



FH·W·S

Hochschule
für angewandte Wissenschaften
Würzburg-Schweinfurt

FHWS SCIENCE JOURNAL

2021 (Jahrgang 5), Ausgabe 2



Sonderausgabe zur Forschung am Institut Digital Engineering

Titelstory: Das hybride Team – Ein Leitfaden zur systematischen Planung von assistierten, kollaborativen Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen in der Montage
(Projekt InKoMo der Bayerischen Forschungsstiftung AZ-1401-19)

Tobias Kaupp, Jan Schmitt, Andreas Hillenbrand, Philipp Kranz

Inhalt

EDITORIAL	3
DAS INSTITUT DIGITAL ENGINEERING (IDEE)	5
TITELSTORY	
DAS HYBRIDE TEAM – EIN LEITFADEN ZUR SYSTEMATISCHEN PLANUNG VON ASSISTIERTEN, KOLLABORATIVEN MENSCH- ROBOTER-ARBEITSPLÄTZEN IN DER MONTAGE	11
(PROJEKT INKOMO DER BAYERISCHEN FORSCHUNGSSTIFTUNG AZ-1401-19) Tobias Kaupp, Jan Schmitt, Andreas Hillenbrand, Philipp Kranz	

BERICHTE UND BEITRÄGE

UNTERSUCHUNGEN ZUR TEMPERATURLEITFÄHIGKEIT ADDITIV GEFERTIGTER STAHLPROBEN IN ABHÄNGIGKEIT DER RELATIVEN DICHTEN Dennis Ochs, Kira Wehnert, Kevin Knopp, Jürgen Hartmann, Alexander Versch, Andreas Schiffler	75
METROLOGISCHE APPARATUREN ZUR MESSUNG THERMOPHYSIKALISCHER MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI SEHR HOHEN TEMPERATUREN IM EU-PROJEKT HI-TRACE Kevin Knopp, Amir Shandy, Jochen Manara, Stephan Vidi, Jürgen Hartmann	83
ROBOTERBASIERTE KOORDINATENMESSTECHNIK – WIE PRÄZISE KANN EIN ROBOTER BAUTEILE VERMESSEN? Andreas Horn, Jan Schmitt	93
INVOLVIERENDE BILDUNGSKOMPONENTEN ZUR ABLEITUNG VON ANPASSUNGSKONZEPTEN FÜR (PRODUZIERENDE) UNTERNEHMEN IM PROJEKT MainKlimaPLUS Sophie Fischer, Jan Schmitt	101
LEHRE, FORSCHUNG UND TRANSFER AM BEISPIEL DER ROBOTIK – VOM ROBOCUP@WORK ZUR AUTONOMEN WARENKOMMISSIONIERUNG Tobias Kaupp	109
MIKROLOGISTIK DER ZUKUNFT MIT DEZENTRAL ORGANISIERTEN BODEN- UND LUFTGEBUNDENEN AUTONOMEN FÖRDEREINHEITEN Christian Bachmeir	117

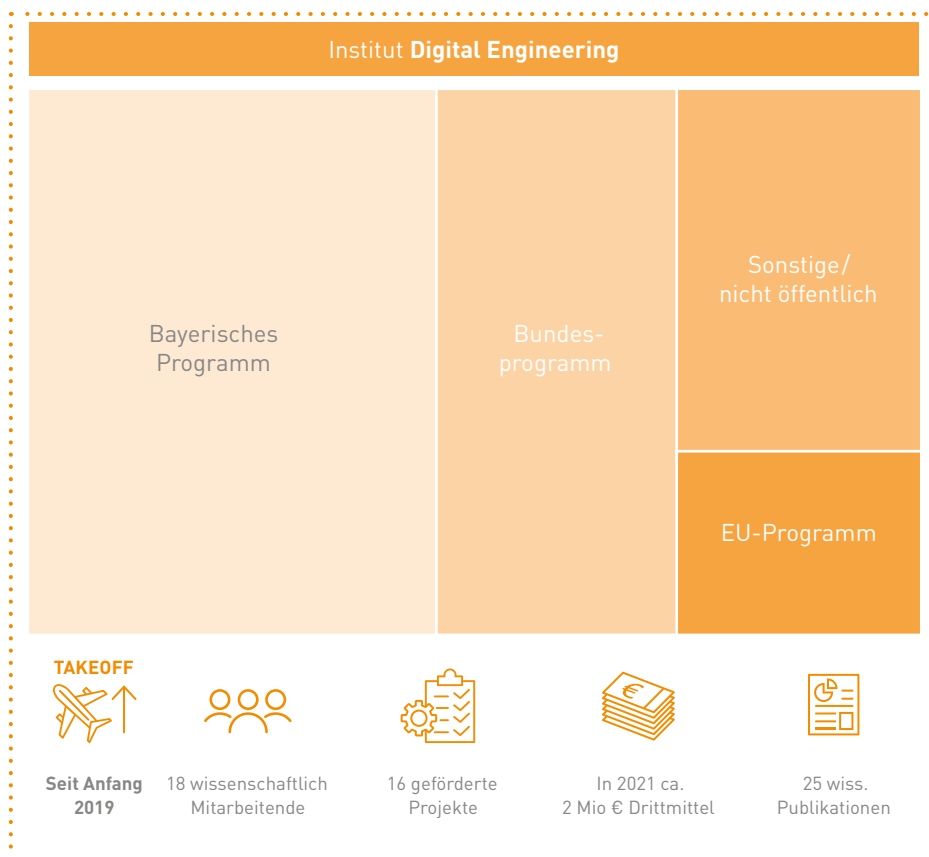
PLANAR – PLANEN MIT AUGMENTED REALITY (AR) EINSATZ VON AR BEI ANLAGENPLANUNG UND MATERIALFLUSSOPTIMIERUNG Markus Wilhelm, Maximilian Rosilius, Volker Bräutigam	125
DAS PROJEKT KI-INSPEKTIONSDROHNE Christian Bachmeir	131
OPTIMIERUNG VON PROZESSEN UND WERKZEUGMASCHINEN DURCH BEREITSTELLUNG, ANALYSE UND SOLL-IST-VERGLEICH VON PRODUKTIONSDATEN Jan Hofmann, Lars Eberhardt, Moritz Heusinger, Alexander Dobhan, Bastian Engelmann, Frank-Michael Schleif	135
INTERNATIONALISIERUNG IN PANDEMIEZEITEN, TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN, LEHR- UND FORSCHUNGSKONZEPTE MAL ANDERS GEDACHT Eddi Miller, Christine Barthelme, Andreas Schiffler, Bastian Engelmann, Jan Schmitt	143
EINSATZ EINER MASCHINELL GELERNTEN BILDSEGMENTIERUNG ZUR PULVERBETTÜBERWACHUNG IM METALLDRUCK Andreas Schiffler, Kira Kristin Wehnert, Dennis Ochs	147

Editorial

Mit dieser Sonderausgabe des FHWS Science Journals möchten wir Sie, liebe Leserinnen und Leser, auf das Institut Digital Engineering (IDEE) aufmerksam machen sowie Einblicke in die aktuellen Forschungsarbeiten in ihrer Breite und Tiefe ermöglichen. Ganz besonders freut uns, dass die Entwicklung in Bezug auf die Teilnahme und den Erfolg bei öffentlichen Förderaufrufen des Landes und Bundes das Institut nach einer Startphase bereits sehr positiv zu bewerten ist. Dies zeigt sich an der Anzahl der eingeworbenen Projekte und den Drittmittelumsatz, der 2020 schon rund 1 Mio. € betrug und in 2021 auf 2 Mio € gesteigert werden konnte.

Ausgangspunkt dieser Sonderausgabe ist die Präsentation eines Leitfadens zur Mensch-Roboter-Interaktion aus dem Projekt InKoMo der Bayerischen Forschungsstiftung heraus. Neben diesem Leitartikel finden sich weitere Beiträge, die den Stand der Forschungen am IDEE wiedergeben. Von 3D-Metalldruck bis Klimaanpassung wird aus vielen (nicht allen) Projekten berichtet und wir hoffen so Ihr Interesse an den Forschungsarbeiten an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg Schweinfurt zu wecken.

Als Übersicht wollen wir Ihnen als derzeitige Institutsleitung einige wenige Kennzahlen des IDEE, sowie die Verteilung der Projekte auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene mitgeben:



Das Institut Digital Engineering (IDEE) wurde Anfang 2019 als Institut der Hochschule für angewandte Wissenschaften mit dem Ziel gegründet, Forschungsaktivitäten rund um das Themenfeld Digitale Produktion/ Industrie 4.0 zu bündeln. Vier Forschungsprofessuren sind

federführend im IDEE tätig. Sie werden durch forschungsaffine Kolleginnen und Kollegen in den jeweiligen Projekten unterstützt. Die Forschungsprofessuren zeichnen sich durch den besonderen Forschungsauftrag aus, der mit einer Lehrentlastung einhergeht.

Das IDEE gliedert sich thematisch in Center, wobei die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Sinne der geforderten Kompetenzen in der Industrie 4.0 immer im Vordergrund steht.

Viel Spaß beim Lesen wünschen Ihnen



*Prof. Dr.-Ing. Jan Schmitt
Institutsleitung*



*Prof. Dr.-Ing. Andreas Schiffler
stellv. Institutsleitung*

Das Institut Digital Engineering (IDEE)

CERI – CENTER ROBOTICS



FHWS

Prof. Dr. Tobias Kaupp
Forschungsschwerpunkte:

- Robotergestützte Arbeitsplätze der Zukunft
- Intralogistik mit Fokus Smart Factory

Die Robotik zählt zu den Megatrends des 21. Jahrhunderts. Roboter werden zunehmend intelligenter und in vielen Bereichen eingesetzt, z.B. in der Industrie, beim Transport (autonomes Fahren), in der Landwirtschaft, im Pflegebereich etc.

Das CERI hat sich zur Aufgabe gemacht, die Bedürfnisse der regionalen Unternehmen im Bereich der Robotik mit angewandter Forschung zu adressieren. Dazu gehört die Automatisierung und Teilautomatisierung von industriellen Prozessen, welche darauf abzielt, die Produktion in Hochlohnländern wie Deutschland zu erhalten. Dabei spielt die Robotik eine wesentliche Rolle – mit intelligenter Sensorik und Methoden der künstlichen Intelligenz wird man in Zukunft produktiver und flexibler produzieren können, auch für kleine Losgrößen.

Forschungsfelder im Einzelnen

Robotergestützte Arbeitsplätze der Zukunft

Um bei der Produktion in Hochlohnländern weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen neue Automatisierungsparadigmen entwickelt werden. Einer dieser Ansätze ist die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), bei der die Stärken von Mensch und Maschine kombiniert werden, um eine erhöhte Produktivität und verbesserte Ergonomie zu erreichen. Dabei sind Arbeitssicherheit und Werkerakzeptanz wichtige Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. Mensch und Maschine müssen effektiv miteinander interagieren und kommunizieren, um deren jeweiligen Intentionen und Ziele zu verstehen. Längerfristig kann so eine Vertrauensbasis geschaffen werden, bei der »Kollege Roboter« als vollwertiges Mitglied im hybriden Mensch-Roboter-Team agieren kann.

Intralogistik mit Fokus Smart Factory

Neben Produktions- und Montagetätigkeiten übernehmen Roboter in der modernen Fabrik immer mehr Intralogistikaufgaben. Bauteile und Werkzeuge müssen zeitnah zwischen verschiedenen Bearbeitungsstationen transportiert werden. Dafür müssen die sogenannten Fahrerlosen Transportsysteme (FTS) in hochdynamischen Umgebungen sicher navigieren, Objekte in der Umgebung erkennen und gegebenenfalls auch aufnehmen und wieder ablegen können. Zusätzlich müssen die Logistikabläufe effizient geplant und optimiert werden und mit den Abläufen an den Bearbeitungsstationen zusammenspielen, um eine produktive Herstellungskette zu gewährleisten. Intralogistikaufgaben erstrecken sich auch auf Anwendungen außerhalb der Fabrik wie beispielsweise Warenlager, Krankenhäuser oder Hotels.



FHWS
CIPS
Center Intelligent
Production Systems

Prof. Dr. Jan Schmitt
Forschungsschwerpunkte:

- Kognitive und immersive Assistenzsystemen
- Maschinennahes Prozessmanagement
- Maschinelles Lernen in Entwicklung und Produktion

Die industrielle Produktion mit einem hohen Qualitätsanspruch muss mit dem fortwährenden technologischen Wandel mithalten, um am Standort Deutschland wettbewerbsfähig zu bleiben. Daher gilt es innovative Technologien verschiedenster Disziplinen in Prozesse einzubinden. Dies gilt insbesondere für die Digitalisierung der industriellen Herstellungs- und der unterstützenden Prozesse z.B. der Entwicklung. Dieser Herausforderung stellt sich das CIPS auf der Schnittstelle zwischen technischem und wirtschaftlichem Prozessmanagement mit einem deutlichen Schwerpunkt in der Technik für die Digitalisierung.

Innerhalb von **drei Schwerpunkten** des CIPS werden diverse Forschungsfragen im Team der Professoren Dr. Schmitt, Dr. Engelmann und Dr. Bräutigam bearbeitet:

Unter **kognitiven & immersiven Assistenzsystemen** werden Anwendungen von AR/VR/MR Technologien in der Produktion verstanden, die eine Unterstützung der Mitarbeitenden in der Montage, also dem Ort der Wertschöpfung (Shop-Floor), bieten können. Wichtig sind hier Aspekte der Nutzerorientierung und -akzeptanz sowie Vernetzung. Bereiche in denen digitale Assistenzsysteme Einzug in die Produktion finden sind Planungsaufgaben, Wertstromvisualisierung und Montageanleitungen. Dieser Forschungsschwerpunkt wird maßgeblich von Prof. Dr. Volker Bräutigam betreut.

Die Nutzung von Produktions- und Prozessdaten zum Shop-Floor-Management wird durch moderne Industrie 4.0 Techniken in wachsendem Maße ermöglicht. Cloud-Dienste und standardisierte Vernetzungsprotokolle über traditionelle Automatisierungsebenen hinweg beschleunigen die Möglichkeiten des **Prozessmanagements** in diesem Bereich. Die relevanten Forschungsaspekte sind hierbei die Fusion heterogener Sensordaten sowie die Entwicklung maßgeschneiderter Algorithmen für die Etablierung kurzer und maschinennaher Regelkreise in Mensch-Maschine-Prozessen. Dieser Forschungsschwerpunkt wird maßgeblich von Prof. Dr. Bastian Engelmann verantwortet.

Im Lebenszyklus eines Produkts von dessen Entwicklung bis zum Recycling können Methoden des **Maschinellen Lernens** helfen, wesentliche Prozessverbesserungen zu erreichen. Beispielsweise ist die Materialentwicklung von einem erfahrungsbasierten, iterativen Vorgehen geprägt. Maschinelles Lernen ermöglicht es hierbei Prognosen von Leistungsparametern eines Produkts schon vor der finalen Charakterisierungsphase. Somit ist es möglich den gesamten Entwicklungsprozess zu verkürzen. In der Produktion kann Maschinelles Lernen helfen Muster als Daten zu erkennen und ebenso Prozessverbesserungen herbeizuführen. Neben der Centerleitung wird dieser Forschungsschwerpunkt von Prof. Dr. Jan Schmitt verantwortet.



Interimsleitung
Prof. Dr. Frank-Michael Schleif
Forschungsschwerpunkte:

- AI Perception
- AI Recognition
- AI Solving
- AI Motion
- AI Speech
- AI Learning

Arbeitsgruppe industrial IoT, Security, kognitive-CPS/UAV
Prof. Dr. Christian Bachmeir

Im Zuge der Hightech Agenda Bayern übernimmt die FHWS mit dem Center for Artificial Intelligence and Robotics (CAIRO) eine Kommunikator-Rolle für die bayerischen Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Anwendung und Forschung der Künstliche Intelligenz. CAIRO hat zum Ziel aktuelle Themen der künstlichen Intelligenz aufzugreifen, für die Gesellschaft zu untersuchen und einen effektiven Wissenstransfer in die industrielle Praxis zu ermöglichen. Dabei liegt der Fokus auch auf einem ganzheitlichen Verständnis der KI, wobei auch ethische und rechtliche Aspekte einbezogen werden.

Ausgehend von den grundständigen Intelligenzbereichen Wahrnehmen, Denken und Handeln sowie einer konzeptbasierten Wissensrepräsentation, kann man die ineinandergreifenden Teilbereiche Perzeption und Konzeptualisierung (Wahrnehmung), Problemerkennung und konzeptuelles Lösen (Handeln) und konzeptuelles Lernen (zentrales Denken) unterscheiden. CAIRO etabliert für die genannten verschiedenen Bereiche, dedizierte Themenschwerpunkte, die durch mehrere Forschungsprofessuren bearbeitet werden.

Die Forschungsprofessuren tragen zudem einen neuen Masterstudiengang zu Artificial Intelligence (MAI) an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der FHWS, mit dem Ziel Studierenden im Bereich starke KI zu qualifizieren. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsprojekte in CAIRO liegen im Bereich semantischer Analyse, wie dem Projekt FHWS-Jukebox, das beim Mozart Festival 2021 eingebunden ist oder der Weiterentwicklung von KI Methoden für Prognosemodelle wie z.B. in der Intralogistik im Projekt FlowPro.

CAMP – CENTER ADDITIVE METAL PRINTING



FHWS

CAMP
Center Additive
Metal Printing

Prof. Dr. Andreas Schiffler
Forschungsschwerpunkte:

- Prozessüberwachung und Prozessdaten-Aufbereitung
- Sensorik zur Prozess- und Schmelzbadbeurteilung
- Prozesskette und innovative Anwendungen

Das CAMP hat sich im IDEE als ein Forschungsgebiet rund um den 3D-Metalldruck und seiner Prozessketten etabliert.

Die schnell wachsende, junge Technologie des 3D-Metalldrucks bereichert die klassische Metallverarbeitung durch neue Gestaltungsmöglichkeiten und schafft daher Raum für neue oder optimierte Produkte. Voraussetzung für den Erfolg in der Anwendung ist die interdisziplinäre Produktentwicklung, sowie die Betrachtung der kompletten Prozesskette – digital und real – mit Ausgestaltung einer Pilotanlage für die voll vernetzte und überwachte Fertigung in der digitalen Produktion.

Gleichzeitig resultiert daraus ein großer Bedarf, Forschungsergebnisse in die Anwendung zu bringen und neue Einsatzfelder zu entwickeln. Das CAMP steht dafür und beschäftigt sich damit in Forschungsprojekten und Kooperationen, eng verknüpft mit dem Labor für »Additive Fertigung metallischer Bauteile« der Fakultät Maschinenbau. Studentische Ausbildung in Theorie und Praxis verschmilzt so mit der Bearbeitung anwendungsbezogener Forschungsfelder. Know-How-Transfer und gemeinsame Aktivitäten mit regionalen KMU und Start-Ups, wie auch Großunternehmen sind das längerfristige Ziel.

Die Aktivitäten im CAMP lassen sich in folgende Unterbereiche gliedern:

- Vernetzte und überwachte Fertigung in der digitalen Produktion
- Prozessüberwachung zur automatisierten Qualitätsregelung
- Prozessketten und innovative Anwendungen
- Interdisziplinäre Produktentwicklung additiv gefertigter Bauteile
- Ausbildung und Know-How-Transfer

Für das Thema »Prozessketten und innovative Anwendungen« steht als zentraler Punkt die durch das ZDI Mainfranken geförderte Laserschmelzanlage (EOS M290), sowie die umfangreichen Software-Werkzeuge insbesondere für Gründungsideen im Bereich additiver Fertigung zur Verfügung. So konnte z.B. im Rahmen eines studentischen Projekts die Funktionsintegration der Kühlung sowie die Gewichtsreduktion in ein formgebendes Werkzeug realisiert werden.

Im Bereich der Prozessüberwachung und Prozess-Sensorik arbeiten zurzeit zwei wissenschaftliche Mitarbeitende im Rahmen von Drittmittelprojekten (Validad, ProDiMe) an weiterführenden Methoden und Einrichtungen, um die Qualität im industriellen Einsatz weiter zu verbessern. Dazu gehört auch die Einbindung von Infrastruktur und technischer Gebäudeaustattung in die Prozessüberwachung.

Geleitet wird das CAMP von den Professoren Dr. Andreas Schiffler und Dr. Alexander Versch.



Prof. Dr. Jürgen Hartmann
Forschungsschwerpunkte:

- Temperaturmessung in extremen Umgebungen
- Messung thermophysikalischer Materialeigenschaften und Strahlungstransferberechnungen

Das Center Sensors and Actuators, kurz CESA, befasst sich mit den physikalischen Prinzipien, die es erlauben, Messgrößen zu erfassen und für übergeordnete Systeme zugänglich zu machen.

Somit sind explizit mögliche Aufbau- und Funktionsweisen von Sensoren und Sensorsystemen für eine spezifische Messaufgabe Gegenstand der Forschung.

Das CESA sieht sich als kompetenter Partner im Bereich der angewandten Forschung für Messtechnik, opto-thermische Sensorik und Thermophysik. Ziel ist die Unterstützung und der Aufbau messtechnischer Kompetenz und Infrastruktur der mittelständischen Industrie – insbesondere durch Technologie-Transfer. Daher soll die Entwicklung und Anwendung von optischen Methoden in der Licht-, Strahlungs- und Temperaturmesstechnik sowie der Materialuntersuchung für Industrie und Forschung vorangetrieben werden.

Forschungsschwerpunkt sind Messaufgaben in extremen Umgebungen, z. B. bei hohen Temperaturen und Drücken (wie z. B. bei der additiven Laserfertigung oder bei Gasturbinen für die Energiewandlung) oder mit sehr hoher räumlicher Auflösung bis in den nm-Bereich. Die Forschung erstreckt sich dabei von grundlagenorientierten Fragestellungen wie die Grundlagen der Temperatur und der Wärmeleitung bis zu den anwendungsnahen Messsystemen für industrielle Anwendungen.

Bevorzugt werden optische Messmethoden entwickelt und eingesetzt, die eine berührungslose, nahezu wechselwirkungsfreie Messung aus der Ferne (Remote Sensing) und insbesondere auch eine bildgebende Messung ermöglicht.

Das hybride Team

**Ein Leitfaden zur systematischen Planung
von assistierten, kollaborativen
Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen in der Montage**



Inhalt

Leitartikel

EINLEITUNG	13
VORSTELLUNG DER TECHNOLOGIEN UND AUSWAHLHILFE	17
VORGEHEN BEIM AUFBAU HYBRIDER ARBEITSPLÄTZE MIT UMSETZUNGSBEISPIEL	33
DER INKOMO USE CASE	55
STAND DER WISSENSCHAFT	65
FAZIT UND AUSBLICK	67
LITERATURVERZEICHNIS	67

Short Facts

Projektlaufzeit: 01.02.2020 – 31.07.2021
Förderträger: Bayerische Forschungsstiftung
Förderkennzeichen: AZ-1401-19



Bayerische
Forschungsstiftung

Einleitung

Im Zuge der fortschreitenden Globalisierung und zunehmenden Digitalisierung der Arbeitswelt, ergeben sich gerade für kleine und mittelständische Unternehmen Herausforderungen im Bereich der Produktion und insbesondere in der Montage. Steigende Komplexität der Produkte, kürzer werdende Produktlebenszyklen bei kleinen Losgrößen mit hoher Variantenvielfalt und großem Wettbewerbsdruck zwingen Unternehmen bereits vorhandene Montagestrategien zu überarbeiten. Gerade bei komplexeren Baugruppen ist eine Hochautomatisierung der Montage in der Serienfertigung aufgrund der Produktstruktur nur schwer realisierbar und oftmals nicht wirtschaftlich. In der industriellen Produktion ist ein klarer Trend von der Massenproduktion hin zur »Massenspezialanfertigung« zu erkennen. Die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den angewandten Produktionsverfahren, den eingesetzten Produktionsmitteln und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Aber auch das Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik trägt dazu bei Potenziale für den Erfolg eines Unternehmens auszuschöpfen. Aufgrund sich ständig ändernder Marktbedingungen und der kostengünstigen Herstellung von Produkten in Niedriglohnländern bei gleichzeitig steigendem Qualitätsniveau müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Die Montage ist im Vergleich zur klassischen Fertigung (wie z.B. Drehen, Fräsen oder Schleifen) ein eher niedrig automatisierter Bereich der industriellen Produktion, indem allerdings eine hohe Wertschöpfung am Produkt stattfindet. Die manuelle Montage ist daher auch zukünftig ein wichtiger Bestandteil der industriellen Produktion. Um am Markt bestehen zu können, müssen Unternehmen nach Möglichkeiten suchen, um manuelle Arbeit produktiver und damit kosteneffizienter zu gestalten ohne dabei Abstriche bei der Qualität hinzunehmen. Zur Unterstützung manueller Tätigkeiten sind in den vergangenen Jahren verschiedene Innovationen in den Fokus der Unternehmen gerückt. Das Ziel muss es sein, den (Montage-)Standort Deutschland durch innovative Konzepte wie kollaborative Mensch-Roboter-Arbeitsplätze zu sichern.

Zwei zukunftsweisende Ansätze sind die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) und assistierte Arbeitsplätze. Das Konzept der kollaborativen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter soll die Kompetenzen beider Akteure gewinnbringend vereinen. Dabei werden die Mitarbeitenden entlastet und durch die Präzision, Wiederholgenauigkeit oder Kraft eines Roboters unterstützt. Diese sogenannte Cobots, welche für die kollaborative Zusammenarbeit mit einem Menschen konzipiert sind, weisen mittlerweile großes Potenzial bei der Montage auf. Ebenso wie die kollaborative Montage mit einem Cobot, zählt die Unterstützung des Menschen durch Assistenzsysteme zu diesen Innovationen. Assistenzsysteme sind technische Geräte, die Informationen aufnehmen und verarbeiten, um Beschäftigte bei der Durchführung von Montagearbeit ggf. multimodal zu unterstützen. Diese Systeme bieten die Chance bei richtiger Gestaltung des Systems einen positiven Beitrag zur digitalen Prozesskette zu leisten und auch bei komplexeren Montageaufgaben die Produktivität zu steigern. Nicht nur das Assistieren bei der Arbeit, sondern auch die automatisierte Überprüfung und Dokumentation von Arbeitsschritten sowie eine einfachere Einarbeitung von Mitarbeitenden können wesentlich zur Optimierung der Montage beitragen.

Ein neuartiger Ansatz bei der stetigen Verbesserung von Montageprozessen bietet die Kombination der Mensch-Roboter-Kollaboration mit einem Assistenzsystem. Dieses sogenannte hybride Team, bestehend aus Mensch, Cobot und Assistenzsystem, bildet einen intelligenten Montagearbeitsplatz. Bei entsprechender Konzeptionierung können sich durch das Zusammenspiel der Akteure die Vorteile der jeweiligen Technologien optimal ergänzen. Dies hat positive Auswirkungen auf Faktoren wie Zeit, Kosten und Qualität. Durch kontinuierliche Verbesserung

und Weiterentwicklung von Technologien sowie Skaleneffekte sind sowohl Cobots als auch Assistenzsysteme für kleinere Unternehmen erschwinglich und gebrauchstauglicher geworden. Hinsichtlich des aktuellen industriellen Wandels in Richtung Industrie 4.0 bietet der Einsatz intelligenter Arbeitsplätze durch »smarter« gestaltete Prozessketten großes Potenzial, mit dem globalen Wettbewerb Schritt halten zu können.

Auf dieser Ausgangslage fußt das Projekt InKoMo – Interaktive, kollaborative Montage komplexer Bauteile, gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung (AZ-1401-19). Ein Ziel des Projektes war es, den hier vorliegenden Leitfaden zu entwickeln.

ZENTRALE LEITFRAGEN FÜR DIE ERSTELLUNG SIND

Was wird im Leitfaden behandelt?



Der Leitfaden soll ...

... eine Handlungsanweisung für die systematische Planung und Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen mit Assistenzsystemen darstellen,

... es erlauben, systematisch hybride Arbeitssequenzen aus bestehenden manuellen Montageschritten zu ermitteln, sowie

... eine Hilfestellung bei der Umwandlung von Montageprozessen ausgehend von manuellen in hybride Montagesysteme liefern.

Was wird im Leitfaden nicht behandelt?



Der Leitfaden soll **nicht** ...

... Anleitung zur Risikobeurteilung von hybriden Arbeitsplätzen sein,

... für die technische Auswahl von MRK-Komponenten und -Assistenzsystemen dienen, sondern lediglich eine Orientierung für mögliche Systeme bieten. Dazu werden ausgewählte Assistenzsysteme vorgestellt, jedoch keine Anleitung zur technischen Auswahl geliefert, da dies in den meisten Fällen in hohem Maße applikationsspezifisch ist und stark vom Unternehmen bzw. dessen Strategie für die Umsetzung von Montageaufgaben und deren Randbedingungen ist,

... die möglichen Rückwirkungen durch die Teilautomatisierung von Abläufen auf das Produkt beleuchten. Die Schnittstelle zur Produktentwicklung (Konstruktion, Produktdesign, Design for Manufacturing) bleibt innerhalb dieses Leitfadens unberücksichtigt.

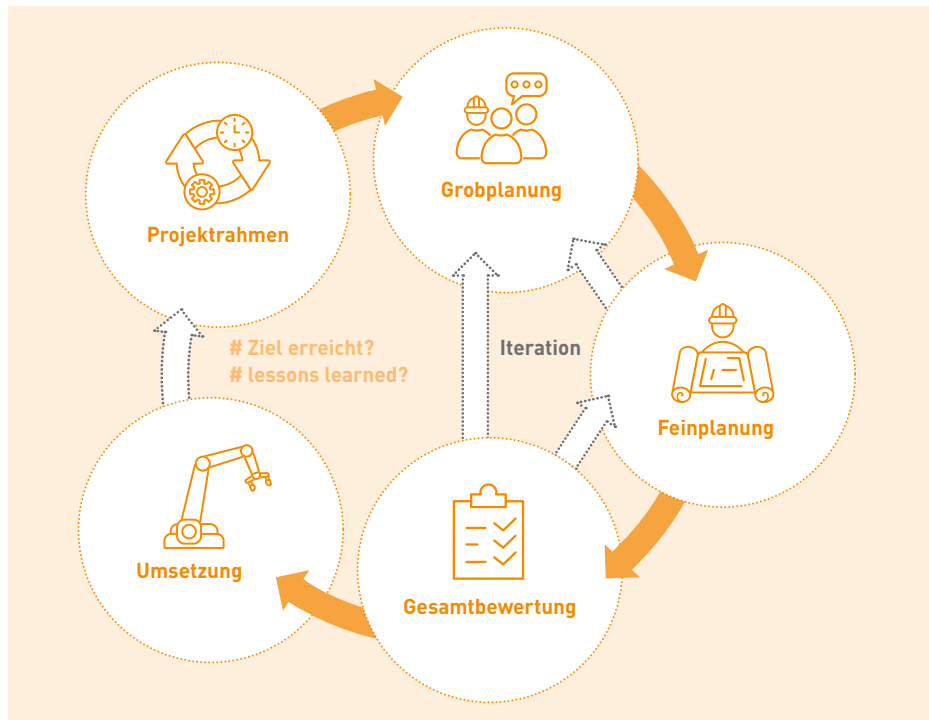
Aus diesen Prämissen ergibt sich die Zielgruppe für diesen Leitfaden. Er richtet sich an Produktionsplaner, die einen hybriden Arbeitsplatz einführen wollen, Anlagenoptimierer, bspw. aus der Instandhaltung, die Potenzial in der Produktion durch assistierte Mensch-Roboter-Arbeitsplätze ausschöpfen wollen.

Dieser Leitfaden ist nicht nach dem klassischen Muster einer wissenschaftlichen Arbeit gegliedert, also der systematischen Rezension des Stands der Wissenschaft, sondern beginnt mit der Vorstellung der einzelnen Technologien für ein hybrides Team. Dieses Wissen fließt dann in ein Vorgehensmodell zum Aufbau hybrider Arbeitsplätze ein, dessen Anwendung an einem Beispiel ausführlich illustriert wird. Erst am Ende wird der aktuelle Stand der Wissenschaft dargestellt, um den Leitfaden abzurunden.

METHODIK

Die in diesem Leitfaden vorgeschlagene Methodik bedient sich einem iterativen Prozess, welcher die Prozessschritte Projektrahmen, Grobplanung, Feinplanung, Gesamtbewertung und Umsetzung durchläuft. Je nach Erreichung der im Projektrahmen festgelegten Projektzielen, können weitere Iterationen erfolgen. Eine Iteration kann in dem Prozessschritt starten, in welchem Optimierungen vorgenommen werden müssen.

Abbildung 1: Vorgeschlagene Methodik zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze



Beginnend wird der Projektrahmen definiert und der Projektumfang abgegrenzt. In diesem ersten Schritt wird die Ausgangssituation analysiert und Anforderungen definiert. Darauf folgt eine Potenzialanalyse der Komponenten und die Festlegung der Projektziele. Nachdem der Projektrahmen festgelegt ist, wird in den Prozessschritt Grobplanung gewechselt. Der bestehende Montageprozess wird in diesem Prozessschritt analysiert, die Interaktionsformen bestimmt und Gestaltungslösungen für die Umsetzung erarbeitet. Ist die Grobplanung abgeschlossen, wird im Abschnitt Feinplanung das Arbeitsplatzlayout erstellt, die hybride Montagesequenz ausgetaktet, sowie eine Bewertung der Sicherheit vorgenommen. Im Prozessschritt

Gesamtbewertung werden verschiedene Arbeitsplatzlayouts bewertet und miteinander verglichen. Anhand einer Nutzwertanalyse wird überprüft, ob das gewählte Layout den Anforderungen und Projektzielen entspricht. In der Umsetzung wird zunächst eine Machbarkeitsanalyse mit den Systemkomponenten durchgeführt. Anschließend wird die Sequenz implementiert und gegebenenfalls optimiert. Außerdem sollte hier ein Schulungskonzept für die Beteiligten erstellt werden.

Vorstellung der Technologien und Auswahlhilfe

Wenn Sie bereits über die Grundlagen zu roboterbasierten Montagetechnologien und Assistenzsystemen verfügen, können Sie dieses Kapitel überspringen.

Was sind Montagesysteme?

Komplexe Bauteile bestehen in der Regel nicht aus einem Teil, sondern werden durch unterschiedliche Einzelteile, die zumeist aus verschiedenen Materialien bestehen, zusammengefügt. Diese Gruppierung und vor allem die Fügeprozesse, welche den Zusammenhalt einzelner Bauteile gewährleisten und somit eine komplexere Baugruppe bilden, wird Montage genannt [1]. Da die Dauer der Montage je nach Komplexität der Bauteile und Fügeprozesse zunimmt, können die für die Montage notwendigen Systeme in verschiedene Kategorien unterteilt werden.

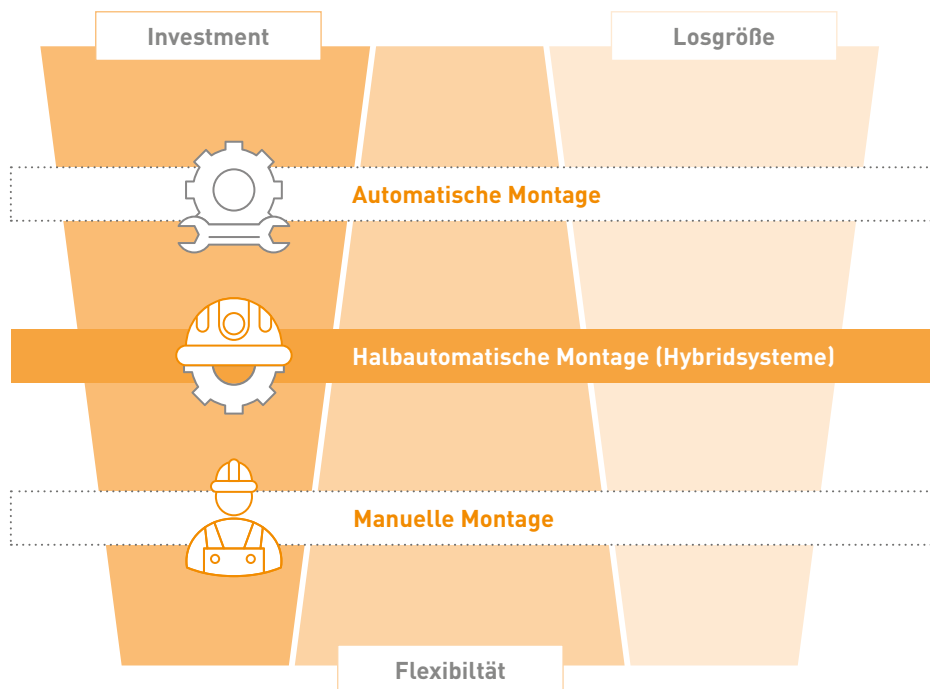


Abbildung 2: Einordnung der Montagesysteme [1]

Es ist zu erkennen, dass die manuelle Montage, insbesondere durch die sensorischen Fähigkeiten des Menschen, mehr Flexibilität erlaubt, wohingegen die automatische Montage hier nachteilig ist. Die halbautomatische Montage siedelt sich demnach im Mittelfeld an. Die automatische Montage wird bei sehr hohen Losgrößen eingesetzt und erfordert ein hohes Investment. Dadurch dass die Maschinen meist nur für ein gewisses Bauteil mit sehr hohen Losgrößen eingesetzt werden, ist die Flexibilität an dieser Stelle sehr gering. Dem gegenüber steht die manuelle Montage. Hier ist die Flexibilität maximal. Somit lassen sich mit einem solchen Montagesystem kleine Losgrößen mit einem geringen Investment fertigen. Die hybride Montage als Mischform zwischen manueller und automatisierter Montage mit Hilfe von Cobots erfordert zwar ein höheres Investment, kann jedoch mit den weitaus teureren automatischen Systemen mit vergleichbarer Montagekomplexität mithalten [1].

Und was genau ist hybride Montage?

In der Regel wird von hybriden Arbeitsplätzen gesprochen, wenn sich Mitarbeitende mit einem Roboter den Arbeitsplatz teilen und zusammen einzelne Bauteile zu Baugruppen montieren. Da sich die hybride Montage in der Mitte der beiden schon erwähnten Montagearten befindet, liegt ihre Stärke darin, den Zusammenbau von Baugruppen mit überschaubaren Stückzahlen zu gewährleisten und dabei ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit aufzuweisen. Wann von einer Stückzahl gesprochen wird, die für den Einsatz von Hybridsystemen interessant ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Zum einen spielt die Menge, die zu einem gewissen Zeitpunkt produziert werden soll, eine gravierende Rolle, jedoch wird auch die Komplexität der Fügeschritte und der Arbeitsinhalte in die Bewertung mit einbezogen. Da der Produktlebenszyklus immer weiter reduziert wird und die Vielfalt der unterschiedlichen Produkte steigt, gewinnen Montagesysteme wie die hybride Montage immer mehr Bedeutung in der industriellen Produktion [1]. Durch die technische Möglichkeit Mensch-Roboter-Interaktion (MRK) zu realisieren, wird dem Menschen ermöglicht dicht mit einem Roboter ohne Schutzzaun zusammenzuarbeiten. Dieses enge Agieren zwischen Mensch und Roboter ermöglicht es, strukturierte hybride Montagesysteme zu schaffen, die die Stärken von Mensch und Roboter nutzen [2].

1. COBOTS

1.1. Was ist ein Cobot?

Ein Cobot oder auch kollaborierender Roboter ist ein für die direkte Interaktion mit dem Menschen konstruierter Roboter. Mensch und Roboter arbeiten dabei als Team gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum. Die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter wird allgemein als Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) bezeichnet.

Das MRK-Team verbindet dabei die Flexibilität, kognitive Fähigkeiten und Feinmotorik des Menschen mit den Stärken des Roboters wie Ausdauer, Präzision und Wiederholgenauigkeit. Die Sicherheit des Menschen wird dabei durch eine Reihe von Sicherheitsprinzipien und einer Risikobewertung des Arbeitsplatzes gewährleistet.



Abbildung 3: (links) Roboter UR3 der Firma Universal Robots A/S [3],
(mittig) Roboter LBR iiwa 14 R820 der KUKA AG [3],
(rechts) Roboter APAS assistant der Robert Bosch GmbH [3]

1.2 Welche Interaktionsformen gibt es?

Die Interaktionsformen zwischen Cobot und Mensch lassen sich nach den jeweiligen Arbeitsräumen, der verrichteten Arbeit und den Berührungspunkten in folgende fünf Interaktionsszenarien unterteilen:

- **Zelle:** klassischer Schutzzaunbetrieb, keine Interaktionsmöglichkeit zwischen Mensch und Roboter.
- **Koexistenz:** Mensch und Roboter arbeiten ohne trennenden Schutzzaun nebeneinander, haben allerdings getrennte Arbeitsräume.
- **Synchronisiert:** Mensch und Roboter arbeiten im gleichen Arbeitsraum, allerdings nicht zur gleichen Zeit.
- **Kooperation:** Mensch und Roboter arbeiten gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum, jedoch nicht am selben Objekt.
- **Kollaboration:** Mensch und Roboter arbeiten gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum, am selben Objekt.

Derzeit liegt ein Großteil der implementierten industriellen Anwendungen in den Bereichen »Koexistenz« und »Synchronisiert«. Die Interaktionsformen »Kooperation« und »Kollaboration« bergen hohes Potenzial zur Produktionssteigerung, haben sich jedoch aus Gründen der Sicherheit und mangelnder Systemintelligenz noch nicht in der Industrie etabliert – hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. [4]

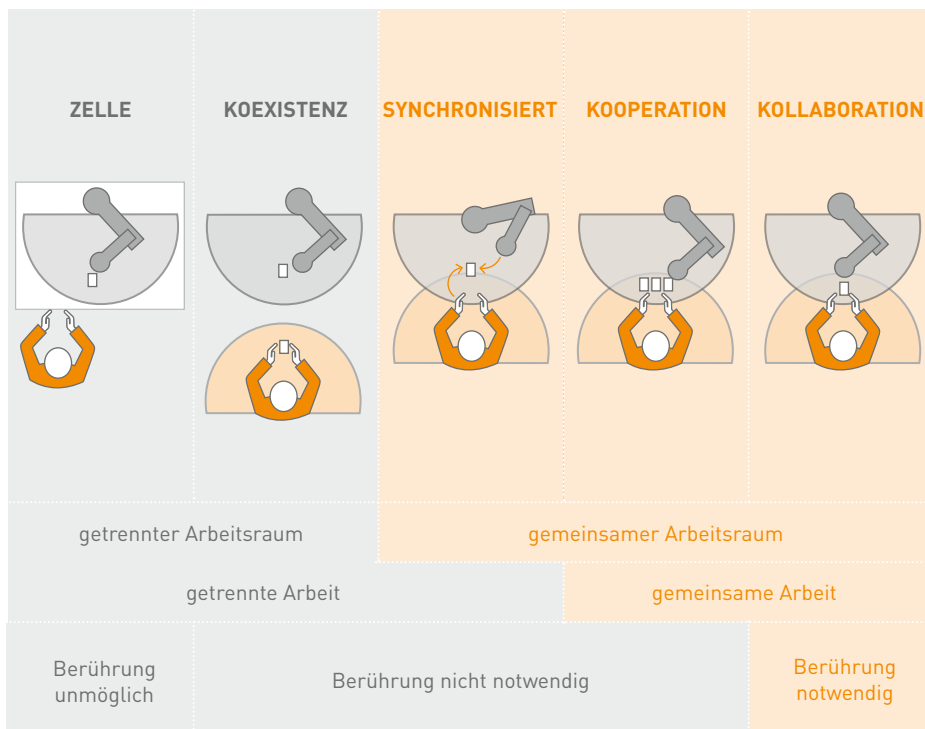


Abbildung 4: Verschiedene MRK-Interaktionsformen [4]

2. TECHNOLOGIEBESCHREIBUNG

2.1 Aufbau

Cobots bestehen, wie auch konventionelle Industrieroboter, aus Armen, die durch Gelenke miteinander verbunden sind. Sie werden über Servomotoren angetrieben. Innerhalb der Gelenke sind Sensoren verbaut, die Kraft, Momente und Geschwindigkeit regeln und durch Begrenzungen dieser für die Sicherheit des Arbeitenden sorgen. Am Flansch des Roboters wird ein Endeffektor angebracht, welcher die Bearbeitung am Werkstück vornimmt. Der Endeffektor unterscheidet sich je nach durchzuführender Tätigkeit und kann beispielsweise ein Greifer, ein Mess- oder ein anderes Werkzeug sein. Der Roboter besitzt eine eigene Steuerung, welche sich häufig über ein Bedienpanel bedienen lässt. Die klassischen Merkmale, nach denen ein Roboter ausgewählt wird, sind seine maximale Reichweite, die Wiederholgenauigkeit, das maximale Handhabungsgewicht, die maximale Ausführgeschwindigkeit, sowie die Sensitivität der verbauten Kraft- und Momentensensorik. Bei Cobots nimmt außerdem die Bedienerfreundlichkeit und die Einfachheit der Programmierung und des Teachens einen wachsenden Stellenwert ein. Mitarbeitende sollen hierdurch in der Lage sein, Cobots ohne tiefe Vorkenntnisse und ohne Unterstützung durch Experten schnell in Betrieb zu nehmen und ebenso für neue Aufgaben anzupassen.

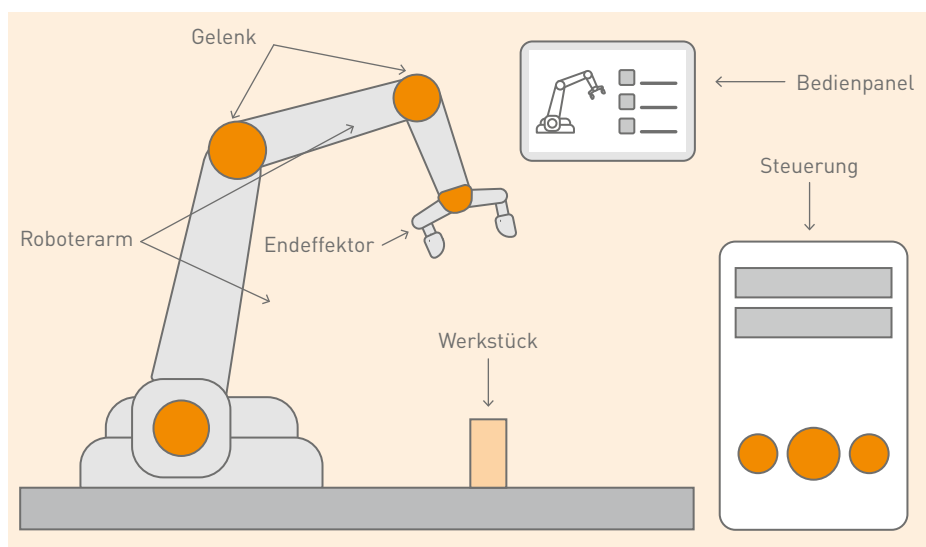


Abbildung 5: Komponenten eines Cobot-Systems – eigene Darstellung

2.2 Endeffektor

Endeffektoren zählen zur Peripherie für einen Cobot und bilden das Bindeglied zwischen dem Roboter und dem Werkstück. In der Industrie werden eine Vielzahl verschiedener Endeffektoren verwendet, am häufigsten sind das Greifer, welche beispielsweise in der Montage Teile bereitstellen, festhalten oder in Einzelfällen auch fügen können. Im Vergleich zu konventionellen Industrierobotern ergeben sich für Greifer im MRK-Einsatz einige Besonderheiten. Diese müssen für einen sicheren Halt des Werkstücks sorgen, sowie eine Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung haben. Außerdem sorgt eine Leistungs- und Kraftbegrenzung für eine sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen. MRK-Greifer sind zudem einfach zu programmieren und durch universelle Schnittstellen schnell in bestehende Montageprozesse einzubinden. Die Sicherheit des MRK-Greifers muss in der Risikobeurteilung des Gesamtsystems mit einbezogen werden. Hierbei helfen sowohl aktive als auch passive Sicherheitsmaßnahmen.

Aktive Sicherheitsmaßnahmen:

- Aktive Sensorik erkennt und verhindert Druckkräfte beim Schließen des Greifers, wenn Kontakt zu einem Menschen besteht
- Verringerte Geschwindigkeit beim Bewegen von Teilen
- Unkritische Trajektorienplanung z.B. wenn der Endeffektor stets abgewandt vom Mitarbeitenden ist
- Kapazitive Sensoren erkennen Annäherung von Menschen an die mechanische Struktur des Cobots frühzeitig

Passive Sicherheitsmaßnahmen:

- Verringerung der Masse der bewegten Teile
- Abrunden von Kanten und Ecken des Greifers
- Vergrößerung der potenziellen Kontaktflächen
- Verwendung von Polsterungen oder nachgiebigen Gelenken

Arten von Endeffektoren

Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der Industrie gibt es neben den am häufigsten verwendeten Zwei- oder Dreibacke-Greifern viele weitere Endeffektoren, die je nach Einsatzzweck sinnvoll sein können. Die Greiffinger bzw. Greifbacken spielen eine wichtige Rolle bei der Wahl des richtigen Greifers, da diese häufig an die Bauteilform angepasst werden müssen. Manche Greifer bieten daher die Möglichkeit selbst entworfene Greiffinger anzubringen, z.B. 3D-gedruckte Greiffinger. Reicht ein einzelner Greifer nicht aus, besteht die Möglichkeit einen Dual-Gripper einzusetzen, also zwei Greifer an einem Roboter oder eine Greiferwechselsystem. Mit einem Greiferwechselsystem kann während des Prozesses vollautomatisiert zwischen mehreren Greifern gewechselt werden. In folgender Tabelle werden einige Greifarten nach dem physikalischen Wirkprinzip sowie Greifsystem und andere Endeffektoren gelistet:

Greifarten		Greifsysteme	
phys. Wirkprinzipien	Greifer		
 Mechanische Greifer	Parallelgreifer	Dualgripper	
	Gelenkfingergreifer		
 Pneumatische Greifer	Vakuumsauger	Greiferwechselsystem	
	Membrangreifer		
 Elektrische Greifer	Elektromagnetgreifer	andere Endeffektoren	
	Elektrostatische Greifer	Additiv gefertigte Greiferbacken	
 Adhäsive Greifer	Kapillargreifer	Schrauber	
	Klebstoffgreifer	Schweißsystem	

3. SICHERHEIT

Die Sicherheitstechnik für Cobots ist in der DIN ISO/TS 15066:2017-04 definiert und umfasst Themen für die Anforderungen bei der Leistungs- und Kraftbegrenzung, die inhärente Sicherheit durch angepasste Konstruktion und Steuerung sowie die Auswahl geeigneter Sicherheitstechnik für den Arbeitsplatz. Zusätzlich wurden nach DIN EN ISO 10218-1:2006-06 2006 weitere Sicherheitsprinzipien für die Mensch-Roboter-Kollaboration definiert.

Sicherheitsprinzipien:

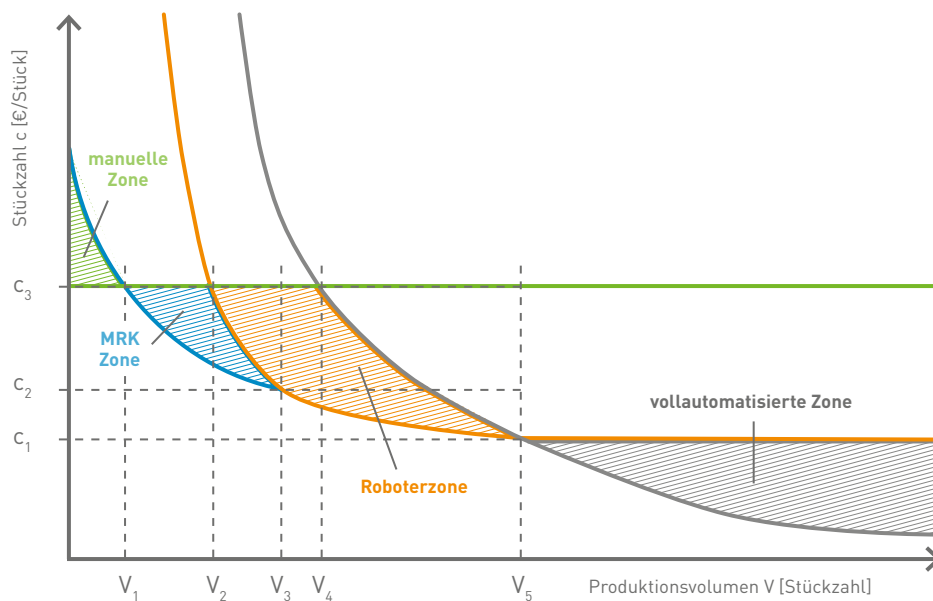
- **Stopp:** Sicherheitszone im Nahbereich des Roboters wird überwacht. Wenn der Mensch in den Sicherheitsbereich kommt, stoppt der Roboter. Wenn der Mensch die Zone verlässt, arbeitet er weiter.
- **Handführung:** Mensch führt den Roboter durch Anfassen am Werkzeug. Freigabe durch Zustimmungstaster.
- **Abstandsüberwachung:** Dynamische Sicherheitszone um den Roboter, die den relativen Abstand zwischen bewegten Roboterteilen und Mensch misst.
- **Kontaktregelung:** Kontakt mit dem Roboter ist durch Design oder Steuerungstechnik soweit abgeschwächt, dass er dem Menschen keinen Schaden zufügt. Die Kollisionskraft des Roboters wird dabei gegen einen Toleranzwert abgeglichen. Bei Überschreiten des Toleranzwertes greift eines der vorherigen Schutzprinzipien. [3]

Im Allgemeinen fallen Roboter ebenfalls unter die Zuständigkeit der EU-Richtlinie für grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Maschinenanlagen und benötigen deshalb eine Risikobeurteilung nach der DIN EN ISO 12100:2011-03 2011.

