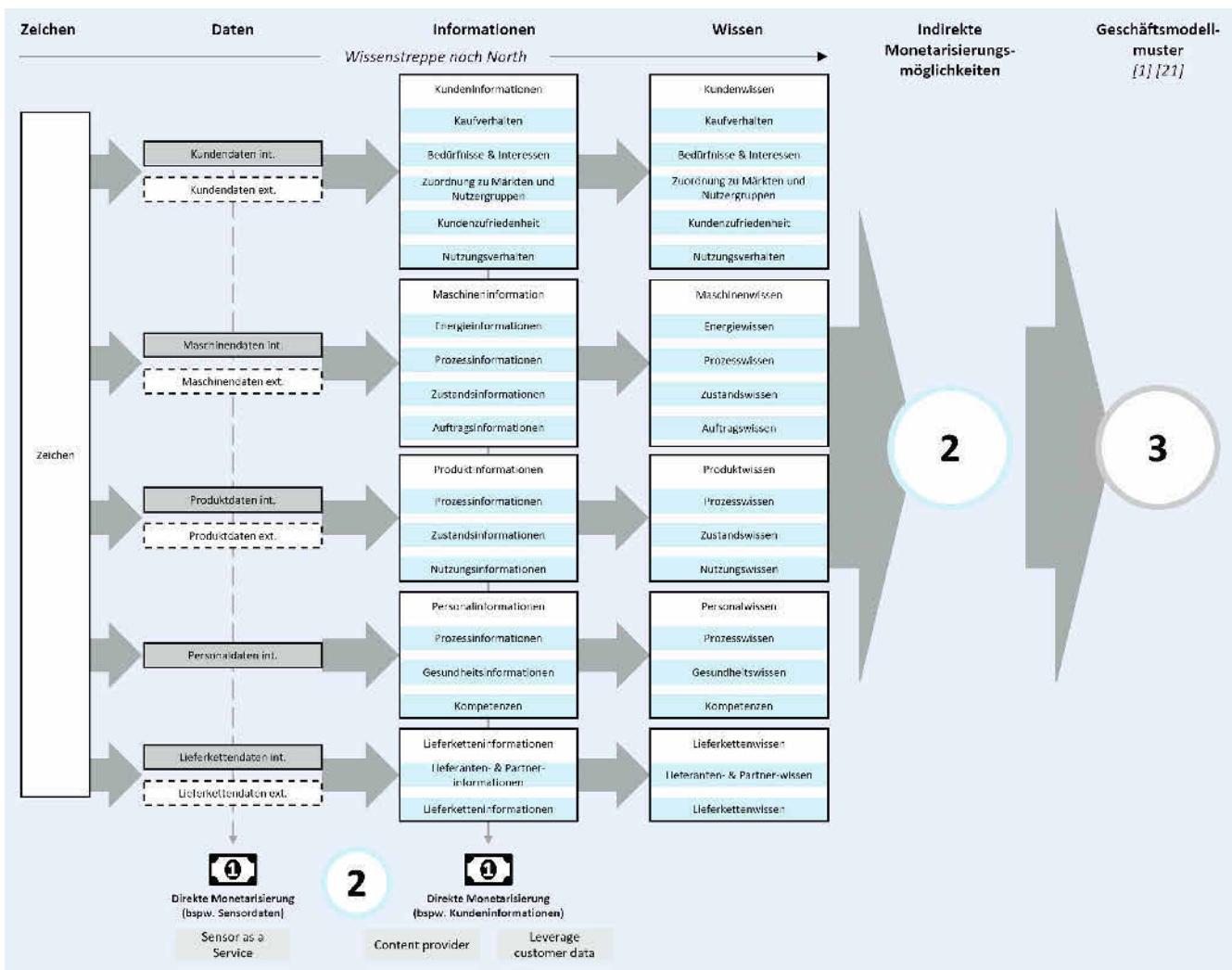


Bild 1. Datenmonetarisierungsmodell (DMM) – Überblick. Grafik: in Anlehnung an Schmidt et al. [20]

nung von Produkten, die Reduktion von Kosten oder die Steigerung von Profiten sein [7].

Daten können auch extern monetarisiert werden. Ein Beispiel für eine externe, indirekte Monetarisierung ist Know-how, das aus Daten gewonnen und zu neuen Geschäftsmodellen weiterentwickelt wird [12]. Werden beispielsweise Rohdaten oder aufbereitete Daten weiterverkauft oder Erkenntnisse wie Prognosen und Analyseergebnisse aus der Analyse der Daten als Dienstleistungen angeboten, spricht man von externer, direkter Datenmonetarisierung [11].

Bisherige Betrachtungen zu Monetarisierungen von Daten zielen entweder stark auf die Generierung, Aufbereitung und Verarbeitung der Daten ab [13] oder bilden wenig anwendungsnahe Kategorien von Daten [14, 15]. Auch existieren Beiträge zu Monetarisierungsmodellen von Daten, die generisch gehalten sind und nicht explizit die Spezifika produzierender Unternehmen berücksichtigen [16, 17] oder Beiträge, die eine rein nationale oder branchenspezifische Datenbetrachtung beschreiben [18, 19]. Da außerdem in bestehenden Ansätzen keine Relationen zwischen Geschäftsmodellen, den darin nutzbaren Daten sowie deren Monetarisierungsmodell im Kontext produzierender Unternehmen hergestellt wurden, wird in diesem Aufsatz ein neues Modell (DMM) vorgestellt.

3 Datenmonetarisierungsmodell (DMM)

Als Grundlage und erster Schritt des DMM (Bild 1) dienen die fünf Datenkategorien Kunden-, Maschinen-, Produkt-, Personal- und Lieferkettendaten sowie daraus abgeleitete und entwickelte Informations- und Wissenskategorien [20].

Da diese Kategorien sowie ihre Subkategorien alle wesentlichen Daten produzierender Unternehmen umfassen, werden in einem zweiten Schritt verschiedene Monetarisierungsmöglichkeiten mit diesen in Verbindung gebracht. Der dritte Schritt umfasst die beispielhafte Verknüpfung ausgewählter Geschäftsmodellmuster nach Remane et al. [1] und Lassnig et al. [21] mit den vorgestellten Monetarisierungsmöglichkeiten.

3.1 Direkte und indirekte Monetarisierung

Im zweiten Schritt des Modells wird nach direkter und indirekter Monetarisierung unterschieden. Als direkte Monetarisierung ist die Möglichkeit der Veräußerung von Daten oder aus Daten generierter Informationen vorgesehen. So ist beispielsweise das Veräußern von Sensordaten oder Kundeninformationen ohne weitere Verarbeitung oder Interpretation auf entsprechenden Marktplätzen denkbar (Sensor as Service). Ein weiteres Beispiel

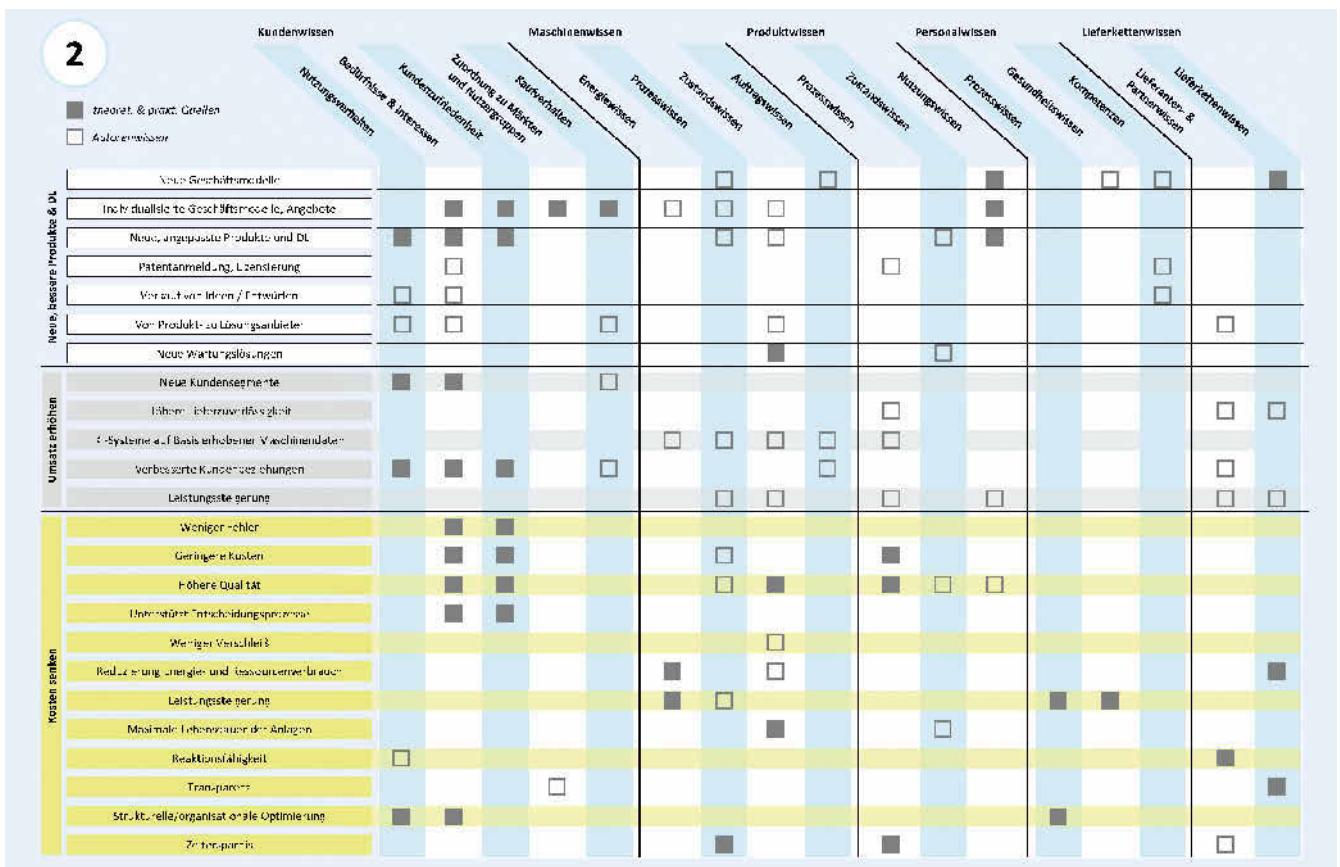


Bild 2. Datenmonetarisierungsmodell (DMM) – Wissenskategorien und Monetarisierungsmöglichkeiten. *Grafik: eigene Darstellung*

ist die Verwertung von Informationen über das Geschäftsmodellmuster „Content Provider“. Eine Monetarisierung von Daten oder Informationen über Maschinen, Produkte oder Prozesse ist somit, wenn auch in der Regel in geringerem Maße, denkbar (Bild 1).

Um das vorhandene und kategorisierte Wissen (indirekt) zu monetarisieren, wurden daraufhin verschiedene indirekte Monetarisierungsarten erarbeitet (Bild 2).

Sie sind in folgende drei übergeordnete Arten aggregiert:

1. Neue, bessere Produkte und Dienstleistungen: Monetarisierungen, die basierend auf den berücksichtigten Daten zuvor nicht vorhandene Produkte oder Dienstleistungen veräußern. Es entsteht ein neues Kundenangebot.

