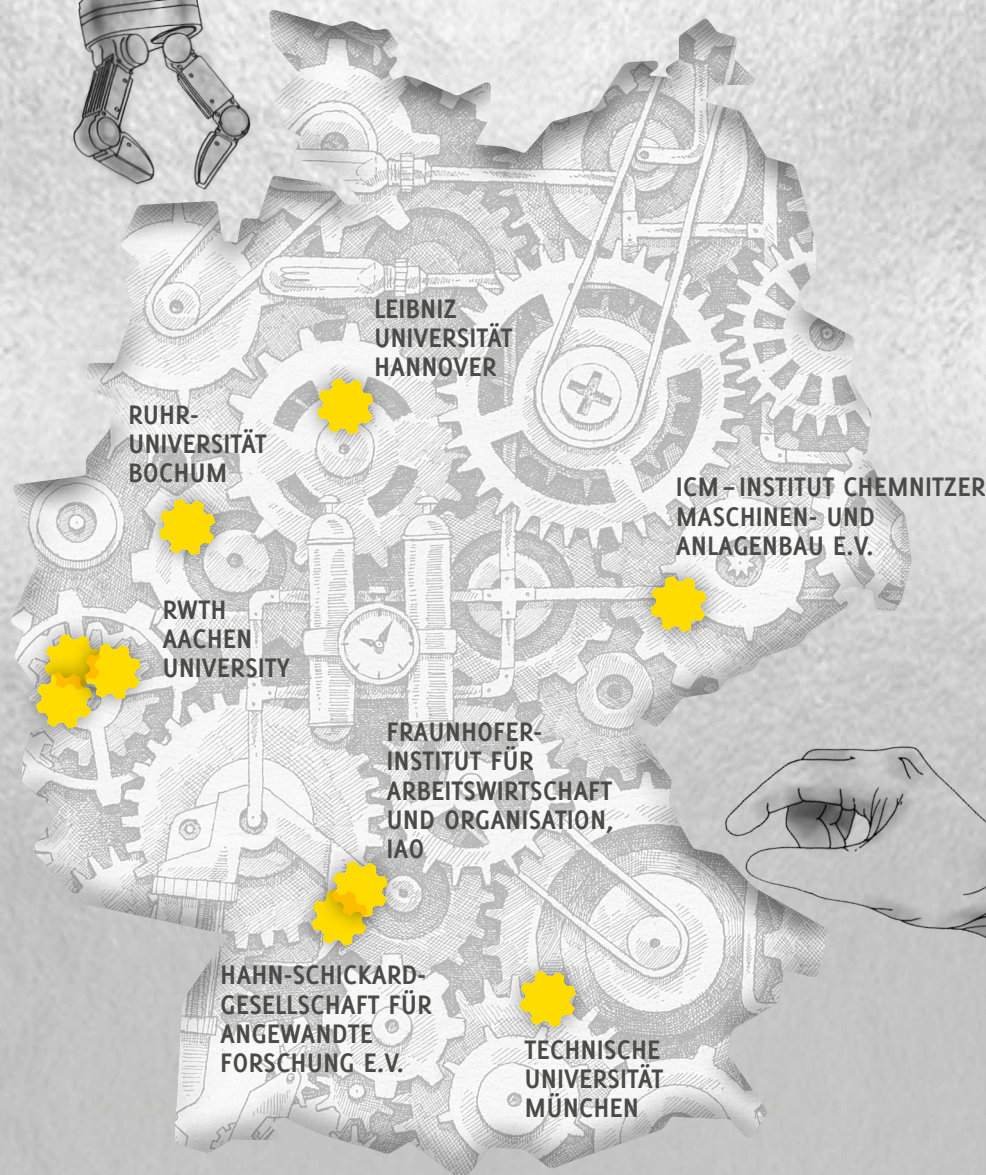
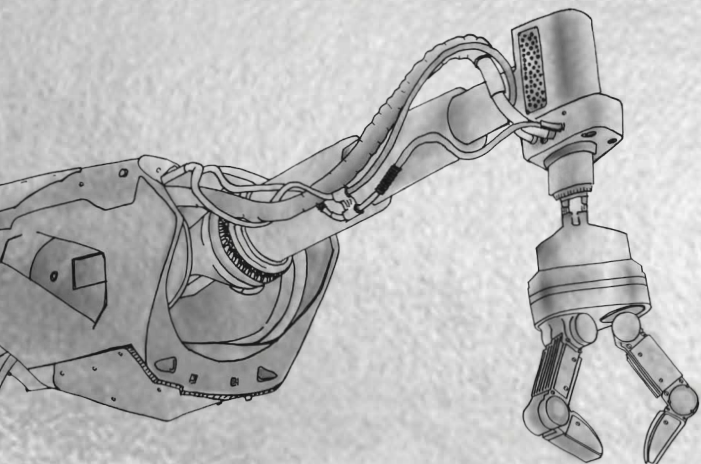




## PROJEKTATLAS



# KOMPETENZ MONTAGE

KOLLABORATIV UND WANDLUNGSFÄHIG

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung





PROJEKTATLAS



# KOMPETENZ MONTAGE

KOLLABORATIV UND WANDLUNGSFÄHIG

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

*wegweiser*

DR. HELMUT BOSSY  
DR. UWE KRAUSE & CHRISTEL SCHWAB  
DR. FRANK HEES

4-7

**WANDLUNGSFÄHIGKEIT**

VON PRODUKTION  
UND MONTAGE

8-35

**BUSINESS INTELLIGENCE**

FÜR DIE WANDLUNGS-  
FÄHIGE MONTAGE

36-57

**SIMULATION**

ZUR PLANUNG UND OPTIMIERUNG  
VON MONTAGESYSTEMEN

58-79

**KONZEPTION**

UND GESTALTUNG KOLLABORATIVER  
MONTAGESYSTEME

80-109

**HUMAN FACTORS**

IM RAHMEN DER NUTZUNG  
KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

110-129

**QUALIFIZIERUNG**

IM KONTEXT VON INDUSTRIE 4.0

130-157

**SICHERHEIT**

IN KOLLABORATIVEN MONTAGESYSTEMEN

158-171

**SYSTEMINTEGRATION**

KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

172-199

**BEWERTUNG**

UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

200-225

*projektsteckbriefe*

226-245

*herausgeber*

246-247

*impressum*

248-249

*glossar*

250-252



# WEGWEISER

## GELEITWORT DES BUNDES- MINISTERIUMS FÜR BILDUNG & FORSCHUNG



Dr.  
**HELMUT  
BOSSY**

Referat 521  
„Zukunft von Arbeit  
und Wertschöpfung;  
Innovationsförderung;  
Industrie 4.0“

Auf die Montage industrieller Güter entfällt in Deutschland als bedeutender Industrienation ein sehr hoher Wertschöpfungsanteil am Bruttosozialprodukt. Darüber hinaus ist Deutschland im Bereich der Ausrüstungen für Montage- und Handhabungstechnik weltweit einer der führenden Anbieter.

Die Montage ist im Herstellungsprozess komplexer Güter der letzte Wertschöpfungsschritt und aufgrund zunehmend volatiler Märkte und neuer Prozessanforderungen – z.B. durch Industrie 4.0 – besonderen Wandlungsanforderungen ausgesetzt. Es gilt, je nach Produkt und Betriebstyp sehr wandlungsfähige und maßgeschneiderte Lösungen zu finden. Dabei spielt die über viele Jahrzehnte historisch gewachsene, wechselseitig enge Beziehung zwischen Montageanwendern und Montageausrüstern eine besondere Rolle. Sie brachte Deutschland weltweit in eine Spitzenposition der Automatisierungslösungen.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im April 2015 einen Ideenwettbewerb zum Thema „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig (KoMo)“ initiiert. Ziel war die Förderung innovativer Systemlösungen zur Montage komplexer Stückgüter in produzierenden Unternehmen. Neun ausgewählte Verbände mit insgesamt 80 Partnern haben in dreijähriger Arbeit beispielhafte Lösungen zum wirtschaftlich optimalen Automatisierungsgrad in der Montage entwickelt und umgesetzt.

In diesem Atlas werden die Ergebnisse dieser Vorhaben vorgestellt und damit die Grundlagen geschaffen, dass neues Wissen und neue Methoden in den Unternehmen zur Anwendung kommen. Das BMBF dankt all denen, die an den Vorhaben mitgewirkt haben, und wünscht den Partnern weiterhin viel Erfolg.

Viele der am Standort Deutschland produzierten komplexen Stückgüter werden aufgrund kleiner Losgrößen und schwankender Stückzahlen derzeit noch überwiegend durch manuelle Montage hergestellt. Die kollaborative Montage kann daher insbesondere den meist kleinen und mittelständischen Unternehmen einen Kosten- und Effizienzvorteil bringen. Trotz hoher Lohnkosten und weltweit höchster Sicherheits- und Arbeitsschutzstandards wird damit Beschäftigung am Standort Deutschland gesichert und ausgebaut.

Die fertigungstechnischen Ausrüster für Montageanlagen und -komponenten aus Deutschland haben besonders hohe Kompetenzen im Systemgeschäft. Der Zukunftsmarkt der Automatisierungstechnik auf den Weltmärkten liegt derzeit weniger bei der Großserienfertigung, als vielmehr bei der Mittel- und Kleinserienfertigung. Hierbei werden zukünftig auf den Weltmärkten der Produktion deutlich weniger Standardlösungen gefragt sein, sondern eher kundenspezifische und wandlungsfähige Problemlösungen. Hieraus ergeben sich gute Exportchancen für deutsche Maschinenbauunternehmen.

Mit den Ergebnissen aus den KoMo-Forschungsvorhaben liegen nunmehr erprobte Vorgehensweisen vor, die auch für andere Unternehmen eine gute Entscheidungshilfe bei der Gestaltung ihrer Montageorganisation darstellen. Die Partner haben sich aufgrund der Fülle ihrer Ergebnisse dazu entschieden, diese im Format eines Atlas aufzubereiten, verdichtet und in leicht lesbarer Form, sozusagen als Leitfaden „Von der Praxis – für die Praxis“. Die Arbeit, die dabei geleistet wurde, ging dabei weit über das übliche Maß zum Ergebnistransfer hinaus. Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen Beteiligten für ihren großen Einsatz bedanken. Wir sind davon überzeugt, dass alle beteiligten Industriefirmen mit ihren neuen Systemlösungen zur Montage auch weiterhin auf den angespannten Weltmärkten Wettbewerbsvorteile erzielen werden. Den beteiligten Forschungspartnern wünschen wir, dass ihre Ideen und pragmatischen, zielführenden Vorgehensweisen von vielen Unternehmen in Deutschland aufgegriffen werden und in einem fruchtbaren Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis eine Weiterentwicklung erfahren. Den Lesern des Atlas viel Freude und Erkenntniszuwachs und den Mut, den Wettbewerbsvorteil in der Montage zu „entdecken“.

## GELEITWORT DES PROJEKT- TRÄGERS



Dr.  
**UWE KRAUSE**

Projekträger Karlsruhe  
(PTKA)



**CHRISTEL  
SCHWAB**

Projekträger Karlsruhe  
(PTKA)



## GELEITWORT DER REDAKTION DES ATLAS „KOMPETENZ MONTAGE“



Dr.  
**FRANK HEES**

Lehrstuhl für Informationsmanagement  
im Maschinenbau der  
RWTH Aachen University

Mit dem Begriff Industrie 4.0 wird neben der Digitalisierung zunehmend auch der sich vollziehende Paradigmenwechsel in der Industrie assoziiert: weg von einer vornehmlich durch Lean Management und Automation getriebenen Gestaltung der Produktions- und Fertigungssysteme hin zu vernetzten, hybriden und lernenden Systemen, die durch eine symmetrische Betrachtung der Dimensionen Mensch, Organisation und Technik charakterisiert sind.

Auf Grundlage der Leistungszuwächse der Künstlichen Intelligenz in den vergangenen 20 Jahren und des boomenden Einsatzes von Verfahren des Machine Learning werden Teilsysteme mit immer höherer Intelligenz und Autonomie möglich. Diese realisieren gleichzeitig die Konzepte einer stark vernetzten Welt und sind zu neuen Kommunikations- und Kooperationsformen fähig. Die Grenzen zwischen Mensch und Maschine beginnen zu verschmelzen, neuartige komplexe Arbeitssysteme entstehen. Die Konsequenz: Forschungs- und Arbeitswelt werden nicht nur vor neue technische, sondern auch vor arbeitsgestalterische Herausforderungen gestellt. In diesem Kontext wurde das Themenfeld „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig“ (KoMo) initiiert. Bei allen neun zugehörigen Verbundprojekten stehen neuartige Lösungs- und Gestaltungsansätze einer modernen, zukunftsfähigen Montage im Zentrum. Das Spektrum des interdisziplinären Forschungsverbundes reicht dabei von Fragestellungen aus dem Bereich der Technik- und Arbeitsforschung über die Akzeptanzforschung bis hin zu Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Aufgrund seines breiten interdisziplinären Kompetenzprofils wurde der Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau (IMA) der RWTH Aachen University mit der redaktionellen Leitung des vorliegenden Atlas betraut. Dieser stellt mit wissenschaftlich belastbaren Erkenntnissen und

durchweg umsetzungsnahen Ergebnissen eine zukunftsweisende Landkarte der „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig“ in Deutschland dar.

Dafür möchte ich mich an dieser Stelle zuallererst bei dem zuständigen Fachreferat „Zukunft von Arbeit und Wertschöpfung, Innovationsförderung, Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) bedanken.

Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger Karlsruhe (PTKA), insbesondere Christel Schwab, Ulrike Kirsten und Martina Göttel, für die außerordentlich engagierte Projektbetreuung. Ihr Einsatz hat der Idee des Projektatlas zum Durchbruch verholfen. Des Weiteren danke ich dem Redaktionsteam, bestehend aus den Koordinatoren der neun Verbundprojekte und Sarah Müller-Abdelrazeq sowie Tristan Langer, die als ARIZ-Projektleitung auch die operative Federführung beim vorliegenden Projektatlas übernommen haben. Sie haben dafür gesorgt, dass die Beiträge mit anwendungsorientierten Lösungsansätzen und Erfahrungen die Basis des Atlas bilden.

Ohne die textuelle Konzeption von Dr. Claudia Weise von rubicondo sowie die graphische Darstellung durch das Team der Agentur wesentlich. Visuelle Kommunikation wäre der Projektatlas in dieser Form nicht entstanden.

Lassen Sie sich nun von der Themenvielfalt des Projektatlas „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig“ begeistern und tauchen Sie ein in die Expertise und Erfahrungen der achtzig Verbundpartner aus der Industrie- und Forschungslandschaft in Deutschland.



Quelle: robomotion GmbH

# WÄNDLUNGS- FÄHIGKEIT

## KAPITEL 1

Unternehmen müssen auf Marktturbulenzen anforderungsgerecht reagieren – tun sie dies nicht, gefährden sie zwangsläufig ihre Konkurrenzfähigkeit. Ein Montagesystem für alle Eventualitäten zu rüsten wäre sowohl theoretisch als auch technisch möglich, aus wirtschaftlicher Sicht jedoch nicht sinnvoll. Hier setzt der Leitgedanke der wandlungsfähigen Montage ein: Darunter wird die Fähigkeit eines Montagesystems verstanden, bei Schwankungen der Losgrößen sowie Produkt- oder Variantenwechseln schnelle Anpassungen von Organisation und Technik vornehmen zu können. Aufgrund der oftmals hohen Investitionen und der langen Amortisationszeiten von automatisierten Montageanlagen werden in diesem Kapitel Wege aufgezeigt, die Wandlungsfähigkeit solcher Systeme zu optimieren.

## WÄNDLUNGSFÄHIGKEIT VON PRODUKTION UND MONTAGE

- 10 Wortwechsel
- 18 Modellierung und Digitalisierung in der Projektierung von Montageanlagen (ProMoA)
- 22 Wandlungsfähige Mikromontage am Beispiel einer Endoskopbaugruppe (MIKROKOMO)
- 26 Die Organisationsform der frei verketteten Montage (freeMoVe)
- 30 Wandlungsfähige Transportstrategien und Stationstechnik (freeMoVe)
- 34 Robotersysteme in der Intralogistik (ARIZ)





*„Der Weg zur wandlungsfähigen Produktion sollte iterativ und auf Basis konkreter, überschaubarer Projekte erfolgen.“*



**KERSTIN ROOK-WEILER**

Director Production & Logistics bei der ZF Friedrichshafen AG



**LUTZ STEINLEGER**

Manager Configuration and Digitalization Platforms bei der PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG

*„Eine wandlungsfähige Produktion braucht ein stringentes Anforderungsmanagement.“*



**THOMAS DERFUSS**

Geschäftsführer der LEA Medizintechnik GmbH

*„In der wandlungsfähigen Produktion ergeben sich neue Formen der Zusammenarbeit zwischen den Akteuren der industriellen Wertschöpfung.“*

# SEL



# WORTWECHSEL

*Wandlungsfähigkeit  
von Produktion  
und Montage*



## WARUM SOLLTE DIE PRODUKTION WANDLUNGSFÄHIG SEIN?

**KERSTIN  
ROOK-WEILER**

Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind Unternehmen mehr denn je gefragt, ihre Produktion konsequent auf die Kundenwünsche auszurichten und schnell auf sich ändernde Bedarfe – sowohl in Bezug auf Mengen als auch auf Varianten – reagieren zu können. Um unsere Produktion wandlungsfähig zu gestalten, beschäftigen wir uns mit unterschiedlichen Themen. Bei der Serienfertigung in Großanlagen verfolgen wir das Ziel, möglichst viele verschiedene Produkte mithilfe einer Anlage herzustellen. Bei der Konzeption und dem Design neuer Fertigungsanlagen ist die Flexibilität im Einsatz mittlerweile ein wesentliches Auslegungskriterium. Aber auch in der Prototypenfertigung wollen wir agiler werden und neue Ideen zügiger als bisher in Modelllösungen überführen.

Die ZF Friedrichshafen AG ist ein Hersteller von Antriebs- und Fahrzeugtechnik.

**LUTZ  
STEINLEGER**

Auch wir richten unsere Produktion konsequent an den Wünschen unserer Kunden aus. Unser Ziel besteht darin, unsere Produkte von der Serie bis hin zur Losgröße 1 schnell und effizient gemäß den individuellen Kundenanforderungen fertigen zu können. Ohne flexible Fertigungsanlagen und -abläufe ist das nicht möglich. Eine weitere Motivation für eine wandlungsfähige Produktion ist die Möglichkeit, sich schneller an neue technologische Entwicklungen anzupassen. Die Technologieentwicklung verläuft immer schneller, sodass man nicht mehr von jahrzehntelangen Laufzeiten einer technisch weitgehend unveränderten Anlage ausgehen kann. Die Planung eines Produktionssystems muss daher auch die verkürzte Lebensdauer von Technologien berücksichtigen.

Die PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG ist ein Hersteller von Komponenten, Systemen und Lösungen für die Elektrotechnik, Elektronik und Automation.

**THOMAS  
DERFUSS**

Neben der Möglichkeit, auch kleine Stückzahlen effizient zu fertigen, versprechen wir uns von der wandlungsfähigen Produktion große Vorteile in Bezug auf die Qualität. Unabhängig von sich ändernden Anforderungen an das Produkt und an die Stückzahl bleibt diese in der wandlungsfähigen Produktion stets auf hohem Niveau. Im Rahmen des MIKROKOMO-Projekts ist es uns gelungen, das Tor zu einer automatisierten Produktion aufzustoßen und neue Arbeitsmethoden kennenzulernen. Sie versetzen uns in die Lage, neue Formen der Zusammenarbeit mit Partnern in der industriellen Wertschöpfungskette einzugehen.

Die LEA Medizintechnik GmbH entwickelt Sensortechnik, Messsonden und Softwarelösungen für die medizinische Diagnostik.



## WELCHE HERAUSFORDERUNGEN ERGEBEN SICH FÜR DIE ORGANISATION UND WIE LASSEN SIE SICH MEISTERN?

Die Organisation muss vor allem einen „Mind Change“ vollziehen, der Offenheit für Neues und die Bereitschaft zum Probieren als elementare Bestandteile der Unternehmenskultur etabliert. Das Management sollte diesen Prozess treiben und klarmachen, dass Wandlungsfähigkeit lebensnotwendig für die Zukunft des Unternehmens ist. Das schließt auch die Erkenntnis ein, dass Initialaufwände nötig sind und sich der Nutzen bestimmter Maßnahmen erst zu einem späteren Zeitpunkt zeigen wird.

Um den Veränderungsprozess erfolgreich zu gestalten, sollten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Anfang an eingebunden sein. Dazu bieten sich beispielsweise Workshops mit Werkern an, in denen neue Technologien und Abläufe vorgestellt, diskutiert und ggf. weiterentwickelt werden. Wichtig ist es zudem, dem Fertigungsteam den Zugang zu den neuen Technologien durch Schulungen sowie durch Assistenzsysteme und geeignete nutzerfreundliche Bedien-Interfaces zu erleichtern.

Insbesondere Entwickler sollten Denkschranken überwinden und ihre Produkte so gestalten, dass diese automatisiert und flexibel gefertigt werden können. Ein wichtiger Aspekt ist zudem, Konzepte zur Beschreibung von Fertigungsaufgaben zu entwickeln. Damit ist man in der Lage, diese Aufgaben auch an andere Unternehmen bzw. (neue) Partner in der Wertschöpfungskette auszulagern und damit selbst flexibler zu werden. Darüber hinaus spielt die Qualifizierung der Werker auch für uns eine wichtige Rolle.

## WAS WÜRDEN SIE UNTERNEHMEN EMPFEHLEN, DIE IHRE PRODUKTION WANDLUNGSFÄHIG GESTALTEN WOLLEN?

Man sollte sich zunächst überlegen, an welcher Stelle in der Produktion man was verbessern möchte. Damit legt man den Rahmen für die Wandlungsfähigkeit fest. Im nächsten Schritt geht es darum, konkrete und überschaubare Projekte zur Umsetzung zu definieren, mit denen man Schritt für Schritt und iterativ dem großen Ziel näherkommt. Wir haben z.B. in unserem Prototypenbau ein Pilotprojekt gestartet. Hier hat sich der 3-D-Druck als hilfreiche Maßnahme erwiesen, um Modelle schneller und effizienter zu fertigen. Ein weiterer wichtiger Aspekt zur erfolgreichen Einführung einer wandlungsfähigen Produktion ist ein fachübergreifendes Team, das den Prozess begleitet.

Für uns gibt es drei Erfolgsfaktoren: Als Erstes sollte man den Veränderungsprozess aktiv gestalten sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern die Motivation und die Notwendigkeit für die Veränderungen erläutern. Als Nächstes gilt es, ein stringentes Anforderungsmanagement zu etablieren. Das heißt, dass die Anforderungen bzw. die Spezifikation eines Produkts oder einer Anlage eindeutig dokumentiert sind. An diesen Anforderungen richtet sich die Fertigungssteuerung aus. Der dritte Punkt bezieht sich auf das iterative Vorgehen, das die Wandlungsfähigkeit in überschaubaren Schritten voranbringt und auch „Quick Wins“ ermöglicht.

Ich kann mich in vielen Punkten meinen Vorrednern anschließen. Sich auf etwas Neues einzulassen und bekannte Prozesse und Abläufe neu zu denken – das sind wichtige Voraussetzungen, um die Produktion flexibler und effizienter zu machen. Hierbei können Forschungsprojekte mit anderen Partnern wichtige Impulse geben. Zudem sollte die Entwicklungsabteilung in der Lage sein, Produkte so zu entwickeln bzw. zu gestalten, dass sie sich für eine automatisierte Fertigung eignen. Und mit Blick auf die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gilt es, zu kommunizieren, dass mit der Wandlungsfähigkeit Arbeit nicht wegfällt, sondern interessanter wird.



# „DIE WANDLUNGS- FÄHIGE PRODUKTION BESTEHT IN DER AUFHEBUNG DER ZEIT- LICHEN UND RÄUMLI- CHEN SYNCHRONISATION VERSCHIEDENER PROZES- SE UND RESSOURCEN.“

Prof. Dr.  
Robert H. Schmitt

## WANDLUNGSFÄHIGKEIT DER PRODUKTION AUS SICHT DER WISSENSCHAFT

Kernidee einer wandlungsfähigen Produktion ist die Aufhebung der zeitlichen und räumlichen Synchronisation verschiedener Prozesse und Ressourcen in der Produktion. Die wandlungsfähige Produktion ermöglicht eine effiziente Ressourcennutzung und neue Geschäftsmodelle auf der Basis kundenindividueller Produkte, erhöht die Resilienz eines Unternehmens und trägt so maßgeblich zu dessen Erfolg bei.

### Flexible Zuordnung zwischen Produkt und Produktionsschritten

Um wandlungsfähige Ressourcen optimal einsetzen zu können, muss die Zuordnung von Produkt und Produktionsschritten flexibel gestaltet sein. Dies gilt auch für deren Reihenfolge und Synchronisation sowie die eingesetzten Verfahren und Maschinen. Die Herausforderung für Unternehmen besteht in der technologischen Umsetzung in den Produktionsanlagen sowie der organisatorischen Realisierung innerhalb der unternehmensübergreifenden Wertschöpfungskette.

### Die wandlungsfähige Produktion besteht in der Auf- hebung der zeitlichen und räumlichen Synchronisation verschiedener Prozesse und Ressourcen

Die Bereitschaft, bestehende Paradigmen in der eigenen Produktion zu hinterfragen, ist Voraussetzung dafür, über bestehende Restriktionen hinweg neue Lösungen zu identifizieren. Dies erfordert Klarheit über die aktuelle und die erwartete Produktpalette sowie die möglichen Produktionsreihenfolgen und ist Voraussetzung für die Flexibilisierung der eingesetzten physischen Montageressourcen.

Für die Beherrschung dieser Systeme sind die Digitalisierung und die Vernetzung der Montage dringend erforderlich. Wenn die von verschiedenen Sensoren erzeugten multimodalen Daten mit Planungs- und Produktdaten verknüpft werden, entsteht der digitale Schatten des Montagesystems. Er bildet die Grundlage für die Beherrschung der Montage der Zukunft.



Prof. Dr.  
**ROBERT H.  
SCHMITT**

Leiter des Lehrstuhls für  
Fertigungsmesstechnik und  
Qualitätsmanagement am  
Werkzeugmaschinenlabor  
WZL der RWTH Aachen  
University

Der Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement beschäftigt sich mit der datengetriebenen Optimierung der Produktion durch Entwicklung geeigneter Sensortechnologien, produktionsintegrierter Fertigungsmesstechnik und Data-Analytics-Methoden im Qualitäts-, Innovations- und Verbesserungsmanagement.



## WETTBEWERBSFÄHIG DURCH FLEXIBLE PRODUKTION



Dr.  
**HÜSEYİN ERDOĞAN**

Leiter Technologie und Hochschulprojekte / Koordination Industrie 4.0 in der Business Unit Advanced Driver Assistance Systems der Conti Temic microelectronic GmbH

Die Conti Temic microelectronic GmbH gehört zum Continental-Konzern, der Technologien für die Mobilität der Menschen, den Transport ihrer Materialien und Stoffe sowie die Übertragung ihrer Daten herstellt.

„Fit for future“ – so könnte man die Motivation für eine wandlungsfähige Produktion zusammenfassen. Produzierende Unternehmen sind mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert, auf die sie flexibel reagieren müssen. Dynamische Lebenszyklen, eine wachsende Anzahl an Modellvarianten, komplexe Produkte und Technologien, anspruchsvolle Prozesse sowie immer individueller werdende Kundenwünsche mit immer kürzeren Entwicklungszeiten seien beispielhaft dafür genannt.

### Offene Unternehmenskultur ist gefragt

Die Unternehmen müssen nicht nur abteilungsübergreifend – von der Produktentwicklung über die Konstruktion bis hin zur Fertigung – flexibel reagieren und planen, sondern auch über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Das bedeutet auch, Lieferanten und den Kunden einzubeziehen und dessen Bedürfnisse als Motor für den Veränderungsprozess zu begreifen. Die Planung und Konzeption der wandlungsfähigen Produktion sollte alle Bereiche – von der Produkt- und Prozessentwicklung bis zu den Fertigungsanlagen – umfassen und über alle Hierarchien des Unternehmens betrieben werden. Neben einem koordinierten Vorgehen ist eine offene Unternehmenskultur erforderlich, die durch intensiven Austausch, Transparenz sowie durch Freiräume für Innovationen gekennzeichnet ist.

Hierbei ist vor allem das Management gefordert, die Innovationsfähigkeit des Unternehmens sicherzustellen und dafür Sorge zu tragen, neue Technologietrends in Prozesse einzugliedern und zeitgleich in marktfähige Produkte umzuwandeln. Nimmt man Innovationen aus dem Umfeld unzureichend wahr und vertraut nur auf die eigenen Stärken, läuft man Gefahr, den Anschluss zu verlieren und damit Wettbewerbsfähigkeit einzubüßen.



## BEWUSSTSEIN FÜR VERÄNDERUNGEN



Dr.  
**ARNE KOHRING**

Leiter des Standorts Warstein der Infineon Technologies AG

Die Infineon Technologies AG ist ein Anbieter von Halbleiterlösungen.

Durch die Globalisierung sind die Märkte sehr stark miteinander verknüpft. Dennoch ändern sich die Rahmenbedingungen für global agierende Produktionsunternehmen immer schneller. Zudem wird mit technologischen Megatrends wie der Elektromobilität auf den wachstumsbestimmenden Weltmärkten völlig unterschiedlich umgegangen – während umfassende Anreizprogramme auf dem chinesischen Markt kurzfristig großen Bedarf generieren, läuft die Entwicklung in Europa eher schleppend.

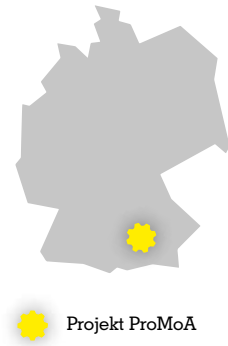
### Flexibilität startet in den Köpfen

Deshalb nimmt die Aussagefähigkeit von Prognosen immer mehr ab. Unternehmen sind gefragt, ihre Planungen möglichst flexibel zu gestalten und mit einer wandlungsfähigen Produktion zu reagieren. Um das zu erreichen, müssen Management und Belegschaft an einem Strang ziehen. Das Management muss die Unternehmensstrategie in Zeiten unvorhersehbarer Märkte erklären und die Notwendigkeit von Veränderungen und Flexibilität glaubhaft vermitteln können. Dies gelingt nur durch eine offene und transparente Kommunikation sowie durch authentisches Handeln.

### Modulare Produkte, flexible Betriebsmittel und harmonisierte Schnittstellen

Technisch gesehen, bilden flexible Betriebsmittel eine wichtige Grundlage für die wandlungsfähige Produktion. So sollten möglichst wenige Fertigungsschritte starr miteinander verkettet sein, sodass Prozesse jederzeit geändert und Anlagen neu konfiguriert werden können. Damit das möglich ist, sollten Komponenten und Anlagen über harmonisierte Schnittstellen verfügen. Die Wandlungsfähigkeit schließt auch das Produktdesign mit ein. Die Forschungs- und Entwicklungsabteilung spielt dabei eine Schlüsselrolle. Sie kann durch die Entwicklung eines modularen Designs, das auf einem Baukastenprinzip basiert, einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung der Produktion leisten. Das modulare Produkt erlaubt es, starr und flexibel miteinander verkettete Fertigungsschritte zu kombinieren.





# MODELLIERUNG UND DIGITALISIERUNG IN DER PROJEKTIERUNG VON MONTAGEANLAGEN

Dr. Jens Müller (XENON Automatisierungstechnik GmbH)

Mithilfe eines Planungstools lassen sich die Anforderungen an eine Montageanlage digital anhand von Technologiemodulen spezifizieren. Anlagenhersteller und -betreiber können damit ihre Planungsprozesse verkürzen und Kosten sparen.

Unternehmen müssen in der Lage sein, durch die flexible Nutzung von Maschinen und Montageanlagen schnell auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Die Planung von Montageanlagen für neue Produkte ist gegenwärtig ein aufwendiger, iterativer und größtenteils manueller, nicht digitalisierter Prozess. Digital verfügbare Aussagen über die technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit bestehender bzw. in Planung befindlicher Anlagen wären dabei jedoch äußerst wünschenswert. Bei dem Versuch, die Flexibilität und Modularität heutiger Montagesysteme umfassend zu berücksichtigen, stoßen herkömmliche Vorgehen der Montageplanung jedoch schnell an ihre Grenzen. Sie können die Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten - die z.B. bei variantenreichen, mechatronischen Produkten vorhanden sind - nicht ausreichend abbilden.

## Ganzheitliche und durchgängige Planung

Daher sind ganzheitliche Planungstools gefragt, die den Planungsprozess sowohl beim Betreiber als auch beim Hersteller von Anlagen mithilfe unterschiedlicher Assistenzfunktionen unterstützen. Dazu haben die ProMoA-Projektpartner eine Softwarelösung erarbeitet, die eine optimale Interaktion zwischen Anlagenbauer und -betreiber auf Basis einer gemeinsamen Planungsumgebung sicherstellt. Die dafür erforderliche Softwarearchitektur wird im Beitrag „Automatisierte Montageanlagenplanung“ in Kapitel 2 beschrieben.

Ein wesentlicher Schritt zur Planung in einer gemeinsamen Plattform ist die standardisierte Modellierung der Anforderungen des Anlagenbetreibers und des Anlagenbauers. Diese Anforderungen hängen von Produkt, Prozess und Ressourcen ab. Zudem sind im Planungs- und Bestellprozess noch nicht alle Anforderungen und deren etwaige Abweichungen voneinander bekannt. Ein Ziel bei der Modellierung der Anforderungen für die digitale Spezifikation besteht daher darin, diese Unschärfen in einer frühen Planungsphase zu reduzieren.