4. WARUM MRK?

Die MRK ist ein neues Automatisierungsparadigma, das sich in den letzten 10 Jahren aufgrund des wachsenden Trends von der Massenfertigung zur Massenspezialisierung entwickelt hat. Wie in folgender Abbildung qualitativ dargestellt, ist die MRK für kleinere Losgrößen (zwischen V1 und V3) eine wirtschaftliche Variante der Herstellung – es ergibt sich eine »Sweet Zone«. Für Unternehmen, die entweder Stückzahlschwankungen bei einem bestehenden Produkt beobachten oder ihre Montagesysteme für die zukünftigen Produkte planen ist MRK zielführend.

Daraus ergibt sich die Herausforderung, welche »Art und Tiefe« der Automatisierung in der Spannweite manueller bis vollständig autonomer Montage gewählt wird. Je nach Ausprägung ist einerseits der investive Initialaufwand hoch (Vollautomatisierung) und es drohen hohe Stückkosten bei nicht abgerufenen Produktionszahlen. Andererseits ist der Anteil der Lohnkosten bei einer rein manuellen Montage im Vergleich sehr hoch. Die MRK bietet hierbei die Möglichkeit der kostengünstigen Flexibilisierung im beschriebenen Stückzahl-dilemma.



Gewinnschwellen

- V_1 : MRK = manuell
- V_2 : Roboter = manuell
- V_3 : Roboter = MRK
- V_4 : vollautomatisiert = manuell
- V_5 : vollautomatisiert = Roboter

- manuelle Montage
- Mensch-Roboter-Kollaboration
- Roboterautomatisierung
- Vollautomatisierung

Abbildung 6: Die »Sweet Zone« der MRK als wirtschaftlichste Herstellungsmethode [5]

Im Vergleich zur Vollautomatisierung und der manuellen Montage ergeben sich diverse Vor- und Nachteile der MRK, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Tabelle: Vor- und Nachteile der MRK gegenüber der Vollautomatisierung und der manuellen Montage. [3]

	Vorteile von MRK	Nachteile von MRK
gegenüber manueller Montage	<ul style="list-style-type: none"> + konstante Produktqualität + Unabhängigkeit von Personal + erhöhte Ergonomie 	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Investitionen für Roboter - Renditenforderungen (Ergonomie) - verschärftes Sicherheitskonzept
gegenüber Vollautomatisierung	<ul style="list-style-type: none"> + Nicht-Automatisierbarkeit von Teilprozessen + keine aufwändige Zuführung + reaktive Fähigkeiten des Menschen 	<ul style="list-style-type: none"> - Lohnkosten für den Menschen - aufwändige Arbeitsablaufplanung - verschärftes Sicherheitskonzept

5. WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

MRK stellt hinsichtlich des Verhältnisses von variablen und fixen Stückkosten einen Mittelweg im Vergleich zur rein manuellen und vollautomatischen Montage dar (Abbildung 7). Damit muss eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit von MRK auch immer im Vergleich zu diesen beiden Alternativen erfolgen. Durch den Einsatz des Roboters können, im Vergleich zur manuellen Montage, die variablen Kosten für den Werker gesenkt werden. Im Vergleich zur Vollautomatisierung sind die Fixkosten für die Automatisierungstechnik bei einer MRK geringer.

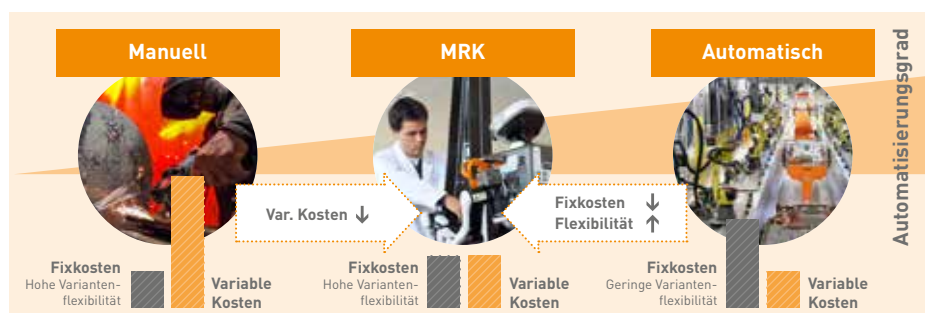


Abbildung 7: MRK als Mittelweg zwischen manueller Montage und Vollautomatisierung [3]

Das Grundproblem eines wirtschaftlichen Einsatzes von MRK stellt die Kombination aus Investitionen in Automatisierungstechnik in Verbindung mit zusätzlichen variablen Kosten für den Menschen dar. Die Gestaltung der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter ist daher die wichtigste Aufgabe bei der Planung von MRK-Arbeitsplätzen. Die Anwendung von MRK ist nur dann rentabel, wenn Mensch und Roboter einen Großteil ihrer Zeit wertschöpfend am Produkt arbeiten. [3]

Wirtschaftliche Vorteile von MRK gegenüber Vollautomatisierung sind ...

- ... geringerer Flächenbedarf durch Wegfallen sonst notwendiger Sicherheitsabstände zu den Anlagen.
- ... erhöhte Ergonomie durch die Kombination der Stärken des Menschen und des Roboters.
- ... verbesserte Intuitivität, da kleinere Änderungen direkt durch den Menschen erfolgen können.
- ... verringerte Aufwände für Peripherie, da trennende Schutzeinrichtungen und vollautomatische Vereinzelungs- und Zuführtechnik wegfallen.
- ... vereinfachte Prozessabsicherung, da der Mensch als Problemlöser fungieren kann.

5.1 Lebenszyklusansatz

Um die Wirtschaftlichkeit einer Roboteranlage über seinen kompletten Lebenszyklus hinweg abzubilden, hat sich die Methode des Life-Cycle-Costing (LCC) etabliert. Beim LCC werden die Kosten einer Anlage in den einzelnen Phasen ihres Lebenszyklus transparent dargestellt (Abbildung 8). Anhand des Net Present Value (NPV) kann dadurch die Amortisationszeit einer Roboteranlage berechnet werden (Zeitspanne bis zu einem NPV von Null). Diese Amortisationszeit ist aufgrund der schwierigen Umrüstbarkeit von klassischen Roboteranlagen meist auf eine Zeitspanne von zwei bis drei Jahren festgesetzt. MRK-Anlagen werden deshalb bei der Lebenszyklusbetrachtung im Vergleich zu vollautomatisierten Anlagen häufig als zu negativ

dargestellt, da ihre hohe Universalität und deutlich längere Lebensdauer nicht mit in die Bewertung einfließen. [3]

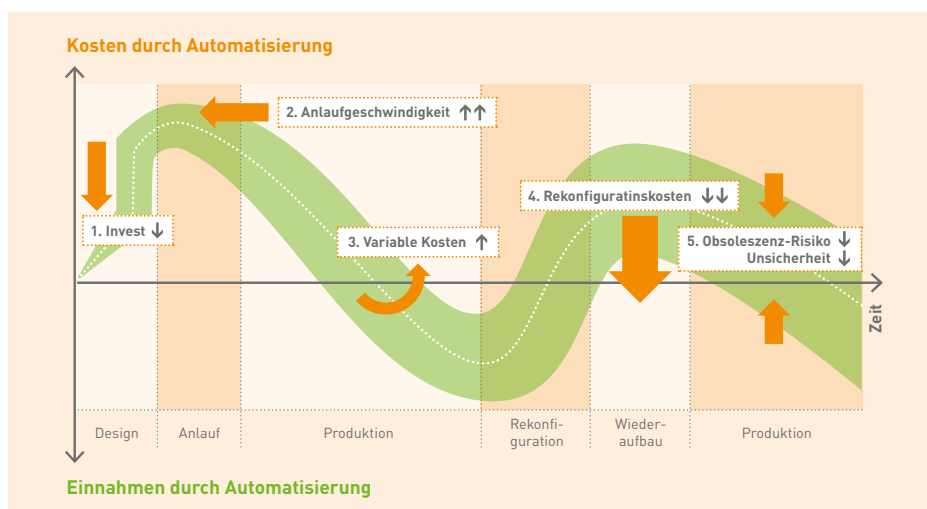


Abbildung 8: Entwicklung des Net Present Value (NPV) über den Lebenszyklus einer Roboteranlage und Potenziale durch MRK. [3]

Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus der Roboteranlage sind ...

- ... kürzere Time-to-Market der Produkte, da die technische Gestaltung der Anlage einfacher ist als bei einer Vollautomatisierung.
- ... günstigere Umrüstung der Anlage auf neue oder geänderte Produkte.
- ... geringeres Obsoleszenz-Risiko der Anlage im Vergleich zur Vollautomatisierung.

Daraus abgeleitet werden Randbedingungen und Einsatzgrenzen von Cobots sichtbar:

RANDBEDINGUNGEN UND EINSATZGRENZEN

Cobots eignen sich für:



... die (Teil-)Automatisierung von Montageprozessen.

... Montageprozesse mit hoher Variantenvielfalt.

... die Steigerung der Ergonomie in Montageprozessen.

Cobots eignen sich nicht für:



... Anleitung zur Risikobeurteilung von hybriden Arbeitsplätzen.

... das Aufbringen hoher Kräfte auf das Bauteil.

... hohe Geschwindigkeiten im Arbeitsraum des Menschen.

In diesem Leitfaden ist das hybride Team bestehend aus Mitarbeitenden, Cobot und Assistenzsystem Gegenstand der Betrachtung. Insbesondere »smarte« Assistenzsysteme wie z.B. die Nutzung von Datenbrillen oder Projektionssystemen (»Pick-by-Light«) erfreuen sich steigender Beliebtheit in der Produktion. Der nun folgende Abschnitt beleuchtet einzelne Technologien, grenzt sie voneinander ab und definiert Einsatzgebiete und Grenzen.

6. ASSISTENZSYSTEME

6.1 Was ist ein Assistenzsystem?

Assistenzsysteme können die Arbeit der Beschäftigten und die Prozesse in der Montage, aber auch deren angrenzende Bereiche nachhaltig verändern. Gerade im vierten industriellen Wandel gewinnen assistierende Systeme bei der manuellen Montage stetig an Bedeutung, um so die digitale Transformation eines Unternehmens voran zu bringen. Viele Technologien haben heute schon einen Fortschritt erreicht, der den Einsatz bei komplexen Montageaufgaben möglich macht, so werden z.B. Kamera- und Projektionssysteme für die Qualitätskontrolle eingesetzt. Das folgende Kapitel verschafft einen Überblick, um die Auswahl eines geeigneten Assistenzsystems zu erleichtern. Der Fokus liegt hierbei auf optischen Assistenzsystemen, welche den Menschen kognitiv unterstützen, um so die Handlung der Mitarbeitenden im Sinne der Produktionsoptimierung, Nutzung von Informationen positiv zu beeinflussen.

6.2 Klassifikation

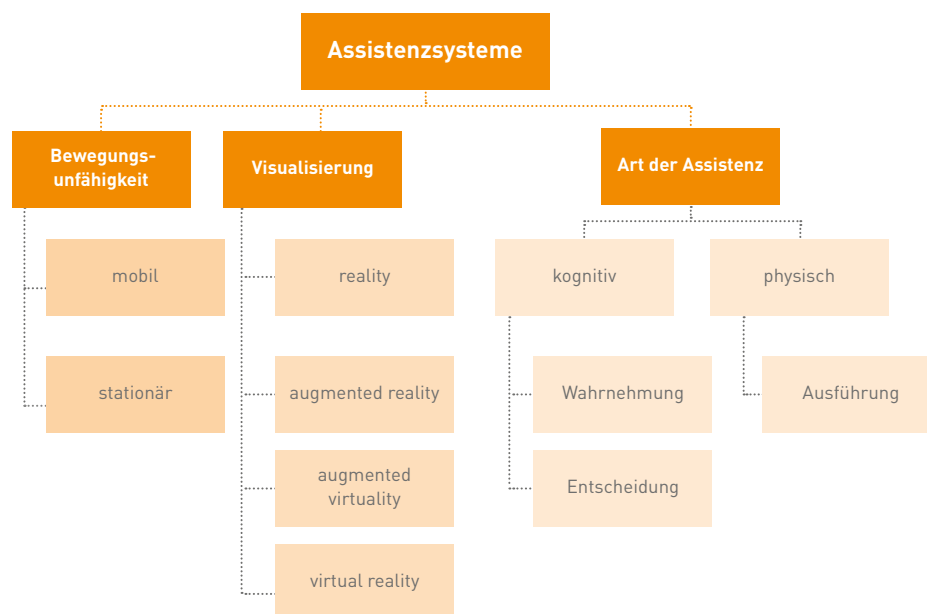


Abbildung 9: Klassifikation von Assistenzsystemen – eigene Darstellung

7. UNTERTEILUNG NACH MOBILEN UND STATIONÄREN SYSTEMEN

7.1 Mobile Systeme

Die ortsveränderliche Verwendung von Assistenzsystemen ist ein wichtiger Aspekt bezüglich Mobilität und Flexibilität. Mobile Assistenzsysteme bieten die Möglichkeit des Einsatzes ohne Aufbau bzw. zusätzlich Verkabelung und Infrastruktur. Wearables, am Körper getragene

Systeme wie z.B. Datenbrille oder Smartwatches, zählen u.a. zu mobilen Assistenzsystemen und sind speziell für Tätigkeiten ausgelegt, bei denen beide Hände der Mitarbeitenden für Primärtätigkeiten frei sind. Folgende Beispiele sind mobile Endgeräte, die im industriellen Kontext zum Einsatz kommen: [6]



Abbildung 10: Datenbrille als mobiles Assistenzsystem [7]

7.2 Stationäre Systeme

Bei stationären Assistenzsystemen handelt es sich um ortsfeste, in einen Arbeitsprozess integrierte Technologien, welche nur mit hohem Aufwand an einem anderen Ort nutzbar sind. [6]

Beispiele für stationäre Assistenzsysteme sind projektionsgestützte Assistenzsysteme, intelligente Bildverarbeitungssysteme oder Kamera-Projektionssysteme (eine Kombination aus beiden). Diese Systeme bieten bei stationären Montageplätzen eine Alternative zu mobilen Geräten, da sie die Bewegungsfreiheit und das Sichtfeld der Werkenden nicht beeinträchtigen. [8]

Projektionsgestützte Assistenzsysteme

Individuell konfigurierbare Montageassistenzsysteme, die den Mitarbeitenden mit Pick-by-Light-Funktion, Markierungs- bzw. Positionierungsdarstellungen und Darstellungen von Text-, Bild- und Videoinhalten bei seiner Tätigkeit unterstützen. [9]



Abbildung 11: Projizierte Montageanweisungen, KLT (Kleinladungsträger)-Erkennung

Intelligente Bildverarbeitungssysteme

- **Applikationsspezifische Bildverarbeitungssysteme:** Einsatzbereite Systeme, welche für einen spezifischen Anwendungsbereich konzipiert sind.
- **Konfigurierbare Bildverarbeitungssysteme:** Vielseitig einsetzbare Systeme, die häufig vom Anwendenden selbst über ein grafisches Benutzerinterface an die entsprechende Anwendung angepasst werden können.

- **Intelligente Kameras:** Bildverarbeitungssystem mit Auswerteeinheit, welche flexibel für verschiedene Aufgaben programmierbar sind.
- **Vision Sensoren:** Gesamtsystem, welches im Gegensatz zur intelligenten Kamera nur für eine bestimmte Applikation ausgelegt ist. [10]

Kamera-Projektionssysteme

- Individuell konfigurierbare Montageassistenzsysteme, die den Mitarbeitenden mit Pick-by-Light-Funktion, Markierungs- bzw. Positionierungsdarstellungen und Darstellungen von Text-, Bild- und Videoinhalten bei ihrer Tätigkeit unterstützen.
- Integriertes Kamerasystem zur Montagekontrolle und Objekterkennung.
- Mit Kamera und Projektor lassen sich virtuelle Buttons auf der Arbeitsfläche erzeugen und Feedback aus dem Prozess zu. [11]



Abbildung 12:
Ein Kamera-Projektionssystem als stationäres Assistenzsystem [11]

8. KERNBEREICH VIELER ASSISTENZSYSTEME IST DIE VISUALISIERUNG

Assistenzsysteme können in verschiedenen Bereichen des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums eingeordnet werden. Es stellt das gesamte Spektrum zwischen den beiden Endpunkten »Realität« und »Virtualität« sowie die dazwischenliegenden Übergänge dar. [12]

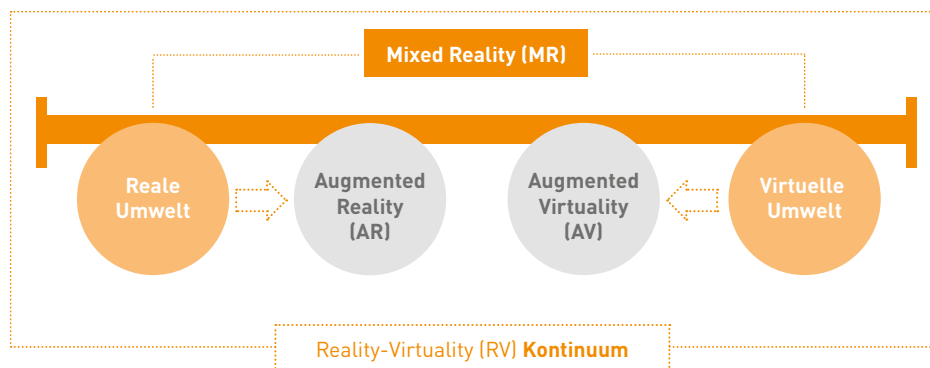


Abbildung 13: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram und Kishino (1994, 283). [12]

Mit dem Begriff Mixed-Reality wird ein Kontinuum bezeichnet, das zwischen virtueller und realer Welt verläuft. In einer Mixed-Reality-Umgebung werden virtuelle Informationen in eine physikalische Umgebung eingeblendet und die Trennung von realer und virtueller Welt aufgehoben. Ausgehend von der realen Welt nimmt der Grad der virtuell dargestellten Inhalte im Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach rechts hin zu, bis mit dem Begriff Virtual Reality eine rein virtuelle Welt definiert wird. [13]

Die Randbereiche reale und virtuelle Welt zählen jedoch nicht zur Mixed Reality. Die Ausprägungsformen AR und AV stellen im Kontinuum die beiden Mischbereiche dar. Unter Augmented Reality wird die Überlagerung der Realität mit virtuellen Inhalten in Form von Texten, Bildern, Videos bis hin zu komplexen, interaktiven 3D-Modellen verstanden. Dabei ist die Abgrenzung zu Augmented Virtuality fließend. Mit dem Begriff Augmented Virtuality wird das Einbinden realer Gegenstände in eine virtuelle Umgebung verstanden. [14]

8.1 Unterteilung nach Art der Assistenz

Kognitionsunterstützende Assistenzsysteme zur echtzeitnahen Informationsbereitstellung sind auf die funktionale Hilfe der Reaktions-, Denk-, Merk- und Schlussfolgerungsfähigkeit des Menschen ausgerichtet. Die Führung von Mitarbeitenden oder Kontrolle durch ein Assistenzsystem bietet bei einer variantenreichen und komplexen Montage die Möglichkeit einer Produktivitätssteigerung bei einer flexiblen Produktion und gleichbleibender Qualität. [9]

Je nach Baugruppe, Montageablauf und Anwendung können die Anforderungen an ein Assistenzsystem unterschiedlich ausfallen. Die Mitarbeitenden sollen bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten gezielt durch Verringerung der mentalen Belastung unterstützt werden. Assistenzsysteme für Montagezwecke in der Produktion lassen sich in Anlehnung an die menschliche Informationsverarbeitung in nachfolgender Darstellung kategorisieren. [15]

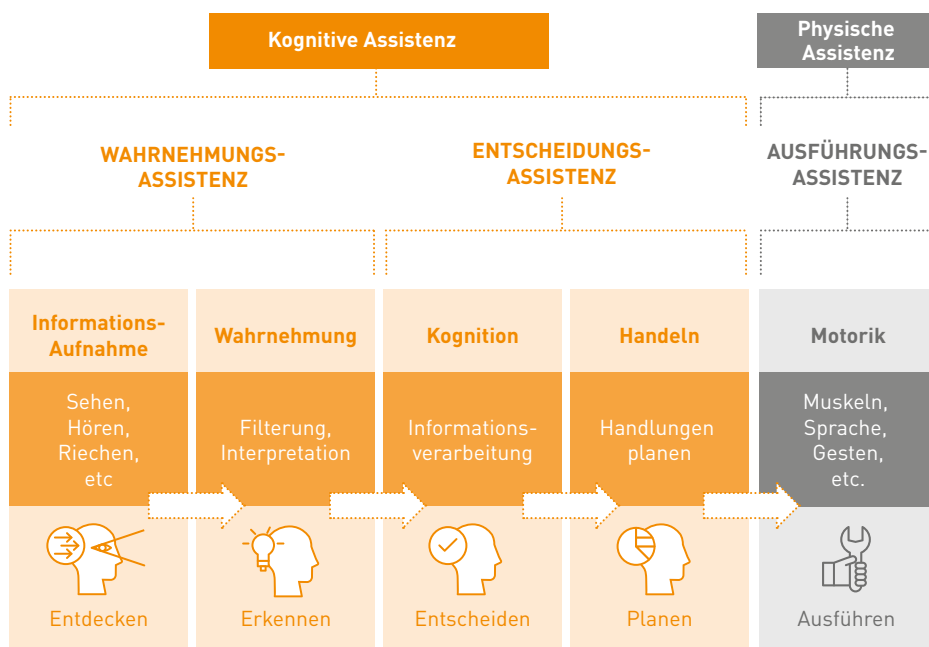


Abbildung 14: Kategorisierung von Assistenzsystemen in der Montage [15]

Bei der Kategorisierung aus Abbildung 14 wird grundsätzlich nach kognitiver und physischer Assistenz unterschieden. Eine spezifischere Abstufung der kognitiven Assistenz untergliedert

sich in **Wahrnehmungs- und Entscheidungsassistentz**, bei der physischen Assistenz in **Ausführungsassistentz**. Optische Assistenzsysteme sind in die Kategorie der kognitiven Assistenz einzuordnen [15].

Wahrnehmungsassistentz

Mit dieser Art der Assistenz werden die Werkenden bei der Aufnahme von Informationen und der Wahrnehmung, also Interpretation der Informationen, unterstützt. Relevant ist bei optischen Assistenzsystemen speziell die visuelle Wahrnehmung des Menschen. Durch gezielte Darstellung der Informationen können Kommissionier- oder Montagetätigkeiten optimiert werden, bei gleichzeitiger kognitiver Entlastung des Menschen. Die Informationsbereitstellung des Assistenzsystems kann durch direkte Projektion auf die Arbeitsfläche oder mittels Anzeige auf einem Display bzw. Monitor erfolgen. Dies kann in Form von Texten, Bildern, Videos etc. geschehen. Auch farbige Markierungen und Umrahmungen zur richtigen Platzierung oder Entnahme von Bauteilen sind möglich (Pick-by-Light). Gerade bei einer großen Variantenvielfalt eines Produktes kann durch ein derartiges Assistenzsystem ein großer Nutzen erzielt werden [15].

Entscheidungsassistentz

Diese Art von Assistenzsystem unterstützt gezielt die Lern- und Problemlösungsprozesse der Mitarbeitenden, also die kognitiven Fähigkeiten. Hierbei ist es wichtig, das richtige Maß an Informationen bereitzustellen, damit der Mensch entsprechend reagieren und Entscheidungen treffen kann. Es sollten nur so viele Informationen wie nötig bereitgestellt werden, da bei einer Informationsflut die Gefahr der Überforderung besteht. Durch diese Art der Unterstützung sind Prozessabläufe einfach nachvollziehbar und es kann flexibel auf Änderungen reagiert werden. Weiter bietet ein Assistenzsystem mit Entscheidungshilfe einen enormen Vorteil beim Einlernen neuer Mitarbeitenden oder Montagesequenzen, ohne zusätzliches Personal. Ein weiterer Vorteil ist eine einfache Anpassung des Montageablaufes aufgrund von Änderungen am Produkt oder am Montageprozess [15].

Ausführungsassistentz

Hierbei handelt es sich um die physische Unterstützung der Werkenden bei Montagetätigkeiten. Gezielt soll beim Ausführen von Tätigkeiten die Belastung des Menschen reduziert und eine körperliche Langzeitbelastung vermieden werden [15].

Weitere Assistenzsysteme, die eine physische Unterstützung bieten, wie bspw. Exo-Skelette zur Entlastung von Mitarbeitenden sind nicht Gegenstand dieses Leitfadens.

9. INTERAKTIVE, DIGITALE UND KOGNITIVE ASSISTENZSYSTEME

9.1. Was sind ...

... interaktive Assistenzsysteme?

Unter interaktiven Assistenzsystemen (IAS) wird ein Endgerät oder ein Wearable-Computer (ein am Körper getragenes Computersystem) verstanden, der mit einer Rückkopplungseinheit an die Anwendenden angebunden ist. Die Rückkopplungseinheit dient zur Ausgabe von visuellen, akustischen und auch haptischen Informationen an die Anwendenden. Interaktive Assistenzsysteme gewährleisten eine Verarbeitung aller relevanten Daten in Echtzeit und wirken als Verstärker der menschlichen Fähigkeiten. Somit ist eine schnelle Entscheidungsfindung des Nutzenden möglich, sowie effiziente

Arbeitsabläufe trotz erhöhter Komplexität. Interaktive Assistenzsysteme müssen für eine schnelle Kommunikation im cyberphysischen System eingebunden sein. Sensoren bilden die Schnittstelle zwischen der virtuellen und realen Welt. [16]

... digitale Assistenzsysteme?

Unter digitalen Assistenzsystemen wird eine interaktive Informations- und Kommunikationstechnologie verstanden, die bei bestimmten Tätigkeiten unterstützt. Sie geben arbeitsbezogene Informationen an den Anwendenden aus und können bei Bedarf relevante Daten von einer verbundenen Datenbank oder Maschine in Echtzeit abrufen, verarbeiten oder vermitteln. [6]

... kognitive Assistenzsysteme?

Im Unterschied zum Abschnitt »Unterteilung nach Art der Assistenz« wird der Begriff »kognitiv« hier auf das Assistenzsystem selbst assoziiert. Kognitive Assistenzsysteme unterscheiden sich durch kognitive Kontrollmechanismen und Fähigkeiten von anderen technischen Systemen und sind mit künstlichen Sensoren und Aktoren ausgestattet. Diese Art von Assistenzsystemen ist in physischen Systemen integriert und agiert in der realen Umgebung. Kognitive Kontrollmechanismen lernen aus bestehenden Daten situative Verhaltensweisen zu adaptieren und können daher Fähigkeiten der Wahrnehmung, Schlussfolgerung und Planung übernehmen. [16]

Ein kognitives System ...

- ... kann Schlüsse ziehen.
- ... kann aus seinen Erfahrungen lernen.
- ... kann seine Aufgabe erlernen.
- ... ist sich seiner eigenen Fähigkeiten bewusst und kann diese im Rahmen seines Verhaltens beachten.
- ... kann robust auf unvorhergesehene Situationen reagieren. [16]

RANDBEDINGUNGEN UND EINSATZGRENZEN

Assistenzsysteme eignen sich für:



... die kognitive Unterstützung von Beschäftigten.

... den Einsatz zum Einlernen neuer Montagesequenzen.

... Montageprozesse mit hoher Variantenvielfalt und komplexen Montageinhalten.

Assistenzsysteme eignen sich nicht für:



... die Verbesserung der Ergonomie.

... eine aktive Verbesserung der Arbeitssicherheit.

10. GEFAHREN UND RISIKEN

Abhängig von konkreten Tätigkeiten bei Montageprozessen sind Gefahren und Risiken noch unbekannt. Daher sind vor dem Einsatz von Assistenzsystemen die entwicklungsbegleitende Beobachtung und Dokumentation aller Risiken notwendig.

Einige bekannte Risiken beim Einsatz von Assistenzsystemen sind nachfolgend gelistet [6]:

- Fehlbeanspruchung der Augen
- Ergonomische Verwendung bei mobilen Assistenzsystemen zu einem Großteil vom Nutzungsverhalten abhängig
- Fehlhaltungen
- Eingeschränktes Sichtfeld
- Ablenkung
- Vermehrte Arbeitsunterbrechungen
- Subjektiv wahrgenommener, erhöhter Arbeitsstress
- Schlechtere selbstberichtete Gesundheit

Vorgehen beim Aufbau hybrider Arbeitsplätze

Das nachfolgende Kapitel bietet eine Handlungsanweisung für die systematische Planung und Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen, bestehend aus Mensch, Roboter und Assistenzsystem. Dieses Vorgehen bietet Hilfestellung bei der Ermittlung hybrider Arbeitssequenzen aus bestehenden manuellen Montageschritten und bei der Neuplanung von hybriden Montageprozessen. Das Vorgehen ist als ein iterativer Prozess gestaltet, der nach Bedarf weitere Durchläufe erlaubt. Am Ende jedes Planungsschrittes kann anhand einer Checkliste überprüft werden, ob zusätzliche Iterationen nötig sind.

Das Vorgehen wird in diesem Leitfaden von relevanten Fragestellungen begleitet. Diese dienen der Orientierung und als Anreiz für weitere Denkanstöße. Im Anschluss an dieses Kapitel wird die vorgeschlagene Methodik anhand eines Umsetzungsbeispiels anschaulich dargestellt.

Die Bezeichnung »hybride Montage« wird meist im industriellen Umfeld für die Kombination aus Handarbeitsplätzen und Automatikstationen verwendet und strebt eine Teilautomatisierung an [1]. Der hier beschriebene Arbeitsplatz, an welchem Mensch, Roboter und Assistenzsystem gemeinsam während des Montageprozesses interagieren, führt ebenfalls zu einer Teilautomatisierung. Er wird daher in diesem Leitfaden als »hybrider Montagearbeitsplatz« bezeichnet.



Abbildung 15: Methodik zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze

1. PROJEKTRAHMEN

In der ersten Phase wird der Projektrahmen definiert, welcher dem Gesamtprozess einen roten Faden vorgibt. Hier wird die Ausgangssituation des zu betrachtenden manuellen Montageprozesses und der zu montierenden Baugruppen analysiert. Anschließend werden Anforderungen und Projektziele für den hybriden Montageprozess definiert.

1.1 Ausgangssituation analysieren und Anforderungen definieren

Fragen:

Welche Anforderungen müssen die Systemkomponenten erfüllen?

Welche Anforderungen werden an den hybriden Arbeitsplatz gestellt?

Gibt es bereits vorhandene Lösungsansätze, die genutzt werden können?

Antworten:

Welche Anforderungen müssen die Systemkomponenten erfüllen?

Die Vorüberlegungen dienen einer ersten Vorauswahl bezüglich Cobot, Assistenzsystem und weiteren Komponenten wie z.B. Montagehilfen und Transportsystemen. Bei einer Neuplanung des Arbeitsplatzes müssen neue Systemkomponenten beschafft werden, während bei einer Umwandlung eines vorhandenen Arbeitsplatzes die Möglichkeit besteht, Komponenten weiterzuverwenden oder anzupassen.

Die Anforderungen an den Cobot richten sich in erster Linie an die Reichweite, Traglast und Präzision. Aber auch Schnittstellen zu anderen Systemen sollten Berücksichtigung finden. Für die Entscheidung, welches Assistenzsystem gewählt wird, muss der Anwendungsbereich bzw. der erwartete Mehrwert festgelegt werden. Dies kann z.B. eine Mitarbeitendenführung durch den Montageprozess oder eine Montagekontrolle zur Minimierung der Fehlerquote und Qualitätssteigerung sein. Grundsätzlich müssen bei allen Systemkomponenten von vornherein die nötigen Sicherheitsvorschriften in Betracht gezogen werden, gerade im Hinblick auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration. Eine ausreichende Energieversorgung und eine Netzwerkanbindung können weitere mögliche Anforderungen an die Arbeitsplatzumgebung sein.

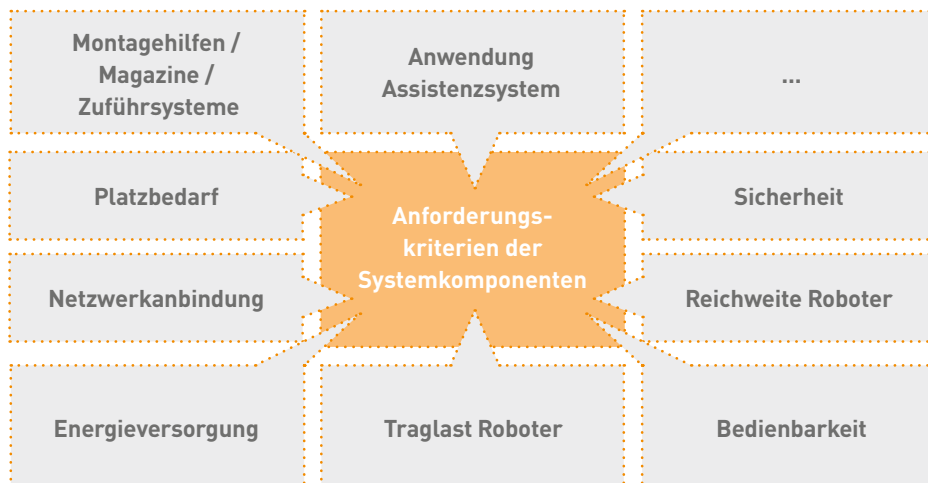


Abbildung 16: Mögliche Anforderungskriterien an die Systemkomponenten – eigene Darstellung

Welche Anforderungen werden an den hybriden Arbeitsplatz gestellt?

Sind die Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten definiert, erfolgt die Beschreibung allgemeiner Anforderungen an den hybriden Arbeitsplatz. Dies können beispielsweise die maximale Nutzungsdauer, der Automatisierungsgrad oder die Amortisationszeit des hybriden Montagesystems sein. Hierbei sollte bedacht werden, dass die maximale Nutzungsdauer eines hybriden Arbeitsplatzes aufgrund der Wiederverwendbarkeit der Systemkomponenten meist über die Produktlaufzeit einzelner Produkte hinausgeht (siehe S. 24 – Wirtschaft-

lichkeitsbetrachtung). Daher kann auch die Erhöhung des Automatisierungsgrades von bestehenden Montagearbeitsplätzen bei gleichzeitiger Erhaltung der Anpassungsfähigkeit des Arbeitsplatzes auf neue Produkte und Varianten durch einen hybriden Arbeitsplatz realisiert werden.

Gibt es bereits vorhandene Lösungsansätze, die genutzt werden können?

Eventuell können bereits teilautomatisierte Montagesequenzen oder vorhandene Systemkomponenten eingebunden werden. Dies kann die Einführung einer weiteren Komponente erleichtern, aber auch neue Herausforderungen für die Umsetzung eines hybriden Arbeitsplatzes mit sich bringen. Es bietet sich an, vor allem bestehende Magazine, Montagehilfen oder Zuführsysteme für eine mögliche Weiterverwendung zu überprüfen.

1.2 Potenzialanalyse

Fragen:

Was ist hier mit einer Potenzialanalyse gemeint?

Ist das Gewicht des Bauteils für einen Cobot bzw. Greifer handhabbar?

Ergeben sich durch Bauteileigenschaften Gefahren für den Menschen?

Lässt die Formstabilität des Bauteils eine Automatisierung zu?

Antworten:

Was ist hier mit einer Potenzialanalyse gemeint?

Die Potenzialanalyse zum Einsatz von Cobots in der Montage beschränkt sich an dieser Stelle auf einen pragmatischen Ablauf zur Potenzialabschätzung der zu montierenden Baugruppe. Die Integration von Cobots in der industriellen Montage ist insbesondere vor dem Hintergrund der hohen Spezialisierung in Montageprozessen eine Herausforderung. Diese macht es gleichsam anspruchsvoll Handlungsempfehlungen einerseits abzuleiten und andererseits zu verallgemeinern. Im Gegensatz zur klassischen Fertigung, in der Cobots oftmals zur Maschinenbe- und -entschickung eingesetzt werden, sind die Montageeinhalte in Prozessketten und darin eingesetzte Technologien (wie z.B. Schrauben, Kleben, Messen etc.) deutlich komplexer sowie zeitlich und örtlich eng aufeinander abgestimmt.

Eine wirtschaftliche Potenzialabschätzung zur Auswahl eines für die Umrüstung auf MRK geeigneten Montagearbeitsplatzes findet hier nicht statt. Informationen zur wirtschaftlichen Bewertung von hybriden Montagearbeitsplätzen, beispielsweise mit der Methode des Life-Cycle-Costing (LCC), werden allerdings im Kapitel Cobot – Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (S. 24) bereitgestellt.

Eine gesamtheitliche Potenzialbewertung von möglichen MRK-Anwendungen bietet die stufenweise Auswahlstrategie des Fraunhofer Instituts für Industrial Engineering – »Schnelle Ermittlung sinnvoller MRK-Anwendungen«. [17]

Ist das Gewicht der Bauteile für einen Cobot bzw. Greifer handhabbar?

Die Traglast des Cobots und Endeffektors ist ausschlaggebend, ob ein Bauteil überhaupt gegriffen und platziert werden kann. Bei der Festlegung der Mindesttraglast eines Roboters ist das Eigengewicht des Endeffektors zu berücksichtigen, welches der Roboter zusätzlich bewegen muss. Des Weiteren ist die maximale Reichweite des Roboterarms zu beachten und bei der Bestimmung der Traglast mit einzubeziehen. Leichtbauroboter können eine Traglast von 3 kg bis 25 kg aufweisen. Die maximale Traglast ist jedoch nicht im gesamten Arbeitsraum gleich, sondern nimmt zumeist mit zunehmendem Radius ab. [18]

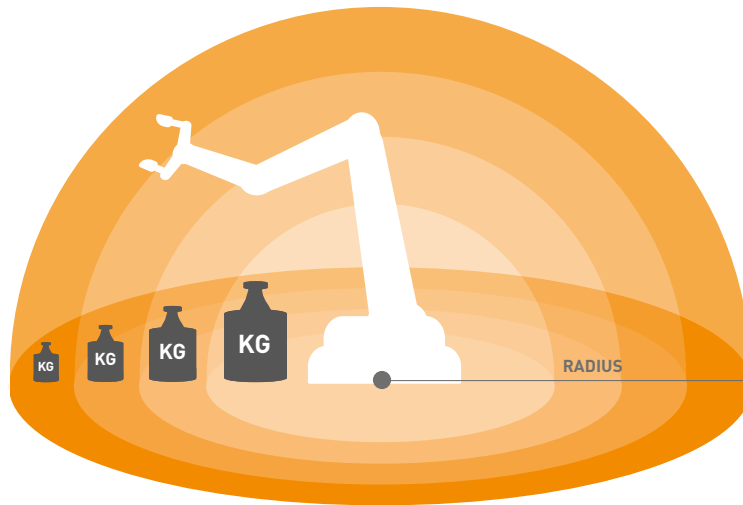


Abbildung 17: Arbeitsraum Roboter – eigene Darstellung

Ergeben sich durch Bauteileigenschaften Gefahren für den Menschen?

Gerade bei kollaborativen Arbeitsschritten muss eine Gefährdung des Menschen durch das Bauteil ausgeschlossen oder auf ein Minimum reduziert werden. Bei einer Kollision mit dem Menschen stellen scharfe Kanten oder spitze Ecken einer Komponente ein erhöhtes Sicherheitsrisiko dar. Eine ausführlichere Betrachtung der Sicherheit wird auf Seite 22 beschrieben. [19]

Lässt die Formstabilität des Bauteils eine Automatisierung zu?

Entscheidend für die Automatisierung einzelner Montageprozesse ist die Form und die Stabilität eines Bauteils. Formstabile Teile lassen sich meist besser von einem Roboter handhaben als formlabile (biegeschlaffe) Teile. Handelt es sich um formlabile Bauteile, wie z.B. Federn, Kabel oder Gummimembrane, ist der Aufwand einer Automatisierung wesentlich höher. Hierfür ist die Montage durch den Menschen weiterhin sinnvoll, während der Roboter parallel andere Tätigkeiten ausführt. [19]

Bei formstabilen Teilen muss eine ausreichende Fläche zum Greifen berücksichtigt werden. Zudem ist die Statik eines Bauteils entscheidend, um durch auftretende Kräfte beim Greifen keinen Schaden zu verursachen. [21]

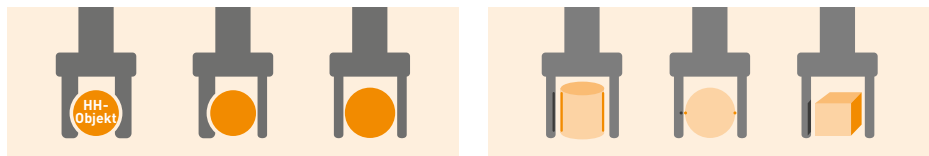


Abbildung 18: (links) Formschluss, Form-Kraftschluss, Kraftschluss, (rechts) Linienkontakt, Punktkontakt, Flächenkontakt

Je nach Greifer kann die Greifkraft variabel eingestellt oder durch individuell angefertigte Greifbacken angepasst werden. In Abhängigkeit der Greifart (Formschluss, Form-Kraftschluss, Kraftschluss) und Kontaktart (Linienkontakt, Punktkontakt, Flächenkontakt) lässt sich die Kraft pro Fläche beeinflussen [21].

1.3 Projektziele definieren

Fragen:

Was sind meine Projektziele und wie bewerte ich sie?

Gibt es ergänzende, konkurrierende oder neutrale Ziele?

Antworten:

Was sind meine Projektziele und wie bewerte ich sie?

Aus den zuvor definierten Anforderungen an den hybriden Arbeitsplatz werden hier konkrete Projektziele und Bewertungskriterien für die Umsetzung definiert. Für die Festlegung dieser Ziele bietet es sich an, einen Kriterienkatalog mit allen Projektzielen zu erstellen. Hierbei sollte eine Einteilung der Ziele nach Muss-, Kann- und Wunschkriterien, sowie nach bestimmten Zielarten (organisatorisch, technisch, wirtschaftlich, personell) erfolgen. [1]

Mögliche Projektziele sind:

- Erhöhung der Qualität
- Erhöhung der Produktivität
- Verbesserung der Ergonomie
- Erhöhung des Automatisierungsgrads
- Akzeptanz durch die Mitarbeitenden
- Verbesserte Wirtschaftlichkeit

Projektziel	Zielart	Verbindlichkeit
Senkung der variablen Kosten um 15 %	wirtschaftlich	muss
Steigerung der Taktzeit um 10 %	wirtschaftlich	muss
Automatisierungsgrad von 60 %	technisch	gewünscht
Steigerung der Ergonomie um 20 %	personell	kann

Abbildung 19: Beispiel Kriterienkatalog – eigene Darstellung

Gibt es ergänzende, konkurrierende oder neutrale Ziele?

Es ist sinnvoll, eigene Ziele nach komplementären, konkurrierenden und indifferenten Zielen zu unterscheiden. Ein Zielsystem, welches auf konkurrierenden Zielen aufgebaut wird, verfeinert durch den Prozess der Kompromissfindung die Kriterien für eine sinnvolle Zielpriorisierung und gibt erste Hinweise für Optimierungsaufgaben.

Ergänzende Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind z.B. ...

- ... Verringerung der Fehlerquote – Senkung der Kosten
- ... höhere Akzeptanz durch den Menschen – kognitive Entlastung

Konkurrierende Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind ...

- ... Verbesserung der Ergonomie – Senkung der Kosten
- ... hohe Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters – einfaches Sicherheitskonzept

Neutrale Ziele bei der Gestaltung von MRK-Arbeitsplätzen sind ...

- ... Verringerung der Fehlerquote – Verbesserung der Ergonomie
- ... Steigerung der Akzeptanz – Steigerung der Qualität

Nachdem die Anforderungen und Projektziele definiert, sowie eine erste Potenzialabschätzung durchgeführt ist, sollten nun erstmals alle beteiligten Betriebsparteien über den hybriden Arbeitsplatz informiert werden (siehe S.53 – Personalschulung durchführen). Es bietet sich an, operative Mitarbeitende und den Betriebsrat frühzeitig mit ins Boot zu holen, um sich deren Unterstützung zu sichern und die Akzeptanz für den hybriden Arbeitsplatz zu erhöhen.

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Anforderungen an hybriden Arbeitsplatz definiert
- Vorhandene Lösungsansätze / Teillösungen überprüft
- Montageprozess überprüft (neuer oder vorhandener Montageprozess)
- Baugruppe mit Cobot handhabbar
- Baugruppe für die Teilautomatisierung geeignet
- Mehrwert durch Assistenzsystem gegeben
- Kriterienkatalog mit Projektzielen erstellt

2. GROBPLANUNG

In der Grobplanungsphase wird der bestehende manuelle Montageprozess analysiert und ein Montageablauf für eine hybride Montagesequenz erarbeitet. Mit der Analyse des bestehenden Montageablaufs sollen mögliche Potenziale, aber auch Schwierigkeiten bei der Montage, am hybriden Arbeitsplatz erfasst werden. Aus den Ergebnissen der Analyse wird anschließend eine sinnvolle Aufteilung der Tätigkeiten zwischen Mensch, Assistenzsystem und Roboter erarbeitet. Dabei soll die Montagesequenz so getaktet sein, dass nach Möglichkeit für keinen der beiden Interaktionspartner Mensch und Roboter Wartezeiten entstehen.

2.2 Montageablauf analysieren

Fragen:

Wie lässt sich der Arbeitsablauf analysieren?

Wer übernimmt welchen Arbeitsschritt?

Antworten:

Wie lässt sich der Arbeitsablauf analysieren?

Als Methode der Reihenfolgeplanung und zur Ableitung einer hybriden Sequenz wird aus

der manuellen Montagesequenz eine Montagevorrangmatrix erstellt. Die Betrachtung der Vorrangbeziehungen der Komponenten kann für die Optimierung der Montagesequenz mit Robotereinsatz herangezogen werden. Möglicherweise ist eine Änderung der Montagereihenfolge sinnvoll und Arbeitsschritte können parallelisiert werden.

Die Montageprozesse werden bei der Darstellung der Vorrangbeziehung in der Kopfzeile und Kopfspalte der Vorrangmatrix gelistet. Bei bestehendem Vorrang des Zeilenelements (O_i) gegenüber dem Spaltenelement (O_k) enthält dieses eine »1«. Wird das Spaltenelement vorrangig dem Zeilenelement montiert, ist eine »-1« einzutragen. Spielt die Montagereihenfolge keine Rolle, so wird für die beiden Elemente eine »0« eingetragen. In der Spalte »Summe« werden die Einträge der Zeilen aufsummiert, wodurch sich letztlich die Reihenfolge der Montage in der Spalte »Rang« ergibt. [22]

$O_i \setminus O_k$	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	Summe	Rang
O_1		0	1	1	0	0	0	2	2
O_2	0		0	1	0	1	1	3	1
O_3	-1	0		0	0	1	0	1	3
O_4	-1	-1	0		0	0	0	0	4
O_5	0	0	0	0					
O_6	0	1	1						

Abbildung 20: Beispiel Vorrangmatrix – eigene Darstellung

Wer übernimmt welchen Arbeitsschritt?

Hier geht es um die Frage, wie die Arbeitsschritte auf Mensch, Roboter und Assistenzsystem sinnvoll aufgeteilt werden können, wobei sowohl Mensch als auch Roboter möglichst wenig Wartezeiten haben sollten. Dazu wird eine Analyse der jeweiligen Prozessschritte aus der manuellen Montage durchgeführt, um eine mögliche Aufgabenteilung der Interaktionspartner abzuleiten. Dies kann in tabellarischer Form geschehen. Dabei werden die einzelnen Prozessschritte aufgeführt und mögliche Schwierigkeiten bei der Montage notiert. Die Prozessschritte werden einzeln betrachtet und hinsichtlich einer Aufteilung der Tätigkeiten von Mitarbeitenden, Assistenzsystem und Roboter bewertet. Zudem wird eine vorläufige Aufteilung sowie Montagekontrolle der auszuführenden Aktionen während der Montage erstellt.

Prozess	Schwierigkeit	Ausführung	Prüfung
Schritt 1	Biegeschlaffe Komponente	Mensch	Assistenzsystem
Schritt 2	Hohe Präzision	Roboter	Assistenzsystem
Schritt 3	Schrauben liegen als Haufwerk im KLT Handhabbarkeit durch geringe Größe	Mensch	Mensch
Schritt 4	Teile liegen als Haufwerk im KLT Auf richtige Beschriftung ist zu achten	Mensch	Assistenzsystem
Schritt 5	Klemmgefahr der Teile im Magazin	Roboter	Assistenzsystem
Schritt 6	Schraubprozess		

Abbildung 21: Beispieltabelle zur Analyse der Prozessschritte – eigene Darstellung

Um während der Montage am Arbeitsplatz fortlaufend eine günstige ergonomische Situation zu erreichen, ist dafür eine menschenzentrierte Gestaltung wichtig. Die Automatisierung von Montageschritten kann zur Verbesserung der Ergonomie beitragen, beispielsweise durch Verlagerung körperlich anstrengender oder sich häufig wiederholender Tätigkeiten sowie langer Greifwege an den Roboter. [19]

2.2 Interaktionsformen planen

Frage:

Welche Interaktionsformen ergeben sich aus dem Montageablauf?

Antwort:

Aus der zuvor analysierten manuellen Montagesequenz wird nun in Anlehnung an die erarbeitete Vorrangmatrix eine hybride Montagesequenz abgeleitet. Im Vorfeld ist eine genaue zeitliche Abschätzung der zugeteilten Aufgaben der jeweiligen Interaktionspartner nicht möglich. Daher kann eine optimale Austaktung der Sequenz ohne Möglichkeit der praktischen Durchführung an dieser Stelle nur ungefähr bestimmt werden. Ebenso ist nur eine Abschätzung der Machbarkeit für die jeweiligen Roboterarbeiten möglich. Diese müssen mit dem vorhandenen Cobot am Montagearbeitsplatz in einer Machbarkeitsanalyse (siehe S. 51 – Machbarkeitsanalyse) überprüft werden und bestimmen maßgeblich die Arbeitsteilung und den Grad der Automatisierung.

Für den Entwurf einer hybriden Montagesequenz kann eine Tabelle erstellt werden, die je eine Spalte für Mensch, Roboter und Assistenzsystem enthält. Idealerweise sollte der Interaktionspartner, welcher die Funktion des »Leader« übernimmt in der mittleren Spalte stehen. Die jeweiligen Prozessschritte werden so den Interaktionspartnern zugeordnet. Die Kommunikation des hybriden Teams wird mit Pfeilen dargestellt.

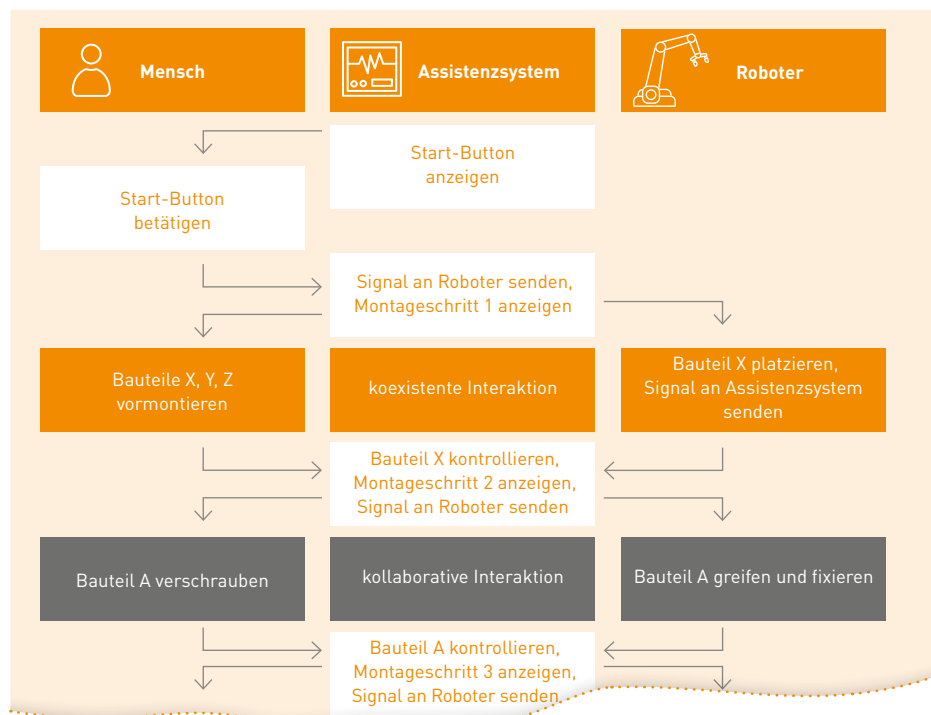


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellungsform einer hybriden Montagesequenz

Als nächsten Schritt werden die Interaktionsformen für Mensch und Roboter während der gemeinsamen Montage erarbeitet. Dabei soll die Montagesequenz konkretisiert und verfeinert werden. Wie im Kapitel Cobots aufgeführt, sind mögliche MRK-Interaktionsformen Koexistenz, Synchronisation, Kooperation und Kollaboration. Die gewählten Interaktionsformen werden in die erarbeitete Tabelle eingetragen. Die Art der Interaktion zwischen Mensch und Roboter hat Auswirkungen auf die Sicherheitsbewertung des Arbeitsplatzes. Für eine Kollaboration gelten beispielsweise andere Sicherheitsvorschriften als bei einer synchronen Interaktion (siehe S.22 – Sicherheit). Eine Orientierung bei der Planung der Interaktionsformen können folgende Fragen geben:

Hilfreiche Fragen:

- Können Prozessschritte parallel ausgeführt werden? (Koexistenz, Kooperation)
- Gibt es Prozessschritte, bei denen der Roboter und der Mitarbeitende zur gleichen Zeit am gleichen Werkstück arbeiten? (Kollaboration)
- Sind vorbereitende Tätigkeiten durch den Menschen oder Roboter sinnvoll? (Koexistenz, Kooperation)
- Gibt es Prozessschritte bei denen Mensch und Roboter voneinander abhängig sind? (Synchronisiert)
- Gibt es Prozessschritte, welche für den Menschen gefährlich sein können?
- Gibt es Prozessschritte, die eine hohe Präzision oder Wiederholgenauigkeit erfordern?