2. Umsatz erhöhen: Der Umsatz eines Unternehmens kann unter Beibehaltung des aktuellen Angebots erhöht werden. Es entsteht primär kein neues Kundenangebot.

3. Kosten senken: Nutzung von Daten zur Reduzierung entstehender Kosten, beispielsweise durch Vermeidung von Verschwendungen.

Die Wissenskategorien nach Schmidt et al. [20] wurden auf Grundlage einer Datenbasis (bestehend aus 70+ Beispielen der Datennutzung aus Theorie und Anwendung, siehe [20]) verschiedenen erarbeiteten Ausprägungen der drei genannten Monetarisierungsarten zugeordnet. Eine oder mehrere Subkategorien der Wissenskategorien wurden dabei bei einer oder bei mehreren Monetarisierungsmöglichkeiten in der Matrix (Bild 2) allokiert. Neben übertragenen Beispielen der Datenbasis wurde die Matrix durch die Autoren mit weiteren beispielhaften und potenziell sehr relevanten Verknüpfungen erweitert.

Die im Folgenden beschriebenen Zuordnungen sind, ebenso wie die weiteren dargestellten Verbindungen im Modell, beispielhaft zu verstehen, da sowohl in der Praxis als auch in der Theorie viele weitere Möglichkeiten vorhanden und denkbar sind. Die Beispiele sollen das Verständnis des Modells erleichtern.

Die drei Subkategorien Nutzungsverhalten, Bedürfnisse und Interessen sowie Kundenzufriedenheit können der Verbesserung der Kundenbeziehung in Form von Umsatzerhöhungen dienen. In Form (zusätzlicher) Services und Dienstleistungen sammeln Unternehmen Erkenntnisse über Kunden, Feedback sowie Produktausfallraten und schaffen daraus Wert, indem Angebote und After-Sales-Services angepasst und verbessert werden, welche wiederum die Wiederkaufabsicht der Kunden steigern sollen und damit zur Verbesserung der Kundenbeziehung, einer Form der Umsatzsteigerung, beitragen [21].

Energiewissen als Subkategorie des Maschinenwissens wird aktuell für die Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs in Kombination mit Leistungssteigerungen eingesetzt. Der Einsatz von cyber-physicalen Systemen (CPS) in der Fabrik ermöglicht beispielsweise die Echtzeitfassung von Daten an Werkzeugmaschinen mit dem Ziel, Ressourcen wie Wasser und Energie einzusparen [22–24].

Gesundheitswissen, wie (chronische) Erkrankungen, Ergonomie und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz sowie die Zufriedenheit der Mitarbeiter (Subkategorien des Personalwissens), kann in Form einer Verbesserung der Arbeitsbedingungen oder Anpassung der Arbeitsaufgabe zu Leistungssteigerung, höherer Motivation und höherer Zufriedenheit des Personals beitragen.

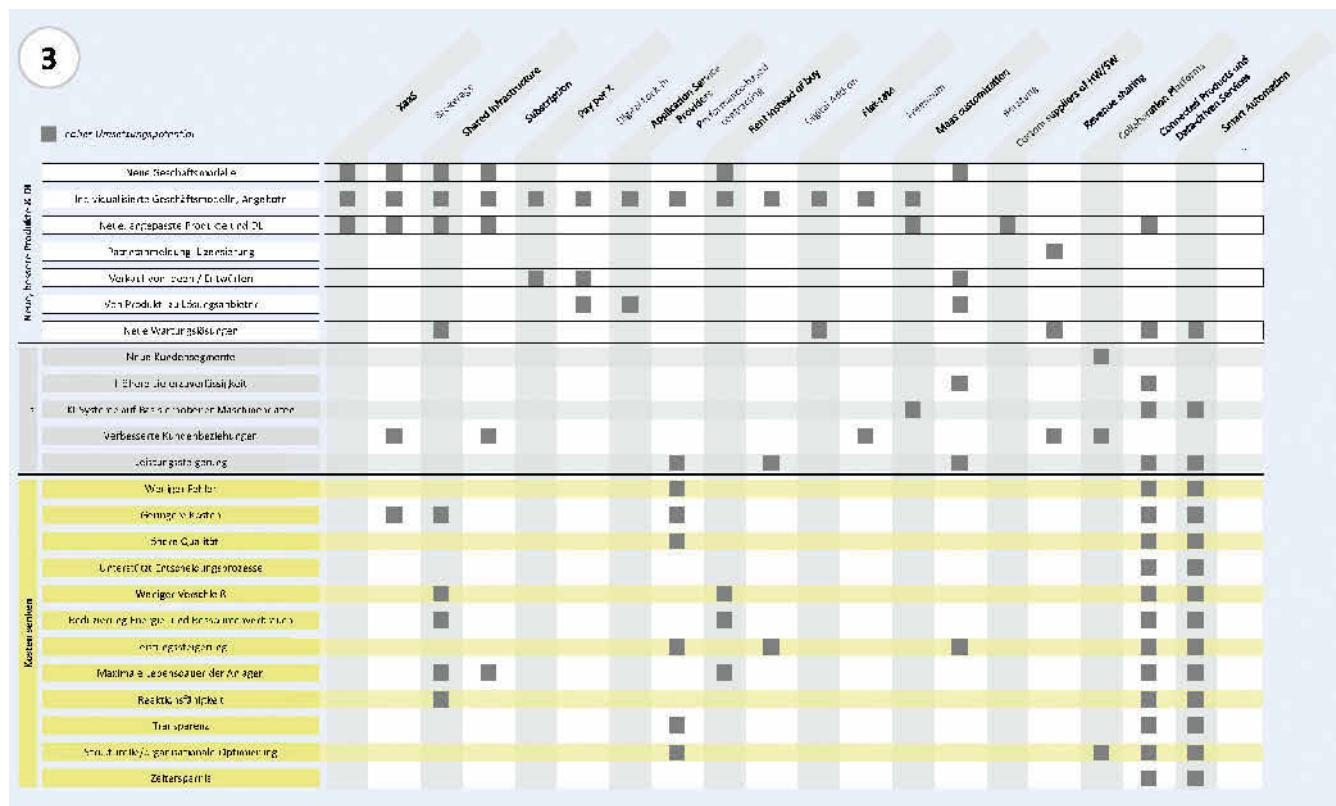


Bild 3. Datenmonetarisierungsmodell (DMM) – Monetarisierungsmöglichkeiten und Geschäftsmodellmuster. *Grafik: eigene Darstellung*

Als Subkategorie des Lieferkettenwissens kann Wissen über Partner und Lieferanten, deren Kompetenzen, Angebote und Netzwerke, den Prozess der Lieferantenauswahl und damit die Dauer der Produktionsplanung und -vorbereitung verkürzen und vereinfachen sowie die Reaktionsfähigkeit steigern.

3.2 Beispielhafte Einbindung von Monetarisierungen in Geschäftsmodelle

Um die aufgezeigten Monetarisierungsmöglichkeiten im anwendungsnahen Modell mit Charakteristika von Geschäftsmodellen zu verknüpfen, werden Auszüge aus den Geschäftsmodellmustern nach *Remane et al.* [1] und *Lassnig et al.* [21] integriert. Für Nutzerinnen und Nutzer des Modells werden somit beispielhaft verschiedene Geschäftsmodellmuster direkt mit möglichen Monetarisierungsarten verknüpft. Zwar zeigt das Modell nur einige Möglichkeiten von Verknüpfung auf, dennoch soll mit den Beispielen das Verständnis des Modells erleichtert werden. Das Modell verdeutlicht, wie basierend auf den fünf Datenkategorien Monetarisierungsmöglichkeiten ausgeschöpft und mit bekannten Geschäftsmodellmustern in Verbindung gebracht werden können (**Bild 3**).

Beispielsweise können bei der Monetarisierungsart „Neue, bessere Produkte und Dienstleistungen“ neue Geschäftsmodelle über die Muster Everything as a Service (XaaS), Brokerage, Shared Infrastructure oder Subscription realisiert werden. Entschließt sich ein Unternehmen zum Beispiel auf Basis des Nutzungswissens seiner bei den Kunden befindlichen Maschinen dazu, diese nicht mehr als klassische Produkte zu veräußern, können XaaS-, Shared-Infrastructure- oder Subscription-Modelle eine Option sein.

Eine indirekte Monetarisierung anhand des Kundenwissens ist etwa über individualisierte Geschäftsmodelle und Angebote denkbar. So besteht die Möglichkeit, dass ein produzierendes Unternehmen neue Bezahlmodelle wie Pay per X, Rent instead of Buy, Flat Rate oder Freemium in Erwägung zieht.

Bei der Monetarisierungsart „Umsatz erhöhen“ können Werte unter anderem über eine höhere Lieferzuverlässigkeit erzeugt werden. Basierend auf dem Kundenwissen (Kaufverhalten, Bedürfnisse), dem Maschinenwissen (Auftragswissen, Prozesswissen), dem Produktwissen und dem Lieferkettenwissen können produzierende Unternehmen ihre Liefergeschwindigkeit und ihre Lieferzuverlässigkeit erhöhen.

Des Weiteren sind verbesserte Kundenbeziehungen für eine Umsatzerhöhung hilfreich. Aufgrund des generierten Kundenwissens, gepaart beispielsweise mit dem Maschinenwissen, können Collaboration Platforms etabliert werden, die eine enge Verbindung zwischen produzierenden Unternehmen und beispielsweise Entwicklungspartnern oder Kunden ermöglicht.

Bei der Monetarisierungsart „Kostensenkung“ sind viele Monetarisierungsmöglichkeiten mit dem Geschäftsmodellmustern Connected Products und Data-driven Services sowie der Smart Automation denkbar. Sowohl Fehlerreduktion, höhere Qualitäten, weniger Verschleiß, Leistungssteigerungen, Transparenz als auch Zeiter sparnis sind beispielsweise durch intelligente Automatisierung möglich.

Ausgehend vom Wissen über das eigene Nutzungsverhalten von Maschinen und Anlagen kann als weiteres Beispiel die Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs genannt werden. So ist es denkbar, dass durch geteilte Infrastruktur (Geschäftsmodellmuster Rent instead of Buy oder Shared Infrastructure) hohe Potenziale geschöpft werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das auf den fünf Datenkategorien nach [20] basierende Modell zeigt Monetarisierungsmöglichkeiten innerhalb der drei Monetarisierungsarten „Neue, bessere Produkte und Dienstleistungen“, „Umsatz erhöhen“ und „Kosten senken“ und verknüpft diese mit beispielhaften Geschäftsmodellmustern nach [1] und [21]. Es bietet damit zwei große Vorteile: Zum einen zeigt es auf, wie ausgehend von Daten verschiedene Monetarisierungsmöglichkeiten denkbar sind und wie diese mit Geschäftsmodellen kombiniert werden können. Das Modell hilft dabei, Daten der vorgestellten fünf Kategorien über eine der drei Monetarisierungsarten gewinnbringend zu nutzen. Zum anderen dient das Modell durch die strukturierte Darstellung als Hilfestellung, um Geschäftsmodelle beziehungsweise einzelne Geschäftsmodellmuster noch effizienter auszustalten. Durch gezielte Wissensgenerierung, ausgehend von spezifischen Daten der aufgezeigten Kategorien, können vorhandene Geschäftsmodelle adaptiert werden.