Den Startpunkt der Arbeiten bildete die Analyse aktueller und zukünftiger Herausforderungen im Bestell- und Planungsprozess von Montageanlagen. Die daraus entstandene „User Story“ umfasst zwei relevante Planungsfälle: die Neuplanung und die Umplanung von Anlagen. Im Fall der Neuplanung einer Montageanlage lag der Fokus auf der Erstellung der digitalen Lösungsalternativen. Dieser Vorgang ist mit einer Erstellung eines Angebots für Anlagen vergleichbar. Ausgehend von einer digitalen Spezifikation, welche die Anforderungen an die Anlage sowie die geforderten Montageprozesse beschreibt, erhält man digitale Lösungsalternativen für alternative Anlagenkonzepte, Informationen hinsichtlich relevanter Kennzahlen wie z.B. Taktzeit, Fläche und Preis sowie mögliche Anlagenlayouts.

Im Falle der Umplanung existiert bereits eine reale Anlage beim Anlagenbetreiber, die für die Montage einer neuen Produktvariante verändert werden soll. Die Planungssoftware dient dabei im ersten Schritt dazu, die Eignung der bestehenden Anlage hinsichtlich der vom Produkt geforderten Montageprozesse zu prüfen (Eignungsprüfung). Der Fokus liegt folglich auf der Feststellung notwendiger Änderungen am Produktionssystem, die

in die digitale Spezifikation überführt werden. Die Spezifikation dient - analog zur Neuplanung - als Planungsgrundlage für den Anlagenbauer. Dieser erstellt basierend darauf digitale Lösungsvorschläge und übergibt sie an den potenziellen Kunden bzw. Anlagenbetreiber. Das Konzept zum benötigten zentralen Datenmanagement wird in Bild 1 zusammengefasst.

In Bild 2 sind die verschiedenen Planungsschritte für einen allgemeinen Anwendungsfall abgebildet. Der Schritt 2 betrifft dabei nur den Fall der Umplanung und wird bei der Neuplanung einer Anlage übersprungen. Die Schritte 3 bis 8 sind dagegen im Fall einer Umplanung optional und werden abhängig vom Ergebnis der vorherigen Schritte ausgeführt oder nicht durchlaufen.

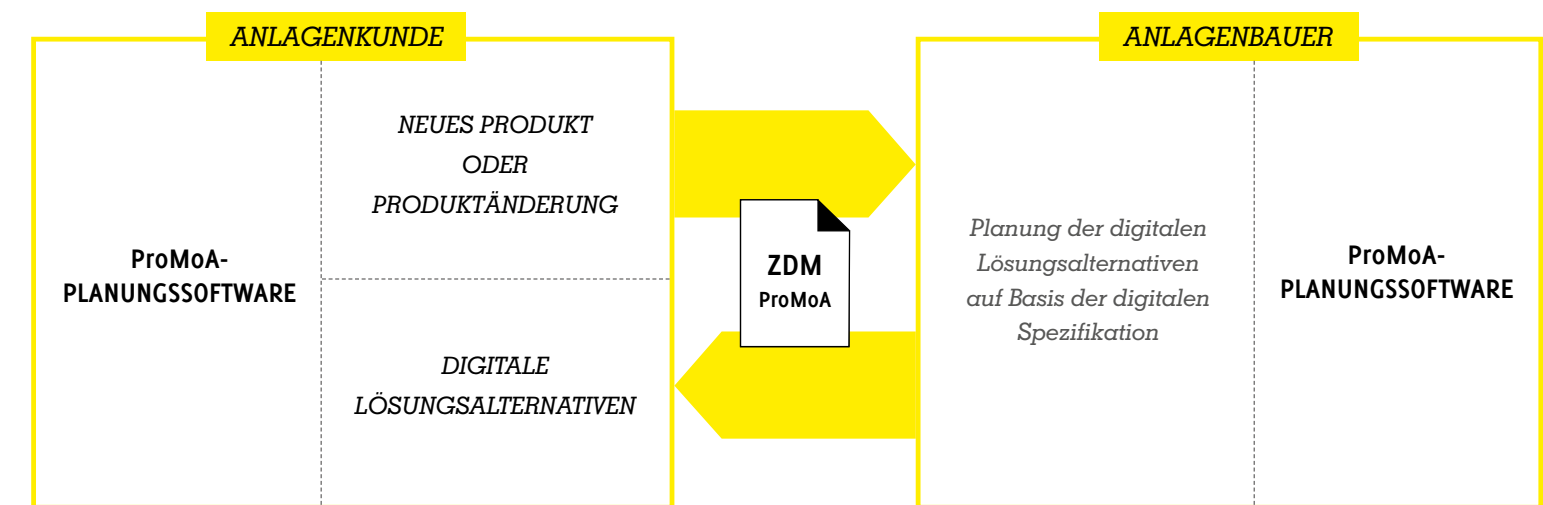


Bild 1: Zentrales Datenmanagement zwischen Anlagenbauer und -kunde

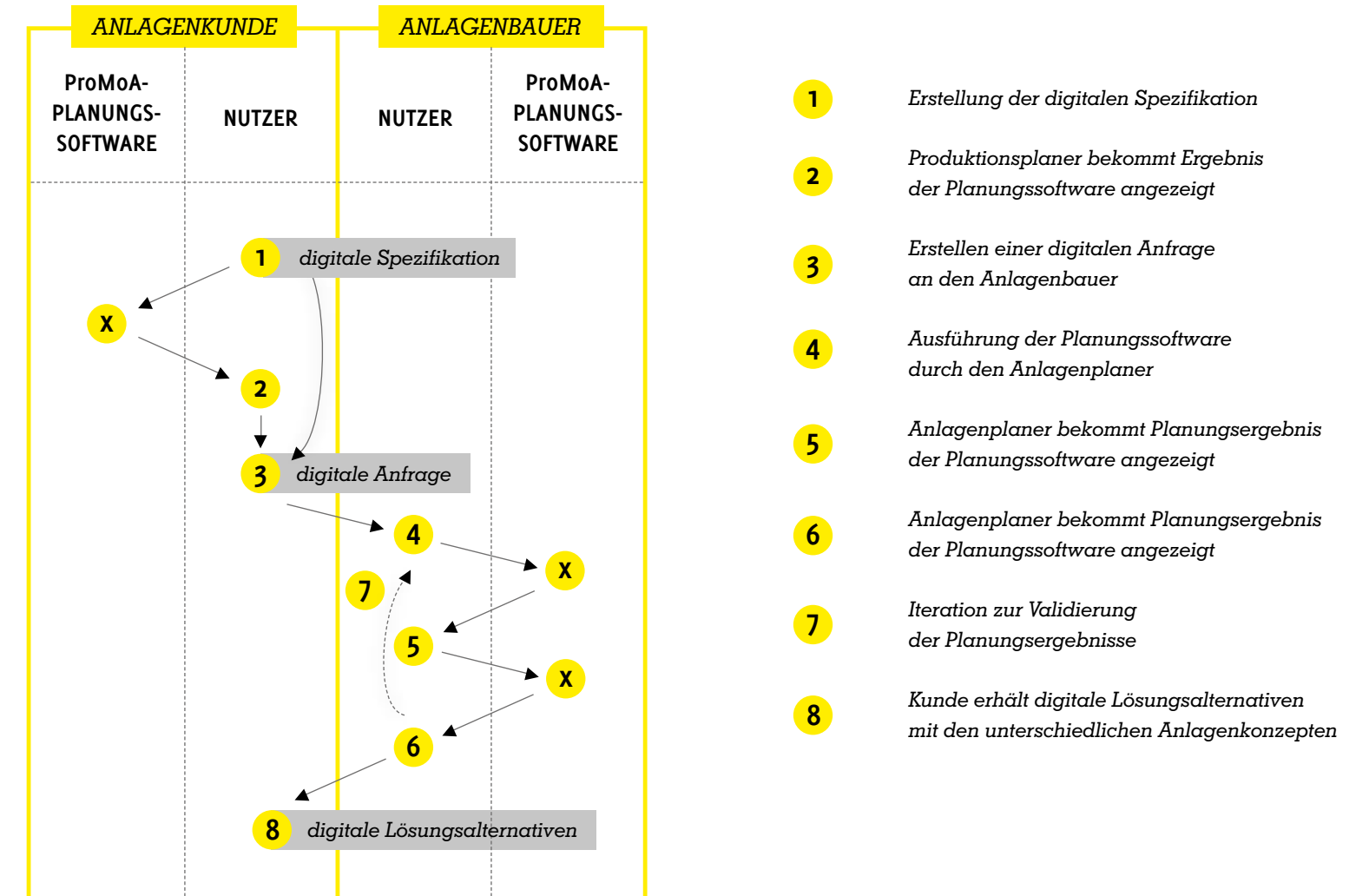


Bild 2: Übersicht über die Sequenz der Planungsschritte

### Technologiemodule zur Anlagenspezifikation

Die produktbasierte Planung erfolgt mithilfe neu entwickelter wandlungsfähiger Technologiemodule, die dem Anlagenbetreiber bei der Neu- und Umplanung von Montageanlagen bereits in einer frühen Phase der Anlagenspezifikation als Datenbasis zur Verfügung stehen. Voraussetzung hierfür ist die hinreichend genaue digitale Beschreibung der Module basierend auf Modulkonzepten. Sie nutzen sowohl dem Anlagenbauer als auch dem Anlagenbetreiber, weil sie den Planungsprozess schneller und kostengünstiger machen.

Um eine hohe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit auf Ebene der Montagelinien und -stationen zu ermöglichen, sollten die Module so konzipiert sein, dass sie jederzeit wiederverwendbar für Neu- und Umplanungen sind. Dazu ist es notwendig, Aspekte der Skalierbarkeit- und/oder Veränderbarkeit von Modulen und deren Grenzen zu betrachten und modellhaft standardisiert zu beschreiben. Des Weiteren müssen bekannte Leistungsmerkmale als Fähigkeiten systematisch und parametrisch beschrieben werden, um Module bei Bedarf flexibel auf bestehende Problemstellungen zu adaptieren. Es ist erforderlich, bestimmte Eigenschaften digital zu erfassen und deren Verknüpfung verständlich aufzuzeigen. Zu diesen Eigenschaften zählen die angestrebte Lebensdauer und anpassbare, definierte Schnittstellen - aus Sicht der Mechanik und Elektrik - zum Austausch von Daten bzw. zur Integration in das Produktionsumfeld verschiedener Kunden aus verschiedenen Branchen.

Zu jedem Prozessschritt in der digitalen Spezifikation werden Technologiemodule vorgeschlagen, die einem lokalen Betriebsmittel entsprechen. Die Auswahl der Technologiemodule ist abhängig davon, wie sie sich für die Durchführung des Prozessschrittes eignen. Der Anlagenplaner hat die Aufgabe, manuell aus den vorgeschlagenen Betriebsmitteln die aus seiner Sicht besten auszuwählen

### Kürzere Planungsprozesse und -zeiten

Mit diesem Tool steht Unternehmen eine Methodik zur Verfügung, die eine automatische Planung und Absicherung von Montageanlagen basierend auf Produktdaten ermöglicht. Die Wirksamkeit der Methode konnte mithilfe unterschiedlicher Demonstratoren nachgewiesen werden. Die Software-Demonstratoren zeigen die neuartigen Werkzeuge zur automatischen Anlagenentwicklung, wie etwa die automatische Analyse von Produktdaten sowie die produkt- und prozessbasierte Auswahl von Ressourcen. Die hiermit erzielten Ergebnisse lassen sich mithilfe eines Hardware-Demonstrators - in Form einer prototypischen, produktbasiert geplanten Montageanlage - evaluieren und präsentieren.

Die erweiterbare Systemarchitektur (siehe Beitrag „Automatisierte Montageanlagenplanung“ in Kapitel 2) und Einführungsleitfäden sorgen zudem für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Unternehmen und andere Montageprozesse. Die ProMoA-Projektpartner erwarten, dass sich durch den Einsatz des neuen Tools die Planungsprozesse von Montageanlagen um bis zu 50 Prozent verkürzen und die Planungskosten um ca. 30 Prozent reduzieren.

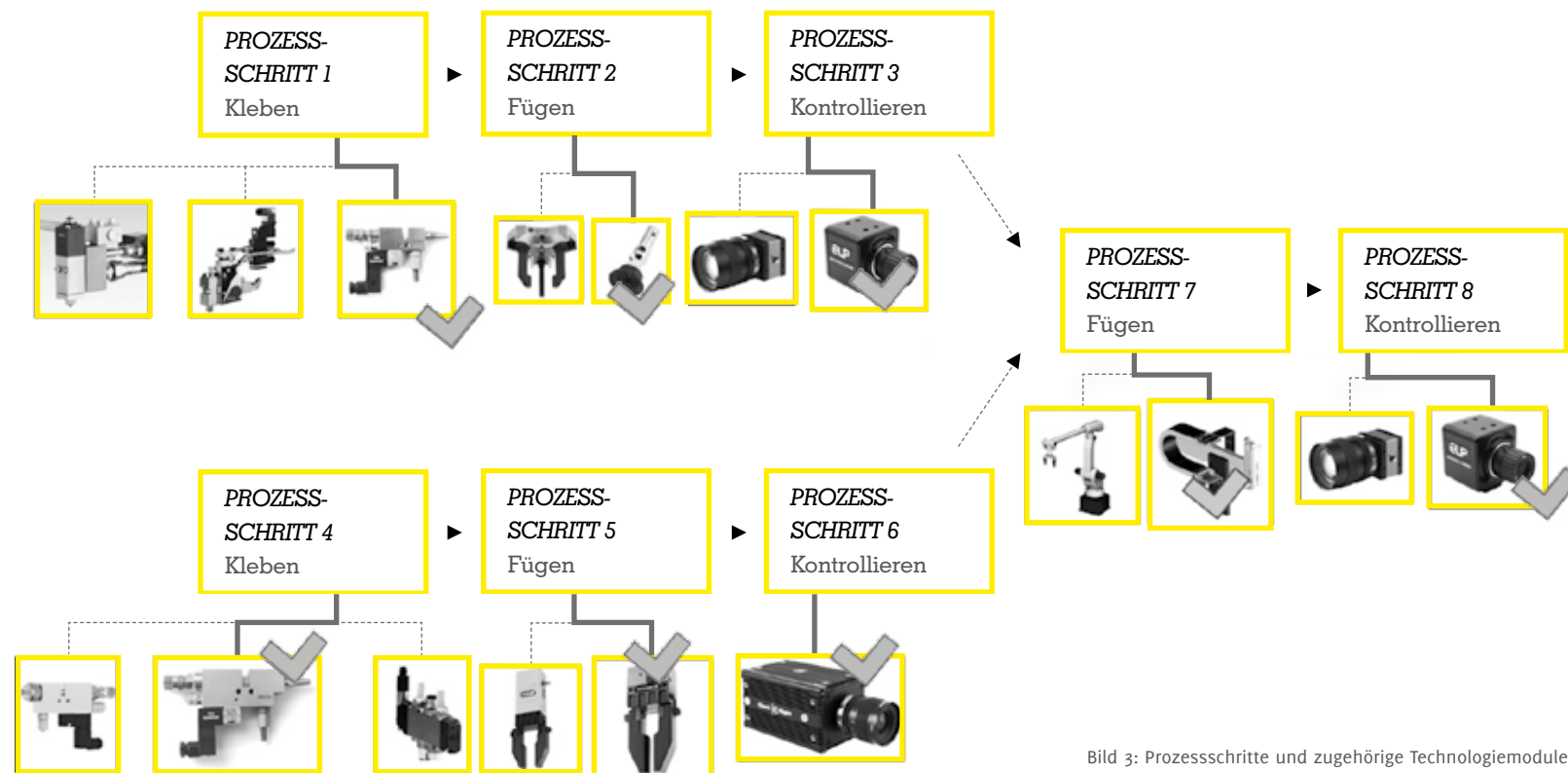


Bild 3: Prozessschritte und zugehörige Technologiemodule



Bild 4: Anlage zur Montage und Prüfung elektroakustischer Wandler, Quelle: XENON Automatisierungstechnik GmbH

### Herausforderungen für die Zukunft

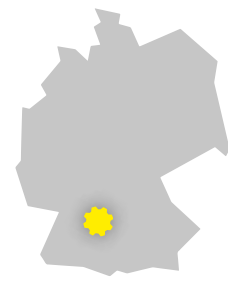
Trotz der vielversprechenden Projektergebnisse ist es bis zur Realisierung eines umfänglich nutzbaren Werkzeugs zur (teil-) automatisierten Anlagenplanung noch ein weiter Weg. Dies liegt vor allem an der Schwierigkeit, den hochkomplexen Prozess der Planung einer auf ein bestimmtes Produkt zugeschnittenen Montageanlage (in der Regel Losgröße 1) auf allgemeingültige Basiselemente (wandelbare Technologiemodule) herunterzubrechen. So lassen sich geforderte Randbedingungen, wie z.B. optimierte Taktzeiten von unter einer Sekunde, oft nur durch Feintuning an vielen unterschiedlichen Teilbereichen der Anlage erreichen. Diese Aufgabe ist nach wie vor nur durch erfahrene Konstrukteure lösbar.

Durch die Vielfältigkeit der möglichen Beziehungen zwischen einzelnen Technologiemodulen (räumlich wie funktional) entsteht eine hochkomplexe und umfangreiche Lösungsraum-

Matrix, die nur bedingt durch automatisierte Algorithmen beherrschbar ist. So muss eine Kompatibilität der ausgewählten Technologiemodule über die Prozessschritte hinweg gegeben sein. Über die Festlegung der technischen Randbedingungen hinaus müssen oft auch noch Kostenentscheidungen getroffen werden, die bestimmte Lösungen eventuell von vornherein ausschließen.

Durch eine erhöhte Rechenleistung ließen sich die angeführten Hindernisse teilweise umgehen, jedoch ist diese im Tagesgeschäft derzeit (noch) nicht praktikabel einsetzbar. Das Verfahren zur produktbasierten Planung von Montageanlagen kann daher zum jetzigen Zeitpunkt und bis auf Weiteres nur teilautomatisiert durchgeführt werden. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um die vollautomatisierte Planung - z.B. auch unter Nutzung von Künstlicher Intelligenz - zu ermöglichen.





Projekt MIKROKOMO

# WANDLUNGSFÄHIGE MIKROMONTAGE AM BEISPIEL EINER ENDO- SKOPBAUGRUPPE

Lutz Labusch (SCHÖLLY Fiberoptic GmbH)

**Ein modulares Mikromontagekonzept, das auf standardisierten Komponenten aufbaut, ermöglicht im Vergleich zur manuellen Montage eine höhere Qualität und kürzere Prozesszeiten.**

Die fortschreitende Miniaturisierung macht es auch im Bereich endoskopischer Systeme möglich, mehr Funktionen zu integrieren, und erlaubt neue Aufbaukonzepte. Zugleich steigen aber die Anforderungen an Toleranzen, an die Ausrichtung von Komponenten zueinander und an das Handling miniaturisierter Komponenten, sodass maschinelle Fertigungsschritte notwendig werden. Da die geringen Stückzahlen jedoch aus Kostengründen die Produktion von vollautomatischen Produktionssystemen nicht rechtfertigen, sind neue Lösungen zur Mikromontage solcher Systeme gefragt. Ein Ansatz hierzu ist das Konzept wandlungsfähiger Maschinen, die flexibel aufgebaut sind und sich mit verschiedenen Werkzeugen für Standardprozesse bestücken und durch Spezialmodule für Sonderanwendungen ergänzen lassen. Dadurch ist es möglich, mit einer variablen Maschine verschiedene Produkte zu fertigen und so die Investitionskosten gering zu halten.

Im Projekt MIKROKOMO haben die Projektpartner ein Mikromontagekonzept für eine produktnahe Baugruppe eines modernen endoskopischen Systems weiterentwickelt und getestet. Die Baugruppe besteht aus einer miniaturisierten Kamera, die es einem Arzt ermöglicht, minimalinvasiv - durch Einführen eines Endoskops in den Körper - zu operieren. Die Kamera erfordert die Mikromontage von vier Bauteilen zu einem Gesamtsystem.

Zu jedem dieser Bauteile gehören separate Handling-, Ausrichte- und Fügeprozesse. Eine große Herausforderung dabei ist, dass die Baugruppe für die manuelle Fertigung und damit nicht automatisierungsgerecht ausgelegt wurde. Sobald das Produkt erfolgreich ist, braucht es automatisierte Fertigungsprozesse, um die gestiegene Nachfrage effizient zu decken.

## Die Montageaufgabe

Die zu montierende Gesamtbaugruppe besteht aus vier Bauteilen:

- CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor)-Bildsensor auf einem ca. 400 mm langen Printed Circuit Board (PCB)
- Linse mit einem Durchmesser von 3 mm
- Metallring zum Schutz der Linse
- Objektiv mit einer Länge von 10 mm und einem Durchmesser von 5 mm

Zunächst müssen die Linse und der Metallring auf den Bildsensor montiert werden. Hierzu ist es notwendig, Klebstoff aufzubringen und dann die beiden Einzelteile auszurichten. Nach dem Aushärten des Klebers wird das Objektiv in Position gebracht und anschließend aktiv ausgerichtet. Wenn das Ausrichten erfolgreich war, wird auch das Objektiv mittels Kleben endgültig fixiert. Die jeweiligen Schritte finden bisher weitestgehend manuell auf eigenen Vorrichtungen statt. Bild 1 stellt die Prozessschrittabfolge zur Montage der optischen Baugruppe dar.

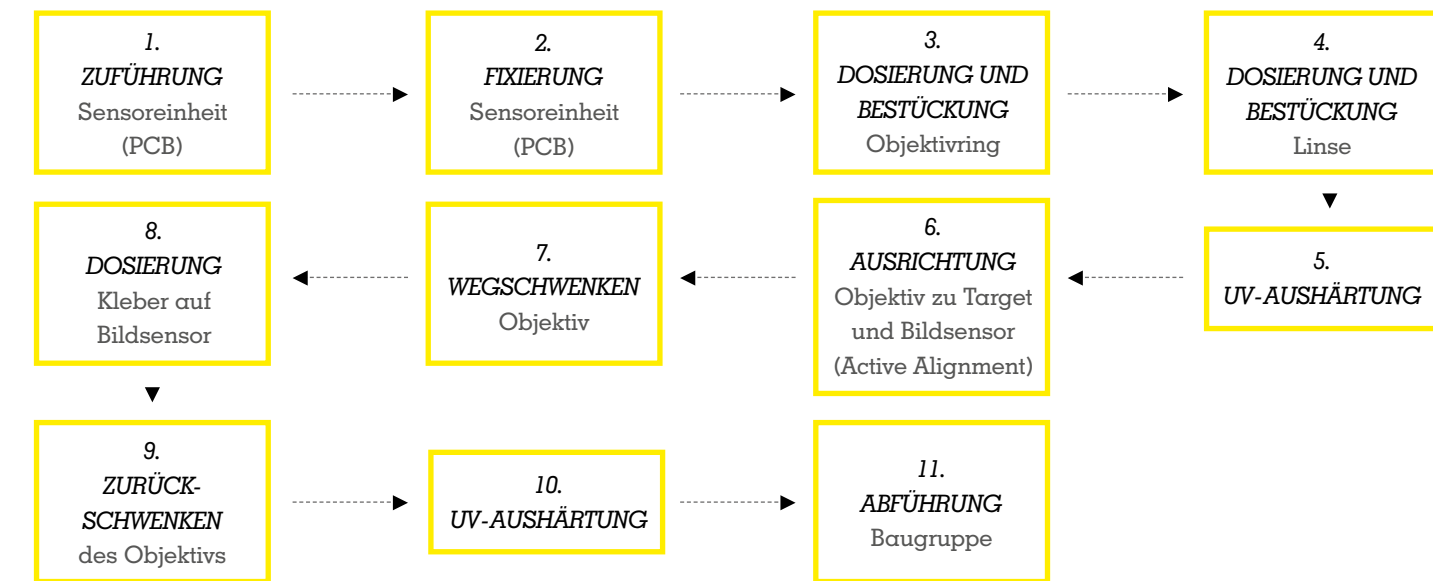


Bild 1: Prozessschritte zur Fertigung der optischen Baugruppe

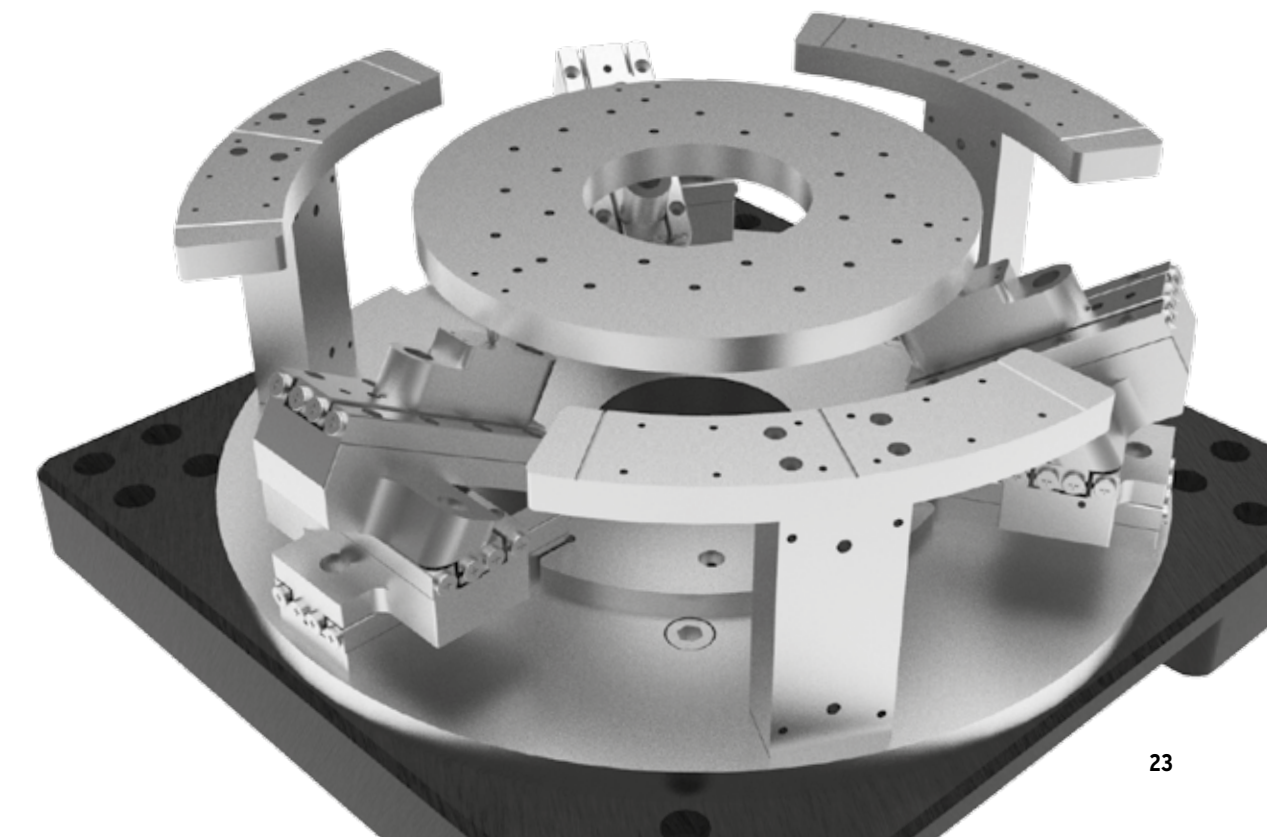
## Die Lösung

Ziel war es, diesen Demonstrator auf einer Mikromontageanlage automatisiert zu fertigen. Hierzu musste die theoretische Prozessschrittabfolge aus Bild 1 in die Realität umgesetzt werden. Als Basis dafür diente das im Projekt entwickelte Beschreibungssystem, das die Vorauswahl der für die einzelnen Teilprozesse notwendigen Komponenten ermöglicht. Sind Prozesse nicht über Standardkomponenten realisierbar, nutzt das Beschreibungssystem Black Boxes, die dem Nutzer gleichzeitig signalisieren, dass hier Entwicklungsbedarf besteht. So kann frühzeitig eine Modul-Neuentwicklung gestartet werden. Dies war in diesem Fall notwendig. Ein neu entwickelter Active-Alignment-Algorithmus - der das Objektiv in sechs Freiheitsgraden automatisch ausrichten kann - benötigte spezielle, noch nicht vorhandene Hardware. Hierzu wurde ein geeigneter

6-Achs-Manipulator (siehe Bild 2) ausgewählt und als neues Prozessmodul in die Anlage integriert.

Als Basissystem wurde OurPlant X Tec - ein Produkt des MIKROKOMO-Projektpartners Häcker Automation GmbH - als wandelbare Plattform zur Mikromontage ausgewählt. Diese Maschine verfügt über ein System aus Linearachsen, die den Arbeitsraum in der X- und Y-Ebene abfahren können und so innerhalb einer Einhausung einen definierten Arbeitsbereich abdecken können. Gleichzeitig bietet die Einhausung Schutz vor Stäuben und anderen Umwelteinflüssen, die innerhalb des optischen Systems Fehler verursachen können. Die Steuerelektronik und sämtliche Bedienelemente sind in die Anlage integriert. Dank des modularen Konzepts ist es möglich, eine Vielzahl von verschiedenen Mess- und Bearbeitungsköpfen zu integrieren und so einen individuellen Fertigungsablauf zu realisieren.

Bild 2: 6-Achs-Manipulator auf einer Trägerplatte zur Integration in die Häcker-Anlage, Quelle: Häcker Automation GmbH







### Zuführung, Handling und Positionierung

Die Zuführung der Komponenten Bildsensor, Linse, Objektivring und Objektiv erfolgt über Magazine, in denen sich Komponenten in definierter Lage und für das Handling ausreichend geschützt zuführen lassen.

Das Handling der Komponenten umfasst die Bauteilaufnahme aus dem jeweiligen Magazin mit einem Vakuumgreifer, die Referenzierung bzw. Zuordnung mit einer Unterseitenkamera und den Transport zum Montageort. Da die Komponenten aus verschiedenen Materialien gefertigt sind und jeweils individuelle Anforderungen an die geometrische Form des Vakuumgreifers stellen, werden individuelle Greifer für jede Komponente verwendet. Ein automatischer Wechsel der Werkzeuge in der Anlage ist deshalb für anspruchsvolle Aufgaben der Mikromontage unbedingt notwendig. Die Referenzierung der am Vakuumgreifer hängenden Komponenten an der Unterseitenkamera ist für hochgenaue Montageprozesse vorteilhaft, da dadurch der Fehler, der durch die Bauteilaufnahme mit dem Vakuumgreifer entsteht, aus der Toleranz- bzw. Fehlerkette entfernt wird, was zu einer höheren Genauigkeit bei der Montage führt. Die Montage erfolgt dabei unter Berücksichtigung der tatsächlichen Position der zu montierenden Komponente am Greifer. Die Positionierung ist der kritischste Schritt, um ein optimales Montageergebnis zu erzielen. Um sie so gut wie möglich zu gestalten, kommen zwei Ansätze zur Anwendung:

- 1 passive Ausrichtung der Komponenten** zueinander anhand von sichtbaren Strukturen, wie z.B. dem Rand der Linse, der Kante des Bildsensors und dem Rand des Objektivrings. Hierbei ist die erreichbare Genauigkeit sowohl von der Qualität der unter den Kameras der Mikromontageanlagen erkennbaren Strukturen der Komponenten als auch von der Achsgenauigkeit der Mikromontageanlagen abhängig. Aus der Reihenfolge aller Montageschritte ergibt sich eine Toleranzkette, die bei der Betrachtung von einer Serie von Aufbauten zu einer Streuung der Endpositionen der aufgebauten Komponenten führt. Dies ist üblicherweise bei der konstruktiven Auslegung der zu montierenden Komponenten und des Gesamtsystems zu berücksichtigen.
- 2 aktive Ausrichtung der Komponenten** zueinander in einer Regelschleife mit ständiger Rückkopplung eines oder mehrerer Zielparameter. Hierbei wird das Objektiv in die Nähe der Endposition gebracht und dann mithilfe eines Algorithmus laufend die Bildqualität eines bekannten Bildes bewertet. Aus dieser Bewertung lassen sich geometrische

Korrekturdaten ermitteln. Anschließend wird anhand dieser Korrekturdaten das Objektiv in sechs Achsen so bewegt, dass sich die Bildqualität verbessert. Dies wird so lange gemacht, bis eine hinreichende Bildqualität erreicht ist. Jedes einzelne montierte Objektiv kommt dadurch dem idealen Zustand einer optimalen Ausrichtung möglichst nahe - trotz aller vorhergehenden Toleranzen bei der Herstellung der Einzelkomponenten. Dadurch ist die aktive Ausrichtung der passiven überlegen. Gleichzeitig erfordert sie aber auch einen größeren Aufwand. So ist bei der Auslegung der Komponenten zu berücksichtigen, dass die Freiheitsgrade der Bewegung, die bei der aktiven Ausrichtung genutzt werden sollen, auch auf mechanischer Ebene vorhanden sind.

### Neuer Montageablauf

Zur Mikromontage der Baugruppe sind folgende Schritte präzise durchzuführen:

- Montage der Linse auf dem Bildsensor
- Montage des Objektivrings auf dem Bildsensor
- Montage des Objektivs auf dem Objektivring mit aktiver Ausrichtung

Die Linse und der Objektivring werden senkrecht von oben auf den Bildsensorchip montiert, wodurch die Klebstoffe und die Komponenten einfach handhabbar sind. Für die einzelnen Komponenten kommt jeweils ein anderer Klebstoff zum Einsatz, weshalb zwei Dosiersysteme für die Klebstoffe erforderlich sind. Durch die Verwendung von schnell aushärtendem Klebstoff lässt sich das Zwischenprodukt nach der Montage der beiden Komponenten sofort weiterverarbeiten.