2.3 Gestaltungslösungen erarbeiten

Fragen:

Welche Technologien werden benötigt?

Welche zusätzlichen Einsatzmittel werden benötigt?

Ist ein bestehender Arbeitsplatz für die Umrüstung geeignet?

Antworten:

Welche Technologien werden benötigt?

Für die Auswahl der Systemkomponenten (Cobot, Endeffektor, Assistenzsystem) müssen deren technische Daten auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Diese beinhalten beispielsweise Traglast und Reichweite des Roboters sowie Hub und Traglast des Endeffektors. Für die Wahl eines Assistenzsystems muss je nach Anwendung ein geeignetes Ausgabemedium (optisch, akustisch, haptisch) für den Informationsaustausch mit dem Menschen gewählt werden. Genauere Informationen können in praxisorientierten Katalogen nachgeschlagen werden.

Cobot auswählen

Ausgangspunkt für die Auswahl eines passenden Cobots ist die Bauteil-, Prozess- und Arbeitsplatzanalyse und die im Projektrahmen definierten Anforderungen an die Systemkomponenten. Darauf aufbauend können nun spezifische Anforderungen an den Cobot festgelegt und ein passendes Modell ausgesucht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Traglast des Cobots für die zu handhabenden Gewichte in seinem Arbeitsraum ausreicht (siehe S.35 – Potenzialanalyse). Wichtig bei der Bestimmung der Traglast ist hierbei, dass das Eigengewicht des Endeffektors mit zum Bauteilgewicht zugerechnet werden muss. Für sensible Aufgaben oder Montagetätigkeiten können zusätzlich Sensoren zur Kraft-Momenten-Messung eingesetzt werden.

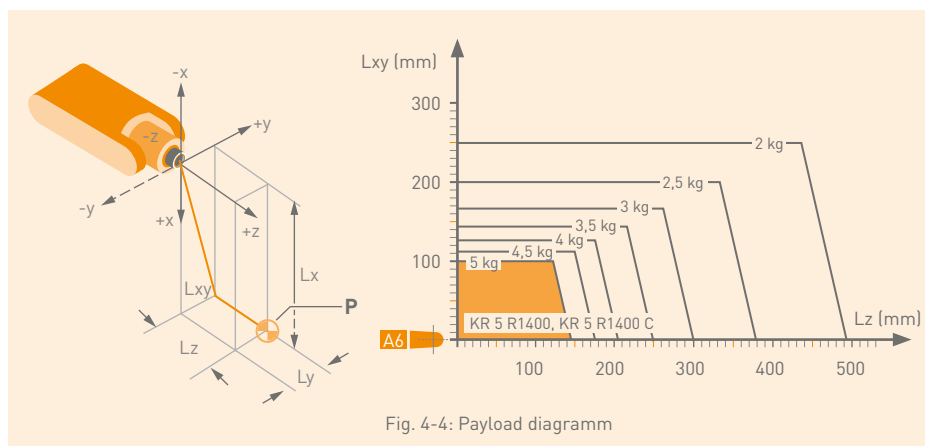


Fig. 4-4: Payload diagramm

Abbildung 23: Traglastdiagramm eines Roboters [18]

Endeffektor planen

Als wesentlicher Teil einer Roboteranwendung gilt der Endeffektor. Dessen Wahl wird oft durch eine hohe Variantenvielfalt erschwert und kann ein Hemmnis für eine Automatisierung darstellen. Durch ein breites Produktspektrum gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Lösungen im Bereich der Endeffektoren. Zu diesen zählen beispielsweise Backengreifer für Handhabungsaufgaben, Schrauber, Vakuumgreifer oder flexible Greifer, welche sich an die Form des Bauteils anpassen. [19] Eine Übersicht verschiedener Endeffektoren ist im Kapitel Cobots – Technologiebeschreibung ab Seite 20 dargestellt.

Für MRK-Anwendungen sollte ein speziell für die Nähe am Menschen konzipiertes Greifsystem gewählt werden. Dieses erfüllt die Sicherheitsanforderung für kollaboratives Arbeiten, beispielsweise durch Kraftbegrenzung, spezielle Sensorik oder abgerundetes Design [24].

Der Einsatz elektrischer Greifer bietet den Vorteil, dass durch eine Kraft- oder Positionssteuerung verschieden große Objekte gegriffen werden können und eine Begrenzung der Greifkraft möglich ist. Weitere wichtige technische Daten auf die geachtet werden sollte, sind Hub, Greifkraft und Traglast des Greifers. [19]

Assistenzsystem auswählen

Bei der Auswahl eines geeigneten Assistenzsystems muss vorweg der Anwendungszweck festgelegt sein. Dieser ist z.B. eine Werkerführung, eine Qualitätskontrolle oder die kognitive Entlastung der Mitarbeitenden. Je nach Assistenzsystem kommen unterschiedliche Interaktionsformen und Mensch-Maschine-Schnittstellen zum Einsatz. Die Schnittstelle kann ein Touch-/Display, eine Projektion, eine Kamera oder ein (virtueller) Button sein. Bei stationären Assistenzsystemen sollten die Möglichkeiten für die Montage am Arbeitsplatz berücksichtigt werden. Mobile Assistenzsysteme sind mit einem Akku ausgestattet und in ihrer Nutzungsdauer begrenzt. Für diese muss eine Lademöglichkeit eingeplant werden und eventuell ein Ersatzgerät zur Verfügung stehen. Für Tätigkeiten während des Montageprozesses ist es wichtig, dass diese nicht durch die Interaktion von Mensch und Assistenzsystem negativ beeinflusst werden. Damit sind beispielsweise ständige Unterbrechung der langen Bewegungen gemeint. Manche Assistenzsysteme können auch Einschränkungen der Mitarbeitenden mit sich bringen und zu ergonomischen Nachteilen führen. Beispiele hierfür sind ein eingeschränktes Sichtfeld bei Datenbrillen und häufig ungünstige Körperhaltungen bei Monitoren oder Projektionen. [8] [22]

Hinweis Schnittstellen:

Bei der Auswahl der Technologien sollte unbedingt auf die Kompatibilität der gewählten Systemkomponenten geachtet werden, um eine möglichst hohe Flexibilität in der Anwendungsgestaltung zu erreichen. Für die Schnittstelle zwischen Cobot und Endeffektor gibt es bereits viele standardisierte Lösungen, welche eine einfache und schnelle Installation ermöglichen. Die Verknüpfung von Cobot und Assistenzsystem ist stark von der Wahl des Assistenzsystems abhängig und kann über gängige Schnittstellen wie Netzwerkanschlüsse, digitale/analoge IO-Ports, WLAN oder Bluetooth realisiert werden. Ist eine direkte Kommunikation nicht möglich, kann ein zusätzlicher PC oder eine separate Programmierung der Schnittstelle notwendig sein.

Welche zusätzlichen Einsatzmittel werden benötigt?

An dieser Stelle werden konkrete Einsatzmittel für den hybriden Arbeitsplatz gewählt, die neben Cobot, Endeffektor und Assistenzsystem benötigt werden. Diese umfassen z.B. Montagehilfen, Kleinladungsträger (KLT), Magazine und Arbeitstisch. Gegebenenfalls sind bereits Arbeitstisch, Montagehilfe oder Magazine vorhanden. Hier muss überprüft werden, ob eine weitere Verwendung ggf. durch Anpassung möglich ist. Eventuell muss ein neues Magazinsystem für die Entnahme durch einen Roboter eingesetzt werden.

Ist ein bestehender Arbeitsplatz für die Umrüstung geeignet?

Ist bereits ein Arbeitsplatz vorhanden, so muss überprüft werden, ob die Anbringung eines Roboters und eventuell eines stationären Assistenzsystems möglich ist. Für die Materialzufuhr muss ein Konzept erarbeitet oder möglicherweise angepasst werden. Gleichfalls muss eine ausreichende Energieversorgung des Arbeitsplatzes sichergestellt sein und bei Bedarf eine Anbindung an das firmeninterne Netzwerk. Beispielsweise muss geprüft werden, ob ein vorhandenes Magazinsystem und ein angebundener interner Rutenzug zur Materialversorgung an die Linie weiterhin genutzt werden kann. Bei dem Ziel der Taktzeitreduzierung können so eventuell Engpässe in der Materialversorgung entstehen. Bei einer Umrüstung auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration sind zuvor benötigte Sicherheitselemente wie Schutzzäune, Lichtschranken oder Abstandsregelungen nicht mehr nötig. Dadurch verringert sich eventuell der Flächenbedarf des Arbeitsplatzes.

Hilfreiche Fragen:

- Welche Werkzeuge, Montagehilfen, Sonstiges (KLTs, Magazine, Arbeitstisch) werden benötigt?
- Sind bereits Montagehilfen vorhanden? Können diese wiederverwendet oder müssen sie abgeändert werden?
- Sind bereits Magazine vorhanden?
- Welche Reichweite, Traglast und Kommunikationsschnittstellen muss der Roboter mindestens aufweisen?
- Welchen Hub und welche Traglast muss der Endeffektor mindestens aufweisen?
- Welche Aufgaben soll das Assistenzsystem übernehmen?

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Arbeitsablauf analysiert
- Vorrangmatrix erstellt
- Theoretische Montagesequenz erstellt
- MRK-Interaktionsformen bestimmt
- Systemkomponenten ausgewählt
(Cobot, Endeffektor, Assistenzsystem, sonstige Einsatzmittel)
- Arbeitsplatz für Umrüstung geeignet

3. FEINPLANUNG

Ist die Grobplanung abgeschlossen, werden nun konkrete Inhalte für die Umsetzung des hybriden Montagearbeitsplatzes erarbeitet. Die Feinplanung beginnt mit der Layoutgestaltung, bei der die Positionierung der Interaktionspartner am Arbeitsplatz festgelegt wird. Darauf folgt die theoretische Erstellung und Austaktung der Sequenz. Für die Durchführung des Kapitels Feinplanung bietet es sich an, ein Simulationstool zu verwenden.

3.1 Arbeitsplatzlayout erstellen

Fragen:

Wo können die Interaktionspartner am Arbeitsplatz positioniert werden?

Welche Layoutoptionen sind möglich?

Antworten:

Wo können die Interaktionspartner am Arbeitsplatz positioniert werden?

Ziel ist es, ein Layout zu erstellen, welches sowohl ergonomischen als auch wirtschaftlichen Ansprüchen gerecht wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die Griffweiten kurz sind und Mensch und Roboter bezüglich ihrer Bewegungsbereiche sinnvoll platziert werden. Der Roboter sollte dabei nahe dem Menschen platziert werden, ohne ihn zu stören. Ebenfalls sollte das Material des Menschen und des Roboters getrennt voneinander platziert werden. Ist geplant, ein stationäres Assistenzsystem zu verwenden, muss dies in der Layoutplanung berücksichtigt werden.

Die restlichen Layoutmöglichkeiten ergeben sich dann aus den fünf Freiheitsgraden der Akteure:

- Position Roboter
- Position Mensch
- Art der Materialzuführung
- Position der KLTs/des Materials
- Raumanforderungen Assistenzsystem

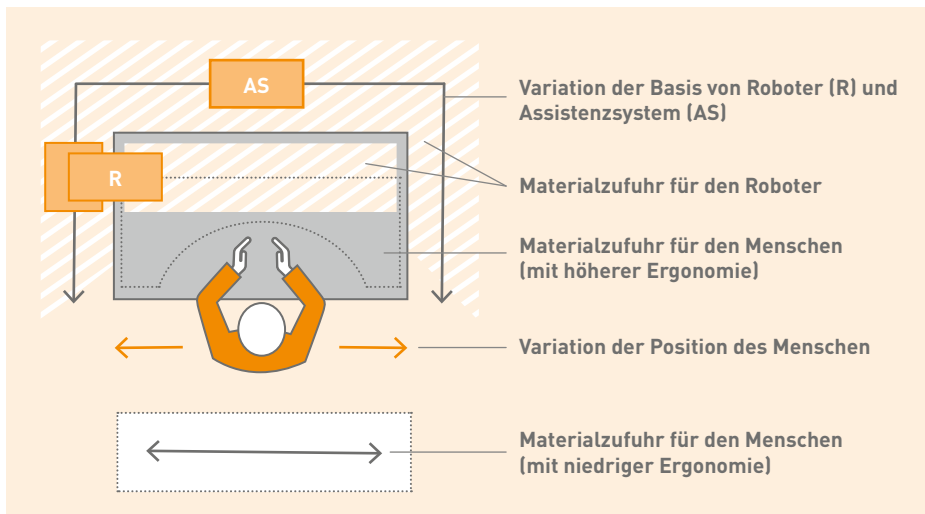


Abbildung 24: Variation der Positionen und der Materialzuführungsbereiche [26]

Welche Layoutoptionen sind möglich?

Nachdem alle benötigten Komponenten für die Montage ausgewählt wurden, gilt es nun, diese sinnvoll am Arbeitsplatz zu platzieren. Hierfür werden verschiedene Arbeitsplatzlayouts erstellt und miteinander verglichen.

Die verschiedenen Arbeitsplatzlayouts werden basierend auf der jeweils durchzuführenden Montagetätigkeit erstellt. Dabei haben sich einige grundsätzliche Vorgehensweisen etabliert. Die Höhe der Roboterbasis sollte identisch mit der Arbeitsplatzhöhe sein, um die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen mit anderen Systemkomponenten zu verringern [23]. Bei der Verwendung eines höhenverstellbaren Tisches sollte daher darauf geachtet werden, dass der Roboter mit dem Tisch verfährt.

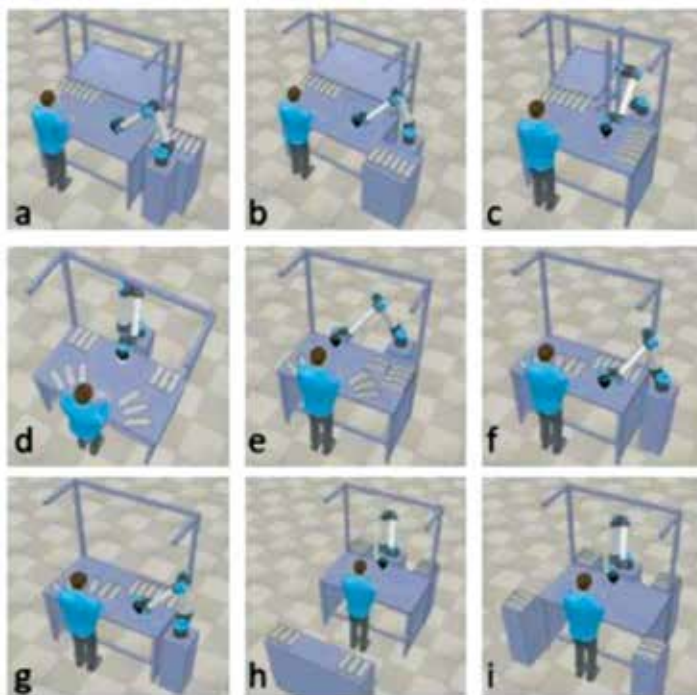


Abbildung 25:
Verschiedene
Layoutoptionen
basierend auf den
fünf Freiheitsgraden
[23]

Ein weiterer wichtiger Punkt sind die jeweiligen Montagezentren der Agierenden. Die Montagezentren bezeichnen den Ort auf dem Arbeitsplatz, an dem jeweils die Montagetätigkeiten der Agierenden ausgeführt werden. Diese werden nach Montagezentrum Mensch (hca), Montagezentrum Roboter (rca) und kollaboratives Montagezentrum (cca) aufgeteilt. Je nach Montagetätigkeit können sich diese Zentren auch überschneiden. Je nach Platzierung der Montagezentren ergeben sich unterschiedliche Bereiche für die Projektion von Montageanweisungen, bzw. die Platzierung von Assistenzsystemen (Ablage Tablet, Smartphone, Bildschirm).

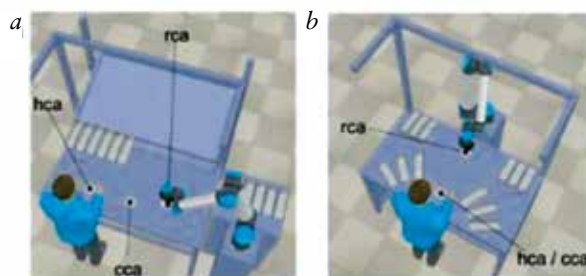


Abbildung 26:
a) getrennte
Montagezentren
b) kombinierte
Montagezentren [23]

3.2 Erstellung und Austaktung der Sequenz

Frage:

Welches Vorgehen beim Erstellen der Montagesequenz ist zu empfehlen?

Antwort:

Schritt 1: Robotersequenz planen

Es ist zu empfehlen als ersten Schritt die Sequenz des Roboters zu planen und ggf. mit Hilfe eines Simulationstools zu erstellen.

Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Ist der Ablauf des Roboters festgelegt, können nun die Arbeitsschritte des Menschen in die Robotersequenz eingefügt werden. An dieser Stelle werden dem Menschen konkrete Aufgaben zugeteilt. Da zunächst noch keine genauen Zeiten für die auszuführenden Arbeitsschritte vorliegen, müssen diese vorerst geschätzt werden.

Schritt 3: Kommunikationsmechanismen hinzufügen

Nun werden die Kommunikationsmechanismen des Assistenzsystems in die Mensch-Roboter-Sequenz eingebracht. Es wird in diesem Schritt nur der Signalfluss des hybriden Teams in der gemeinsamen Sequenz festgelegt.

Schritt 4: Montageanweisungen planen

Erst wenn die hybride Sequenz fertig geplant ist, empfiehlt es sich, die Montageanweisungen zu erstellen. Die konkrete Umsetzung wird im Kapitel Umsetzung – Implementierung (S.63) der Sequenz genauer erläutert.

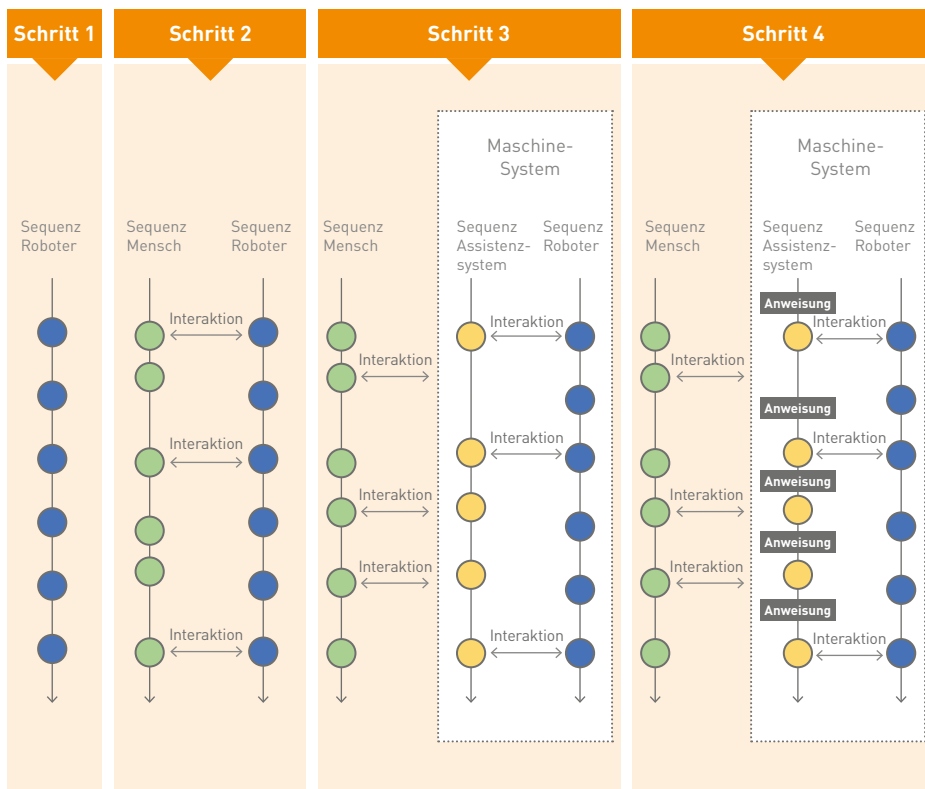


Abbildung 27: Vorgehen beim Erstellen einer hybriden Montagesequenz

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Layoutoptionen erstellt
- Arbeitsplatzlayout ausgewählt
- Montagesequenz ausgetaktet
- Arbeitsablauf simuliert (optional)

4. GESAMTBEWERTUNG

Im Kapitel Gesamtbewertung werden die erstellten Layoutoptionen miteinander verglichen und bewertet. Für das gewählte Layout wird zudem ein Sicherheitskonzept erstellt. Die Nutzwertanalyse vereint anschließend alle zuvor durchgeführten Bewertungen und vergleicht sie mit den im Projektrahmen getroffenen Zielen.

4.1 Layoutbewertung

Frage:

Wie können die Layoutoptionen bewertet werden?

Welche Vorteile bietet ein ergonomischer Arbeitsplatz?

Antworten:

Wie können die Layoutoptionen bewertet werden?

Die zuvor erstellten Layoutoptionen werden anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen. Entscheidend hierbei ist die Art der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (kooperativ, kollaborativ, koexistent, synchron), die Art der verrichteten Arbeit (Montage oder Handling) sowie die Aufteilung der Arbeitsschritte (Roboter, Mensch oder beide). Daher ist es sinnvoll die Bewertung der Layoutoptionen erst nach der Ausstattung der Arbeitssequenz vorzunehmen.

Um Layoutoptionen gegenüberzustellen und auszuwählen, haben sich die Evaluationskriterien nach Berg [23] als zielführend herausgestellt. Berg verwendet Bewertungskriterien u.a. des Methods-Time-Measurement (MTM). Die wichtigsten Kriterien für die MRK sind folgende:

- Bewegungslänge des Roboters (Distanz des Montagezentrums (rca) zum Material des Roboters)
- Die relative Distanz, der Anfahrwinkel, sowie die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Roboters
- Der Intrusionswinkel während der Kollaboration (siehe Abbildung 28)
- Die Anordnung der Montagezentren (hca gleich cca ist meistens besser als hca ungleich cca)
- Das Kollisionspotenzial des Roboters (Distanz des Roboters zum nächsten Kollisionsobjekt)
- Erreichbarkeit aller Seiten des zu bearbeitenden Werkstücks durch den Roboter
- Ergonomie bei der Platzierung des Assistenzsystems (Ablageort Tablet/ Smartphone, Anbringungsort Bildschirm) oder der Projektionsfläche beachten

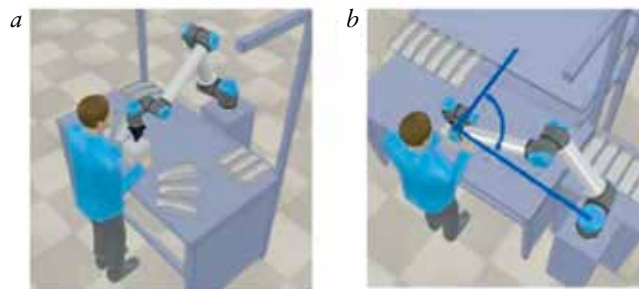


Abbildung 28:

a) kleiner

Intrusionswinkel

b) großer

Intrusionswinkel [23]

Welche Vorteile bietet ein ergonomischer Arbeitsplatz?

Bei der Bewertung von Layoutoptionen für hybride Arbeitsplätze sollte ein besonderes Augenmerk auf eine ergonomische Gestaltung geworfen werden. Eine sinnvolle Anordnung der Systemkomponenten am Arbeitsplatz und ein gezielter Einsatz des Cobots können die Ergonomie für den Menschen deutlich verbessern. Zum Beispiel kann der Cobot die Handhabung gefährlicher Materialien und heißer oder scharfkantiger Bauteile übernehmen um so potenzielle Gefahren für den Menschen zu reduzieren [19].

Vorteile einer ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung sind ...

- ... gesündere Mitarbeitende, die weniger Fehltag haben und weniger Fehler machen.
- ... positive Kosten-Nutzen-Effekte durch motivierte und produktivere Mitarbeitende.
- ... die Steigerung der Attraktivität der Arbeitgebenden und somit Vorteile in der Gewinnung und Bindung von qualifizierten Fachkräften. [24]

4.2 Sicherheitsbewertung



Abbildung 29: Sicherheitsmaßnahmen bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter [25]

Frage:

Wie muss ein Sicherheitskonzept aufgebaut werden?

Antwort:

Hybride Arbeitsplätze fallen grundsätzlich unter die EU-Richtlinie für grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Maschinenanlagen und benötigen deshalb eine Risikobewertung nach der DIN EN ISO 12100:2011-03 2011 [26]. Dabei sind die folgenden beiden Schritte iterativ durchzuführen, bis die entsprechenden Vorgaben erfüllt sind.

Schritt 1: Risikoanalyse durchführen

Dabei sollen alle potenziellen Gefahren identifiziert und mögliche Risiken eingeschätzt werden. In den vorherigen Kapiteln wurde bereits auf sicherheitsrelevante Themen hingewiesen, diese helfen die Risikoanalyse durchzuführen.

Schritt 2: Risikobewertung vornehmen

Hier sollen durch technische und organisatorische Schutzmaßnahmen Risiken minimiert werden. Cobots und Endeffektoren können bereits eine Zulassung für den direkten Kontakt mit dem Menschen haben (siehe S.22 – Sicherheit). Dies kann eine Risikobeurteilung erleichtern. Des Weiteren können passive Sicherheitsvorkehrungen durch optische oder kognitive Assistenzsysteme ergänzend zum Einsatz kommen.

4.3 Nutzwertanalyse

Frage:

Wurden die zuvor definierten Ziele erreicht?

Antwort:

Bevor der hybride Arbeitsplatz in die Phase der Umsetzung geht, werden zunächst verschiedene Lösungsvarianten bezüglich der zuvor definierten Ziele bewertet. Mit der Nutzwertanalyse (siehe beispielhafte Abbildung 30) können diese qualitativ miteinander verglichen werden. Anhand der vorangegangenen Kapitel kann hier bereits die Taktzeit und das Sicherheitskonzept abgeschätzt und eine Ergonomiebewertung durchgeführt werden. Als Grundlage für die Bewertung wird der Kriterienkatalog aus dem Kapitel Projektrahmen – Projektziele definieren (S.37) verwendet.

Vorgehen Nutzwertanalyse:

1. Bewertungskriterien hierarchisch strukturieren (mit paarweisen Vergleich oder Gewichtungsfaktoren).
2. Erfüllungsgrad für jedes Bewertungskriterium festlegen (von 0 (nicht erfüllt) bis 10 (voll erfüllt)) und mit dem Gewichtungsfaktor multiplizieren – Teilnutzen.
3. Absoluten Nutzwert jeder Variante als Summe der Teilnutzen berechnen.
4. Relativen Nutzwert in Bezug zum Ausgangszustand (manuellem Montageplatz) oder der Variante mit dem niedrigsten absoluten Nutzwert berechnen.

Bewertungskriterium	Gewicht	Ist-zustand		Variante					
				1		2		3	
	G	E	E-G	E	E-G	E	E-G	E	E-G
Gefahr von Fehlteilen	0,14	2,0	0,3	7,0	1,0	8,7	1,2	9,3	1,3
Bestände im Arbeitssystem	0,13	2,3	0,3	6,7	0,9	7,0	0,9	8,3	1,1
Produktverantwortung	0,12	7,7	0,9	5,0	0,6	5,0	0,6	9,3	1,1
Durchlaufzeit	0,11	3,3	0,4	7,0	0,7	5,0	0,5	8,7	0,9
Ergonomie	0,11	1,7	0,2	7,3	0,8	7,3	0,8	9,0	1,0
Personalflexibilität	0,09	5,0	0,4	3,0	0,3	4,7	0,4	7,0	0,6
kurzfristige Flexibilität	0,09	6,0	0,5	3,7	0,3	5,3	0,5	8,0	0,6
Materialfluss-Steuerung	0,06	6,0	0,4	5,7	0,4	3,7	0,2	7,3	0,5
Überschaubarkeit des Auftragsfortschritts	0,05	2,0	0,1	6,0	0,3	8,0	0,4	5,7	0,3
Monotonie	0,05	8,0	0,4	5,0	0,3	4,3	0,2	9,3	0,5
Stückzahlflexibilität	0,03	4,0	0,1	5,3	0,2	6,7	0,2	8,3	0,3
Materialfluss-Schnittstellen	0,02	3,7	0,1	6,0	0,1	7,3	0,2	7,7	0,2
Typenflexibilität	0,01	4,0	0,0	8,0	0,1	9,0	0,1	4,7	0,0
absoluter Nutzwert (Punkte)		4,1		5,8		6,2		8,3	
relativer Nutzwert [%]		100		142		151		203	

Wertskala für Erfüllungsgrad E:	0	5	10
	nicht erfüllt	befriedigend erfüllt	voll erfüllt

Abbildung 30: Nutzwertanalyse zur qualitativen Bewertung verschiedener Lösungsvarianten [1]

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Layoutbewertung durchgeführt
- Ergonomie bewertet
- Sicherheitskonzept erarbeitet
- Nutzwertanalyse durchgeführt
- Ziele aus Kapitel Projektrahmen erreichbar

5. UMSETZUNG

Nachdem die Systemkomponenten beschafft sind, werden sie aufgebaut und am Arbeitsplatz installiert. Bei der Installation werden die Komponenten, wie in der Layoutplanung festgelegt, am Arbeitsplatz angebracht. Im weiteren Vorgehen dieses Prozessschrittes wird eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt, um die geplanten Anwendungen von Roboter und Assistenzsystem zu prüfen. War diese erfolgreich, folgt die Implementierung der Sequenz. Außerdem wird ein Schulungskonzept zur Einarbeitung von Projektbeteiligten und operativen Mitarbeitenden vorgeschlagen.

5.1 Machbarkeitsanalyse

Fragen:

Können die Bauteile wie geplant mit dem Greifsystem gegriffen und platziert werden?

Können die Funktionen des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden?

Funktioniert die Kommunikation am Arbeitsplatz wie geplant?

Antworten:

Können die Bauteile wie geplant mit dem Greifsystem gegriffen und platziert werden?

Nachdem die Systemkomponenten am Arbeitsplatz installiert sind, wird überprüft, ob die geplanten Bauteile mit dem bestehenden Robotersystem gegriffen werden können. Dies umfasst auch das Einsetzen der Komponenten in vorhandene Montagehilfen. So werden eventuelle Einschränkungen in Bezug auf das Einlegen in die Montagehilfe und das Greifen der Komponenten erkannt. Es ist zu empfehlen, die Robotersequenz in Teilsequenzen der jeweiligen Komponente abzugrenzen. Einerseits können dadurch Teilsequenzen für andere Produktvarianten wiederverwendet werden und andererseits wird so das Roboterprogramm übersichtlich gestaltet.

Können die Funktionen des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden?

Ein weiterer Bestandteil der Machbarkeitsanalyse besteht darin, Funktionalitäten des Assistenzsystems wie z.B. Montagekontrolle oder Gestenerkennung zu testen. Dabei soll überprüft werden, ob die Funktionen wie geplant in die Montagesequenz eingebracht werden können.

Funktioniert die Kommunikation am Arbeitsplatz wie geplant?

Ist die Machbarkeitsanalyse für den Cobot und das Assistenzsystem durchgeführt, folgt die

Implementierung des Kommunikationskanals zwischen Cobot und Assistenzsystem. Beide Systeme werden miteinander über die geplante Schnittstelle verbunden und anschließend die Kommunikation beider Interaktionspartner überprüft.

5.2 Implementierung der Sequenz

Abschließend der Machbarkeitsanalyse folgt eine Beurteilung der Ergebnisse. Abhängig von diesen, können Änderungen bzw. Optimierungen vorgenommen werden oder die Umsetzung des Use Cases kann begonnen werden. Hier empfiehlt sich die Orientierung am Vorgehen aus dem Kapitel Erstellung und Austaktung der Sequenz (S. 46).

Schritt 1: Robotersequenz implementieren

Die Teilsequenzen aus der Machbarkeitsanalyse können hier wiederverwendet werden, um die Robotersequenz zu implementieren.



Abbildung 31: Mitarbeiter mit Roboterbedienpanel

Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Ist der Ablauf des Roboters implementiert, werden nun die Arbeitsschritte des Menschen und des Roboters ideal ausgetaktet. Bei Wartezeiten für einen der beiden Interaktionspartner kann eventuell die Robotergeschwindigkeit angepasst oder die Mensch-Roboter-Sequenz überarbeitet werden.

Schritt 3: Kommunikationsmechanismen einbringen

Erst wenn die Mensch-Roboter-Sequenz optimal umgesetzt ist, empfiehlt es sich, das Assistenzsystem mit seinen Kommunikationsmechanismen in die Mensch-Roboter-Sequenz einzubringen. Es werden hier noch keine konkreten Inhalte wie z.B. Montageanleitung, Projektionen etc. eingebracht, sondern nur die Kommunikation von Assistenzsystem, Roboter und Mensch implementiert. Müssen Änderungen im Montageablauf vorgenommen werden, lassen sich diese in der Regel ohne großen Aufwand umsetzen.

Schritt 4: Montageanweisungen erstellen

Funktionieren die Kommunikationsmechanismen am assistierten Montagearbeitsplatz wie geplant, werden abschließend Projektionen und Montageanweisungen erstellt oder Montagekontrollen eingelernt und in die hybride Sequenz eingepflegt. Dies ist dahingehend zu empfehlen, da bei einer Änderung im gesamten Ablauf eventuell Anweisungen und Projektionen ebenfalls geändert oder gelöscht werden müssen. Somit kann unnötige Arbeit vermieden und Zeit eingespart werden.

Fragen:

Wie sind Montageanweisungen zu gestalten?

Wie kann die hybride Sequenz optimiert werden?

Antworten:

Wie sind Montageanweisungen zu gestalten?

Die Schnittstelle von Mensch und Assistenzsystem sollte intuitiv gestaltet werden nach dem Motto: »So wenige Informationen wie möglich, so viele wie nötig« Bei der Anordnung von Texten, Bildern und Videos empfiehlt es sich, diese immer gleich zu platzieren und ein konsistentes Design zu wählen. Hilfreich können hier Schablonen bzw. im Voraus erstellte

Musteranweisungen sein. Textuelle Beschreibungen, Abbildungen und Videos in einem Anweisungsschritt sollten sich immer aufeinander beziehen und ergänzen. Die Anweisungen sind eindeutig zu gestalten und idealerweise zu nummerieren, sodass die Montagereihenfolge leichter eingehalten werden kann.

Wie kann die hybride Sequenz optimiert werden?

Erst nach der Implementierung der Montagesequenz und ersten Testläufen wird deutlich, ob die hybride Sequenz optimal getaktet ist. Eventuell wird an dieser Stelle Potenzial für Verbesserungen ersichtlich. Als Möglichkeiten zur Optimierung der hybriden Sequenz können folgende Tipps herangezogen werden:

- Vorbereitende Tätigkeiten für den Menschen einführen
- Arbeitsschritte von Mensch und Roboter tauschen
- Anordnung der Magazine ändern
- Robotergeschwindigkeit anpassen
- Montagehilfen einführen
- Zuführsystem anpassen

5.3 Personalschulung durchführen

Fragen:

Wer soll geschult werden?

Was soll geschult werden?

Welche Schulungsmethoden bieten sich an?

Antworten:

Wer soll geschult werden?

Geschult werden sollen ...

... alle direkten und indirekten operativen Mitarbeitenden für die Arbeit am hybriden Arbeitsplatz.

... alle Verantwortlichen (Projektleitenden, Produktionsplanenden, Führungskräfte) zur Potenzialabschätzung, Planung und mitarbeiterorientierten Anleitung an hybriden Arbeitsplätzen.

... der Betriebsrat zu den Grundlagen und der Motivation beim Aufbau hybrider Arbeitsplätze.

Was soll geschult werden? Welche Schulungsmethoden bieten sich an?

Da bei der Einführung und Planung eines hybriden Arbeitsplatzes verschiedene Betriebsparteien mit unterschiedlichen Interessen beteiligt sind, bietet es sich an ein modulares Schulungskonzept zu verwenden. Dabei hat sich ein Vorgehen in drei Schritten als zielführend herausgestellt [27]:

Schritt 1: Grundlagen- und Motivationsschulung

Bevor mit der eigentlichen Planung des hybriden Arbeitsplatzes begonnen wird, sollten alle beteiligten Betriebsparteien (direkte und indirekte Mitarbeitende, Verantwortliche, Betriebsrat) über die Motivation für dessen Einführung informiert und sensibilisiert werden. Dabei sollten Themen wie die Grundlagen von MRK und Assistenzsystemen, Arbeitssicherheit, Ergonomie sowie Wirtschaftlichkeit behandelt werden [27].

Schulungsmethoden: *Seminar, Informationsveranstaltung*

Schritt 2: Schulung zur Potenzialanalyse und Planung

Anschließend werden Methoden zur Potenzialanalyse sowie zur Planung und Implementierung von hybriden Arbeitsplätzen geschult [28]. Die Schulung richtet sich an Produktionsplanende und Projektleitende sowie an operative Mitarbeitende mit Prozesswissen. Als Grundlage für diese Schulung kann die Vorgehensweise zum Aufbau hybrider Arbeitsplätze in diesem Leitfaden dienen.

Schulungsmethoden: *Fallstudie, Planspiel, Workshop, Blended Learning*

Schritt 3: Spezielle Anwendungsschulungen


Hierunter fallen alle Schulungen, die im operativen Bereich für den Betrieb des hybriden Arbeitsplatzes benötigt werden. Dies können beispielsweise Schulungen zur Programmierung, Wartung und Sicherheit sowie dem Umgang mit den Systemkomponenten sein. Es bietet sich an, diese Schulungen schon vor dem eigentlichen Einsatz am hybriden Arbeitsplatz vorzunehmen, um die Akzeptanz und Motivation der Mitarbeitenden zu erhöhen und Berührungsängste mit dem hybriden System zu reduzieren. Hierbei kann ein Mix aus Simulationen (z.B. mit AR-Anwendungen) und realen Anwendungen für eine Schulung verwendet werden [27].

Schulungsmethoden: *Seminar, Workshop, Blended Learning, E-Learning, Training (on the job)*

ITERATION NOTWENDIG?

CHECKLISTE

- Machbarkeitsanalyse erfolgreich
- Sequenz implementiert
- Arbeitsanweisungen erstellt
- Schulungskonzept erstellt
- Personalschulungen durchgeführt



Der InKoMo Use Case



1. PROJEKTRAHMEN

1.1 Ausgangssituation analysieren

Zur Veranschaulichung eines Use Cases zur assistierten Mensch-Roboter-Kollaboration ist nachfolgend die Montage eines Modell-Pick-Up-Trucks gezeigt. Dieser besteht aus mindestens 17 Bauteilen und -gruppen und kann in mehreren Varianten konfiguriert werden. Es besteht die Möglichkeit die Größe der Kabinenhaube, der Ladefläche und die Anzahl der Radachsen zu wählen. Des Weiteren ist ein Chassis sowie Achshalterungen mit Schrauben für die Montage des Modell-Pick-Up-Trucks nötig.

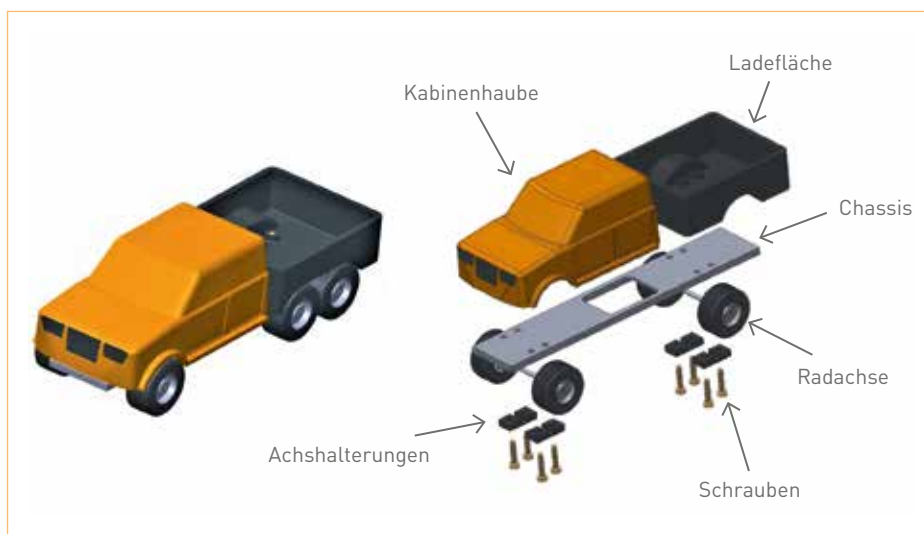


Abbildung 33: 3D-CAD Modell des Modell-Pick-Up-Trucks in der Variante mit drei Achsen (links) sowie als Explosionsansicht mit zwei Achsen (rechts)

Für die rein manuelle Montage des Modell-Pick-Up-Trucks wird aktuell eine Montagehilfe eingesetzt, welche zur Fixierung der Bauteile dient. In diese werden die Einzelteile eingelegt und anschließend mit einem Schraubendreher verschraubt. Die Bauteile sind als Haufwerk in Kleinladungsträgern (KLT) am Montageplatz magaziniert. Für den Einsatz eines Roboters ist diese Art von Magazinen ungeeignet und muss angepasst werden.

Der vorhandene höhenverstellbare Montagearbeitsplatz ist aus Aluminiumprofilen aufgebaut und kann für die Anbringung eines Roboters erweitert werden. Eine ausreichende Energieversorgung für die Systemkomponenten ist ebenfalls vorhanden. Nach einer ersten Abschätzung muss der Roboter eine Reichweite von ca. 600 mm aufweisen, um die mittig platzierte Montagehilfe sowie später angebrachte Magazine erreichen zu können. Zudem ist bereits ein Kamera-Projektionssystem vorhanden, welches auf seine Eignung als Assistenzsystem zur Unterstützung der Montage überprüft werden soll.

1.2 Potenzialanalyse

Bauteilgewicht

Das Gesamtgewicht des Modell-Pick-Up-Trucks liegt bei 47 g, daher sind alle Einzelteile für einen Cobot und einen Greifer mit mehreren kg Traglast leicht handhabbar.

Verletzungsgefahr

Da die Bauteile des Modell-Pick-Up-Trucks keine scharfen Kanten und spitzen Ecken sowie ein geringes Bauteilgewicht haben, besteht ein sehr geringes Verletzungsrisiko bei einer möglichen Kollision mit dem Menschen.

Formstabilität

Die Bauteile weisen eine hohe Formstabilität auf und können mit einem Backengreifer gegriffen werden. Die Achshalterungen sowie die Schrauben sind für eine Automatisierung möglicherweise ungeeignet. Die Handhabung der Radachsen bringt die Schwierigkeit mit sich, dass sich beim Platzieren beide Räder außen auf der Achse befinden müssen.

Fazit

Aufgrund des geringen Gewichts der jeweiligen Bauteile sowie einer hohen Formstabilität bietet der Anwendungsfall Potenzial für eine Teilautomatisierung durch einen Cobot. Zudem besteht kein Verletzungsrisiko für den Menschen bei einer möglichen Kollision.

1.3 Projektziele definieren

1. Anforderungsliste erstellen

Die hybride Montage des Modell-Pick-Up-Trucks soll im Vergleich zur bisher manuellen Montage eine höhere Taktzeit haben, mit dem Ziel den Montageablauf insgesamt wirtschaftlicher zu gestalten. Zusätzlich soll durch den Einsatz des Cobots die Ergonomie für den Menschen verbessert werden. Mit dem Assistenzsystem soll die Fehlerquote reduziert sowie eine Steigerung der Akzeptanz des Werkenden erreicht werden.

2. Bewertungskriterien festlegen

Aus den zuvor beschriebenen Anforderungen wird ein Katalog aus Bewertungskriterien für die Zielerreichung erstellt.

Tabelle: Projektziele

Projektziel	Zielart	Verbindlichkeit
Reduzierung der Taktzeit um 10 %	wirtschaftlich	muss
Steigerung der Ergonomie um 20 %	personell	muss
Reduzierung der Fehlerquote um 10 %	wirtschaftlich	kann
Automatisierungsgrad von 60 %	technisch	gewünscht

3. Kriterienkatalog auf komplementäre und konkurrierende Ziele überprüfen

Die Steigerung der Ergonomie des Arbeitsplatzes kann zur Akzeptanz durch den Menschen beitragen. Die beiden Ziele können daher als komplementär angesehen werden.

Die Steigerung des Automatisierungsgrades über ein für MRK-Arbeitsplätze wirtschaftlich sinnvolles Maß hinaus kann zu einer höheren Taktzeit führen. Da diese beiden Ziele daher konkurrierend sein könnten, wird das Ziel des höheren Automatisierungsgrades nur als Wunschziel in den Kriterienkatalog aufgenommen.

2. GROBPLANUNG

2.1 Montageablauf analysieren

Die Teile werden gemäß der Prioritätsmatrix in der nachfolgenden Tabelle montiert. Zur Vereinfachung werden die Achshalter und Schrauben als ein Element für die Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs betrachtet.

	Ladefläche	Kabinenhaube	Chassis	Vorderachse	Hinterachse	Achshalterung vorne	Achshalterung hinten	Schrauben Achse vorne	Schrauben Achse hinten	Summe	Rang
Ladefläche		1	1	1	1	1	1	1	1	8	1
Kabinenhaube	-1		1	1	1	1	1	1	1	7	2
Chassis	-1	-1		1	1	1	1	1	1	6	3
Vorderachse	-1	-1	-1		0	1	0	1	0	2	4
Hinterachse	-1	-1	-1	0		0	1	0	1	2	4
Achshalterung vorne	-1	-1	-1	-1	0		0	1	0	1	5
Achshalterung hinten	-1	-1	-1	0	-1	0		0	1	1	5
Schrauben Achse vorne	-1	-1	-1	-1	0	-1	0		0	0	6
Schrauben Achse hinten	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	0		0	6
1	Montage des Zeilenelements X vor Spaltenelement Y										
0	Die Montage ist egal										
-1	Montage des Zeilenelements X nach Spaltenelement Y										

Abbildung 34: Vorrangmatrix für den Modell-Pick-Up-Truck

Für die Montage des Modell-Pick-Up-Trucks müssen nacheinander die Ladefläche, die Kabinenhaube und das Chassis eingelegt werden, bevor die Vorderachse oder Hinterachse eingelegt werden kann. Anschließend können das Anbringen der Achsträger und das Anschrauben der Achsen erfolgen. Die Reihenfolge der Achsmontage ist hierbei beliebig. Die betrachteten Prozessschritte der manuellen Montage werden in der folgenden Tabelle analysiert, um eine mögliche Aufgabenteilung der Interaktionspartner abzuleiten.






Prozess	Schwierigkeit	Ausführung	Prüfung
7. Platzierung Chassis 	<ul style="list-style-type: none"> • Richtige Lage an Endposition • Bohrungen von Chassis, Ladefläche und Kabinenhaube müssen übereinstimmen • Chassis ist sehr flach 	Roboter	Kamerasystem
8. Entnahme und Vorbereitung Radachsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Reifen können auf der Achse verschoben sein und müssen erst bis an die beiden Anschläge der Achse auseinandergezogen werden 	Mensch / Roboter	Mensch
9. Platzierung Radachsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Achse muss mittig zwischen den Bohrungen für die Achsträger platziert werden • Räder müssen sich im Radkasten befinden 	Mensch / Roboter	Mensch / Kamerasystem
10. Entnahme Achsträger 	<ul style="list-style-type: none"> • Achsträger ist recht klein • Lage im Magazin • anschließende Platzierung recht schwierig 	Mensch	Kamerasystem
11. Platzierung Achsträger 	<ul style="list-style-type: none"> • Achsträger muss mit der mittigen Aussparung auf die Achse gelegt werden • Bohrlöcher von Chassis, Ladefläche und Kabine übereinstimmen 	Mensch	Kamerasystem

Abbildung 35: Ausschnitt aus der Tabelle der Modell-Pick-Up-Truck-Analyse

2.2 Interaktionsformen planen

Aus der Vorrangmatrix und der Analyse der manuellen Montagesequenz wird nun eine hybride Montagesequenz abgeleitet, bei der die Austattung sowie Machbarkeit der Systeme abgeschätzt werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die jeweiligen Aktionen der Interaktionspartner gelistet. Das Assistenzsystem soll als »Leader« eingesetzt werden und ist deshalb in der mittleren Spalte der Tabelle platziert. Die Kommunikation des hybriden Teams ist mit roten Pfeilen dargestellt. Die geplanten Interaktionsformen sind als farbige Kästen in die Tabelle mit eingebracht.

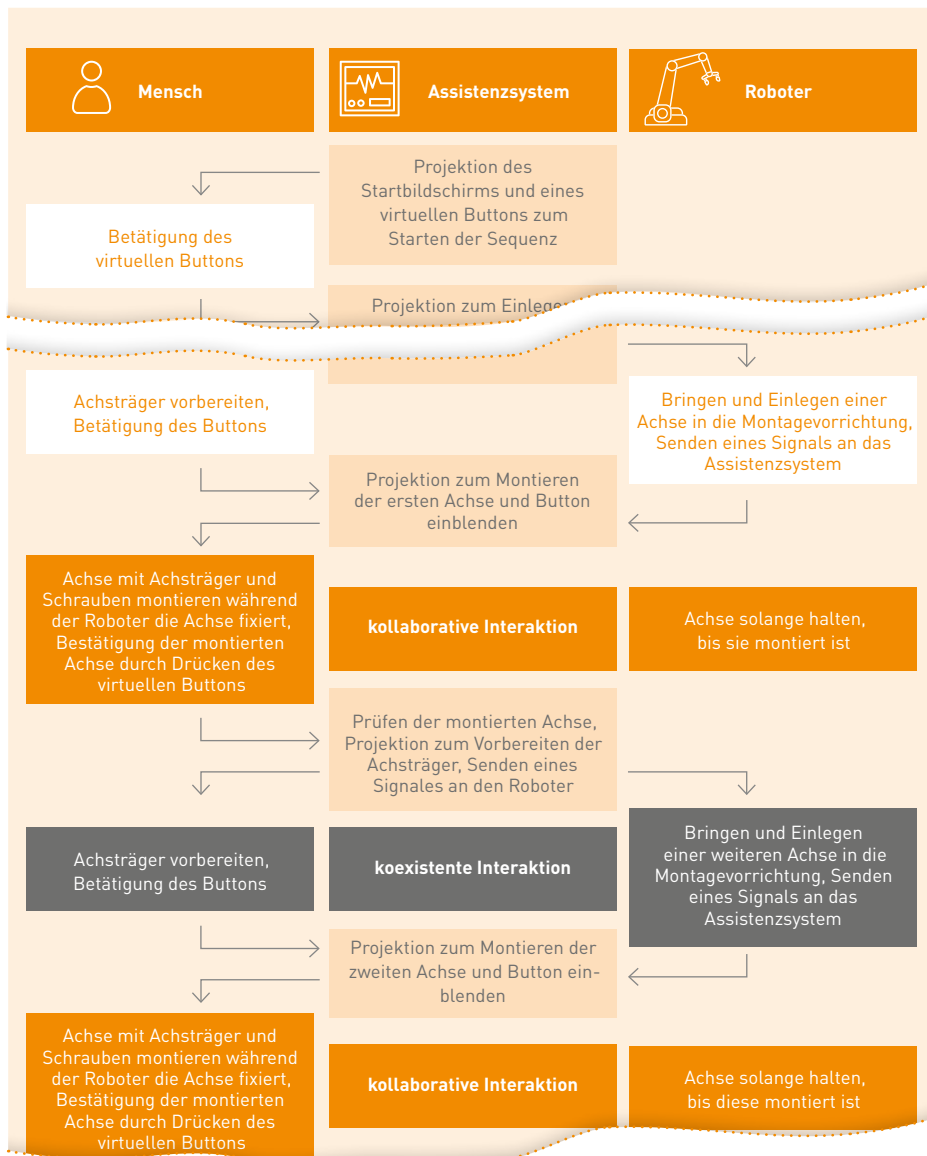


Abbildung 36: Auszug aus der geplanten hybriden Montagesequenz

Im Use Case sind zwei Mensch-Roboter-Interaktionstypen realisiert, die jeweils durch das Assistenzsystem unterstützt werden:

1. Koexistenz: Der Roboter holt die Ladefläche, die Kabinenhaube, das Chassis und die beiden Achsen aus ihren Magazinen, während Mitarbeitende die Achsträger und Schrauben vorbereiten.

2. Kollaboration: Nach dem Einsetzen der ersten Achse fixiert der Roboter diese, während der Mitarbeitende die Achshalter mit einem Elektroschrauber montiert. Der Roboter fungiert hier als »dritte Hand«, während das Assistenzsystem kamerabasiert eine Qualitätskontrolle durchführt. Für die Montage weiterer Achsen wird dieser Vorgang wiederholt.

2.3 Gestaltungslösungen erarbeiten

Nun werden konkrete Anforderungen an die geplanten Systemkomponenten Cobot, Endeffektor und Assistenzsystem gestellt sowie ein passender Cobot und Endeffektor ausgewählt.