Wie bereits erwähnt, werden im Modell nur beispielhaft Verknüpfungen der Wissensebene mit den Monetarisierungsmöglichkeiten und Zusammenhänge zwischen Monetarisierungsmöglichkeiten und Geschäftsmodellmustern aufgezeigt. Dennoch ist sehr auffällig, dass viele der im Modell aufgezeigten Möglichkeiten noch nicht erschlossen oder zumindest in Theorie und Praxis nicht verschriftlicht wurden. Trotz der großen Potenziale ist das Monetarisieren von Daten in produzierenden Unternehmen noch nicht weit verbreitet. Dies kann zum einen an fehlender Kenntnis über die Potenziale innerhalb produzierender Unternehmen sowie an mangelnder angewandter Forschung liegen. Zum anderen kann der fehlende Monetarisierung von Daten ein Mangel an ausgebildeten Fachkräften für datengetriebene Geschäftsmodelle sowie für die operative Umsetzung (Datensammlung und Datenaufbereitung, Wissensgenerierung, Vermarktung) zu grunde liegen.

Das aufgezeigte Modell kann für weitere Branchen und Anwendungsgebiete adaptiert und erweitert werden. So sind weitere oder andere Monetarisierungsarten und -möglichkeiten denkbar. Auch kann das Modell mittels weiterer Literaturrecherchen oder praktischen Umsetzungen validiert werden. Ein großer Nutzen ist zudem zu erwarten, wenn das Modell für weitere Forschung im Bereich der Nutzung und Generierung von Daten beziehungsweise datenbasierter Geschäftsmodelle im produzierenden Gewerbe herangezogen wird.

L i t e r a t u r

- [1] Remane, G.; Hanelt, A.; Tesch, J. F. et al.: The business model pattern database – A tool for systematic business model innovation. International Journal of Innovation Management 21 (2017) 1, # 1750004
- [2] Steegmüller, D.; Zürn, M.: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: Bauernhansl, T.; ten Hömpel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 103–119
- [3] May, M. C.; Schmidt, S.; Kuhnle, A. et al.: Product Generation Module: Automated Production Planning for optimized workload and increased efficiency in Matrix Production Systems. Procedia CIRP 96 (2021), pp. 45–50. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.01.050
- [4] Siegert, J.; Schlegel, T.; Bauernhansl, T.: Matrix Fusion Factory. Procedia Manufacturing 23 (2018), pp. 177–182. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.04.013
- [5] Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F. et al.: Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Dashchenko, A. I. (ed.): Manufacturing Technologies for Machines of the Future. Heidelberg: Springer-Verlag 2003, S. 627–665
- [6] Brownlow, J.; Zaki, M.; Neely, A. et al.: Data and Analytics – Data-Driven Business Models: A Blueprint for Innovation. Stand: 2015. Internet: www.researchgate.net/publication/276272305_Data-Driven_Business_Models_A_Blueprint_for_Innovation. Zugriff am 19.08.2022
- [7] Trauth, D.; Bergs, T.; Prinz, W.: Monetarisierung von technischen Daten. Innovationen aus Industrie und Forschung. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2021
- [8] Förster, M.; Bansemir, B.; Roth, A.: Innovation von datengetriebenen Geschäftsmodellen. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 58 (2021) 3, S. 595–610, doi.org/10.1365/s40702-021-00730-2
- [9] Hartmann, P. M.; Zaki, M.; Feldmann, N. et al.: Big Data for Big Business? A Taxonomy of Data-driven Business Models used by Start-up Firms. Stand: 2014. Internet: www.nsuchaud.fr/wp-content/uploads/2014/08/Big-Data-for-Big-Business-A-Taxonomy-of-Data-driven-Business-Models-used-by-Start-up-Firm.pdf. Zugriff am 19.08.2022
- [10] Hoffmann, D.: Big Data: Wie die Industrie mit Daten Geld verdienen kann. Produktion, 18.01.2021. Internet: www.produktion.de/technik/big-data-wie-die-industrie-mit-daten-geld-verdienen-kann-299.html. Zugriff am 19.08.2022
- [11] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg: Datenmonetarisierung. Wie der Mittelstand Daten gewinnbringend für sich nutzt. 8. Dezember 2020. Internet: www.wirtschaft-digital-bw.de/aktuelles/thema-des-monats/datenmonetarisierung. Zugriff am 19.08.2022
- [12] Müller, J.; Lassnig, M.; Klieber, K.: Digitale Geschäftsmodelle und Smart Services Stand: 2020. Internet: www.dtz-salzburg.at/digitale-gescha%CC%88ftsmodelle-smart-services/. Zugriff am 19.08.2022
- [13] Yousfì, S.; Chiadmi, D.; Rhanoui, M.: Smart big data framework for insight discovery. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences (2022). In Press, Corrected Proof, doi. org/10.1016/j.jksuci.2021.12.009
- [14] Bratschi, N.: Visualisierung von Daten Stand: 2016. Internet: www.digitale-nachhaltigkeit.unibe.ch/unibe/portal/fak_wiso/a_bwl/inst_wi/abt_digital/content/e90958/e490158/e490165/files500819/Vertiefungsarikel_NathalieBratschi_ger.pdf. Zugriff am 19.08.2022
- [15] Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.): Digitale Marktkommunikation für das Energiesystem der Zukunft. Stand: 2021. Internet: www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena_BR_Future_Energy_Lab_Gutachten_Digitale_Marktkommunikation_WEB.pdf. Zugriff am 19.08.2022
- [16] Hecker, D.; Koch, D. J.; Heydecke, J. et al.: Big-Data-Geschäftsmodelle – die drei Seiten der Medaille. Wirtschaftsinformatik & Management 8 (2016) 6, pp. 20–30
- [17] Wixom, B. H.; Ross, J. W.: How to Monetize Your Data. Stand: 2017. Internet: sloanreview.mit.edu/article/how-to-monetize-your-data/. Zugriff am 19.08.2022
- [18] Hagedorn, M.; Hartmann, S.; Heilert, D. et al.: Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Stand: 2019. Internet: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030–2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16. Zugriff am 19.08.2022
- [19] Schreier, J.: KI und smarte Datennutzung machen Fahrzeugproduktion effizienter. Stand: 2020. Internet: www.industry-of-things.de/ki-und-smarte-datennutzung-machen-fahrzeugproduktion-effizienter-a-909539/. Zugriff am 19.08.2022
- [20] Schmidt, S.; Martin, A. J.; Bauernhansl, T.: Datenkategorisierung für datenbasierte Geschäftsmodelle. wt werkstattstechnik online 112 (2022) 7/8, S. 501–505. Düsseldorf: VDI-Fachmedien. Internet: www.werkstattstechnik.de
- [21] Lassnig, M.; Stabauer, P.; Breitfuß, G. et al.: Geschäftsmodell-innovationen im Zeitalter von Digitalisierung und Industrie 4.0. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 55 (2018) 2, S. 284–296
- [22] Omar, Y. M.; Minoufekr, M.; Plapper, P.: Business analytics in manufacturing: Current trends, challenges and pathway to market leadership. Operations Research Perspectives 6 (2019), p. 100127. DOI: 10.1016/j.orp.2019.100127
- [23] Vijayaraghavan, A.; Dornfeld, D.: Automated energy monitoring of machine tools. CIRP Annals, 59 (2010) 1, pp. 21–24
- [24] Gutowski, T.; Murphy, C.; Allen, D. et al.: Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States. Journal of Cleaner Production, 13(2005) 1, pp. 1–17



Simon Schmidt, M.Sc.

Foto: Autor

Anna Josephine Martin, B.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA sowie
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1102
simon.schmidt@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Seilrobotergelenk für automatisiertes Hämmern

J. Walter¹, T. Nemoto¹, C. Bachmann, M. Gerlich, S. Reitelshöfer, J. Franke

Herkömmliche Roboter sind aufgrund der Konfiguration rigider Gelenke und empfindlicher Getriebe anfällig für Stoßbelastungen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass ein Roboter-Gelenk, basierend auf einer neuartigen Topologie mit drei aktiven und drei passiven Seilen, Stoßbelastungen bewältigen kann, die bei Bearbeitungsaufgaben wie dem Hämmern auftreten können.

STICHWÖRTER

Handhabungstechnik, Automatisierung, Forschung

Cable-driven robotic joint for automated hammering

Conventional robots are vulnerable to high impact loads due to the configuration of rigid joints and fragile gears. This paper shows that a robotic joint based on a novel topology with three active and three passive cables can cope with impact loads as they occur in machining tasks such as hammering.

1 Einleitung

In der Montage spielen Bearbeitungsaufgaben, die auf impulsartigen Bewegungen beruhen (beispielsweise Hämmern), eine wichtige Rolle. Sie sind aber mit herkömmlichen Robotern nur schwer zu realisieren. Diese impulsartigen Bearbeitungsaufgaben dienen dem Justieren und bilden eine Untergruppe der Montageoperationen nach [1]. Speziell die Operation des Hämmerns ist für die Montage bedeutend und wird vielfach eingesetzt, um das Fügen zweier Bauteile über das Justieren durch Umformen zu erleichtern. Damit das Hämmern gelingt, sind zwei Funktionen notwendig. Erstens muss der Hammer durch ein System (Mensch oder Maschine) beschleunigt werden, um die notwendige kinetische Energie für den Hammerschlag bereitzustellen. Zweitens muss das System den Stoßbelastungen standhalten, die entstehen, sobald der Hammer das Bearbeitungsobjekt trifft. Letzterer Punkt stellt für konventionelle Roboter eine Herausforderung dar. Ohne weitere Vorkehrungen können diese aufgrund der Konfiguration aus rigiden Gelenken und Kraftübertragungselementen sowie stoßempfindlicher Getriebe nicht die impulsartigen Kräfte aufnehmen.

Das Problem des robotischen Hämmerns wurde bereits in vorausgehenden Forschungsarbeiten behandelt. Forschende weltweit haben die Interaktion des Roboters mit dessen Umgebung im Impulsmoment analysiert und modelliert [2–6]. Auf Basis dieser Modelle entstanden neue Roboter, welche impulsartigen Kräften standhalten können und so beispielsweise das automatisierte Hämmern oder Sägen ermöglichen [7–9].

Garabini et al. [7] präsentieren einen Mechanismus, angetrieben durch Aktoren mit variabler Steifigkeit. Sie verfolgen das Ziel, die Geschwindigkeit des Roboters an einer bestimmten Position zu maximieren, um so die Krafteinwirkung des Hammers zu maximieren. *Imran et al.* [8] schlagen einen muskuloskeletalen Zweiarmanipulator für impulsartige Bearbeitungsaufgaben

vor. Sie argumentieren, dass die muskuloskelettale Struktur im Vergleich zu konventionellen Roboterstrukturen den Vorteil hat, dass bei der Durchführung dieser Bearbeitungsaufgaben weniger interne impulsive Kräfte auftreten. *Romanyuk et al.* [9] stellen eine Strategie vor, die einen Roboter dazu befähigt, Nägel ohne Hardware-Erweiterungen einzuhämmern. Dies gelingt, indem ausgewählte Gelenke des Roboters in einen passiven Modus mit Reibungskompensation umgeschaltet werden, um eine freie Drehung des Gelenks während des Aufpralls zu ermöglichen.