Im ersten Schritt zur Montage der Linse auf dem Bildsensorchip wird die genaue Lage des Bildsensorchips auf dem PCB bestimmt. Dann wird der Klebstoff in einer definierten Menge appliziert. Dies ist ein besonders kritischer Prozess, da die Klebeschicht absolut fehlerfrei und homogen sein muss, da sie direkt im optischen Pfad liegt. Im dritten Schritt wird dann die Linse in ihren Magazinen detektiert. Hierbei stellen die optische Funktion und das Material der Linse eine Herausforderung dar, weshalb möglichst kontrastreiche Strukturen zur automatischen Erkennung nötig sind. Nach der Erkennung wird die Linse mittels des passenden Vakuumgreifers aufgenommen und im Anschluss an ihre Montageposition gebracht. Mithilfe einer passiven Ausrichtung erfolgt nun die Positionierung. Im letzten Schritt wird der Kleber fixiert. Nun kann das nächste Teil montiert werden.



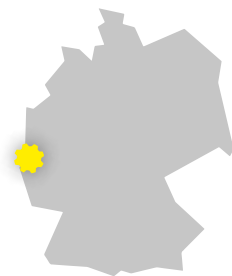
Die Montage des Objektivringes verläuft analog zur Linse. Die Erkennung ist hierbei weniger schwierig, entscheidend ist vielmehr die Absetzgenauigkeit, da der Ring über die Linse gestülpt werden muss. Hier erweist sich die Referenzierung über die Rückseitenkamera als äußerst nützlich. Damit ist es möglich, den Ring fehlerfrei über die Linse zu setzen. Der bereits aufgebrachte Kleber wird nun abermals fixiert. Im nächsten Schritt wird das so entstandene Zwischenprodukt aus Bildsensorchip, Linse und Objektivring um 90 Grad in die Senkrechte geschwenkt. Dies ist notwendig, um genügend Raum für den Strahlengang zwischen Bildsensorchip mit Linse, Objektiv und einem Bildschirm mit dem Bild zur Bewertung der Bildqualität zur aktiven Ausrichtung der Kamerasysteme zu haben, da der Arbeitsabstand der zu montierenden Optik größer ist als die Bauhöhe der Montageanlage. Die Bauteilhalterung für das PCB mit dem Bildsensorchip verfügt zusätzlich über eine elektrische Kontaktierung des PCB, um die Bildsignale während des Montageprozess auswerten zu können. Diese Signale bilden die Grundlage, um den oben beschriebenen geschlossenen Regelkreis für das aktive Ausrichten technisch umzusetzen. Das Objektiv wird unter Verwendung eines passenden Greifers aus seinem Magazin aufgenommen und in eine geeignete Initialposition innerhalb des oben beschriebenen Aufbaus aus Bildsensorchip, Linse und Objektivring bewegt. Nun beginnt die aktive Regelung des Ausrichtens, wobei die dabei erreichte Abbildungsqualität laufend bewertet wird. Aus den gemessenen Werten für die Abbildungsqualität werden mittels Software die notwendigen Korrekturdaten bestimmt und die Position des Objektivs entsprechend korrigiert. Sobald der Regelkreis eine ausreichend gute Position mit hinreichender optischer Abbildungsqualität erreicht hat, wird die Position des Objektivs nicht weiter verändert.

Nun wird die Position des Objektivs gespeichert und das Objektiv weggefahren, um einen möglichst großen Arbeitsraum für das Applizieren des Klebers zu schaffen. Mittels eines schnell aushärtenden Klebstoffs wird das Objektiv dann, nachdem es wieder in die gespeicherte Position gefahren wurde, in dieser Position dauerhaft fixiert.

Besonders vorteilhaft ist es, dass die Vorgehensweise eine (automatische) Messung der Kameraqualität beinhaltet. Diese elektronische Funktionsprüfung des Kamerachips führt zu einer höheren Qualität. Nach Abschluss des Montageprozesses wird der Bildsensorchip mittels eines Vakuumgreifers aus dem Montagebereich entfernt und dem entsprechenden Magazin zugeführt. Der Prozess kann nun von Neuem beginnen.

### Fazit

Durch den definierten Arbeitsablauf mit den Schritten „Erstellen einer Aufgabenbeschreibung“, „Ableitung der notwendigen Teilprozesse“, „Auswahl und Neuentwicklung der benötigten Hardwarekomponenten“ und „Entwicklung und Evaluation des Montageablaufs“ haben die MIKROKOMO-Projektpartner ein Automatisierungskonzept für ein Mikromontageprojekt entwickelt. Am Beispiel endoskopischer Bauteile konnten sie zeigen, dass das Konzept eine konstantere Qualität und kürzere Prozesszeiten im Vergleich zur manuellen Montage ermöglicht. Die Verwendung modularer Anlagen und die Abbildung der Teilprozesse auf bestehenden standardisierten Komponenten ermöglichen es außerdem, auf einer Anlage verschiedene Montageaufgaben durchzuführen. Durch eine Umrüstung einiger weniger Module kann schnell eine andere Montageaufgabe auf derselben Anlage bearbeitet werden.



Projekt freeMoVe

# DIE ORGANISATIONSFORM DER FREI VERKETTETEN MONTAGE

Guido Hüttemann, Amon Göppert (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL); Dennis Grunert, Sven Jung (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT); Kerstin Rook-Weiler, Pascal Lettmann (ZF Friedrichshafen AG); Achim Cordes (Infineon Technologies AG)

**Mit der Möglichkeit, ein Produkt ohne zeitliche und räumliche Restriktionen zu fertigen, zeigt die freie Verkettung neue Wege auf, Produktionsabläufe flexibler und effizienter zu gestalten.**

Die Fähigkeit von Montagesystemen, sich an sich ändernde Rahmenbedingungen anzupassen, wird als Wandlungsfähigkeit bezeichnet. Diese Fähigkeit wird maßgeblich durch die Wahl der Montageorganisationsform bestimmt. Im Projekt freeMoVe haben die Projektpartner mit der „freien Verkettung“ eine neue Organisationsform für die Montage entwickelt.

**Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sind Wettbewerbsvorteile**

Produktionsanlagen müssen flexibler und wandlungsfähiger werden, weil die Produktvarianz zunimmt (durch eine Individualisierung der Produkte) und der Innovationsdruck steigt (durch die zunehmende Anzahl weltweiter Wettbewerber). Um die Produktion an diese Rahmenbedingungen anzupassen - z.B. durch die Integration neuer Prozesse oder strukturelle Anpassungen der Stationsreihenfolge -, ist es erforderlich, Montagesysteme häufig zu rekonfigurieren und zu skalieren. Dies stellt aktuelle Systeme vor große Herausforderungen, da die in diesen eingesetzten Montageressourcen durch Transportsysteme effizient, aber starr miteinander verkettet sind.

Dies führt zu Defiziten bei Auslastung, Taktzeitpreizung und Flächenvorhalt, Produktionsunterbrechungen beim Umbau sowie eingeschränkten Möglichkeiten der Investitionsabstufung. Die Verwendung einer systemübergreifenden Taktzeit und die starre

Verbindung von Montageressourcen untereinander werden als starre zeitliche bzw. räumliche Verkettung bezeichnet. Die zeitliche Verkettung bedingt eine sinkende Auslastung der Montageressourcen infolge von Taktzeitschwankungen, während die räumliche Verkettung zu Stillständen bei Rekonfigurationen und Umbauten bei Skalierungen - also Änderungen des Produktionsvolumens - führt.

**Jedes Produkt hat eine eigene Auftragsroute**

Das Konzept der frei verketteten Montage hebt das über das Paradigma der Lean Production etablierte Fließprinzip auf und bedient sich gleichzeitig der aus dem Werkstattprinzip bekannten flexiblen räumlichen Kopplung. Kernelement der freien Verkettung ist der Verzicht auf eine räumliche und zeitlich starre Verkettung der einzelnen Montageressourcen, sodass eine individuelle und flexible Montageabfolge für jeden Auftrag möglich ist. Diese Montageabfolge beschreibt die logische und zeitliche Reihenfolge der zum Zusammenbau des Produkts eingesetzten Montageressourcen und wird als Auftragsroute bezeichnet. Ein frei verkettetes Montagesystem zeichnet sich also dadurch aus, dass zu jedem individuellen Produkt eine eigene Auftragsroute ohne räumliche oder zeitliche Restriktionen besteht.

Eine Auftragsroute wird individuell für jeden einzelnen Auftrag festgelegt, sodass für mehrere Aufträge eines Produkttyps abhängig von den vorhandenen Montageressourcen unterschiedliche Auftragsrouten vorliegen können (siehe Bild 1), d.h., die Bearbeitungsreihenfolge variiert. Im Gegensatz zu einem konventionellen Montagesystem, das für jeden Auftrag eine identische Auftragsroute vorsieht, werden in einem idealen

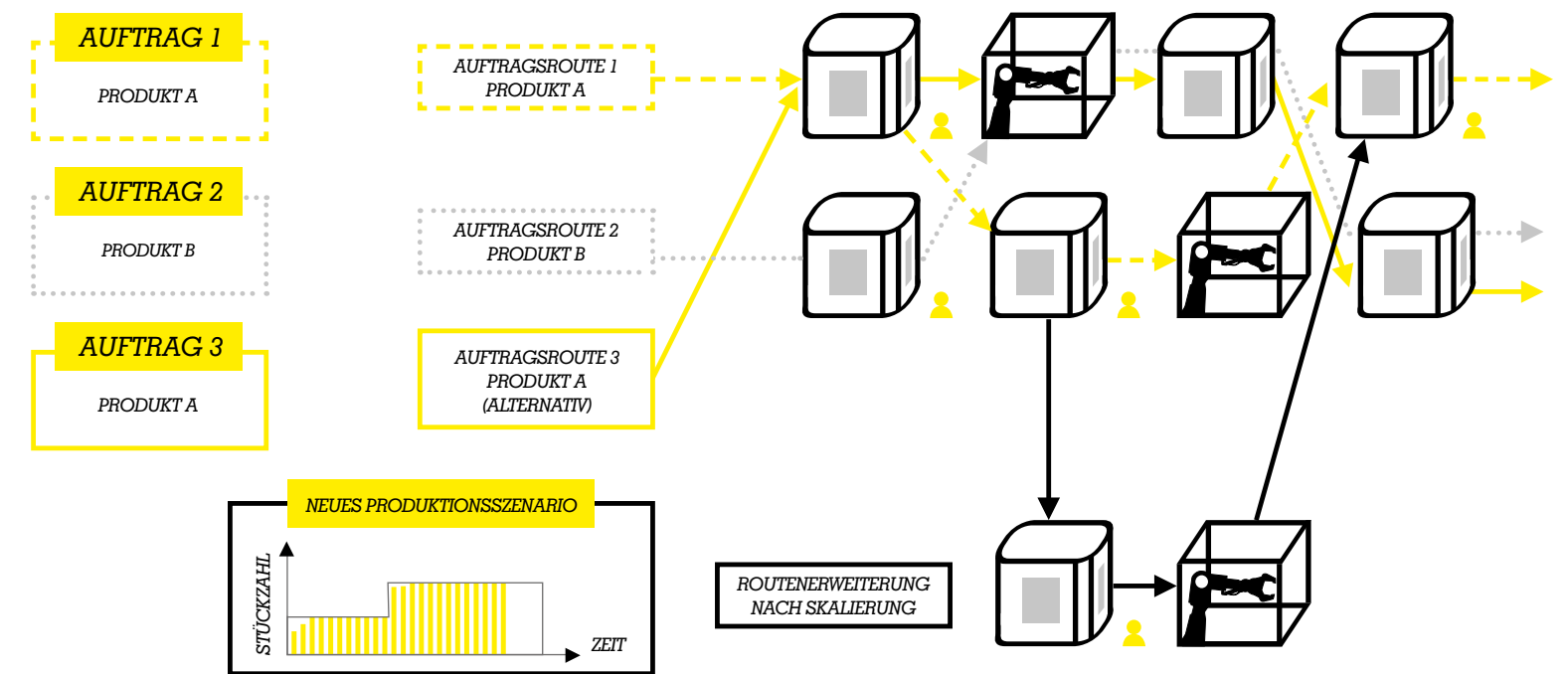


Bild 1: Individuelle Auftragsrouten für verschiedene Produkte in einem frei verketteten Montagesystem

frei verketteten Montagesystem die Auftragsrouten dynamisch dem Montagesystemzustand angepasst. Die freie Verkettung löst damit die starre zeitliche und räumliche Verkettung von Montageressourcen auf. Dies erlaubt es, für unterschiedliche Varianten unterschiedliche Montageressourcen anzusteuern, bei belegten Montageressourcen auf Alternativen auszuweichen und ohne Berücksichtigung der räumlichen Reihenfolge weitere Montageressourcen zu integrieren.

**Potenziale und Herausforderungen frei verketteter Montagesysteme**

Durch die zeitliche Entkoppelung der Montageressourcen lassen sich Prozesse mit großer Taktzeitpreizung ohne Effizienzverluste durchführen; gleichzeitig wird die Bindung an fest definierte Produktionssequenzen aufgehoben. Dies erlaubt eine Reduzierung der Losgrößen bis hin zu Losgröße 1. Wegen der höheren Auslastung der einzelnen Montageressourcen steigt die Produktivität. Die räumliche Entkoppelung ermöglicht es zudem, Prozesse zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem beliebigen Ort zu integrieren oder zu entfernen. Dadurch wird eine produktionsparallele Skalierung und Rekonfiguration von Montagesystemen möglich und die Zahl der umsetzbaren Produktvarianten im Montagesystem steigt. In der Umsetzung bestehen jedoch einige Herausforderungen, wie variierende Durchlaufzeiten, höherer Work-in-Process und Flächenbedarf sowie die aufwendige Materialbereitstellung für gleiche Teile an verschiedenen Orten. Die Beherrschbarkeit des komplexen Leitsystems stellt ein entsprechendes Risiko dar.

Die Einführung frei verketteter Montagesysteme erfordert ein geeignetes Leitsystem, das die dynamische Bestimmung der Auftragsrouten übernimmt und alle beteiligten Ressourcen, wie

Mitarbeiter, Produkttransport, Materialbereitstellung von Montagestationen, sowohl anbindet als auch koordiniert (siehe auch Beitrag „Leit- und Informationssysteme für die frei verkettete Montage“ in Kapitel 2).

Infolge der dynamischen Auftragsrouten erhöht sich zudem die Komplexität der Materialbereitstellung aufgrund von Änderungen in Bereitstellungsort, -zeitpunkt und -sequenz. Wegen des komplexen Materialflusses ist eine intuitive Nachvollziehbarkeit des Montagestatus eines Auftrags nicht gegeben, weshalb geeignete Informationssysteme den Systemstatus aufbereiten und visualisieren sollten.

Frei verkettete Montagesysteme benötigen zudem möglichst universelle Montageressourcen, die eine Vielzahl an Produkten oder Prozessen umsetzen können und somit durch Redundanz mehr potenzielle Auftragsrouten ermöglichen. Erforderlich sind zudem flexible, einfach erweiterbare Transportsysteme sowie die Option, kurzfristig Produkte zwischen Bearbeitungsschritten puffern zu können.

**Gestaltungsdimensionen frei verketteter Montagesysteme**

Während der Planung eines frei verketteten Montagesystems sind verschiedene Designentscheidungen zu treffen, die für konventionelle Montagesysteme nicht notwendig oder zumindest nicht kritisch sind. Diese betreffen primär das Leitsystem, die Materialbereitstellung und die Layoutgestaltung.

Entscheidend für den Betrieb eines frei verketteten Montagesystems sind der Aufbau und die Funktion des Leitsystems. Dabei geht es vor allem um die Definition und Parametrierung



von Leitsystemregeln zur Gewährleistung eines stabilen Systemzustands. Der Materialfluss ist ein Problem der multikriteriellen Optimierung, denn es geht darum, die Auslastung der Montageressourcen zu maximieren, den Umlaufbestand und die Durchlaufzeit zu minimieren und die Sequenz möglichst zu erhalten. Die Optimierung erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Nebenbedingungen wie Priorisierungsaufträgen, der Verfügbarkeit von Montage- und Transportressourcen, Qualitätsanforderungen (z.B. der Priorisierung des Transports erwärmter Teile vor einem Funktionstest) sowie der Verfügbarkeit von Mitarbeitern für unterschiedliche Aufgaben (z.B. manuelle Montage, Rüsten, Wartung). Es sind dazu verschiedene Optimierungsgrößen sowie Kombinationen als Steuerungsparadigma denkbar, u.a. „First come, first served“ bzw. „First in - first out“ (FiFo), Ressourcenauslastung und Minimierung des Work-in-Process (WIP).

Eine weitere Gestaltungsdimension ist die Materialbereitstellung an den Stationen. Neben der üblichen Materialbereitstellung am Montageort durch die Intra-logistik (durch Routenzüge oder durch autonomen Teiletransport) bietet sich für frei verkettete Montagesysteme, insbesondere bei kleineren Produkten, der Einsatz des Part-Kitting mittels eigener Stationen zur Zusammenstellung des entsprechenden Materials an. Damit die Intra-logistik rechtzeitig die Materialbereitstellung vornehmen und Lieferungen auslösen kann, ist eine vorausschauende Planung durch das Leitsystem erforderlich.

### Umsetzung pragmatisch angehen

Die praktische Umsetzung frei verketteter Montagesysteme sollte nicht dogmatisch allen Grundprinzipien, sondern einem pragmatischen Ansatz folgen. So ist es beispielsweise nicht zwangsläufig erforderlich, von jeder Montageressource aus zu einer beliebigen anderen wechseln zu können. Entscheidungen wie diese beeinflussen die Layoutgestaltung. Die Anordnung der Stationen kann unterschiedlichen Prämissen folgen, die entweder auf die Anordnung nach übergeordneter Montagereihenfolge setzen oder auf die Gruppierung von Montageressourcen nach unterschiedlichen Kriterien. Dies kann z.B. durch die Gruppierung von Technologien, Automatisierungsgrad, gemeinsamen Umgebungsanforderungen oder nach gemeinsamen und variantenspezifischen Prozessen erfolgen. Die Gestaltung des Transportsystems erfolgt abhängig von der Produktgröße und der eingesetzten Fördertechnik. Hauptgestaltungsmerkmal ist

der Grad der Vermaschung zwischen den Montageressourcen (Ermöglichung des Wechsels zu einer beliebigen Ressource nach jeder beliebigen Ressource). Es können für den Transport sowohl ortsfeste als auch ortsflexible Transportsysteme, wie Handkarren oder mobile Roboter und Manipulatoren, eingesetzt werden.

### Anwendungsbeispiele: Montage von Fahrwerkkomponenten und Halbleitermodulen

Zwei Anwendungsszenarien standen im Fokus der praktischen Untersuchungen im Projekt freeMoVe. Anhand der Montage von Fahrwerkkomponenten beim Projektpartner ZF Friedrichshafen AG wurde für den Kleinserien- und Prototypenbau eine Umsetzung als frei verkettetes System untersucht. Der Bereich ist geprägt durch eine sehr hohe Anzahl unterschiedlicher Produkte mit individuellen, meist halbautomatischen Prozessen und kleinen Losgrößen. Der Montagebereich wurde dazu so gestaltet, dass die verschiedenen in Inseln angeordneten vorhandenen Montageressourcen (manuelle und automatisierte Arbeitsplätze) durch ein ortsflexibles Transportsystem erreichbar sind. Mitarbeiter müssen nun nicht mehr manuell ihre Montageaufgaben planen, sondern werden durch das Informations- und Leitsystem zu den verschiedenen Montagestationen entsendet, an denen sie gebraucht werden. Der Transport von Bauteilen und Produkten währenddessen mithilfe mobiler Manipulatoren oder Regalwagen (siehe Bild 2). Die Mitarbeiter können sich so auf die Montage konzentrieren - im Vergleich zum alten Montagekonzept führt die automatisierte Auftragsroutenplanung zu einem höheren Durchsatz.

Als zweites Beispiel wurde beim Projektpartner Infineon Technologies AG ein Abschnitt der Halbleitermontage betrachtet. Die Prozesse sind geprägt durch eine enge räumliche und zeitliche Verknüpfung von manuellen Vormontageschritten und automatisierten Lötvorgängen im Sinne einer direkten Zuordnung. Je nach Produktvariante bestehen zwischen den Prozesszeiten der manuellen und der automatisierten Prozesse erhebliche Unterschiede, die zu Effizienzverlusten führen. Durch den Einsatz der freien Verkettung wurde diese starre Zuordnung aufgehoben. Die Montagemitarbeiter arbeiten nun nicht mehr an einzelnen Montagearbeitsplätzen je Ofen, sondern in einem zentralen Bereich mit manuellen Arbeitsplätzen. Das Leitsystem entsendet sie an einen Arbeitsplatz, an dem sie eine vorgegebene

Anzahl von Montageschritten ausführen sollen. Nach Abschluss dieser Tätigkeit wechselt der Mitarbeiter an einen benachbarten Arbeitsplatz und führt dort Aufgaben für ein anderes Produkt durch. Währenddessen erfolgt der Materialtransport zum Lötöfen mittels mobiler Manipulatoren. Dies ermöglicht eine beliebige Zuordnung von Öfen und Mitarbeitern, sodass sich die Ressourcenauslastung erhöht.

### Freie Verkettung – höhere Flexibilität und Produktivität

Die Einführung des Konzepts der freien Verkettung stellt einen Paradigmenwechsel dar, der das Dilemma zwischen Produktivität und Flexibilität auflösen kann. Die Anwendungsbeispiele im Projekt zeigen, dass durch die räumliche und zeitliche Entkop-

plung von Ressourcen Effizienzgewinne, wie z.B. eine höhere Auslastung der Ressourcen, möglich sind. Die Einführung der freien Verkettung bietet sich insbesondere für die Klein- und Mittelserie mit häufig wechselnden Produktvarianten an. Produktionsszenarien, in denen eine höhere Nachfrage erwartet wird, sind für den Einsatz der freien Verkettung ebenfalls geeignet, da diese Organisationsform eine einfache und produktionsunterbrechungsfreie Skalierung erlaubt. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit autonom fahrender mobiler Roboter in der Montage besteht zudem die Möglichkeit, die freie Verkettung um den Aspekt vollständig mobiler Montageressourcen zu erweitern. Insbesondere für große Bauteile wird hier ein großes Potenzial für weitere Effizienzsteigerungen erwartet.

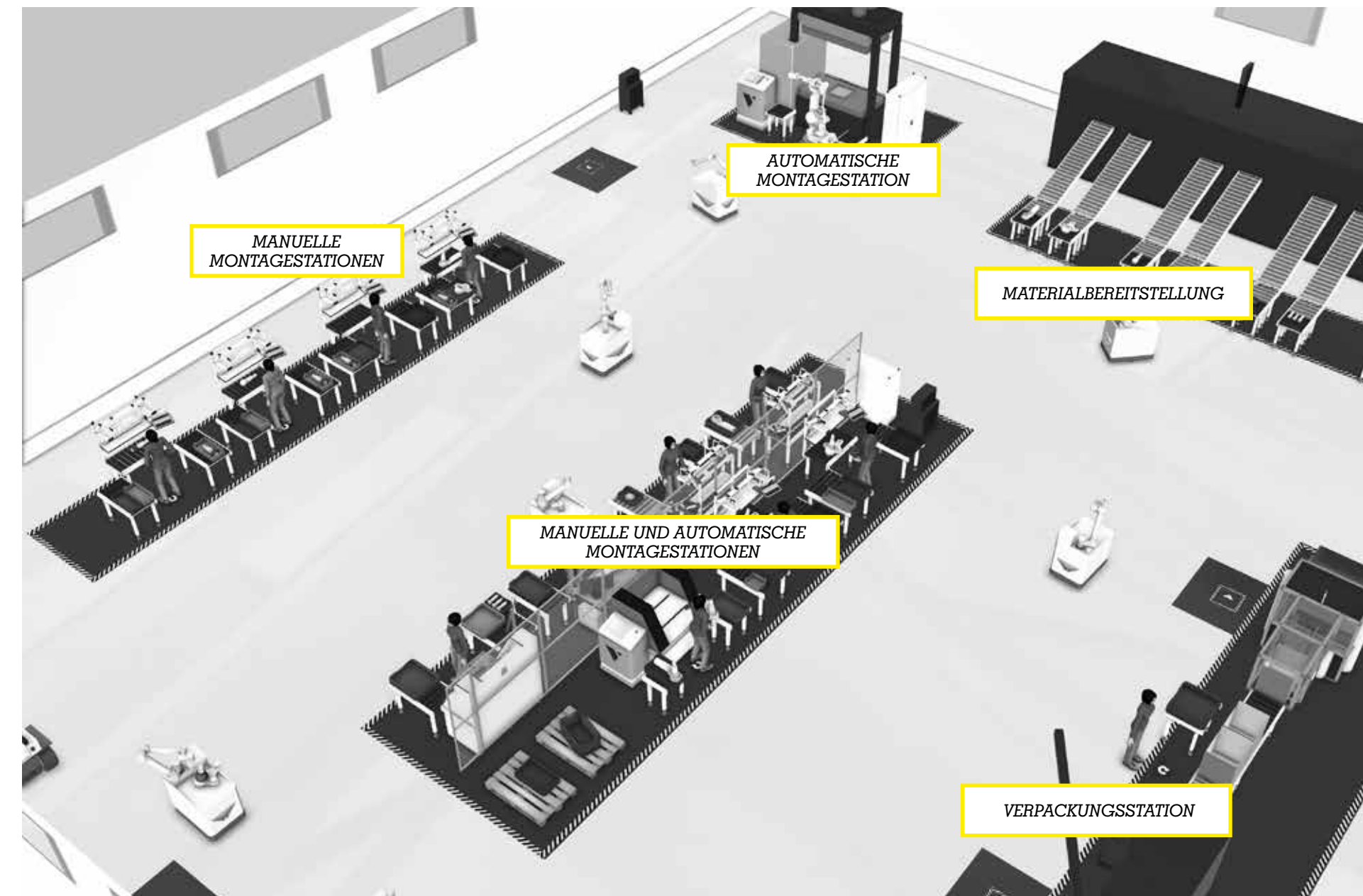
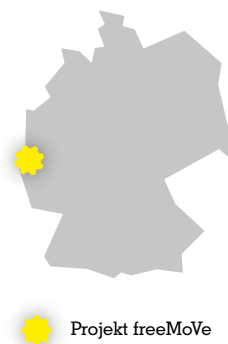


Bild 2: Mögliches Layout eines frei verketteten Montagesystems für die Kleinserienfertigung mit mobilen Manipulatoren





Projekt freeMoVe

# WANDLUNGSFÄHIGE TRANSPORTSTRATEGIEN UND STATIONSTECHNIK



Bild 1: Mobiler Manipulator „Mobile Robot 3.0“ (MR3.0) mit Handhabungssystem für Vorrichtungen, Quelle: Henkel + Roth GmbH

Dr. Uwe Hoffmann, Erwin Eiling, Dirk Wagemann (Philips GmbH Innovation Services Aachen); Erik Bauhaus, Tobias Hikade (Zimmer GmbH); Mathias Roth, Stephan Pöhler (Henkel + Roth GmbH); Rigobert Zehner, Klemens Werner (IFSYS Integrated Feeding Systems GmbH); Guido Hüttemann (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL)

## Transportkonzepte basierend auf mobilen Robotern, eine adaptive Greiftechnik, produktunabhängige Zuführungssysteme und eine universelle Montagezelle bereiten den Weg für eine frei verkettete Montage.

Die freie Verkettung in der Montage ermöglicht es, für jedes Produkt individuelle Bearbeitungsabläufe festzulegen. Dabei kommt einer universellen Transport- und Stationstechnik eine große Bedeutung zu, da die Verkettung von der inhärenten Flexibilität der eingesetzten Ressourcen profitiert.

### Wandlungsfähiger Transfer mit mobilen Manipulatoren

Gefragt ist ein flexibles Transportkonzept, das dynamische Auftragsrouten umsetzen kann und somit die kurzfristige Erstellung und Ausführung von Transportaufträgen ermöglicht. Die freeMoVe-Projektpartner haben dazu ein Transferkonzept auf der Basis von mobilen Manipulatoren entwickelt. Ein mobiler Manipulator ist eine autonome Fahrplattform (mobiler Roboter) mit integriertem Industrieroboter und Ablagefläche für Transportgüter oder Transporthilfsmittel, der zusätzlich zum Materialtransport durch den Roboterarm auch die Handhabung der transportierten Güter erlaubt.

Neben dem Produkt- und Bauteiltransport bietet ein mobiler Manipulator zudem eine erhöhte Flexibilität bei der Beladung und Entnahme von Bauteilen, bei Schnittstellen zum Bedienungspersonal sowie bei Schnittstellen zu nachgeordneter Peripherie. Wenn er zudem den vorhandenen Arbeitsraum des Menschen nutzt, ermöglicht der mobile Manipulator darüber hinaus auch die Integration bereits bestehender Stationstechnik.

Der im freeMoVe-Projekt entwickelte mobile Roboter heißt „Mobile Robot 3.0“ (MR 3.0). Basierend auf einer Untersuchung verschiedener industrieller Anwendungsfälle wurden zentrale Anforderungen an diesen mobilen Manipulator abgeleitet:

- kompakte Abmessungen: Breite < 750mm
- Verzicht auf ortsfeste Einrichtungen für die Navigation und Sicherheit
- hohe Manövrierbarkeit zur Reduzierung der für Fahrmanöver benötigten Fläche und Zeit
- Autarke Energieversorgung für den Einsatz im Schichtbetrieb
- Bedienung von Anlagen im Aktionsraum des Menschen: Arbeitshöhe 600-900 mm Reichweite bis 1.000 mm Bruttounlast 10 kg (Manipulator)
- Kommunikation mit Flottenmanager und zu bedienenden Maschinen

Der MR 3.0 ist als modulares Systemkonzept ausgelegt, in dem Navigationssystem, Energieversorgung, Steuerung, Kommunikationsschnittstellen und Sicherheitskomponenten integriert sind. Der modulare Aufbau erlaubt die Integration verschiedener Fahrwerkskomponenten und Robotertypen (Bild 1).

Für eine maximale Manövrierbarkeit wurde der MR 3.0 mit einem flächenbeweglichen Fahrwerk ausgestattet. Zum Einsatz kommen einzeln gefederte Antriebe, die um die Z-Achse rotieren können und damit einen zusätzlichen Freiheitsgrad besitzen. Dies ermöglicht sehr flexible Fahrmanöver mit nur zwei angetrie-

benen Radmodulen. In Vorversuchen (z.B. seitliches Einparken) zeigten sich beim Einsatz eines flächenbeweglichen Fahrwerks ein erheblicher Zeitvorteil sowie eine erhöhte Fahrpräzision. Die Navigation erfolgt mittels in Bodennähe eingebauten Laserscannern, die zudem Teil des Sicherheitskonzepts sind.

### Laufzeit von bis zu acht Stunden

Die Energieversorgung der Plattform erfolgt durch ein 48V-Gleichspannungssystem mit Lithium-Akkus. Die hohe Energiedichte der Akkus reduziert den Platzbedarf und ermöglicht zugleich Akkulaufzeiten von bis zu acht Stunden. In Vorversuchen wurde ein Lade-Entlade-Verhältnis von ca. 1:10 ermittelt, sodass mit kurzen Ladezyklen, beispielsweise während des Einsatzes an einer Station, ein durchgehender Betrieb erfolgen kann. Mittels eines induktiven Ladesystems können die Akkus während des Betriebs kontaktfrei aufgeladen werden. Ein integrierter Wechselrichter erlaubt den Betrieb von Robotersteuerungen ohne Umbau.

### Sicherheit hat oberste Priorität

Der Einsatz mobiler Manipulatoren auf gemeinsam mit Menschen genutzten Flächen erfordert ein entsprechendes Sicherheitskonzept, das individuelle Risikoanalysen beinhaltet. Das Sicherheitskonzept für den MR 3.0 ist mehrstufig und wird zum Großteil durch die Plattform selbst abgedeckt. Der erste Schritt besteht in der Auswahl und Integration geeigneter Komponenten. Es muss gewährleistet werden, dass sicher wählbare Arbeitsbereiche, Geschwindigkeiten und weitere Sicherheitsfeatures verfügbar sind. In einem zweiten Schritt kommt zusätzliche Sensorik - wie z.B. Sicherheits-Laserscanner - auf dem Fahrzeug zum Einsatz. Anschließend erfolgen die richtlinienkonforme Installation und Konfiguration von Komponenten und Steuerung. Dies erfolgt anhand anwendungsspezifischer Anforderungen und berücksichtigt u.a. die zu greifenden und transportieren-

den Werkstücke, Fahrbereiche, Geschwindigkeiten sowie den Handhabungsbereich. Zuletzt werden im Applikationsumfeld sicherheitsbezogene Maßnahmen (z.B. Greifschutzsysteme, Stehverhinderer an Engstellen, Spiegel) zur Absicherung verbleibender Gefährdungen eingeführt.

Bei der Erprobung erwies sich der MR 3.0 als robust, praxis- und industrietauglich. Das Sicherheitskonzept erlaubt kurze Taktzeiten, schnelle Roboterbewegungen und die simultane Anwesenheit von Roboter und Personen im gemeinsamen, offenen Raum.

### Adaptive, flexible Greiftechnik

Das Handhaben von Einzelteilen oder Baugruppen ist eine elementare Tätigkeit in der industriellen Montage, deren Anpassung an wechselnde Produkte zeit- und kostenintensiv ist. Große regelbare Hub- und Greifkraftbereiche sowie eine einfache Anpassbarkeit der Greiffingergeometrie sind wichtige Anforderungen an eine adaptive Greiftechnik. Die freeMoVe-Projektpartner haben unterschiedliche adaptive Greifsysteme für verschiedene Anwendungsfälle entwickelt. Dabei wurden auch die Fähigkeiten moderner elektrischer Greifsysteme berücksichtigt, die durch die stufenlose Einstellbarkeit von Kraft und Geschwindigkeit ein taktiler Arbeiten ermöglichen.