Tabella: Anforderungen an die Systemkomponenten

Cobot	Endeffektor	Assistenzsystem
<ul style="list-style-type: none"> • Traglast min. 3 kg • Reichweite min. 600 mm • Intuitive Programmierung • Kompatibel mit verschiedenen Greifsystemen • Verschiedene Kommunikationsschnittstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hub von min. 120 mm • Greifkraft von max. 140 Nm • Traglast von min. 1 kg • Kompatibel zu gewähltem Cobot • Einstellbare Greifkraft • Für MRK geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung bei Werkerführung • Montagekontrolle • Schnittstelle für Kommunikation mit einem Cobot • Intuitive Interaktionsmöglichkeiten

COBOT

Die Wahl des Cobots fällt auf den UR5e der Firma Universal Robots. Dieser weist eine Traglast von bis zu 5 kg bei einer Reichweite von maximal 850 mm auf. Als Schnittstelle zu anderen Systemen bietet der UR5e die Möglichkeit über digitale und analoge Ein- und Ausgänge sowie einen Ethernet-Schnittstelle zur Netzwerkkommunikation. [29]




Abbildung 37: Roboter UR5e [31]

ENDEFFEKTOR

Als geeigneter Endeffektor wird der Greifer 2F-140 von Robotiq ausgesucht. Dieser stellt eine passende Schnittstelle für den gewählten Cobot UR5e bereit. Mit einer maximalen Traglast von 2,5 kg und einem maximalen Hub von 140 mm ist es möglich, den Pick-Up-Truck als Ganzen zu greifen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Greifkraft individuell einzustellen. Mit seinem abgerundeten Design und einer maximalen Greifkraft von 125 N ist dieser Greifer für MRK-Anwendungen geeignet. [30]




Abbildung 38: Greifer 2F-140 Robotiq [32]

ASSISTENZSYSTEM

Der bereits vorhandene Assistent A600 verfügt über ein Multisensor-Kamerasystem, mit dem Montagekontrollen durchgeführt und KLT-Eingriffe erkannt werden können. Über ein integriertes Projektor-System besteht die Möglichkeit Montageanleitungen auf die Arbeitsfläche zu projizieren. Montageschritte können durch virtuelle Buttons auf der Arbeitsfläche bestätigt werden. Mit den vorhandenen I/O-Ports ist die Interaktion mit anderen Geräten möglich. [11]




Abbildung 39: Assistenzsystem Ulixes A600 [11]

3. FEINPLANUNG

3.1 Arbeitsplatzlayout erstellen

Das gewählte Assistenzsystem erlaubt nur eine Anbringung über dem Arbeitsplatz und wird mit Aluminiumprofilen befestigt. Für die Platzierung des Roboters wird am Arbeitsplatz eine Erweiterung der Arbeitsfläche auf der rechten Seite vorgenommen (Layoutoption g, S.45). Die Montagehilfe wird mittig auf der Arbeitsfläche positioniert. Dort ist das kollaborative Montagezentrum (cca) und das des Roboters (rca), das Montagezentrum des Menschen (hca) liegt links davon.



Abbildung 40: CAD-Model des hybriden Arbeitsplatzes

3.2 Erstellung und Austaktung der Sequenz

Nachdem das Arbeitsplatzlayout geplant ist, wird der Arbeitsplatz in der Simulationssoftware emu erstellt und die zuvor erarbeitete hybride Montagesequenz eingepflegt. Darauf erfolgt die Simulation der hybriden Montage des Modell-Pick-Up-Trucks hinsichtlich Ergonomie und Austaktung. Es werden vier verschiedene Szenarien simuliert und anschließend bewertet. Das Ergebnis der Simulationen fließt in die Gesamtbewertung des Arbeitsplatzes ein.



Abbildung 41: Simulation des hybriden Arbeitsplatzes

3.3 Sicherheitskonzept erstellen

Der gewählte Roboter UR5e ist nach der Norm EN ISO 10218-1:2011 und EN ISO 13849-1:2015, Cat.3, PL d spezifiziert [29] und kann ohne weitere Sicherheitsvorkehrungen eingesetzt werden. Gleiches gilt für den Greifer 2F-140 von Robotiq, welcher nach der Norm NF EN ISO 14539 2000, NF EN ISO 12100 2010 und NF EN IEC 60204-1 für MRK-Anwendungen zugelassen ist [33]. Der Cobot wird nach dem Sicherheitsprinzip der Kontaktregelung betrieben, sodass eine Kollision durch Design oder Steuerungstechnik stark abgeschwächt wird. Zudem wird durch das sehr geringe Eigengewicht der Bauteile der Schaden eines ungewollten Zusammenstoßes erheblich reduziert.

Das Assistenzsystem A600 entspricht der EG-Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) und erfüllt die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen [11]. Darüber hinaus wird als weiter passive Sicherheitsvorkehrung der Arbeitsbereich von Mensch und Roboter auf die Arbeitsfläche projiziert (siehe Abbildung 42). Durch diese visuelle Abgrenzung der Arbeitsbereiche kann im Vorfeld die Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Mensch und Cobot reduziert werden.

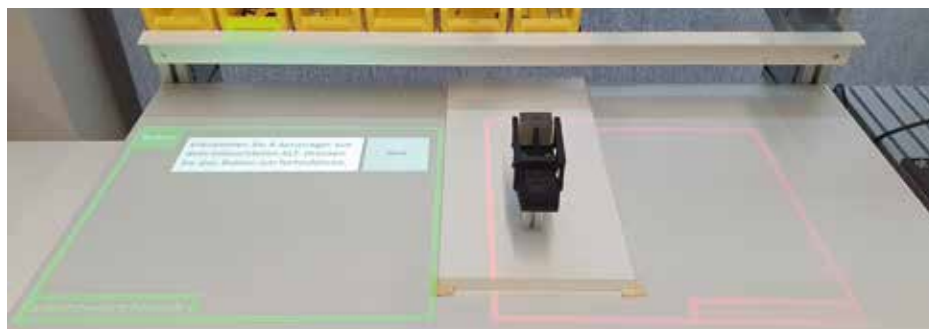


Abbildung 42: Projektion auf die Arbeitsfläche des hybriden Arbeitsplatzes

4. GESAMTBEWERTUNG

4.1 Bewertung des hybriden Arbeitsplatzes



Abbildung 43: (links oben) koexistente Interaktion, (rechts oben) kollaborative Interaktion, (links unten) Montagekontrolle durch das Assistenzsystem, (rechts unten) Teilemagazin des Cobots

Taktzeit 10 %:

Die Taktzeit der manuellen Montage beträgt 1:40 Minuten, die des hybriden Arbeitsplatzes 1:24 Minuten. Dadurch ergibt sich eine Verringerung der Taktzeit um 11,4% und erfüllt somit das zuvor gesetzte Ziel. Erreicht wurde das Ziel durch die Parallelisierung von Arbeitsschritten in der koexistenten Interaktionsform.

Ergonomie 20 %:

Im Vergleich zur manuellen Montage konnte mit Hilfe des hybriden Arbeitsplatzes eine Ergonomieverbesserung um 28,6% erreicht werden. Die Simulation ergab, dass in den Arbeitsschritten »Achshalter einlegen« und »Achsen verschrauben« eine verbesserte Ergonomie erreicht wurde. Dies sind die kollaborativen Arbeitsschritte in denen der Cobot als »dritte Hand« agiert.

Fehlerquote:

Da es sich bei diesem Anwendungsfall um einen Forschungsaufbau handelt, gibt es keine aussagekräftigen Vergleichswerte für die Messung der Fehlerquote. Während der Testläufe hat der Roboter keine Teile falsch eingelegt, zudem wird durch die Montagekontrolle des Assistenzsystems die korrekte Position jedes Teils überprüft. Daher kann angenommen werden, dass die Fehlerquote verringert wird.

Automatisierungsgrad 60 %:

Der Grad der Automatisierung berechnet sich aus dem Quotienten der Anzahl automatisierter Operationen und der Anzahl aller Operationen [16]. Es ergeben sich für diesen Use Case durch das Einlegen von Ladefläche, Kabinenhaube, Chassis, Vorder- und Hinterachse durch den Roboter fünf automatisierte Operationen. Die zwei manuell ausgeführten Operationen sind das Positionieren der Achsträger und das anschließende Eindrehen der Schrauben. Folglich ergibt sich ein Automatisierungsgrad für die hybride Montage des Pick-Up-Trucks von 71 %.

5. UMSETZUNG

5.1 Machbarkeitsanalyse

Nun wird überprüft, ob die Komponenten des Modell-Pick-Up-Trucks gegriffen und in die vorhandene Montagehilfe eingelegt werden können. Ebenso wird getestet, ob die Montagekontrolle des Assistenzsystems wie geplant eingesetzt werden kann.

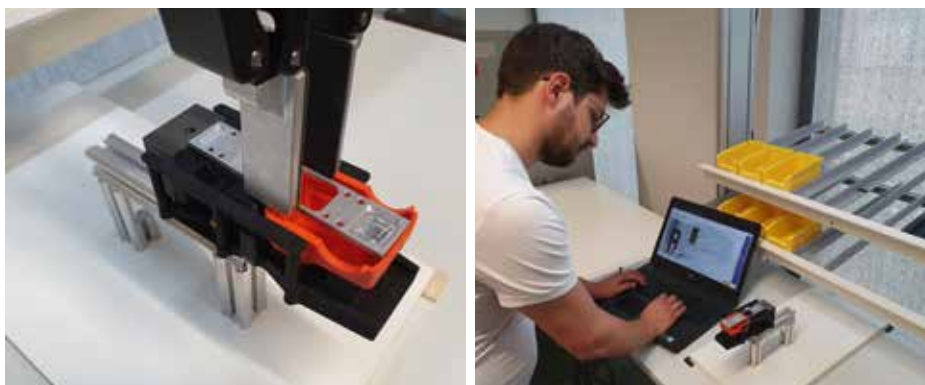


Abbildung 44: (links) Platzieren des Chassis durch den Cobot, (rechts) Einlernen der Montagekontrolle

Die Machbarkeitsanalyse ergab, dass die Teile des Modell-Pick-Up-Trucks wie geplant gegriffen und platziert werden können. Um ein Verrutschen der Ladefläche durch den Roboter zu verhindern, wurde ein zusätzlicher Anschlag an der Montagehilfe angebracht. Somit sind fünf von sechs Freiheitsgraden der Ladefläche gesperrt.

5.2 Implementierung der Sequenz

Gemäß der im Leitfaden beschriebenen Methodik wird die hybride Montagesequenz am Arbeitsplatz umgesetzt.

Schritt 1: Robotersequenz implementieren

Um die Robotersequenz zu implementieren, werden die Teilsequenzen aus der Machbarkeitsanalyse wiederverwendet.

Schritt 2: Austaktung Mensch-Roboter

Die Austaktung der beiden Interaktionspartner wird hier erstmals am Arbeitsplatz überprüft und die Robotergeschwindigkeit angepasst.

Schritt 3: Kommunikationsmechanismen einbringen

Daraufhin wird der virtuelle Button sowie die Montagekontrolle und die KLT-Erkennung des Assistenzsystems in die Mensch-Roboter-Sequenz eingebracht.

Schritt 4: Montageanweisungen erstellen

Abschließend werden die projizierten Montageanweisungen mit Text und Bildern erstellt und an den entsprechenden Stellen in der hybriden Montagesequenz platziert.

Die nachfolgenden Bilder zeigen Ausschnitte der Montage des Pick-Up-Trucks durch das hybride Team. Das Assistenzsystem projiziert Arbeitsbereiche, sowie Montageanweisungen als Text und Bild zur Unterstützung des Menschen auf die Arbeitsfläche. Der Cobot arbeitet in der koexistenten oder kollaborativen Interaktionsform.

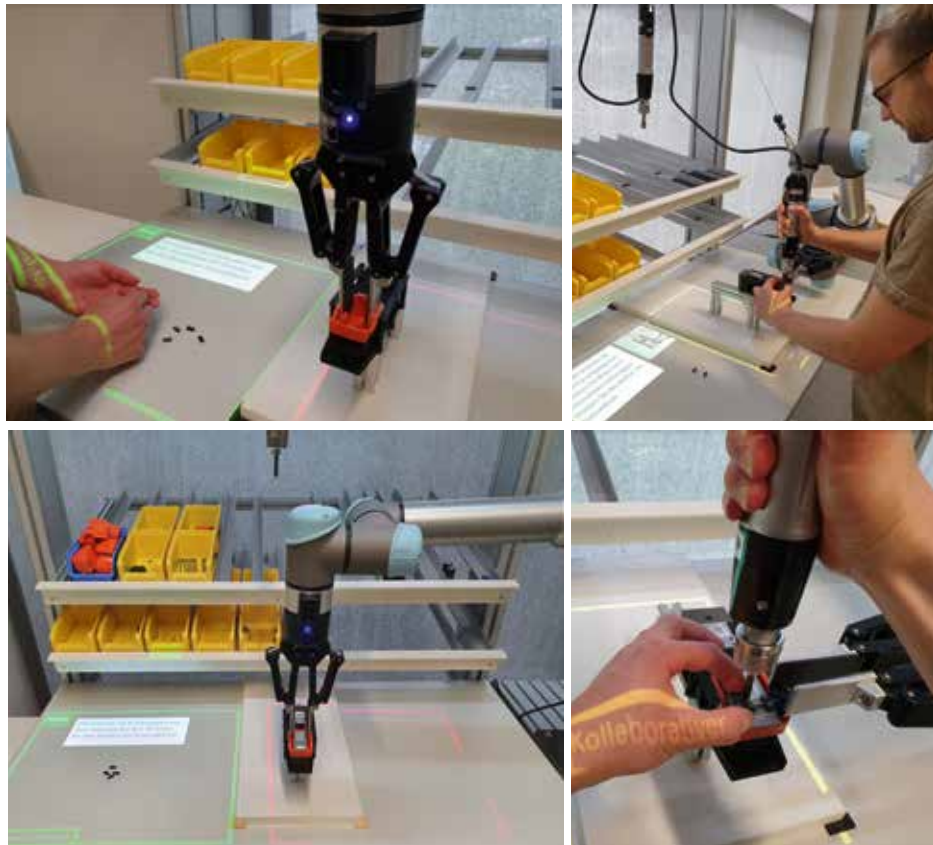


Abbildung 45: (linke Seite) koexistente Interaktionsform, (rechte Seite) kollaborative Interaktionsform

Stand der Wissenschaft

Nach den eher praxisorientierten Aspekten zur assistierten Mensch-Roboter-Interaktion soll nun abschließend der Stand der Forschung beleuchtet werden. Zugegeben eine eher ungewöhnliche Gliederung, jedoch steht die Anwendungsorientierung und die Praxisnähe im Vordergrund dieses Leitfadens. Dennoch soll die wissenschaftliche Eruierung des Stands der Forschung nicht zu kurz kommen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zum Thema MRK zeigen, dass es bereits umfangreiche Untersuchungen in den für die Montage relevanten Bereichen gibt. Durch aktive und passive Sicherheitsvorkehrungen, einem geringen Eigengewicht und einer angepassten Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters kann die Sicherheit des Menschen gewährleistet werden [33] [34] [35]. Mit dem Einsatz von Software können bereits im Vorfeld Arbeitsplätze und Montageprozesse hinsichtlich Layoutgestaltung, Produktivität und Koordination des Roboters sowie Sicherheit simuliert und geprüft werden [35] [36] [37]. Bezüglich Ergonomie und Akzeptanz muss auf einen angepassten Bewegungsablauf bei entsprechender Geschwindigkeit geachtet werden, um keine zusätzliche Belastung des Menschen zu erzeugen [38]. Es kann durch den Einsatz von Cobots nachweislich die Montagezeit, sowie die Beanspruchung des Menschen reduziert werden [39]. Zudem bietet der Einsatz von Cobots die Möglichkeit schwerbehinderte Menschen in den Montageprozess zu integrieren. Die Nutzung von MRK-fähigen Robotern hat einen signifikanten Einfluss auf die Produktivitätssteigerung, sowie Flexibilität im Montageprozess [40].

Auch zum Thema Assistenzsysteme mit AR-Technologien gibt es bereits Untersuchungen im Einsatzgebiet der Montage zur Produktivitätssteigerung und Entlastung der Mitarbeitenden. Durch den Vergleich von AR-basierenden Assistenzsystemen mit einer herkömmlichen Printanleitung konnte aufgezeigt werden, dass sich die Projektion auf die Arbeitsfläche und auf das Objekt als bessere Unterstützung herausstellt als andere Technologien [41]. Grundsätzlich lässt sich eine Reduktion der kognitiven Belastung, der Durchlaufzeit und Fehlerquote, bei Erhöhung der Flexibilität feststellen [42] [43] [56] [58]. Des Weiteren wurden die Grenzen und Möglichkeiten verschiedener AR-Assistenzsysteme untersucht und aufgezeigt, sowie Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen zur Lern- und Gesundheitsförderung erarbeitet [41]. Aus den Befragungen der Teilnehmenden der Studien kann eine generelle Akzeptanz von AR-basierenden Assistenzsystemen festgestellt werden [36] [37] [58].

Wie die Literaturrecherche in Bezug auf ein Gesamtsystem aus Cobot und Assistenzsystem zeigt, wurde in diesem Bereich bisher wenig Forschung betrieben. Es wurden lediglich Konzepte zu Potenzial, Sicherheit, Ergonomie und Akzeptanz erarbeitet und Montagearbeitsplätze mit verschiedenen AR-Technologien aufgebaut [38] [39] [40] [42]. Bei einem entwickelten Montagearbeitsplatz wurde zusätzlich ein Steuerrechner mit künstlicher Intelligenz aufgebaut, um die physische und kognitive Belastung zu reduzieren [43]. Bei den betrachteten Forschungsberichten konnte bei einer Untersuchung herausgefunden werden, dass der Einlernprozess bei der Zusammenarbeit mit einem Cobot durch ein AR-Assistenzsystem unterstützt und vereinfacht werden kann. Eine weitere praktische Untersuchung wies die Reduzierung der Montagezeit nach [41].

Um einen genaueren Überblick über die untersuchten Forschungsberichte zu MRK und Assistenzsystemen zu erhalten, wurden diese nach den Aspekten Sicherheit, Planung / Layout, Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz und Ergonomie kategorisiert. Die Forschungsberichte, welche auf Untersuchungen einer Kombination aus Cobot und Assistenzsystem abzielen, wurden nach

den Aspekten kategorisiert, ob ein Konzept entwickelt, ein Arbeitsplatz aufgebaut oder eine Studie durchgeführt wurde. Die Kategorisierung ist in die nachfolgende Tabelle eingetragen.

	MRK				AR-Assistenzsystem				Gesamt-system				
	Sicherheit	Planung / Layout	Wirtschaftlichkeit	Akzeptanz	Ergonomie	Sicherheit	Planung / Layout	Wirtschaftlichkeit	Akzeptanz	Ergonomie	Konzeptentwicklung	Arbeitsplatz installiert	Studie
Vysocky und Novak [44]	x												
Gopinath, Ore u.a. [45]	x												
Bobka, Germann u. a. [46]	x	x	x										
Berg, Gebauer u. a. [47]		x			x								
Kemény, Beregi u. a. [48]		x											
Johannsmeier, Haddadin [49]		x			x								
Cesta, Orlandini u. a. [50]		x			x								
Matheson, Minto u. a. [51]			x	x	x								
Lee, Barthelmey u. a. [52]		x	x		x								
Hegenberg, Wilhelm u. a. [53]			x	x	x								
Lungfiel u. a. [54]				x	x								
Kremer, Hermann [33]					x								
Schenk, Haase u. a. [34]						x			x				
Funk, Kosch u. a. [35]							x		x				
Makris, Pintzos u. a. [55]							x		x				
Tang, Owen u. a. [56]							x		x				
Bonino, Giannini u. a. [36]								x					
Nilsson und Johansson [37]								x					
Zäh, Wiesbeck u.a. [57]									x				
Hou, Wang u. a. [58]							x	x	x				
Liu, Wang [39]										x	x		
Blaga und Tamas [38]										x	x		
Makris, Karagiannis u. a. [40]										x	x		
Danielsson, Syberfeldt u. a. [42]										x	x	x	
Charoenseang, Tonggoed [41]										x	x	x	
Ender, Wagner u. a. [43]										x	x		

Fazit und Ausblick

Der Leitfaden zur Einführung hybrider Montagearbeitsplätze soll Produktionsplanenden, Führungskräften und Anwendenden eine Orientierung zur Planung assistierter MRK-Arbeitsplätze geben. Die Checklisten nach jedem Schritt ermöglichen ein schnelles, iteratives Vorgehen, bei dem mögliche Risiken frühzeitig erkannt und beseitigt werden. Bisherige Erfahrungen aus Industrie und Forschung sind in Form von Leitfragen mit in die vorgeschlagene Vorgehensweise eingeflossen und helfen Stolpersteine bei der Einführung zu umgehen.

Der Leitfaden soll den Paradigmenwechsel von manueller Montage zu hybriden Arbeitsplätzen erleichtern und so vor allem KMU dabei helfen Produktionsstandorte in Hochlohnländern langfristig zu erhalten und so Arbeitsplätze sichern. Die Kombination aus Cobot und Assistenzsystem bietet dabei einen innovativen Ansatz bei der Unterstützung neuer Montageabläufe. Durch das hybride Team können Arbeitsplätze flexibler gestaltet werden und eine Anpassung an sich ändernde Marktbedingungen, wie kleiner werdende Losgrößen oder höhere Variantenvielfalt wird vereinfacht.

Dieser Leitfaden basiert auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt InKoMo – Interaktive, kollaborative Montage komplexer Bauteile, das von der Bayerischen Forschungsförderung (AZ-1401-19) gefördert wurde. Für die Zukunft ist ein Folgeprojekt geplant, das sich mit einer konfigurierbaren Prozesskette in der kollaborativen Montage befasst. Ziel dieser Forschung soll es sein, die Konfiguration der Prozesskette von assistierten MRK-Arbeitsplätzen zu automatisieren und mit Hilfe einer Echtzeit-Algorithmik adaptiv Änderungen im Roboterprogramm zu realisieren.

Literaturverzeichnis

- [1] **Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.)** (2012), »Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis«, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [2] **Buxbaum, H.J. (Ed.)** (2020), »Mensch-Roboter-Kollaboration«, Springer-Verlag, Berlin
- [3] **Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kuhlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A.** (2019), »Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration«, Carl Hanser Verlag, München
- [4] **Bauer, W.; Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.** (2016), »Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen«, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, verfügbar in: https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4151100.pdf
- [5] **Matthias, B.; Ding, H.** (2013), »Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage«, in Internationales Forum Mechatronics (ifm), verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/269410966_Die_Zukunft_der_Mensch-Roboter_Kollaboration_in_der_industriellen_Montage

- [6] **Mewes E.; Minow A.; Bergmüller A.; Wassmann S.** (2020), »Digitale Assistenzsysteme zur mobilen Verwendung im technischen Service«, Fraunhofer IFF, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/340655390_DIGITALE_ASSISTENZSYSTEME_ZUR_MOBILEN_VERWENDUNG_IM_TECHNISCHEN_SERVICE_Ein_Leitfaden_fur_die_Gestaltung_und_Nutzung
- [7] **Picavi** (2017), »Datenbrille unterstützt Sequenzierung«, verfügbar in: <https://www.maschinenmarkt.ch/datenbrille-unterstuetztsequenzierung-a-642814/>
- [8] **Rapp S.; Weber I.** (2009), »LumEnActive: bewegte Projektion mit Anwendungsmöglichkeiten in Fertigung und Entwicklung«, verfügbar in: http://conante.com/~rapp/publications/IFFMagdeburg09/Publication/beitrag_rapp_weber.pdf
- [9] **Apt W.; Bovenschulte M.; Priesack K.; Weiß C.; Hartmann E. A.** (2018), »Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb«, Forschungsbericht, verfügbar in: https://www.iit-berlin.de/iit-docs/0b0ab71d0ed949269fa39e2b38665fde_Einsatz-von-digitalen-Assistenzsystemen-im-Betrieb.pdf
- [10] **VDMA** (2018/2019), »Industrielle Bildverarbeitung 2018/19 – Anwendungen, Produkte, Bezugsquellen«, verfügbar in: https://rua.vdma.org/documents/256550/26983528/VDMA_IBV_Branchenfuehrer_dt_Final_1540547428804.pdf/27381ef3-c073-a38d-2ae3-4fd8a9a040a7
- [11] **Ulixes** (2021), »A300 / A500 / A600 de Handbuch«, Ulixes Robotersysteme GmbH
- [12] **Rüger C.; Moosburner S.; Sauer I. M.** (2020), »Extended-Reality-Technologien zur Unterstützung chirurgischen Handelns«, *Der Chirurg* Volume 91, S. 544–552.
- [13] **Hochberg J.; Vogel C.; Bastiaens T.** (2017), »Gestaltung und Erforschung eines Mixed-Reality-Lernsystems«, verfügbar in: <https://www.medienpaed.com/article/view/476/459>
- [14] **Teizer J.; Wolf M.; König M.** (2018), »Mixed Reality Anwendungen und ihr Einsatz in der Aus- und Weiterbildung kapitalintensiver Industrien«, VDI-Bau-technik, verfügbar in: https://digirab.blogs.ruhr-uni-bochum.de/wp-content/uploads/2019/07/2018_Bauingenieur_Teizer_MixedReality.pdf
- [15] **Galaske N.; Rönick K.; Stockinger C.** (2019), »Leitfaden Arbeit 4.0 – Erfassung und Verarbeitung sensibler Mitarbeiterdaten für Assistenzsysteme in der Produktion«, *Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Darmstadt*, verfügbar in: https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/leitfaden-arbeit-40.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [16] **Kasselmann S; Willeke S.** (2016), »4.0 READY – Technologie-Kompendium – Interaktive Assistenzsysteme«, Institut für Integrierte Produktion Hannover, verfügbar in: https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompendium.pdf
- [17] **Bauer, W.; Rally, P., Scholtz, O.** (2018), »Schnelle Ermittlung sinnvoller MRK-Anwendungen – Auswahlunterstützung in der Montage«, *ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, JG. 113, Carl Hanser Verlag, München.

- [18] **KUKA Roboter GmbH** (2013) »KR 5 R1400 Specification«, verfügbar in: [http://supportwop.com/IntegrationRobot/content/2-Robots/Petites_charges\(5-16kg\)/KR_5_arc/English_manual_KR_5_R1400_en.pdf](http://supportwop.com/IntegrationRobot/content/2-Robots/Petites_charges(5-16kg)/KR_5_arc/English_manual_KR_5_R1400_en.pdf)
- [19] **Berg J.; Merhar L.; Lottermoser A.; Härdtlein C.; Henke M.** (2019), »Roboter für den Mittelstand – Praxisleitfaden für Leichtbauroboter in der Produktion«, Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, verfügbar in: http://www.kompetenzzentrum-augsburg-digital.de/leitfaden_robotik
- [20] **Hesse S.** (2011), »Greifertechnik – Effektoren für Roboter und Automaten«, Carl Hanser Verlag, München
- [21] **Schröter D.** (2017), »Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in MRK«, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung Band 81, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, verfügbar in: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9966/1/Daniel-Schroeter-81.pdf>
- [22] **Büttner S.; Funk M., Sand O. und Röcker C.** (2016) »Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems: A Comparison«, Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments
- [23] **Berg, J.; Gebauer, D.; Reinhart, G.** (2019), »Method for the evaluation of layout options for a human-robot collaboration«, *Procedia CIRP*, Jg. 83, S. 139–145.
- [24] **Daub U.; Ackermann A.; Kopp V.** (2019), »Ergonomie-Benefits - Kriterien zur Bewertung ergonomischer Maßnahmen in der Kosten-Nutzen-Analyse«, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA – Stuttgart
- [25] **Schunk GmbH & Co. KG** (2021), verfügbar in: https://schunk.com/de_de/co-act/hintergrundwissen-mrk/
- [26] **Deutsches Institut für Normung (DIN)** (2011), »Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung«, DIN EN ISO 12100:2011-03, verfügbar in: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-12100/128264334>
- [27] **Niewerth, C.; Miro, M.; Schäfer, M.; Wannöffel, M. (Hrsg.); Kuhlenkötter, B. (Hrsg.)** (2019), »Leitfaden zur Einführung von Mensch-Roboter-Kollaboration: Perspektiven der betrieblichen Interessenvertretung«, Ruhr-Universität Bochum, verfügbar in: <https://rubigm.ruhr-uni-bochum.de/Transfer/MRK%20Leitfaden.pdf>
- [28] **Oberc, H.; Prinz, C.; Glogowski, P.; Lemmerz, K.; Kuhlenkötter, B.** (2019), »Human Robot Interaction – learning how to integrate collaborative robots into manual assembly lines«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 31, S. 26–31.
- [29] **Universal Robots A/S** (2018), »Universal Robots e-Series Benutzerhandbuch«, verfügbar in: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40980/UR5e_User_Manual_de_Global.pdf

- [30] **Robotiq Inc.** (2018), »2F-85 & 2F-140 – Instruction Manual«, verfügbar in: https://robotics.ee.uwa.edu.au/courses/robotics/project/ur5/Gripper_UserManual.pdf
- [31] **JUGARD+KÜNSTNER** (2021), verfügbar in: <https://www.jugard-kuenstner.de/universal-robots/cobots/ur5.html>
- [32] **WiredWorkers** (2021), verfügbar in: <https://wiredworkers.io/product/robotiq-2f-140>
- [33] **Kremer, D. und Hermann, S.** (2018), »Mensch-Roboter-Zusammenarbeit – Gestaltung sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit«, verfügbar in: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Veranstaltungen/Dokumentationen/Neue-Technologien/Mensch-Roboter-2017.html>
- [34] **Schenk, M.; Haase, T.; Keller, A.; Berndt, D.** (2016), »Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme« in Schlick, C. M. (Hrsg.), Megatrend Digitalisierung – Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation, GITO Verlag, Magdeburg, S. 131–139.
- [35] **Funk, M.; Kosch, T.; Schmidt, A.** (2016), »Interactive worker assistance: comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions« in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), UbiComp '16: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, 12.–16. September, Heidelberg, Deutschland, ACM, S. 934–939.
- [36] **Bonino, B.; Giannini, F.; Monti, M.** (2019), »Augmented Reality in manufacturing engineering«, CNR-IMATI, Genova, verfügbar in: <http://irs.imati.cnr.it/files/reports/19-03.pdf>
- [37] **Nilsson, S.; Johansson, B. J.** (2008), »Acceptance of Augmented Reality Instructions in a Real Work Setting«, in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), CHI '08: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 5.–10. April, Florence, Italy, ACM, S. 2025–2032.
- [38] **Blaga, A.; Tamas, L.** (2018), »Augmented Reality for Digital Manufacturing«, MED '18: The 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, 19.–22. Juni, Zadar, Kroatien, S. 173–178.
- [39] **Liu, H.; Wang, L.** (2017), »An AR-based Worker Support System for Human-Robot Collaboration«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 11, S. 22–30.
- [40] **Makris, S.; Karagiannis, P.; Koukas, S.; Matthaiakis, A.-S.** (2016), »Augmented reality system for operator support in human–robot collaborative assembly«, *CIRP Annals*, Jg. 65, Nr. 1, S. 61–64.
- [41] **Charoenseang, S.; Tonggoed, T.** (2011), »Human-Robot Collaboration with Augmented Reality« in Stephanidis, C. (Hrsg.), HCI International 2011 Posters' Extended Abstracts, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 93–97.

- [42] Danielsson, O.; Syberfeldt, A.; Brewster, R.; Wang, L. (2017), »Assessing Instructions in Augmented Reality for Human-robot Collaborative Assembly by Using Demonstrators«, *Procedia CIRP*, Jg. 63, S. 89–94.
- [43] Ender, J.; Wagner, J.; Kunert, G.; Guo, F.; Larek, R.; Pawletta, T. (2019), »Concepts of a self-learning Workplace Cell for Worker Assistance while Collaboration with a Robot within the Self-Adapting-Production-Planning-System«, *Informatyka Automatyka Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, Lublin University of Technology, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/337997920_CONCEPT_OF_A_SELF-LEARNING_WORKPLACE_CELL_FOR_WORKER_ASSISTANCE_WHILE_COLLABORATION_WITH_A_ROBOT_WITHIN_THE_SELF-ADAPTING-PRODUCTION-PLANNING-SYSTEM
- [44] Vysocky A.; Novak P. (2016) »Human-Robot Collaboration In Industry«, *MM Science Journal*, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/303853919_Human_-_Robot_collaboration_in_industry
- [45] Gopinatha V.; Oreb E.; Grahnd S.; Johansen K. (2018), »Safety-Focussed Design of Collaborative Assembly Station with Large Industrial Robots«, Elsevier B.V., Stockholm
- [46] Bobkaa P.; Germanna T.; Heyna J. K.; Gerbersa R.; Dietricha F.; Dröder K. (2016), »Simulation platform to investigate safe operation of human-robot,« Elsevier B.V., Braunschweig
- [47] Matheson E.; Minto R.; Zampieri E.; Faccio M.; Rosati G. (2019), »Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review«, Licensee MDPI, Basel
- [48] Keménya, Z.; Beregia, R.; Nacsaa, J.; Kardosa, C.; Horvátha, D. (2018), »Human–robot collaboration in the MTA SZTAKI learning factory facility at Győr«, *Procedia Manufacturing*, Jg. 23, S. 105–110.
- [49] Johannsmeier, L. und Haddadin, S. (2017), »A Hierarchical Human-Robot Interaction-Planning Framework for Task Allocation in Collaborative Industrial Assembly Processes«, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Jg. 2, Nr. 1.
- [50] Cesta, A.; Orlandini, A.; Umbrico, A. (2018), »Fostering Robust Human-Robot Collaboration through AI Task Planning«, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 1045–1050.
- [51] Matheson, E.; Minto, R.; Zampieri, E. G. G.; Faccio, M.; Rosati, G. (2019), »Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review«, Licensee MDPI, Basel
- [52] Lee, E.; Barthelmey, A.; Reckelkamm, T.; Kang, H.; Son, J. (2019), »A Study on Human-Robot Collaboration based Hybrid Assembly System for Flexible Manufacturing«, in *Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) (Hrsg.) IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2019*, 14.–17. Oktober, Lissabon, IEEE, S. 4197–4202.

- [53] Hegenberg, J.; Schimpf, D.; Fischer, N.; Schmidt, L. (2018), »Fallstudie zur Roboterunterstützung des Menschen bei manueller Montage«, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 72, S. 239–251.
- [54] Koppenborg, M.; Lungfiel, A.; Naber, B.; Nickel, P. (2013), »Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit«, in Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e. V. (Hrsg.), 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, 27. Februar – 1. März, Krefeld, GfA-Press, Dortmund S. 417–420.
- [55] Makris, S.; Pintzos, G.; Rentzos, L.; Chryssolouris, G. (2013), »Assembly support using AR technology based on automatic sequence generation«, CIRP Annals, Jg. 62, Nr 1, S. 9–12.
- [56] Tang, A.; Owen, C.; Biocca, F.; Mou, W. (2003), »Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly« in Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.), CHI '03: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 5.–10. April, Ft. Lauderdale, Florida, USA, ACM, S. 73–80.
- [57] Zäh, M.; Wiesbeck, M.; Engstler, E.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S.; Bannat, A.; Wallhoff, F. (2007), »Kognitive Assistenzsysteme in der Montage«, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
- [58] Hou, L.; Wang, X.; Martijn, T. (2015), »Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly: An Experiment-Based Evaluation«, Journal of Computing in Civil Engineering, Jg. 29, Nr. 1.

BEITRÄGE & BERICHTE

Vom 3D-Metalldruck bis Klimaanpassung



Untersuchungen zur Temperaturleitfähigkeit additiv gefertigter Stahlproben in Abhängigkeit der relativen Dichte

Dennis Ochs, Kira-Kristin Wehnert, Kevin Knopp, Jürgen Hartmann, Alexander Versch, Alexander Schiffler

Short Facts

Projekt: ProDiMe – Projektgruppe digitale Anwendungen in der Metallverarbeitung

Projektlaufzeit: 2017–2020

1 EINLEITUNG

Das direkte Metall-Laser-Schmelzen (DMLS) aus der Familie der Additiven Fertigungsverfahren (AM) ermöglicht die schichtweise Erzeugung komplexer dreidimensionaler Geometrien mit hoher relativer Dichte unter Verwendung von Metallpulver als Ausgangsmaterial [1]. Die Technologie wird zunehmend eingesetzt, um innovative Bauteile material- und gewichtsparend herzustellen oder komplexe Produkte ohne zusätzliche Werkzeuge oder Spannvorrichtungen zu fertigen. Darüber hinaus sind Funktionsintegrationen, zum Beispiel Gussformen mit eingepägten Kühlkanälen, möglich.

Da einzelne Metallpulverschichten auf vorhergehende Schichten aufgeschmolzen werden, entstehen während der Herstellung des Bauteils komplexe, zeitabhängige Temperaturprofile [2]. Durch den Einsatz hoher Laserintensitäten und Scangeschwindigkeiten, bei denen die Belichtungszeit der Laserbestrahlung im Bereich von Millisekunden liegt, werden zudem extrem hohe Aufheiz- und Abkühlraten induziert, die zu einzigartigen Mikrostrukturen und Materialeigenschaften führen [3].

Diese extremen Prozessbedingungen können sich jedoch auch negativ auf den Fertigungsprozess auswirken. Bei komplexen Bauteilen bleibt die Prozessstabilität und Qualitätssicherung Umfragen zufolge weiterhin die wichtigste technologische Barriere für den Einsatz additiv gefertigter Bauteile in hochbelasteten oder sicherheitsrelevanten Bereichen [4]. Daher verspricht der Zusammenhang zwischen Temperaturprofil während der Fertigung, relativer Dichte der Bauteile, sowie thermophysikalischer Eigenschaften additiv gefertigter Proben wichtige Erkenntnisse, insbesondere im Hinblick auf eine zerstörungsfreie Qualitätssicherung, sowie neue Anwendungsmöglichkeiten.

2 METHODE

2.1 Probenherstellung

Für die Herstellung der Teile wird eine EOS M290 Metalldruckanlage mit einem 400 W Faserlaser und einem Laserfokussdurchmesser von 100 μm verwendet. Die Proben werden mit einer Belichtungsstrategie bestehend aus einer rotierenden Streifenbelichtung mit einem kontinuierlichen Wechsel der Scanrichtung zwischen jeder aufeinanderfolgenden Schicht um einen Drehwinkel von 67 Grad hergestellt. Weiterhin werden die Probenflächen in 10 mm breite Streifen unterteilt und mit einem Streifenüberlapp von 80 μm alternierend belichtet. Die Belichtungsstrategie ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

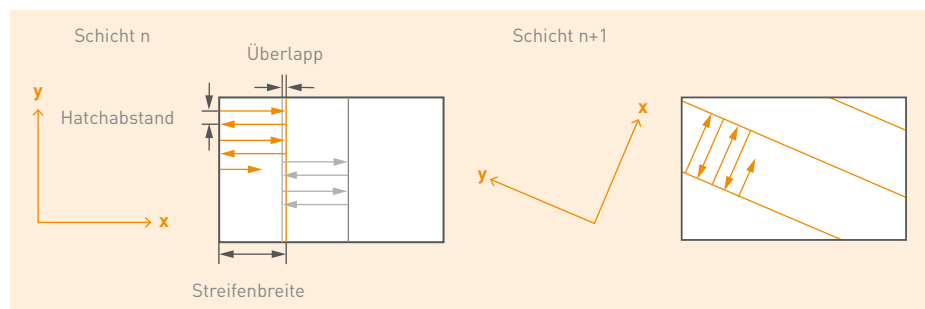


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Belichtungsstrategie

Weitere, für alle Proben konstante Prozessparameter sind eine Scangeschwindigkeit von 960 mm/s, eine Laserleistung von 285 W und eine Pulverschichtdicke von 40 μm . Als Material kommt EOS MaragingSteel MS1 mit einer Korngröße $\leq 63 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Das Pulvermaterial entspricht dabei in Zusammensetzung der europäischen Klassifikation 1.2709. Die genaue Zusammensetzung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Materialzusammensetzung EOS MaragingSteel MS1 [5]

FE	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn, Si	P, S
Rest	17–19	8,5–9,5	4,5–5,2	0,6–0,8	0,05–0,15	$\leq 0,5$	$\leq 0,03$	$\leq 0,1$	$\leq 0,01$

Die thermische Analyse der Proben wird an einer Laser-Flash-Apparatur durchgeführt. Dazu werden zylinderförmige Proben mit einem Durchmesser von 12,7 mm und einer Höhe von 4 mm hergestellt. Um Proben mit unterschiedlichen relativen Dichten zu erzeugen, wird der Hatchabstand, welcher den Abstand zweier benachbarter Schmelzspuren beschreibt, variiert. Die Zuordnung der Hatchabstände und die daraus resultierenden volumetrischen Energiedichten sind in Tabelle 2 dargestellt. Zum Vergleich wird zudem eine CNC-gedrehte Probe aus konventionell hergestelltem 1.2709 mit der gleichen geometrischen Form verwendet, um die Temperaturleitfähigkeit mit den Werten der additiv gefertigten Proben zu vergleichen.

Tabelle 2: Probenbezeichnungen mit zugehörigen Hatchabständen und resultierender volumetrischer Energiedichte

Probenbezeichnung	Hatchabstand [mm]	volumetrische Energiedichte [J/mm^3]
Probe 1	1	7,42
Probe 2	0,5	14,84
Probe 3	0,25	26,69
Probe 4	0,11	67,47

2.2 Dichtemessung

Die relative Dichte der additiv gefertigten Probenkörper wird optisch bestimmt. Dazu werden die Proben metallographisch präpariert und anschließend ein Schlifffbild erstellt. Aus dem Verhältnis von Porenfläche zur Fläche des Vollmaterials wird die relative Dichte bestimmt.

Da in der konventionellen Probe kein unvollständig aufgeschmolzenes Pulver im Probeninneren vorliegt, welches die Messung verfälscht, kann die relative Dichte hier nach dem archimedischen Prinzip über das Wägen an Wasser und an Luft ermittelt werden.

2.3 Prozessüberwachung

Das zur Prozessüberwachung eingesetzte System ist ein EOSTATE Exposure OT, welches zur Qualitätssicherung und -kontrolle bei der Produktion additiv gefertigter Teile entwickelt wurde. Das System enthält eine sCMOS-Kamera, welche die Prozessemissionen während der Belichtung mit 10 fps bei einer zentralen Wellenlänge von 900 nm und einem schmalen Bandpass von 25 nm erfasst. Anschließend werden die Werte der einzelnen Pixel über die Belichtungszeit der jeweiligen Schicht integriert. Durch die Korrelation der Helligkeit im Bild mit der berechneten Größe Strahlungsdichte \times Zeit lassen sich Grauwertinformationen gewinnen, um den Prozess zu charakterisieren.

2.4 Laser-Flash-Analyse

Die Laser-Flash-Analyse kommt bei der Messung der Temperaturleitfähigkeit einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien zum Einsatz. Ein Laserpuls erwärmt die Vorderseite einer planparallelen Probe und der daraus resultierende Temperaturanstieg auf der Rückseite der Probe wird in Abhängigkeit der Zeit detektiert. Je höher die Temperaturleitfähigkeit, desto schneller erreicht der Temperaturanstieg die Probenrückseite. Für den eindimensionalen, adiabatischen Fall wird die Temperaturleitfähigkeit aus dem rückseitigen Temperaturanstieg wie folgt berechnet [6].

$$a = 0,1388 \frac{d^2}{t_{0,5}} \quad (1)$$

Dabei beschreibt d den Probendurchmesser und $t_{0,5}$ die Halbwertszeit des maximalen Temperaturanstiegs. Gemessen werden vier additiv hergestellte Proben unterschiedlicher relativer Dichte sowie eine konventionell hergestellte Probe. Die Temperaturschritte betragen $\Delta T = 50 \text{ °C}$ über einen Temperaturbereich von $50 \text{ °C} - 1000 \text{ °C}$. Die nominelle Dichte des Materials wird auf $8,1 \text{ g/cm}^3$ und die spezifische Wärmekapazität zunächst auf einen konstanten Wert von $c_p = 450 \text{ J/kgK}$ eingestellt [5].

3 ERGEBNISSE

Die mittels DMLS hergestellten Proben sind in Abbildung 2 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Hatchabstände und den daraus resultierenden, unterschiedlichen volumetrischen Energiedichten, sind Proben mit unterschiedlichen relativen Dichten entstanden.



Abbildung 2: Darstellung der additiv hergestellten Proben und der konventionell hergestellten Probe von links nach rechts: Probe 1, Probe 2, Probe 3, Probe 4, konventionelle Probe

Je größer der Hatchabstand bei ansonsten konstanten Prozessparametern ist, desto geringer ist die volumetrische Energiedichte bei der Belichtung (vgl. Tabelle 2). Dies hat zur Folge, dass die Laserstrahlung das Metallpulver nicht mehr vollständig aufschmilzt. Folglich steigt

die Menge an unvollständig aufgeschmolzenem Pulver, sowie die Anzahl der Defekte und Einschlüsse, was zu einer Zunahme der Porosität und folglich zu einer Abnahme der relativen Dichte führt. Die Schlißbilder, anhand derer die relativen Dichten bestimmt wurden, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die relativen Dichten der einzelnen Proben in Abhängigkeit von der volumetrischen Energiedichte sind weiterhin in Tabelle 3 aufgeführt.



Abbildung 3: Schlißbilder der additiv gefertigten Proben. Das Material ist in grau, die Porenfläche in schwarz dargestellt

Tabelle 3: Zuordnung der Hatchabstände und der volumetrischen Energiedichten zu den resultierenden relativen Dichten, der Temperaturleitfähigkeit bei 200 °C und dem mittleren Grauwerten über alle Schichten

Probenbezeichnung	Hatchabstand [mm]	volumetrische Energiedichte [J/mm^3]	Relative Dichte [%]	durchschnittlicher Grauwert [-]	Temperaturleitfähigkeit bei 200 °C [mm^2/s]
Probe 1	1	7,42	42,3	1.692	1,299
Probe 2	0,5	14,84	82,2	3.317	2,583
Probe 3	0,25	29,69	99,1	8.219	4,462
Probe 4	0,11	67,47	99,7	26.134	5,120
konv. Probe	–	–	99,8	–	4,969

Die räumliche Temperaturverteilung während des Fertigungsprozesses lässt zudem Rückschlüsse auf den Prozess und die resultierenden Materialeigenschaften zu. Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein integriertes OT-Bild des Prozessüberwachungssystems. In Anlehnung an das Planck'sche Strahlungsgesetz, das den Zusammenhang zwischen der Strahldichte der Wärmestrahlung pro Raumwinkel, Flächenelement und Wellenlängenintervall eines schwarzen Körpers und dessen Temperatur als Funktion der Wellenlänge beschreibt, können Unterschiede in der Pixel-Helligkeit prinzipiell auf Temperaturunterschiede während des Fertigungsprozesses zurückgeführt werden. Aufgrund der sich schnell ändernden Aggregatzustände, die zu wechselnden Emissionskoeffizienten im Schmelzbad führen, sowie der räumlich und zeitlich extremen Temperaturgradienten, ist es allerdings nicht einfach möglich, absolute Temperaturen zu bestimmen.

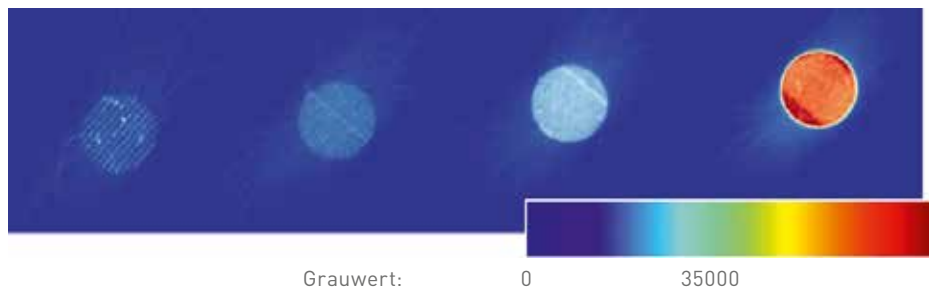


Abbildung 4: Integriertes Bild des Prozessüberwachungssystems für eine Schicht. Von links nach rechts: Probe 1, Probe 2, Probe 3, Probe 4

Da einige Pixel aufgrund der teilweise nah beieinanderliegenden Schmelzspuren und der daraus resultierenden Überlappung der Wärmeeinflusszonen während der Integrationszeit mehrere zeitlich versetzte Aufheiz- und Abkühlphasen beobachten, können die Grauwerte der einzelnen Pixel für jede Schicht zudem nicht auf eine einzige, absolute Verarbeitungstemperatur zu einem definierten Zeitpunkt bezogen werden.

Dennoch gilt: je höher die Temperatur während der Belichtung, desto höher ist die vom Schmelzbad und dem umgebenden Material abgegebene Strahldichte, welche folglich von der Thermografiekamera detektiert wird.

Abbildung 5 zeigt die gemittelten Grauwerte von Schicht 5–95 der vier additiv hergestellten Proben. Wie zuvor beschrieben steigen die ermittelten Grauwerte mit ansteigender volumetrischer Energiedichte.

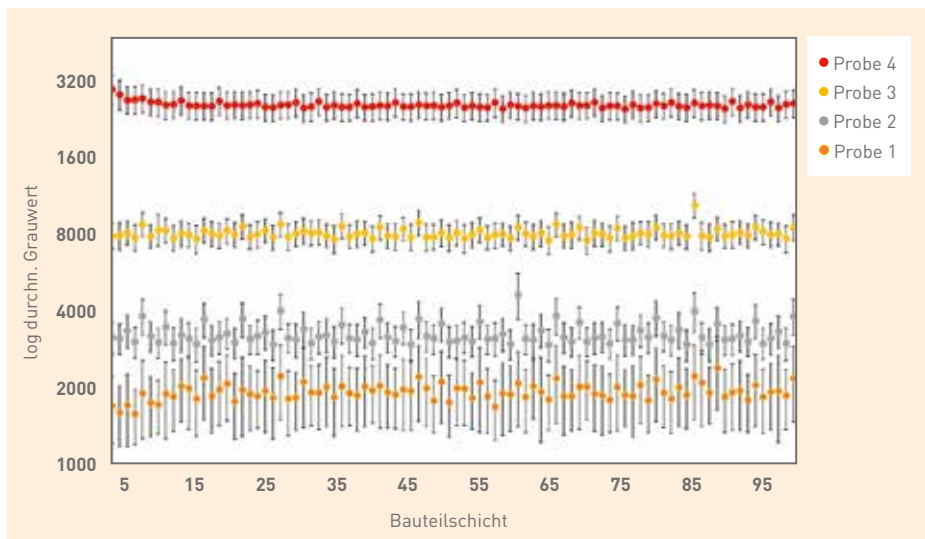


Abbildung 5: Mittlere Grauwerte des OT-Überwachungssystems für die Bauteilschichten 5–95

Da sich aufgrund der unterschiedlichen Hatchabstände allerdings nicht nur die in die einzelnen Schichten eingebrachte volumetrische Energiedichte ändert, sondern damit zusammenhängend sowohl Belichtungsfläche als auch in gleichem Maße auch Bearbeitungszeit des Lasers und somit Integrationszeit der OT-Bilder, erscheint es sinnvoll, die durchschnittlichen Grauwerte der einzelnen Schichtbilder in Abhängigkeit der Wegstrecke L_1

des Bearbeitungslasers darzustellen. Dabei ergibt sich aus einer Halbierung des Hatchabstandes eine Verdoppelung der Wegstrecke. Somit lassen sich die erhöhten durchschnittlichen Grauwerte der einzelnen Schichten aufgrund der mehr belichteten Fläche berücksichtigen und Rückschlüsse auf etwaige Temperaturunterschiede ziehen. Die Wegstrecke L_1 des Bearbeitungslasers in einer Schicht der Probe 1 mit einem Hatchabstand $\Delta y_1 = 1$ mm gilt dabei als Referenzwert. Im Folgenden sind die mittleren Grauwerte in Abhängigkeit der Wegstrecke L_1 des Bearbeitungslasers dargestellt.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen relativer Dichte und auf die Laser-Bearbeitungstrecke L_1 normierten Grauwerte

Probenbezeichnung	Relative Dichte	Mittlerer Grauwert (L_1)
Probe 1	42,3	1.692
Probe 2	82,2	1.658
Probe 3	99,1	2.055
Probe 4	99,7	2.875

Die Auswertung zeigt, dass sich die normierten mittleren Grauwerte und damit zusammenhängend die Prozesstemperatur der ersten beiden Proben nur gering unterscheiden. Grund dafür ist der große Hatchabstand und damit der große Abstand zweier benachbarter Schmelzspuren dieser Proben von 1 mm (Probe 1) bzw. 0,5 mm (Probe 2). Dadurch überlappen sich die Schmelzlinien, welche eine Schmelzbadbreite von etwa 180 μm – 200 μm haben, sowie deren Wärmeeinflusszonen im Anschluss nicht oder nur gering. Infolgedessen kann die eingebrachte Energie vollständig nach unten abgeleitet werden, ohne dass es zu einer signifikanten Erwärmung des Materials im Bereich zwischen den Schmelzlinien kommt. Somit wird das Pulvermaterial nicht vollständig aufgeschmolzen, was zu erhöhter Porosität im Bauteil führt. Bei einem Hatchabstand von 0,25 mm (Probe 3) beginnen sich die Wärmeeinflusszonen um das Schmelzbad zu überlappen und die Schmelzbäder nähern sich weiter an. Dadurch verringert sich der Bereich des unaufgeschmolzenen Pulvers zwischen den Schmelzspuren, was die relative Dichte steigen lässt. Außerdem erfährt das Material während der Integrationszeit mehrere zeitlich versetzte Aufheiz- und Abkühlphasen, wodurch die detektierten Grauwerte weiter steigen. Bei einem Hatchabstand von 0,11 mm (Probe 4) liegen die Schmelzlinien so nah beieinander, dass sich die Schmelzspuren gerade berühren. Die eng beieinanderliegenden Schmelzspuren in Kombination mit den durch die Streifenbelichtung erzeugten, kurzen Scanvektoren verstärken zudem das lokale Aufheizen der Probe, wodurch die Aufschmelzung des Materials und damit die relative Dichte der resultierenden Probe maximiert wird.

Abschließend ist in Abbildung 6 die Temperaturleitfähigkeit der additiv, sowie der konventionell hergestellten Proben über die Temperatur dargestellt. Die Verläufe bestätigen die Aussage von Eucken [5], wonach die Temperaturleitfähigkeit poröser Materialien mit sinkender Porosität zunimmt. Ausgehend davon ist der maximal erreichbare Wert derjenige des vollständig dichten Körpers. Die Temperaturleitfähigkeit nimmt überdies exponentiell mit der Dichte zu. Diese Ergebnisse decken sich auch mit denen von Beiss [8] und Bocchini [9]. Auffällig ist indes, dass die additiv gefertigte Probe trotz geringerer relativer Dichte

eine höhere Temperaturleitfähigkeit aufweist, als die konventionelle Probe, was Gegenstand weiterer Forschungen ist.