In diesem Beitrag zeigen wir mit einer alternativen Lösung, dass ein bioinspiriertes Roboter-Gelenk in der Lage ist, die hohen Impulse beim Hämmern zu bewältigen. Im Unterschied zu den bereits existierenden Ansätzen hämmender Roboter werden hier Seile zur Kraftübertragung eingesetzt, die das Funktionsprinzip der menschlichen Sehnen aufgreifen. Der generelle Vorteil seilgetriebener Roboter sind hohe Beschleunigungen aufgrund der geringen bewegten Masse [10, 11] und Nachgiebigkeit in mehreren Achsen [12]. Das hier verwendete Gelenk [11] hat darüber hinaus aufgrund der speziellen Gestaltung (mit Direktantrieb und passiven Seilen) das Potenzial, impulsartigen Kräften zu widerstehen. Im Folgenden wird dieses Potenzial durch das Hämmern auf ein steifes Zielobjekt demonstriert.

2 Neuartiges bioinspiriertes Roboter-Gelenk

Das Funktionsprinzip des neuartigen bioinspirierten Roboter-Gelenks [11] wird in Bild 1 erklärt. Das Gelenk umfasst eine bewegliche Plattform zur Ausrichtung eines Werkzeugs (beispielsweise eines Hammers), Seile zur Kraftübertragung und lineare Aktuatoren zur Krafterzeugung. Die Plattform ist drehbar

¹ Jonas Walter and Takeru Nemoto contributed equally to this work.

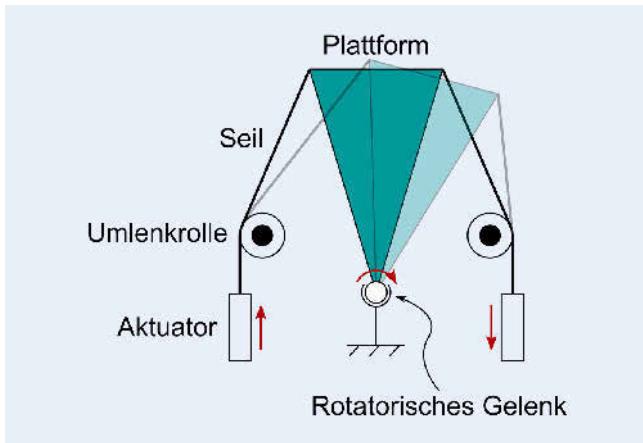


Bild 1. Vereinfachte schematische Darstellung des Robotergelenks.
Grafik: Siemens AG, FAPS

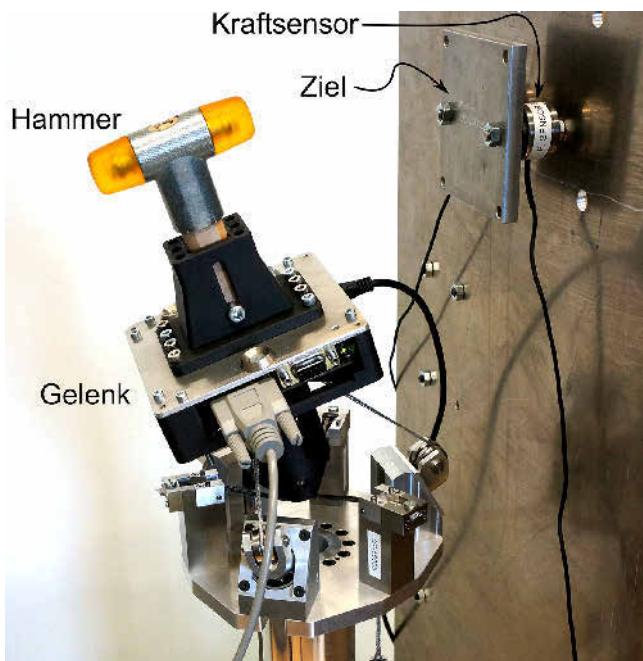


Bild 2. Experimenteller Aufbau des hämmernden Robotergelenks.
Foto: Siemens AG, FAPS

gelagert, so dass sie lediglich um einen Punkt rotieren. An der Plattform sind zwei Seile angebracht, an denen jeweils ein Linearaktuator eine Zugkraft erzeugen kann. Um die Rotation des Gelenks zu regeln, müssen beide Seile ständig unter Spannung stehen. Durch Veränderung der Spannung in den Seilen über die Linearaktuatoren kann die Orientierung des Gelenks gesteuert werden. Um die Reibung in der Seilführung zu reduzieren, sind Umlenkrollen installiert.

In [11] wird ein Demonstrator entwickelt, in dem das Konzept auf zwei rotatorische Freiheitsgrade erweitert wird. Der Demonstrator hat drei aktivierte (oder aktive) Seile, welche die Kraft der Linearaktuatoren übertragen. Anstelle einer herkömmlichen Lagerung werden drei passive Seile (vergleichbar mit den menschlichen Bändern) verwendet, um die translatorische Bewegung der Plattform einzuschränken. Die Orientierung der Plattform wird über eine inertiale Messeinheit (IMU) bestimmt. Abhängig von den Messdaten und der Zielorientierung berechnet

ein Regler die Zielkräfte für die Linearaktuatoren. Dieser Regler bietet weiterhin die Möglichkeit, die Steifigkeit des Gelenks zu variieren, ohne die Ausrichtung des Gelenks zu verändern [10]. Eine genauere Erläuterung des Funktionsprinzips und der Regelung des Gelenks ist in [11] zu finden.

Das Gelenk kann stoßartigen Belastungen standhalten, wie sie beim Hämmern auftreten. Die einwirkenden Stoßbelastungen können durch das elastische Verhalten der Seile absorbiert werden. Diese Einbeziehung von Seilen eröffnet neue Anwendungen für automatisierte impulsartige Montageoperationen.

3 Experiment zum automatisierten robotischen Hämmern

Der Versuchsaufbau (**Bild 2**) umfasst das Gelenk und ein Zielobjekt. Auf einer beweglichen Plattform des Gelenks wird ein Hammer aus Cellidor der Firma Wera montiert, um das Verhalten des Gelenks beim Hämmern zu testen. Die bewegliche Plattform ist als zylindrisches Objekt mit einer Höhe von 75 mm und einem Radius von 20 mm aus Onyx gedruckt. Die Masse der Plattform beträgt 320 g und die Diagonaleinträge der Trägheitsmatrix sind 590 kg mm^2 , 590 kg mm^2 und 75 kg mm^2 . Das Gesamtgewicht von Plattform und Hammer beträgt etwa 480 g. Der Abstand zwischen dem Rotationszentrum des Gelenks und der Hammerspitze beträgt 210 mm.

In der Reichweite des Gelenks wird das Zielobjekt platziert, das aus einer 6 mm dicken Metallplatte besteht, die über zwei identische Kraftsensoren (KM KZ26 1 kN) der Firma ME-Meßsysteme an einer starren Metallwand befestigt ist. Die beiden Kraftsensoren erfassen die Hamerkraft im Messbereich bis insgesamt 2 kN mit einer Abtastrate von 3 ms. Die Stoßkraft des Hammers wird aus der Wertesumme der beiden Kraftsensoren berechnet. Das Zielobjekt und der Hammer berühren sich, wenn das Gelenk um circa 12° rotiert ist.

Durch eine Rotation der Plattform in einem Freiheitsgrad wird der Hammer beschleunigt und auf ein Zielobjekt gelenkt (**Bild 3**). Der Hammer wird um eine Achse rotiert, indem zwei der drei Linearaktuatoren (ML7123) der Firma Pollmeier daselbe Verhalten vorgegeben wird. Dadurch verhält sich das Gelenk genauso wie das Ein-Freiheitsgrad-Gelenk, das in Bild 1 dargestellt ist. Die Drehung der Plattform wird auf der Grundlage von Messdaten einer IMU (KM KZ26 1 kN) der ME-Meßsysteme geregelt, indem die Spannung in drei Seilen über die drei Linearaktuatoren eingestellt wird. Die Aktuatoren werden durch die elektromagnetische Kraft gesteuert und können eine kontinuierliche Kraft von bis zu 60 N erzeugen.

Für ein automatisiertes Hämmern wird eine bestimmte Bewegungsabfolge vorgegeben. Zunächst wird ein Rotationswinkel der Plattform von -20° angefordert. Dann wird der Zielwinkel auf 20° geändert, um den Hammer in Richtung des Zielobjekts zu schwingen. Das Ziel von 20° wird 100 ms lang beibehalten. Die Plattform erreicht allerdings nicht 20° , sondern kollidiert ab etwa 12° mit dem Zielobjekt.

Beim Hämmern werden wiederholbar hohe Stoßkräfte erzielt und gemessen. Während der Rotationsbewegung wird kinetische Energie gespeichert, bis der Hammer das Zielobjekt erreicht. Beim Aufprall wird die Energie auf das Zielobjekt übertragen, wodurch sich impulsartig eine Stoßkraft aufbaut. Die am Zielobjekt gemessene Kraft erreicht bis zu 800 N und stets mehr als 500 N (**Bild 4**).

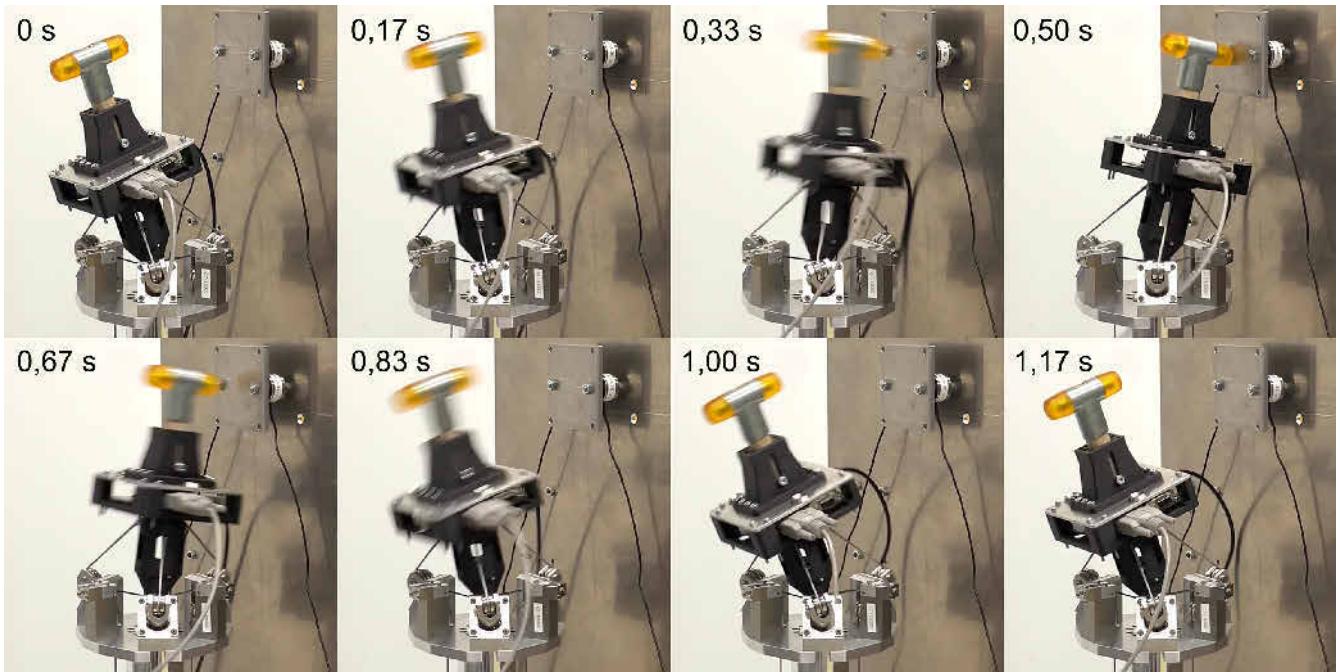


Bild 3. Bewegungsabfolge des automatisierten Hämmerns. Foto: Siemens AG, FAPS

Aufgrund des hohen Signalrauschens von durchschnittlich etwa 40 N werden die Kraftdaten sowohl unverarbeitet als auch gefiltert dargestellt. Die elastischen Seile absorbieren einen Teil der freigesetzten Energie, weshalb das System nicht kollabiert und den Schlagvorgang mehrmals hintereinander ausführen kann, ohne Schaden zu nehmen. Im Rahmen des Experiments wurden mehr als 100 Hammerschläge erfolgreich ausgeführt.