Für den Transport unterschiedlichster Vorrichtungen durch einen mobilen Manipulator wurde ein adaptives Greifsystem entwickelt, das die Vorrichtungen an individuell definierten Positionen sicher greift. Das aus mehreren Elektrogreifern bestehende System zeichnet sich durch seine extreme Vielseitigkeit und Flexibilität aus. Es verfügt über einen großen einstellbaren Hub in X- und Y-Richtung und ermöglicht den klassischen Kraft- und Formschluss sowie das vogesteuerte Vorpositionieren und Greifen (Bild 1).

### Wechselfingersystem für unterschiedliche Produkte

In einem zweiten Anwendungsfall wurde ein völlig neuartiges Wechselfingersystem zur Handhabung unterschiedlichster Fahrwerkkomponenten entwickelt. Durch Anpassen der produktseitigen Greiffingergeometrie lassen sich Bauteile sicher greifen. Systeme mit weichen oder abformenden Materialien können die exakte Positionierung des Bauteils im Greifer jedoch nicht gewährleisten. Daher wird häufig mittels Wechselschnittstelle am Roboter der komplette Greifer ausgetauscht, was zu hohen Kosten führt. Bei dem neuen Wechselfingersystem werden lediglich die Greiffinger ausgetauscht und somit die Anzahl redundanter Greifer deutlich reduziert. Die Greiffinger können dennoch Kräfte in allen Raumrichtungen aufnehmen.

Für den automatisierten Wechsel sind weder Werkzeuge noch zusätzliche Antriebe oder Sensoren nötig, da er durch die Bewegung des Roboters erfolgt, was den Vorgang robust und wartungsfrei macht. Das System ist beliebig erweiterbar, kann Druckluft und Vakuum übertragen und ist einfach in Anwendungen integrierbar (Bild 2-2).

Im dritten Anwendungsfall wurde untersucht, wie man die Elastizität der Greiffinger dafür nutzen kann, um insbesondere Bauteile mit hohen prozess- und geometriebedingten Toleranzen zu handhaben. Dazu haben die Projektpartner eine spezielle Greiffingergeometrie entwickelt, die je nach eingesetztem Material eine definierte Flexibilität zulässt. Im Zusammenspiel mit einem universellen Zuführsystem konnte prozesssicheres Greifen gezeigt werden (Bild 2-3).

Zur Vereinfachung des Greiferwechsels für Anwendungen im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration sowie auf mobilen Manipulatoren wurde ein „End-of-Arm“-Systembaukasten entwickelt. Mittels eines werkzeuglosen mechatronischen Schnellwechselsystems mit Luft-, Strom- und Signalübergabe können mehrere Greifer, Kamerasysteme und Sensoren direkt und ohne außenliegende Kabel mit dem Roboterflansch verbunden werden, die ihre Informationen mit der Robotersteuerung austauschen und entsprechend parametrieren und bedienen werden.

### Produktunabhängige Zuführsysteme

Marktübliche Zuführsysteme zur Bereitstellung von als Schüttgut vorliegenden Bauteilen sind starr auf ein Produkt ausgerichtet. Für wandlungsfähige Montagesysteme mit hoher Teilevarianz und hochvariablen Abläufen sind derartige Systeme nicht hinreichend schnell anpassbar. Es sind somit produktunabhängige Zuführsysteme erforderlich, die verschiedene Bauteile einzeln und zuführen können sowie zudem über Einrichtungen für Chargentrennung, raschen Typenwechsel und unkomplizierte Typenerweiterung verfügen.

Innerhalb des freeMoVe-Projekts wurde ein neuartiges Zuführsystem entwickelt, das Komponenten wie Stufenförderer und Vibrationsrinnen einsetzt, um eine Vorvereinzelung von Bauteilen aus dem Schüttgut vorzunehmen (Bild 2-1). Anstelle einer Orientierung und Sortierung durch produktspezifische Elemente erfolgt die Zuführung auf eine flache Ebene eines Transportbands. Ein 2D-Kamerasystem zur Bauteilerkennung und Klassifizierung bestimmt die Greifpositionen und gibt diese an ein Handhabungssystem weiter, das das Bauteil zum Bestimmungsort transportiert. Nicht zuführbare oder falsche Teile werden in den Bunker zurückgeführt. Der Grundaufbau ist modular gestaltet, sodass Erweiterungen – für den einfachen Produktwechsel (z.B. Schnellentleerung des Bunkers) oder zur Chargentrennung – einfach hinzugefügt werden können. Der Test anhand der Zuführung von Spannrings verlief erfolgreich.

### Einheitliche Schnittstellen erleichtern die Anbindung

Die neue Lösung erlaubt die Zuführung einer großen Anzahl unterschiedlicher Teile – sie ist jedoch aufgrund der möglichen Vielfalt verschiedener anfallender Teile limitiert. Es kann daher erforderlich sein, den Einsatzort des Zuführsystems zu ändern. Beim Umbau und Umzug von Zuführsystemen sind bisher oftmals aufwendige mechanische Ausrichtung- und mechatronische Anschlussarbeiten erforderlich. Um diesen Prozess zu erleichtern, wurde eine mechanische Schnittstelle zur Gewährleistung einer wiederholbaren Positionierung entwickelt. Auf diese Weise kann ein Zuführsystem einfach mit einem Hubwagen angedockt werden. Eine einheitliche Schnittstelle für die Strom-, Signal- und Luftversorgung stellt die einfache Anbindung an die Station sicher. Vereinheitlichte Kommunikations- und Steuerungsbausteine erleichtern die Integration in die Anlagensoftware.

### Universelle Montagezelle

Die frei verkettete Montage profitiert von Montagetechnik, die bei geringem Rekonfigurationsaufwand ein möglichst großes Spektrum an Produkten montieren kann. Im freeMoVe-Projekt wurde dazu eine universelle Montagezelle entwickelt, die auf zwei UR5-Robotern (Roboter des Herstellers Universal Robots A/S) basiert und die zuvor beschriebenen Technologien nutzt. Innerhalb eines frei verketteten Montagesystems meldet sich eine derartige Zelle über ihre Steuerung beim übergeordneten Leitsystem und gibt so an, welchen Konfigurationszustand sie aktuell hat und welche Produkte sie somit montieren kann. Die Grundlage dafür bildeten Konzepte zur Aufnahme von produktspezifischen Vorrichtungen und deren schnellem Wechsel,

zur Integration von Logistikbehältern, zur kamerabasierten Erkennung von Bauteilen und Behälterfüllzuständen sowie zu Mensch-Maschine-Interaktionsszenarien der Bedienung.

Der Einsatz kollaborativer Roboter bzw. dieser Montagezelle ermöglicht die Zusammenarbeit mit Menschen sowie – durch den Einsatz der roboterintegrierten Sensorik – die „gefühlvolle“ Automatisierung vormals manueller Arbeitsvorgänge. Das Konzept wurde am Beispiel von verschiedenen Produkten aus dem Bereich Personal Care – wie z.B. elektrische Zahnbürsten oder Rasierapparate – erprobt und anhand eines Demonstrators erfolgreich validiert (Bild 2-6).

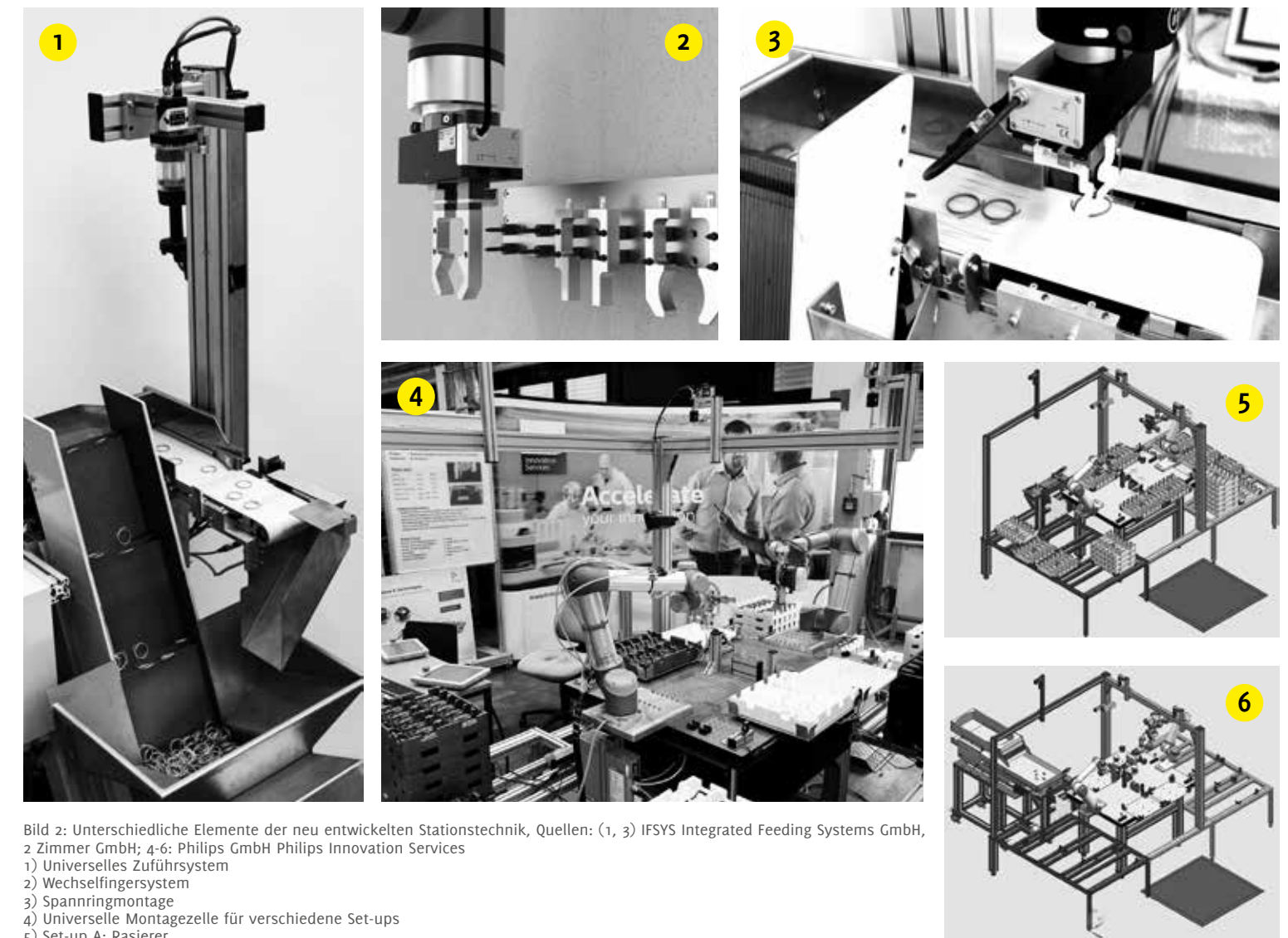
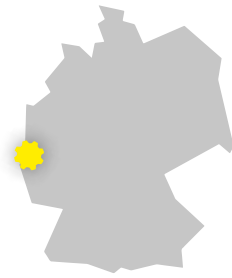


Bild 2: Unterschiedliche Elemente der neu entwickelten Stationstechnik, Quellen: (1, 3) IFSYS Integrated Feeding Systems GmbH, 2 Zimmer GmbH; 4-6: Philips GmbH Philips Innovation Services  
 1) Universelles Zuführsystem  
 2) Wechselfingersystem  
 3) Spannringsmontage  
 4) Universelle Montagezelle für verschiedene Set-ups  
 5) Set-up A: Rasierer  
 6) Set-up B: Zahnbürste





Projekt ARIZ

# ROBOTERSYSTEME IN DER INTRALOGISTIK

Haoming Zhang (Institut für Unternehmenskybernetik e.V.)

**Eine wandlungsfähige Produktion ist auf Just-in-time-Lieferungen angewiesen. Mobile Robotersysteme, die sich selbstständig in der Umgebung orientieren, können dabei wertvolle Unterstützung bieten.**

Die Smart Factory der Zukunft ist auf eine flexible Intralogistik angewiesen. Im Projekt ARIZ haben die Projektpartner ein Robotersystem entwickelt, das diverse Logistikaufgaben in einem Montageprozess übernehmen kann. Auf Hardwareebene wurde das System als „minimales“ System konstruiert, in dem nur kommerziell verfügbare und notwendige Hardwarekomponenten eingebaut sind. Dazu kommen drei mobile Robotersysteme vom Typ „Robotino v3“ - einem Produkt des Projektpartners Festo Didactic SE - mit heterogenen Sensoren zum Einsatz.

Um die Intralogistiklösung in den Produktionsprozess zu integrieren, wurde das Szenario in drei Ebenen strukturiert (siehe Bild 1). Die erste Ebene setzt sich aus zwei Steuerungskonzeptionen zusammen. Bei der interaktiven Steuerung steht das Robotersystem im Mittelpunkt. Der Bedienende kann den Ablauf des Roboters durch interaktive Schnittstellen selbst ansteuern und anpassen. Eine zentrale Steuerung, die zum Informationssystem der Produktion gehört, vermittelt unterschiedliche Tasks und verwaltet die interaktive Steuerung. Die zweite Ebene enthält die einzelnen Komponenten im Robotersystem. Die entsprechenden Schnittstellen zur Mensch-Roboter-Kollaboration sind der dritten Ebene zugeordnet.

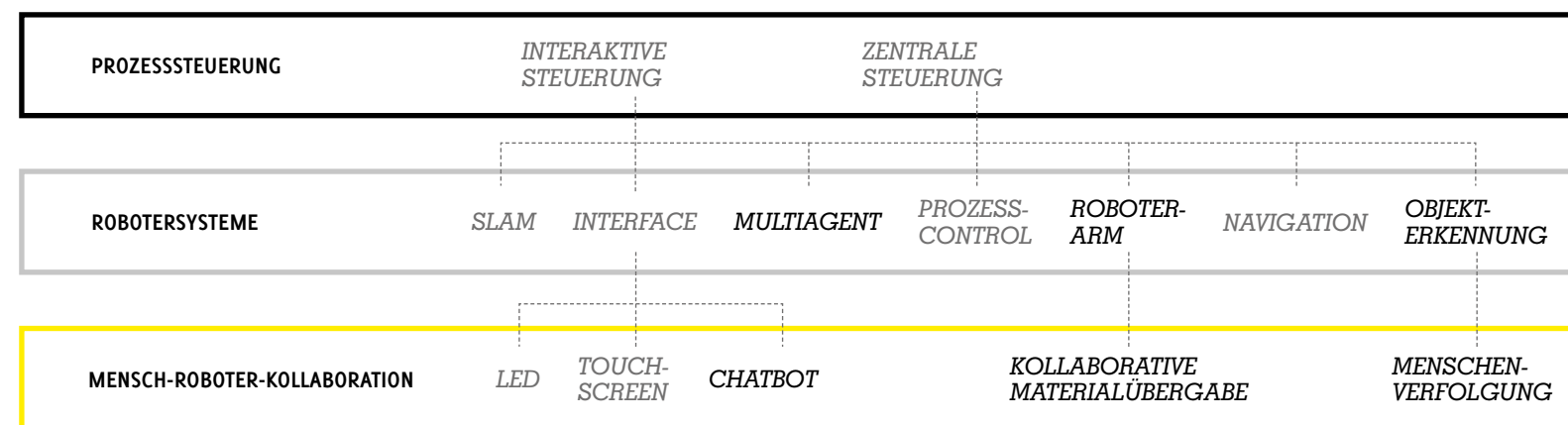


Bild 1: Komponenten im Robotersystem

## Roboternavigation ohne aufgebaute Landmarken

Die Roboternavigation innerhalb des einzelnen Systems erfolgt mithilfe des Verfahrens SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) und eines statischen Navigationsplans in Form eines Graphen. Die visuelle Wahrnehmung übernehmen die Stereo-Kamera 2-D-LIDAR, eine inertielle Messeinheit - ein Messsystem zur Bewegungsdetektion - und eine Stereo-Kamera. Um die Daten bearbeiten und KI-Algorithmen einsetzen zu können, wurden weitere Rechnerkapazitäten (Intel® NUC und NVIDIA Jetson) im Roboter integriert.

Beim SLAM-Verfahren kann sich der Roboter mithilfe einer Sensorwahrnehmung ohne speziell aufgebaute Landmarken in der Umgebung orientieren. Dazu zeichnet er sein Wissen beispielsweise in Form einer Karte auf - diese Karte wird auch Weltmodell genannt. In der Praxis kommen überwiegend Abstandssensoren zum Einsatz, z.B. in Form von Laserscannern. Sie ermöglichen es, die Distanz zwischen dem Akteur (Roboter) und dem Ziel (Mensch oder ein Hindernis) messtechnisch zu ermitteln. Mithilfe der Kamerasysteme erkennt der Roboter die Umgebungsobjekte. Ein Touchscreen und eine sprachliche Kommunikationsschnittstelle mit Natural Language Processing - einer auf KI basierten digitalen Sprachverarbeitung - bilden die Basis für die Mensch-Roboter-Interaktion.

## Demonstrationsanwendungen zeigen weiteren Forschungsbedarf

In Demonstrationsanwendungen hat sich gezeigt, dass die Roboternavigation durch das SLAM-Verfahren mit dem aufgebauten System nicht zuverlässig arbeitet. Die maßgeblichen Ursachen dafür sind die „Low-Cost“-Sensoren, die nur über eine beschränkte Leistungsfähigkeit verfügen, sowie die unzureichende Rechenleistung des in den Roboter integrierten Rechners. Zudem kann die Lokalisierung im statischen Navigationsplan nicht erfolgen, wenn die Umgebung des Roboters nicht genügend strukturiert werden kann.

Hinzu kommt, dass bei der Bewegungsplanung in der Navigation nur die Position, aber nicht die Dynamik der sich bewegenden Objekte im System berücksichtigt wird. Dies führt zu instabilen Bewegungen des Roboters aufgrund fehlender Planungsinformationen. Um die Bewegungsplanung zu verbessern, ist die Integration von KI-basierten Methoden, dem sogenannten Reinforcement Learning - einer Form des Maschinellen Lernens - erforderlich. Neben dieser Weiterentwicklung werden die Optimierung der Steuerung bzw. das „Motion Planning“ des hybriden Systems Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein.

## Hybrides System: mobiler Roboter mit statischem Roboterarm

Zur Beförderung der Materialien und Halbzuge zwischen den Produktionsinseln wurde die mobile Basis des Robotinos um den Roboterarm „Kinova“ - ein Produkt des Unternehmens Kinova Europe GmbH - erweitert. Dies macht die Koordinierung des Systems deutlich komplexer. Ein derartiges System, bei dem ein stationärer Roboter bzw. ein stationäres Roboterelement/Arm in eine mobile Plattform integriert ist, wird als mobile Manipulation bezeichnet. Im Rahmen des Projekts erfolgte die Steuerung des stationären Roboters (Roboterarms) und der mobilen Basis getrennt. Diese Steuerung erfolgt auf Basis industrieller Standards mithilfe eines endlichen Zustandsautomaten - eines Modells, das das Verhalten aufgrund von Zuständen, Zustand-sübergängen und Aktionen beschreibt. Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass die zu steuerenden Größen beider Komponenten - mobile Basis und Roboterarm - unterschiedlich sind bzw. verschiedene sogenannte Zustandsraumrepräsentationen erfordern. Die zentrale Steuerung eines solchen hybriden Systems ist sehr komplex und daher Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

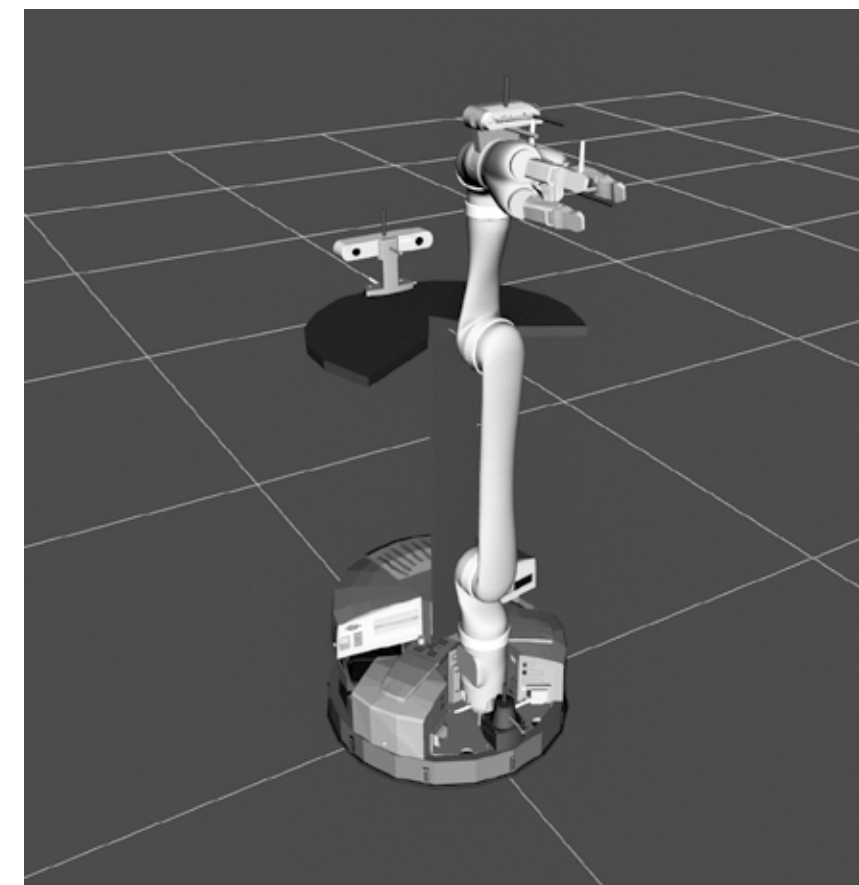


Bild 2: Hybrides Robotersystem in der Simulation



# BUSINESS INTELLIGENCE

## KAPITEL 2

Unter dem Begriff Business Intelligence – im Deutschen auch als Geschäftsanalytik bezeichnet – werden verschiedene Verfahren und Prozesse zur Sammlung, Auswertung und gezielten Visualisierung von Daten zusammengefasst. Unternehmen können so neue Erkenntnisse erlangen, die ihnen bei der Entscheidungsfindung helfen. Viele mittelständische Betriebe in Deutschland setzen bisher nur wenig oder gar keine Techniken aus diesem Bereich ein. Die Beiträge in diesem Kapitel zeigen vielfältige Möglichkeiten auf, wie auch kleinere Firmen durch zielgerichteten und passgenauen Einsatz solcher Instrumentarien und entsprechender Software und IT-Systeme einen großen Nutzen für ihre Montage erzielen können. Die Beispiele reichen dabei von der automatisierten Anlagenplanung über die fertigungsgerechte Planung neuer Produkte und den Aufbau spezieller Leit- und Informationssysteme bis hin zum vollständigen Produktlebenszyklusmanagement.

## BUSINESS INTELLIGENCE FÜR DIE WANDLUNGS- FÄHIGE MONTAGE

- 38** Wortwechsel
- 42** Automatisierte Montageanlagenplanung  
(ProMoA)
- 46** Fertigungsgerechte Planung  
für die Mikromontage  
(MIKROKOMO)
- 50** Leit- und Informationssysteme  
für die frei verkettete Montage  
(freeMoVe)
- 54** Produktlebenszyklusmanagement für MRK  
(KoKoMo)



*„Es hat sich bewährt,  
Business-Intelligence-  
Projekte in multidisziplinären  
Teams abzuwickeln.“*



Dr.  
**MARTIN LINDEN**  
R&D Manager bei der  
Hengstler GmbH



*„Business Intelligence  
versetzt uns in die Lage,  
hochkomplexe Produktions-  
prozesse zu steuern und  
zu optimieren.“*

Dr.  
**UWE HOFFMANN**  
Program Manager Ind. 4.0  
bei der Philips GmbH Inno-  
vation Services Aachen

# WORTWECHSEL

*Business Intelligence  
für die wandlungs-  
fähige Montage*



DR.  
MARTIN LINDEN

DR.  
UWE HOFFMANN

## WIE KANN DIE PRODUKTION DURCH BUSINESS INTELLIGENCE WANDLUNGSFÄHIGER WERDEN?

Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen, eine schwankende Nachfrage, kleine Losgrößen und ein hoher Kostendruck stellen produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Deshalb muss die Produktion wandlungsfähig und damit in der Lage sein, vielfältige Produkte an optimal ausgelasteten Fertigungsanlagen herzustellen. Unser Planungshorizont beträgt mittlerweile nur noch zwei Jahre – ein Zeitraum, in dem der Return on Invest für den Sondermaschinenbau kaum noch darstellbar ist. Die Digitalisierung der Fertigung hilft uns dabei, unsere Prozesse und Anlagen sowie unsere Produktentwicklung flexibel zu gestalten. Intelligente Softwarelösungen bzw. Business Intelligence, die aus einer Vielzahl von Produktionsdaten entscheidungsrelevante Informationen und Handlungsempfehlungen ableiten, spielen dabei eine zentrale Rolle.

Dr. Linden hat die Motivation und den Nutzen von Business Intelligence schon sehr gut auf den Punkt gebracht. Bei der Einführung einer Softwarelösung sollten immer folgende Fragen im Fokus stehen: Welche Produktionsdaten sind erforderlich? Wie erfolgt die Auswertung? Welche Konsequenzen lassen sich daraus ziehen? Business Intelligence versetzt uns in die Lage, hochkomplexe Produktionsprozesse zu steuern und zu optimieren. Die damit einhergehende Transparenz an Information hat zudem eine qualitätssteigernde Wirkung. Ein weiterer Aspekt ist, dass man mithilfe der Software auch Zusammenhänge erkennt, die einem vorher nicht bekannt oder bewusst waren. So lassen sich weitere Potenziale zur Prozessoptimierung identifizieren. Durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz sind auf diesem Gebiet in Zukunft weitere Fortschritte zu erwarten.

## WAS ZEICHNET EINE GUTE BUSINESS-INTELLIGENCE-LÖSUNG AUS UND WIE GELINGT EINE ERFOLGREICHE IMPLEMENTIERUNG?

Wir empfehlen, bei Business Intelligence auf Standard-Softwarelösungen zu setzen und Eigenentwicklungen zu vermeiden. Gleiches gilt für die Visualisierung und für die Schnittstellen. Die Kompatibilität zu anderen Anwendungen sollte in jedem Fall gegeben sein. Bei der Einführung von Business Intelligence sollte man möglichst mit einem kleinen Projekt starten, um schnell Erfolge vorweisen und damit Akzeptanz schaffen zu können. Dabei ist es wichtig, das Projekt gut zu planen, realistische Ziele zu definieren und moderne Projektmanagement-Methoden – wie z.B. Scrum – anzuwenden. Da Unternehmen selten über die notwendige Expertise verfügen, kann zumindest in der Einführungsphase von Business Intelligence eine externe Unterstützung durch spezialisierte Dienstleister hilfreich sein. Zudem hat es sich bewährt, Business-Intelligence-Projekte in multidisziplinären Teams abzuwickeln. So gelingt es, alle fachlichen und unternehmerischen Perspektiven in die Anwendung einzubringen.

In Bezug auf die Software halten auch wir Standardlösungen mit offenen Schnittstellen für sehr wichtig. Zudem sollte bei der Auswahl der Software auf eine einfache und intuitive Bedienbarkeit geachtet werden. Auch unsere Erfahrung zeigt, dass die Integration aller Beteiligten extrem wichtig für den Projekterfolg ist. Neben der Forschungs- und Entwicklungsabteilung, der Produktion und dem Management gilt dies vor allem auch für die eigene IT-Abteilung. Denn gerade hier gibt es eine Herausforderung: Mit ihrem offenen Charakter in Bezug auf Schnittstellen und Datennutzung stehen Business-Intelligence-Projekte oft den Sicherheitsvorgaben der IT-Abteilung entgegen. Diese unterschiedlichen Vorstellungen kann man nur durch offene Kommunikation und Kooperation zu einer gemeinsamen Lösung zusammenbringen.

Die Hengster GmbH ist ein Hersteller industrieller Zähl- und Steuerungskomponenten für die Automatisierung.

Die Philips GmbH gehört zu Royal Philips und ist ein Anbieter von Gesundheitstechnologien.



## BUSINESS INTELLIGENCE REDUZIERT KOMPLEXITÄT

Die Rahmenbedingungen für produzierende Unternehmen ändern sich immer schneller. Die Digitalisierung, politische Krisen und Firmenfusionen seien beispielhaft als Ursachen dafür genannt. Unternehmen müssen darauf vorbereitet sein und schnell reagieren, z.B. in Form neuer Produkte und Services oder neuer Standorte. Es ist also ein hohes Maß an Flexibilität gefragt, das neue Arbeitsmethoden und Tools verlangt.

### Mit Business Intelligence zu kürzeren Realisierungszeiten

Der klassische Ansatz mit langen Konzeptphasen und seriellen Projektabläufen funktioniert nicht mehr. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind kurze Realisierungszeiten bzw. eine kurze Time-to-Market erforderlich. An dieser Stelle kommt Business Intelligence ins Spiel: Diese Software kann komplexe betriebswirtschaftliche und technische Informationen so aufbereiten, dass man daraus handlungsorientierte Entscheidungen ableiten kann. Business Intelligence ermöglicht das „Simultaneous Engineering“ – ein Verfahren, bei dem Produktentwicklung und Produktionsgestaltung zeitlich parallel erfolgen. Die Software kann aber auch im Fertigungsbetrieb ganz konkrete Unterstützung leisten. So hilft sie dem Bediener, den Überblick über den Materialfluss an der Anlage zu behalten, generiert Materialanforderungen und kann ggf. sogar automatisch eine Materialbestellung auslösen.

### Künftige User frühzeitig einbinden

Bei der Einführung von Business Intelligence haben wir die Erfahrung gemacht, dass eine frühzeitige Einbindung der künftigen User akzeptanzfördernd ist. Zudem können diese dadurch ihre wertvollen spezifischen Kenntnisse einbringen und damit den Nutzeffekt der Softwareanwendung erhöhen. Das Management ist gefragt, den Prozess aktiv voranzutreiben. Hat man sich nach einer Test- und Probierphase für eine Einführung entschieden, sollte diese auch konsequent und ohne analoge Parallelwelten erfolgen.

Eine gute Business-Intelligence-Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass sie zuverlässig funktioniert, hochwertige Ergebnisse erzeugt und intuitiv bedienbar ist. Bei der Entwicklung dieser Tools setzen wir auf die Zusammenarbeit mit Softwarepartnern. Sie bringen die notwendige Expertise mit und sorgen für einen langfristigen Support.

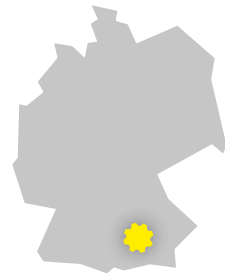


Dr.  
**HARTMUT FREITAG**

Geschäftsführer der XENON  
Automatisierungstechnik  
GmbH

Die XENON Automatisierungstechnik GmbH entwickelt und baut Montage- und Prüfanlagen zur Automatisierung der Fertigung von mechatronischen Komponenten.





Projekt ProMoA

# AUTOMATISIERTE MONTAGEANLAGEN- PLANUNG

Patrick Zimmermann (Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV); Magdalena Paul (Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften); Dr. Judith Ngoumou, Dr. Matthieu Portail, Klaus Lechner und Dr. Gerald Hönig (TWT GmbH Science & Innovation)

**Eine Softwarearchitektur, die aus einer verknüpften Toolkette mit Datenbanken besteht, ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer vollautomatisierten Planung von Montageanlagen.**

Die Planung von Montageanlagen und auch die von Produktionssystemen im Allgemeinen erfordert heutzutage ein hohes Maß an Expertenwissen, das oft bei den verschiedensten am Planungsprozess beteiligten Partnern liegt. Es ist daher eine enge Abstimmung zwischen Komponentenherstellern, Anlagenbauern bzw. Systemintegratoren und Endkunden – also den tatsächlichen Betreibern der Anlagen – notwendig. Wesentliche Punkte hierbei sind das Sammeln und Formalisieren der Kundenanforderungen sowie die Auswahl, Zusammenstellung und Anordnung geeigneter Betriebsmittel, um diese Anforderungen hinreichend zu erfüllen.

Während es bereits Tools zur Unterstützung einzelner Teilschritte des Planungsprozesses gibt, fehlt es an einer durchgängigen Toolkette für sämtliche Planungsschritte. Der Planungsprozess beginnt bei der Betrachtung der Anforderungen – die sich aus dem zu produzierenden Produkt ergeben – und endet bei der in Betrieb genommenen Anlage zur Fertigung des Produkts. Daher wäre es ideal, den gesamten Prozess möglichst automatisiert und mithilfe eines Tools durchführen zu können.

**Reibungslose Kommunikation zwischen Anlagenbauer und -betreiber sicherstellen**

Um dem Ziel der vollautomatisierten Anlagenplanung näher zu kommen, haben die ProMoA-Projektpartner eine Softwarearchitektur entwickelt, die aus einer verknüpften Toolkette mit Datenbanken besteht. Im Fokus steht dabei die Kommunikation zwischen Endkunde und Anlagenbauer. Zunächst wurde deshalb ein Konzept entwickelt, um die meist in Textform vorliegenden Anforderungen des Kunden quantifizierbar zu formalisieren und sie dem Anlagenbauer möglichst einfach zugänglich zu machen. Die Lösung besteht in einer formalen Beschreibung der Prozessschritte, die zur Montage des Produkts notwendig sind. Sogenannte Fähigkeiten, wie beispielsweise Positionieren, Dosieren oder Kleben, dienen als betriebsmittelneutrale Beschreibung der einzelnen Prozessschritte und spezifizieren mithilfe entsprechender Parameter die Kundenanforderungen.