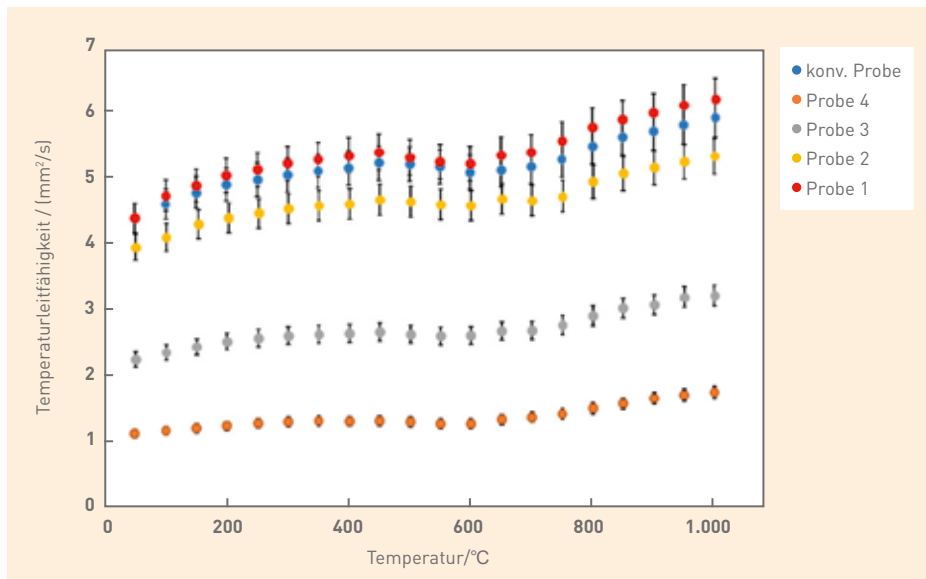


Abbildung 6: Temperaturleitfähigkeit der additiv gefertigten, sowie der konventionell hergestellten Proben aus MaragingSteel MS1 bzw. 1.2709 über die Temperatur

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Shamsaei, N.; Yadollahi, A.; Bian, L.; Thompson, S.M. (2015), »An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control«, Additive Manufacturing 8 [2015], S. 12–35
- [2] Hartmann, J.; Manara, J.; Zipf, M.; Stark, T.; Knopp, K.; Zänglein, M.; Lenski, P.; Schreiber, E.; Schmidt, F.; Brunner, M.; Müller, M. (2018), »Thermophysical property measurements at high-temperatures for power engineering and additive manufacturing processes«, DGZfP-Proceedings BB 167 Tu.3.A.1
- [3] Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2011), »Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel«, Physics Procedia, 12, S. 255–263.
- [4] Koch, C. (2019), »3. Normung für neue Technologien am Beispiel Additiver Fertigung.« In Mangelsdorf, A.; Weiler, P. (Hrsg.), Normen und Standards für die digitale Transformation, Berlin, Boston, De Gruyter Oldenbourg, S. 18–36
- [5] EOS GmbH. Materialdatenblatt EOS MaragingSteel MS1 (2011), Krailling, verfügbar in: <https://www.fabb-it.de/files/datenblaetter/werkzeugstahl.pdf>

- [6] Parker W.J.; Jenkins, R.J.; Butler, C.P.; Abbott, G.L. (1961), »Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity«, Journal of Applied Physics. 32, Nr. 9
- [7] Eucken, A. (1940), »Allgemeine Gesetzmäßigkeiten für das Wärmeleitvermögen verschiedener Stoffarten und Aggregatzustände«, Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, A 11(1), S. 6–20.
- [8] Beiss, P., Kutsch, U., Jager, H. J., Schmitz, F.; Maier, H. (1998), »Thermal Conductivity of Sintered Stainless Steel 316 L«, PM 98: 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, S. 3.
- [9] Bocchini, G. F., Bovesecchi, G., Coppa, P., Corasaniti, S., Montanari, R., & Varone, A. (2016), »Thermal diffusivity of sintered steels with flash method at ambient temperature«, International Journal of Thermophysics 37(4), S. 38.

Metrologische Apparaturen zur Messung thermophysikalischer Materialeigenschaften bei sehr hohen Temperaturen im EU-Projekt Hi-TRACE

Kevin Knopp, Amir Shandy, Jochen Manara, Stephan Vidi, Jürgen Hartmann

Short Facts

Projektlaufzeit: 01.07.2018–31.12.2021

Fördersumme: 1,6 Mio. €, FHWS 116 T €

Förderträger: EU (FKZ-17IND11)

1 EINLEITUNG

Industriezweige wie die Glas-Industrie, die Kraftwerkstechnik sowie die Luft- und Raumfahrtstechnik müssen kontinuierlich neue Methoden entwickeln, sowie bestehende Verfahren optimieren, um in ihren Bereichen wettbewerbsfähig zu sein bzw. neue Anforderungen an Umwelt- und Klimaschutz zu erfüllen. Dies beinhaltet oft die Entwicklung neuer Materialien, die leichter zu fabrizieren sind und sowohl mechanisch als auch thermisch höheren Belastungen standhalten. Für die genannten Industriezweige sind Prozesse mit hohen Betriebstemperaturen bis zu 3.000 °C kennzeichnend und damit ist die Kenntnis von Materialeigenschaften bei diesen extremen Temperaturen von großer Bedeutung. Auch wenn es bereits einige Messapparaturen für die Bestimmung von thermophysikalischen Materialdaten bei hohen Temperaturen gibt, muss die Rückführung dieser auf die SI Basiseinheiten gewährleistet werden, um die Zuverlässigkeit der gemessenen Daten für die Anforderung der genannten Branchen sicherzustellen.

Diese Aufgabe ist das Ziel des EMPIR-(European Metrology Programme for Innovation and Research) Projektes Hi-TRACE [1]. Hi-TRACE zielt darauf ab, Referenzapparaturen und neue Methoden für die Messung von thermophysikalischen Materialeigenschaften, (thermische Diffusivität, spezifische Wärme, Emissionsgrad und Schmelztemperatur) sowie der Haftung von Schichten über 1.000 °C zu bestimmen.

Das Projekt ist in vier technische Arbeitspakete (AP) unterteilt. In AP1 wird basierend auf dem Laser-Flash-Verfahren eine Methode zur Bestimmung der thermischen Diffusivität mit einer geplanten erweiterten Messunsicherheit von wenigen Prozent bis zu Temperaturen von 3.000 °C entwickelt. Daneben wird ein Ringvergleich mit den beteiligten Industriepartnern für diese Messgröße durchgeführt. Einwurf-Kalorimeter werden in AP2 entwickelt mit einer geplanten erweiterten Messunsicherheit von 0,5 % unterhalb und 1,5 % oberhalb 1.000 °C. Andere Messmethoden für die Kalorimetrie basierend auf der ohmschen oder gepulsten Laserheizung werden auf hohe Temperaturen hin angepasst und mit dem entwickelten Einwurf-Kalorimeter verglichen. In AP3 werden Emissionsgrade (normal spektral und gesamt hemisphärisch) mit einer zu entwickelnden Referenzapparatur gemessen. Auf induktiver, ohmscher und laser-basierter Heizung aufbauende Apparaturen werden entwickelt, um die Emissionsgrade und die Schmelztemperaturen bis zu 3.000 °C zu messen. In AP4 wird der thermische Kontaktwiderstand zwischen einzelnen Schichten, sowie zum Substrat ermittelt und es wird ein numerisches 3D-Modell für die thermische Ausbreitung in Zwei- und Dreischichtsysteme entwickelt, um die durchgeführten Messungen auswerten zu können. Als Referenzsysteme dienen sowohl Zweischichtsysteme aus einer keramischen Wärmedämmschicht auf Stahl als auch Dreischichtsysteme aus zwei hochleitfähigen Schichten (Graphit

und Kupfer) mit einer schlecht leitfähigen Zwischenschicht aus einem Kunststoffmaterial für niedrige Temperaturen und aus einer Keramik für hohe Temperaturen.

Die FHWS entwickelt in enger Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE) in diesem Projekt innovative Methoden zur Bestimmung der thermischen Diffusivität, des Emissionsgrades und des thermischen Kontaktwiderstandes. Im Abschnitt 2 werden die Methoden und erste Ergebnisse zur Bestimmung der thermischen Diffusivität präsentiert. In Abschnitt 3 folgt die Bestimmung der spezifischen Wärme. Abschnitt 4 ist der Messung des Emissionsgrades gewidmet und in Abschnitt 5 werden die Methoden zur Bestimmung des thermischen Widerstandes dargelegt.

2 THERMISCHE DIFFUSIVITÄT

Das von Parker et. al [2] Anfang der 1960-er Jahre zur Bestimmung der thermischen Diffusivität entwickelte Laser-Flash-Verfahren beruht auf der kurzzeitigen Erhitzung der Probenunterseite (Probenvorderseite) mittels eines Lasers und der Messung der Temperatur auf der Probenoberseite (Probenrückseite) mittels eines Infrarotdetektors (Abbildung 1). Aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatur lässt sich die thermische Diffusivität α eines Materials durch Lösen der Wärmeleitungsgleichung berechnen. Zu deren einfachen Bestimmung in einem Einschichtsystem reicht es aus, die Zeit $t_{1/2}$ bis zum Erreichen der maximalen Temperaturerhöhung zu bestimmen und folgende Gl. (1) anzuwenden:

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (1)$$

Für die Berechnung der thermischen Diffusivität α im eindimensionalen adiabatischen Fall gehen neben der erwähnten Zeit $t_{1/2}$ nur noch die Dicke d der Probe ein [2].

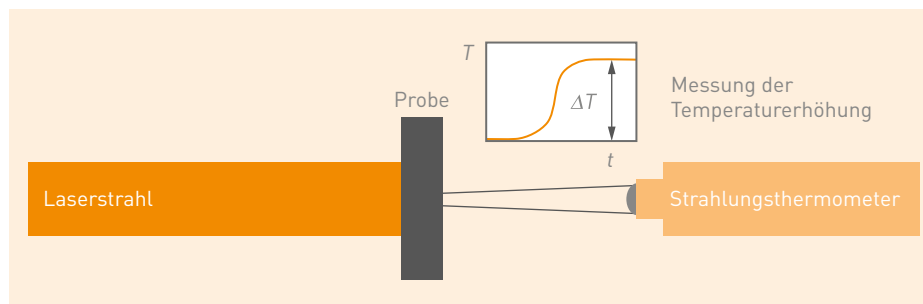


Abbildung 1: Prinzip des Laser-Flash-Verfahrens

Seit der Entwicklung der Laser-Flash-Methode wurde eine Vielzahl unterschiedlicher analytischer Lösungen für Ein- und Mehrschichtsysteme unter Berücksichtigung zusätzlicher Terme zur Beschreibung der Konvektions-, sowie Strahlungsverluste veröffentlicht (siehe z. B. [3]).

An der FHWS wurde eine konventionelle Laser-Flash-Apparatur von der Firma Netzsch so erweitert, dass neben der Detektion der Strahlung auf der Probenrückseite die Untersuchung der thermischen Materialeigenschaften auf der Probenvorderseite möglich ist. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze der ExDyMa-Anlage (Experimentierplattform für dynamische Materialuntersuchung [4]) sowie dessen reale Umsetzung im Labor. Mithilfe dieses Aufbaus können nun Proben auf Vorder- und Rückseite – je nach Messaufgabe – simultan

durch Laserstrahlung angeregt und die von der Probe emittierte Strahlung detektiert werden. Dabei verfolgt die ExDyMa-Anlage u. a. das langfristige Ziel der Messung der thermischen Kontaktwiderstände an den Grenzflächen von Mehrschichtsystemen.

In Abbildung 2 (rechts) wurde die ExDyMa-Anlage auf Vorder- und Rückseite mit zwei Strahlungsthermometern des Typs Metis MQ22 (Spektralbereich $\lambda_{\text{Mess}} = 1,45 \mu\text{m} - 1,8 \mu\text{m}$) ausgestattet. Anschließend wurde ein einleitender Versuch zur späteren Identifizierung der Kontaktwiderstände durchgeführt, in dem eine einschichtige, auf beiden Seiten mit Graphitspray beschichtete, NiCrAl-Probe ($d = 4 \text{ mm}$) auf $904,6 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt und von der Unterseite mit einem Laserpuls (Laserwellenlänge $\lambda_{\text{Laser}} = 1.064 \text{ nm}$, Pulslänge $\tau = 1 \text{ ms}$) bestrahlt wurde. Es erfolgte eine Aufzeichnung der Temperaturhübe auf Probenvorder- und -rückseite, woraus sich die thermische Diffusivität der Probenvorder- und -rückseite berechnen lässt. Die Temperaturhübe sowie die Filtergebnisse sind aus Abbildung 3 zu entnehmen.

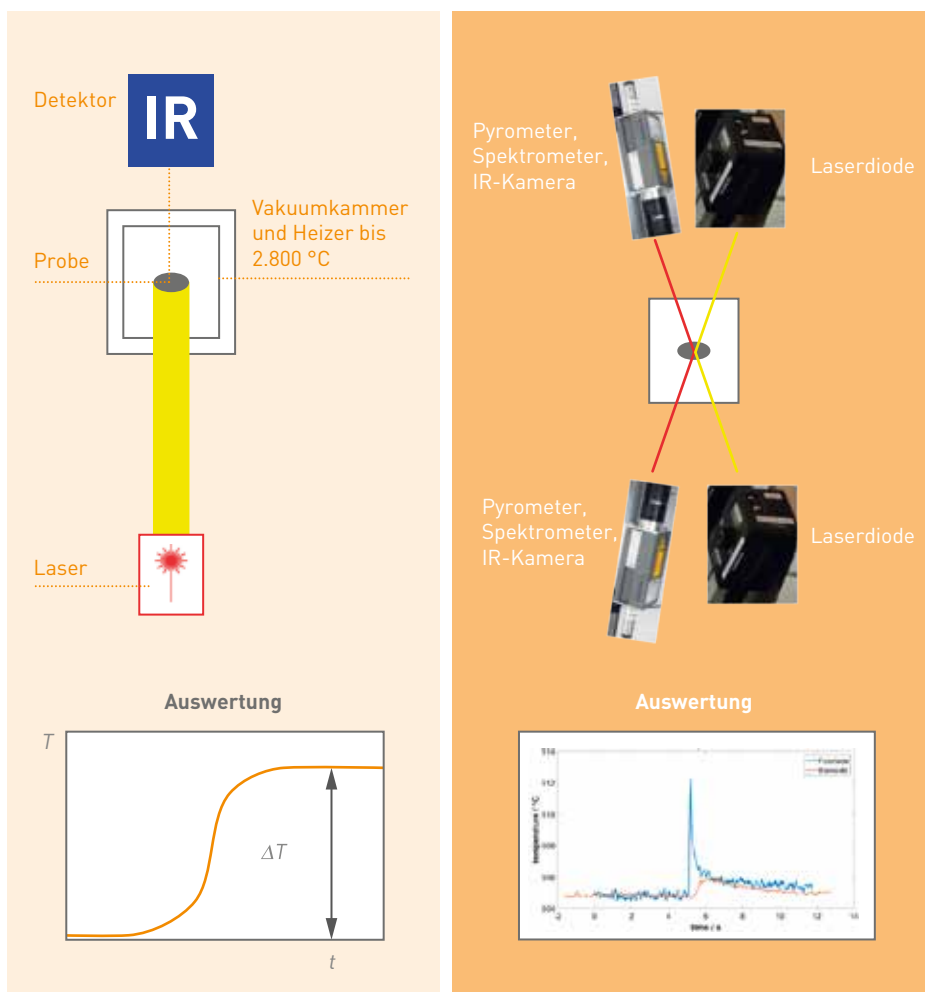


Abbildung 2: Prinzip des ExDyMa (oben), reale Umsetzung (links)

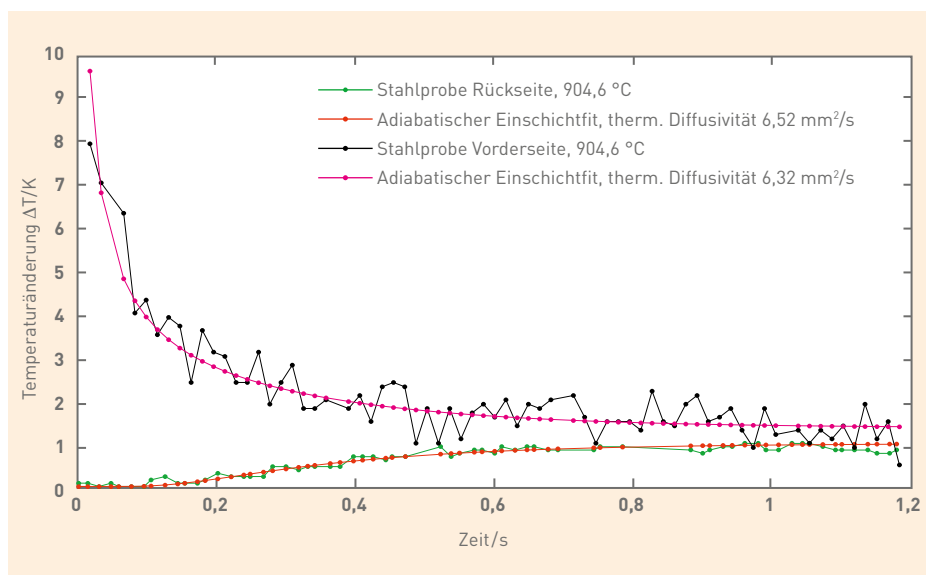


Abbildung 3: Simultan gemessene Vorder- und Rückseitentemperatur an einer Stahlprobe bei einer Ist-Probentemperatur von ca. 905 °C und relative Temperaturänderung nach einer Laser-Puls-Heizung ($\tau = 1 \text{ ms}$) an der Vorderseite zum Zeitpunkt $t=0 \text{ s}$ sowie die an die Messdaten angepassten Fitkurven

In der nachfolgenden adiabatischen Vorder- und Rückseitenauswertung wurden Wärmeverluste (und Kontaktwiderstände) vorerst vernachlässigt. Die für die Auswertung verwendeten Formeln sind in [2] und [3] gezeigt. Für die Auswertung der Probenrückseitentemperatur berechnete sich eine thermische Diffusivität von $6,52 \text{ mm}^2/\text{s}$ und für die Vorderseitentemperatur in Höhe von $6,32 \text{ mm}^2/\text{s}$. Die berechneten Ergebnisse liegen im Rahmen der abgeschätzten Unsicherheit von 7,5 %.

Mit diesem Vorversuch steht nun eine Basis zur künftigen dezidierten Auswertung von Schichtparametern zur Verfügung. Insbesondere bei Messung der absoluten Temperatur und der Kenntnis, dass sich beide Temperaturverläufe für lange Zeiten angleichen müssen, lassen sich auch Aussagen über die spezifische Wärmekapazität und/oder des Emissionsgrades der Probe gewinnen.

Die dem Projekt Hi-TRACE zugeordneten Messungen der thermischen Diffusivität bei hohen Temperaturen wurden durchgeführt, indem drei verschiedene Materialproben (isotropisches Graphit IG210, $d = 1,99 \text{ mm}$, Molybdän 99,9 %, $d = 1,98 \text{ mm}$ und Wolfram 99,95 %, $d = 1,97 \text{ mm}$) während eines Messzyklus startend bei Raumtemperatur bis hin zu 2.800 °C untersucht wurden. Das Experiment beinhaltet zwei direkt aufeinanderfolgende Zyklen sowie eine abschließende Messung der thermischen Diffusivität bei Raumtemperatur. Bei jeder Temperaturstufe wurden drei Messungen durchgeführt und daraus das arithmetische Mittel der thermischen Diffusivität berechnet. Die Ergebnisse der thermischen Diffusivitäten mit zugehöriger Referenzmessung (POCO-Graphit) sind in Abbildung 4 aufgetragen.

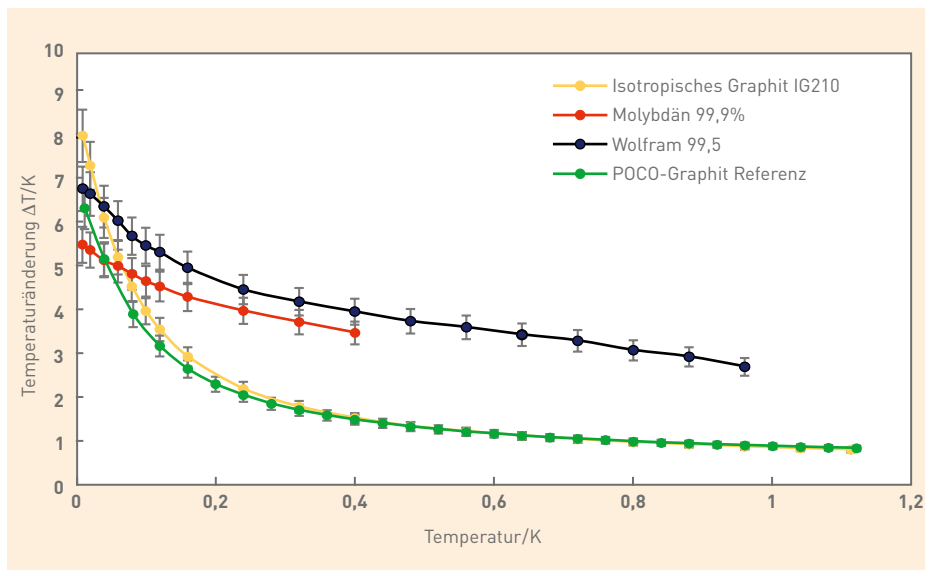


Abbildung 4: Gemessene thermische Diffusivitäten von isotropischem und POCO-Graphit, Molybdän und Wolfram; mit einer abgeschätzten Unsicherheit von 7,5 %

3 SPEZIFISCHE WÄRME

Zur Bestimmung der spezifischen Wärme c_p steht am ZAE eine Puls kalorimetrie-Apparatur (PISA) zur Verfügung. Damit können elektrisch leitfähige Materialien bei hohen Temperaturen bis hin zum Schmelzpunkt charakterisiert werden (Abbildung 5). Dazu wird die Probe mit Hilfe eines Strompulses mittels ohmscher Heizung in sehr kurzer Zeit auf die gewünschten Temperaturen gebracht (Abbildung 6). Zur Bestimmung der spezifischen Wärme c_p werden dabei die elektrischen Größen Strom und Spannung, aber auch, mittels eines Hochgeschwindigkeits-Strahlungsthermometers, der Temperaturverlauf in der Mitte der Probe gemessen. Die Messung dauert wenige Sekunden und wird aufgrund der hohen Temperaturen im Vakuum oder unter Schutzgas durchgeführt.

Unter Verwendung der »long thin rod« Näherung Gl. (2) kann schließlich die spezifische Wärme c_p ermittelt werden.

$$c_p = \frac{1}{\delta l S^2} \cdot \frac{\rho l^2}{\frac{\partial T}{\partial T_{\text{heat}}} - \frac{\partial T}{\partial T_{\text{cool}}}} \quad (2)$$

Dabei werden der Aufheizvorgang und der Abkühlvorgang bei jeweils gleicher Temperatur verglichen. Hierbei ist ρ der spezifische elektrische Widerstand, I der Strom durch die Probe, S die Querschnittsfläche und l die Länge der Probe, δ die Dichte und c_p die spezifische Wärmekapazität der Probe.

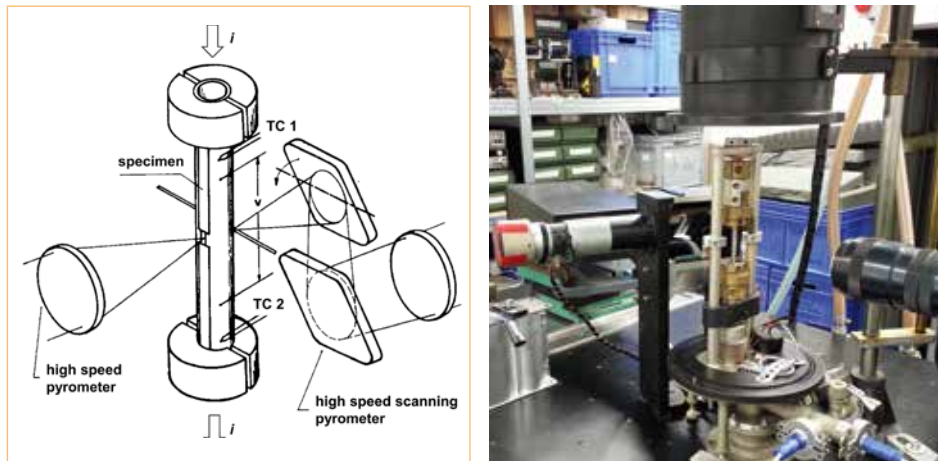


Abbildung 5: Schematischer Messaufbau der PISA (links) und Foto des Versuchsaufbaus (rechts)

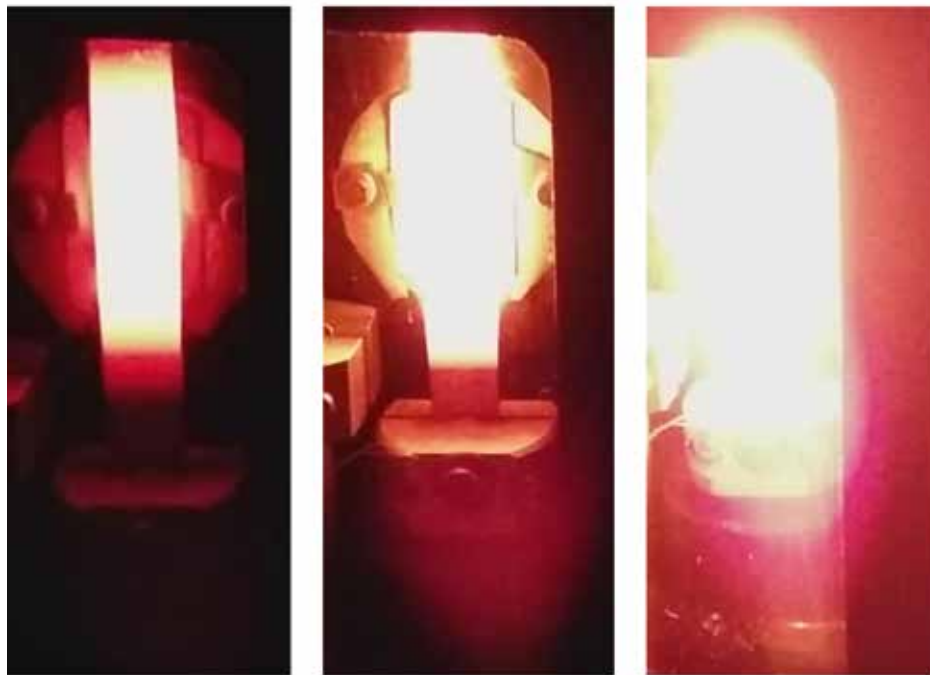


Abbildung 6: Aufnahme der Probe in der PISA während des Heizvorgangs

4 EMISSIONSGRAD UND SCHMELZTEMPERATUR

Zur Bestimmung des Emissionsgrades bei hohen Temperaturen wird die am ZAE bestehende Emissionsgradmessanlage EMMA weiterentwickelt und für extreme Temperaturen optimiert. Dies ermöglicht die Messung des gerichtet-spektralen Emissionsgrades ε_g in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ , dem Abstrahlwinkel θ und der Temperatur T (Abbildung 7). Die Probe wird dazu in einem Vakuumbehälter positioniert und auf die Probentemperatur T_p geheizt. Die Innenwand des Vakuumbehälters ist mit einer hoch emittierenden Beschichtung (Nextel Velvet-Coating 811-21) versehen und wird auf der Umgebungstemperatur T_u gehalten. Die vom Detektor erfasste Intensität i_{mess} einer opaken Probe setzt sich zusammen aus der

von der Probe selbst abgestrahlten Intensität i_e und der Intensität i_r , die von der Schwarzkörperumgebung vor der Probe auf die Probe fällt und von dieser reflektiert wird:

$$i_{mess}(\lambda, T_p, T_u) = i_e(\lambda, T_p) + i_r(\lambda, T_p, T_u) = \varepsilon_g(\lambda, T_p) \cdot i_{bb}(\lambda, T_p) + \rho_{gh}(\lambda, T_p) \cdot i_{bb}(\lambda, T_u) \quad (3)$$

Da für opake Materialien die Summe aus gerichtetem Emissionsgrad ε_g und dem gerichtet-hemisphärischem Reflexionsgrad ρ_{gh} gleich 1 ist, kann Gl. (3) umgeformt werden. Es folgt der gerichtet-spektrale Emissionsgrad als Funktion der gemessenen Intensität i_{mess} und den berechneten Intensitäten eines schwarzen Strahlers bei der Probertemperatur $i_{bb}(T_p)$ und der Umgebungstemperatur $i_{bb}(T_u)$:

$$\varepsilon_g(\lambda, T_p) = \frac{i_{mess}(\lambda, T_p, T_u) - i_{bb}(\lambda, T_u)}{i_{bb}(\lambda, T_p) - i_{bb}(\lambda, T_u)} \quad (4)$$

Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit die Proben bis zur Schmelztemperatur aufzuheizen, um dadurch die Änderung des Emissionsgrades beim Phasenwechsel sowie die Schmelztemperatur zu erfassen.

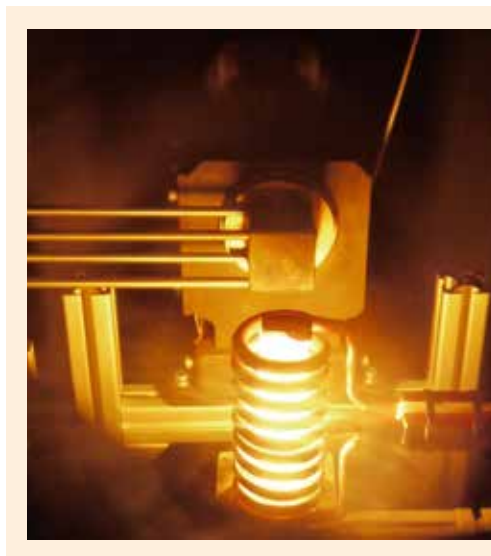
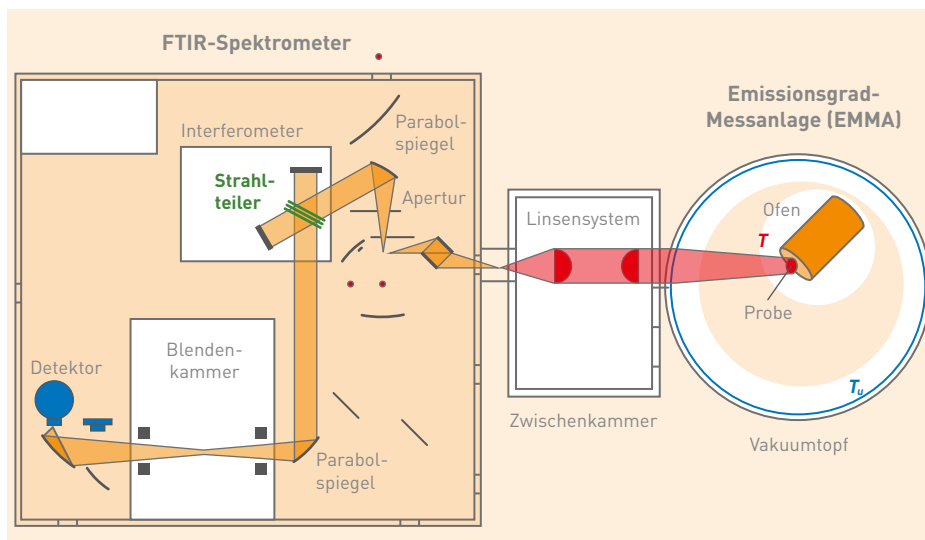


Abbildung 7:
Schematischer Aufbau der Emissionsgradmessanlage EMMA mit FTIR-Spektrometer, Zwischenkammer und Vakuumbehälter mit Induktionsheizung (oben) sowie Induktionsheizer mit aufgeheiztem Referenzstrahler (links)

Zur Quantifizierung der thermischen und mechanischen Haftung von Schichten werden die in Kapitel 2 und 4 beschriebenen Messaufbauten entsprechend modifiziert und angepasst. Darüber hinaus wurde ein Messaufbau zur Detektion von lokalen Delaminationen entworfen, der im Folgenden kurz beschrieben wird. Auf die beschichtete Probe bzw. das mehrlagige Schichtsystem wird mittels eines Lasers Energie in die Oberfläche eingebracht. Durch Verwendung eines Lichtwellenleiters wird die Strahlung auf eine definierte Stelle der Oberfläche gelenkt. Durch Variation von Bestrahlungsdauer, Position und Strahldurchmesser kann die Energiedichte auf der Oberfläche eingestellt werden. Für die Erfassung des resultierenden Temperaturprofils auf der Oberfläche wurde eine Thermografiekamera (Infratec VarioCAM®) eingesetzt. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

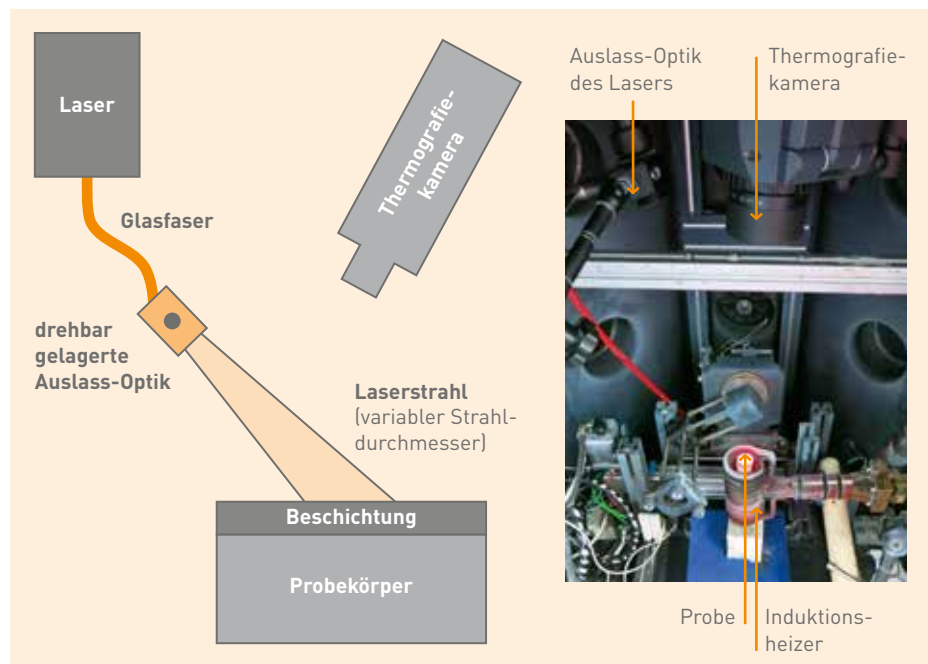


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Messverfahrens zur berührungslosen und zerstörungsfreien Prüfung von Beschichtungen mittels aktiver Thermografie (links) und Foto des Versuchsaufbaus (rechts)

Zur Demonstration des entwickelten Messverfahrens wurde die in Abbildung 9 links gezeigte Probe eines beschichteten Substrats mit definiert eingebrachter Delamination untersucht, die optisch nicht sichtbar ist (siehe Foto in Abbildung 8). Dabei erfolgte ein Wärmeeintrag mittels Laserpuls und die Oberflächentemperatur sowie deren Änderung wurde in Abhängigkeit von der Zeit während der Aufheizung und der anschließenden Abkühlung mit einer Thermografiekamera erfasst. Eine Auswahl resultierender, thermografischer Bilder ist in Abbildung 9 rechts dargestellt. Auf dem ersten Bild ist keine Struktur zu erkennen, da Oberfläche und Umgebung die gleiche Temperatur aufweisen. Nach dem Einschalten des Lasers steigt die Oberflächentemperatur an, wobei der Temperaturanstieg an der Position des Luftspalts deutlich größer ist, als an den Positionen ohne Luftspalt. Dies ist bedingt durch den höheren thermischen Kontaktwiderstand (bzw. den geringeren Wärmeübergangskoeffizienten) des Luftspalts im Vergleich zu den Positionen ohne Luftspalt. Nach dem Abschalten des Lasers sinkt die Oberflächentemperatur und schließlich verschwinden die Temperaturunterschiede, wobei die Oberflächentemperatur am Ende insgesamt etwas höher ist, als am Anfang.

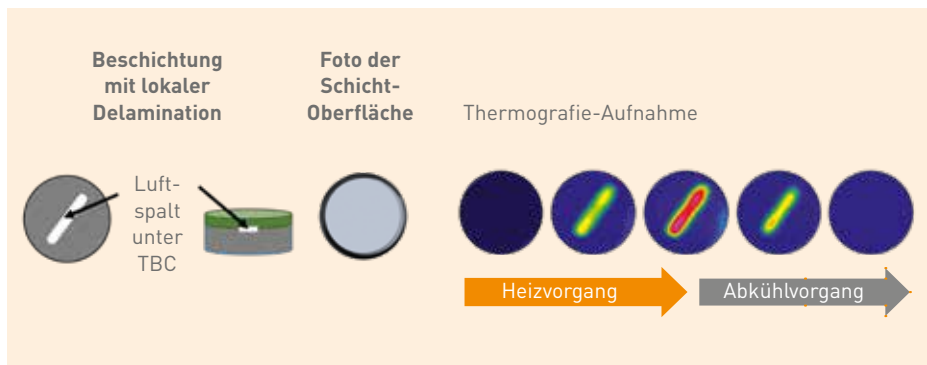


Abbildung 9: Keramische Beschichtung auf Stahlsubstrat mit definierter partieller Delamination (links) und mittels aktiver Thermografie ermittelte Temperaturverteilungen (rechts)

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des Projektes Hi-TRACE wurden neue Messtechniken und hochgenaue Referenzanlagen zur Bestimmung der thermophysikalischen Größen Temperatur T_f , thermischer Kontaktwiderstand R_c , thermische Diffusivität α , spezifische Wärme c_p und Emissionsgrad ϵ bis zu 3.000 °C entwickelt. Dies beinhaltet zuverlässige Kalibriermethoden und validierte Unsicherheitsbudgets sowie rückführbare Referenzmaterialien für den Hochtemperaturbereich.

Die zuverlässige thermophysikalische Charakterisierung von Hochtemperaturmaterialien ermöglicht nationalen und internationalen Industrieunternehmen die Energieeffizienz erheblich zu steigern, Schadstoffemissionen zu reduzieren, die Sicherheit zu erhöhen und die Zuverlässigkeit kritischer Anwendungen zu verbessern. Durch den Ausbau dieser Kompetenzen an bayerischen Hochschulen und Instituten werden diese auch zukünftig in der Lage sein, bayerischen, deutschen und europäischen Unternehmen messtechnische Leistungen anzubieten, um aktuelle Materialentwicklungen zielführend begleiten zu können und damit sowohl den Wissenschaftsstandort als auch den Industriestandort Bayern zu stärken.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] www.hi-trace.eu
- [2] Parker W.J.; Jenkins, R.J.; Butler, C.P.; Abbott, G.L. (1961), »Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity«, Journal of Applied Physics. 32, Nr. 9
- [3] Vozár, L.; Hohenauer, W. (2004), »Flash method of measuring the thermal diffusivity«, A review in High temperatures-High pressures, 36, 3, S. 253–264.
- [4] Hartmann, J.; Manara, J.; Zipf, M.; Stark, T.; Knopp, K.; Zänglein, M.; Schreiber, E.; Schmidt, F.; Brunner, M.; Müller, M. (2018), »Experimental set-up for dynamic material investigation at high temperatures«, ITG-Fachbericht 281, S. 516–519

Roboterbasierte Koordinatenmesstechnik – Wie präzise kann ein Roboter Bauteile vermessen?

Andreas Horn, Jan Schmitt

Short Facts

Förderträger: Hans-Wilhelm Renkhoff Stiftung

Projektlaufzeit: 01.04.2021 – 30.03.2022

1 AUSGANGSLAGE

In der industriellen Produktion findet die Qualitätssicherung von Bauteilen auf verschiedenen Ebenen statt. Bauteile mit hohen Toleranzanforderungen (wenige Hundertstel-Millimeter) und komplexen Messpunkten, die z.B. schwer zu erreichen sind, Kombinationsmaße oder Form- und Lagetoleranzen darstellen, werden abseits der Produktion taktil durch Koordinatenmessmaschinen oder optisch durch die sog. Streifenlichtprojektion vermessen. Messungen an wenigen »einfachen« Messpunkten (1–20), werden i.d.R. direkt in der Produktion durchgeführt, wobei die Toleranzen dieser Messpunkte ebenso im Hundertstel-Millimeter-Bereich liegen. In der Produktion bedienen sich Unternehmen zumeist präzisen Messuhren, von denen mehrere in bauteilspezifischen Aufnahmen integriert sind. Dies gilt sowohl für Metall- als auch für Kunststoffbauteile mit geringeren Toleranzanforderungen (wenige Zehntel-Millimeter) gleichermaßen. Beachtenswert bei den produktionsfernen Messmitteln sind deren Dimensionen (Koordinatenmessmaschinen haben zumeist Raumgröße). Produktionsnahe Messsysteme beinhalten oftmals mehrere Messmittel und spezifische Aufnahmen für genau ein Bauteil.

Es lässt sich somit festhalten: Koordinatenmessmaschinen und Messkammern für robotergeführte Streifenlichtprojektion sind flexibel, also für eine Vielzahl von Bauteilen anwendbar, benötigen jedoch einen großen Bauraum und sind im Vergleich kostenintensiv (ca. 100.000 bis 200.000 €). Aufbauten mit (analogen oder digitalen) Messuhren hingegen sind bauteilspezifisch, somit größenangepasst und erlauben eine Messung direkt in der Produktion. Die Kosten dieser manuellen Messstationen liegen aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen und der Vielzahl von Messstellen jedoch auch oft im 5-stelligen Bereich. Zudem ist es nicht möglich die Messaufgabe (teil-)automatisiert nach der Programmerstellung ablaufen zu lassen, wie es bei Koordinatenmessmaschinen und der robotergeführten Streifenlichtprojektion üblich ist.

Ferner unterliegen Produkte, deren geometrische Qualität gesichert werden muss, immer häufiger einem kürzeren Lebenszyklus und werden durch neue Varianten oder eine neue Generation abgelöst. Gleiches gilt für die spezifischen Messmittel. Zudem werden eine Vielzahl kleinerer Bauteile bspw. aus der Zuliefererindustrie von klein- und mittelständigen Unternehmen gefertigt, so dass bzgl. des Bauteilvolumens eine Messung nicht notwendigerweise durch große Messmaschinen erfolgen muss. Darüber hinaus ist die Qualitätssicherung von Bauteilen durch Messung ein nicht-wertschöpfender Prozess und somit Nebenzeit, welche die Gesamtanlageneffektivität und somit die Wirtschaftlichkeit schmälert. Daher ist es zielführender den Messprozess möglichst von einem Mitarbeiterinsatz zu entkoppeln.

Das beschriebene Spektrum an derzeit etablierten Messstrategien in Zusammenhang zu deren Charakteristika (Platzbedarf, Produktionsnähe etc.) findet sich in der nachfolgenden

Abbildung 1. Es zeigt sich in Bezug auf die Systemkosten, den Platzbedarf, die Flexibilität als Gegenspieler zur Bauteilspezifität, die Komplexität der Messaufgabe sowie den produktionsnahen Einsatz eine Lücke auf. Diese soll durch das RoKoMess-System geschlossen werden.



Abbildung 1: Spannungsfeld der industriellen Messtechnik

Das beschriebene Spannungsfeld aus Flexibilität, Bauraum, Kosten, Genauigkeit und automatisierter Messung soll in diesem Vorhaben mit der Realisierung einer größenangepassten, roboterbasierten Koordinatenmesstechnik begegnet werden. Als Herausforderung wird hierbei das Verfahren zur Optimierung der Genauigkeit (Kalibrierung) aus den gegebenen Randbedingungen (Kinematik, Steifigkeit) insbesondere des Roboters gesehen.

2 DAS RoKoMess AUFBAUKONZEPT

Mit dem Ziel die Genauigkeit eines größenangepassten, roboterbasierten Koordinatenmesssystems zu bestimmen und zu optimieren, wird ein hochgenauer 6-Achs-Roboter mit einem taktilen Messsystem als Endeffektor ausgestattet und auf einer Grundplatte montiert. Nachfolgend zeigt die Abbildung 2 den realisierten Versuchsstand sowie eine Darstellung der maßgebenden Komponenten.

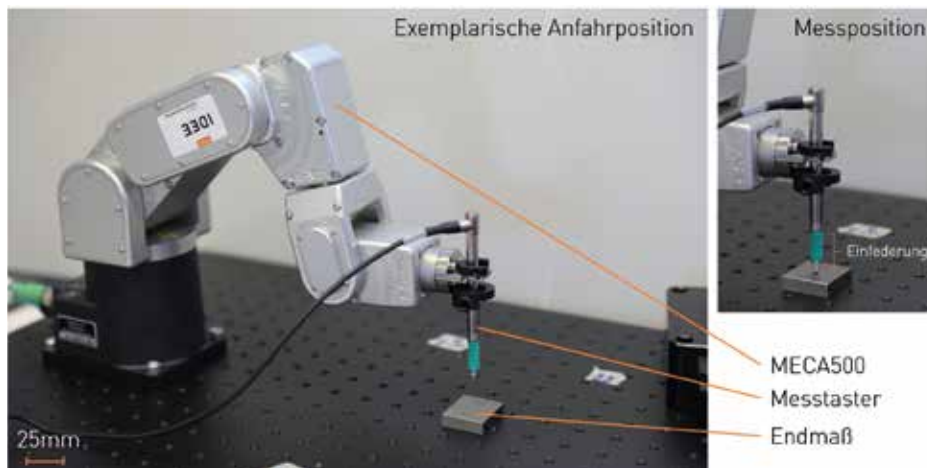


Abbildung 2: RoKoMess Aufbau

Ein hochpräziser MECA500 6-Achs-Roboter mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,005$ mm sowie ein TESA GT62 taktile Messtaster mit einer Wiederholbarkeit von $24 \mu\text{m}$, einer Linearitätsabweichung von $8,8 \mu\text{m}$ und einem Federweg von ± 5 mm als Endeffektor sind auf einer Thorlabs Grundplatte PBG12118 mit einer Gradheit von $\pm 0,15$ mm über $0,3 \text{ m}^2$ montiert. Über die Python-Entwicklungsumgebung wird der Roboter programmiert, der Controller ist in der Basis des Roboters integriert. Durch die Sperrung der drei rotatorischen Freiheiten wird es möglich Messungen im kartesischen Raum (drei translatorische Freiheiten x, y, z) durchzuführen.

In bisherigen Ansätzen mit Robotern geometrische Messaufgaben zu realisieren stellt sich heraus, dass Roboter zwar hoch flexibel sind was ihre Einsatzmöglichkeiten betrifft [6] und eine hohe Wiederholgenauigkeit bieten [1]. Die niedrige absolute Positioniergenauigkeit (mehrere Zehntel Millimeter) im Arbeitsraum stellt dabei allerdings eine entscheidende Limitierung dar. Diese Messunsicherheit hat verschiedene Ursachen und lässt sich in fünf Kategorien einteilen [2]:

- **Umwelt:** z.B. durch Temperatureinflüsse
- **Parametrisch:** z.B. Fertigungs- und Montagetoleranzen
- **Messtechnisch:** z.B. Auflösung der Motordrehgeber
- **Rechnerisch:** z.B. Rundungsfehler der Steuerung
- **Applikation:** z.B. Fehler bei der Installation

Diese Einflüsse führen dazu, dass die im Steuerungscontroller hinterlegten Parameter zur Bestimmung der Roboterkinematik nicht mit der realen Roboterstruktur übereinstimmen [3]. Ein möglicher Ansatz, um die absolute Positionierungsgenauigkeit so weit wie möglich zu optimieren (und somit die Messunsicherheit zu minimieren), ist die sogenannte numerische Kalibrierung [4]. Dabei sind Messfehler durch andere Ursachen gering: Die Messunsicherheit ist zu 90 % auf geometrische Fehler zurückzuführen, die zu einer Verschiebung bzw. Rotation der Koordinatensysteme der Robotergelenke führen [5].

In den letzten Jahren wurden verschiedenste Kalibriermethoden entwickelt und vorgestellt:

Quelle	Kalibrierstrategie
Gaudreault et al. 2018 [1]	Bestimmung der Position des Endeffektors mit Hilfe von TriCal
Du & Zhang 2013 [3]	Kalibrierung mit Hilfe einer Kamera und eines Schachbrettmusters als Referenz
Jiang et al. 2020 [6] Luo et al. 2018 [7]	Kalibrierung der Roboterparameter mit Hilfe eines Neuronalen Netzes
Jing et al. 2016 [8]	Product-of-Exponential und Gauß-Prozess Regression
Möller et al. 2016 [9]	Kalibrierung mit Hilfe eines Stereo-Kamera-Systems
Nubiola & Bonev 2014 [2]	Kalibrierung mit Hilfe eines Kreisformmessgeräts
Shi et al. 2020 [10]	Kalibrierung über die Bestimmung und Manipulation der Roboterparameter

Allerdings erzielt keine dieser Kalibriermethoden eine Genauigkeit von kleiner 0,1 mm. Das ist in erster Linie auf die eingesetzten Industrieroboter und deren Einsatzzweck zurückzuführen. Für typische Robotik-Anwendungen, wie Materialhandling, Schweiß- oder Lackieranwendungen werden häufig mittlere bis große Industrieroboter mit entsprechendem Arbeitsraum eingesetzt. Eine zunehmende Größe der Roboterkinematiken wirkt sich allerdings negativ auf die absolute Positioniergenauigkeit aus, weshalb roboterbasierte messtechnische Anwendungen eine Herausforderung darstellen [4]. Mit dem im Projekt RoKoMess eingesetzten, größenangepassten Roboter soll dieser inhärente Nachteil zu Gunsten einer reduzierten Messunsicherheit minimiert werden.

3 NUMERISCHE KALIBRIERUNG ALS ANSATZ ZUR GENAUIGKEITSSTEIGERUNG

Ein vielversprechender Ansatz die Absolutgenauigkeit von Robotern zu steigern und dessen Anwendbarkeit für den dargestellten Untersuchungsgegenstand »Roboterbasierte Messtechnik« ist die genannte numerische Kalibrierung. Dabei wird der Arbeitsraum, in konkretem Falle Messraum, durch eine Gitterstruktur diskretisiert [11]. Jeder Punkt des Gitters wird angefahren und die Position des Endeffektors gemessen. Da der gezeigte RoKoMess-Aufbau selbst ein 2-dimensionales, präzises Messmittel als Endeffektor besitzt (Hub 0–10 mm) kann somit die Position in einem Freiheitsgrad (z-Koordinate) ermittelt werden. Das Residuum zwischen

programmierter und tatsächlich erreichter Pose wird in einer Matrix hinterlegt. Das so entstehende 3-dimensionale Vektorfeld eignet sich für Prognosen über den zu erwartenden kartesischen Fehler in z-Richtung. Um den gesamten Messraum, und nicht nur die Gitterpunkte, kann zwischen den Punkten und in weiteren Koordinatenebenen interpoliert werden. Hierzu stehen eine Reihe von Verfahren u.a. das maschinelle Lernen zur Verfügung, deren Güte im Laufe des Vorhabens weiter evaluiert werden. Nachfolgend ist die Prozedur zur beschriebenen numerischen Kalibrierung gezeigt (siehe Abbildung 3).

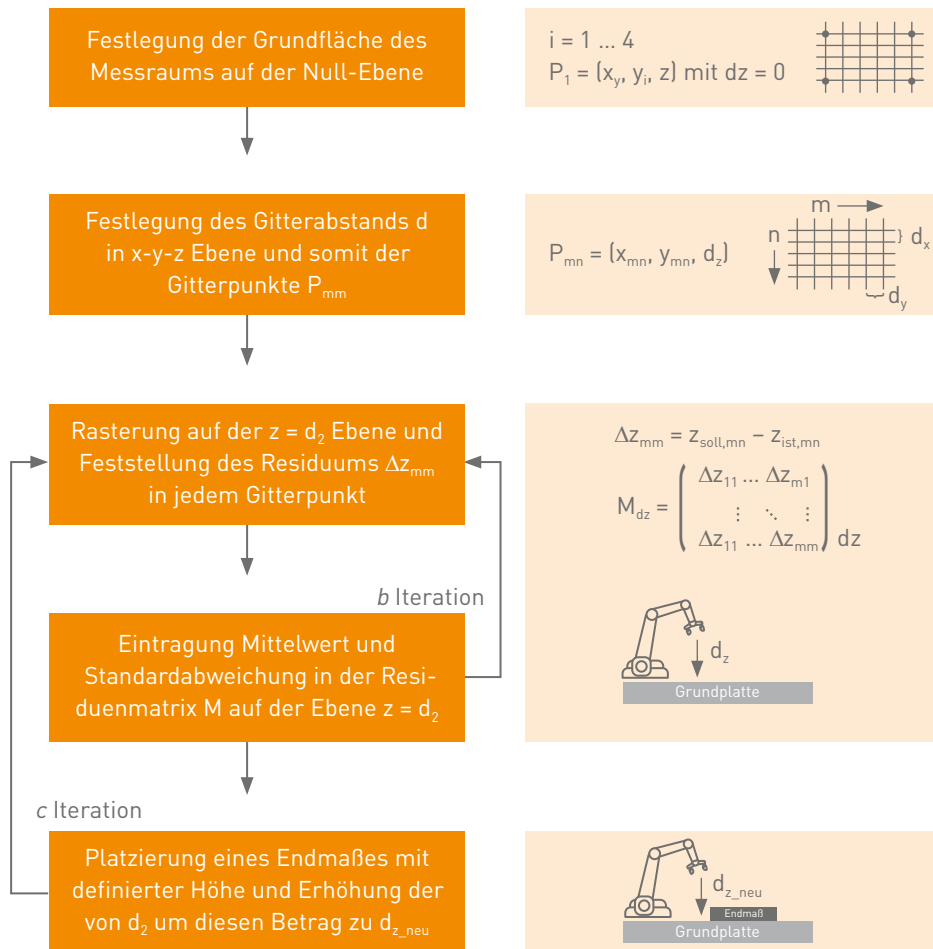


Abbildung 3: Ablauf der numerischen Kalibrierung

4 ERSTE ERGEBNISSE

Wie den Spezifikationen des RoKoMess-Aufbaus zu entnehmen ist, gibt es eine inhärente Schiefe der Grundplatte. Diese kann mit dem vorgestellten Verfahren als Offset berücksichtigt werden, um eine möglichst einheitliche Nullebene zu erzeugen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die resultierende Residuenmatrix zwischen der Grundplatte $z_0 = 0$ mm, den absoluten Fehler ohne Kalibrierung in einer Ebene $z_3 = 3$ mm sowie deren Kalibrierung in Abhängigkeit der x- und y-Koordinate.