4 Schlussfolgerung

In diesem Paper wurde gezeigt, dass ein Robotergelenk, das auf einer neuen Topologie basiert, Stoßbelastungen standhalten kann, wie sie beim Hämmern als typischer impulsartiger Bearbeitungsvorgang in der Montage auftreten. In einer zukünftigen Arbeit könnte untersucht werden, ob das vorgeschlagene Handgelenk einen herkömmlichen Knickarmroboter dazu befähigt, ebenfalls hämmern zu können.

L iteratur

- [1] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2012
- [2] Zheng, Y.-F.; Hemami, H.: Mathematical modeling of a robot collision with its environment. Journal of Robotic Systems 2 (1985) 3, pp. 289–307
- [3] Walker, I. D.: Impact configurations and measures for kinematically redundant and multiple armed robot systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation 10 (1994) 5, pp. 670–683
- [4] Ferretti, G.; Magnani, G.; Zavala Rio, A.: Impact modeling and control for industrial manipulators. IEEE Control Systems 18 (1998) 4, pp. 65–71
- [5] Tornambe, A.: Modeling and control of impact in mechanical systems: theory and experimental results. IEEE Transactions on Automatic Control 44 (1999) 2, pp. 294–309
- [6] Lee, S. H.; Kim, S. H.; Kwak, Y. K.: Modeling and analysis of internal impact for general classes of robotic mechanisms. Proceedings of

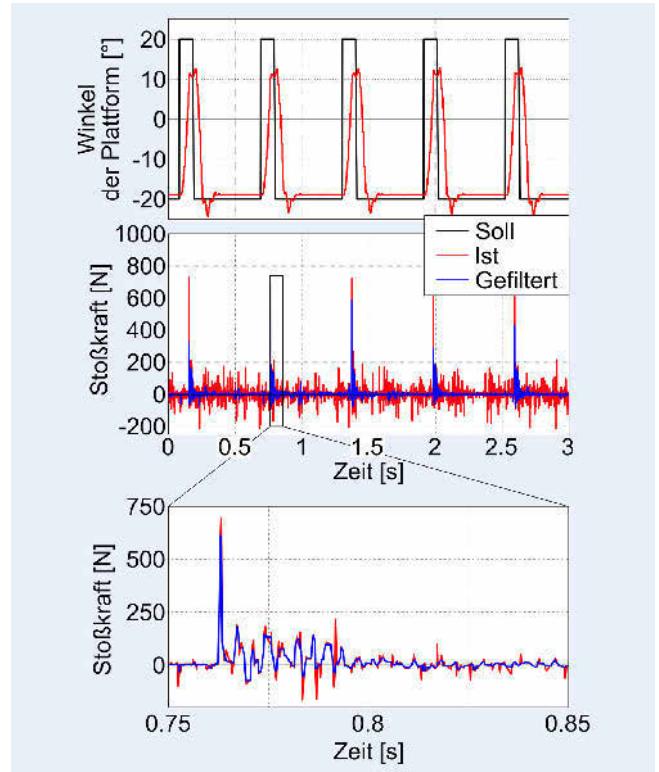


Bild 4. Darstellung der gemessenen Stoßkräfte. Grafik: Siemens AG, FAPS

- 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), Takamatsu, Japan, 2000, pp. 1955–1962
- [7] Garabini, M.; Passaglia, A.; Belo, F. et al.: Optimality principles in variable stiffness control: The VSA hammer. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011), San Francisco, CA, 2011, pp. 3770–3775
- [8] Imran, A.; Yi, B.-J.: A Closed-Form Analytical Modeling of Internal Impulses With Application to Dynamic Machining Task: Biologically



Inspired Dual-Arm Robotic Approach. IEEE Robotics and Automation Letters 3 (2018) 1, pp. 442–449

- [9] Romanyuk, V.; Soleimanpour, S.; Liu, G.: A Multiple Working Mode Approach to Hammering with a Modular Reconfigurable Robot. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, 2019, pp. 774–779
- [10] Kraus, W.: Force control of cable-driven parallel robots. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 49. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2016
- [11] Nemoto, T.; Walter, J.; Bachmann, C. et al.: Highly Dynamic 2-DOF Cable-Driven Robotic Wrist Based on a Novel Topology. IEEE Robotics and Automation Letters 7 (2022) 2, pp. 5727–5734
- [12] Friesen, J. M.; Dean, J. L.; Bewley, T. et al.: A Tensegrity-Inspired Compliant 3-DOF Compliant Joint. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, 2018, pp. 3301–3306



J o n a s W a l t e r , M . S c .
Foto: Autor

Dipl.-Ing. **S e b a s t i a n R e i t e l s h ö f e r**
Prof. Dr.-Ing. **J ö r g F r a n k e**
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Egerlandstr. 7–9, 91058 Erlangen
Tel. +49 9131 / 85-28740
jonas.walter@faps.fau.de
www.faps.fau.de



T a k e r u N e m o t o , M . E n g .
Foto: Autor

Dipl.-Ing. **C h r i s t i a n B a c h m a n n**
Dr.-Ing. **M a t t h i a s G e r l i c h**
Siemens AG
Mechatronische Systeme und Systemintegration
Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München

Modularer Baukasten für die Erstellung anwendungsspezifischer Greiffinger

Greiferfinger für eine schnelle Rekonfiguration

M. Friedmann, S. Schabel, J. Gerber, A. Döhring, L. Meschter, J. Fleischer, M. May

Handhabungsprozesse sind Teil nahezu jedes automatisierten Prozesses. Während das Handhabungsgerät verhältnismäßig einfach an neue Handhabungsaufgaben angepasst werden kann, erfolgt die Gestaltung der Greiferfinger als Schnittstelle zwischen Handhabungssystem und Objekt meist händisch und basierend auf Erfahrungswissen. Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Greiferfingerbaukastens, der für eine automatisierte Konfiguration anwendungsspezifischer Greiferfinger genutzt werden kann.

STICHWÖRTER

Handhabungstechnik, Entwicklung, Automatisierung

Gripper fingers for fast reconfiguration - Modular construction kit for creating application-specific gripper fingers

Handling processes are part of almost every automated process. While the handling device is relatively easy to adapt to new handling tasks, the design of the gripper fingers as the interface between handling system and object is usually done manually, based on empirical knowledge. This paper describes the development of a gripper finger construction kit to automate the configuration of application-specific gripper fingers.

1 Einleitung und Stand der Technik

Kurze Produktlebenszyklen, volatile Märkte und eine zunehmende Individualisierung der Nachfrage zwingen produzierende Unternehmen zu flexibleren Produktionsmethoden, die eine wirtschaftliche Herstellung von unterschiedlichen Werkstücken, in beliebiger Reihenfolge und wechselnden Losgrößen ermöglichen [1, 2]. Mit der Automatisierung und Digitalisierung industrieller Prozesse wird versucht, diesen Herausforderungen zu begegnen [3]. Handhabungsprozesse sind Teil nahezu jeden automatisierten Prozesses. Dem Greifer als Schnittstelle zwischen Handhabungsgerät und Handhabungsobjekt, kommt dabei eine Schlüsselrolle zu: Als einzige Komponente des gesamten Handhabungssystems mit direktem Kontakt zum Werkstück entscheiden der Greifer und dessen Wirkelemente maßgeblich über die Handhabungsleistung und ermöglichen die Erfassung wichtiger Prozess- und Werkstückinformationen [4].

Die Gestaltung dieser Greiferfinger erfolgt bisher weitestgehend manuell und basierend auf Erfahrung [5, 6]. Bei mechanischen Zweifinger-Parallelbackengreifern, die etwa 45 % der eingesetzten Greifer ausmachen, benötigt ein erfahrener Entwickler mehrere Stunden [5]. Bestehende Ansätze, wie Fingerrohlinge [7] oder individuelle Greiferfinger [5, 8] müssen jedoch schon für kleinste Änderungen an der Handhabungsaufgabe vollständig neu gefertigt werden. Sie weisen dadurch eine erhöhte Bereitstellungszeit auf, während rekonfigurierbare Greiferfinger [9–11] nur eine begrenzte Anpassung ermöglichen. Aufgrund der oft nur begrenzten Formen von Objekten und den begrenzten Arten von Handhabungsaufgaben in industriellen Prozessen sind Greifer in Form menschenähnlicher Hände oder mit hochflexiblen Greifer-

fingern meist nicht wirtschaftlich [12, 13]. Zudem wird die Integration von Sensorik bisher bei keiner automatisierten Gestaltung berücksichtigt und ist somit immer eine Individuallösung, die wirtschaftlich häufig unrentabel ist.

Modulare Greiferfinger bestehen aus Elementen, die über eine einheitliche Schnittstelle miteinander verbunden werden. Bei bestehenden Ansätzen (zum Beispiel [14]) erhält der Anwender ein Set an Modulen, aus denen er die Finger zusammensetzen kann. Die Einhaltung von Randbedingungen, wie Gewicht oder Fingerlänge, obliegt dem Anwender. Modulare Greiferfinger ermöglichen eine schnelle Rekonfiguration und damit eine kurzfristige Bereitstellung neuer Greiferfinger. So können individuelle Finger aus Standardkomponenten erstellt werden, die durch eine standardisierte Schnittstelle den Einbau und Austausch von Sensorik erleichtern. In [6] wird ein ganzheitlichen Ansatz zur automatisierten Auswahl und Dimensionierung von Greiferfingern aus Modulen vorgestellt. Wesentliche Voraussetzungen zur Realisierung dieses Ansatzes sind die Entwicklung der Module, die Realisierung einer Greifpunktbestimmung sowie die Entwicklung der Konfigurationslogik. Dieser Beitrag beschreibt hierfür die Entwicklung eines modularen Greiferfingerbaukastens für Zweifinger-Parallelgreifer, der die Grundlage für die automatisierte Konfiguration modularer Greiferfinger bildet.