Die Reihenfolge der Fähigkeiten können Anwender selbst auf Basis eines sogenannten Montagevorranggraphen – eines Tools zum Festlegen der Fertigungssequenz – festlegen. Diese Reihenfolge lässt sich in einer grafischen Oberfläche modellieren oder mithilfe eines CREO®-basierten Analysetools (CREO ist ein Softwareprodukt der Firma PTC) automatisiert aus einem

CAD-Modell extrahieren und anschließend direkt in die Modellierungssoftware importieren. Die Beschreibung der betriebsmittelneutralen Fähigkeiten und ihrer Parameter erfolgt standardisiert und ist in einer gemeinsamen Datenbank gespeichert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass sämtliche Tools eine einheitliche Datenbasis nutzen. Zudem können auch die modellierten Gesamtprozesse gespeichert und über eine Modellierungssoftware sowohl vom Kunden als auch vom Anlagenbauer aufgerufen und angepasst werden.

**Kundenanforderungen und Betriebsmittelbeschreibung formalisieren**

Die Formalisierung der Kundenanforderungen erfolgt über verschiedene Parameter der Fähigkeiten. So kann man im Falle der Fähigkeit „Dosieren“ beispielsweise angeben, welche Masse dosiert werden soll, welche Temperatur notwendig ist oder welche Taktzeit gefordert wird. Da diese Anforderungen oft einer gewissen Unsicherheit unterliegen, kann man dazu nicht nur einen festen Wert, sondern auch einen Wertebereich eingeben. Der nächste Schritt besteht darin, Betriebsmittel auf Basis dieser Anforderungen automatisiert auszuwählen. Dazu ist eine formalisierte Beschreibung der Betriebsmittel einschließlich der angebotenen Fähigkeiten notwendig.

Während bei den Anforderungen bezüglich der Fähigkeiten der gewünschte Wert angegeben wird, müssen bei den Betriebsmitteln die entsprechenden Grenzen in einzelnen Fähigkeitsparametern hinterlegt sein. Wird z.B. eine bestimmte Traglast innerhalb der Fähigkeit „Bewegen“ als Anforderung hinterlegt, steht im Modell des Betriebsmittels mit Blick auf diese Fähigkeit, welcher Traglastbereich – minimale und maximale Traglast – akzeptabel ist. Ähnlich wie bei den Anforderungen gibt es auch hier Unsicherheiten, da ein theoretisches Überschreiten der Betriebsmittelgrenzwerte in der Praxis nicht zwangsläufig zu einem direkten Versagen führen muss. Im Fall der Traglast eines Roboters wird dieser Grenzwert im Betriebsmittel-Datenblatt überwiegend für die maximale Auslenkung bei maximaler Verfahrensgeschwindigkeit angegeben. Eine Überschreitung des Traglastgrenzwertes ist jedoch bei langsameren Bewegungen, die den Arbeitsraum nicht vollständig ausnutzen, durchaus akzeptabel.

Die Grenzwerte der Betriebsmittel sind also keine statischen Werte, sondern hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Aufgrund dieser mehrdimensionalen Abhängigkeiten lassen sie sich teilweise nicht einmal durch aufwendige Simulationen errechnen. Daher ist eine formalisierte Beschreibung dieser Werte eine besondere Herausforderung, für die in zukünftigen Forschungsprojekten eine Lösung gefunden werden muss.

Aus den im ProMoA-Projekt gesammelten Erfahrungen lassen sich Empfehlungen für die Umsetzung von Automationsprojekten in der (Montage-)Anlagenplanung ableiten.

Die Verwirklichung einer automatisierten Anlagenplanung erfordert maximal flexible Kommunikationslösungen zwischen den beteiligten Akteuren – z.B. Anwendern und Kunden –, aber auch zwischen den in ein Gesamtframework eingebundenen Softwaremodulen. Um das zu erreichen, müssen alle Partner – mit sehr unterschiedlichen Hintergründen und Denkmustern – ein gemeinsames Verständnis für die betriebsmittelneutrale Beschreibung der Prozessschritte entwickeln. Die Notwendigkeit zum Denken in Prozessschritten, das auch eine Abkehr von vertrauten Bauteilflüssen erfordert, stellt dabei eine Herausforderung dar. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass die Komplexität noch zunimmt, weil Fertigungsprozessschritte beliebig verschachtelt werden können.

**Flexibilität durch containerartige Objekt-Klassen**

Diesem Aspekt wurde bei der softwaretechnischen Umsetzung durch containerartige Objekt-Klassen Rechnung getragen. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass sich einzelne Prozess-(unter)schritte als Container mit ihren ggf. vorhandenen Unterprozessen herauslösen lassen. Damit können sie an Module weitergegeben werden, die beispielsweise weitere Optimierungen und Absicherungen durchführen. Die hierfür notwendigen Simulationen benötigen teilweise eine hohe Rechenleistung und sind nicht für alle Prozesse sinnvoll. Da die Prozessschritte problemlos herausgelöst werden können, ist eine Weiterverarbeitung dieser Schritte in externen Rechenzentren eine Alternative. Im Anschluss an diese Weiterverarbeitung, werden die verarbeiteten Prozessschritte einschließlich der errechneten Informationen wieder an der ursprünglichen Position in die Anlagenplanung eingegliedert.



### Anwenderorientierte Softwarearchitektur

Um eine geeignete Softwarearchitektur zu finden, sollten sich Softwareentwickler und Anwender intensiv miteinander austauschen. Im ProMoA-Projekt zeigte sich, dass es beispielsweise nicht sinnvoll ist, die Fähigkeits- und Ressourcendatenbank zu früh zu erstellen. Dies kann zu unnötig eingeschränkten Softwarearchitekturen führen, die dem Ordnungsprinzip und Denkmuster der Anwender zwar nachempfunden, jedoch nicht ausreichend flexibel für die automatisierte Anlagenplanung sind. Daher ist es entscheidend, dass Anwender und Softwareentwickler eine gemeinsame Sprache finden, ihre unterschiedlichen Perspektiven erkunden und sich gegenseitig verstehen lernen.

Bei der Auswahl einer geeigneten Implementierung bzw. Softwarearchitektur sollte die Perspektive der Softwareentwicklung eingenommen werden. Softwareentwickler haben das nötige Gespür dafür, Strukturen für Objekt-Klassen zu identifizieren, die zur Abbildung des Fertigungsprozesses notwendig sind. Ihre Fachfremdheit gegenüber der Anlagenplanung kann dabei sogar von Vorteil sein. Sie bringt eine Offenheit mit sich, die zur Kreation einer vielseitigen und erweiterbaren Softwarearchitektur erforderlich ist. Ungeachtet der für die Anwender vielleicht

befremdlich wirkenden Natur der kreierten Softwarearchitektur, spielt die Anwenderperspektive bei der anschließenden Gestaltung einer grafischen Benutzeroberfläche die entscheidende Rolle, um die Nachvollziehbarkeit dargestellter Planungen für alle Anwender zu realisieren.

### Erfolgsfaktoren für die Softwarestruktur

Eine automatisierte Anlagenplanung sollte auf einer Softwarestruktur basieren, die über folgende Eigenschaften verfügt:

- verschachtelbar
- herauslösbar
- wiedereingliederbare Prozesse
- offen und durchgängig für Zusatzinformationen

Bis zum Ablauf des ProMoA-Projekts Ende 2019 sind weitere Anwendertests geplant. Die Herausforderung wird darin bestehen, die Bedürfnisse aller Akteure zufriedenzustellen, ohne jedoch den Lösungsraum der automatisierten Planung unnötig einzuschränken.

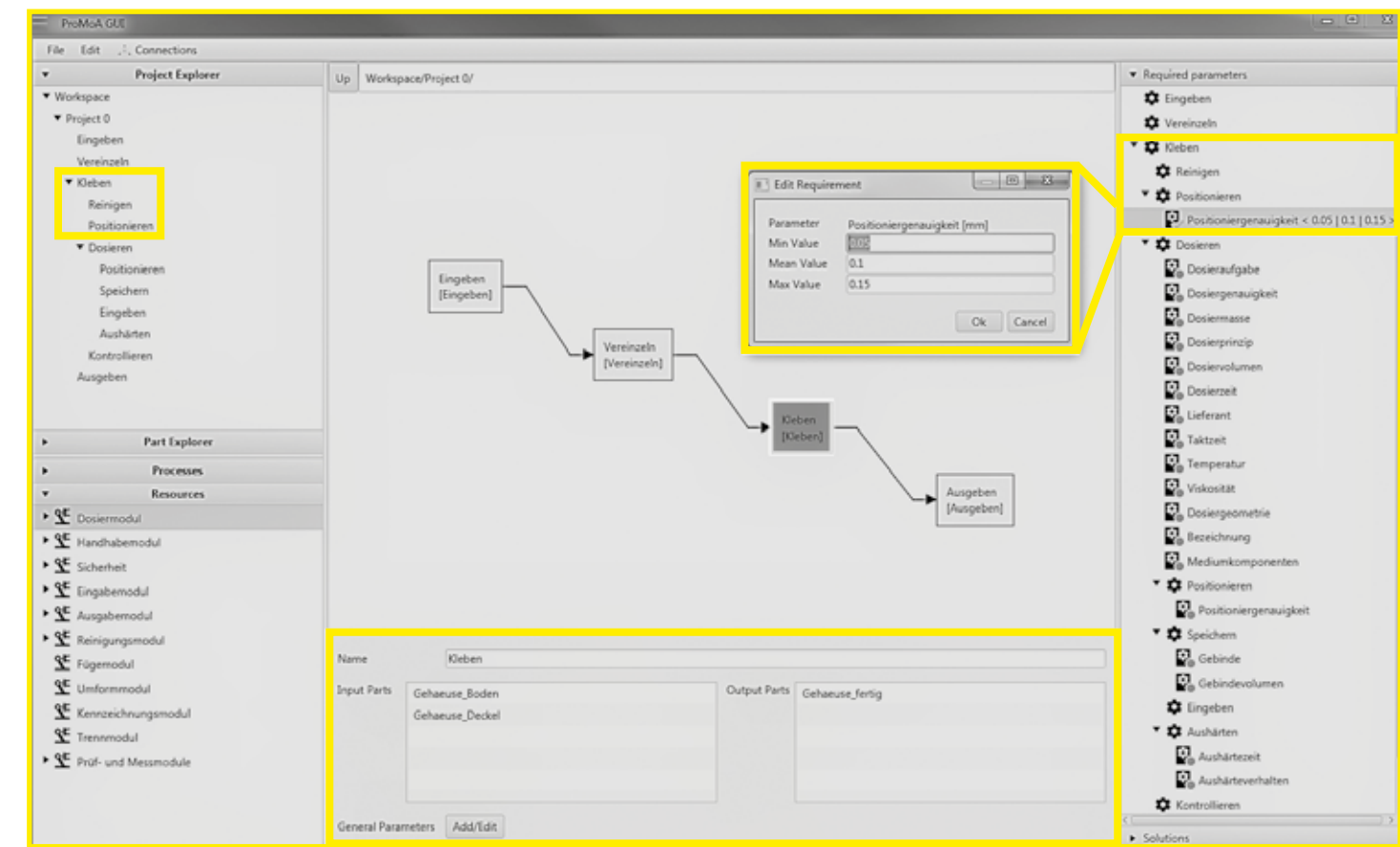
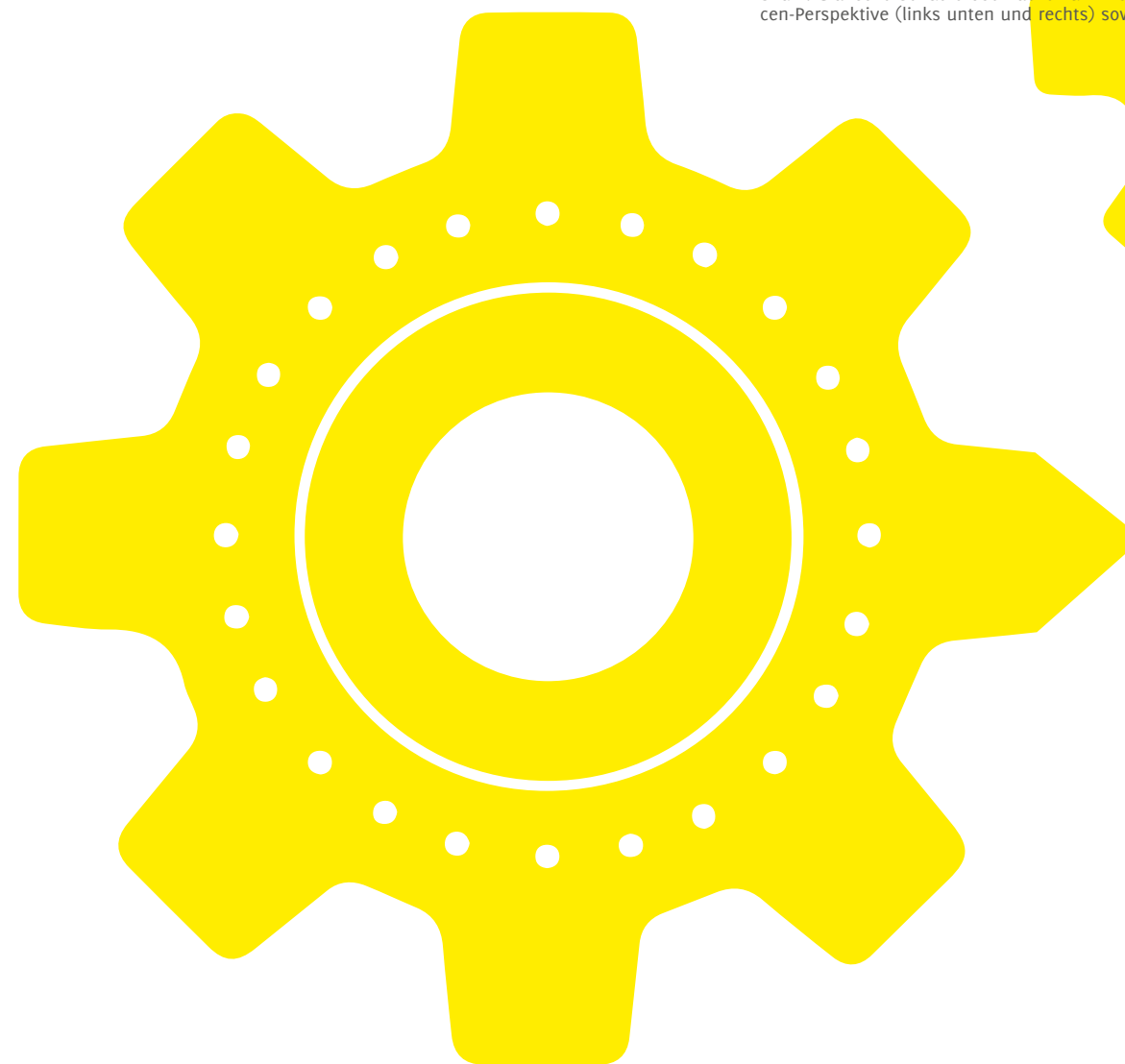
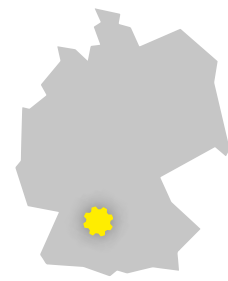


Bild 1: Grafische Benutzeroberfläche zur Anlagenplanung – mit Prozess-Perspektive (Mitte), Bauteil-Perspektive (links und Mitte unten), z.B. von Endkunden, Ressourcen-Perspektive (links unten und rechts) sowie Fähigkeiten-Perspektive (links oben und Pop-up-Fenster) von Optimierungsmodulanbietern



*Aus den im ProMoA-Projekt gesammelten Erfahrungen lassen sich Empfehlungen für die Umsetzung von Automationsprojekten in der (Montage-)Anlagenplanung ableiten.*



Projekt MIKROKOMO

# FERTIGUNGSGERECHTE PLANUNG FÜR DIE MIKROMONTAGE

Christoph Gielisch (Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Institut für Mikroaufbautechnik)

## Bessere Investitionsentscheidungen in der Mikromontage: Mithilfe einer softwaregestützten Systematik lassen sich optimale Anlagenkonfigurationen auf Basis der Modellierung von Produktideen ermitteln.

Viele Branchen wie die Mikroelektronik oder die Medizintechnik benötigen eine extrem präzise und fehlerfreie Montage von kleinen Bauteilen. Während die Bestückung von zweidimensionalen Teilen, beispielsweise Leiterplatten, weitgehend standardisiert ist, stellen vor allem komplexere Bauteilgeometrien, die eine Bestückung in mehrere Raumachsen erfordern, eine Herausforderung dar. Zur Einhaltung der notwendigen Toleranzen können solche Montageschritte nur in begrenztem Umfang effizient manuell erledigt werden. Häufig kommen dafür Sondermaschinen zum Einsatz.

## Wandlungsfähigkeit als Antwort auf aktuelle Trends

Markttrends hin zu kürzeren Produktlebenszyklen und stärkerer Individualisierung von Produkten erhöhen jedoch für Unternehmen das Risiko bei einer Investition in solche Sondermaschinen. Einen Ausweg aus dieser Situation stellt die Verbesserung der Umrüstbarkeit einer Maschine hin zu einem wandelbaren Fertigungssystem (Reconfigurable Manufacturing System) dar. Ein solches wandelbares Fertigungssystem setzt dabei häufig auf ein modulares Konzept. Einzelne Hardwarebauteile werden als Montagemodule realisiert und können ohne großen Aufwand in einer Basismaschine verbaut werden.

Schätzungen des Herstellers Häcker Automation GmbH sowie des Forschungsinstituts Hahn-Schickard - beide MIKROKOMO-Projektpartner - gehen davon aus, dass bis zu 80 Prozent der zu bewältigenden Aufgaben innerhalb eines Mikromontagevorgangs auf Standardprozesse entfallen, die bei nahezu allen Produkten gleich oder zumindest ähnlich ablaufen.

## Flexibilität als Erfolgsfaktor

Die initialen Anschaffungskosten einer wandelbaren Anlage liegen häufig über denen einer Sondermaschine. Eine entsprechende Investition rentiert sich für ein Unternehmen also erst durch die Montage mehrerer Produkte auf einer Anlage. Von entscheidender Bedeutung ist daher, dass die Wandlungsfähigkeit des Systems möglichst optimal ausgenutzt wird. Um dies zu gewährleisten, müssen Produktideen schon in einer sehr frühen Phase an die Fertigung auf einer wandelbaren Mikromontageanlage angepasst und optimiert werden.

In Bild 1 ist der Produktentwicklungsprozess nach Pahl und Beitz dargestellt. Im Rahmen des MIKROKOMO-Projekts haben die Projektpartner ein Konzept erarbeitet, mit dem das Produktdesign bereits in der Konzeptphase optimiert erstellt werden kann. Dazu haben sie ihr Wissen über die Anlagenfähigkeiten sowie die dahinterstehenden Prozess- und Operationsschritte eingebracht. Das Konzept ermöglicht es, die Produktentwicklung bereits in der Konzeptphase fertigungsgerecht zu gestalten. Auf diese Weise lassen sich teure Neu- und Umplanungen in späteren Entwicklungsphasen vermeiden.

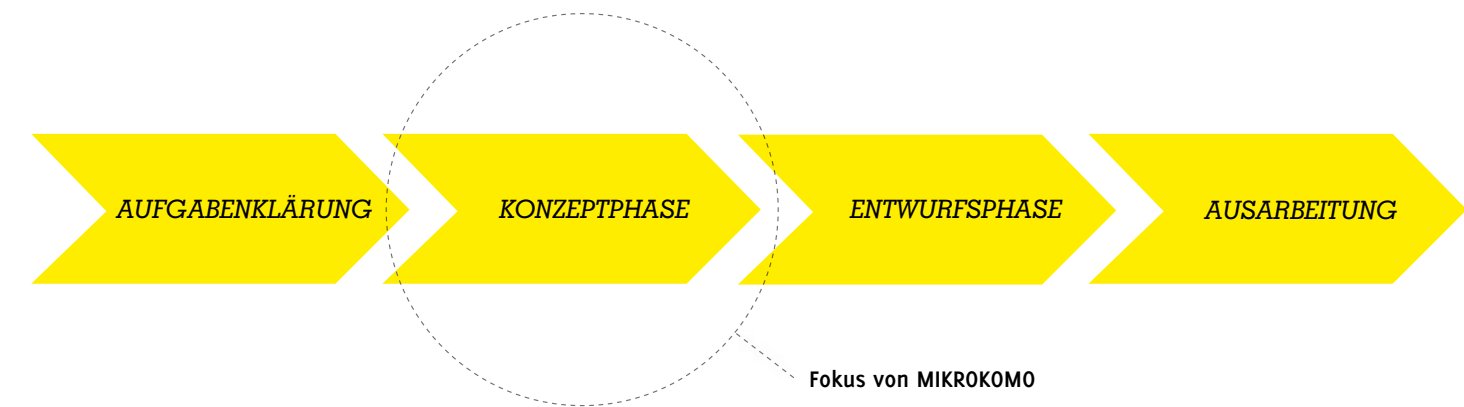


Bild 1: Produktentwicklungsprozess nach Pahl und Beitz

## Modell zur produktorientierten Anlagenplanung.

Hierzu muss ein Abstraktionsmodell entworfen werden, das sich in einer Konfiguratorsoftware mit einer intuitiven und einfachen Bedienung umsetzen lässt und Nutzern ermöglicht, Produktideen ohne größere Einschränkungen zu modellieren. Das Ergebnis ist eine passende Anlagenkonfiguration für die modellierte Produktidee. Damit erhalten die Nutzer ein erstes Feedback über die mögliche Mehrfachbenutzung eines Anlagen- und Modul-parks für verschiedene Produkte. Analog lässt sich überprüfen, ob sich eine vorhandene Anlagenkonfiguration zur Fertigung eines neuen Produkts eignet bzw. wie groß der Bedarf an neuen Montagemodulen ist. Dies ist elementar für eine verbesserte Ausnutzung der vorhandenen Module sowie für die Vermeidung kostenintensiver Spezialkonstruktionen.

Das Abstraktionsmodell besteht aus einem Beschreibungssystem für die Modellierung der Produktidee sowie aus nachgelagerten Entscheidungsebenen, in denen die eingegebenen Daten automatisiert verarbeitet werden.

### Schritt 1: Beschreibungssystem entwickeln

Der erste Schritt besteht in der Entwicklung eines einfachen Beschreibungssystems zur Modellierung von Produktideen in der Mikromontage. Hierfür sind einige Grundregeln zu beachten.

1. Es wird ein Satz relativ simpler, **grundlegender Prozessarten** definiert:
  - a) Fügen
  - b) Gießen
  - c) Formen
  - d) Inspizieren
2. Über diese Standardprozesse hinaus gibt es häufig einzelne Spezialprozesse. Es muss also ebenfalls ein **Black-Box-Prozess** existieren, der die Modellierung der Prozesse ermöglicht.

3. Prozessen ist immer mindestens ein Eingabebauteil sowie ein Ausgabebauteil zugeordnet, die sich voneinander unterscheiden.
4. Prozesse können Abhängigkeiten bezüglich ihrer Reihenfolge aufweisen.

### Schritt 2: Prozessschritte zuordnen

In einem nächsten Schritt sind den Prozessarten entsprechende konkrete Prozessschritte zuzuordnen. Bei einem Fügevorgang beschreibt dies die Auswahl aus möglichen Optionen, wie beispielsweise aus UV-basiertem Kleben oder Löten. Aus diesen Prozessschritten lassen sich von der Maschine durchzuführende Operationen herleiten. Für die Operationen müssen wiederum passende Hardwaremodule wie Greifer- und Bearbeitungsköpfe für die wandelbare Mikromontageanlage ausgesucht werden. Geometrische und materialbezogene Eigenschaften des zu montierenden Produkts beeinflussen die Auswahl der Prozessschritte und der dazu passenden Montagemodule.

Das Ergebnis dieses Schritts muss dabei keine singuläre Anlagenkonfiguration sein. Dies würde eine sehr präzise, in vielen Bereichen zu detaillierte Eingabe von Parametern erfordern. Das Softwaretool muss daher in der Lage sein, sowohl eine Anlagenkonfiguration auszuschließen, die den Anforderungen nicht entspricht, als auch passende Konfigurationen zu evaluieren. Eine dafür geeignete Bewertungsfunktion kann auf unterschiedliche Faktoren wie Taktzeiten, Flexibilität in der Umrüstung, Erfahrungswerte aus der Vergangenheit und prognostizierte Wirtschaftlichkeit setzen.

Entscheidungsbäume haben sich als nützliches Instrument bei der Festlegung konkreter Prozessschritte erwiesen. Sie visualisieren Prozesswissen und bieten eine formalisierte Grundlage für das systematische Erfragen von relevanten Parametern für die Entscheidung. Bild 2 zeigt einen Entscheidungsbaum für die Prozessart Fügen.



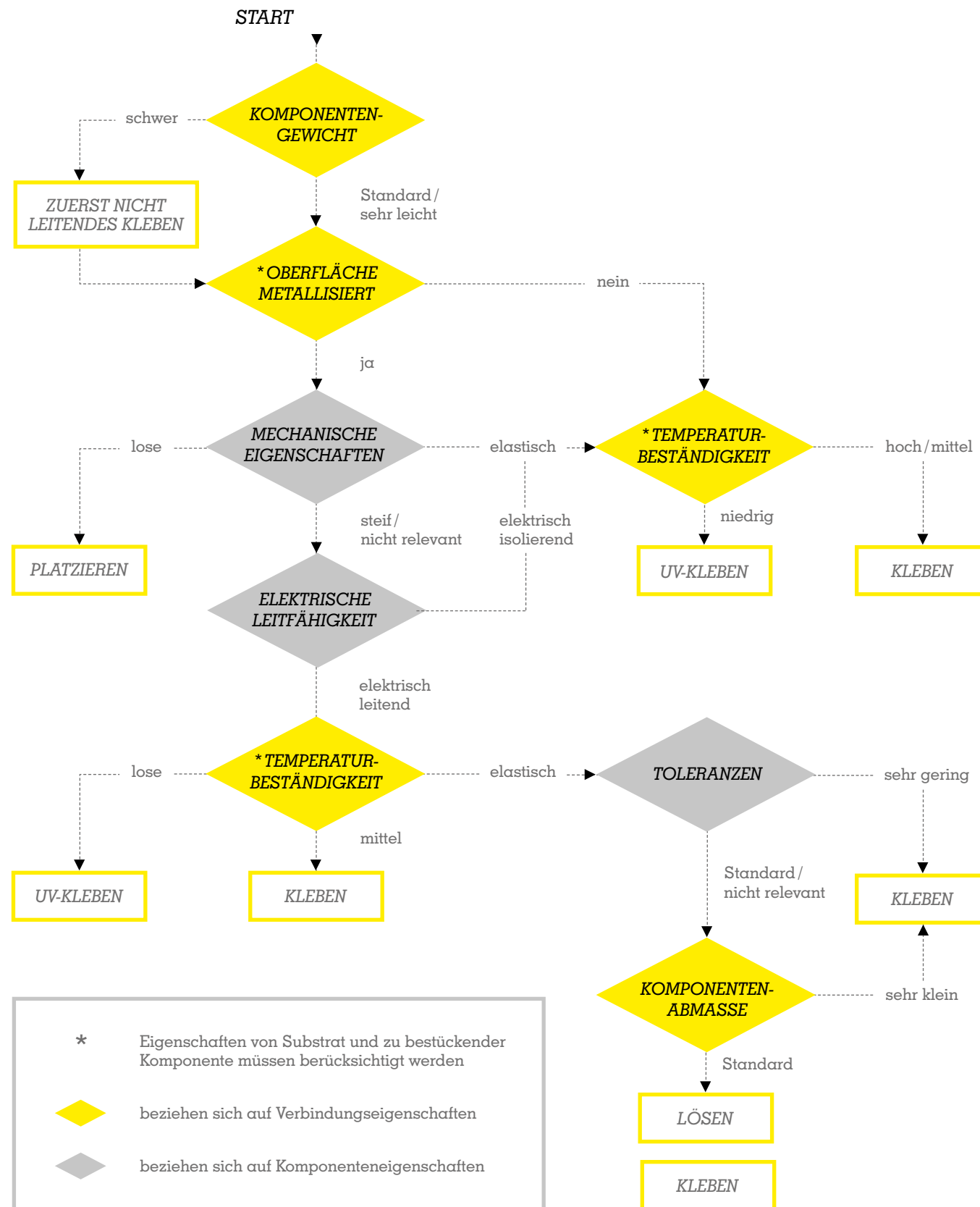


Bild 2: Entscheidungsbaum für einen Fügevorgang in der Mikromontage, Quelle: „Wandlungsfähige Mikromontage – Auf dem Weg zur TransferFab 4.0“ von Anika Noack (Masterarbeit)

Nutzer können mithilfe der Entscheidungsbäume die Menge an möglichen konkreten Prozessschritten eingrenzen. Dabei lassen sich auch in Vorgängerprozessen getroffene Entscheidungen einbeziehen, wie beispielsweise die Temperaturbeständigkeit eines Bauteils innerhalb einer Baugruppe.

#### Schritt 3: Anlagenkonfiguration festlegen

Um aus den definierten Prozessschritten passende Anlagenkonfigurationen abzuleiten, müssen die durchzuführenden Operationen festgelegt werden. Diese Zuordnung ist in der Regel statisch und in einer Datenbank hinterlegt. Passend zu den Operationen können die Anlagen und Module je nach Fähigkeit in eine dynamische und erweiterbare Datenbank eingepflegt werden.

Das Tool ist anhand der definierten Prozessschritte mit den dahinterstehenden Operationen in der Lage, Hardwarebauteile für die Produktion auszuwählen. Weiterhin ist natürlich auch ein Abgleich mit schon existierenden Anlagen und Modulen des Produktentwicklers möglich. Die Datenbank bietet zudem die Möglichkeit, weitere Informationen zu hinterlegen, die bei der Auswahl verschiedener Optionen für eine Operation nützlich sein könnten.

Ist es nicht möglich, den Zielprozess mit einer grundlegenden Prozessart zu modellieren, besteht die Alternative in der Definition eines Black-Box-Prozess. Für diesen Prozess steht kein Entscheidungsbaum zur Verfügung. Dafür können direkt

notwendige Maschinen und Module sowie weitere Parameter wie Taktzeit, Kosten und Größe eines zusätzlichen Black-Box-Moduls hinterlegt werden.

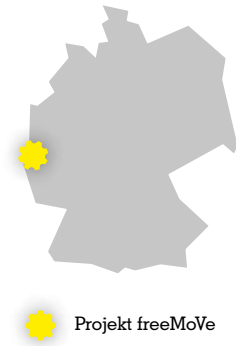
#### Schritt 4: Verschiedene Anlagenkonfigurationen technisch und wirtschaftlich bewerten

Der letzte Schritt besteht darin, aus den möglichen Anlagenkonfigurationen die optimale Lösung zu finden. Die Auswahl ist umso genauer, je besser die Qualität der Eingangsdaten ist. Fehlende Werte werden durch Intervalle ersetzt, die in den Datenbanken hinterlegt sind. Automatisierte Simulationen helfen bei der Bestimmung der Anlagengröße, der zu erreichenden Taktzeiten sowie beim Aufbau der Module im Bauraum und der dafür notwendigen Verfahrenwege. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden mit Wirtschaftlichkeitsberechnungen kombiniert, die Anschaffungskosten, Nutzeranforderungen und Vergleichsdaten berücksichtigen. Aus dieser Aggregation ergibt sich eine Kennzahl, mit deren Hilfe sich Anlagenkonfigurationen vergleichen lassen und eine optimale Lösung ableiten lässt.

Das Modell ermöglicht eine fertigungsgerechte Planung („Design for manufacturing“) von wandelbaren, effizienten Mikromontageanlagen. Die Grundlage dafür bildet eine mehrstufige Abstraktionslogik bzw. Systematik, die bei der Modellierung von Produktideen ansetzt. Durch den Einsatz des Modells lässt sich das Risiko einer Investition in eine wandelbare Mikromontageanlage deutlich senken - davon können sowohl die Hersteller als auch die Nutzer der Montageanlagen profitieren.

## DIE WICHTIGSTEN MODELL-BAUSTEINE AUF EINEN BLICK

- prozessbasiertes Beschreibungssystem zur Modellierung von Produktideen
- Entscheidungsbäume zur Visualisierung und Auswahl der Prozessarten
- statische Datenbank, die Prozessschritten durchzuführende Operationen zuweist
- dynamische Maschinen- und Moduldatenbank, die eine Verknüpfung der Operationen mit Hardwarebauteilen ermöglicht
- Bewertungsfunktion zum Ranking möglicher Anlagenkonfigurationen
- Softwarekonfigurator zur Nutzerinteraktion in Echtzeit



# LEIT- UND INFORMATIONSSYSTEME FÜR DIE FREI VERKETTETE MONTAGE

Thomas Batton, Christian Gayer und Uli Möhrmann (ISTEC Industrielle Software-Technik GmbH); Dennis Grunert und Sven Jung (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT); Amon Göppert (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL)

**Komplexe Montageprozesse erfordern eine effiziente Steuerung, die auf gut aufbereitete Informationen zurückgreifen kann und Produkthanforderungen automatisch auf den vom System bereitgestellten Prozessen abbildet.**

Kernelement in der freien Verkettung ist der Verzicht auf eine räumlich und zeitlich starre Verkettung der einzelnen Montageressourcen, sodass eine individuelle und flexible Montageabfolge für jeden Auftrag möglich ist - die sogenannte Auftragsroute. Dies erlaubt es, für unterschiedliche Varianten unterschiedliche Montageressourcen anzusteuern, bei belegten oder ausgefallenen Montageressourcen auf Alternativen auszuweichen und bei Bedarf weitere Montageressourcen zu integrieren. Die damit verbundene höhere Komplexität zu beherrschen ist Aufgabe smarter Leit- und Informationssysteme. Im freeMoVe-Projekt haben die Projektpartner dazu flexible Konzepte zur Steuerung von frei verketteten Montagesystemen entwickelt.