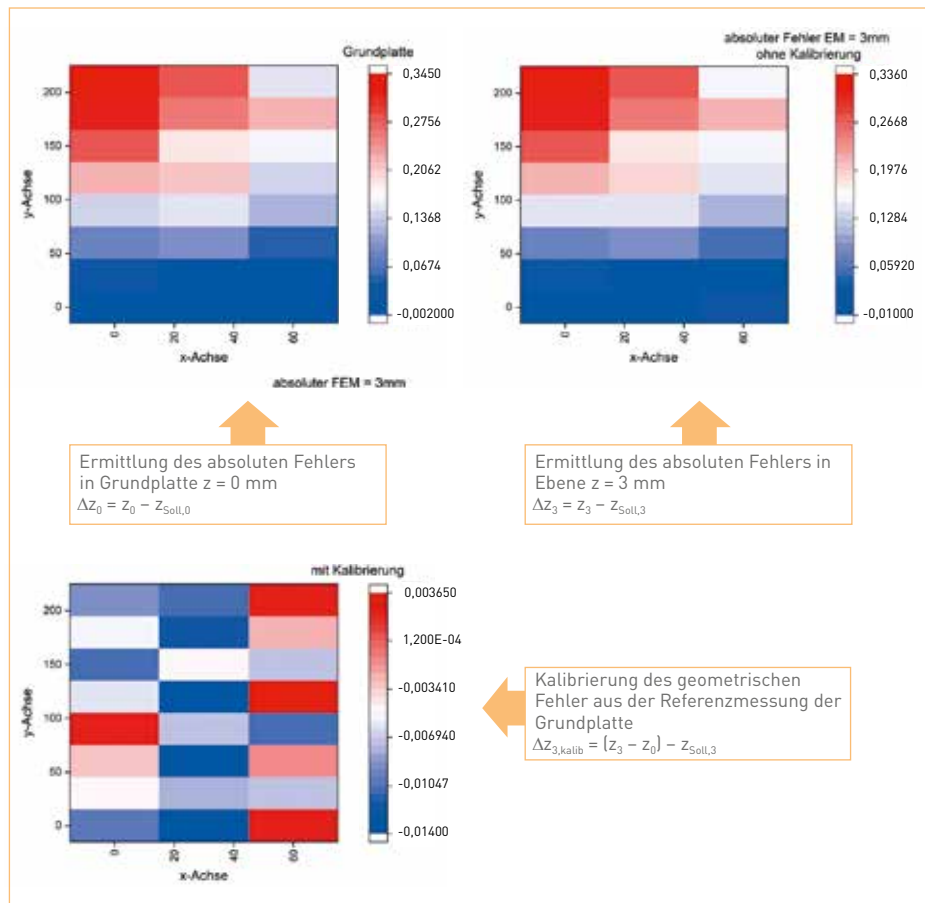


Abbildung 4: Residuen in 3 verschiedenen Ebenen

In Abbildung 4 zeigt sich, dass der maximale Fehler auf der Ebene maximal 0,34 mm beträgt. Dieser setzt sich aus der Messunsicherheit des Roboters, verursacht durch kinematische Fehler, sowie der Schiefe der Grundplatte (maßgeblich in y-Richtung zusammen). In der Kalibrierebene $z = 3$ überträgt sich diese Messunsicherheit nahezu mit gleichem Betrag. Wird nun diese Ebene zur Veranschaulichung mit der Residuenmatrix der Ebene $z = 0$ kalibriert, ergibt sich eine maximale Sollwertabweichung über den gesamten Messbereich von 0,0177 mm. Mit einem sehr ähnlichen Verfahren werden nun weitere Ebenen im Messraum kalibriert. Nach der vollständigen numerischen Kalibrierung kann ein zu vermessendes Bauteil im Messraum platziert werden. Durch die Interpolation und Kalibrierung des, durch das dargestellte Verfahren, ermittelten Messfehlers im aufgespannten Messraum, soll eine fähige Bauteilvermessung (mindestens in einer Raumachse) möglich werden. Notwendig ist hierbei die ungefähre Kenntnis der Lage des Messobjekts im Messraum, um einen Bezug zum Messpunkt und Ortsfehler herstellen zu können.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Nachdem die Ausgangssituation sowie das RoKoMess-Aufbaukonzept vorgestellt und die numerische Kalibrierung als Ansatz zur Genauigkeitssteigerung roboterbasierter Messtechnik beschrieben wurde, zeigen die ersten Ergebnisse dessen Tragfähigkeit im Problemfeld. Weitere Forschungsarbeiten betreffen die gesamte Kalibrierung über den Messraum mit Hilfe von End-

maßen, die Exploration geeigneter Interpolationsalgorithmen zwischen den Messgitterebenen (klassische Interpolation vs. maschinelles Lernen) sowie die Messsystemanalyse Typ 3 mit einem Referenzbauteil. Dieses Verfahren findet bei Messsystemen Anwendung, die vollautomatisch arbeiten und somit keinerlei Bedienendeneinfluss unterliegen. Wenn die Genauigkeit des RoKoMess-Aufbaus über dieses Verfahren in einer translatorischen Raumachse (z) sichergestellt ist, sollen die verbleibenden translatorischen Freiheiten (x und y) als Messachsen in das Gesamtsystem einbezogen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Gaudreault, M.; Joubair, A.; Bonev, I.** (2018), »Self-Calibration of an Industrial Robot Using a Novel Affordable 3D Measuring Device«, *Sensors* 18 (10), Basel, verfügbar in: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3380>
- [2] **Nubiola, A.; Bonev, I. A.** (2014), »Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar«, *Precision Engineering* 38 (3), S. 472–480.
- [3] **Du, G.; Zhang, P.** (2013), »Online robot calibration based on vision measurement«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (6), S. 484–492.
- [4] **Olabi, A.; Damak, M.; Bearee, R.; Gibaru, O.; Leleu, S.** (2012), »Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors« *IEEE International Conference on Industrial Technology 2012, ICIT 2012, Athens*, S. 492–497.
- [5] **Wu, Y.; Klimchik, A.; Caro, S.; Furet, B.; Pashkevich, A.** (2015), »Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments«, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 35, S. 151–168.
- [6] **Jiang, Y.; Yu, L.; Jia, H.; Zhao, H.; Xia, H.** (2020), »Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot«, *Sensors* 20 (16), Basel, verfügbar in: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/16/4354>
- [7] **Luo, R. C.; Wang, H.; Kuo, M.-H.** (2018), »Low cost solution for calibration in absolute accuracy of an industrial robot for iCPS applications«, *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) 2018, St. Petersburg*, S. 428–433.
- [8] **Jing, W.; Tao, P. Y.; Yang, G.; Shimada, K.** (2016), »Calibration of industry robots with consideration of loading effects using Product-Of-Exponential (POE) and Gaussian Process (GP)«, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2016, Stockholm*, S. 4380–4385.
- [9] **Möller, C.; Schmidt, H. C.; Shah, N. H.; Wollnack, J.** (2016), »Enhanced Absolute Accuracy of an Industrial Milling Robot Using Stereo Camera System«, *Procedia Technology* 26, S. 389–398.

- [10] Shi, G.; Zhao, S.; Hu, B. (2020), »A Practical Method to Improve Absolute Positioning Accuracy of Industrial Robot«, Journal of Physics Conference Series 1453:012121, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/339683272_A_Practical_Method_to_Improve_Absolute_Positioning_Accuracy_of_Industrial_Robot
- [11] Wiest, U. (2001), »Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern«, Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), verfügbar in: <https://www.wiest-ag.de/de/assets/media/files/dissertation.pdf>

Involvierende Bildungskomponenten zur Ableitung von Anpassungskonzepten für (produzierende) Unternehmen im Projekt MainKlimaPLUS

Sophie Fischer, Jan Schmitt

Short Facts

Förderkennzeichen:	67DAS216
Projektlaufzeit:	01.04.2021 – 31.03.2023
Förderträger:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Fördersumme:	193.512,25 €



1 AUSGANGSLAGE

Der globale Klimawandel ist allgegenwärtig. Gegenüber dem vorindustriellen Niveau (etwa Mitte 18. Jahrhundert) hat sich die globale Durchschnittstemperatur um rund $+1^{\circ}\text{C}$ erhöht und die Kohlenstoffdioxid-Konzentration (CO_2) in der Atmosphäre ist um rund 46 % auf 410,5 ppm angestiegen [1]. Die Auswirkungen wie Veränderungen in der Luft- und Wasserqualität, extreme Temperaturen und Wasserknappheit, überschreiten naturgemäß jegliche Ländergrenzen und machen nicht Halt vor »politisch-administrativen Grenzen« [2]. Der Klimawandel birgt vielschichtige Folgen für die Gesundheit, da Menschen, Tiere und Pflanzen in einer komplexen, abhängigen Wechselbeziehung zueinanderstehen (ebd.). Neben verminderter Wohlbefinden, etwa durch niedrige Luftqualität, thermische Belastung oder psychischem Stress [3] als Folge von Extremwetterereignissen, wird die Leistungsfähigkeit bestehender »Organismen wie auch Strukturen und Funktionen in ökologischen und soziologischen Systemen« [4] beeinträchtigt.

Zusätzlich zu den gesamtgesellschaftlichen Ausprägungen induziert der Klimawandel multiple Risiken und Anpassungsbedarfe für Agierende inmitten des Wirtschaftsgeschehens. Denn die direkten und indirekten Auswirkungen beeinflussen zunehmend die Arbeitsumgebung von Beschäftigten und wirken sich auf Wertschöpfungsaktivitäten aus. Mit der gleichzeitig zunehmenden Ausrichtung auf Effizienz, bspw. durch die globale Auslagerung von Produktionsprozessen und Beschaffung von Rohstoffen, Zulieferstrategien wie Just-in-Time und Just-in-Sequence, sowie global ineinander verzahnten Lieferketten, werden produzierende Unternehmen vulnerabel gegenüber klimatischen Einflüssen. Bei einer Erderwärmung um $+1,5^{\circ}\text{C}$ bis zum Jahr 2060 wird weltweit ein volkswirtschaftlicher Schaden von 20 Billionen US-Dollar prognostiziert [1]. Schon bei einer Erwärmung um $+2,5^{\circ}\text{C}$ verdoppelt sich die kalkulierte Schadenshöhe auf 44 Billionen US-Dollar (ebd.).

Es gilt, auf diverse Szenarien des Klimawandels vorbereitet zu sein, potenziell negativen Einflüssen vorzubeugen und Chancen (bspw. hinsichtlich Absatz- und Beschaffungsmarkt) zu ergreifen. Diese Ausprägungen regen dazu an, maßgeschneiderte Bildungskomponenten zu

konzeptualisieren, um (produzierende) Unternehmen zukünftig sowohl in ihrer Verantwortungsfunktion zu sensibilisieren, als auch sie lernend zu befähigen, individuelle Klimaanpassungsmaßnahmen abzuleiten.

1.1 Anpassungsbedarf der mainfränkischen Wirtschaft

Auch in der bayerischen Region Mainfranken hält das Thema Klimawandel Einzug: durch die hohen Erwärmungsraten wird sie derzeit als »Hotspot des Klimawandels« betitelt [7]. Die Regiopolregion setzt sich aus den beiden kreisfreien Städten Würzburg und Schweinfurt sowie sieben Landkreisen zusammen. Das wirtschaftliche Ökosystem Mainfranken lebt von seiner unternehmerischen Diversifikation. Besonders die Stadt Schweinfurt und deren Umland zeichnet sich durch eine hohe Dichte produzierender Unternehmen von Großindustrie (Kugellagerbranche) und eine Vielzahl von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) aus. Seit dem Jahr 1947 wird eine Erwärmung von 1,1 °C (im Sommer) und 1,4 °C im Winter verzeichnet [5] [6]. Diese Erwärmungsraten sind deutlich höher als im globalen und bundesdeutschen Durchschnitt. Neben einem Zuwachs von bis zu 140% an Sommertagen und 10% Jahresniederschlag, Zunahme an Tropennächten, inkludieren diese Hochrechnungen einen Rückgang der Frosttage um 40–50% sowie der Eistage um 60–80% [7]. Ein solches Klima wirkt sich auf die Natur und Wirtschaft gleichermaßen aus, bspw. erfordern veränderte Vegetationsperioden für den Weinbau, ein Charakteristikum der Region, dass neue Rebsorten kultiviert werden müssen (ebd.). Ebenso führen die gehäuften Extremwetterlagen bei ansässigen Unternehmen zu nicht unerheblichen Schäden. Beispielsweise verzeichnete der größte Produktionsstandort und Hauptsitz der deutschen SKF GmbH in Schweinfurt (4.400 Mitarbeitende) im Jahr 2018 aufgrund eines Starkregenereignisses schon einmal einen zweitägigen Produktionsstopp.

Damit für nachfolgende Generationen ein »intaktes ökologisches, soziales und ökonomisches Gefüge« erhalten wird, räumt die lokale Politik dem Thema Klimamanagement derzeit eine hohe Priorität ein. Zum Beispiel zeigt eine aktuelle gemeinsame Vision der Stadtverwaltung, Großindustrie und kooperierender Hochschule FHWS auf, die Stadt Schweinfurt bis 2030 zur »grüne(n) Industriestadt« mit stark reduzierten Treibhausgasemissionen, leistungsstarker Produktion und attraktiven Lebens- und Wohnbedingungen zu entwickeln [8]. Auch für die Stadt Würzburg ist vorgesehen, dass diese »spätestens« bis zum Jahr 2045 klimaneutral konstituiert wird [9].

1.2 Organisation des Lernens als Forschungsansatz

Da sich Anpassungsstrategien auf lokale, zu anderen Regionen und Ländern divergierende klimatische Verhältnisse bezieht, sind standardisierte Vorgaben (bspw. globale Anpassungsstrategien) weniger zielführend. Angesichts der stark verzögerten Wirksamkeit von Klimaschutz und -anpassung, der Halbwertszeit des Wissens, sowie der Interdependenzen von ökonomischen und ökologischen Aktivitäten, bedarf es fundierter Wissensgrundlagen und Werkzeuge, um Agierende im Umgang mit Ungewissheit und Unbeständigkeit zu unterstützen.

Mit dem Forschungsvorhaben MainKlimaPLUS werden diese Herausforderungen zunächst über einen Zeitraum von zwei Jahren adressiert und drei Bildungskomponenten entwickelt, um (produzierende) Unternehmen in ihrer Verantwortungsfunktion zu sensibilisieren und sie dabei zu begleiten, individuelle Anpassungsmaßnahmen abzuleiten (siehe Abschnitt 3). Deren methodisch-didaktische Perspektive leitet sich entsprechend der Taxonomie nach Bloom ab [10] und differenziert sich in die Lernergebnisse bzw. Kompetenzfelder – Kennen, Können, Verstehen. Dafür basisgebend sind eine Regionalstudie, ein Videoteaser, sowie ein Planspiel als Hauptkomponente (siehe ebd., Abbildung 1). Ziel hierbei ist es, den aktuellen

Stand von Klimaanpassungsmaßnahmen bei den untersuchten Unternehmen gemeinsam mit dem aktuellen wissenschaftlichen Diskurs praxisorientiert aufzubereiten. Um ferner zu untersuchen, inwiefern sich Unternehmen perspektivisch an den Klimawandel anpassen und dabei organisationales Lernen stattfindet, werden zudem die mit dem Klimawandel einhergehenden Herausforderungen auf organisationale Lernprozesse betrachtet und dabei lernfördernde und lernhemmende Elemente identifiziert und diskutiert. Die mit dem Projekt bewirkten Veränderungsmechanismen sollen dazu führen, dass die derzeitigen und zukünftigen Umwelteinflüsse konstruktiv betrachtet und wirtschaftliche Risiken antizipiert werden.

2 KLIMAWANDEL UND FOLGEN

2.1 Industrieller Einfluss

Im Jahr 2019 lagen die global emittierten CO₂-Werte mit 36,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid auf dem höchsten Wert seit 1960 [1]. Mit jährlich 9,2 Tonnen pro Kopf produziert Deutschland rund doppelt so viele Treibhausgasemissionen wie die Menschen weltweit im Mittel [11]. Die Gründe dafür finden sich sowohl in der überaus großen Anzahl von Industrieunternehmen als auch in dem wachsenden Bevölkerungswohlstand, der bspw. zum übermäßigen Konsum und Verbrauch von Gütern verleitet. Um diesem negativen Trend entgegenzuwirken, hat die Bundesrepublik Deutschland bereits im Jahr 2009 der »Effort Sharing Decision« des Europäischen Parlaments vertraglich zugestimmt, mit der eine nationale Verringerung von Treibhausgasemissionen anvisiert wird. Nicht zuletzt wurde im Jahr 2015 auf der 21. UN-Klimakonferenz im Rahmen der Klimakonvention der Vereinten Nationen mit 195 beteiligten Nationen das Pariser Abkommen verabschiedet [12]. Dieses intendiert, die Erwärmung der globalen Durchschnittstemperatur auf mindestens unter 2 °C aber besser 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [13]. Damit sollen die Auswirkungen des Klimawandels zu begegnen möglichst gering gehalten werden (ebd.). Wegen der prognostizierten Nicht-Erfüllung der Ziele (u.a. der des Pariser Abkommens) wurde im Jahr 2019 das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verabschiedet, um Deutschland bis zum Jahr 2050 in das Ziel der Treibhausgasneutralität zu führen [1].

Gemäß jüngstem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts, das genau jenes KSG als verfassungswidrig erklärte, müssen die bisher definierten Reduktionspfade von Kohlenstoffdioxidemissionen präzisiert werden. Diese Entscheidung ist auf Stimmen zurückzuführen, die sich auf den Brundtland-Bericht der UN-Kommission aus dem Jahr 1992 beziehen. Zwei leitende Grundannahmen sind die Prinzipien einer »intergenerativen und [...] globalen sozialen Gerechtigkeit« [14]. So sollen auch nachfolgende Generationen von sozialen, ökonomischen und ökologischen Systemen profitieren können oder zumindest keine negativen Auswirkungen spüren.

Der einleitend genannte Einfluss von Deutschland, einem bedeutenden Industrie- und Exportland, auf die globalen Treibhausgasemissionen zeigt sich an den Folgen der Covid-19-Pandemie: Im Vergleich zum Vorjahr wurde 2020 ein Rückgang um 4,6 Prozent an durch die Industrie emittierten Treibhausgasemissionen verzeichnet, womit sich die im Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegten Richtwerte um 10 Millionen Tonnen CO₂ unterschreiten ließen [15]. Demnach haben sich die während der Covid-19-Pandemie geltenden Einschränkungen, Anpassungen und Schutzmaßnahmen maßgeblich auf Arbeitsbedingungen, Produktionsprozesse und Freizeitaktivitäten ausgewirkt. Dies ist jedoch differenziert zu betrachten. Dirk Messer, Präsident des Bundesumweltministeriums, konstatiert zur Wirkung des Lockdowns, dass Deutschland trotz der Wirksamkeit von klimapolitischen Instrumenten, »sein Klimaziel für 2020 verfehlt« hätte (ebd.).

Bis dato verantwortet Deutschland 4,6% der global verursachten Treibhausgasemissionen, bemessen am Zeitraum seit Mitte des 18. Jahrhunderts [11]. Gerade produzierende Unternehmen tragen erhöht zum Klimawandel bei. Neben der Energiewirtschaft verursacht die Industrie sektoral die zweithöchsten CO₂-Emissionswerte [15]. Konkret verursacht das produzierende Gewerbe in Deutschland durchschnittlich 24 Prozent der landesweit verzeichneten Emissionen (siehe hierzu: ebd.).

2.2 Bedarf an Klimaschutz und -anpassung bei (produzierenden) Unternehmen

Um mit den (negativen) klimatischen Auswirkungen umzugehen, gibt es grundsätzlich zwei Ansätze, die einer sogenannten Austauschbeziehung (sog. trade-off) unterliegen: Klimaschutz und Klimaanpassung. Klimaschutz ist entgrenzt und wirkt der globalen Erderwärmung entgegen, indem Kohlenstoffdioxid-Emissionen und einhergehender Treibhauseffekt verringert werden [16]. Reaktive und antizipative Klimaanpassung hingegen wirkt lokal und enthält individuelle Maßnahmen bzw. Strategien, um mit bereits vorhandenen und zukünftig auftretenden Auswirkungen umzugehen. Durch die lokale Wirkung von Anpassungsstrategien ist die Beobachtung, dass ein gesellschaftspolitischer Fokus primär auf dem Klimaschutz liegt, evident (siehe dazu auch: ebd., S.152). Laut einer Untersuchung des statistischen Bundesamts lässt sich insbesondere im produzierenden Gewerbe noch (Zeitraum von 2008 bis 2018) kein Trend erkennen, inwiefern Klimaschutz und -anpassung als priorisiertes Handlungsfeld thematisiert wird [17].

Agierende der Wirtschaft sind aufgefordert, bestehende ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Bedarfe zu befriedigen. Die erwähnte Pandemie und der anthropogen-getriebene Klimawandel [16] verdeutlichen prägnant, dass das aktuelle Zeitalter neben all seinen positiven Neuerungen und erheblichen Fortschritten für diese Akteure zunehmend komplexer wird. Mit bundesgerichtlich verordneten Nachschärfungen zum KSG und zunehmenden politischen Auflagen bezüglich Emissionswerten und erneuerbarer bzw. regenerativer Energien erhöht sich der öffentliche Druck auf Unternehmen immens, Themen wie Nachhaltigkeitsmanagement und Klimaschutz strategisch in die Prozesse zu integrieren. Gleichzeitig müssen sie selbst als Betroffene direkte Schäden z.B. an Gebäuden, oder indirekte Schäden durch verminderte Performanz, Beschaffungslücken oder Produktionsstopps in ausländischen Standorten, handhaben.

Da sich zu alledem die Auswirkungen des Klimawandels zeitlich versetzt bemerkbar machen, die Verzögerung liegt bei etwa 30–50 Jahren [17] [18], kennzeichnet die Ableitung von effektiven Klimaschutz und -anpassungsmaßnahmen einen strategischen Prozess. Bis dato initiierte Schutzmaßnahmen werden etwa in frühestens drei Dekaden ihre Wirkung entfalten. (Produzierende) Unternehmen müssen einen adäquaten Umgang mit Risiken und Chancen finden, um sich weiterhin marktwirtschaftlichen Bestand zu sichern. Neben der Betrachtung des Absatzmarkts, erfordert es die Orientierung an den veränderten Bedarfen von Stakeholdern (siehe: gesellschaftlicher Werte- und Bewusstseinswandel). Der Themenkomplex Klimaschutz und -anpassung steht fortan gesamtgesellschaftlich im Fokus – unbestreitbar die multiplen Auswirkungen der schnell ansteigenden, globalen Erwärmungsraten durch eine lichter werdende Ozonschicht.

3 FORSCHUNGSMETHODIK

Um tradierte, konventionelle Denk- und Handlungsmuster bei Entscheidungstragenden zu lösen, sie von der Handlungsrelevanz zu überzeugen und gezielt zu befähigen, erfordert es einen

mehrschrittigen Transformationsprozess (Abbildung 1). Eine authentische (nicht aufoktroierte), positive Verhaltensveränderung ist langwierig, ressourcenintensiv und erfordert strategische, flexible Interventionen im Handeln. Dies stellt insoweit eine Herausforderung dar, dass Wandel oft negativ konnotiert wird. Mit dem Forschungsprojekt sollen betreffende Agierende mit zielgerichtet entwickelten Werkzeugen (respektive Bildungskomponenten) intrinsisch motiviert werden, eigene Anpassungsstrategien zu entwickeln. Der dabei anvisierte Austausch mit branchenähnlichen und -fremden Akteuren, bspw. während der Durchführung des Planspiels, soll die Inspiration fördern. Eine breite Wissensbasis (Netzwerk) und katalogisierte Aufbereitung regional vorhandener und geplanter Anpassungsmaßnahmen sollen bewirken, dass Entscheidungstragende von Unternehmen best-practice-Beispiele adaptieren und selbst anwenden.



Abbildung 1: Konzeptualisierung des Bildungsmoduls

Mit einer Regionalstudie soll der Modus Operandi der Klimaanpassung in Mainfranken erfasst werden (Abbildung 1). Die gewonnenen empirischen Erkenntnisse werden dann auf die basisgebenden theoretischen und empirischen Vorannahmen transferiert und daraus deduktiv die weiteren Implikationen bzw. Handlungsempfehlungen mit Leitfadencharakter abgeleitet. Um das Begriffsverständnis, die Sensibilisierung für den Klimawandel und die Relevanz bzw. den Grundgedanken von Anpassungsmaßnahmen in Wirtschaftsunternehmen weiter zu unterstützen, wird ein kurzes Teaservideo entwickelt (ebd.). Dieses soll außerdem die Verbreitung der Themenstellung fördern und dient zusätzlich als Einleitung für das Planspiel. Anhand der Durchführung eines Planspiels auf Basis des game-based Learning Ansatzes, werden Entscheidungstragende aus Unternehmen befähigt, Ideen und Konzepte für eigene Anpassungsstrategien zu generieren und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit zu bewerten (ebd.). Dies geschieht anhand der Simulation von aus der Regionalstudie abgeleiteten Klimaanpassungsmaßnahmen und deren Wirkung.

Um anschließend die Wirksamkeit der konzipierten Bildungskomponenten hinsichtlich der Befähigung zur Klimaanpassung zu analysieren, eignet sich ein zweischrittiger Ansatz, mit dem Fokus auf das didaktische Konzept (= den Prozess) und die Effektivität des Planspiels (= subjektiver Erfahrungszuwachs). Als methodisches Erhebungswerkzeug dienen der Fragebogen und das Experteninterview. Der standardisierte Fragebogen dient formativer Evaluation des Planspiels, bei dem sowohl der Vermittlungsprozess (didaktische Aufbereitung, Kontext

eines Workshops u.a.) des Bildungsansatzes als auch der empfundene Erfahrungs- / Wissenszuwachs subjektiv eingeschätzt werden sollen.

Neben den empirischen Zugängen unterstützen begleitende, wissenschaftliche Analysen zum Themenkomplex Klimawandel und -anpassung, Game-based Learning und didaktischer Ausgestaltung von Planspielen die Entwicklung, Durchführung und Diskussion der Bildungskomponenten. Wissenschaftlich betrachtet eignen sich dafür mehrere Subdisziplinen zur kontextualen (Teil-)Verortung und Diskussion: Organisationspädagogik, betriebliche Weiterbildung, Öko- / Umweltpädagogik, Bildung für nachhaltige Entwicklung, Game-based Learning und Mediatisierung. Auch wird ersichtlich, dass eine Synthese verschiedener Disziplinen sinnvoll und wichtig ist. Denn nicht zuletzt unterstützen ökonomische bzw. wirtschaftsingenieurwissenschaftliche Sichtweisen zu Aspekten der energie- und ressourcenschonenden Produktion sowie Kreislaufwirtschaft im Kontext der Nachhaltigkeit die fachlich profunde Konzeptualisierung der Bildungskomponenten. Genauso bedarf es aktueller Klimadaten und -projektionen, die meist seitens geographischer Disziplinen / Teilbereiche zur Verfügung gestellt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Statista** (2020), »Dossier Klimawandel«, verfügbar in: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/41248/dokument/klimawandel-statista-dossier/>
- [2] **Knieling, J.; Fröhlich, J.; Krekeler, M.** (2014), »Grenzen und Ebenen überschreitende Governance der Klimaanpassung«, in Cormont, P.; Frank, S. (Hrsg.), Governance in der Klimaanpassung – Strukturen, Prozesse, Interaktionen. Dokumentation der Tagung der KLIMZUG-Verbünde an der TU Dortmund am 03.12.2010, S.10–16.
- [3] **Grothmann, T.** (2005), »Klimawandel. Wetterextreme und private Schadensprävention. Entwicklung, Überprüfung und praktische Anwendbarkeit der Theorie privater proaktiver Wetterextrem-Vorsorge«, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/234022900_Klimawandel_Wetterextreme_und_private_Schadenspraevention_Entwicklung_Uberprufung_und_praktische_Anwendbarkeit_der_Theorie_privater_proaktiver_Wetterextrem-Vorsorge_Climate_change_weather_extremes_and_
- [4] **Lozán, J.; Graßl, H.; Jendritzky, G.; Karbe, L.; Reise, K.** (2014), »Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen« (2. Aufl.), verfügbar in: <https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/gesundheitsrisiken/>
- [5] **Karg, L.; Wedler, M.; Blaschke T.,; Pielniok D.; Sailer, M.; Giglmaier, S.** (2012), »Integriertes Klimaschutzkonzept für die Stadt Würzburg«, verfügbar in: https://www.wuerzburg.de/media/www.wuerzburg.de/org/med_512829/415559_bericht_ikk_wuerzburg_130318.pdf
- [6] **Rauh, J.; Paeth, H.** (2011), »Anthropogener Klimawandel und Weinwirtschaft: Wahrnehmung und Anpassungsmaßnahmen fränkischer Winzer auf den Wandel klimatischer Bedingungen«, Berichte zur deutschen Landeskunde, 85, S. 2151 – 2177.

- [7] Schönbein, D.; Keupp, L.; Pollinger, F.; Paeth, H. (2020), »Klimabericht für Unterfranken. Die Region unter dem Einfluss der globalen Erwärmung«, Begleitbericht zum Projekt BigData@Geo, verfügbar in: <https://bigdata-at-geo.eu/klimabericht/#/>
- [8] Stadt Schweinfurt (2021), »Zukunftsvision 2030: Stadt Schweinfurt möchte grüne Industriestadt werden«, verfügbar in: <https://www.schweinfurt.de/wirtschaftsbildung/aktuelles/8083.Zukunftsvision-2030-Stadt-Schweinfurt-moechte-gruene-Industriestadt-werden.html>
- [9] Stadt Würzburg; Heilig, M.; Frommer, J.; Göpfert, C.; Galonska, C.; Mähler, P.; Rohmer, A.; Wenzel, S. (2020), »Würzburg: vorbereitet · resilient · sicher · lebenswert. Klimaanpassung & Stadtentwicklung 2020+«, verfügbar in: https://www.wuerzburg.de/m_569915.
- [10] Bloom, B. S.; Krathwohl, D. R.; Masia, B. B. (1984), »Bloom taxonomy of educational objectives«, Allyn & Bacon, Pearson Education
- [11] BMU (2020), »Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit«, Broschüre | Nr. 10034, Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, verfügbar in: <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutz-in-zahlen-2020/>
- [12] Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H. O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P. R.; Pirani, A.; Moufo-uma-Okia, W.; Péan, C.; Pidcock, R.; Connors, S.; Matthews, J. B. R.; Chen, Y.; Zhou, X.; Gomis, M. L.; Lonnoy, E.; Maycock, T.; Tignor, M.; Waterfield, T. (2019), »IPCC, 2018: Häufig gestellte Fragen und Antworten«, 1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut, World Meteorological Organization, Genf, deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim/SCNAT, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, verfügbar in: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-FAQs_de_barrierefrei.pdf
- [13] KSG (2019), »Klimaschutzgesetz«, verfügbar in: <http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>
- [14] Gräsel, C. (2016), »Bildung für nachhaltige Entwicklung«, in Tippelt, R.; Schmidt-Hertha, B. (Hrsg.), Handbuch Bildungsforschung, Springer Nature, Wiesbaden, S. 1093–1109.
- [15] BMU (2021), »Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Treibhausgasemissionen sinken 2020 um 8,7 Prozent«, verfügbar in: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/treibhausgasemissionen-sinken-2020-um-87-prozent/>
- [16] Mahammadzadeh, M.; Chrischilles, E.; Biebeler, H. (2013), »Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen: Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf«, IW-Analysen, No. 83, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln

- [17] **Brandt, M.** (2020), »Umweltschutz. Kein erkennbarer Trend beim Klimaschutz«, Verfügbar in: <https://de.statista.com/infografik/22090/klimaschutz-investitionen-des-produzierenden-gewerbes-in-deutschland/>
- [18] **Ott, H.; Richter, C.** (2008), »Anpassung an den Klimawandel – Risiken und Chancen für deutsche Unternehmen«, Kurzanalyse für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Projekts »Wirtschaftliche Chancen der internationalen Klimapolitik« (FKZ 90511504), verfügbar in: <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/2903/file/WP171.pdf>.

Lehre, Forschung und Transfer am Beispiel der Robotik – vom RoboCup@Work zur autonomen Warenkommissionierung

Tobias Kaupp

Short Facts

<i>Förderkennzeichen:</i>	<i>DIE-2010-0009</i>
<i>Projektlaufzeit:</i>	<i>01.02.2021 – 31.01.2024</i>
<i>Förderträger:</i>	<i>Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie</i>
<i>Projektpartner:</i>	<i>Linde Material Handling</i>
<i>Fördersumme:</i>	<i>347.300 €</i>

1 EINLEITUNG

Die Kernaufgaben der Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) sind praxisorientierte Lehre, angewandte Forschung und Transfer [1]. Nicht erst seit der geplanten Reform des Hochschulgesetzes und der Hightech Agenda des Freistaats Bayern werden die Forschungsaktivitäten an HAW zunehmend gestärkt. Dieser Trend wird auch von der Wirtschaft begrüßt, die Interesse an gemeinsamen Forschungsprojekten hat, sowie einem zunehmenden Fachkräftemangel vorbeugen muss.

Der Transfer in die Wirtschaft bedingt auch einen verstärkten Bedarf an Wissenschaftskommunikation als Transfer in die Öffentlichkeit, um die Gesellschaft in die Arbeit der Hochschulen einzubeziehen. »Transfer in Wirtschaft und Gesellschaft [zu] stärken« gehört außerdem zu den großen forschungspolitischen Zielen des Pakts für Forschung und Innovation (2021–2030) zwischen Bund und Ländern [2].

Einer der Forschungsschwerpunkte an der HAW Würzburg-Schweinfurt (FHWS) sind Digitale Intelligente Systeme. In diesem Schwerpunkt werden u.a. Aspekte der Digitalisierung in Produktion, Fertigung, Handel und in der Gesellschaft betrachtet, die oftmals unter dem Stichwort Industrie 4.0 diskutiert werden. Zur Konsolidierung der Forschungsarbeiten im genannten Schwerpunkt wurde Anfang 2019 das fakultätsübergreifende Institut Digital Engineering (IDEE) gegründet [3]. Ziel ist es, interdisziplinäre und angewandte Forschung rund um das Themengebiet Digitale Produktion, in enger Kooperation mit der regionalen und überregionalen Industrie und Forschungseinrichtungen durchzuführen.

Das IDEE ist mit vier Forschungsprofessoren besetzt, die durch eine Lehrentlastung Freiräume für den Auf- und Ausbau von interdisziplinären Forschungsaktivitäten nutzen können. Das Center Robotik (CERI) ist eines der Aufgabengebiete des IDEEs mit den beiden Schwerpunkten »Robotergestützte Arbeitsplätze der Zukunft« sowie »Intralogistik in der Smart Factory«.

Dieser Artikel beschäftigt sich mit dem zweiten Schwerpunkt. Anhand der CERI-Aktivitäten im Bereich der fahrerlosen Transportsysteme wird aufgezeigt, wie der »Dreiklang« Forschung, Lehre und Transfer in der Praxis umgesetzt wird und die drei Bestandteile sich gegenseitig befruchten können.

Robotik in der Smart Factory

Die Robotik spielt bei einer intelligenten Fabrik eine wesentliche und äußerst vielseitige Rolle. Industrieroboter werden schon seit Jahrzehnten für Tätigkeiten eingesetzt, die eine große Wiederholgenauigkeit und Kraft benötigen, wie beispielsweise Schweißen und Handhabung von schweren Bauteilen. In den letzten zehn Jahren hat sich ein neues Automatisierungsparadigma entwickelt, das eine enge Zusammenarbeit zwischen Werkern und Leichtbaurobotern (Cobots) voraussetzt, die sogenannte Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) [4] [5]. Dabei werden gemeinsam Montagetätigkeiten durchgeführt, die flüssig und sicher ablaufen müssen und deshalb einen hohen Grad an Roboter-Intelligenz bedingen. Der Cobot muss die Intentionen des Menschen »verstehen« und auf Änderungen schnell und flexibel reagieren. Wie diese Ziele erreicht werden können, ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [6].

Neben Produktions-, Handling-, und Montagetätigkeiten übernehmen Roboter in der modernen Fabrik immer mehr Intralogistikaufgaben [7] [8]. Bauteile und Werkzeuge müssen zeitnah zwischen verschiedenen Arbeitsstationen transportiert werden. Dafür müssen die sogenannten fahrerlosen Transportsysteme (FTS) in hochdynamischen Umgebungen sicher navigieren, Objekte in der Umgebung identifizieren, aufnehmen und wieder ablegen können.

Fahrerlose Transportsysteme

Fahrerlose Transportsysteme werden zwar schon seit den 1960er Jahren für Logistikaufgaben eingesetzt, benötigen aber in der Regel eine fixe Infrastruktur wie beispielsweise Leitlinien. Die Entwicklungen in der Mobilrobotik, welche zum großen Teil auf probabilistischen Algorithmen basieren [9], ermöglichen, dass die Navigation ohne Infrastruktur stattfinden kann und Roboter und Menschen sich in den gleichen Bereichen sicher aufhalten und bewegen können [5] [8]. Dabei können FTS in bestehende IT-Strukturen integriert und mit anderen Fahrzeugen vernetzt werden, wodurch sich die Intralogistik-Abläufe weiter optimieren lassen [2]. Diese Merkmale sind wichtige Voraussetzungen, um beispielsweise Kommissionierungsabläufe flexibel und agil zu gestalten [10] [11] [5].

Warenkommissionierung

Als Kommissionierung bezeichnet man das Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen (Artikeln) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) aufgrund von Aufträgen. Kommissionierung als Teilgebiet der Logistik ist grundsätzlich eine nicht wertschöpfende Tätigkeit und es wird deswegen versucht, diese Abläufe möglichst zu minimieren [5]. Ein neuer Trend bei der Kommissionierung ist die Kombination von autonomen Transportrobotern mit Greifrobotern, was neben dem Transport von Waren auch das Be- und Entladen ermöglicht [8].

Im Bereich des intelligenten Greifens sind zahlreiche Vorarbeiten unter dem Begriff »Griff-in-die-Kiste« (GidK, engl. Bin Picking) vorhanden. Das GidK-Problem ist schon seit fünf Jahrzehnten Gegenstand der Forschung, jedoch bleibt das Problem in seiner allgemeinen Form weiterhin ungelöst. Die Promotionsarbeit von Buchholz bietet einen historischen Überblick der Forschungsansätze zum Bin Picking und stellt drei neuartige Ansätze vor [12]. Weder die historischen noch die neuartigen Ansätze nutzen die Methoden des Maschinellen Lernens (ML), welche in den letzten Jahren mit den Erfolgen des Deep Learnings eine Renaissance erlebt haben [13]. ML-basierte Methoden werden zunehmend auch auf das GidK-Problem angewendet [14].

Forschungsbedarf

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es weiterhin Forschungsbedarf im Bereich der Intralogistik mit fahrerlosen Transportsystemen gibt. Mobile Roboter müssen robust, sicher, verlässlich und selbstständig navigieren können. Objekte müssen unter realen Kommissionierbedingungen erkannt, klassifiziert und von Roboterarmen gegriffen werden, wobei das Maschinelle Lernen einen vielversprechenden Ansatz darstellt. Schließlich müssen die gesamten Logistikabläufe effizient geplant, modelliert und optimiert werden.

3 FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN AM CERi

RoboCup@Work

Um die wissenschaftliche Untersuchung der oben genannten Forschungsfragen zu fördern, wurde 2013 die RoboCup@Work Liga gegründet [15]. Bei diesem internationalen Wettbewerb geht es darum, Roboter zu entwickeln, die autonom Transport- und Handhabungsaufgaben in einer abstrahierten Industrieumgebung durchführen können (siehe Abbildung 1 bis Abbildung 3). Der populäre RoboCup-Wettbewerb mit seinen inzwischen fünf Hauptligen hat sich seit 1997 als eine Plattform bewährt, um den Stand der Technik in Robotik und Künstlicher Intelligenz an Schulen und Hochschulen voranzutreiben und der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.



Abbildung 1: Teil der FHWS-RoboCup@Work-Arena, die eine abstrahierte Industrieumgebung darstellt. Der Roboter muss autonom navigieren, statische und bewegte Objekte erkennen sowie greifen, an andere Orte transportieren und wieder ablegen.



Abbildung 2: Der Roboter führt eine Greifoperation durch. Dazu muss zunächst das Bauteil erkannt, klassifiziert und lokalisiert werden.



Abbildung 3: Mit einer Tiefenkamera werden Punktwolken von den zu greifenden Bauteilen generiert.

Anfang des Jahres 2020 wurde ein RoboCup@Work-Team an der FHWS gegründet, um die strategischen Interessen der FHWS im Bereich der Forschung, Lehre und des Ideen-, Wissens- und Technologietransfers zu verfolgen. Erste Ergebnisse innerhalb dieser drei Kategorien werden in der folgenden Tabelle präsentiert.

Tabelle 1: Durch den RoboCup@Work erzielte Ergebnisse in den Kategorien Forschung, Lehre sowie Transfer (im Sinne von Ideen-, Wissens- und Technologietransfer [2]).

Ergebnis	Forschung	Lehre	Transfer
Etablierung einer industrietauglichen Experimentierumgebung zum Ausbau des Forschungsschwerpunktes Digitale Intelligente Systeme. In dieser Umgebung werden derzeit mehrere Forschungsfragen im Bereich FTS/Intralogistik durch Masteranden und wissenschaftliche Mitarbeitende bearbeitet	x	x	
Etablierung eines Kooperationsprojekts mit der regionalen Wirtschaft im Anwendungsgebiet Warenkommissionierung – siehe nächster Abschnitt	x	x	x
Pilotprojekt mit einem Medizintechnikhersteller zum Transport von Montagestationen innerhalb der Produktion	x	x	x
Vergabe von mehreren Masterprojekten, welche die Teilgebiete Navigation, intelligentes Greifen und Task-Planung in einer dreisemestrigen wissenschaftlichen Forschungsarbeit bearbeiten	x	x	
Abschluss von mehreren hochschulinternen Bachelorarbeiten und Studierendenprojekten, welche technische Teilaspekte des RoboCups behandeln		x	
Einbindung der Testumgebung und der entwickelten Hard- und Softwareinfrastruktur in die Lehr- und Laborveranstaltungen des seit dem WS 2020/21 neu gestarteten Studiengang »B.Eng. Robotik/Robotics«		x	
Presseartikel [16] sowie ein professioneller Webauftritt mit Videopräsentation [17]			x
Unterstützung durch die Hans-Wilhelm-Renkhoff-Stiftung beim Aufbau des RoboCup-Teams			x
Teilnahme am ersten virtuell durchgeführten RoboCup im Juni 2021			x
Sponsoring durch regionale Unternehmen zur Unterstützung zukünftiger RoboCup-Teilnahmen			x

Griff ins Regal mit Kommissionierroboter

Basierend auf den RoboCup@Work-Aktivitäten begann Anfang 2021 ein Kooperationsprojekt zwischen Linde Material Handling (LMH) und der FHWS. LMH ist Marktführer in Europa für Flurförderzeuge und Nummer zwei in der Welt. Für seine Kunden entwickelt LMH hochleistungsfähige Lösungen für die Intralogistik. Die Grundlage dafür sind Elektro- und Dieselstapler, Lagertechnikgeräte, Hubwagen, Software für das Flottenmanagement, Automatisierungslösungen und Fahrassistenzsysteme.

Ziel des Kooperationsprojekts ist die Entwicklung eines mobilen Pick-Roboters zur vollautomatisierten Kommissionierung diverser Warentypen. Der Roboter soll sich eigenständig im Lager bewegen, die benötigten Waren von Quellpaletten im Regal entnehmen und sicher auf der Zielpalette platzieren (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Die Innovation des Vorhabens besteht darin, mehrere technisch komplexe Einzelaufgaben zu lösen und in ein funktionierendes Komplettsystem mit anspruchsvollen technischen Spezifikationen zu integrieren.



Abbildung 4: Konzept eines mobilen Kommissionierroboters für den »Griff ins Regal«

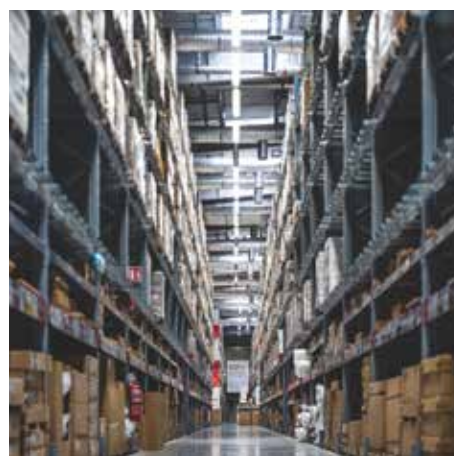


Abbildung 5: Regale, Paletten und Pakete in einem Warenlager

Die Forschungsarbeiten am CERI fokussieren hierbei die Umgebungswahrnehmung und -interpretation, um Regalstrukturen, Ladungsträger und andere Objekte zu erkennen und zu lokalisieren. Dabei werden Informationen von komplementären Sensortechnologien fusioniert und mit Hilfe moderner Methoden des Maschinellen Sehens und Lernens verarbeitet. Es ist geplant, die Forschungsarbeit im Rahmen von zwei kooperativen Promotionen zu bearbeiten.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Anhand eines konkreten Beispiels aus der Robotik wurde in diesem Artikel aufgezeigt, wie die Kombination von Lehre, Forschung und Transfer an einer Hochschule für angewandte Wissenschaften funktionieren kann. Der RoboCup@Work-Wettbewerb eignet sich sowohl zur Ausbildung von forschungs- und entwicklungsaffinen Studierenden als auch zum Einstieg in die Forschung mit Industriepartnern. Dies wurde anhand des gerade gestarteten Vorhabens zur Entwicklung eines Kommissionierroboters mit Linde Material Handling (LMH) illustriert.

Die beschriebenen Projekte stehen erst am Anfang ihres Lebenszyklus. Ergebnisse aus dem RoboCup@Work werden in das LMH-Projekt sowie andere Forschungsprojekte einfließen und umgekehrt. Die Arbeitsergebnisse aus der Forschung werden in der Lehre verwertet, insbesondere in den Vertiefungsrichtungen »Industrielle Robotik« und »Mobile Robotik« des neuen Studiengangs B.Eng. Robotik / Robotics. Technologietransfer in die Industrie und Wissenstransfer in die Öffentlichkeit werden durch diese Aktivitäten ebenso vorangetrieben.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hochschule Bayern, <https://www.hochschule-bayern.de/>
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung, <https://www.bmbf.de/de/pakt-fuer-forschung-und-innovation-546.html>
- [3] HAW Würzburg-Schweinfurt, <http://idee.fhws.de>
- [4] Matthias, B.; Ding, H. (2013), »Die Zukunft der Mensch-Roboter-Kollaboration in der industriellen Montage,« Internationales Forum Mechatronics (ifm)
- [5] Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kuhlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A. (2019), »Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration«, Carl Hanser Verlag, München
- [6] Riedelbauch, D.; Heinrich, D. (2019), »Koordination hybrider Mensch-Roboter-Teams«, Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration, Carl Hanser Verlag, S. 260–272.
- [7] Scholz, M. (2019), »Anwendungsbeispiel: Intralogistik«, Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration, Carl Hanser Verlag, München, S. 399–404
- [8] Robotik und Produktion (2019), »Themenheft: Mobile Robotik und smarte Intralogistik«, Robotik und Produktion
- [9] Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D. (2005) »Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)«, MIT Press, Cambridge
- [10] Institut für Innovation und Technik (iit) (2019), »PAiCE – Digitale Technologien für die Wirtschaft«, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin
- [11] Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2017), https://www.ifl.kit.edu/robotik_und_interaktive_systeme_qbiik.php
- [12] Buchholz, D. (2016), »Bin-Picking: New Approaches for a Classical Problem«, Springer, Berlin
- [13] Fraunhofer Gesellschaft (2018), »Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf«, Fraunhofer, verfügbar in: https://www.bigdata-ai.fraunhofer.de/content/dam/bigdata/de/documents/Publikationen/Fraunhofer_Studie_ML_201809.pdf

- [14] [Alonso, M.; Izaguirre, A.; Grana, M.](#) (2019), »Current Research Trends in Robot Grasping and Bin Picking«, International Joint Conference SOCO'18-CISIS'18-ICEUTE'18
- [15] [CT – Magazin für Computertechnik](#) (2017), »Meisterschaft der Maschinen: RoboCup@Work,« verfügbar in: <https://www.heise.de/ct/artikel/Meisterschaft-der-Maschinen-RoboCup-Work-3746064.html>
- [16] [HAW Würzburg-Schweinfurt](#), <https://fokusorange.fhws.de/forschen-verstehen/fhws-goes-robocup/>
- [17] [HAW Würzburg-Schweinfurt](#), <https://robotik.fhws.de/fhws-robotik/forschung/projekte/robocupatwork/>

Mikrologistik der Zukunft mit dezentral organisierten boden- und luftgebundenen autonomen Fördereinheiten

Christian Bachmeir

Short Facts

Projektlaufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

Fördersumme: 869.024 €

Förderträger: BMVI

Projektpartner: Emqopter GmbH, FHWS – Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Flexus AG, htw saar, ASTI Mobile Robotics GmbH und Siemens AG.



1 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG

1.1 Ausgangssituation

Geprägt durch den Einzug der Digitalisierung in Wirtschaft und Industrie sieht sich die Logistikbranche heute zunehmend damit konfrontiert, immer kleinere Stückmengen und Losgrößen transportieren zu müssen. Heutige, konventionelle Logistiksysteme sind für diese zukünftigen Anforderungen nicht ausgelegt. Deshalb bringt der Transport kleiner Losgrößen hohe Kosten mit sich. Darüber hinaus sind heutige Logistiksysteme nicht flexibel genug. Auch die praktizierte Ansammlung von kleinen Losgrößen zu größeren Einheiten erfüllt die Anforderungen nicht. Der Warentransport wird aus Sicht des steigenden Anspruchs an den Zeitfaktor teuer. Darüber hinaus entstehen zusätzliche Lagerkosten.

Neue Technologien wie fahrerlose Transportsysteme und Transportdrohnen können in ihrer aktuellen Entwicklung dem Bedarf der Mikromobilität nur in stark abgegrenzten Bereichen gerecht werden und somit ihr Potenzial noch nicht ganzheitlich entfalten. Im Projekt wird die kollaborative Zusammenarbeit verschiedener Transporteinheiten wie fahrerlose Transportsysteme (FTS), Multicopter- und Flächendrohnen aufbauend auf einem KI-Service entwickelt, was einem heterogenen Netzwerk die Überwindung der einzelnen, technologischen Systemgrenzen und zweckdienlichen Einsatz ermöglicht.

Die Auslegung von logistischen Systemen erfolgt immer nach dem Prinzip des minimalsten Aufwandes. Das Projekt FlowPro entwickelt ein auf KI-Verfahren basierendes Logistiknetzwerk, welches sich selbstständig organisiert und in Industrieparks die Intralogistik sowie darüber hinaus unternehmensübergreifend auf dem Land- und Luftweg die Mikromobilität von Waren ermöglicht und optimiert.

1.2 Idee und Schwerpunkte des Vorhabens

Digitalisierung, sowohl in Wirtschaft, als auch Produktion beeinflusst auch alle tangierenden Bereiche wie etwa die logistische Infrastruktur. IoT-Technologie, intelligente Produkte, vernetzte Produktionsanlagen und Logistiksysteme sowie 5G-Übertragungsstandards ebnen den Weg weg von der Massenproduktion eines Artikels hin zu individuellen, kundenspezifischen Produkten, bis schließlich zu einer Produktionslogistik mit der Losgröße 1, einer sogenannten

güterzentrierten Mikromobilität. Gegenwärtige Logistiksysteme sind jedoch für solch eine Entwicklung nicht ausgelegt, weshalb der Transport von kleinen Losgrößen sehr teuer und unflexibel ist. Selbst bei der Ansammlung kleiner Losgrößen zu größeren Einheiten wird der Warentransport aus Sicht des Zeitfaktors sehr teuer. Derzeit beträgt der Anteil an LKW-Leerfahrten und Minimal-Ladungen deutlich über 37,1 %, was den Bedarf von individuellen und auf kleine Losgrößen adaptierten Logistiksystemen darlegt [1]. Neue Technologien wie autonome, fahrerlose Transportsysteme sowie Transportdrohnen (bspw. Emqopter) decken den logistischen Bedarf der industriellen Entwicklung 4.0 jedoch aktuell nur in einem stark abgegrenzten Rahmen und in spezifischen Einzelfällen ab. Durch den »unvernetzten« Einsatz bleibt das volle Potenzial ungenutzt.