2 Konzeption des Baukastens

Die Entwicklung eines modularen Baukastens für eine automatisierte Konfiguration von Greiferfingern folgt einer Modularisierung nach technisch-funktionalen Gesichtspunkten. Ausgehend von einer Literaturrecherche werden erste Anforderungen an

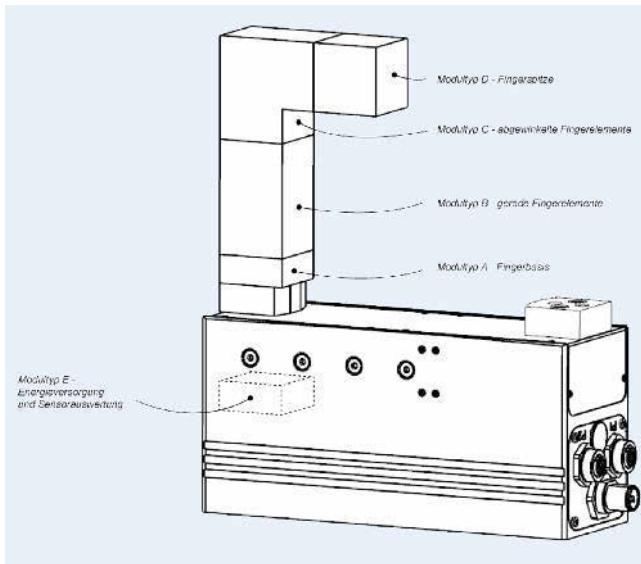


Bild 1. Modularisierungskonzept eines Greiferfingers. Grafik: wbk

Greiferfinger ermittelt und um weitere Anforderungen und Randbedingungen ergänzt. Die Anforderungen werden durch die Merkmale und Funktionen der Greiferfinger bestimmt, die im nächsten Schritt beschrieben werden. Wie gut die Anforderungen durch die Merkmale erfüllt werden, kann über eine Korrelationsmatrix in Anlehnung an das Quality Function Deployment (QFD) ermittelt werden. Nachdem die Merkmale des Greiferfingers definiert sind, werden diese zu Modulen zusammengefasst.

Ziel ist es technische Wechselwirkungen zu reduzieren und eine physische Unabhängigkeit der Module zu erreichen. Dafür werden in einer symmetrischen Matrix die Merkmale spalten- und zeilenweise eingetragen und dann hinsichtlich ihrer Koppungen untersucht und bewertet. Die so entstehende Design Structure Matrix (DSM) [15] kann dann rechnergestützt ausgewertet werden. Der dafür eingesetzte Idicula-Gutierrez-Thebeau-Algorithmus (IGTA) untersucht, quantifiziert und minimiert die durch Interaktion der DSM-Elemente verursachten Kosten, sodass diese zwischen den Elementen eines Clusters geringer sind als die Kosten zwischen verschiedenen Clustern [16]. Dies wird durch die Zuordnung der Merkmale zu verschiedenen Clustern erreicht. Die resultierenden Cluster untereinander abhängiger Merkmale stellen Ähnlichkeitscluster dar und liefern eine erste Unterteilung des Greiferfingers in Modultypen (Bild 1).

Dieses Modularisierungskonzept besteht aus den fünf Modultypen Fingerbasis (A), gerade Fingerstücke (B), abgewinkelte Fingerstücke (C), Fingerspitze mit Sensorik (D) sowie Energieversorgung und Auswertung (E). Das Ziel, das mit jedem Baukasten verfolgt wird, ist die Erreichung einer maximalen externen Vielfalt durch eine minimale interne Vielfalt [17]. Um die Anzahl der Modulvarianten für den Baukasten festzulegen, wird die Methode der variantengerechten Produktgestaltung [18] genutzt. Ziel der Methode ist das Baukastenkonzept so zu optimieren, dass die Baukastenelemente in Standard- und Variantenkomponenten unterteilt werden können, Standardanteile aus Variantenkomponenten eliminiert werden, Variantenkomponenten direkt Unterscheidungsmerkmalen zugeordnet werden können und Variantenkomponenten entkoppelt werden. Für die Darstellung der aktuellen Vielfalt wird der Baukasten „Fingerkit“ von Weiss Robotics als Standardbaukasten ohne zusätzliche Module heran-

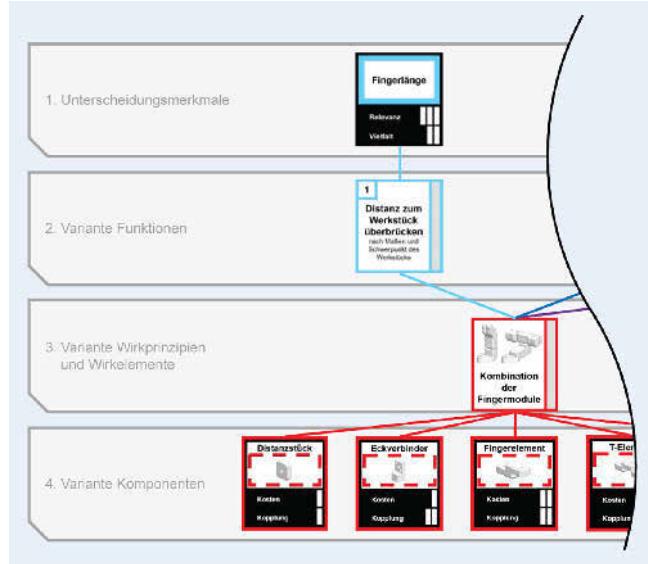


Bild 2. Ausschnitt des Variety Allocation Model. Grafik: wbk

gezogen, da nicht auf einem bestehenden Baukasten aufgebaut werden kann. Die Vielfalt wird auf den vier Abstraktionsstufen der Produktentwicklung (Anforderungen, Funktionen, Wirkprinzipien und Komponenten) dargestellt und die Elemente jeder Ebene entsprechend der Zusammenhänge miteinander verbunden. Bild 2 zeigt einen Ausschnitt dieses sogenannten Variety Allocation Model (VAM).

Bei der Suche nach alternativen, variantengerechten Lösungsansätzen wird versucht sich dem Idealbild anzunähern, bei dem jedes Unterscheidungsmerkmal von genau einer Komponente oder ohne physische Vielfalt abgebildet werden kann. Um die Merkmale des neuen Baukastens zu berücksichtigen, werden weitere Elemente auf den vier Ebenen ergänzt, wie etwa die zuvor ermittelten Modultypen auf der Ebene der Komponenten.

Anschließend können Lösungen, ausgehend von der untersten beziehungsweise konkretesten Ebene zur obersten Ebene im VAM, gesucht werden. Bild 3 zeigt ein Beispiel der Lösungskonzepte für die abgewinkelten Fingermodule (Modultyp C).

Modultyp C wird benötigt, um Auskragungen in oder quer zur Greifrichtung zu realisieren und so beispielsweise die Öffnungsweite zu verändern (Bild 4).

Die geraden und abgewinkelten Module (Typ B und C) auf der Komponentenebene des VAM beeinflussen die Unterscheidungsmerkmale Fingerlänge, Auskragung und die maximale Öffnungsweite. Für die Variantenvielfalt des Modultyps C ergeben sich verschiedene Konzepte: Das erste beinhaltet vier Varianten, wobei jede Variante eine Auskragungsrichtung abbildet. Konzept zwei umfasst zwei Varianten bei denen eine Variante zwei Auskragungsrichtungen abbilden kann. Das dritte Konzept umfasst nur noch eine Variante, bei der alle Auskragungsrichtungen berücksichtigt werden.

Für die Umsetzung des zweiten und dritten Lösungskonzepts ist die Verbindung aller Schnittstellen miteinander erforderlich. Je nach Schnittstellenkonzept variiert die Herstellbarkeit erheblich. Die Einbringung der elektrischen Kabelführung in das Modul ist der kritische Aspekt: Es ist denkbar die Schnittstellen als Punkt- oder Stiftkontakte mittig einzubringen. Durch eine symmetrische Anordnung aller Schnittstellen wird ermöglicht auch das erste Lösungskonzept mit nur einer Variante einzuführen, wodurch die