## Kommunikations- und Leitsystemarchitektur

Das Leitsystem ist für die kontinuierliche Planung der zu montierenden Produkte verantwortlich - also deren Verteilung auf die verfügbaren Montageressourcen. Eine weitere Aufgabe besteht darin, die Ausführung in Echtzeit zu steuern und zu überwachen. Mit der Einführung von frei verketteten Montagesystemen ergeben sich neue Anforderungen. Zentrale Aufgabe des Leitsystems ist es, die verschiedenen Produktflüsse effizient zu koordinieren sowie den Status und die Fähigkeiten der Montageressourcen zu

überwachen. Der Grad an Komplexität und Flexibilität übersteigt allerdings die Möglichkeiten bestehender Leitsysteme. Daher ist es notwendig, neue Ansätze für die Architektur solcher Systeme zu entwickeln. Die Interaktionen und Verantwortlichkeiten müssen dabei so gewählt werden, dass eine maximale Flexibilität bei gleichzeitiger Minimierung der Gemeinkosten für Abhängigkeiten gewährleistet ist. Die Kommunikations- und Leitsystemarchitektur ist daher in eine Reihe verschiedener Subsysteme unterteilt, die über offene und globale Schnittstellen zusammenarbeiten (Bild 1).

Das Leitsystem übernimmt insbesondere die nachstehenden, zeitlich aufeinander folgenden Aufgaben:

1. Matching zur Berechnung aller möglichen Auftragsrouten
2. Routing für die Auswahl der optimalen Route
3. Überwachung und Ausführung der ausgewählten Auftragsrouten

Dabei wird unterschieden zwischen der Hauptaufgabe des Leitsystems - der Organisation und Realisierung wertschöpfender Tätigkeiten durch Montageressourcen, wie Montagestationen oder Transporteinheiten - und den Aufgaben angrenzender Systeme - zum Beispiel der Materialbereitstellung und der Intra-logistik.

Das Leitsystem verwendet zur Planung Produktinformationen aus den ERP (Enterprise Resource Planning)- und sonstigen IT-Systemen eines Unternehmens sowie Statusinformationen des

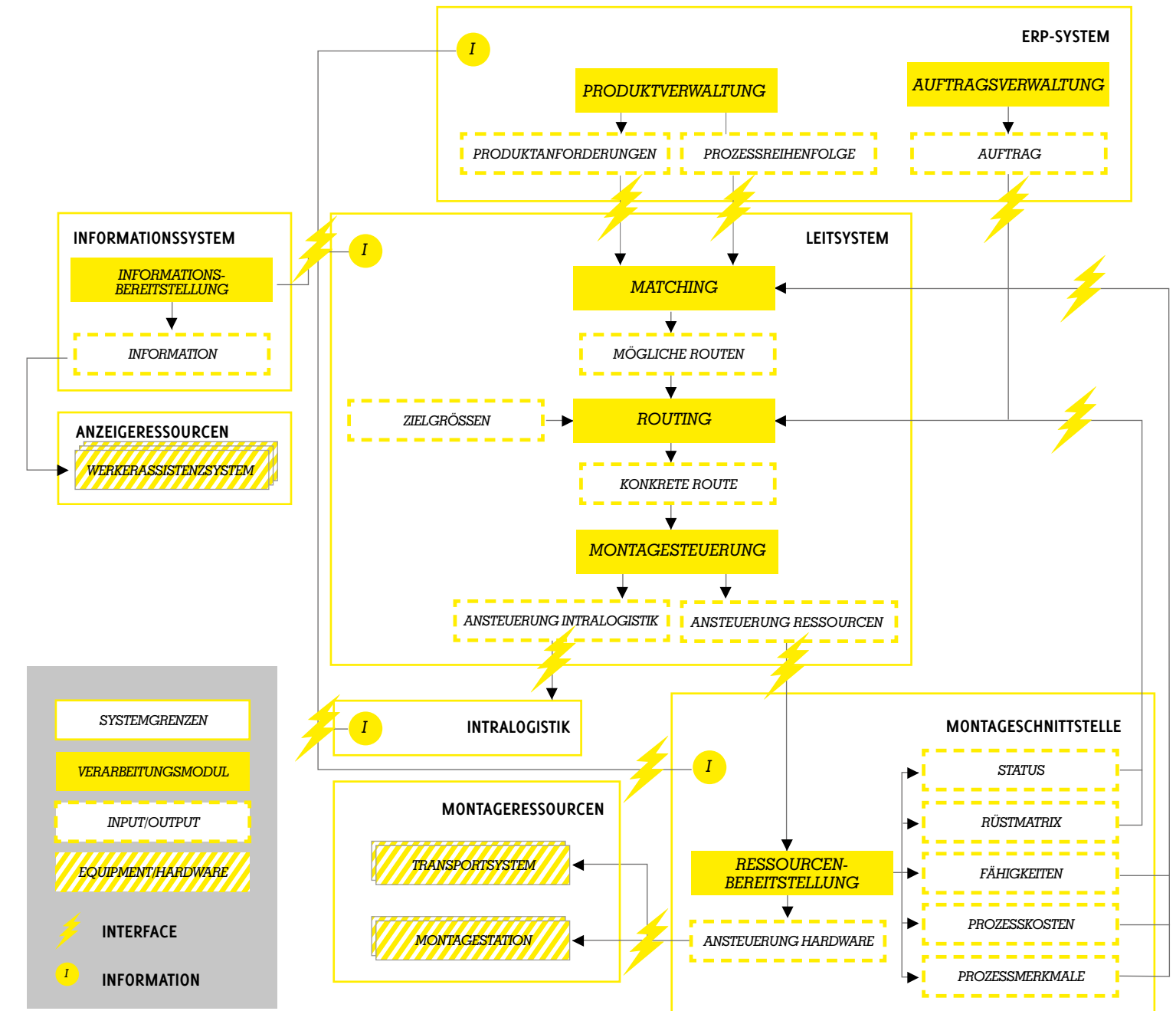


Bild 1: Referenzarchitektur für die Steuerung von frei verketteten Montagesystemen

Montagesystems. Während die Informationen aus dem ERP-System weitgehend statisch sind, sind die Informationen aus dem Montagesystem und angrenzenden Systemen, wie der Intra-logistik, dynamisch und unterliegen stochastischen Einflüssen, z.B. Ausfällen. Innerhalb der Architektur werden die verschiedenen physischen Montageressourcen daher als autonome Agenten abgebildet, die ihre Funktionalitäten und Merkmale über selbstbeschreibende Schnittstellen anbieten. Dies können entweder dynamische Bedingungen sein, wie der vom Routing-Modul benötigte Status, oder statische Bedingungen, wie die Fähigkeiten mit entsprechenden Kosten, Funktionen und Rüstmatrix. Die Schnittstelle fungiert dabei als digitales Abbild einer Montageressource und ist oberhalb der Feldebene zur Steuerung der einzelnen Ressourcen angesiedelt. Bestehende und neue Ressourcen werden durch ein Softwaremodul, die Montageschnittstelle, ergänzt und auf diese Weise in das Agentensystem integriert.

## Berechnung von Auftragsrouten

Eine der größten Herausforderungen einer effizienten und adaptiven Produktionsplanung besteht darin, montagerelevante Anforderungen des Produkts automatisch auf die vom System bereitgestellten Prozesse abzubilden. Einerseits wird eine Montageressource durch Fähigkeiten mit inhärenten Charakteristiken beschrieben, welche sogenannte Fähigkeitsräume aufspannen. Andererseits verlangt ein zu montierendes Produkt nach bestimmten Bearbeitungsschritten mit spezifischen Prozessparametern, die jeweils Punkte innerhalb dieser Fähigkeitsräume darstellen. Ziel des Matchings ist es dann, geeignete konkrete Montageprozesse bestimmter Ressourcen zu finden, deren Parameter zu den Anforderungen des Produkts passen - sogenannte Services. Dies geschieht, indem die erforderlichen Prozessparameter in den n-dimensionalen Fähigkeitsräumen abgebildet werden.



Als Ergebnis des Matchings stehen nun alle möglichen Auftragsrouten zur Verfügung. Für das Routing werden diese Informationen aufgegriffen und die vom Matching erstellten Routen bewertet. Diese Bewertung erfolgt anhand von Zielgrößen aus dem ERP-System, z.B. Lieferdatum, und anhand aktueller Statusinformationen aus der Montage. Der Routing-Algorithmus nutzt diese Informationen zur Auswahl einer konkreten Auftragsroute, die anschließend an die betreffenden Komponenten der Feldebene zur Umsetzung kommuniziert wird. Der gesamte Prozess des Matchings und Routings läuft in einem Zyklus ab, um auf statische und dynamische Veränderungen im Montagesystem reagieren zu können.

### Universelles Informationsmodell zur Produktbeschreibung

Für eine effiziente Routenplanung und -steuerung benötigt das Leitsystem Informationen über das Produkt aus dem Planungssystem sowie Informationen über den aktuellen Zustand und die Fähigkeiten aller Montageressourcen. Voraussetzung für die unabhängige Kommunikation von Maschinen und Anlagen ist dabei ein universelles, beschreibendes Informationsmodell. Grundidee ist, dass jede Maschine digital durch eine semantische Schnittstelle repräsentiert wird, die ihre Daten und Dienste auf eine serviceorientierte Weise anbietet. Diese Modellstrukturen müssen so konzipiert sein, dass sie universell gültig sind, um alle produktionsrelevanten Prozesse abzudecken, und gleichzeitig Schlüssigkeit gewährleisten.

Im Projekt wurde ein universelles, umfassendes serviceorientiertes Informationsmodell für montagerelevante Merkmale mit vordefinierten Strukturen und deren semantischen Beschreibungen entwickelt. Zur Modellierung der Fähigkeiten einer Montageressource wird diese in sogenannte Elementarfähigkeiten zerlegt und anschließend erneut zusammengesetzt. Im Detail wird jede Montageressource in Anlehnung an gängige, richtliniengestützte Bezeichnungen aus der Praxis einem Prozess, z.B. nach VDI 2860 oder DIN 8085 zugeordnet und dann über Parameter, die von Expertinnen und Experten bestimmt werden, beschrieben. Den entsprechenden Parametern werden Wertebereiche zugeordnet, um einen n-dimensionalen Fähigkeitsraum der Montageressource aufzuspannen. Zur Auswahl der optimalen Ressourcenbelegung durch das Routing definiert jede Fähigkeit zudem die benötigten Kosten und Rüstzustände.

Produktseitig wird die gleiche semantische Beschreibung mithilfe des systemweiten Informationsmodells für eine Beschreibung der notwendigen Prozesse verwendet, wobei hier nur einzelne Werte eingesetzt werden. Das Ziel ist, einen Fähigkeitsraum zu bilden, der die Prozessgrenzen einer Montageressource beschreibt, sodass im Matching geprüft werden kann, ob das Produkt von dieser Montageressource bearbeitet werden kann.

### Serviceorientierte „Plug & Produce“-Schnittstelle

Zuletzt bedarf es seitens der Montageressourcen einer flexiblen und anpassungsfähigen „Plug & Produce“-Schnittstelle zur Einbindung in das Leitsystem – der sogenannten Montageschnittstelle. Ein vielversprechender industrieller Standard, der sich auf die Interoperabilität zwischen Komponenten verschiedener Hersteller konzentriert, ist die OPC Unified Architecture (OPC-UA). OPC-UA nutzt den serviceorientierten Ansatz, um generalisierte Dienste mit einem einheitlichen Adressraum anzubieten. Jede Montageressource muss ihr individuelles semantisches Informationsmodell umsetzen und die Daten und Fähigkeiten an das Leitsystem übermitteln. Dies kann über das OPC-UA-Protokoll oder auch über eine proprietäre Montageschnittstelle des Leitsystems, z.B. XML, erfolgen.

### Informationssysteme als Mensch-Maschine-Schnittstelle

Während die Kontrollsysteme auf technischer Ebene arbeiten, spielt auch der Mensch als kontrollierende und aktive Instanz eine Rolle. Damit er diese wahrnehmen kann, muss das Gesamtsystem transparent sein. Denn die neuen Freiheiten in der Montagereihenfolge führen zu einem erhöhten Informationsbedarf des Montagepersonals. Statt des bisherigen starren Arbeitsablaufes muss der Mensch nun in ein verändertes Arbeitsumfeld und eine veränderte Arbeitsweise eingebunden werden. Informationssysteme übernehmen diese Integration und bilden so die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Zentrales Modul ist das Informationssystem, das die Informationen aus allen Systemen aggregiert und an das einzelne Assistenzsystem verteilt. Denkbar sind verschiedene Endgeräte, wie Displays, Smartphones, Tablets oder Smart Wearables. So können z.B. individuelle Montageanleitungen für manuelle Montageaufgaben erstellt oder dem Bediener der Systemstatus angezeigt werden. Unterschieden werden dabei Systeme zur Informationsbereitstellung, zur Entscheidungsunterstützung sowie zur autonomen Entscheidungsfindung.

Darüber hinaus benötigt das Leitsystem zur Steuerung und weiteren Einplanung der Arbeitskräfte Transparenz über die realen Arbeitsfortschritte der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Dies ist besonders bei der manuellen Montage entscheidend, bei der der Mensch die zentrale „Arbeitsressource“ darstellt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, Funktionalitäten zur Rückführung der Arbeitsfortschritte an das Leitsystem bereitzustellen. Dies wird u.a. mittels der in Smart Devices integrierten Sensorik ermöglicht. So dient beispielsweise die Kamera zur Dokumentation.

### Assistenz durch Tablets, Smartphones & Co.

Smarte Informationssysteme müssen nach ISO 9241 einen hohen Grad an Gebrauchstauglichkeit garantieren. Die drei Leitkriterien hierzu lauten: Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Effektivität meint, ob das System den Anwender bei der Zielerreichung unterstützt. Die Effizienz beschreibt, wie diese Ziele erreicht werden und wie das Verhältnis der eingesetzten Ressourcen zu den erzielten Ergebnissen ist. Das Kriterium der Zufriedenheit

schließlich misst, inwiefern die Anwender willens sind, das System zu nutzen. Darüber hinaus müssen technologische Anforderungen (z.B. Leistung der Sensorik, Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit), ergonomische und gestalterische Anforderungen (z.B. Tragekomfort, Farbgebung und Kontrast) sowie Anforderungen an die effektive Einbindung (Fähigkeit zur Mitarbeiterunterstützung) beachtet werden. Hinzu kommt eine rollen- und situationsbasierte Informationsbereitstellung.

Bild 2 zeigt verschiedene Eigenschaften verschiedener Smart Devices. Jedes Gerät besitzt spezifische Vor- und Nachteile, die je nach Anwendungsfall stärker oder schwächer ins Gewicht fallen. Im freeMoVe-Projekt kamen Tablets zum Einsatz, da die Informationen lediglich zwischen einzelnen Montageschritten (z.B. „Welcher Auftrag muss als Nächstes bearbeitet werden?“) verfügbar sein mussten. Das größere Display der Tablets überwog hier beispielsweise den Vorteil der handfreien Informationsbereitstellung bei Smart Glasses, die zudem eine schlechtere Ergonomie aufweisen (z.B. Gewicht).





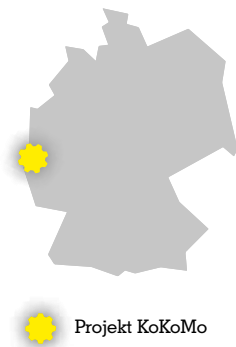
 SMARTPHONE	 TABLET	 DATENBRILLE	 SMARTWATCH
+ ortsunabhängig	+ ortsunabhängig	+ ortsunabhängig	+ kompakt
+ Scannen möglich	+ Scannen möglich	+ Hände sind frei	+ ergonomisch
+ Aufnahme von Bildern möglich	+ Aufnahme von Bildern möglich	+ Aufnahme von Bildern möglich	+ geringe Ablenkung
+ hohe Leistung	+ hohe Leistung	+ Erweiterung der Realität	
+ Portabilität/Handlichkeit	+ Informationsdichte	+ Scannen möglich	
- Hände sind nicht frei	- Hände sind nicht frei	- weniger intuitiv	- Informationsgehalt
- kann behindernd wirken	- kann behindernd wirken	- geringere Eingabemöglichkeiten	- geringe Bedienmöglichkeiten
- kann leicht abhandenkommen	- kann leicht abhandenkommen	- Beeinträchtigung des Sichtfeldes	- limitierte Anwendungsfälle
- mittlere Informationsdichte	- Handlichkeit	- schwache Performance	

Bild 2: Eigenschaften verschiedener Smart Devices



# PRODUKTLEBENS- ZYKLUSMANAGEMENT FÜR MRK

Dr. Werner Herfs, Simon Storms, Simon Roggendorf, Oliver Petrovic (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL); Viktor Schubert, Marcus Schneider, Dr. Seref Erkayhan (Seeburger AG); Patrick Rückert, Prof. Dr. Kirsten Tracht (Universität Bremen, Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen, bime); Kurt Heinen (Heinen Automation GmbH & Co. KG)

## Mit einem Informationsmanagement, das auf Lebenszyklusdaten, Simulationen und eine serviceorientierte Architektur setzt, gelingt die effiziente Planung der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte.

Der Lebenszyklus eines mithilfe von MRK montierten Produkts unterscheidet sich zunächst nicht signifikant von einem manuell montierten. In den Phasen von der Idee eines Produkts bis zur Übernahme durch den Kunden fallen zahlreiche Daten an. Konzepte zur Nutzung dieser Daten lassen sich unter dem Begriff Produktlebenszyklusmanagement (PLM) zusammenfassen. Die sogenannten Liebensteiner Thesen – entwickelt von einer Gruppe von Unternehmen – beschreiben PLM sehr treffend als unternehmensspezifisches Konzept (nicht als Lösung), das sowohl Lösungskomponenten, wie z.B. CAD (Computer-aided Design), CAM (Computer-aided Manufacturing), Virtual Reality (VR) und Produktdatenmanagement (PDM), als auch Schnittstellen zu anderen Systemen wie ERP (Enterprise Resource Planning) oder MES (Manufacturing Execution System) enthalten sollte.

## Produktionsplanung mithilfe Digitaler Zwillinge

Die Produktionsanlage, auf der ein Produkt montiert wird, ist aus Sicht des Anlagenbauers wieder ein Produkt. Das PLM-Konzept muss damit übertragbar und auf den entsprechenden Anwendungsfall anpassbar sein. Wie in Bild 1 zu sehen, überschneiden sich die Lebenszyklen des Produkts und der Produktionsanlage in einem Punkt, der aus Sicht des Produkts „Produktion“ und aus Sicht der Anlage „Betrieb“ genannt werden kann. In der Abbil-

dung sind anlagenbezogene Technologien und Phasen gelb markiert. Je individueller eine Produktionsanlage auf ein Produkt abgestimmt ist, desto mehr Verbindungen existieren zwischen den beiden Lebenszyklen, bevor sie sich schneiden.

Im Laufe der Produktentwicklung entsteht ein digitales Abbild von Produkt und Produktionsanlage, das man Produktmodell oder Anlagenmodell nennt. Das Produktmodell beschreibt einen Typ bzw. eine Klasse eines Produkts oder einer Produktvariante und enthält Konstruktionsdaten, Funktionsbeschreibungen oder Montageinformationen. Es ist eine Komponente eines klassischen PLM-Systems und Teil des Digitalen Zwillinges.

Während der Produktion und Montage eines Produkts wird sein Digitaler Zwilling zusätzlich mit Informationen aus der Produktion bzw. der realen Welt angereichert. Der Digitale Zwilling ist somit das vollständige digitale Abbild eines Produkts. Er bezieht sich fortan auf die einzelne Instanz eines Produkts und erweitert damit die Idee des klassischen – auf einen Produkttyp bezogenen – PLM. Die Instanz eines Produkts enthält somit beispielsweise den aktuellen Montagezustand, Qualitätsmesswerte oder Nutzungsdaten. Die Instanz der Anlage enthält Informationen zu Produktionsbedingungen, Maschinenparametern oder Fehlerzustandsinformationen.

Ist der Digitale Zwilling entsprechen modelliert und maschinenlesbar in standardisierter Form verfügbar, kann er u.a. zur rechnergestützten Produktionsplanung genutzt werden. Im einfachsten Fall sind bereits Montagezeiten oder Betriebsmittelzu-

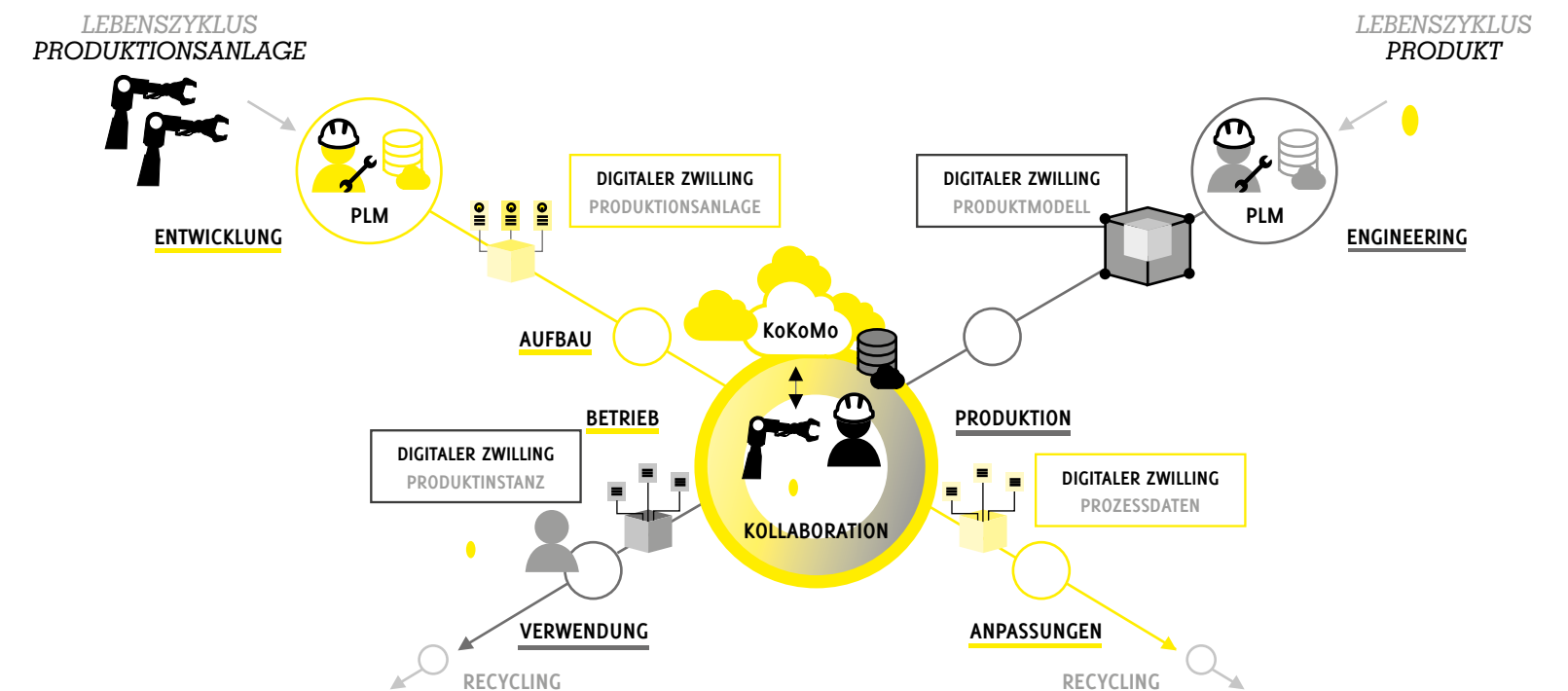


Bild 1: Verbindung zwischen dem Produkt- und dem Produktionsanlagen-Lebenszyklus, Quelle: WZL der RWTH Aachen, Abteilungsleitbild Automatisierung und Steuerungstechnik

gehörigkeiten definiert. In komplexeren Fällen werden aufgrund der semantischen Beschreibung von Produkt und Produktionsanlage Betriebsmittel automatisiert und fähigkeitsbasiert auf verschiedene Anlagen oder auch – und das ist im MRK-Kontext weiterhin eine Herausforderung – auf den Menschen aufgeteilt. Zudem werden Roboterprogramme automatisiert angepasst oder Montageanleitungen Werker-gerecht aufbereitet und visualisiert. Im Falle von MRK-Anwendungen ist es mithilfe des instanzbezogenen Digitalen Zwillinges möglich, spontan auf bestimmte Umstände (z.B. manuell auszuführende Korrekturen) zu reagieren. Die erwähnten Planungsaufgaben lassen sich in einer Simulationsumgebung durchführen und evaluieren.

## PLM für kollaborative Montagesysteme

Besondere Anforderungen an das PLM-System ergeben sich durch den Einsatz von MRK: Da sich MRK insbesondere für die flexible Fertigung kleiner Serien oder variantenreiche Produkte eignet, sollte bei der Konzeption eine auf das Produkt individualisierte Produktionsanlage vermieden werden. Das kollaborative Montagesystem sollte stets neu konfigurierbar sein und Aufgaben auf bereits existierende Ressourcen flexibel verteilen können.

Die Implementierung und effiziente Nutzung von MRK erfordert einen konsistenten PLM-Ansatz, der nicht nur die Produktstruktur und eine umfassende Aufgabenbeschreibung, sondern auch die besonderen Anforderungen in der Planungs- und Bereitstellungsphase berücksichtigt. So sind beispielsweise spezielle

Planungswerkzeuge erforderlich, deren Leistungsspektrum vom Wissens- und Prozessmanagement für die lang- und kurzfristige Prozessplanung bis hin zur Echtzeit-Interaktion (z.B. Online-Programmierung) umfassen sollte.

Als Ergebnis aktueller Forschungsarbeiten stehen Planungswerkzeuge für kollaborative Prozesse sowie virtuelle Techniken für die flexible Gestaltung von Arbeitsplätzen und Fertigungssystemen zur Verfügung. Es gibt jedoch derzeit keine Ansätze für ein konsolidiertes Informationsmanagement in der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte. An diesem Punkt setzte das Projekt KoKoMo an. Die Projektpartner haben einen Lösungsansatz entwickelt, der auf einer Kombination von Simulation, PLM und einer serviceorientierten Architektur basiert. Der durch die Modellierung von Fähigkeiten und Anforderungen erzeugte Mehraufwand soll dabei durch einen PLM-Ansatz minimiert werden. Durch eine serviceorientierte Architektur, basierend auf dieser Modellierung, soll eine erhöhte Flexibilität der Produktionsanlage erreicht werden.

Ein Verfahren zum Informationsmanagement in einer flexiblen Produktionsumgebung ist die Implementierung dienstleistungsbasierter Fertigungssysteme. Diese ermöglichen es Produktionssystemen, sich automatisch an wechselnde Systemzustände und externe Anforderungen anzupassen. Um ein solches Fertigungssystem abzubilden, kommt eine fähigkeitsbasierte Planung zum Einsatz. Sie zielt darauf ab, das Lebenszyklusmanagement von technischen Anlagen bei lang- und kurzfristigen Planungsaktivitäten sowie die vertikale Integration zwischen

verschiedenen IT-Systemen in einem produzierenden Unternehmen zu unterstützen (Pfrommer et al. 2014 <sup>1</sup>). Das im Projekt KoKoMo umgesetzte System basiert auf bestehenden Standards und ermöglicht eine flexiblere Produktion im Sinne von „plug & produce“. Um die Kommunikation zwischen allen Einheiten herzustellen, kommt eine Integrationsplattform zum Einsatz, die jede angebundene Komponente (entweder Hardware oder Software) in die Lage versetzt, sich selbst und ihre Fähigkeiten zu beschreiben sowie diese Informationen innerhalb des Produktionssystems weiterzugeben.

### Planungsspezifische Nutzung der Lebenszyklusinformationen

Der erste Schritt zur Realisierung einer PLM-basierten und serviceorientierten Produktion besteht darin, das Produktmodell als Teil des Digitalen Zwillings auf Basis von CAD-Daten abzubilden und es mit Metadaten anderer Anwendungen zu ergänzen. Metadaten bestehen z.B. aus Greifstellen, Werkzeugschnittstellen, technischen Daten oder allgemein Montageinformationen für Mensch oder Roboter. Darüber hinaus beinhaltet die Modellierung des Produkts einen maschinenlesbaren Arbeitsplan, der später die Grundlage für den Workflow von Mensch und Roboter bildet. Durch die Verwendung industrieller Modellierungsstandards und eines PDM-Systems lassen sich Daten mit minimalem Aufwand flexibel wiederverwenden. Dadurch können interoperablere Systeme zur Planung, Ausführung und Lehre der Mensch-Roboter-Interaktion angebunden werden.

Bild 2 veranschaulicht den Workflow der Konsolidierung und Nutzung des Datenmodells für die Virtualisierung, die physikalische Simulation und die Übertragung in die Fertigung. Erteilt der Kunde über ein ERP-System einen individuellen Auftrag für eine Produktvariante, werden alle vorhandenen Daten für die Planung und Produktion verwendet. Im Mittelpunkt stehen variantenreiche oder individualisierte Produkte. Dadurch entstehen teils neue, noch nicht oder in anderer Kombination ausgeführte Arbeitsvorgänge (1). Handelt es sich um eine neue Variante, muss zunächst eine typspezifische Produkt-ID mit Stückliste und

Arbeitsplan generiert werden (2). In der folgenden Produktionsplanung (3) werden die vorhandenen Aufträge unter Berücksichtigung verschiedener Optimierungskriterien den verfügbaren Ressourcen zugeordnet. Die fähigkeitsbasierte Zuordnung kann beispielsweise über Produkt-/Ressourcendefinitionen (z.B. Greifplanung (Roggendorf et al. 2018 <sup>2</sup>) oder über maschinelle Lernalgorithmen (Storms et al. 2017 <sup>3</sup>) erfolgen. Wurde eine Ressource in der Vergangenheit in einem bestimmten Arbeitsschritt (4) noch nicht genutzt, wird dies in einer VR-Simulation (5) durchgeführt (Rückert et al. 2018 <sup>4</sup>). In der Simulation wird die Kompatibilität der Ressource für den Arbeitsschritt final validiert und die Ressourcenkonfiguration erstellt. Auf diese Weise wird der Produktionsprozess auf Basis des Digitalen Zwillings simuliert und mit den Daten aus der neuen Variante und der Ressourcenkonfiguration kumuliert.

Basierend auf der VR-Simulation lassen sich kollisionsfreie Roboterwege automatisch generieren, die Greiferplanung durchführen und die Sicherheit von Mensch-Roboter-Interaktionen verifizieren. Dieser Schritt ist wichtig, da der Mensch einen nicht deterministischen Agenten im Prozess darstellt – einen im Sinne der Informatik autonomen, nicht berechenbaren Akteur. Mithilfe einer Augmented-Reality-Simulation können Aktionen und Bewegungen im Montageprozess aufgezeichnet und dadurch unvorhergesehene Bewegungen und Kollisionen aufgezeigt werden. Die Ressourcen werden aus der Simulation parametrisiert, Informationen im Arbeitsplan gespeichert und zur Ausführung der Montageaufgabe auf den ausgewählten Ressourcen verwendet (6) – siehe Beitrag „Aufgabenorientierte Zuordnung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter“ in Kapitel 4. Treten bei der Montage Änderungen der Umstände ein (7), werden diese in der Simulation während der Montagezeit überprüft. Dies kann bedeuten, dass der Roboter seine Bewegung in Abhängigkeit vom menschlichen Verhalten anpassen muss oder dass die Aufnahmeposition der Komponenten undefiniert ist und von Kameras während der Montage erfasst wird. Das im Arbeitsablauf generierte Wissen wird konsolidiert und weitergegeben, um den Produktionsprozess kontinuierlich zu verbessern.