Hier besteht jedoch ein Bedarf, denn die Unternehmen sehen sich zunehmend nicht mehr nur an ihre eigenen Hallengrenzen gebunden, sondern arbeiten immer mehr im kooperativen Verbund, teilen Ressourcen und organisieren ihre Supply-Chain über die Unternehmensgrenzen hinweg. Diese Form der Sharing Economy, ein möglicher zukünftiger Handel von Stillstandszeiten, stellt Unternehmen auch vor Herausforderungen in der logistischen Organisation, wenn es um das Teilen von physischen Gütern in kleinen Losgrößen geht.

Die Auslegung von logistischen Systemen erfolgt dabei meist nach dem Prinzip des minimalsten Aufwandes. Logistische Auftragsspitzen unternehmensübergreifend auszugleichen wird aus Kostengründen in der Praxis selten berücksichtigt.

Dabei existieren bspw. die folgenden Bedürfnisse: Im Audi-Werk Ingolstadt ist der intralogistische Lieferverkehr so stark ausgelastet, dass nach Möglichkeiten gesucht wird, den größtenteils ungenutzten Luftraum dafür zu verwenden. Besonders in Szenarien wie die der »Notfallbestellung« macht sich laut Audi ein Multicopter bezahlt. So können hier die Zeiten von 15 Minuten mittels FTS auf 5 Minuten gesenkt werden. Besonders im Produktionsumfeld mit kostenintensiven Ausfallzeiten sind Einsparpotenziale vorhanden [2].

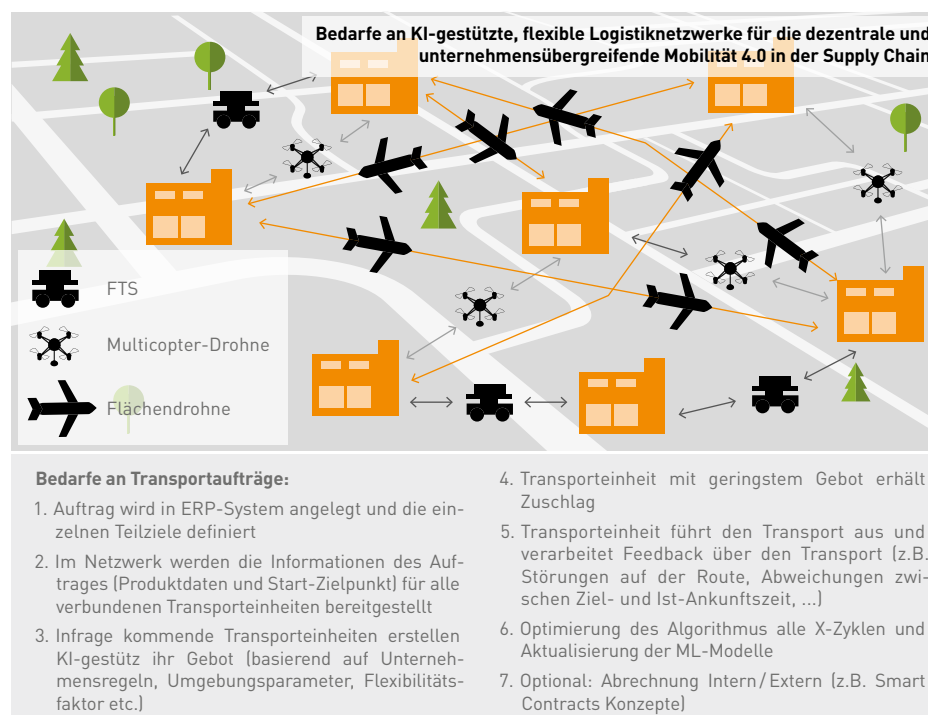


Abbildung 1: Beispielszenario zukünftiger Logistiknetzwerkbedarfe

Es besteht daher der Bedarf, die jeweiligen Vorteile der Technologien FTS, Multicopter und Flächendrohne bestmöglich über eine intelligente Gesamtlösung für Unternehmen und Logistikzentren zu vereinen.

1.3 Zielsetzung

Ziel des Projektes FlowPro ist es, innerhalb von 5G-Testumgebungen (Testfeld der Stadt Merzig & Siemens) ein intelligentes Logistiknetzwerk mit boden- und luftgebundenen autonomen Transporteinheiten zu pilotieren, welches einer unternehmensübergreifenden und auf kleine Losgrößen ausgerichteten Produktion und Mikromobilität von Waren in der Supply Chain der Zukunft gerecht wird. Erreicht wird dies über die nachfolgend dargestellte Systemarchitektur in Abbildung 2.

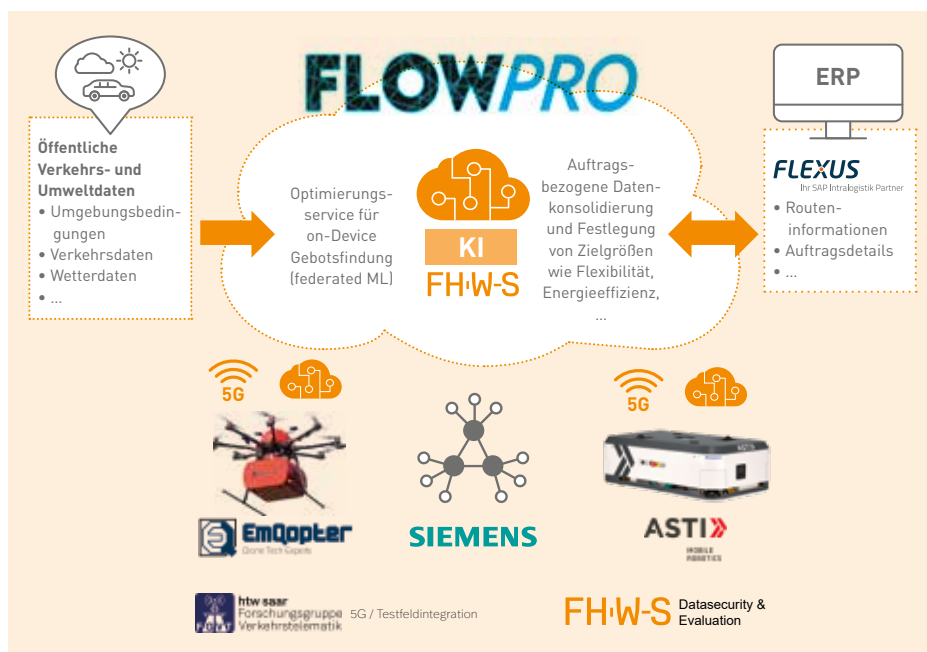


Abbildung 2: FlowPro-Systemarchitektur

Das FlowPro-System führt auftragspezifische und externe Datenquellen zusammen, bietet mittels künstlicher Intelligenz für alle Teilnehmenden Optimierungen an und kommuniziert mit diesen über ein plattformunabhängiges, dezentrales Framework. Angebunden werden drei autonome, für ein urbanes Umfeld taugliche, Systeme.

Erreicht wird dies durch eine Struktur mit den folgenden Kernelementen:

- Die Transporteinheiten sind über ein Application-Layer Ad-Hoc Netzwerk verbunden, welches neue Teilnehmende dynamisch zu dem bestehenden System integrieren kann.
- Zur dezentralen Organisation der Transporteinheiten untereinander kommt ein KI-basiertes Auktionsverfahren zum Einsatz. Die Gebote dienen primär der Zuteilung von Aufträgen zwischen den potenziellen Transporteinheiten, sind aber gleichzeitig Grundlage für die finanzielle Abrechnung (auch unternehmensübergreifend).
- Die KI-Services der Transporteinheiten dienen als Clients innerhalb eines federated Learning-Systems [3]. Dies ermöglicht eine stetige Optimierung der KI auf den verteilten Transporteinheiten ohne einen Austausch sensibler Daten. Es werden nur die lokalen ML-Modelle optimiert und stetig übergreifend aktualisiert.
- Das FlowPro-System optimiert für jeden Transportauftrag basierend auf spezifischen

Zielgrößen einen Satz individueller Faktoren. Diese können zum Beispiel Einfluss auf die Flexibilität oder Energieeffizienz einer Supply Chain, basierend auf Vorgaben der Unternehmensstrategie und Auftragslage sowie externen Daten (inkl. öffentlich zugänglichen Quellen) wie Wetterbedingungen, Verkehrslagen, Erfahrungswerten vorangegangener Aufträge, haben. Produktionsumgebungen mit großer Planbarkeit und geringer Variantenvielfalt benötigen statt einer hohen Flexibilität eine höhere Energieeffizienz. Bei kleinen Losgrößen mit unterschiedlichsten Produkten ermöglicht es bspw. eine hohe Flexibilität, um auf kurzfristige Änderungen oder Verzögerungen während einer Just-in-sequence-Produktion reagieren zu können.

2 EINORDNUNG IN DEN KONTEXT DER HOCHSCHULE

Im Rahmen des Projektes FlowPro werden zahlreiche Kompetenzen der Hochschule genutzt und weiter ausgebaut. Das Projektziel der Hochschule besteht in der Entwicklung eines sicheren, dezentralen, selbstorganisierten KI-Systems, welches einen automatischen, adaptiven Auktionsprozess im Logistiksystem realisiert. Das Lernen des Auktionsmodells [4] wird dabei mittels federated learning [3] aus heterogenen Streamingdaten [5] [6] [7] [8] realisiert. Ein weiterer Punkt ist die Integration von Sicherheit und Betriebsicherheit in allen Systemkomponenten, mit dem Ziel der Entwicklung neuer flexibler, dezentraler KI-unterstützter Ansätze der Angriffserkennung, die einer inhomogenen dynamischen Supply Chain angepasst sind.

Mit dem Kompetenzzentrum für Künstliche Intelligenz und Robotik (CAIRO – Center for Artificial Intelligence and Robotics) und dem Kompetenzzentrum industrial IoT, Security, kognitive-CPS/UAV bringt die die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt ihre Kompetenzen in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Security ein. Basis hierfür bilden einige Veröffentlichungen in diesen Bereichen [5] [6] [8] [9] [10].

3 BETEILIGUNG DER FHWS AN FLOWPRO

Das Institut Digital Engineering übernimmt die Führung in zwei Abschnitten des Projekts. Diese sind Security und Künstliche Intelligenz und werden folgend näher erläutert.

3.1 Security

Die FHWS integriert Security in das Gesamtsystem, entwickelt eine Plattform zur dezentralen Erkennung und Ergreifung von Maßnahmen bei IT-Angriffen im Kontext von Industrie/Mobilität 4.0, und definiert die Kommunikationsarchitektur.

Hieraus ergeben sich die folgenden Aufgaben:

- Security by Design: Entwicklung, Durchführung von Angriffen, Security-Evaluation, Architektur-Review & -Verbesserung
- Security by Operations: Entwicklung und Integration einer Security-Plattform mit dezentraler, verteilter Angriffs-Erkennung und -Behandlung für Mobilität 4.0 Szenarien
- Entwicklung von Kommunikationsarchitektur für Gesamtsystem

Als erwartetes Ergebnis ist das entwickelte Logistik-Netzwerk resilient gegenüber zu erwartenden Cyberangriffen, und kann somit auch in der Praxis eingesetzt werden. Zusätzlich existiert eine flexible, modulare, offene Kommunikationsarchitektur als systemübergreifendes Fundament für kommunizierende Services.

3.2 Künstliche Intelligenz

Zum einen entwickelt die FHWS maschinelle Lernverfahren, Algorithmen und neuronale Netzwerke zur stetigen echtzeitnahen Überwachung, autonomen Entscheidungsfindung (Bidding-System) und Optimierung der Handlungsstrategien des dezentralen, heterogenen und flexiblen Flottenverbundes und dessen Zielen.

Zum anderen wird die gesamte Cloud-Infrastruktur entwickelt und aufgesetzt, die als KI-Serviceprovider des Flottennetzwerks dienen wird.

Basierend auf den Anforderungen aus vorherigen Arbeiten im Projekt ergeben sich folgende Aufgabenstellungen:

- Ableitung und Definition lokaler und globaler Ziel- und Strategie KPIs
- Spezifikation, Bewertung und Anbindung der nötigen Inputkriterien (öffentliche und nichtöffentliche Daten)
- Aufsetzen der zentralen Input- und Analysedatenbank
- Evaluation geeigneter Machine Learning Algorithmen & Entwicklung neuronaler Netzwerke zur KI-Optimierung
- Entwicklung und Implementierung der lokalen (Biddingsystem) und globalen (Flexibilitätsfaktor) KI-Strategie (Strategiesynthese)
- Evaluierung und Auswahl der einzelnen Cloud-Komponenten
- Einbindung der einzelnen KI-Bausteine in die Infrastruktur
- Definition & Entwicklung des Netzwerk- sowie des zentralen betriebswirtschaftlichen Monitorings im ERP-System

Nach Durchführung der Aufgaben stehen KI-Services die über eine auf Security, Performance und Scalability ausgerichtete Cloud-Service-Infrastruktur lokal als intelligentes Auktionssystem on Device und global als Flexibilitätsfaktor on Cloud verfügbar sind. Des Weiteren werden Entitäten befähigt, sich über einen KI-federated-learning Ansatz als Gesamtsystem zu optimieren.

Darüber hinaus wird es ermöglicht, alle Inputparameter aus dem ERS-System und externen Umweltdaten in den Entscheidungsprozess einfließen zu lassen.

4 AKTUELLER STAND DES PROJEKTS

4.1 Definition der Anwendungsszenarien und Use Cases

Die Anwendungsszenarien und Use Cases wurden mit den Projektpartnern entwickelt. Diese wurden in mehreren Zyklen erarbeitet und regelmäßig in Workshops diskutiert und verfeinert. Hierbei fokussierten wir uns besonders auf die IT-Sicherheit und den Datenschutz. Im Rahmen dessen war es notwendig aktuelle Standards und Richtlinien auszuwerten und auf die Use Cases anzuwenden. Neben den Sicherheitsaspekten, identifizierte und spezifizierte die FHWS ebenfalls Anwendungsszenarien, welche durch KI unterstützt werden können, wie z. B. das Auktionsverfahren. Als Ergebnis stehen die Use Cases welche mit Hilfe von FlowPro umgesetzt werden.

4.2 Ableitung von Anforderungen und Zielen aus den Anwendungsfällen hinsichtlich IT-Infrastruktur, IT-Sicherheit, Kommunikationsarchitektur und die KI-seitigen Strategien

Aus den erarbeiteten Use Cases hat das Konsortium in mehreren Arbeitszyklen und Workshops die Anforderungen und Ziele des Systems erarbeitet. Mit den bei der Erarbeitung der Use Cases

erlangten Kompetenzen konnte auch bei der Ableitung von Anforderungen und Zielen unser Fokus auf die IT-Sicherheit gelegt werden. Ergebnis ist ein Anforderungskatalog mit 113 Anforderungen, welcher natürlich im Laufe des Projekts noch erweitert und weiter spezifiziert wird.

4.3 Anforderungen an Geschäfts- und Finanzierungsmodelle eines unternehmensübergreifenden Logistiksystems

Parallel zu der Ableitung der Anforderungen aus den Anwendungsfällen wurde das Geschäfts- und Finanzierungsmodell erarbeitet. Hierbei haben wir unterstützend agiert und dem Projektpartner alternative Betrachtungspunkte und Vorschläge geliefert und unseren Fokus auf Security und KI nicht verloren.

4.4 IT-Security für dezentrale IoT-Plattform

Bei der Erstellung der Use Cases und Anforderungen sind regelmäßig Aspekte der IT-Security aufgetaucht. Um diese zu bearbeiten wurde ein Konzept zur modularen Demonstration der verwendeten Technologien erarbeitet. Folgend können Evaluationen der einzelnen Komponenten durchgeführt werden. Als Ergebnis steht ein Konzept für eine Demonstration, welche die Basis zur Entwicklung der Angriff- und Security-Plattform darstellt. Dieses Demonstrationssystem stellt eine funktionstüchtige Miniatur eines FlowPro-Systems dar, so dass an ihr ausgiebige Sicherheits- und Funktionstests durchgeführt werden können.

4.5 Dezentrales maschinelles Lernen im IoT-Kontext

Es wurden erste Forschungsarbeiten in die Wege geleitet, um geeignete Auktionsmechaniken für die angedachte Versteigerung der Aufträge zu evaluieren. Hierzu werden sowohl die Themen »Differential Privacy« als auch die Minimierung der Kommunikationskosten berücksichtigt. Derzeit wird ein Prototyp in Python entwickelt, der es ermöglicht, den Angebotsmechanismus dezentral zu integrieren [11]. Hierzu wird das ebenfalls in Python geschriebene Federated Learning Framework Flower [12] genutzt. Zusätzlich wurden bereits erste Merkmale identifiziert, welche für die Auktion entscheidend sein werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] o. A., »Leerfahrten in der Logistik«, verfügbar in: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscher-Lastkraftfahrzeuge/Verkehrsaufkommen/vd1_z_leer_1995_2019.html?nn=652412.
- [2] o. A., »Drohnen in der Intralogistik: Geflügelter Lieferservice«, verfügbar in: <https://www.produktion.de/trends-innovationen/drohnen-in-die-intralogistik-gefluegelter-lieferservice-108.html>.
- [3] Bonawitz, K.; Eichner, H.; Grieskamp, W.; Huba, D.; Ingerman, A.; Ivanov, V.; Roselander, J. (2019), »Towards federated learning at scale: System design«, arXiv preprint arXiv:1902.01046
- [4] Jin, J.; Song, C.; Li, H.; Gai, K.; Wang, J.; Zhang, W. (2018), »Real-time bidding with multi-agent reinforcement learning in display advertising«, Proceedings of the 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, S. 2193–2201.

- [5] Heusinger, M.; Raab, C.; Schleif, F.-M. (2020), »Passive concept drift handling via variations of learning vector quantization«, Neural Computing and Applications S. 1–12.
- [6] Raab, C.; Heusinger, M.; Schleif, F.-M. (2020), »Reactive Soft Prototype Computing for Concept Drift Streams«, Neurocomputing, verfügbar in: <https://arxiv.org/abs/2007.05432>
- [7] Raab C.; Schleif, F.-M. (2020), »Low-Rank Subspace Override for Unsupervised Domain Adaptation«, IEEE WCCI / IJCNN (submitted)
- [8] Zühlke, D.; Schleif, F.-M.; Geweniger, T.; Haase, S.; Villmann, T. (2010), »Learning vector quantization for heterogeneous structured data«, ESANN 2010, verfügbar in: https://www.researchgate.net/publication/221165319_Learning_vector_quantization_for_heterogeneous_structured_data
- [9] Hösch, L.; Arndt, M.; Fichtel, L.; Frühwald, A.-M.; Schreibmann, V.; Schmiedl H.; Schütz, A.; Bachmeir, C. (2020), »Towards a comprehensive attack framework against commercial and private UAV«, Proceedings of the International Conference on Applied Informatics Imagination, Creativity, Design, Development, ICDD 2020
- [10] Fichtel, L.; Frühwald, A.-M.; Hösch, L.; Schreibmann, V.; Bachmeir, C.; Bohlander, F. (2020), »Tree Localization and Monitoring on Autonomous Drones Employing Deep Learning«, Proceedings of the 29th conference of FRUCT association
- [11] Zeng, R.; Zhang, S.; Wang, J.; Chu, X. (2020), »More: An Incentive Scheme of Multidimensional Auction for Federated Learning in MEC«, 2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), S. 278–288.
- [12] Beutel, D. J.; Topal, T.; Mathur, A.; Qiu, X.; Parcollet, T.; de Gusmao, P. P.; Lane, N. D. (2020), »Flower: A friendly federated learning research framework«. arXiv preprint arXiv:2007.14390

PlanAR – Planen mit Augmented Reality (AR) – Einsatz von AR bei Anlagenplanung und Materialflussoptimierung

Markus Wilhelm, Maximilian Rosilius, Volker Bräutigam

Short Facts

Förderträger: Bayerisches Verbundforschungsprogramm IUK-1811-0022

Projektlaufzeit: 01.01.2020 – 31.03.2023

1 AUSGANGSLAGE

Die Weiterentwicklung von Endgeräten wie z.B. von NReal oder die Microsoft HoloLens 2 im Bereich Augmented Reality (AR) führt zu einem erweiterten Nutzungsfeld von AR außerhalb klassischer Entwicklungs- und »Gaming«-Umgebungen. Eine der sich intensivierenden Nutzungsoptionen ist der wertorientierte Einsatz im industriellen Umfeld. In diesem Bereich bedarf es noch einer weitreichenden Identifizierung und Evaluierung der Einsatzpotenziale und des -nutzens [1]. Naheliegender Vorteil der Technologie ist die Anwendung in integrativen Planungsprozessen z.B. in der Anlagenplanung. Durch die Visualisierung von virtuellen Inhalten in einer realen Umgebung, können zukünftige Veränderungen auf mögliche Störfaktoren bereits vor Umsetzung detailliert geprüft und optimiert werden. Dies führt zu Zeit- und Kostenersparnis in Planungsphasen, da nachträgliche Änderungen signifikant kostenintensiver und komplexer sind. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit ist die Simulation von Fertigungsprozessen und deren Auswirkungen. Die Simulation kann insbesondere bei der Identifikation unternehmensunabhängiger Probleme helfen. Auch kann der zeitliche Faktor, der jedem Prozess zugrunde liegt, eingebettet in einem virtuell erweiterten Realszenario geprüft werden. Als Beispiel kann hier die Störungsbeseitigung in industriellen Fertigungsprozessen dienen, welche meistens einer notwendigen engen Taktung unterliegen. Störungen sind häufig durch die direkte Umwelt oder Probleme in Arbeitsabläufen begründet. An diesem Punkt können die möglichen Optimierungsoptionen unter den gegebenen Bedingungen eine erste Validierung erfahren, ohne direkten Eingriff in laufende Prozesse.

Diese Anwendungsmöglichkeiten gilt es zu untersuchen und in eine gebrauchstaugliche Lösung für den Einsatz im wertschöpfenden Bereichen zu überführen. Ziel dabei ist es die noch hypothetischen Potenziale zu bewerten und in einsetzbare Applikationen zu transformieren, die den Anforderungen in einer industriellen Umgebung standhalten. Um eine nutzerorientierte Forschung zu gewährleisten, ist es notwendig den Bedarf der Industrie zu erfassen. An diesem Punkt setzt das Vorhaben PlanAR an und untersucht die interdisziplinären Auswirkungen der Anwendungsmöglichkeiten und Applikationen bei industrienahen Nutzungsanforderungen.

2 PROJEKT PLanAR

Aufbauend auf einem Konsortium aus Industrieunternehmen, mittelständischen Fertigungsbetrieben, IT-Firmen und Hochschulen, werden die eingangs beschriebenen Möglichkeiten der Technologie im Rahmen des Projekts PlanAR untersucht. Startpunkt innerhalb des Projekts sind die Erfassung der Anforderungen aus der Wirtschaft und deren Abgleich mit dem Stand der Forschung und Technik. Aus diesen Erkenntnissen wird eine AR-Plattform entwickelt, die es ermöglicht, eine virtuelle Planung und Inbetriebnahme von Produktionsstätten

im realen Umfeld zu ermöglichen. Die Plattform soll auf einer breiten Vielfalt von Endgeräten eingesetzt werden können. Für den ersten Prototyp wurde die Microsoft HoloLens 2 mit dem Mixed Reality Tool Kit ausgewählt. Basis für eine mögliche »plug&play« Applikationsumgebung ist die offene Softwarearchitektur, d.h. für spätere Anbindung an plattformunabhängige Systeme durch externe Nutzer. Beispielhaft hierfür ist das Verorten einer neuen geplanten Anlage in ein bereits bestehendes laufendes Fertigungsumfeld. Mittels dieser Entwicklung lassen sich mögliche Fehler bei der Realisierung frühzeitig vermeiden, Redundanzen reduzieren und Abstimmungen der Beteiligten optimieren (Abbildung 1). Ziel dieses Forschungsbereichs ist es Maschinen bis ins Detail virtuell zu platzieren und die Einbindung in das Gesamtsystem überprüfen zu können. So sollen beispielsweise Anschlussmöglichkeiten oder bauliche Hindernisse vorab erkannt und entsprechend angepasst werden können.

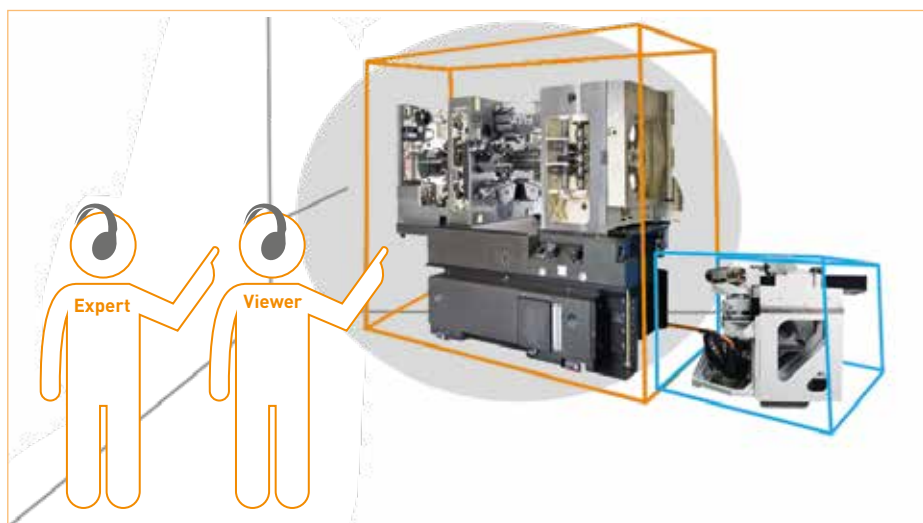


Abbildung 1: Schematische Darstellung zweier Nutzungsgruppen bei der Präsentation immersiver erweiterter Anlagen

Zusätzlich sollen mittels der PlanAR-Plattform Informationen sowohl bei virtuellen als auch bei realen Anlagen annotiert werden können und mit entsprechender ERP-Software in Echtzeit abgeglichen werden. Um reale Anlagen in ein virtuelles Umfeld integrieren zu können, werden Erfassungsmöglichkeiten zur Digitalisierung der Anlagen mittels Scantechnologie untersucht. Durch diese technischen Entwicklungen und Forschungen sollen der Übergang zwischen virtueller Planung und realem Umfeld fließend und ohne Informationsverlust ineinander übergehen. Dieser Ansatz kann auch in sogenannten »Greenfield« (kompletter Neuaufbau) oder auch in »Brownfield« (punktuelle Neuplanung im bestehenden Umfeld) bidirektional zwischen virtuellen und physischen Anwendungsbeispielen von Visualisierungselementen genutzt werden. Ein weiterer Ansatz ist die Optimierung von Materialflüssen und die Wertstromoptimierung. Um dies zu ermöglichen, sollen erfasste Daten in einen virtuellen Planungsprozess überführt werden. Eine Manipulation dieser Daten führt zu einer direkten Anpassung der Simulation, welche am Ort des Geschehens betrachtet und angepasst werden kann und die Informationen ggfs. in die Layoutmodellierung zurückgeführt werden. Zusätzlich zu diesen Kernthemen der Entwicklung bedarf es weiteren Untersuchungen, insbesondere über die Gestaltung und Wahrnehmung von AR-Applikationen. In Kooperation mit dem Lehrstuhl für Psychologie 1 der Julius-Maximilians-Universität Würzburg werden die menschlichen Faktoren innerhalb des Projekts untersucht. Dazu werden die verschiedenen Sinneswahrnehmungen des Menschen bei der Nutzung von AR betrachtet. Daraus ableitend werden Erkenntnisse gewonnen, welche Auswirkungen die AR-Nutzung auf den Menschen hat, aber auch wie AR-Applikati-

onen wahrgenommen werden. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Gestaltungsrichtlinien, insbesondere mit Blick auf die speziellen Umgebungsbedingungen, in der Industrie ableiten. Nachfolgend sollen erste Erkenntnisse aus diesem Bereich vorgestellt werden.

3 UNTERSUCHUNG ZUR SICHTBARKEIT VON AR-ANWENDUNGEN

Die Nutzung der AR-Technologie im produktiven Umfeld hängt entscheidend von der Akzeptanz der Anwendenden ab. Sollte der benötigte Aufwand bei Nutzenden zu hoch oder die Darstellung der Applikationen ungenügend sein, wird dies eine skeptische bis ablehnende Haltung beim Nutzenden erzeugen, wodurch eine Einführung mit hohen Widerständen verbunden ist oder nahezu unmöglich wird. Es bedarf also einer Gestaltung der Anwendung die sowohl übersichtlich, lesbar und intuitiv zu bedienen ist. Dafür notwendig sind Untersuchungen, welche zu Richtlinien führen nach denen eine Anwendung für die Nutzenden angenehm gestaltet werden kann. Die erste Untersuchung innerhalb des Projekt fokussiert sich insbesondere auf die Sichtbarkeit bei verschiedenen Gestaltungsweisen. Bisherige Untersuchungen identifizierten verschiedene Faktoren [2], welche einen Einfluss auf die Sichtbarkeit bzw. Lesbarkeit von Darstellungen besitzen. Es zeigt sich, dass Hinterlegungen von Texten und Abbildungen mit virtuellen Hintergründen eine hohe Verbesserung der Sichtbarkeit liefern – insbesondere dann, wenn die virtuell eingeblendeten Inhalte auf einem weißen virtuellen Hintergrund gezeigt werden. Zusätzlich besitzt die Auswahl von Schriftarten, deren Gestaltung und Darstellung einen hohen Einfluss auf die Lesbarkeit. Diese kann hierbei sowohl positiv, wie auch negativ beeinflusst werden [3] [4] [5] [6] [7]. Entsprechend der Literatur ist ein weiterer Faktor die Ausleuchtung der Umgebung. Sowohl eine zu hohe Beleuchtungsstärke als auch eine zu schwache führen zu einer negativen Beeinflussung der Sichtbarkeit [8]. Ein weiterer Punkt ist, dass die realen Hintergründe über die die immersiven Abbildungen gelegt werden, kaum Einfluss auf die Sichtbarkeit haben [9]. Aufgrund der Ausrichtung des Projekts PlanAR, sollen entsprechende Untersuchungen im industriellen Kontext eingebettet sein. Der Versuch findet deshalb unter industrienahen Bedingungen statt, um die Aussagekraft für das Projekt zu gewährleisten. Zusätzlich wird mit der Microsoft HoloLens 2 neueste, marktreife AR-Technologie verwendet. Für die Untersuchungen werden weiße Ringe (Landoltringe) auf verschiedenen industrietypischen Untergründen dargestellt. Die Ringe werden entsprechend dem Landolt-Sehtest mit einer Öffnung abgebildet, deren Position sich während des Ablaufs ändert. Die Probanden müssen während des Versuchs die Position der Öffnung erkennen und benennen.



Abbildung 2: Darstellung der Landoltringe auf den verschiedenen genutzten Oberflächen (Aluminium, Beton, Fliese)



Abbildung 3: Versuchsaufbau mit industrienahen Hintergründen

Die wichtigsten Kriterien für die Prüfenden sind sowohl die Antwortzeit, als auch die Korrektheit. Die Ringe werden nacheinander über die verschiedenen Untergründe gelegt, dabei werden in den Durchgängen sowohl die Beleuchtungsstärke, die Transparenz der Ringe und die virtuelle Hinterlegung der Ringe variiert. Die Beleuchtungsstärke und die Farbtemperatur werden anhand der Normen für industrielle Arbeitsplätze für verschiedene Tätigkeiten ausgewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Verwendung von virtuellen Hintergründen, insbesondere bei kleinen, textuellen Inhalten positiv auf die Sichtbarkeit von immersiven Visualisierungen auswirkt (Abbildung 4). Bei der Verwendung von virtuellen Hintergründen empfiehlt es sich, eine niedrige Beleuchtungsstärke und einen mittleren Grauwert zu wählen

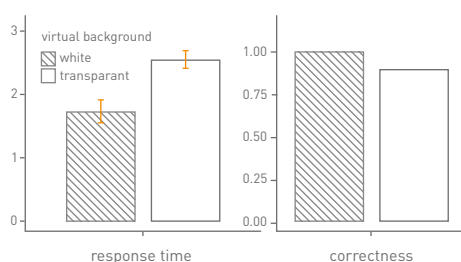


Abbildung 4: Mittelwert der Antwortzeiten und Korrektheit mit den weißen und transparenten Hintergründen

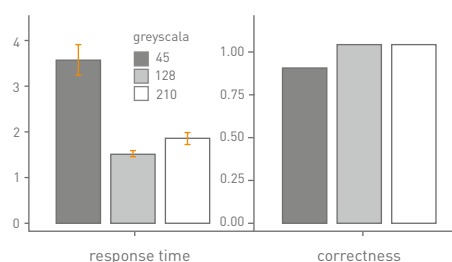


Abbildung 5: Mittelwert der Antwortzeiten und Korrektheit bei den geprüften Graustufen

(Abbildung 5, 6). Wenn ein transparenter virtueller Hintergrund verwendet wird, sollte ebenfalls eine niedrige Beleuchtungsstärke und ein mittlerer Graustufenwert gewählt werden (Abbildung 7). Um Industriearbeitsplätze für immersive Anwendungen zu optimieren, sollte eine diffuse, gedämpfte Umgebungsbeleuchtungsstärke eingestellt werden. Wenn aufgrund konkurrierender Anforderungen eine hohe Umgebungsbeleuchtungsstärke erforderlich ist, werden für immersive Anwendungsdesigns dennoch ein mittlerer Graustufenwert empfohlen. Für Anwendungsdesigns mit Inhalten, die tendenziell hohe Graustufen aufweisen, sollte ein transparenter virtueller Hintergrund und eine niedrige Umgebungsbeleuchtungsstärke vorgewählt werden.

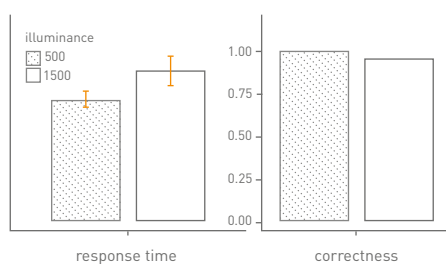


Abbildung 6: Mittelwert der Antwortzeiten und Korrektheit bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

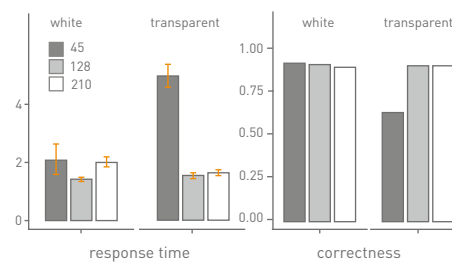


Abbildung 7: Mittelwert der Antwortzeiten und Korrektheit der Antworten bei Kombination von Graustufen und virtuellen Hintergründen

Die Ergebnisse der im vorhergehenden Abschnitt ersten Untersuchung decken sich mit bisherigen Erkenntnissen aus der Literatur [8]. Aus diesem Versuch kann eine Gestaltungsrichtlinie für den industriellen Einsatz von AR Anwendungen abgeleitet werden. Aufgrund dessen, dass die Microsoft HoloLens 2 für den Versuch genutzt wurde, kann die Aktualität der Ergebnisse und die Anwendbarkeit bei neuester marktreifer Technologie gewährleistet werden.

Hauptaugenmerk der weiteren Forschung sind verschiedene Anwendungsfälle wie die Layout-, Wertstrom- und Anlagenplanung. Teilgebiete in diesem Bereich, wie Inbetriebnahmen, Kollisions- und Konsistenzprüfungen, sowie ortsgebundene Dokumentationsmöglichkeiten sind hierbei inbegriffen. Des Weiteren soll eine gebrauchstaugliche Integration von Maschinenezeitdaten für Nutzende erfolgen. Ziel ist es nicht, dies einzelnen Nutzenden zu ermöglichen, sondern Gruppen, verschiedene AR-Szenarien und mögliche Handlungsoptionen zu weisen zu können.

Aktuell und zukünftig werden zusätzlich zu den technischen Forschungsschwerpunkten weitere Untersuchungen im Kontext der Ausgestaltung von AR-Applikationen durchgeführt. Beispielsweise finden Untersuchungen zur Farbauswahl statt, aber es werden auch Steuerungsmöglichkeiten, wie die Nutzung der Gedanken (Human-Brain-Interface) oder Spracheingabe geprüft und ausgewertet. Auch wird die anwendungsbezogene Forschung wie industriell einsetzbare AR-Messanwendungen Teil der Forschung sein. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt wird der Faktor »Mensch« in einer Mixed Reality Umgebung sein. Wichtige Fragen sind exemplarisch – wie der Mensch die immersive Erweiterung der realen Umwelt erlebt und welchen Einfluss ein steigender Realismusgrad der Erweiterung der Realität auf Nutzende hat.

Im Zusammenspiel mit den technischen Entwicklungen werden zudem Untersuchungen zu möglichen Frustrationsfaktoren bei Nutzenden geprüft, die zu einem Scheitern bei der Durchsetzung von Anwendungen führen würden. Ziel ist die Ausgabe von Richtlinien und Empfehlungen für die Nutzung von AR mit Schwerpunkt auf die Industrie und das produzierende Gewerbe zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Forschungsbereiche fließen dann direkt in die Forschung, Entwicklung und Gestaltung der integrativen Plattform PlanAR ein. Abschließend zwei exemplarische Abbildungen (8,9), in denen mittels PlanAR-Plattform eine virtuelle Produktionsszenerie im Raum erzeugt wird.



Abbildung 8: Virtuelle Produktionsszenerie in realer Umgebung



Abbildung 9: Aufstellen und Betrachten einer virtuellen Maschine in realer Umgebung

5 LITERATUR

- [1] Bräutigam, V., Pauli, P., Wienrich, C., Rosilius, M., Wilhelm, M., von Eitzen, I., Pfeuffer, K.; Lotzen, M. (2020), »Einsatz immersiver Assistenzsysteme bei operativen (Planungs-) Prozessen«, Automation Software Engineering Kongress, 18. Nov. 2020
- [2] Erickson, A.; Kim, K.; Bruder, G.; Welch, G. F. (2020), »A Review of Visual Perception Research in Optical See-Through Augmented Reality«, International Conference on Artificial Reality and Telexistence, S. 1–8.
- [3] Gabbard, J. L.; Swan, J. E.; Hix, D. (2006), »The Effects of Text Drawing Styles, Background Textures, and Natural Lighting on Text Legibility in Outdoor Augmented Reality«, Presence: Teleoperators & Virtual Environments 15 (1), S. 16–32.
- [4] Litwinowicz, P.; Williams, L. (1994), »Animating images with drawings«, in Glassner, A. (Hrsg.), Proceedings of SIGGRAPH '94 (Orlando, Florida, July 24–29, 1994), Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, S. 409–412.
- [5] Gabbard, J. L.; Swan, J. E. (2008), »Usability engineering for augmented reality: employing user-based studies to inform design«, IEEE transactions on visualization and computer graphics 14 (3), S. 513–525.
- [6] Fiorentino, M.; Debernardis, S.; Uva, A. E.; Monno, G. (2013), »Augmented reality text style readability with see-through head-mounted displays in industrial context«, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 22(2), S. 171–190.
- [7] Debernardis, S.; Fiorentino, M.; Gattullo, M.; Monno, G.; Uva, A. E. (2014), »Text readability in head-worn displays: color and style optimization in video versus optical see-through devices«, IEEE transactions on visualization and computer graphics 20 (1), S. 125–139.
- [8] Gattullo, M.; Uva, A. E.; Fiorentino, M.; Monno, G. (2015), »Effect of Text Outline and Contrast Polarity on AR Text Readability in Industrial Lighting« IEEE transactions on visualization and computer graphics 21 (5), S. 638–651.
- [9] Satkowski, M.; Dachselt, R. (2021), »Investigating the Impact of Real-World Environments on the Perception of 2D Visualizations in Augmented Reality«, in Kitamura, Y., Quigley, A.; Isbister, K.; Igarashi, T.; Bjorn P.; und Drucker, S. (Hrsg.), Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Yokohama, New York, S. 1–15.

Das Projekt KI-Inspektionsdrohne

Christian Bachmeir

Short Facts

Projektlaufzeit: 01.01.2018 – 31.12.2021

Fördersumme: 623.000 €

1 KURZZUSAMMENFASSUNG UND PROJEKTZIEL

Das Verbundvorhaben KI-Inspektionsdrohne, im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms V [1], hat als Ziel Maintenance-, Repair- und Overhaul-(MRO-)Prozesse in der Luftfahrtindustrie zu beschleunigen, und damit die MRO-Industrie noch wettbewerbsfähiger zu machen. Im Vorhaben wird ein sicheres System zur Schadensdetektion und -bewertung von äußeren Flugzeugstrukturen unter Berücksichtigung aktueller Instandhaltungs-Anforderungen der Luftfahrtbranche entwickelt. Der entwickelte Prototyp integriert vernetzte UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Flugsysteme), autonome Navigation und Schadensaufnahme und KI-gestützte Auswertung und stellt ein Decision Support System zur Verfügung bzw. fällt eigenständig Entscheidungen. Forschungsschwerpunkt der FHWS ist, bzw. Forschungsschwerpunkte sind industriespezifische Ende-zu-Ende-Security, KI, Safety, und insbesondere die Absicherung der mobilen, mit Cloud oder Edge verbundenen Einheiten gegen Cyberattacken.



Abbildung 1: Inspektionsdrohne mit Lidar und Kamera

2 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG

Der zu beschleunigende Prozess ist die Inspektion von Flugzeugen im Hangar. Diese findet meist in regelmäßigen Intervallen statt, kann aber auch anlassbezogen, beispielsweise nach einem Flug durch ein Gewitter, gewährleistet werden. Bisher wird diese Inspektion rein manuell durchgeführt: Fachpersonal schiebt verschiedene Aufbauten, Leitern und Gerüste zum Flugzeug, inspiziert gestützt durch Arbeitskarten das gesamte Flugzeug und meldet gefundene Schäden. Die Kosten eines stehenden Flugzeugs sind hoch, daher existiert hier ein Einsparpotenzial, das nun genutzt werden soll.

Ziel des Projektes ist es, eine Drohne zu entwickeln, die autonom um das Flugzeug im Hangar fliegen soll und das gesamte Flugzeug nach Schäden scannt. Diese gefundenen Schäden sollen dann KI-gestützt identifiziert und klassifiziert werden.

2.1 Konsortium

Das Projektkonsortium besteht aus der Lufthansa Technik, IBM und den drei wissenschaftlichen Partnern HSU, TUM und FHWS.

3 SCHWERPUNKTE DER FHWS

Ziel der FHWS ist die Verbesserung der IT-Sicherheit für das Gesamtsystem »KI-Inspektionsdrohne« gegenüber Cyber-Angriffen. Dazu wird ein Ende-zu-Ende-Security-Konzept entwickelt und auf das im Verbund entwickelte Gesamtsystem angepasst.

- Zunächst wird über einen Security-by-Design-Ansatz, angepasst an das Gesamtsystem, eine möglichst hohe Hürde für Cyber-Angriffe aufgebaut. Dies geschieht durch die Isolierung von Aviation- und Non-Aviation-Funktionalität.
- Die verbauten Sensoren werden auf Schwachstellen und Fehleranfälligkeit untersucht. Dazu werden Situationen analysiert, bei denen die Sensordaten unzuverlässig werden. Im Anschluss werden Mitigationsstrategien vorgeschlagen und umgesetzt.
- Die Kommunikation mit der Bodenstation wird nach Stand der Technik gesichert.
- Verbaute Komponenten werden nach Sicherheitskriterien bewertet und ausgewählt.
- Betriebs- und Notfallkonzepte werden zusammen mit den anderen Partnern entwickelt.
- Die KI wird sowohl im Hinblick auf Fehleranfälligkeit, als auch im Hinblick auf gezielte Angriffe analysiert. Insbesondere wird hier ein Augenmerk auf Adversarial Attacks gelegt.

4 EINORDNUNG IN DEN KONTEXT DER HOCHSCHULE

Im Rahmen des Projektes KI-Inspektionsdrohne werden zahlreiche Kompetenzen der Hochschule genutzt und weiter ausgebaut. Das Projektziel der Hochschule besteht in der Entwicklung eines sicheren, autonomen Drohnensystems, welches eine automatisierte KI-gestützte Inspektion im Rahmen eines MRO-Prozesses in einem besonders sensiblen Bereich (Flughafen) realisiert.

Mit dem Kompetenzzentrum für Künstliche Intelligenz und Robotik (CAIRO – Center for Artificial Intelligence and Robotics) und dem Kompetenzzentrum Industrial IoT, Security, kognitive-CPS/UAV bringt das IDEE die Kompetenzen in den Bereichen Künstliche Intelligenz und Security ein.

5 AKTUELLER STAND DES PROJEKTS

Das Projekt befindet sich auf der Zielgeraden. Im September 2021 wird eine Demonstration der Projektergebnisse stattfinden. Die entwickelte Drohne verfügt über ein SLAM-Modul, welches das Erkennen und vollständige Scannen eines stehenden Flugzeugs autonom ermöglicht. Die Daten werden auf eine Bodenstation transferiert und von einer KI analysiert.

Der Drohnen-Operator hat die Möglichkeit, mittels einer Fernsteuerung jederzeit einzugreifen und die Kontrolle über die Drohne zu übernehmen.

6 ÜBERBLICK ÜBER DIE ERGEBNISSE

6.1 Redundanzen

Für den Anwendungsfall wurde ein Hexacopter für geeignet erachtet, welcher den Verlust von 2 bis 3 Rotoren ausgleichen kann, je nachdem wo diese relativ zueinander positioniert sind.

Die Hardware wurde so gewählt, dass 3 IMUs (Inertial Measurements Units) redundant vorhanden sind. Eine davon reicht aus, stabil (potenziell mit leichtem Drift) eine Position zu halten. Zusätzlich verfügt die Drohne über einen um 360-Grad rotierenden Lidar (Infrarot-Laserbasierte Abstandsmessung), der nochmals geschwenkt wird, um den kleinen Öffnungswinkel in die dritte Achse auszugleichen. Die Daten des Lidars werden für ein SLAM-System verwendet, welches die Drohne nochmals unabhängig im Raum verortet und akkumulierende Fehler der anderen Systeme ausgleicht. Die Erkennung des Flugzeugs sowie die Pfadplanung erfolgen auf den Daten des Lidars. Als weiteres redundantes System kann der Operator angesehen werden, der über eine AR-Brille die Wahrnehmung und Einschätzung der Drohne angezeigt bekommt und auch eingreifen kann.

6.2 Kommunikationssicherheit

Die FHWS integrierte Security in das Gesamtsystem mittels eines Security-by-Design Ansatzes. Besonderer Fokus war hierbei die Redundanz von Sensorsystemen und die Beschränkung der Kommunikation der Computing Units mit der Bodenstation auf ein Minimum. Als Kommunikationsmethode wurde ein State-of-the-Art WLAN gewählt, das auch gegen Deauthentication-Angriffe geschützt ist. Zusätzlich wurde die Anforderung spezifiziert, dass ein menschlicher Operator jederzeit die Kontrolle übernehmen kann. Dazu wurden handelsübliche Fernbedienungen auf Security-Aspekte hin analysiert.

6.3 Analyse vorhandener Drohnenfernsteuerungen

Die Fernbedienungen DT 7 der Firma DJI [2] und die Taranis X9D [3] von FRSky wurden mittels Reverse-Engineering-Methoden auf Sicherheitsfeatures hin untersucht. Als erstes Ergebnis ist hier anzumerken, dass die Firmware der DT 7 nur verschlüsselt ausgeliefert wird. Auf der Fernbedienung selbst wird diese dann entschlüsselt und aufgespielt. Daher war es notwendig, das Protokoll über Black-Box-Tests und einen Logic-Analyzer zu rekonstruieren. Schlussendlich war es möglich, sich zwischen den Funkcontroller der DT7 und den Microcontroller zu schalten und das Protokoll soweit zu reverse engineerieren, dass ein Replay-Angriff geplant und demonstriert werden konnte [4]. Auch die Taranis X9D war anfällig gegen eine Übernahme der Kontrolle durch eine sorgfältig konstruierte Fernsteuerung.

FrSky wechselte jedoch während der Projektlaufzeit auf das neue ACCESS Protokoll, welches sich als deutlich resilienter erwies [5].



Abbildung 2: DT7 & Taranis X9D

7 BETRIEBSKONZEPT UND NOTFALLMAßNAHMEN

Es wurde ein Betriebskonzept nach den Zielen Security, Safety und Betriebssicherheit entwickelt. Auf der technischen Seite existieren eine Erkennung des Verlustes der Verbindung zur Bodenstation oder Ausfall anderer Systeme sowie entsprechende Notfallprozeduren (Inform Operator, Hold Position, Return to Home, Return to nearest free Space, Slow Descent).

Zusätzlich wurde ein Mindestabstand berechnet, den anderes Personal minimal zu einer Drohne halten muss, damit die Drohne oder ein Operator im Fehlerfall genügend Zeit zum Reagieren hat. Dieser Operator kann mittels einer Augmented-Reality-Brille die Wahrnehmung der Drohne nachvollziehen und so von der Drohne unerkannte Gefahren oder Probleme rechtzeitig erkennen und mittels einer Fernbedienung, die eine unabhängige Frequenz nutzt, jederzeit die Kontrolle über die Drohne übernehmen.

8 KI

Die entwickelte KI wurde mittels XAI(eXplainable AI)-Methoden analysiert und bewertet. Auch die Anfälligkeit gegen Adversarial Attacks wurde nachgewiesen. Vorschläge zur Verbesserung der Resilienz und Treffergenauigkeit der KI wurden eingebracht und werden gerade umgesetzt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] o. A. (2019), »Luftfahrtforschungsprogramm V«, DLR, verfügbar in: <https://www.dlr.de/pt-lf/desktopdefault.aspx/tabid-8363/>
- [2] o. A., »DT 7«, DJI, verfügbar in: <https://www.dji.com/de/dt7-dr16-rc-system/feature>
- [3] o. A., »Taranis X9D Plus«, FrSky, verfügbar in: <https://www.frsky-rc.com/product/taranis-x9d-plus-2/>
- [4] Namboodiri, V.; Aravinthan, V.; Mohapatra, S. N.; Karimi, B.; Jewell, W. (2013), »Toward a secure wireless-based home area network for metering in smart grids«, IEEE Systems Journal, 8(2), S. 509–520.
- [5] o. A., »ACCESS – Protokoll«, FrSky, verfügbar in: <https://www.frsky-rc.com/frsky-advanced-communication-control-elevated-spread-spectrum-access-protocol-release/>

Optimierung von Prozessen und Werkzeugmaschinen durch Bereitstellung, Analyse und Soll-Ist-Vergleich von Produktionsdaten

Jan Hofmann, Lars Eberhardt, Moritz Heusinger, Alexander Dobhan, Bastian Engelmann, Frank-Michael Schleif

Short Facts

Förderkennzeichen: OBerA-IKK 530/10
Projektlaufzeit: 01.04.2018 – 31.03.2021

1 EINLEITUNG

Mit einem Umsatz von 103 Milliarden Euro ist die Metallindustrie eine der größten deutschen Industriebranchen. Diese ist von volatilen Marktbedingungen und hohem Wettbewerb geprägt [1][2]. Kleine und mittlere produzierende Unternehmen (sogenannte KMU) sehen zunehmend gravierende Probleme bei der Einhaltung von Lieferterminen bedingt durch hohe Durchlaufzeiten in der Produktion [3]. Neben kaufmännischen Planungssystemen zur Erstellung von Produktionsplänen nutzen Unternehmen als Planungsgrundlage weiterhin Excel mit 31 % und manuelle Prozesse mit 10 % [4]. Gleiches gilt für Produktwechsellvorgänge auf Maschinen (Rüsten). Aufgrund dieser Aspekte ist es notwendig, die Rentabilität der KMU in der Metallindustrie zu steigern. Das wird durch effiziente Produktionsplanung und -steuerung, sowie der daraus resultierenden hohen Reaktionsfähigkeit und Flexibilität realisiert. Daher ist die Produktionsplanung auf die Markt- und Kundenanforderungen und die Anlageneffektivität auf ein hohes und stabiles Niveau auszurichten [5]. Hier bietet die Erfassung von Echtzeitdaten eine adäquate Reaktion auf die genannten Anforderungen. Ebenfalls liefert sie großes Potenzial für die Produktionsplanung und -steuerung, um die Disposition und Koordination von Arbeitsaufträgen zu optimieren. Weiterhin werden Störgrößen oder unvorhergesehene Planungsabweichungen reduziert [4][6]. Zusätzlich ist eine erhöhte Transparenz und Verbesserung menschlicher Entscheidungsprozesse notwendig. Dies kann durch datengetriebene Methoden unterstützt und sichergestellt werden [7].

Ein Ansatz zur Optimierung des Produktionsergebnisses kann durch die Erhöhung der Anlagenproduktivität selbst realisiert werden. Dazu muss die Verfügbarkeit der Anlagen durch Lokalisierung und Reduzierung von Verlusten erhöht werden. Die Umrüstungsprozesse tragen stark negativ zur Verfügbarkeit einer Produktion bei. Eine Steigerung der Gesamtanlageneffektivität (overall equipment effectiveness oder kurz OEE) in einer Fertigungsumgebung ist jedoch möglich durch eine intelligente Nutzung von Sensordaten mit Techniken wie z. B. Machine Learning (ML).

2 DAS FORSCHUNGSPROJEKT OBerA

Das Projekt OBerA (Optimierung von Prozessen und Werkzeugmaschinen durch Bereitstellung, Analyse und Soll-Ist-Vergleich von Produktionsdaten) wurde initiiert, um metallverarbeitende Unternehmen aus dem Mittelstand bei der Digitalisierung ihrer Systemlandschaft zu unterstützen. Das Projektkonsortium besteht aus fünf produktionsorientierten Unternehmen aus der Region Franken. Zusätzlich fungiert die Firma Siemens als Technologiepartner, die Firmen Heisab und Heitec als Spezialisten für Softwareentwicklung und Prozessverbesserung. Die Hochschule für angewandte Wissenschaften agiert als akademischer Partner. In der

folgenden Tabelle 1 werden die Produktionsfirmen und Partner des OberA-Projekts dargestellt. Diese sind kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) mit unterschiedlichen Produktionscharakteristika. Die Absicht war es, ein breites Spektrum von unterschiedlichen Unternehmen und somit exemplarisch für die Region Nordbayern, abzubilden.