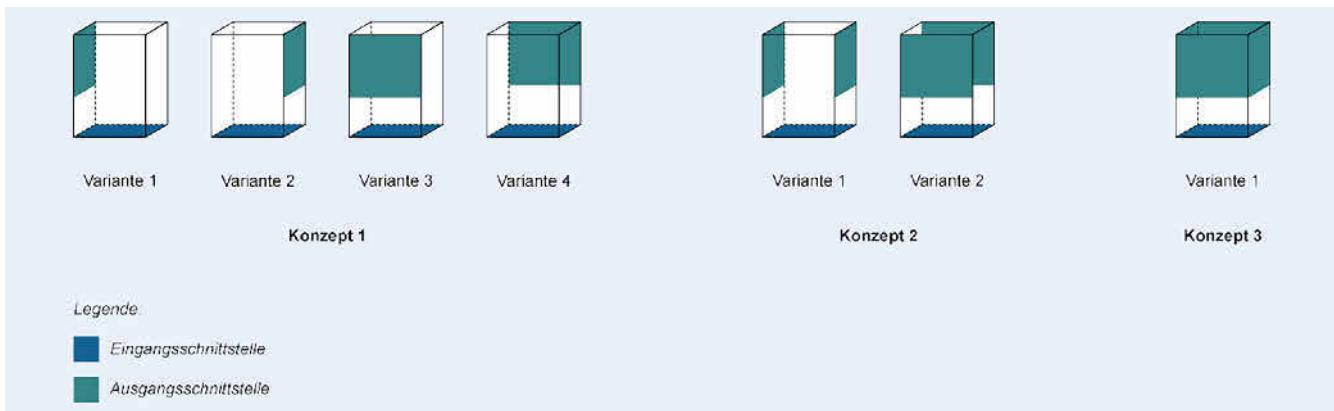


Bild 3. Lösungskonzepte für Modultyp C. Grafik: wbk

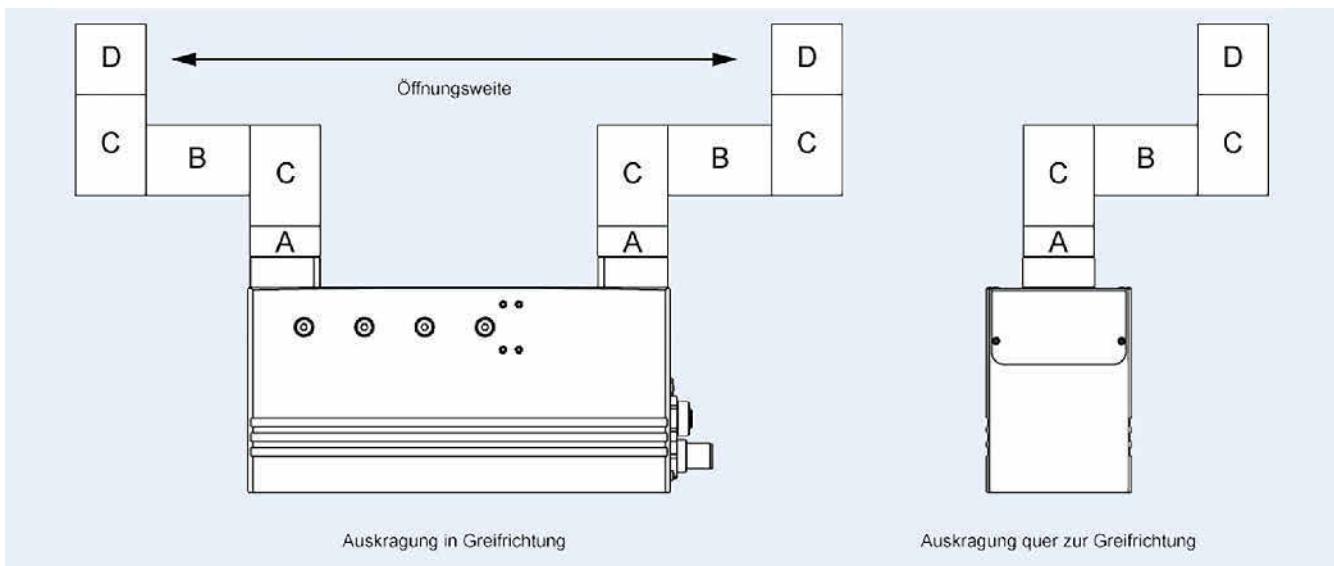


Bild 4. Auskragungsbeispiele. Grafik: wbk

Schnittstellen nicht mehr richtungsgebunden sind. Eine außen liegende, flexible Steckerverbindung mit kurzer Kabelführung führt zum selben Ergebnis, wäre aber anfällig für Schäden durch äußere Einwirkungen und wird daher nicht weiterverfolgt. Für eine Entscheidungsfindung kann eine Kostenanalyse, zum Beispiel über eine Bottom-Up-Kostenkalkulation von Herstellkosten, verwendet werden. Da in diesem Beispiel die Konzepte zwei und drei eine Reduzierung der Variantenvielfalt ermöglichen, aber fertigungstechnisch sehr aufwendig sind, wird nur das erste Konzept weiterverfolgt. Das Ergebnis der Lösungssuche ist ein Entwurf des Baukastens (**Bild 5**).

3 Gestaltung der Greiferfingermodule

Greiferfinger werden hauptsächlich auf Zug/Druck und Biegung belastet. Um möglichst geringe Außenabmessungen zu erreichen, wird ein quadratisches Vollprofil als Querschnittsfläche gewählt. Neben der Querschnittsfläche werden die Module maßgeblich durch die Gestalt der elektrischen und mechanischen Schnittstelle bestimmt. **Bild 6** zeigt eine Übersicht der Modultypen mit den verschiedenen Schnittstellen.

Die Schnittstelle zwischen den Modulen des Baukastens hat die Hauptfunktion, eine lösbare Verbindung zwischen zwei

Modulen zu realisieren. Dazu gilt es die Module so mechanisch zu verknüpfen und zu positionieren, dass diese einfach gekoppelt werden können. Die daraus resultierende Haftkraft muss in der Lage sein, die auftretenden Gewichts- und Prozesskräfte beim Handhaben aufzunehmen. Zudem muss die Schnittstelle elektrische Energie und Signale zur Versorgung von Sensoren in den Fingern übertragen können.

Die Übersetzung der mechanischen Schnittstelle am Greifer auf die des Baukastens soll gemäß dem Baukastenkonzept über greiferspezifische Basisplatten (Modultyp A) erfolgen. Daher wird zunächst nur die Schnittstelle zwischen den Fingermodulen betrachtet. Bei der Gestaltung dieser Schnittstelle zwischen den Elementen des Baukastens können Kombinationen unterschiedlicher Kraftübertragungs- sowie Verriegelungsformen genutzt werden. Dabei treten häufig Mischformen von kraft- und formschlüssigen Verbindungen auf. Zusätzlich kann eine Unterscheidung erfolgen in Systeme, die einen Werkzeugeinsatz erfordern und solche, die ohne zusätzliche Werkzeuge ver- beziehungsweise entriegelt werden. Gemäß dieser Unterscheidungskriterien werden acht mechanische Schnittstellenkonzepte erarbeitet (**Bild 7**).

Um die verschiedenen mechanischen Schnittstellenkonzepte miteinander vergleichen zu können, erfolgt eine Bewertung gemäß der Schnittstellenanforderungen (etwa (De-)Montageauf-

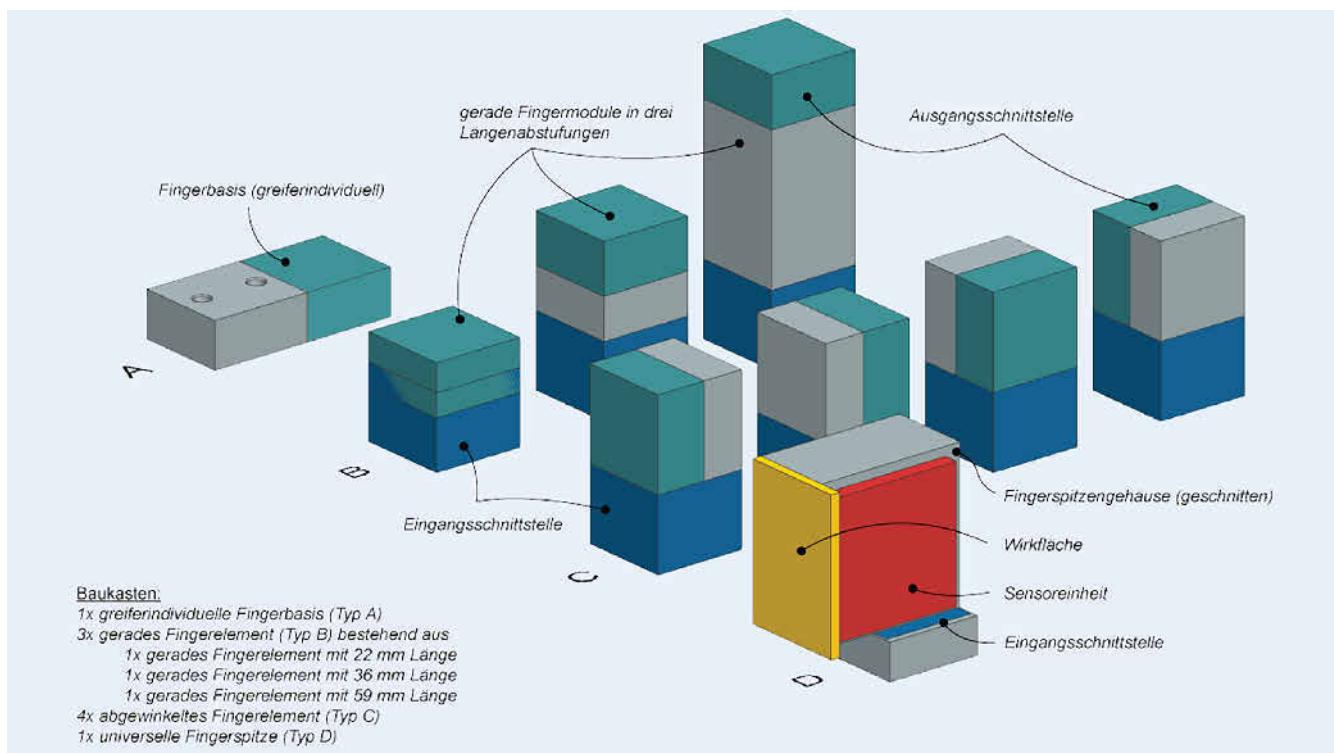


Bild 5. Übersicht über das variantengerechte Gesamtkonzept. Grafik: wbk

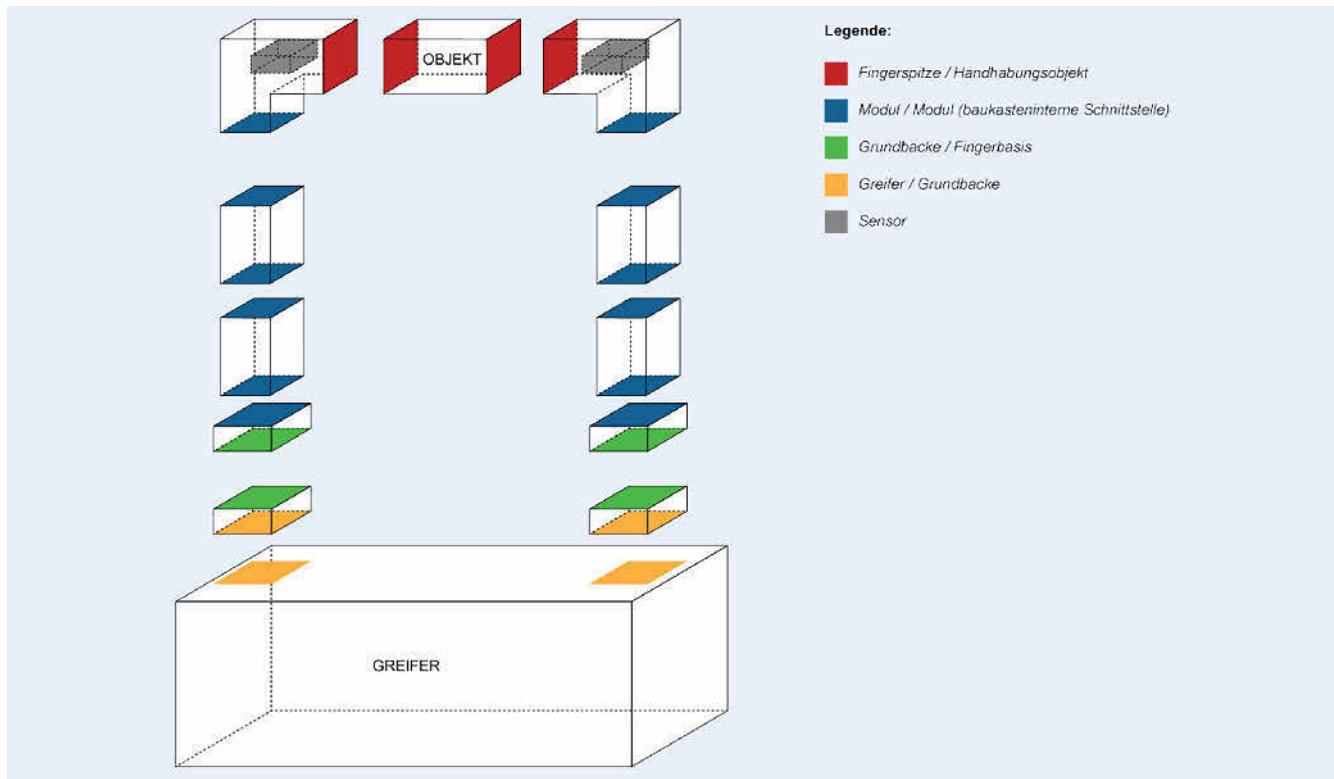


Bild 6. Schnittstellenübersicht des Greifergesamtsystems. Grafik: wbk

wand). Aus der Bewertung und dem Vergleich der mechanischen Schnittstellenkonzepte wird das erste Schnittstellenkonzept mit Elementen des Backenschnellwechselsystem Schunk BSWS ausgewählt.