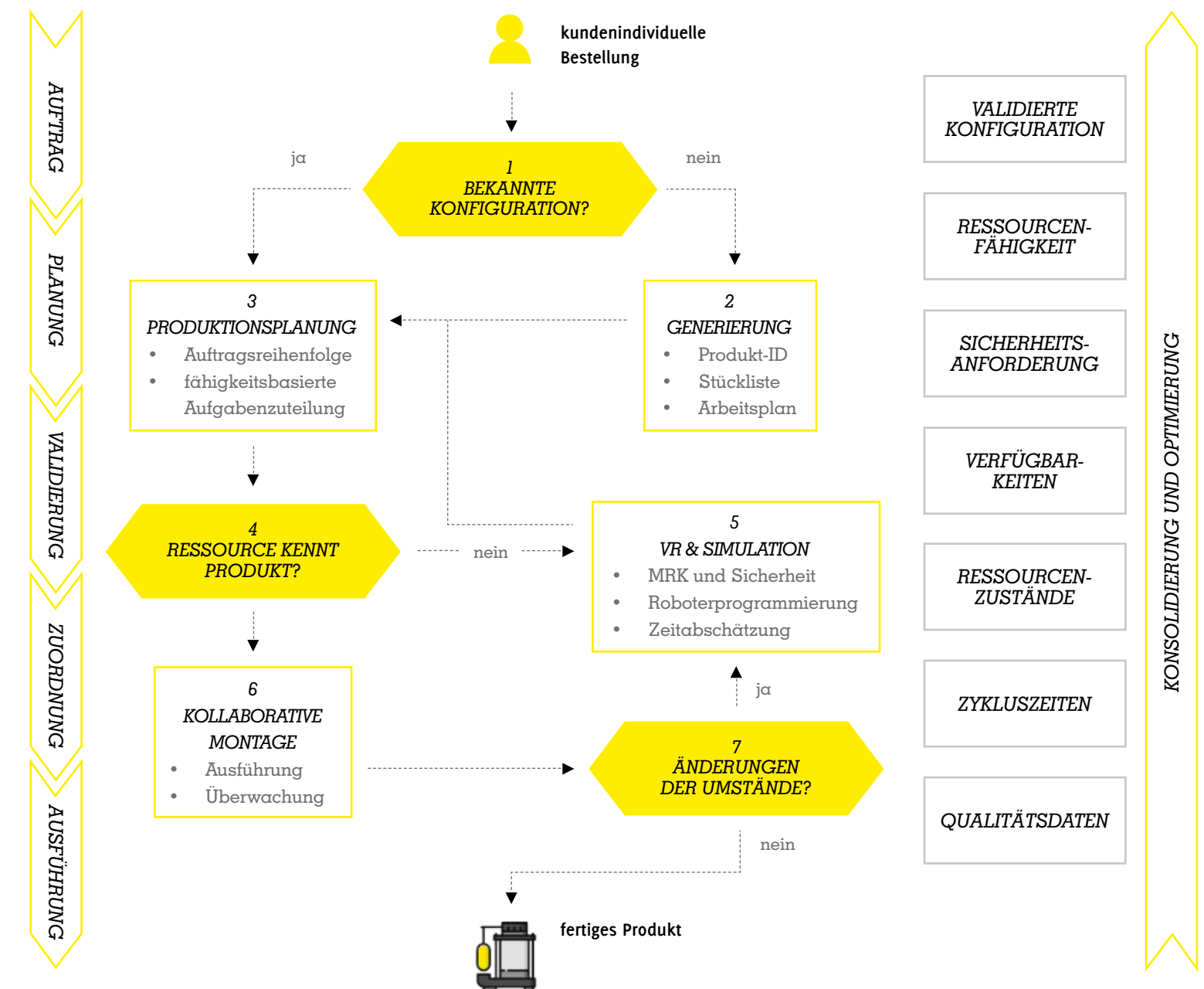


Bild 2: KoKoMo-Methode: Workflow von der Bestellung zum finalen Produkt

#### Literatur

- 1 Pfrommer, J.; Stogl, D.; Aleksandrov, K.; Schubert, V.; Hein, B. (2014): Modelling and orchestration of service-based manufacturing systems via skills. In: Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation, 16–19 Sept. 2014, Barcelona, Spain. Piscataway, NJ, S. 1–4.
- 2 Roggendorf, S.; Ecker, C.; Storms, S.; Herfs, W. (2018): Simulation-Based Planning of Grasping Processes for Assembly Robots. In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hg.): Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). Cham: Springer, 228–236. Online verfügbar unter [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1_23).
- 3 Storms, S.; Roggendorf, S.; Stamer, F.; Obdenbusch, M.; Brecher, C. (2017): PLM -supported automated process planning and partitioning for collaborative assembly processes based on a capability analysis. In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hg.): 7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5.–6. Oktober 2017. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, S. 241–249. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/712002>, zuletzt geprüft am 22.08.2018.
- 4 Rückert, P.; Meiners, F.; Tracht, K. (2018): Augmented Reality for teaching collaborative robots based on a physical simulation. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hg.): Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. 1. Auflage 2018. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, S. 41–48.



# SIMULATION

## KAPITEL 3

Um Planungsalternativen in der automatisierten und manuellen Montage zu bewerten und ihre Komplexität zu beherrschen, ist der Einsatz von Simulationssoftware unerlässlich. Ereignisdiskrete Simulationen werden beispielsweise für die Bestimmung des erreichbaren Durchsatzes von Montagesystemen mit einer Vielzahl von Stationen wie auch für die Bestimmung von Abläufen in komplexen Stationen eingesetzt. Die Untersuchung neuer Montageansätze wie der frei verketteten Montage oder der automatisierten Mikromontage stellt Planer vor die Herausforderung, eine Vielzahl von Varianten mittels Konfiguratoren zu bewerten. Kontinuierliche Simulationen werden insbesondere für Ergonomie- und Mehrkörpersimulationen eingesetzt. Dies eignet sich für den Bereich der kollaborativen Montage, da es hier sowohl den Arbeitsplatz der Montagefachkraft wie auch den Arbeitsbereich des Roboters zu simulieren gilt und dabei eine Vielzahl von Arbeitssicherheitsrestriktionen zu berücksichtigen sind. Neue Planungsmethoden wie Virtual und Augmented Reality helfen hier, die optimale Auslegung zu finden.

## SIMULATION ZUR PLANUNG UND OPTIMIERUNG VON MONTAGESYSTEMEN

- 60** Wortwechsel
- 66** Simulation als Werkzeug in der Montageplanung  
(ProMoA)
- 68** Simulationsanalyse frei verketteter Montagesysteme  
(freeMoVe)
- 70** Prozess- und Rüstplanung für modulare Mikromontageanlagen  
(MIKROKOMO)
- 72** Simulationssysteme für MRK-Lösungen  
(KUKoMo)
- 76** Virtuelle Erprobung kollaborativer Montagesysteme  
(KoKoMo)
- 78** Werkzeug zur realitätsnahen MRK-Simulation  
(KoMPI)



*„Mithilfe von Simulationen lassen sich Prozesse ausprobieren und visualisieren, bevor diese überhaupt existent sind.“*



**JÖRG RIEGEL**

Verantwortlicher für Forschung und Entwicklung im Bereich Fabrikplanung bei der plavis GmbH



**STEFAN STÜRING**

Geschäftsführer der LIVINGSOLIDS GmbH

*„Die Verfügbarkeit und Qualität der Produkt- und Prozessdaten ist entscheidend für Aufwand und Güte der Simulation.“*

# SEL

# WORTWECHSEL



*Simulation zur Planung und Optimierung von Montagesystemen*

**JÖRG  
RIEGEL**

**STEFAN  
STÜRING**

## WELCHE VORTEILE ERGEBEN SICH DURCH DEN EINSATZ VON SIMULATIONS-LÖSUNGEN?

Mithilfe von Simulationen lassen sich Was-wäre-wenn-Szenarien durchspielen und Prozesse ausprobieren und visualisieren, bevor diese überhaupt existent sind. So können verschiedene Fertigungsprozesse und die dafür erforderlichen Ressourcen bereits in der Planungsphase parametrisiert und bewertet werden. Dies ermöglicht eine qualitativ hochwertige und effiziente Konzeption von Anlagen und Abläufen. Eine gute Simulationslösung zeichnet sich außerdem dadurch aus, dass ihre Ergebnisse transparent, anschaulich und auch für Nicht-Experten verständlich dargestellt sind.

Insbesondere bei der Einführung von MRK sollte man unbedingt auf Simulationen setzen. Bei MRK geht es in der Regel um komplexe Abläufe, in denen Produkte mit hoher Variantenvielfalt gefertigt werden. Hier greifen klassische Planungslösungen oft zu kurz. Den Startpunkt der Simulation bildet die Antwort auf die Frage, wie der Soll-Prozess aussehen soll. Im Anschluss daran erfolgen Variantenuntersuchungen. Darin wird der geeignete Einsatzfall definiert, mit dem sich die gesetzten Ziele in Bezug auf Bearbeitungszeit, Ressourcen und Kosten erreichen lassen.

## WELCHE ERKENNTNISSE, DIE SIE DURCH DEN EINSATZ EINER SIMULATION GEWONNEN HABEN, WAREN AM BEMERKENSWERTESTEN FÜR SIE?

Im Gespräch mit Kunden und Anwendern stellen wir immer wieder fest, dass es viele unterschiedliche Vorstellungen darüber gibt, was eine Simulation eigentlich ist. Sie reichen von einer 3-D-Darstellung bis hin zur komplexen Ablaufsimulation. Hier gilt es, zunächst die Erwartungen an dieses Planungsinstrument abzugleichen. Zudem ist es wichtig - zumindest für die Fabrik- und Materialflussplanung -, über ausreichendes Prozesswissen zu verfügen. Für den Erfolg einer simulationsgestützten Planung ist daher die enge Zusammenarbeit von IT, Planern und Produktionsexperten essenziell.

Wir arbeiten derzeit - u.a. im SafeMate-Projekt - daran, reale Menschen in eine Simulation durch das sogenannte Motion Capturing einzubinden. Unser Ziel ist es, diese Methodik mit preiswerter Hardware - die für die beteiligten Personen keine komplizierten, mit Sensorik ausgestatteten Anzüge erfordert - und überschaubarem Kalibrierungsaufwand erschwinglicher und schneller zu machen. Wir denken, dass wir damit gerade für MRK-Anwendungen, die hohe Sicherheitsanforderungen haben, einen wichtigen Beitrag zu mehr Effizienz in der Planung leisten.

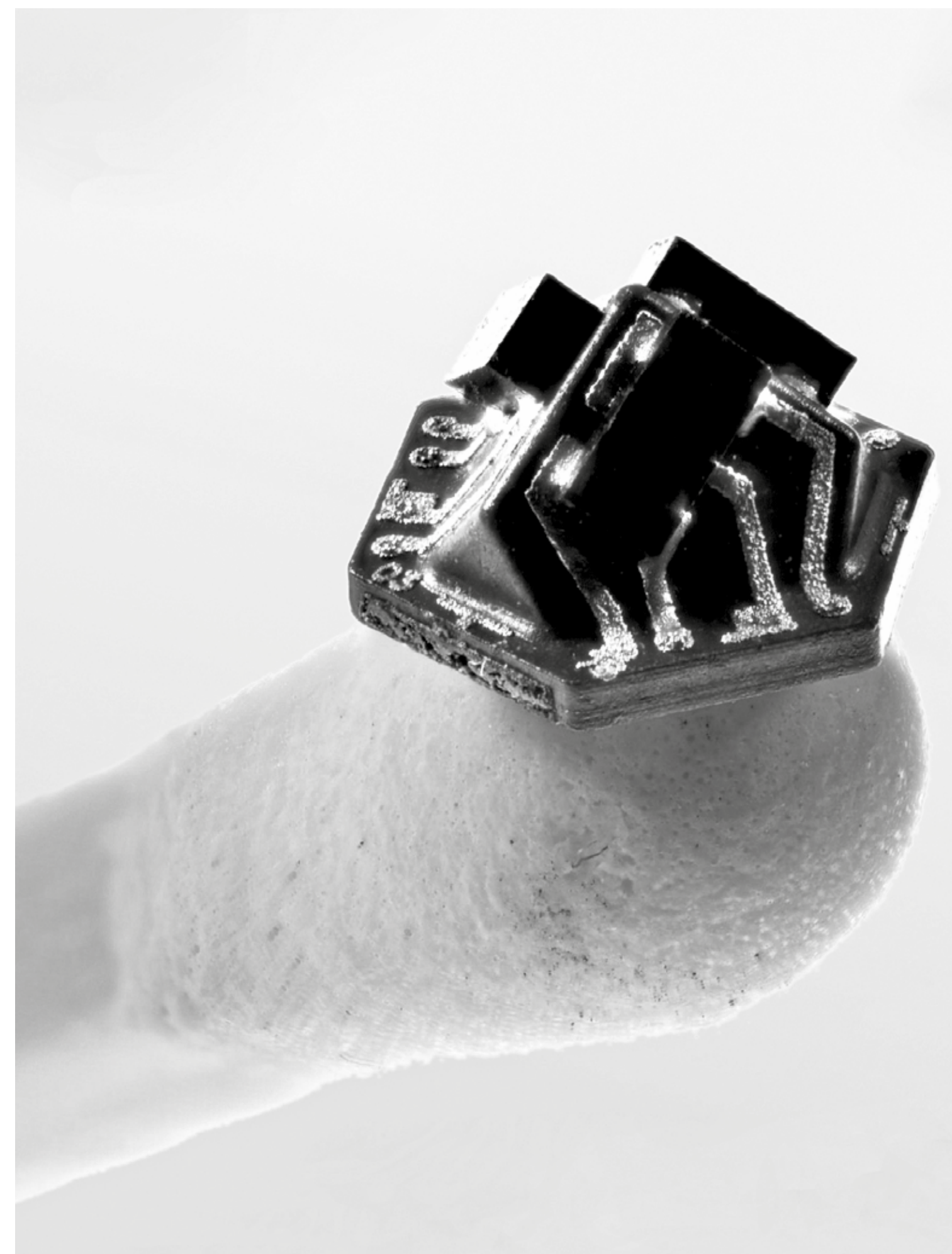
## WELCHE IT-INFRASTRUKTUR IST FÜR DEN EINSATZ EINER SIMULATIONS-LÖSUNG ERFORDERLICH?

Für den Einsatz von Simulationslösungen ist keine besondere Hardware erforderlich. Es ist vielmehr wichtig, über das erforderliche Know-how für den zielgerichteten Einsatz von Simulationen zu verfügen. Zudem ist die Datenakquise ein wichtiges Thema, das bei jedem Kunden anders geartet ist. Falls keine oder unzureichende Betriebsdaten zur Verfügung stehen, behelfen wir uns ggf. mit vereinfachten Modellen, z.B. statischen Berechnungen.

Das sehe ich genauso: Die normale IT-Infrastruktur reicht völlig aus. Die Verfügbarkeit und Qualität der Produkt- und Prozessdaten ist entscheidend für Aufwand und Güte der Simulation. Sie hängt unserer Erfahrung nach sehr stark vom digitalen Reifegrad des jeweiligen Unternehmens ab. Grundsätzlich gilt: je besser die Daten, desto besser die Aussagekraft der Simulation.

Die plavis GmbH entwickelt Methoden und Werkzeuge, um produzierende Unternehmen bei ihrer Fabrikplanung zu unterstützen.

Die LIVINGSOLIDS GmbH entwickelt Softwarelösungen, die eine Interaktion mit 3-D-Modellen von Anlagen, Maschinen und technischen Konsumgütern in Echtzeit ermöglichen.



Quelle: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V



**STEFAN PFAFF**

Geschäftsführer der  
Dr. Prautsch & Partner  
Ingenieure PPI - Informatik

PPI ist ein Simulations-  
dienstleister, der auf die  
Analyse und Optimierung  
von Materialfluss-, Logistik-  
und Fertigungssystemen  
spezialisiert ist.

## **SIMULATION HEISST PROBIEREN**

Bei bestehenden Fertigungsanlagen kann man aus naheliegenden Gründen nur sehr eingeschränkt probieren. Und bei Systemen im Planungsstadium geht das erst recht nicht. Simulationen ermöglichen die Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme von Produkten und Anlagen, ohne dass bereits das reale System ganz oder teilweise existieren muss. Durch diese virtuelle Planung lassen sich Ideen und Konzepte auch schon in einem frühen Projektstadium absichern. So kann beispielsweise geprüft werden, ob bestimmte Anforderungen, z.B. in Bezug auf die Leistung (Durchsatz der geplanten Anlage), mit dem geplanten Konzept erreichbar sind. Zudem ermöglichen Simulationen den Vergleich bzw. die Bewertung von Planungsvarianten.

**Transparenz hilft Herstellern und Betreibern**

Die Transparenz, die eine Simulation bietet, z.B. über das Auslastungsprofil einer Anlage, ist vorteilhaft für alle an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure - vom Hersteller bis zum Betreiber der Anlage. Die Wechselwirkungen zwischen einer konkreten Konfiguration der Modulbestückung in der Anlage und der eines Auftragsprofils lassen sich ohne Simulation nur schwer abschätzen.

Simulationen sollten zum Standard-Rüstzeug für produzierende Unternehmen gehören. Eine Vielzahl der verfügbaren Tools erfordert keine spezifischen Simulationskenntnisse und kann mit Hilfe vorhandener Standard-Hardware betrieben werden. Daher sind diese Simulationstools für Unternehmen aller Größen, insbesondere auch für KMU, geeignet.

## **MIT SIMULATIONEN ZEIT UND KOSTEN SPAREN**

Mit dem Einsatz von Simulationslösungen können Prozesse und Arbeitsplätze prospektiv geplant, gestaltet und optimiert werden. Der Nutzen einer solchen Lösung ist vielfältig. Die 3-D-Modellierung macht das Planungsergebnis sichtbar und zeigt die räumliche Machbarkeit, bevor die MRK-Anlage oder der Arbeitsplatz realisiert ist. Es entsteht damit der Digitale Zwilling, in dem Informationen in Bezug auf Layout, Anlagentechnik und Hallenstruktur sowie Produktdaten und Betriebsmittel abgebildet sind. Mithilfe des Digitalen Zwillings lassen sich nicht nur Planungsfehler frühzeitig vermeiden, sondern auch der Betrieb optimieren - z.B. in Bezug auf Laufwege, die Materialbestellung, die Anordnung der technischen Ausrüstung sowie die Arbeitsplatzgestaltung.

**Planungsszenarien vergleichen und einfach umplanen**

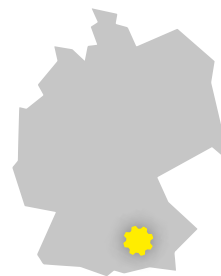
Simulationslösungen liefern Hinweise im Hinblick auf die Dauer von Abläufen und die Ergonomie eines Arbeitsplatzes. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit zum Vergleich verschiedener Planungsszenarien sowie eine verbesserte Kommunikation aller Projektbeteiligten durch eine anschauliche Visualisierung. Zudem entfällt der Aufwand für physische Prototypen und Aufbauten. So bleiben bei Umplanungen die geometrischen Beziehungen erhalten, sodass beispielsweise Prozessschritte auf andere Akteure - Mensch oder Roboter bei MRK-Konzepten - neu verteilt oder Veränderungen am Layout vorgenommen werden können.

Simulationswerkzeuge stellen keine besonderen Anforderungen an die Hardware. Die Herausforderungen bestehen eher in der Integration dieser Stand-alone-Lösung in die vorhandene Softwareinfrastruktur - insbesondere im Hinblick auf die Versorgung mit relevanten Prozess- und CAD-Daten.

**CARSTEN OTTO**

Fachbereichsleiter Fertigungs-  
prozessentwicklung bei der  
imk automotive GmbH

Die imk automotive GmbH  
bietet eine Softwarelösung  
als 3-D-Planungsmethode zur  
Simulation und Bewertung  
von menschlicher Arbeit an.



Projekt ProMoA

# SIMULATION ALS WERKZEUG IN DER MONTAGEPLANUNG

Marcus Röhler (Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV); Jörg Riegel (plavis GmbH); Magdalena Paul (Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften)

## Werden Simulationsmodule in Montageplanungssoftware integriert, lassen sich verschiedene Anlagenkonzepte bereits in der Planungsphase bewerten.

Um Unsicherheiten bei der Neu- und Umplanung von Montageanlagen zu reduzieren und um den Planungsprozess zu beschleunigen, bieten sich Simulationslösungen an. Diese kommen jedoch häufig erst im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme zum Einsatz, um die Steuerungslogik zu validieren. Mit dem Ziel, bereits während der Planungsphase Lösungsalternativen anhand von Kenngrößen - wie Taktzeit, Erreichbarkeit von Arbeitspunkten oder Kollisionsfreiheit - absichern zu können, haben die ProMoA-Projektpartner verschiedene Simulationsmodule konzipiert und implementiert.

Um diese Module in ein System zur automatisierten Anlagenentwicklung einsetzen zu können, sollten sie schnell und robust abbildbar sein sowie einen automatischen Aufbau der Simulationsumgebung auf Basis formalisierter Beschreibungen der Hardware-Konfiguration ermöglichen. Der automatische Ablauf der Simulation einschließlich der Generation von Kennzahlen ermöglicht somit eine Integration in die Gesamtarchitektur.

Im ProMoA-Projekt wurden drei Simulationsmodule entwickelt, die die Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Planung abdecken:

- 1) Simulation der Fügeprozesse beim Auftragen von Klebstoffen
- 2) 3-D-Kinematiksimulation für Mehrkörpersysteme

- 3) vereinfachte Simulation geometrischer sowie logistischer Aspekte zur Layoutplanung mehrerer Montagezellen in einer Montagelinie

**Zur Abbildung von Fügeprozessen wie Kleben (1)** diente das Fluidsimulationsverfahren Smoothed Particle Hydrodynamics. Es wurde um die Betrachtung des scherverdünnenden Fließverhaltens von Klebstoffen wie Epoxidharzen erweitert. Zu jedem Zeitschritt wurden die Scherrate und die Viskosität berechnet, die bei vielen Klebstoffen mit zunehmender Scherrate rapide abnimmt. Das Fließverhalten der Klebstoffe kann über die Parameter des sogenannten Carreau-Modells - eines nach dem Rheologen Pierre Carreau benannten Modells zur Beschreibung des Fluidverhaltens - angegeben werden.

Komplexe nichtnewtonsche Eigenschaften - bei nichtnewtonischen Fluiden ist die Viskosität abhängig von der Belastung - übersteigen zumeist das menschliche Vorstellungsvermögen, weshalb selbst Klebeexperten im Rahmen der Montageplanung nur sehr vage Vorhersagen bezüglich der letztendlichen Taktzeit treffen können. Um die Planungsunsicherheit bei der Konfiguration verschiedener Lösungsalternativen zu reduzieren, sollen die bisher in der Planung von Montageanlagen eingesetzten Simulationsansätze um diese physikalischen Phänomene erweitert werden. Während ein automatischer Aufbau der Simulationsumgebung und die Kombination mit der Simulation weiterer Aspekte der Montagezelle möglich ist, existiert derzeit noch kein allgemeingültiges mathematisches Modell, um alle Szenarien abdecken zu können. So ist das hier verwendete Carreau-Modell zur Simulation des Klebstoffauftrags auf freien Oberflächen

anwendbar (Fluid-Festkörper). Hingegen lässt sich das Aufeinandertreffen von zwei Fluiden (Fluid-Fluid) hierdurch nicht valide abbilden und erfordert den Einsatz anderer Modelle, z.B. viskoelastischer Modelle.

**Zur Simulation von Mehrkörpersystemen (2)** wurden bestehende Ansätze um den automatisierten Aufbau der Simulationsumgebung auf Basis einer formalisierten Beschreibung der Hardware-Konfiguration erweitert und Algorithmen zur Ableitung von Kenngrößen integriert. In dieser Beschreibung enthalten sind die Positionen der einzelnen Objekte, die Abmessungen der Montagezelle, die zu erreichenden Arbeitspunkte und die einzelnen Betriebsmittel (z.B. Roboter und Greifer). Die Simulationsmodelle wurden zunächst entsprechend einer formalisierten Beschreibung des Zellenlayouts positioniert und die Wände der Montagezelle generiert. Anschließend wurden die einzelnen Simulationsmodelle der Betriebsmittel zusammengesetzt und die kinematische Kette abgeleitet.

Zur Abbildung beliebiger und auch überbestimmter Systeme diente ein genetischer Algorithmus zur Optimierung der Gelenkparameter. Er besteht in der künstlichen Evolution von Lösungskandidaten, mit denen sich die Erreichbarkeit der Bahnpunkte unter den Randbedingungen der Kollisionsfreiheit und der Kinematik des Betriebsmittels umsetzen und evaluieren lässt. Die ermittelten Gelenk-Konfigurationen wurden daraufhin zur Planung der kollisionsfreien Trajektorie zwischen den einzelnen

Arbeitspunkten eingesetzt und die Taktzeit auf Basis der maximalen Gelenkgeschwindigkeiten und -beschleunigungen ermittelt. Die Ergebnisse in Bezug auf die Erreichbarkeit der Arbeitspunkte und die Taktzeit der Grobbewegung stehen für weitere ProMoA-Planungsmodule zur Verfügung.

## Layoutplanung bei der Montage von Automobilkameras

Beim Industriepartner Continental AG kam die Simulation zum Einsatz, um eine modulare und flexible Anlage zur Montage von - im Automobilbereich eingesetzten - Surround-View-Kameras zu validieren.

Nach dem Engineering der einzelnen Montagezellen unterstützte das Softwaremodul die **Layoutplanung der Montagelinie (3)** auf Fabrikebene. Die konzipierten Montagezellen wurden in das Modul eingelesen und mit Informationen des Gebäudeplans - verfügbare Flächen, Hindernisse sowie notwendige technische Schnittstellen, z.B. für die Medienversorgung - angereichert. Auf diese Weise gelangen die Umsetzung eines materialflussoptimierten Groblayouts sowie eine automatische Platzierung in der Fabrikumgebung, die zudem die Prozessfolge und organisatorische Vorgaben berücksichtigten. Mithilfe der direkten Kopplung zur Planungssoftware - des Projektpartners plavis GmbH - visTABLE®touch wurden die erzielten Lösungen anschließend dreidimensional visualisiert und über formalisierte Beschreibungen in die Gesamtarchitektur übermittelt.

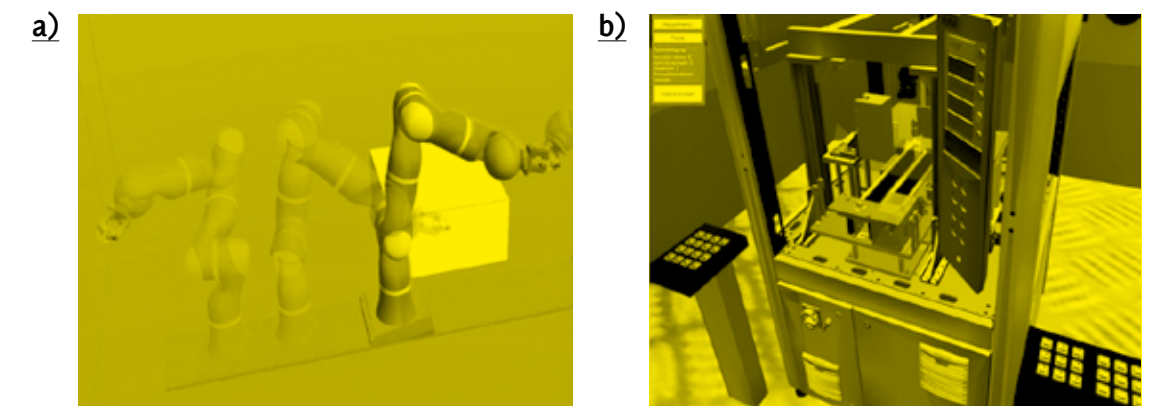


Bild 1: a) Bahnplanung beliebig zusammengesetzter kinematischer Ketten; b) Darstellung einer konfigurierten Anlage

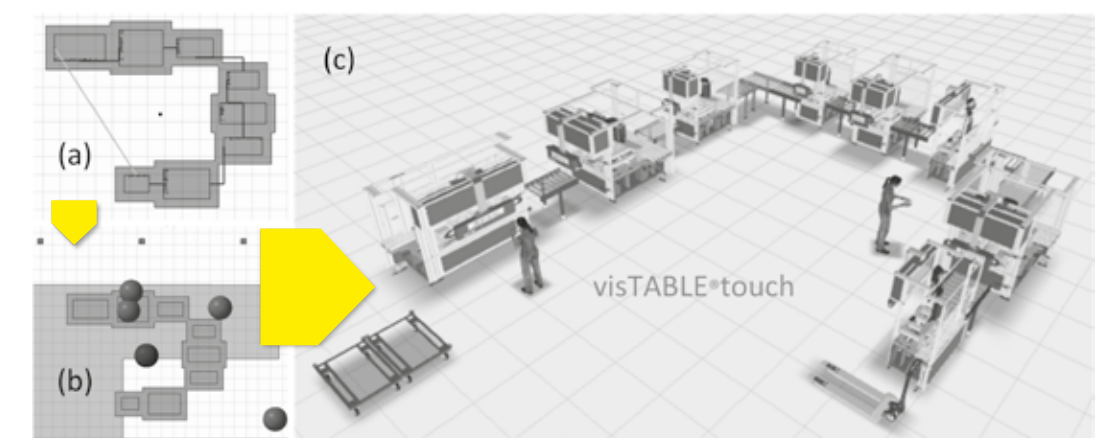
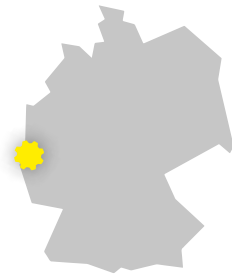


Bild 2: Automatisierte Layoutplanung: (a) Groblayout, (b) Platzierung in der Fabrikumgebung, (c) 3-D-Visualisierung



Projekt freeMoVe

# SIMULATIONSANALYSE FREI VERKETTETER MONTAGESYSTEME

Amon Göppert (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL); Dr. Frank Bauer (Infineon Technologies AG)

## Mithilfe einer Simulationssoftware ist es möglich, flexible und effiziente Montageprozesse realitätsnah zu planen.

Die freie Verkettung zeichnet sich durch eine hohe Systemkomplexität und dynamische Auftragsrouten aus. Um dieses Prinzip in einem Montagesystem anwenden und ausgestalten zu können (siehe Kapitel 1), braucht es deshalb in der Planungsphase eine simulative Unterstützung. Die Analyse möglicher Montageszenarien muss rechner- bzw. modellgestützt erfolgen, da die Rekonfiguration eines realen Montagesystems zeitlich und finanziell zu aufwendig ist. Außerdem kann der stochastische Ablauf des Montageszenarios - der durch die dynamischen Auftragsrouten in der freien Verkettung bedingt ist - nicht mit statischen mathematischen Modellen durchgeführt werden. Daher wird ein Simulationsmodell eingesetzt, das das Montagesystem in abstrahierter Form abbildet.

Dieses Modell wird in ereignisdiskreter Form umgesetzt, d. h., dass sich der Systemzustand nur aufgrund eines Ereignisses ändert. Dadurch können im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Simulation Zeitintervalle übersprungen und folglich große Zeiträume in vergleichsweise kurzer Rechenzeit simuliert werden.

## Aufbau der Simulation

Im freeMoVe-Projekt haben die Partner eine Simulationslösung entwickelt, die eine Integration des Prinzips der freien Verkettung und die Anbindung an beliebige Software- und Datenschnittstellen ermöglicht. Dazu kam die quelloffene Simulationssoftware JaamSim zum Einsatz.

Die Montageprozesse an den Arbeitsstationen werden so weit abstrahiert, dass lediglich die für den Prozess benötigte Zeit in die Simulation einfließt. Insbesondere bei manuellen, aber auch bei automatisierten Prozessen kann die Prozesszeit schwanken, was einen Teil der Dynamik von frei verketteten Montagesystemen ausmachen kann. Daher werden diese als Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z.B. Normalverteilung, Dreiecksverteilung) modelliert. Das Transportsystem wird durch instanziierte Transportmittel aufgebaut, die eine definierte Transportgeschwindigkeit für den beladenen und unbeladenen Zustand haben. Aus der räumlichen Anordnung der Arbeitsstationen und der sonstigen Montageumgebung, also dem Layout, wird mithilfe eines A\*-Suchalgorithmus - einer auf heuristischen Methoden basierenden Berechnung - die kürzeste Transportdistanz zwischen zwei Stationen ermittelt. Dies muss bei einem frei verketteten Montagesystem durch einen solchen Algorithmus erfolgen, da das Layout durch die Auflösung der räumlichen Verkettung sehr variabel ist und daher als Variable für die Simulationsanalyse genutzt werden muss. Aus der Distanz und der Transportgeschwindigkeit wird eine Transportzeit ermittelt, die, ebenso wie der Montageprozess, ein Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen darstellt.

Aufgrund der Dynamik und der Varianz, für die ein frei verkettetes Montagesystem ausgelegt ist, sind Puffer zur zeitlichen Entkopplung der Montageprozesse unabdingbar. Diese werden durch die klassische FIFO (First In - First Out)-Logik beschrieben, jedoch können diese z.B. für Eilaufträge mittels einer Prioritätsvergabe auch als Direktzugriffspuffer fungieren.

Insbesondere für frei verkettete Montagesysteme müssen spezielle Objekte für die Steuerungslogik entwickelt werden. Hierzu dient im freeMoVe-Leitsystem das Prinzip des Matchings und Routings: Die Steuerung basiert auf einem dynamischen Online-Entscheidungsalgorithmus, der für jeden Auftrag die möglichen kommenden Prozesse basierend auf globalen Zielwerten (z.B. Durchlaufzeit, Stationsauslastung) auswählt. Die Zielwerte werden für jede mögliche Entscheidung verglichen. Daraus ergibt sich während des Montageszenarios die individuelle Auftragsroute.

## Simulation zur Optimierung

Zur Untersuchung der Eigenschaften eines frei verketteten Montagesystems wurde eine Szenarioanalyse durchgeführt. Im Hinblick auf die Eingangsvariablen und Kennzahlen bei der Szenarioanalyse hat sich gezeigt, dass eine hohe Spreizung zwischen Prozesszeiten und eine ungleichmäßige Verteilung dieser Prozesse zu hohen Pufferbeständen und damit zu einer geringen Auslastung der Stationen führen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Vorteil der freien Verkettung darin liegt, Prozesse, die als „Bottleneck“ großen Einfluss auf die Kennzahlen haben, zu parallelisieren und damit Kennzahlen, wie die Auslastung der Arbeitsstationen oder die Durchlaufzeit der Aufträge, zu optimieren.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass verschiedene Kennzahlen bei der Veränderung der Variablen gegenläufig sind und miteinander konkurrieren. Daher sind bei der Auslegung eines frei verketteten Montagesystems verschiedene Kompromisse nötig, die bei klassischen starr verketteten Montagesystemen entfallen. So

muss mittels der Verteilung der Prozesse oder des Parallelisierungsgrads entschieden werden, ob die Auslastung der Arbeitsstationen hoch und die Anzahl der Stationsblockaden niedrig sein sollen oder ob die Pufferbestände und damit die Anzahl der Aufträge im System niedrig sein sollen.