Tabelle 1: Partner des OBERA-Konsortiums

Unternehmen	Umsatz Mio. €	Anzahl Angestellte	Branche	Charakteristik
Franken	10–50	200	Werkzeuge zum Bohren, Fräsen, Gewindeschneiden	Kleinserien und Serienfertigung
Kritzner	10–50	100	Automatisierung und Automobil	Einzel- und Kleinserienfertigung
Pabst	6–10	60	Automobil und Luftfahrt	Einzel- und Kleinserienfertigung
Brehm	10–50	100	Medizinische Implantate	Einzel- und Serienfertigung
Siemens	> 600	3.000	Elektronikmotoren	Serienfertigung
Heisab	10	25	Prozessverbesserung und Digitalisierung	Unternehmensberatung
Heitec	130	1.000	Softwareentwicklung	Unternehmensberatung
FHWS	–	600	Hochschule	Forschung

Zu Beginn des Projekts wurden bei allen Partnern Anwendungsfälle (Use Cases) identifiziert. Ziel war es, dass jedes Unternehmen mindestens einen Anwendungsfall bearbeitet. Die Anwendungsfälle müssen einen Nutzen im Rahmen des Projektauftrags stiften, sowie innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden können. Anschließend wurden die Fokusthemen und Anwendungsfälle den Unternehmen zugeordnet, welche in folgender Tabelle 2 dargestellt sind.

Tabelle 2: Anwendungsfälle der Partner des OBERA-Konsortiums

Fokusthema	Unternehmen	Anwendungsfall (Use Case)
Rüsten	Pabst	Erkennung von Rüstphasen, Rüststatusmonitor
	Siemens	ERP-basiertes Analysetool für historische Umrüstzeiten aus vergangenen Aufträgen
Produktionsplanung	Brehm, Franken	Optimierte Produktionsplanung
	Brehm, Franken, Kritzner, Siemens	Transparenz der Maschinenzustände
	Siemens	Bedienung mehrerer Maschinen mit Bedienerführung
Werkzeugverwaltung	Brehm, Franken, Kritzner, Siemens	Werkzeugverschleißerkennung
	Brehm, Kritzner	Anforderungen an eine Werkzeugverwaltungssoftware
Automatisierung durch Künstliche Intelligenz	Franken, Siemens	Prozessautomatisierung durch Anwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass die vier Fokusthemen Rüsten, Produktionsplanung und Werkzeugverwaltung und Künstliche Intelligenz identifiziert und entsprechende Use Cases abgeleitet wurden. Insgesamt wurden 10 Use Cases definiert. Exemplarisch werden hier die Use Cases 1 bis 4 vorgestellt (siehe Tabelle 3). Wie in Tabelle 3 zu erkennen ist, werden die Use Cases 1 bis 3 thematisch dem Rüsten zugeordnet und Use Case 4 der Fertigungsplanung.

Tabelle 3: Themen mit Use Cases

ID	Thema	Use Case
1	Rüsten	Detektion von Rüstphasen
2	Rüsten	Transparenz durch Soll-Ist-Abgleich der Rüstvorgänge in einem Rüstmonitor
3	Rüsten	Rüstautomatisierung über eine Rüstmatrix
4	Fertigungsplanung	Mittelstandgerechte Optimierung der Produktionsplanung

3 USE CASES

3.1 Use Case 1–3 (Rüsten)

3.1.1 Use Case 1: Automatisierte Erkennung von Rüstphasen

Im Use Case 1 wurde die automatisierte Erkennung von Rüstphasen bei der Firma Pabst umgesetzt. Zunächst wurde bei der Firma Pabst ein standardisiertes Sensorsetup in der Fertigung an einer Fräsmaschine installiert, das in nachfolgender Abbildung 1 visualisiert ist.

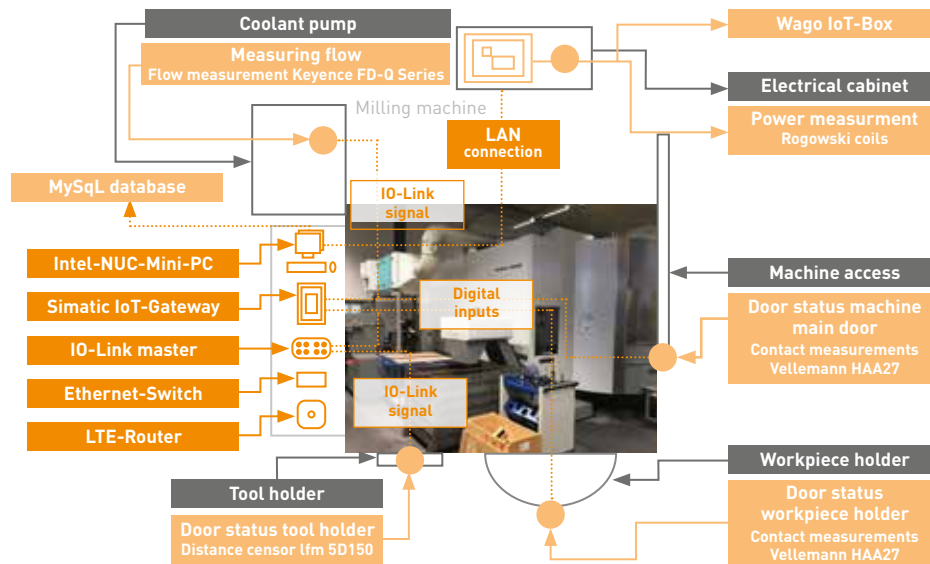


Abbildung 1: Sensorsetup an einer Fräsmaschine der Firma Pabst

Um die Daten der fünf installierten Sensoren an der Maschine zu erfassen, wird ein LTE-Router und ein Ethernet-Switch eingesetzt, die den Internetzugang aller Sensoren ermöglichen. Tabelle 4 zeigt die eingesetzten Sensoren bei der Firma Pabst:

Tabelle 4: Sensoren des Sensorsetups

Sensor	Messobjekt	Messart
Ifm 5D150	Türstatus Werkzeugträger	Distanzmessung
Keyence FD-Q Series	Kühlmitteldurchfluss	Durchflussmessung
Velleman HAA27	Türstatus Werkstückträger	Kontaktmessung
Velleman HAA27	Türstatus Maschinenhaupttüre	Kontaktmessung
Wago IoT-Box 9466	Maschinenleistung	Leistungsmessung

Sowohl der Sensor Ifm 5D150, welcher den Türstatus des Werkzeugträgers via Distanzmessung misst, als auch der Keyence FD-Q, der den Kühlmitteldurchfluss misst, sind mit einem IO-Link-Master (automatisiertes Kommunikationssystem) verbunden, der die Kommunikation mit allen angeschlossenen IO-Link-Geräten steuert. Die Kontaktschalter Velleman HAA27, welche den Türstatus von Werkstückträger und Maschinenhaupttüre via Kontaktmessung erfassen, sind an das Simatic IoT2040-Gateway (Internet of Things – Gateway als Bindeglied zwischen dem Sensornetzwerk und der LAN- bzw. Internet-Welt) angeschlossen. Das Gateway liest die digitalen Signale, die von den Kontaktschaltern erzeugt werden, ein und stellt diese im lokalen Netz oder im Internet zentral zur Verfügung. Die Wago IoT-Box misst die Maschinenleistung, hat eine eingebaute SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) und kann Daten mit verschiedenen Methoden senden. Alle genannten Geräte sind in der Lage, Datennachrichten über das MQTT-Protokoll (Message Queue Telemetry Transport Protokoll) zu übertragen. Das MQTT-Protokoll ist ein Client-Server-Protokoll, bei dem die Clients dem Server Nachrichten senden, welche über Zusatzinformationen hierarchisch eingestuft werden. Zuletzt wird ein PC benötigt, um die verschiedenen Datennachrichtenthemen der einzelnen Sensoren zu abonnieren. Für diesen Fall wird ein Intel NUC Mini-PC verwendet, auf dem die Anwendung Node-RED installiert ist. Node-RED ist eine Plattform zur Integration von IoT-Geräten in Kombination mit einer grafischen Programmiersprache. Sie bietet eine komfortable Möglichkeit, die verschiedenen Themen der Datennachrichten zu abonnieren und die Daten in ein nutzbares Format umzuwandeln. Schließlich werden alle Daten in einer SQL-Datenbank (Structured Query Language) gespeichert.

Dieses Setup erlaubt es, mit den oben beschriebenen Sensordaten ein ML(Machine Learning)-Modell für unterschiedliche Rüstphasen zu trainieren. Zur Detektion von Rüstphasen konnte bei der Firma Pabst eine Erkennung von Rüstvorgängen mit einer Genauigkeit von aktuell 93 % erreicht werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse aus dem Use Case, dass es mit dem trainierten ML-Modell möglich ist, in einer Serienproduktion, »Produktions-« und »Umrüstphasen« auf einem zuverlässigen Niveau zu unterscheiden.

3.1.2 Use Case 2: Rüstmonitor

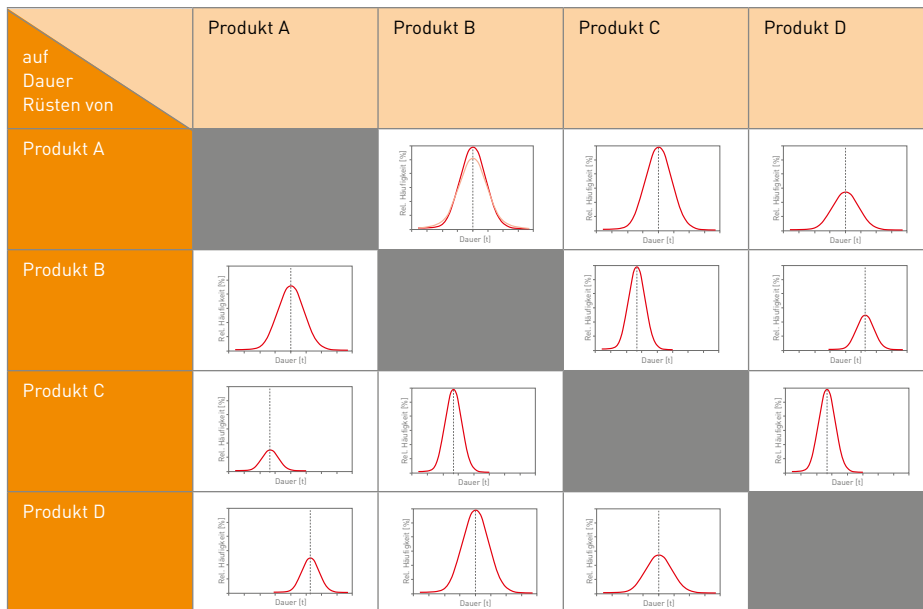
Bei der Firma Pabst wurde im Use Case 2 ein Konzept für einen sogenannten Rüstmonitor entwickelt. Ziel war es, mit Hilfe dieses Rüstmonitors die Transparenz der Rüstvorgänge herzustellen, den Rüstprozess zu verbessern und vergleichbar zu gestalten. Dazu wurde ein Soll-

Ist-Abgleich der Rüstvorgänge vorgenommen. Dieser Abgleich konnte durch den Vergleich der Ist-Werte der und der Soll-Werte aus dem ERP-System ermöglicht werden. Anhand des Abgleichs der Daten kann das System fortlaufend aktualisiert und ein Frühwarnsystem für ein Abweichungsmanagement aufgebaut werden.

3.1.3 Use Case 3: Rüstautomatisierung über eine Rüstmatrix von Siemens

Mit dem Use Case 3 wurde bei der Firma Siemens eine Auswertung der vergangenen Rüstvorgänge mittels einer sogenannten Rüstmatrix geschaffen (siehe Tabelle 5). Eine Rüstmatrix stellt die Dauer der Rüstvorgänge für alle möglichen Abfolgen von Produkten in tabellarischer Form dar. Mittels der zurückgemeldeten Rüstzeiten können die Häufigkeitsverteilungen der Rüst Dauern ermittelt werden. Über die Auswertung der Verteilungen können dann die im ERP vorliegenden Vorgabezeiten aktualisiert werden.

Tabelle 5: Prinzipdarstellung einer Rüstmatrix



Die Datenermittlung erfolgt kontinuierlich mit jedem Fertigungsauftrag. Folglich muss eine Veränderung der zugrunde liegenden Verteilung ebenfalls überwacht werden. Insgesamt konnte die Rüsttransparenz deutlich verbessert werden und wertvolle Informationen für Optimierungen z.B. in klassischen Rüstworkshops ermittelt werden. Zukünftig ist geplant, die automatische Erkennung des Rüststart und -stopps (s. Use Case 1) in diesen Use Case zu integrieren.

3.2 Use Case 4: Fertigungsplanung

Mit Use Case 4 wurde bei der Firma Franken der Fokus auf die Fertigungsplanung gelegt. Die Anforderung bestand darin, eine flexible und nachvollziehbare Fertigungsplanung zu implementieren. Um die Akzeptanz der Mitarbeitenden für das neue Verfahren zu erlangen, war es von besonderer Wichtigkeit, das Setting so einfach wie möglich zu halten und keine hochkomplexen mathematischen Systeme einzuführen. Ziel war es, die Komplexität so zu reduzieren, dass die Fertigungsplanung in einem KMU praxistauglich ist und dennoch ein logisches und umfassendes Verfahren, bezogen auf die wichtigsten Punkte, etabliert werden kann.

Im ersten Schritt wurde analysiert, welche Parameter Einfluss auf die Fertigungsplanung haben. Dafür wurde die Literatur der letzten Jahre sondiert und diese mittels einer Metaanalyse auf gemeinsame Parameter untersucht. Im Ergebnis wurden, die drei Parameter Bearbeitungszeit, Schlupfzeit (Lieferdatum – aktuelles Datum – Bearbeitungszeit) und die Lagerreichweite als die Parameter identifiziert, die sich in allen Modellen wiederfinden.

Die ermittelten Faktoren wurden über einen prioritätsbasierten Ansatz verknüpft. Dieses Vorgehen ist nahe am intuitiven Verständnis der Werk- und Fertigungsplanenden. Gleichzeitig wird eine hohe Flexibilität ermöglicht, ohne auf höhere Mathematik zurückgreifen zu müssen. Zusätzlich wurden die identifizierten Parameter bei der Firma Franken um drei individuelle Anforderungen erweitert. Anforderung eins war die »Reservierung«, d.h. es muss unterscheidbar sein, ob ein Produktionslos reserviert ist oder nicht. Anforderung zwei war der »Prioritätsauftrag«. Dies sind Aufträge, die auf Veranlassung der Geschäftsführung beschleunigt gefertigt werden müssen. Anforderung drei war der »Schaftdurchmesser«, welcher ein sogenanntes Rüststeuerkennzeichen ist. Die hohe Flexibilität und Einfachheit der Formel sorgen dafür, dass diese ohne Problem individuell ergänzt werden kann, in diesem Fall um die neuen drei Attribute. Diese Erweiterung ist skalierbar und unternehmensunabhängig jederzeit erweiterbar.

Das prioritätsbasierte Modell konnte erfolgreich bei der Firma Franken eingeführt werden und befindet sich derzeit im ersten Praxistest. Die Fertigungsplanenden können die Prioritäten über eine Eingabemaske in SAP eintragen. Die Berechnung des Fertigungsvorschlags erfolgt anschließend vollautomatisiert. Die gefundene Reihenfolge wird unter Zuhilfenahme des Rüststeuerkennzeichens (Schaftdurchmesser) iterativ auf die Maschinen verteilt. Hierbei wird die Liste stets neu berechnet, je nachdem welche Maschine als nächstes frei wird. Durch dieses Vorgehen konnte eine rüstopoptimale Fertigungsplanung implementiert werden. Bei Übergang zwischen Aufträgen mit zwei gleich großen Schäften ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass wenig Rüstzeit anfällt. Bei einer Rüstung von unterschiedlichen Schaftgrößen ist hingegen ein signifikant hoher Zeitbedarf für den Rüstvorgang zu prognostizieren. Daher ist es wünschenswert gleiche Schaftgrößen nacheinander zu produzieren.

Insgesamt deuten die Rückmeldungen während der Testphase auf eine hohe Akzeptanz des dargestellten Ansatzes hin, weil es in der Systematik dem intuitiven Vorgehen der Fertigungsplaner entspricht und gleichzeitig erhebliche Erleichterungen schafft. Erste Tests haben bereits gezeigt, dass das Verfahren dabei hilft, den Rüstaufwand zu reduzieren, das Personal zu entlasten und letztlich deutliche Zeitgewinne innerhalb der Fertigung zu generieren.

4 AUSBLICK

Insgesamt wurden im OBERA-Projekt viele Use Cases mit KMU-relevanten Aufgabenstellungen erfolgreich umgesetzt, wie exemplarisch durch die Use Cases 1 bis 4 gezeigt wurde. Mit Use Case 1 wurden nach der erfolgten Detektion von Rüstphasen die rüstbezogenen Daten des mobilen IoT-Setups für die Erstellung eines Rüsterkennungssystems eingesetzt. Ziel ist zukünftig die automatische Erkennung des Rüststarts und -stopps von Fertigungsaufträgen. Die aktuell realisierte Genauigkeit von 93 % soll mit zusätzlichen Sensoren wie z. B. Indoor-GPS und den internen Daten der Maschinensteuerungen in der Restlaufzeit des Projekts weiter gesteigert werden. Im Ergebnis von Use Case 2 wurde die benötigte Transparenz durch einen Soll-Ist-Abgleich der Rüstvorgänge im Rüstmonitor erreicht. Zukünftig sollen diese Daten in eine Visualisierung im Sinne des o.g. Rüstmonitors münden und an die erstellte Rüstmatrix aus Use Case 3 exemplarisch angebunden werden. Die Ergebnisse bei der Firma Pabst fließen

aktuell in den Soll-Ist-Vergleich sowie die automatische Rüstmatrix ein. Die Programmierung des Rüstmonitors wird nach heutiger Planung ebenfalls innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen. In der Fertigungsplanung soll im Use Case 4 der Praxistest bei der Firma Franken weiter verifiziert werden. Sollten dafür genügend Daten für weitere sinnvolle Formelparameter vorliegen, soll eine Auswahlliste erstellt werden, damit weitere Firmen die Formel baustellenbasiert über Vorschläge individuell und eigenständig zusammensetzen können. Es ist das erklärte Ziel, dieses Verfahren als einen der Standards, innerhalb der metallverarbeitenden Branche zu etablieren und somit aktiv die Digitalisierung in der Fertigungsplanung zu unterstützen und zu forcieren.

Insgesamt wird übergreifend an praxistauglichen Demonstratoren gearbeitet, die bis zum Projektende realisiert werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Projekt OberA die metallverarbeitenden Unternehmen aus dem Mittelstand bei der Digitalisierung ihrer Systemlandschaft erfolgreich unterstützt. Dies wird durch die Optimierung von Prozessen und Werkzeugmaschinen erreicht, welche wiederum durch Bereitstellung, Analyse und Soll-Ist-Vergleich von Produktionsdaten ermöglicht wird. Daraus lässt sich nachweislich ein Mehrfachnutzen ableiten. Zum einen haben die Firmen selbst sowie das metallverarbeitende Gewerbe im Allgemeinen einen Nutzen von den Maßnahmen, da sie einerseits ihre Prozesse effizienter gestalten und andererseits neue Mitarbeitende einstellen können. Zum anderen wird eine Verbesserung der Standortbedingung in Bayern erreicht.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Statistisches Bundesamt** (2018), »Umsatz der Deutschen Metallindustrie in den Jahren 2005 bis 2017«, verfügbar in: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237217/umfrage/umsatz-der-metallindustrie-in-deutschland/>
- [2] **Nyhuis, P.; Münzberg, B.; Kennemann, M.** (2009), »Konfiguration und Regulierung von PPC«, *Prod.-Nr. Eng.* 2009, 3, S. 287–294.
- [3] **Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.** (2007), »Hochauflösendes Produktionsmanagement. Im Fortschritte in Produktionsmanagementsystemen. Nachhaltige Produktions- und Servicelieferketten«, in Prabhu, V.; Taisch, M.; Kiritsis, D. (Hrsg.), Springer, Berlin, S. 439–442.
- [4] **Schuh, G.; Prote, J.; Luckert, M.; Schmidhuber, M.** (2018), »Potenzial von Echtzeitdaten für die Produktion, Ergebnisse einer Studie des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen«, *Werkstattstechnik online* 108(4), S. 198–203.
- [5] **Heins, M.; Nyhuis, P.; Pachow-Frauenhofer, J.** (2008), »Zustandsbeschreibung von Produktionsanlagen. Methodik zur Abbildung einer nachhaltigen Verfügbarkeitsverbesserung«, *Werkstattstechnik Z. Ind. Fert.*, S. 622–627.
- [6] **Tempelmeier, H.** (2014), »Produktionsplanung in Supply-Chains der Verbrauchsgüterindustrie«, 1. Aufl.; Apprimus-Verlag: Aachen

- [7] Schuh, G.; Potente, T.; Wesch-Potente, C.; Weber, A. R.; Prote, J. P. (2014), »Kollaborationsmechanismen zur Produktivitätssteigerung im Kontext von Industrie 4.0«, *Procedia CIRP* 2014, 19, S. 51–56.

Internationalisierung in Pandemiezeiten, technische Möglichkeiten, Lehr- und Forschungskonzepte mal anders gedacht

Eddi Miller, Christine Barthelme, Andreas Schiffler, Bastian Engelmann, Jan Schmitt

Short Facts

Projektlaufzeit: 01.10.2020 – 31.09.2021

Förderträger: DAAD IVAC

1 AUSGANGSSITUATION

Eines der zentralen strategischen Ziele unserer Hochschule ist die Internationalisierung, sowie der »internationalisation@home«. Als die weltweite Corona-Pandemie die Präsenzlehre und -forschung ebenso wie den internationalen Austausch von Studierenden und Forschenden zu Beginn 2020 quasi zum Erliegen brachte wurden die Rufe nach digitalen Angeboten im internationalen Bereich schnell laut. Vor diesem Hintergrund reagierte der »Deutsche Akademische Auslandsdienst (DAAD)« mit der kurzfristig ins Leben gerufenen Förderlinie »International Virtual Academic Collaboration« (IVAC), um internationale Hochschulkooperationen und weltweite Mobilität unter digitalen Vorzeichen strategisch zu gestalten und auszubauen [1].

Die Anfrage Prof. Raphael Batres der FWI Partnerhochschule Tec de Monterrey/Mexico (kurz »Tec«) zu einer DAAD-geförderten Kooperation stieß bei Prof. Jan Schmitt sogleich auf tiefes Interesse. Grundidee für die gemeinsame Antragstellung war die Schaffung eines neuen Moduls für Bachelorstudierende zum Thema »Machine Learning«, unter Einbindung eines virtuellen Labors für eine anwendungsorientierte Lehre. Die aktuellen Themenkomplexe »Künstliche Intelligenz« (KI) und »Industrie 4.0« beeinflussen und fordern eine Anpassung der Lehr- und Forschungsinhalte und waren ohnehin geplant in das Curriculum von Studiengängen eingebettet zu werden. Ziel war es demnach, den Kurs so zu konzipieren, dass ihn sowohl Tec-Studierende der Computer Sciences, als auch Studierende der Studiengänge Wirtschaftsingenieurwesen und Logistik gemeinsam besuchen können und Lehrende beider Institutionen Vorlesungen gestalten und halten. Damit sollen die Studierenden nicht nur theoretisches Wissen zu Machine Learning erwerben, sondern durch das Lernen und Arbeiten im internationalen Kontext und in interdisziplinären Teams ideal auf die spätere vielschichtige Arbeitsrealität vorbereitet werden.

Aufgrund der kurzen Antragszeit galt es unter beträchtlichem Zeitdruck eine Struktur für den angedachten Kurs zu entwickeln, die den formalen Bedingungen der beiden Hochschulen Rechnung tragen konnte.

2 RANDBEDINGUNGEN DES KOOPERATIVEN MODULS »MACHINE LEARNING« TEC – FHWS

Aufgrund der divergierenden akademischen Kalender und der Zeitverschiebung wurde das Modul als Blockveranstaltung konzipiert. In der zwölfwöchigen Überschneidungszeit der akademischen Kalender besuchten die Studierenden wöchentlich die vierstündige Lehrveranstaltung die um 16 Uhr MEZ startete, was 9 Uhr mexikanischer Ortszeit entspricht. Während die FHWS die Struktur für das virtuelle Labor entwickelte und zur Verfügung stellte, ermöglichte das Tec den FHWS-Studierenden Zugang zu deren Lernplattform »Canvas« zur Koordination

der Kursmaterialien. Auch für die Problematik der stark abweichenden Prüfungsformen konnte eine Lösung gefunden werden. Während an deutschen Hochschulen die Prüfungsleitung üblicherweise eine Prüfung am Ende des Semesters darstellt, verlangt das Tec-System eine semesterfortlaufende Bewertung in Form von Quizzes, Papers und Poster-Präsentationen. Durch das Festlegen der Prüfungsleistung im Portfolio-Format konnte die FHWS sich an das Prüfungssystem der Tec anlehnen. Bewertet wurden die Studierenden im jeweiligen Notensystem der eigenen Hochschule. Zur Sicherstellung des Lernerfolges wurden die Studierenden nach jedem Vorlesungsblock darum gebeten eine Kurzevaluation in Form von sogenannten Minute Papers anzufertigen. Hierbei wurden zwei einfache Fragen gestellt:

»Was sind aus deiner Sicht die wichtigsten Aspekte der heutigen Vorlesung?« und
»Welche Fragen bleiben unbeantwortet?«

Durch die Einbeziehung der Minute Papers konnte die Qualität der Vorlesungseinheiten konsekutiv von Woche zu Woche gesteigert werden. Die Evaluation des gesamten Kurses erfolgte an dessen Ende über einen standardisierten Fragebogen mittels EvaSys. Letztlich ist es gelungen, die Veranstaltung sowohl am Tec als auch an der FHWS curricular zu verankern und damit zu verstetigen.

In Vorbereitung auf diese Herausforderungen war ein kurzes interkulturelles Training zu Kursbeginn Teil der Lehrveranstaltung. Die Kursteilnehmenden wurden für die erschwerten Kursbedingungen über das »Global Classroom« Projekt der Tec mit einem »Digital badge« belohnt.

Das virtuelle Labor bestand bereits an der FHWS. Folgende Punkte wurden bei der Entwicklung des Labors als Funktionen definiert:

- Weltweit nutzbar
- Flexibel zugänglich
- In aggregierter Form nutzbar
- Interoperabel gestaltbar

Das virtuelle Labor (vLab) wurde nach den genannten Anforderungen konzipiert und bereits prototypisch in verschiedene Lehrveranstaltungen und für Forschungsarbeiten an der FHWS genutzt und optimiert. Im virtuellen Labor ist es möglich verschiedenen Microservices z.B. für Programmierarbeiten (JupyterLab für Python, NodeRed zur grafischen IoT-Programmierung oder p5.js) als Online-Plattform zum Erlernen des Programmierens auf visuelle Art und Weise zu nutzen. Basis für die Zugangsberechtigung ist die Verwaltung über den FHWS Microsoft Azure Tenant. Den Studierenden und Forschenden wurde über eine sog. Landing-Page der Zugang zu ihrem persönlichen virtuellen Laborbereich ermöglicht.

Diese innovative IT-Infrastruktur wurde in das DAAD-Projekt mit einbezogen und als Lehrumgebung im Modul »Machine Learning« genutzt.

3 TECHNISCHE AUSGESTALTUNG DES vLab

Das vLab bündelt Lern- und Entwicklungsumgebungen als zeit- und ortsunabhängige Angebote an die Studierenden. Eine 1:1-Betreuung ist ebenfalls durch die gemeinsame Arbeit an Aufgaben im Rahmen von praktischen Aufgabenstellungen in Gruppen möglich. Softwaretechnische Eckpfeiler des vLab bilden die OSS-Applikationen Jupyter, NodeRed und GitLab. Jupyter ist ein

Herausgeber von Open-Source-Software für wissenschaftliche Datenauswertung und Berechnungen. Vor allem finden die sog. Jupyter Notebooks Verwendung. Das Konzept dieser Notebooks sieht vor, dass sie den Workflow des wissenschaftlichen Rechnens unterstützen und der Programmcode in verschiedenen Zellen und Abschnitten individuell bearbeitet und ausgeführt werden kann [2]. Node-RED hingegen ist ein grafisches Entwicklungswerkzeug, welches die Verbindung von Hardware und APIs ermöglicht, weshalb es insbesondere Anwendung im IoT-Bereich findet [3]. Um Studierenden zu ermöglichen, dass sämtliche Dateien und Programmcodes gepflegt werden können, wurde GitLab in das virtual Lab integriert. GitLab bietet die Option kollaborative Entwicklungsumgebungen zu nutzen, um die Versionierung von Dateien zu ermöglichen [4].



Abbildung 1: Dashboard zu den vLab-Ressourcen

Die technische Basis bildet ein Kubernetes Cluster, auf dem die einzelnen Instanzen bedarfsgerecht automatisiert gestartet werden. Die Nutzer können das vLab über einen SSO, eine Einmalanmeldung, erreichen. Für die Verwaltung der Nutzungsaccounts wird das Azure Active Directory verwendet, welches auch für die gesamte FHWS genutzt wird. Dadurch reduziert sich der administrative Aufwand und die Studierenden haben ein anwendungsfreundliches Nutzungserlebnis hinsichtlich der Authentifizierung. Auch externe Accounts können angelegt werden. Diese ermöglichen einen Zugriff für Lehrende und Studierende von anderen Hochschulen oder Universitäten, um Kooperationen und kollaborative Lehrveranstaltungen zu ermöglichen. Aktuell wird die Architektur erstellt die es ermöglicht im vLab auch Jupyter Notebooks zur Verfügung zu stellen, welche auf zusätzliche GPU-Ressourcen zugreifen können (siehe Abbildung 1). Damit wird das vLab dem steigenden Bedarf von Machine-Learning-Anwendungen gerecht.

4 ERKENNTNISSE INTERNATIONALER LEHRVERANSTALTUNGEN IM BEREICH KI-KOMPETENZEN

Durch die Implementierung des Vorlesungsmodules konnte das strategische Ziel »internationalisation@home« zielgerichtet weiter ausgebaut werden. Studierenden, die nicht die Möglichkeit haben ein Auslandssemester zu absolvieren, können dadurch Kompetenzen vermittelt werden, die dem internationalen und interdisziplinären Arbeitsfeld von (Wirtschafts-) Ingenieuren und Logistikern entsprechen und damit die Chancengleichheit gefördert wird.

Durch die Belegung des Moduls haben Studierende die Möglichkeit, neben Fachkompetenzen, die sie im Bereich »Machine Learning« erlernen können, die Möglichkeit, sich in einer

neuen Kursstruktur zurecht zu finden, unterschiedliche Lehrmethoden anzunehmen und in internationalen Teams zu agieren.

Verstetigung findet das erfolgreiche Gemeinschaftsprojekt durch die Verankerung im Modulhandbuch. Der Kurs wird, in den folgenden Jahren jedes Sommersemesters, als Wahlmodul im Bereich Produktion für Wirtschaftsingenieure angeboten, sowie als Wahlmodul A/B/C für Logistiker.

Die Herausforderung aus Sicht der Lehrenden ist die große Bandbreite an Vorerfahrungen der Studierenden im Bereich Programmierung sowie die Koordination der virtuellen, teamorientierten Kollaboration. Entscheidend zur Risikominimierung bzgl. der genannten Punkte stellte sich das sog. »Icebreaker«-Event heraus. In der ersten Vorlesungsveranstaltung hatten die Studierenden die Aufgabe in einer Break-Out-Session, in der sie als kleine Gruppe per Zufall teilnahmen, sich gegenseitig vorzustellen, einen kreativen Team-Namen zu finden und ihre Motivation für den Kurs auf innovative Weise anschließend in der großen Gruppe zu präsentieren. Diese Teams bestanden über die gesamte Vorlesungszeit hinweg. Begleitet durch ein kurzes interkulturelles Training durch den Hochschulservice Internationales der FHWS, gestaltete sich eine gute Gruppendynamik und die ersten Vorbehalte der internationalen, virtuellen Teamarbeit wurden erfolgreich gelöst.

4 SCHLUSSBETRACHTUNG UND WERT FÜR DIE FORSCHUNG AM IDEE

Das Vorhaben »moVi« als mehr lehr- denn forschungsseitig gelagertes Projekt zeigt dennoch die Zusammengehörigkeit beider Dimensionen. Aus der Gestaltung des Moduls Machine Learning ergaben sich mehrere Anfragen zu Abschlussarbeiten, die Nutzung des vLabs erfolgte zudem auch für andere Lehr- und Projektinhalte. Beides zeigt, dass die Studierenden von den Lehrinhalten und der bedienbaren, leicht zugänglichen IT-Infrastruktur des vLabs profitieren. Auch Forschungsinhalte, die über die Microservices des vLabs abgebildet werden können, erzielen dadurch einen höheren Mehrwert hinsichtlich der Wieder- und Weiterverwendung z.B. von Codezeilen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] o. A., <https://www.daad.de/de/infos-services-fuer-hochschulen/weiterfuehrende-infos-zu-daad-foerderprogrammen/ivac/>
- [2] Kluyver, T.; Ragan-Kelley, B.; Pérez, F.; Granger, B. E.; Bussonnier, M.; Frederic, J. et al. (2016), »Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows«, Vol. 2016, S. 87–90.
- [3] Blackstock, M.; Lea, R. (2014), »Toward a distributed data flow platform for the web of things (distributed node-red)«, Proceedings of the 5th International Workshop on Web of Things, S. 34–39.
- [4] Ríos, J. C. C.; Kopec-Harding, K.; Eraslan, S.; Page, C.; Haines, R.; Jay, C.; Embury, S. M. (2019), »A methodology for using GitLab for software engineering learning analytics«, 2019 IEEE/ACM 12th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering (CHASE), S. 3–6.

Einsatz einer maschinell gelernten Bildsegmentierung zur Pulverbettüberwachung im Metalldruck

Andreas Schiffler, Kira Kristin Wehnert, Dennis Ochs

Short Facts

Förderkennzeichen: VALIDAD-IKK-1905-0013

Projektlaufzeit: 01.10.2019 – 30.09.2022

1 EINLEITUNG

3D-Metalldruck oder Additive Manufacturing (AM) umfasst eine breite Palette sich entwickelnder junger Technologien. Diese Prozesstechnologien versprechen die Fähigkeit, durch den schichtweisen Aufbau von Metall, komplexe dreidimensionale Komponenten zu erzeugen. Ursprünglich nur für das Prototyping verwendet, haben jüngste Fortschritte und Marktbedingungen es ermöglicht, dass der Metalldruck endkonturnahe Bauteile für den Endgebrauch produziert. Insbesondere wird der Metalldruck für hochentwickelte oder kundenspezifische Teile in kleinen bis mittleren Stückzahlen eingesetzt. Die Anwendung dieser spezifischen Bauteile z.B. in Luft- und Raumfahrt, medizinische Implantate und Automobilindustrie stellen jedoch auch hohe Anforderungen an die Qualitätssicherstellung, die Rückverfolgbarkeit des Produktionsprozesses und der Prozessfähigkeiten. Der Prozess des Metalldrucks zeichnet sich, unabhängig vom Verfahren, durch einen großen lokalen Energieeintrag aus. Daher sind so gefertigte metallische Bauteile besonders anfällig für Anomalien in thermischen Eigenschaften, stochastische Abweichungen der Pulverkorngrößen und allgemeine Maschinenfehler wie z.B. Positionsabweichungen. Einige dieser Anomalien treten in sehr kurzen Zeiten oder in sehr kleinen Längenskalen auf, sodass sie während des Aufschmelzens oder des Bindens des Materials erkannt werden müssen. Die dafür notwendigen Überwachungsmaßnahmen werden daher i.d.R. als in situ Prozessüberwachung bezeichnet. Einige der genannten Prozessabweichungen sind jedoch persistent und so charakterisiert, dass eine schichtweise Erkennung möglich ist.

Der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen ist auf eine schichtweise Erkennung von Abweichungen durch die automatisierte Analyse von Bilddaten aus pulverbettbasierten Metalldruckprozessen gelegt. Bei diesen Prozessen wird eine dünne Schicht im Bereich von 20 bis 100 μm aus pulverförmigem Metallpulver aufgetragen. Ein zweidimensionaler Querschnitt des gewünschten Bauteils wird dann entweder mit einer selektiven Wärmequelle aufgeschmolzen oder mit einem Bindemittel zusammengebunden. Anschließend wird das Substrat um die Höhe einer Pulverschicht abgesenkt und der Vorgang wiederholt, bis der Aufbau abgeschlossen ist. Nach dem Abschluss des Aufschmelzens einer Schicht wird ein Bild mittels einer Kamera im sichtbaren Wellenlängenbereich erstellt. Abbildung 1 zeigt zwei Beispiele solcher Bilder. Diese bilden die Eingangsgröße für die Erkennung von Abweichungen. Durch die gewählte Schichtdicke kann die Herstellung eines Bauteils mehrere tausend Bilder erzeugen. Die automatisierte und zeitnahe Auswertung ist daher Inhalt aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten [1]. Nicht zuletzt da die notwendige Sensorik – eine Kamera – wirtschaftlich und robust einsetzbar ist.

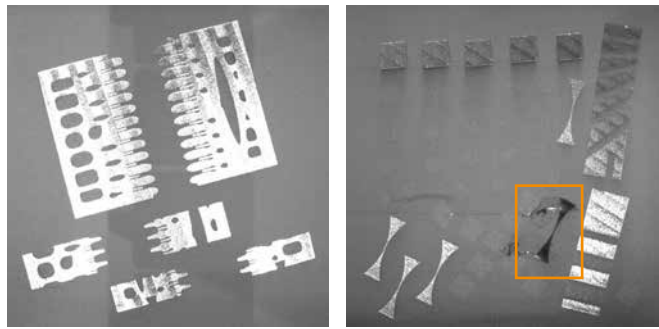


Abbildung 1:
Beispiele für Kameraaufnahmen der Baufäche im Pulverbett nach dem Aufschmelzen; (Links) Fehlerfreier Zustand; (Rechts) Störung/Fehler (orange markiert)

2 NEURONALES NETZ FÜR SEMANTISCHE SEGMENTIERUNG DER KAMERABILDER

Wie Abbildung 1 darstellen soll, ist die Aufgabe automatisiert Anomalien in Kamerabildern des Pulverbetts in jeder Schicht zuerkennen. Der hier beschriebene Ansatz geht in zwei Stufen vor:

- 1. Festlegung von Bereichen in dem Metall aufgeschmolzen wurde (= Vordergrund, Metall) und Bereichen, in denen kein Metall aufgeschmolzen wurde (= Hintergrund, Metallpulver)
- 2. Berechnung des Verhältnisses von Ist-Vordergrund zu Soll-Vordergrund

Aus dem letzten Schritt resultiert pro Schicht ein einfaches Überwachungskriterium welches im Idealfall gleich eins ist. Eine Abweichung von diesem Wert abzüglich einer gewählten Toleranz wird als Anomalie und somit Fehler im Pulverbett gewertet. Eine Klassifizierung, welche Art von Fehler vorliegt, erfolgt zunächst nicht.

Die Umsetzung des ersten Schrittes erfordert die sichere Erkennung der aufgeschmolzenen Bereiche im Pulverbettbild. Wie in Abbildung 1 links zu erkennen ist, ist die Festlegung eines einfachen Schwellwerts – Schwarz-Weiß-Konvertierung – nicht möglich. Dies liegt an den sich spiegelnden Oberflächen, Reflexionen und Schattenwürfen. Auch aufwendige Algorithmen zur Trennung von Vorder- und Hintergrund wie sie in der Softwarebibliothek *openCV* [5] vorgeschlagen werden, liefern keine befriedigenden Ergebnisse.

Der Einsatz eines trainierten neuronalen Netzes, als spezifischer Algorithmus zur Lösung des ersten Schritts, kam daher aus den folgenden Gründen in Betracht:

- Eine typische Zeitspanne zwischen zwei Bauteilschichten beträgt mindestens 0,5 Sekunden. Diese Zeit ist in den meisten Fällen mit modernen Geräten ausreichend, um ein Bild mit 1.024^2 Pixeln zu verarbeiten.
- Mit der Veröffentlichung des Beitrags [2] steht eine Netzwerkarchitektur – sog. U-Net – zur Verfügung, welche sich als geeignet und performant bei der Aufgabe automatisiert biomedizinische Bilder zu analysieren zeigte. Auch bei einer weiteren Anwendung zur Erkennung des Verschleißes von Werkzeugen wurde dieser Ansatz erfolgreich eingesetzt [4].

Aus dem Stand der Technik wurde daher eine U-Net Architektur gewählt. Jedoch nicht wie ursprünglich in [2] vorgeschlagen, sondern ein Netzwerk wie in der Arbeit [6] entwickelt, bei dem Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit gezeigt werden konnten. Abbildung 2 zeigt diese Xception-Style Architektur angepasst auf eine Bildgröße von 256^2 Pixel mit beispielhaft gewählten Eingangs- und Ausgangsbildern.

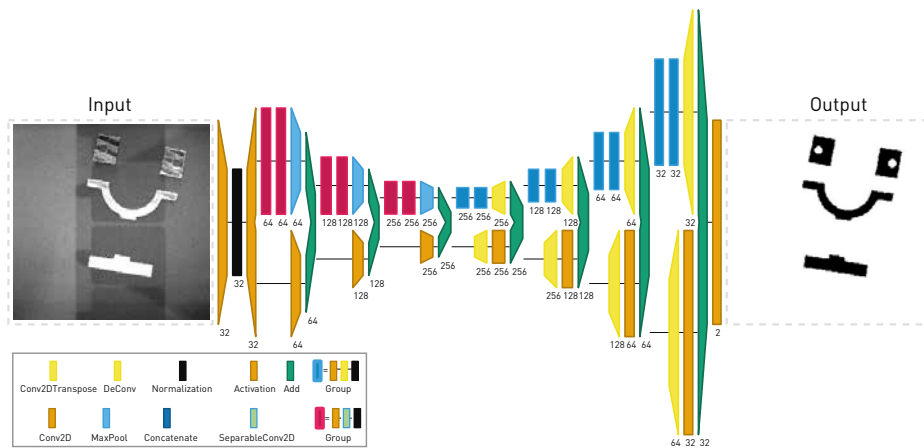


Abbildung 2: Xception-Style U-Net Netzwerk Architektur vorgeschlagen in [6] auf Basis der Arbeiten aus [2]

Durch den Einsatz eines trainierten Netzes, wie in Abbildung 2 dargestellt, konnten trotz schwieriger Belichtungsszenen und Spiegelungen Bereiche, in dem Metall aufgeschmolzen wurde, pixelweise im Bild vom Hintergrund getrennt werden. Dies wird im weiteren Verlauf des Artikels noch erläutert.

3 SENSORGESTÜTZTE GENERIERUNG VON PIXELWEISE KLASSIFIZIERTEN TRAININGSBILDERN

Die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen als Algorithmus zur Bildverarbeitung erfordert ein vorheriges Training, also eine Parametrisierung des Netzes. Für die Anzahl der Bilder, welche zum Training verwendet werden, gilt stets: Je mehr, desto genauer kann später eine Aussage / Vorhersage erfolgen. Da nicht nur Bilder, sondern auch entsprechende Kontextinformationen eingegeben werden müssen, kann das Training sehr zeit- und ressourcenaufwendig werden. Gerade im Falle einer semantischen Segmentierung, welche hier zum Einsatz kommt, muss jeder Pixel im Bild eine Kontextinformation erhalten um für das Training verwendet werden zu können. Im einfachsten Fall – wie hier – kann jeder Pixel maximal zwei Zustände haben. Vordergrund = Metall oder Hintergrund = Metallpulver. Wie in der aktuellen Veröffentlichung [1] berichtet, wurden hier etwa 6.000 Bilder per Hand pixelweise von Experten mit der notwendigen Kontextinformation erweitert. Dabei wird hier von »Labeling« gesprochen. Dieser Vorgang ist sehr zeitaufwendig. Allerdings muss dieser Vorgang nur einmal durchgeführt werden und später in der Anwendung des trainierten Netzes nicht mehr. Daher wird hier der Ansatz verfolgt, zusätzliche Sensoren einzusetzen, um den Vorgang des »Labelings« zu automatisieren. In der vorhandenen Anlage EOS M290 stehen zwei weitere Messsysteme zur Verfügung, welche sich eignen, aufgenommene Bilder vom Pulverbett zu klassifizieren. Eingesetzt wurde eine weitere Kamera welche Aufnahmen im nahen Infrarotwellenlängenbereich (900 bis 1.200 nm) erstellt.

Diese Bilder wurden mit einem festen Schwellwert schwarz-weiß transformiert um somit eine Maske zu erhalten, welche die Bereiche schwarz kennzeichnet, in dem Metall aufgeschmolzen und weiß, wo kein Metall aufgeschmolzen wurde. Abbildung 3 stellt anhand einer beispielhaften Bauschicht die unterschiedlichen Bilder dar. Ganz rechts ist das Bild, welches als Maske für das Training des neuronalen Netzes verwendet wird. Somit können Bilder zusammen mit der Verwendung von zusätzlicher Sensorik automatisiert als Trainingsdaten verwendet werden.

Das so trainierte Netz erfüllt die im Abschnitt zuvor definierte erste Aufgabe – das Trennen von Vordergrund und Hintergrund. Mit der Nutzung des neuronalen Netzes kann eine zweite Kamera im nahen Infrarotbereich – wie sie für das Training verwendet wurde – eingespart werden. Hier wird daher von einem Soft-Sensor gesprochen, da die Funktionalität durch die Software, genauer von einem Algorithmus, übernommen wird. Der Zeitbedarf für die Ausführung des Netzes auf ein Bild mit 256^2 Pixeln liegt kleiner 100 Millisekunden und kann daher als Lösung verwendet werden.



Abbildung 3: Beispielhafte Bilder einer Bauschicht. (links) Kamerabild, (Mitte) Kamerabild naher Infrarotbereich, (rechts) Erzeugte Maske für das automatisierte Labeling

Erste Versuche und das initiale Training des neuronalen Netzes wurden mit etwa 5.000 Bildern durchgeführt. Eine Validierung mit einem Testdatensatz ergab eine Genauigkeit (true-positiv) von 90%. Allerdings muss dieses Ergebnis relativiert werden, da die Aussage stark von der Verteilung der Flächen von Hintergrund zu Vordergrund abhängt. Enthalten Bilder beispielsweise überwiegend Pixel welche als Hintergrund klassifiziert werden, ist nur aufgrund der Menge an Pixeln die Genauigkeit stets besser als für die Klassifizierung des Vordergrundes.

4 ANWENDUNG ZUR VERBESSERUNG DER ANOMALIEERKENNUNG

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, wie mit Hilfe eines neuronalen Netzes die Bereiche in denen Metall aufgeschmolzen wurde von Bereichen mit Metallpulver segmentiert werden können. Dies erfolgt ohne den Einsatz zusätzlicher Sensorik. Wird nun das trainierte Netz $UNet(P)$ während der Fertigung auf jedes Bild mit der Pixelmenge P_{powder} einer Schicht angewendet, kann die Fläche A_{metall} , also die Summe aller Pixel mit der Klassifizierung Vordergrund, beschrieben werden. Wird diese beobachtete bzw. berechnete Fläche A_{metall} auf Basis der Kamerabilder in Bezug zu der bekannten Sollfläche A_{soll} gesetzt, resultiert, wie eingangs beschrieben, ein Überwachungskriterium für eine fehlerfreie Schicht:

$$0,8 < \frac{A_{\text{soll}}}{A_{\text{metall}}} < 1,2 \quad (1)$$

mit

$$P_{\text{seg}} = UNet(P_{\text{powder}}) \quad (2)$$

$$P_{\text{metall}} = \{P_{\text{seg}} | P_{\text{seg}} \geq 1\} \quad (3)$$

$$A_{\text{metall}} = \sum P_{\text{metall}} \quad (4)$$

Abbildung 4 zeigt für ein Bauteil den Verlauf der berechneten / beobachteten Fläche und die Sollfläche für die ersten 7 mm der Bauhöhe. Im Bereich der Bauhöhe zwischen 1 und 1,5 mm kann deutlich eine signifikante Abweichung zwischen Sollfläche und im Pulverbett aufgeschmolzene Fläche erkannt werden. Die entsprechenden Ausschnitte aus den Kamerabildern bestätigen die Abweichung, wie in Abbildung 4 rechts in den Bildern zu erkennen. Der Bereich der geschlossen rechteckig aufgeschmolzen werden sollte hat sichtbare Fehlstellen.

Diese ersten Ergebnisse bestätigen zunächst den Ansatz und stellen zugleich ein einfaches Überwachungskriterium dar. Darin liegt aber auch das Optimierungspotenzial begründet, da diese Schwellwertüberwachung keine direkten Rückschlüsse auf die Position oder die Art der Anomalie im Pulverbett zulässt. Weiterhin wird im Folgenden noch untersucht wie die Auflösung der Kamerabilder einen positiven Einfluss auf die Genauigkeit der Flächenberechnung hat. Eine Verifizierung der Generalisierung des Ansatzes konnte bisher nicht gegeben werden, da nur Bildmaterial von einer Anlage zur Verfügung stand.

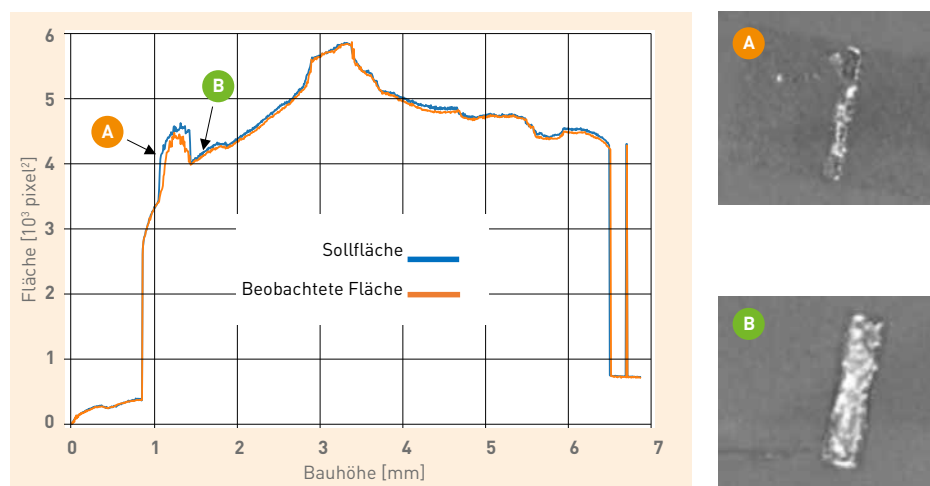


Abbildung 4: (links) Verlauf der berechneten Fläche des aufgeschmolzenen Metalls im Pulverbett und gewünschte Fläche, (rechts) beispielhafte Relation zu Kamerabildern im Fall A für eine signifikante Abweichung Soll zu beobachtet und Fall B fehlerfreier im gleichen Bauteilbereich

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Scime, L.; Derek S.; Seth B.; Vincent P. (2020), »Layer-wise anomaly detection and classification for powder bed additive manufacturing processes: A machine-agnostic algorithm for real-time pixel-wise semantic segmentation«. Additive Manufacturing 36, verfügbar in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420308253>
- [2] Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T. (2015), »U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation«, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), verfügbar in: <http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/Publications/2015/RFB15a>

- [3] **Akeret, J.; Chihway C.; Aurelien L.; Alexandre R.** (2017), »Radio frequency interference mitigation using deep convolutional neural networks«. *Astronomy and Computing* 18, S. 35–39.
- [4] **Benjamin, L; Kisskalt, D.; Regulin, D.; Reisch, R.; Schiffler, A.; Franke, J.** (2019), »Evaluation of Deep Learning for Semantic Image Segmentation in Tool Condition Monitoring«, *International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA-2019)*, 2007–2012. Boca Raton
- [5] **Bradski, G.** (2000), »The OpenCV Library«. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*
- [6] **Chollet, F.** (2016), »Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions«, 2017, *Computer Vision and Pattern Recognition*, verfügbar in: <https://arXiv:1610.02357>

IMPRESSUM

V. I. S. D. P.

Prof. Dr. Robert Grebner
Hochschule für angewandte Wissenschaften
Würzburg-Schweinfurt

Münzstraße 12
97070 Würzburg
Telefon +49 931 3511-6002
Fax +49 931 3511-6044

Ignaz-Schön-Straße 11
97421 Schweinfurt
Telefon +49 9721 940-602
Fax +49 9721 940-620

HERAUSGEBER DIESER AUSGABE

Prof. Dr. Jan Schmitt
Ignaz-Schön-Straße 11 · 97421 Schweinfurt
Telefon +49 9721 940-8594 · jan.schmitt@fhws.de

Ansprechpartner am Campus Angewandte Forschung
Vizepräsident Prof. Dr. Jürgen Hartmann
Münzstraße 12 · 97070 Würzburg
Telefon +49 931 3511-6002 · Fax +49 931 3511-6044

Redaktion am Campus Angewandte Forschung
Felix Liedel, M.A.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter für Wissenschaftskommunikation
Münzstraße 12 · 97070 Würzburg
Telefon +49 931 3511-8495 · felix.liedel@fhws.de

Design
Supstanz Kommunikationsdesign GbR
Suprun | Stanko Angrés
Kickerlingsberg 6 · 04105 Leipzig
info@supstanz.com

Kontakt, Themenvorschläge und Feedbacks
scj@fhws.de

Alle angegebenen Online-Quellen wurden zuletzt überprüft am 28.9.2021

urn:nbn:de:bvb:863-opus-19389
ISSN 2196-6095

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