Die störungsfreie Übertragung elektrischer Energie und Signale durch den Finger zur Verwendung von Sensoren soll verschiedene Übertragungsprotokolle, wie das Serial Peripheral Interface (SPI), das Inter-Integrated Circuit (I^2C) oder das Controller

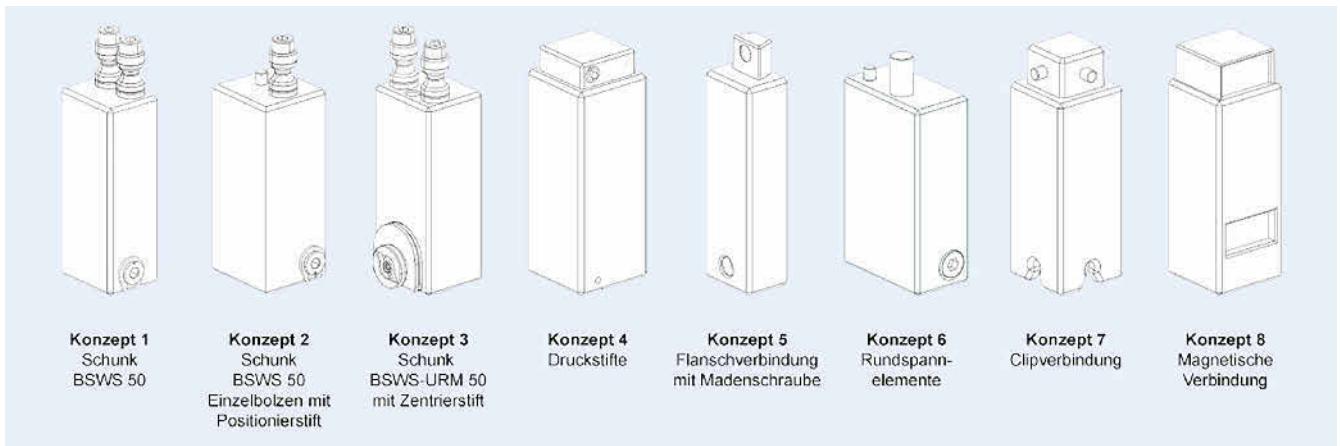


Bild 7. Übersicht über mechanische Schnittstellenkonzepte. *Grafik: wbk*

Tabelle. Übersicht der notwendigen Leitungen für verschiedene Kommunikationsprotokolle.

Kommunikationsprotokoll		SPI	PCI	CAN
Pin	1	Spannungsversorgung (5V)		
	2	Erdung (GND)		
	3	Taktleitung (SCLK)		
	4	Datenleitung (MISO)		
	5	Datenleitung (MOSI)		
	6	Auswahlleitung (SS)		
	7		Taktleitung (SCL)	
	8		Datenleitung (SDA)	
	9			CAN HIGH
	10			CAN LOW

Area Network (CAN), unterstützen. Hierfür werden, wie in der **Tabelle** angegeben, zehn Leitungen benötigt.

Die Übertragung von elektrischer Energie und Signalen erfolgt üblicherweise kabelgebunden mittels konventionellen Steckverbindungen. Über eine formschlüssige Verbindung der Module an der Schnittstelle wird eine elektrisch leitende Verbindung hergestellt. Aufgrund des Formschlusses nehmen die Stecker während des Fügens eine positionierende Funktion ein. Diese soll im betrachteten mechatronischen Schnittstellensystem jedoch einzig durch die mechanischen Schnittstellenkomponenten übernommen werden. Zusätzlich soll auch die mechanische Verriegelung dieser Steckverbindungen vermieden werden, um eine einfache (De-)Montage der Module zu gewährleisten. Aus den genannten Gründen werden für die elektrische Schnittstelle Federkontakteanschlüsse gewählt. Über einen federbelasteten, axial verschiebbaren Pin wird die elektrische Energie kraftschlüssig an einen Gegenkontakt übertragen. Dadurch agieren sie weder verriegelnd noch positionsbestimmend während des Montagevorgangs.

Zusammenfassend ergibt sich nach der Gestaltung die in **Bild 8** (links) dargestellte Modulform. Auf der rechten Seite ist ein Beispelfinger aus Modulen abgebildet.

gegnen, versuchen Unternehmen Produktionsprozesse zu digitalisieren und zu flexibilisieren. Handhabungsprozesse als wesentlicher Bestandteil automatisierter Prozesse spielen eine bedeutende Rolle, um variantenreiche Produkte kostengünstig und zeiteffizient durch die automatisierte Produktion zu bringen. Als einzige Komponenten des gesamten Handhabungssystems mit direktem Kontakt zu Werkstück entscheiden die Wirkelemente von Greifern maßgeblich über die Zuverlässigkeit einer Handhabungsoperation. Der heute noch weitestgehend manuelle Prozess zur Gestaltung dieser Wirkelemente muss vereinfacht und die Bereitstellung anwendungsgerechter Greiferfinger beschleunigt werden.

Dieser Beitrag beschreibt die systematische Entwicklung eines modularen Greiferfingerbaukastens für (mechatronische) Zweifinger-Parallelgreifer als Basis für eine automatisierte Konfiguration von Greiferfingern. Das Vorgehen orientiert sich dabei an verschiedenen Methoden der Produktentwicklung.

Im Anschluss an den Aufbau des Baukastens folgt die Modellierung der Einzelmodule, um diese für die automatisierte Konfiguration verwenden zu können.

L iteratur

- [1] Bartenschlager, J.; Hebel, H.; Schmidt, G.: Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 1998

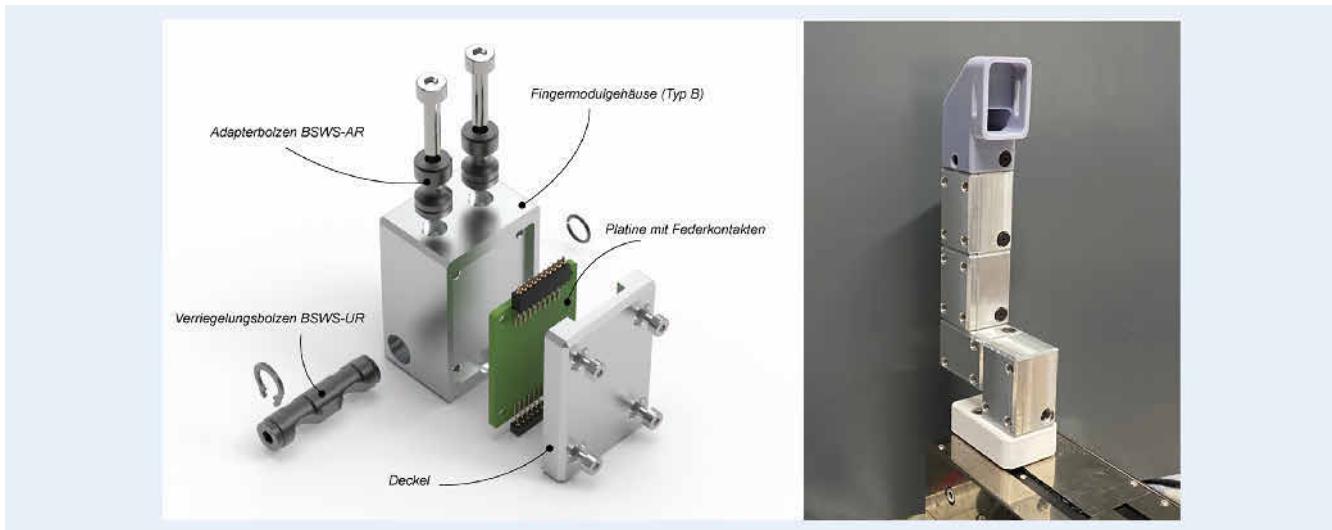


Bild 8. Links: Explosionsansicht eines Moduls, rechts: realisierter Greiferfinger. Foto: wbk

- [2] Pott, A.; Dietz, T.: Industrielle Robotersysteme. Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2019
- [3] Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: Grundlagen Automatisierung, Sensorik, Regelung, Steuerung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017
- [4] Fantoni, G.; Santochi, M.; Dini, G. et al.: Grasping devices and methods in automated production processes. CIRP Annals 63 (2014) 2, pp. 679–701
- [5] Nagel, M.; Giese, F.; Becker, R.: Flexible Gripper Design Through Additive Manufacturing. In: Reinhardt, D.; Saunders, R.; Burry, J. (Hrsg.): Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Cham: Springer International Publishing 2016, pp. 455–459
- [6] Friedmann, M.; Fleischer, J.: Automated Configuration of Modular Gripper Fingers. Procedia CIRP 106 (2022), pp. 70–75
- [7] Hesse, S.: Greiftechnik. Effektiv für Roboter und Automaten. München: Carl Hanser Verlag 2011
- [8] Honarpardaz, M.: Finger Design Automation for Industrial Robots. A Generic and Agile Approach. Linköping: Linköping University Electronic Press 2018
- [9] Brown, R. G.; Brost, R. C.: A 3-D modular gripper design tool. IEEE Transactions on Robotics and Automation 15 (1999) 1, pp. 174–186
- [10] Balan, L.; Bone, G. M.: Automated Gripper Jaw Design and Grasp Planning for Sets of 3D Objects. Journal of Robotic Systems 20 (2003) 3, pp. 147–162
- [11] PHD Inc.: Modular Gripper Jaw Tooling. Click & Grip. Stand: 2020. Internet: litstore.phdinc.com/pdf.asp?filename=CLICK-GRIP.pdf. Zugriff am 08.08.2022
- [12] Carbone, G. (ed.): Grasping in robotics. London: Springer-Verlag 2013
- [13] Belter, J. T.; Segil, J. L.; Dollar, A. M. et al.: Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review. Journal of rehabilitation research and development 50 (2013) 5, pp. 599–618
- [14] Weiss Robotics GmbH & Co. KG: FiINGERKIT by Weiss Robotics. Internet: weiss-robotics.com/fingerkit/. Zugriff am 08.08.2022
- [15] Steward, D. V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management EM-28 (1981) 3, pp. 71–74
- [16] Barg, S.: Kontextbezogene Auslegung von Produktbaukästen. Dissertation, RWTH Aachen, 2018
- [17] Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien. Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln. Heidelberg: Springer Vieweg 2018
- [18] Kipp, T.: Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. Dissertation, Technisch Universität Hamburg-Harburg, 2012



Marco Friedmann, M.Sc.
Foto: KIT

Sebastian Schabel, M.Sc.

Jonas Gerber, B.Sc.

Andreas Döhring, M.Sc.

Linda Meschter, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 721 / 608 49197
marco.friedmann@kit.edu
www.wbk.kit.edu

Dr. Martin May

Schunk GmbH & Co. KG
Spann- und Greiftechnik
Bahnhofstr. 106-134
74348 Lauffen/Neckar