## Anwendungsfall Halbleitermodulmontage

Im Anwendungsfall der Halbleitermodulmontage wird untersucht, inwieweit sich die starre Verkettung manueller Arbeitsstationen und automatisierter Lötöfen durch ein flexibles Transportsystem in Form von mobilen Robotern auflösen lässt. Die Simulation mithilfe der Software AnyLogic - eines Produkts des Unternehmens The AnyLogic Company - soll zeigen, wie eine optimale Auslastung der Transportmittel und der Arbeitsstationen aussieht. Dabei wurden spezielle Steuerungslogiken für die Transportmittel und ein interner Flottenmanager in Java implementiert.

Folgende Kennzahlen wurden betrachtet: die Auslastung der Lötöfen, die Auslastung der mobilen Roboter bzw. die Anzahl der Roboter, die zeitgleich im Einsatz sind, sowie die Auslastung der manuellen Arbeitsstationen. Weiterhin wurden die ausstehenden Produktionsaufträge sowie die ausstehenden Transportaufträge für die mobilen Roboter ermittelt. Als Ergebnis liefert die Simulation die Anzahl der mobilen Roboter für das betrachtete Szenario - für einen sicheren Prozessablauf sind dies im untersuchten Anwendungsfall drei Roboter.

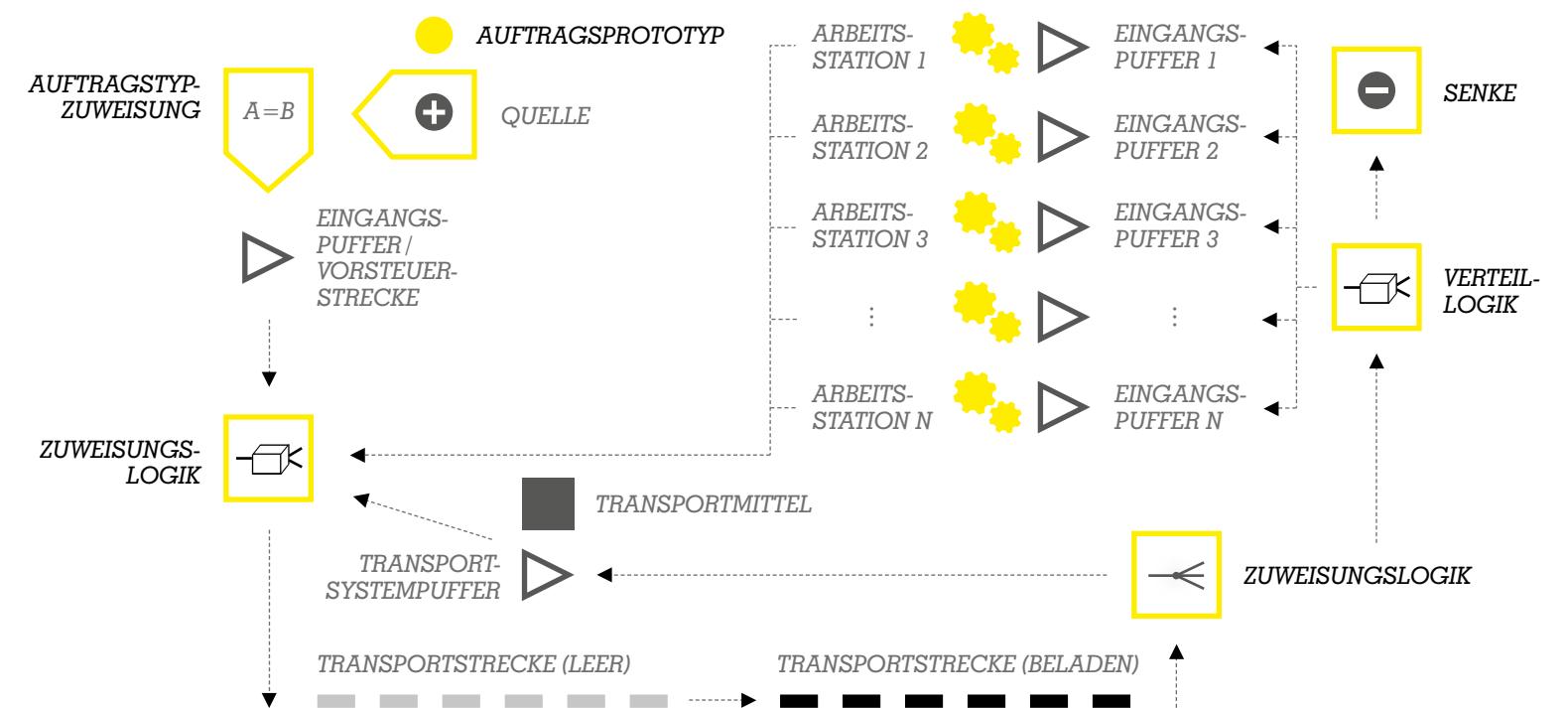
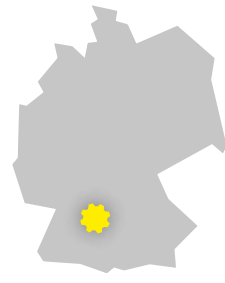


Bild 1: Architektur eines generischen Simulationsmodells





Projekt MIKROKOMO

# PROZESS- UND RÜST- PLANUNG FÜR MODULARE MIKROMONTAGEANLAGEN

Stefan Pfaff (Dr. Prautsch & Partner Ingenieure PPI - Informatik)

## Durch den Einsatz eines einfach zu bedienenden Simulationstools lassen sich Produktentwicklung und Prozessgestaltung in der Mikromontage parallelisieren und Aussagen zur Wirtschaftlichkeit frühzeitig ableiten.

Für die Prozessplanung bei der Mikromontage gelten grundsätzlich die gleichen Anforderungen wie bei der Makromontage. Eine Besonderheit der Mikromontage besteht jedoch darin, dass häufig Sondermaschinen zum Einsatz kommen, die spezifisch für das mithilfe dieser Anlage herzustellende Produkt gebaut wurden. Die damit verbundenen hohen Investitionen sind der Grund dafür, dass viele Produktideen, die eine Mikromontage erfordern, nicht umgesetzt werden.

Die MIKROKOMO-Projektpartner haben einen Ansatz entwickelt, um Kleinserien von Mikroprodukten auf einer flexibel bestückbaren Maschinenplattform wirtschaftlich herzustellen. Der Ansatz beinhaltet auch Softwaretools, die die Anwendung dieser Maschinenplattform in der Praxis erleichtern. Den Startpunkt bildet ein Lastenheftgenerator, der es in der Produktentwicklungsphase ermöglicht, die Anforderungen an die Montage des Produkts strukturiert zu beschreiben und in einem Lastenheft zu dokumentieren. Die eigentliche Prozessplanung des Montageprozesses erfolgt in einem Konfigurationstool, das auf der im Projekt entwickelten Methode zur fertigungsgerechten Planung mittels abstrahierter Darstellung von Produktideen (siehe Beitrag „Fertigungsgerechte Planung für die Mikromontage“ in Kapitel 2) basiert.

## Konfigurationstool legt Montagemodule fest

Anhand der vom Anwender definierten Prozesse und ihrer produktspezifischen Parameter bestimmt das Konfigurationstool die für die Montage des Produkts bestmögliche Modulkombination sowie deren Anordnung auf der Maschinenplattform. Ggf. können mehrere Konfigurationen bzw. Modulkombinationen die Montage des Produkts abbilden. Das Ergebnis der Konfiguration dient als Grundlage für die Spezifikation zur Beschaffung einer Anlage. Das Konfigurationstool kann zwar die erforderliche Modulkombination bestimmen, mit der die Plattformmaschine bestückt werden muss - es ist aber nicht möglich, die damit erreichbare Taktzeit und damit die Ausbringung bzw. Anlagenleistung hinreichend genau zu bestimmen. Die mit einer spezifischen Konfiguration erzielbare Anlagenleistung lässt sich mittels einer Ablaufsimulation ermitteln. Dazu wurde eine entsprechende Simulationslösung entwickelt und in die MIKROKOMO-Softwaretools integriert.

## Simulationsumgebung

In der Simulationsumgebung wird aus den bei der Konfiguration erzeugten Daten ein Simulationsmodell generiert, auf dessen Basis sich Simulationsexperimente durchführen lassen. Deren Ergebnisse werden anschließend der Konfiguration zur Verfügung gestellt. Die MIKROKOMO-Simulationsumgebung wurde auf Basis der Simulationssoftware „Plant Simulation“ der Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. entwickelt. „Plant Simulation“ ist ein ereignisorientierter Simulator, der in der

Industrie sowohl in der Produktion als auch in der Logistik stark verbreitet ist. Aufgrund seiner objektorientierten Struktur und der integrierten Entwicklungsumgebung können auch Anwender ohne Simulations- und IT-Kenntnisse mit diesem Programm simulationsbasierte Anwendungen erstellen.

Die Komponenten der Simulationsumgebung - im objektorientierten Sinne als Klassen bezeichnet - umfassen:

- Datenaustausch mit dem Konfigurator: Die Simulation übernimmt mithilfe der Datenaustausch-Klasse eine Konfiguration aus der Konfiguratoranwendung. Der Datentransfer erfolgt via XML(Extensible Markup Language)-Datei. Die Simulationsergebnisse werden über den gleichen Kanal per XML-Datei an den Konfigurator übergeben.
- Prozessbausteine, die die realen Komponenten einer Mikromontageanlage abbilden, sind in Form der Basismaschine (Plattform), der unterschiedlichen Module (wie Bestückungssysteme, Dosiersystem, Kamerasysteme) und der Handlingeinrichtungen (wie Substrat- und Bauteilaufnahmen) in der Klassenbibliothek des Simulators angelegt. Diese eigentlichen Prozessmodule werden noch durch erforderliche Zubehörmodule, wie z.B. die Reinigungsstationen für die Dosiersysteme, ergänzt.
- Ein Verwaltungsbaustein im Simulationsmodell übernimmt die automatische Modellgenerierung, d.h., die virtuelle Maschine wird mit den konfigurieren Modulen bestückt.

Da die Konfiguration mit den Modulen nicht nur die Maschinenbestückung, sondern auch die Prozessfolge ausgibt, kann in der Simulation ein Arbeitsplan für die zu fertigenden Teile generiert werden. Der Arbeitsplan gibt je Abfolge der Prozessschritte die dazu erforderlichen Module und die zeitliche Beanspruchung des Moduls durch den Prozessschritt an.

Wesentliche Ergebnisse der Simulationsexperimente sind die beiden Basiskennzahlen Ausbringung (Jobs per Hour, JpH) und Auslastung der Anlagenmodule. Diese beiden Kennzahlen werden in den unterschiedlichen Anwendungsszenarien verwendet.

## Anwendungsszenario 1: Leistungsermittlung für ein Produkt

Die Leistung definiert sich vor allem darüber, welche Stückzahl pro Zeiteinheit hergestellt werden kann. Daraus lassen sich

Aussagen zu folgenden Fragen ableiten: Wie viele Anlagen sind nötig, um die geforderte Stückzahl herzustellen? Wie unterscheiden sich verschiedene Anlagenkonfigurationen bzw. Modulkombinationen in Bezug auf die Anlagenleistung? Ausgehend von der Anlagenleistung lassen sich dann die Stückkosten der Herstellung bestimmen und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage bewerten.

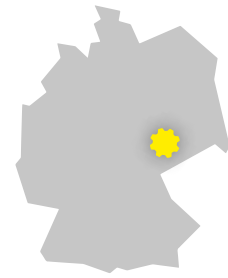
Der einfache Zugang zu einer Anlagensimulation über die Konfiguration und den automatischen Modellaufbau ermöglicht dem Anwender, bereits in einem frühen Stadium der Produktentstehung verschiedene Optionen in Bezug auf die Prozesse zu vergleichen und zu bewerten. Produktentwicklung und Prozessgestaltung lassen sich so parallelisieren und Aussagen zur Wirtschaftlichkeit frühzeitig ableiten.

## Anwendungsszenario 2: Kapazitätenportal

Die Idee des MIKROKOMO-Kapazitätenportals ist es, dass Mikromontageanlagen-Betreiber ihre freien Maschinenkapazitäten über ein Portal zur Verfügung stellen können. Das Portal kann einem Anwender, der über den Konfigurator für sein Produkt einen Prozess definiert hat, geeignete Anlagen vorschlagen. Bei einer Anfrage wird geprüft, ob für das zu fertigende Produkt auf bestehenden Anlagen noch genügend Kapazität frei ist. Dazu wird ein Simulationsexperiment durchgeführt, das einen virtuellen Produktionsplan abfährt und die ggf. erforderlichen Umrüstvorgänge zwischen den Aufträgen abbildet. Es wird also nicht nur eine Anlagenkonfiguration (für ein Produkt), sondern die Abfolge mehrerer Produktionsaufträge auf einer Maschine simuliert. Je nach Anforderung an die erforderlichen Prozessmodule der Produkte und aktueller Modulbestückung der Anlage müssen dann zwischen den Aufträgen nicht benötigte Module von der Maschine abgerüstet und andere Module auf der Maschine eingerüstet werden.

## Anwendungsszenario 3: Monitoring

Das Ziel des Monitoringsystems ist es, einen Vergleich zwischen der Auslegungsleistung der Mikromontageanlagen und der realen Betriebssituation zu ermöglichen. Dazu werden die realen Betriebsdaten als Eingangsparameter für die Prozessdauer einzelner Schritte in der Simulation verwendet. Daraus lassen sich Aussagen über die Abweichung und deren Ursache treffen - zugleich lassen sich diese realen Parameter als zukünftige Planungsparameter für weitere Simulationen heranziehen.



Projekt KUKoMo

# SIMULATIONS- SYSTEME FÜR MRK-LÖSUNGEN

Riccardo Prielipp, Prof. Dr. Ralph Riedel, Nadine Göhlert (Technische Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme)

## Eine neu entwickelte Systematik unterstützt Unternehmen dabei, eine auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Softwarelösung zur Planung von MRK-Systemen zusammenzustellen.

Der Einsatz von Softwaretools zur Fabrikplanung und Arbeitsplatzgestaltung wird bei der Konzeption kollaborativer Montagesysteme sehr empfohlen, um die Komplexität bei der Prozessgestaltung zu beherrschen, die Arbeitssicherheit für das Personal zu gewährleisten und eine wirtschaftlich sinnvolle MRK-Lösung umzusetzen<sup>1</sup>. Mit einer Softwarelösung lässt sich zudem die technische Realisierbarkeit besser einschätzen. Die Schwierigkeit besteht jedoch derzeit darin, dass keine Software zur vollumfänglichen MRK-Simulation auf dem Markt verfügbar ist. Daher ist jedes Unternehmen gefragt, eine geeignete, an seine Bedürfnisse angepasste Kombination unterschiedlicher Simulationssoftware für die Planung von MRK-Systemen auszuwählen. Insbesondere KMU, die oft nicht über eigene Kompetenzen im Umgang mit Simulationswerkzeugen verfügen, sollten sich dazu externe Expertise ins Boot holen. So kann ein auf MRK-Simulationen spezialisierter Dienstleister bei der Auswahl des Roboters und der Gestaltung der Arbeitsplätze unterstützen und damit einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftlichen MRK-Integration leisten.

## In sieben Schritten zur anwendungsspezifischen Software

Unternehmen, die eine simulationsgestützte Planung selber durchführen möchten, können bei der Wahl der richtigen Simulationswerkzeuge auf eine im KUKoMo-Projekt entwickelte Entscheidungshilfe zurückgreifen. In sieben, speziell für KMU konzi-

pierten Schritten wird nicht nur das systematische Vorgehen zur Softwareauswahl erklärt, sondern es werden auch konkrete Hinweise zu den einzelnen Schritten gegeben.

### Schritt 1: Digitalen Funktionsumfang für die Planung von MRK bestimmen

In einem ersten Schritt gilt es, den benötigten Funktionsumfang zu bestimmen – insbesondere, um den Einsatz der Fabrikplanungssoftware zu planen. Als Grundlage dafür dienen die in der VDI-Richtlinie 5200 festgelegten Fabrikplanungsschritte. Je nach Anwendungsfall kann es erforderlich sein, weitere Funktionen zu definieren. Neben der Prozessgestaltung – der konkreten Einteilung manueller und automatisierter Teilarbeitsschritte – spielen vor allem Sicherheitsaspekte, Roboterkinematiken und Menschmodelle eine wichtige Rolle<sup>2</sup>. Mit einem 3-D-Modell des Arbeitsplatzes lassen sich Roboter- und Menschbewegungen simulieren und auf Kollisionen gemäß den Grenzwerten der ISO/TS 15066 überprüfen. Auf diese Weise können Gefährdungspotenziale frühzeitig identifiziert werden. Anhand der Menschmodelle können manuelle Teilarbeitsschritte und die Belastung über die Arbeitszeit analysiert werden. Auf Basis der Simulation des gesamten Arbeitsplatzes lässt sich anschließend ein Sicherheitskonzept erstellen.

Durch die Simulation von MRK-Systemen sinkt das Risiko von Fehlentscheidungen, das aufgrund der Komplexität der Thematik und der Vielzahl an Möglichkeiten per se relativ hoch ist. Insbesondere die Wahl des richtigen Roboters, der sowohl den Prozessablauf technisch umsetzen kann als auch die wirtschaft-

lichen Anforderungen erfüllt, wird durch die Simulation unterstützt. Die virtuelle Inbetriebnahme inklusive Bahnsteuerungen sowie Machbarkeitsuntersuchungen und Kollisionsmessungen erlaubt eine detaillierte und anwendungsspezifische Planung<sup>3</sup>.

Folgende Funktionen lassen sich beispielsweise für die MRK-Planung softwaretechnisch abbilden<sup>1,4</sup>:

- Grob- und Fein-Layoutgestaltung
- Dimensionierung der Betriebsmittel
- 2-D/3-D-Geometrie-Modellierung und Visualisierung
- Arbeitsplatzgestaltung inklusive Betriebsmittelanordnung
- Prozessgestaltung und Taktzeituntersuchung
- virtuelle Inbetriebnahme
- Materialflussanalysen
- Informationsflussanalysen
- Planung von Sicherheitskonzepten, u.a. gemäß DIN EN ISO 10218-2 und ISO/TS 15066 und Sensorsimulationen
- Ergonomiesimulationen und Menschmodelle
- Roboterbahnsteuerung, -programmierung und Kinematiksimulationen
- Machbarkeitsuntersuchungen inklusive Erreichbarkeitsuntersuchungen
- Simulation zur Überprüfung der Kollisionsfreiheit
- Simulation des Energiebedarfs
- Risikobewertungen
- automatische Dokumentation inklusive Zeichnungen
- automatische Identifikation von Gefährdungen
- Bibliotheken von Robotern, Gelenkeigenschaften und Menschmodellen

### Schritt 2: Software zur Robotermodellierung und -simulation

Bei der Software zur Modellierung und Simulation der Roboter ist zwischen proprietärer und freier Software zu unterscheiden. Die herstellerbezogene Software besitzt in der Regel den größten Funktionsumfang – allerdings nur in Bezug auf die vom Hersteller angebotenen Roboter. Sie stößt jedoch in ihrer weiteren Anwendung an ihre Grenzen, insbesondere bei systemübergreifenden Schnittstellen. Zudem entsteht eine gewisse Abhängigkeit zum Hersteller, die die Roboterwahl für künftige MRK-Projekte einschränkt. Es bleibt zudem zu klären, ob bestimmte Fabrikplanungsfunktionen, wie z.B. die Layoutgestaltung, mit proprietären Systemen umsetzbar sind.

Freie Simulationssoftware arbeitet teilweise nur mit Näherungswerten, wenn sie die Robotersteuerung mit herstellerunabhängigen Steuerungsalgorithmen nachbildet. Dadurch können Abweichungen von bis zu fünf Prozent bei der Berechnung der Prozesszeiten auftreten. Diesen Abweichungen steht jedoch

der Vorteil gegenüber, dass in den Bibliotheken freier Software Roboter unterschiedlicher Hersteller hinterlegt sind und damit eine objektivere Auswahl möglich ist.

Typische Softwarefunktionen, um den Funktionsumfang eines Roboters zu bestimmen, sind die 3-D-Modellierung, die Simulation der Roboterbahnen, Prozess- und Taktzeituntersuchungen, Machbarkeits- und Erreichbarkeitsuntersuchungen sowie die Simulation des Energiebedarfs. Teilweise wird auch eine Überführung des Roboterprogramms in die reale Steuerung angeboten – die Software „Visual Components“, die zudem auch noch einfaches Teachen der Roboter ermöglicht, ist ein Beispiel dafür.

### Schritt 3: Funktionsumfang für die Menschmodelle ermitteln

Als Erstes muss geklärt werden, ob die Rolle des Menschen überhaupt digital über entsprechende Modelle oder anderweitig erfasst werden soll. Insbesondere aus Gründen der Vergleichbarkeit und Anpassung empfiehlt sich jedoch eine digitale Simulation. Die Software ema Work Designer des Unternehmens imk automotive GmbH ist bei digitalen Menschmodellen derzeit führend. Sie simuliert eine Vielzahl realer Arbeitstätigkeiten motorisch korrekt und erlaubt als Einzige eine hinreichend genaue Bewertung der Ergonomie. Die genaue Analyse und Bewertung menschlicher Handlungen verbessert maßgeblich die Möglichkeiten zur Prozessgestaltung von MRK-Systemen.

### Schritt 4: Funktionsumfang mit bereits verwendeter Software abgleichen

In diesem Schritt ist zu prüfen, welche Planungstools bereits im eigenen Unternehmen vorhanden sind und inwieweit sie den benötigten Funktionsumfang zur Planung von MRK-Systemen abbilden. Bei dieser Prüfung hat sich der Einsatz von Matrizen bewährt, die auf die im Schritt 1 genannten Funktionen zurückgreifen. Das Bild 1 zeigt eine solche Matrix.

### Schritt 5: Bedarfsgerechte Kombinationen von Planungssoftware zusammenstellen

Um eine durchgängige Planung von MRK zu realisieren, muss nun – auf Basis des ermittelten Funktionsumfangs der im Unternehmen verwendeten Planungssoftware – geprüft werden, wie sich die einzelnen Planungsprogramme in ihrer Funktionalität ergänzen und im Planungsablauf kombinieren lassen. Mithilfe der Matrix lassen sich auf höherer Abstraktionsebene die benötigten Funktionen verschiedener Softwares kombinieren. Dabei sollte es stets ein zentrales Anliegen sein, die bereits in Unternehmen verwendete Planungssoftware weiter zu nutzen.

Phasen und Funktionen der Fabrikplanung nach VDI 5200			Software			
			PLANT SIMULATION	VISUAL COMPONENTS	EMA WORK DESIGNER	
VDI 5200 Phase 3: Konzept- planung	Funktions- bestimmung	Stücklistenauflösung		!		
		Ableitung Funktionsschema	!			
	Dimensio- nierung	statisch	Betriebsmittel	✓		
			Arbeitsperson			
		dynamisch	Engpassanalyse		✓	✓
				Diagramme	Durchlaufzeit	✓
			Kapazitätsbedarf	✓	✓	
				Ressourcenbedarf	✓	✓
	Gantt Diagramm	✓				
	Flächendimensionierung		✓			
	Kosten	Herstellkosten	✓			
		Maschinenstundensatz	✓			
	Struktur- planung	Materialfluss- analyse (Soll- Zustand)	Mengen-Wege-Bild			
			Sankey Diagramm	✓		
			Wertstromanalyse	✓		
			Materialfluss-/Transportmatrix	✓	✓	
		Auswahl der Fertigungsformen	!	!		
		Entwurf	Analytische Verfahren	✓		
	Realplanung	Ideallayout	Heuristische Verfahren (MDV)	!	!	
			Entwurf Real- layoutvarianten	Probiervverfahren	!	!
Bewertung und Auswahl		Dynamisches Verfahren	!	!		
		Nutzenwertanalyse	!	!		
Wirtschaftliche Methoden						
VDI 5200 Phase 4: Detail- planung	Arbeitsplatz- gestaltung	EAWS			✓	
		MTM			✓	
		OCRA			✓	
		NIOSH			✓	
	Feinlayout- planung	Zeichnung		✓		
		Grundrisschablonen		✓		
		3D-Modelle	✓	✓	✓	
	Roboterprogrammierung	!	!	!		
	Erstellung der Genehmigungsanträgen					
	Erstellung der Leistungsbeschreibung	Lastenheft	!	!	!	
Ausführungsplanung		!	!	!		
Pflichtheft		!	!	!		
Einsatzmöglichkeiten			Legende			
Einsatzmöglichkeiten			✓	einsetzbar	!	einsetzbar als Hilfsmittel

 Bild 1: Beispiel einer Funktionsmatrix für Fabrikplanungssoftware <sup>5</sup>

### Schritt 6: Schnittstellenkompatibilität der Planungssoftware-Kombination sicherstellen

Nachdem die gewünschte Softwarekombination gefunden ist, gilt es nun, die Kompatibilität der einzelnen Systeme untereinander zu prüfen. Hierzu bietet es sich auch an, die jeweiligen Anbieter direkt nach unterstützten Formaten und möglichen Schwierigkeiten zu befragen. Neben den weitverbreiteten proprietären Systemen stehen lediglich wenige Softwarelösungen mit standardisierten, nicht proprietären Formaten, wie beispielsweise OpenSCAD, zur Verfügung. Diese sind jedoch in ihrer Nutzung für MRK funktional eingeschränkt.

Die Kompatibilität der Dateiformate ist in der gewählten Softwarekombination im Einzelfall und je nach Funktionsumfang zu prüfen. Teilweise stehen auch Drittanbieterprogramme zur Konvertierung verschiedener Dateiformate zur Verfügung, die zumindest teilweise regelmäßig um weitere Formate ergänzt werden, um deren Kompatibilität sicherzustellen.

### Schritt 7: Kompetenzbewertung, wirtschaftliche Abschätzung und Risikobetrachtung

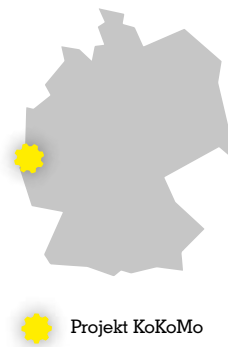
Je höher die Anforderungen an die Simulationen, desto höher sind in der Regel die Lizenzkosten der jeweiligen Software und die Anforderungen an das benötigte Personal. Insbesondere Fabrikplanungssoftware verursacht oftmals hohe Initialkosten, weshalb die Auswahl einer geeigneten Software sehr wichtig ist. Dabei sollten neben den Lizenzkosten auch die Kosten für Schulungen und Wartungen berücksichtigt werden und zwingend in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der MRK-Lösungen einfließen.

Die Arbeit mit Fabrikplanungsprogrammen setzt ein umfassendes Know-how voraus. Unternehmen sollten sich im Klaren darüber sein, welche Planungskompetenzen bereits vorhanden sind und inwieweit neue aufgebaut werden müssen. Bei der Einarbeitung in eine neue Software hat es sich als hilfreich erwiesen, die Mitarbeiterin bzw. den Mitarbeiter frühzeitig einzubinden. Zudem ist es sinnvoll, eine Risikobewertung beispielweise für den Fall der Abwanderung von kompetentem Personal durchzuführen.

#### Literatur

- Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kühlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A.: Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. Carl Hanser Verlag München, 2019.
- Reinhart, R.; Magaña Flores, A.; Zwicker, C.: Industrieroboter. Planung, Integration, Trends – Ein Leitfaden für KMU. Würzburg: Vogel Communications 2018, S.162.
- Gerhard, S.: Digitale Modelle helfen weiter. In: Digital Manufacturing, Ausgabe 3/2018, S.14.
- <https://imk-ema.com/startseite.html> vom 13.06.2019.
- Cong, Y.: Entwicklung eines Verfahrens zur Auswahl anwendungsspezifischer Softwaresysteme zur durchgängigen Planung von MRK-Systemen in der Montage, Chemnitz, 2019.





Projekt KoKoMo

# VIRTUELLE ERPROBUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

Patrick Rückert, Prof. Dr. Kirsten Tracht (Universität Bremen, Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen, bime); Dr. Georg Wunsch, Philipp Schwarz (machineering GmbH & Co. KG)

**Anhand von Modellen realer Arbeitsplätze und mithilfe von Virtual und Augmented Reality lassen sich kollaborative Montagesysteme virtuell erproben. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind ein wertvoller Input für die Gestaltung eines zukünftigen MRK-Systems.**

Bei der virtuellen Erprobung kollaborativer Montagesysteme geht es darum, das Verhalten eines technischen Systems in Interaktion mit dem Menschen zu modellieren und zu simulieren. Die KoKoMo-Projektpartner haben dafür eine Methode entwickelt, die eine systematische Erprobung in Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) ermöglicht.

Basierend auf den CAD-Daten eines kollaborativen Montagearbeitsplatzes, wird eine physikbasierte Simulation der Roboterkinematik und der Umgebung erstellt. In dieser werden die Montageabläufe interaktiv simuliert, indem der reale Mensch und die virtuelle Anlage in der VR zusammentreffen. Die Methode der virtuellen Erprobung kann so bereits zu einem frühen Zeitpunkt des Planungsprozesses von Anlagen verwendet werden, um Aussagen über die Ergonomie und Sicherheit von kollaborativen Montagearbeitsplätzen zu treffen. Das Ergebnis ist ein interaktiver virtueller Zwilling, der die experimentelle Erprobung kollaborativer Montageprozesse ermöglicht. Daraus lassen sich Anforderungen an die Arbeitsplatz- und Anlagengestaltung ableiten und validieren.<sup>1</sup>

**Virtuelle Inbetriebnahme mit einer 3-D-Simulationssoftware**

Die technologische Grundlage der virtuellen Umgebung für die Mensch-Roboter-Kollaboration besteht in der physikbasierten und echtzeitfähigen Simulation industrialPhysics® des Unternehmens machineering GmbH & Co. KG. In dieser Simulationsumgebung zur virtuellen Inbetriebnahme können komplexe mechatronische Anlagen vorab simuliert werden, was eine Überprüfung der Roboter-Programmierung in Wechselwirkung mit einem Gesamtsystem ermöglicht. Zur Gestaltung eines Simulationsmodells werden die CAD-Daten des zu untersuchenden Montagesystems und -objekts in die Simulation überführt und der Arbeitsplan als sequenzieller Ablauf implementiert. Die Darstellung von Simulationsmodellen auf Head-mounted Displays – am Kopf befestigten visuellen Geräten – und unter Zuhilfenahme von AR schafft die technische Voraussetzung, die Simulation dreidimensional und interaktiv zu gestalten.<sup>2</sup>

Um den Menschen und seine Bewegungsmuster in die Simulationsumgebung zu integrieren, wird das Lighthouse-Tracking-System der Firma Valve zur Positionsbestimmung und Ausrichtung von Kopf und Händen genutzt. In Verbindung mit VR-Controllern kann außerdem eine Rückkopplung durch Haptik und Vibration gegeben werden. Dadurch lassen sich zum einen Bewegungspfade des Menschen in die Simulation integrieren und auf Kollision



Bild 1: Montageszenario real und VR, Quelle: © bime – Patrick Rückert

überprüfen. Zum anderen kann das Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter in sicherer Umgebung betrachtet werden, um den Montageprozess zu steuern und Fehler offenzulegen. Die Simulation ermöglicht es, die erprobten Roboterpfade über eine Datenbankschnittstelle an die Robotersteuerung des Montagesystems zu übergeben und als Roboterinstruktion in den Arbeitsplan zu übernehmen. Durch diese virtuelle Inbetriebnahme lassen sich neue Montageabläufe für variantenreiche Produkte erproben und implementieren, ohne den operativen Betrieb der Produktion zu stören.

**Einsatz als Schulungstool**

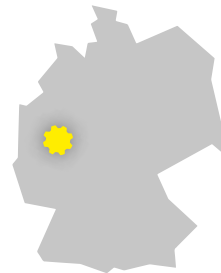
Neben der Möglichkeit, Anlagen virtuell zu gestalten und zu konfigurieren, kann die Methode auch zur frühzeitigen Schulung des Personals genutzt werden. Aus den Anwendungen lassen sich Schulungsszenarien ableiten, um die Fähigkeiten und Rahmenbedingungen zur Zusammenarbeit von Mensch und Roboter zu erlernen. Die Mitarbeiterin oder der Mitarbeiter kann sich dazu in der virtuellen Schulungsumgebung schrittweise mit Themen wie Sicherheit, Arbeitsabläufen und Mensch-Roboter-Interaktion vertraut machen.

Die Schulungsszenarien anwendungsnah zu gestalten war ein zentrales Anliegen. Daher wurde der Lernerfolg an einer realen Anlage und an einem Digitalen Zwilling gemessen und verglichen. Die Ergebnisse dieser Evaluation wurden bei der Konzeption der Schulungsszenarien berücksichtigt. Dabei kann die virtuelle Erprobung die Anlaufphase insbesondere hinsichtlich der Faktoren Akzeptanz, Einarbeitungszeit und sicherer Umgang mit Robotern verbessern. Je nach Bedarf können die Schulungen spezifisch für einzelne Unternehmen gestaltet werden, um so deren Mitarbeitende optimal für die kollaborative Montage zu befähigen.

Aus den Erkenntnissen der virtuellen Erprobung lassen sich verschiedene Erfolgsfaktoren – insbesondere hinsichtlich der sicheren Mensch-Maschine-Interaktion – ableiten, bewerten und validieren. Im Ergebnis des KoKoMo-Projekts entstehen Handlungsempfehlungen in Form eines Umsetzungskataloges für die Gestaltung und Inbetriebnahme kollaborativer Montagesysteme. Diese Empfehlungen ermöglichen vor allem auch KMU, durch den Einsatz neuester Technologien dauerhaft wandlungsfähig zu bleiben und eine Vielzahl an Produktvarianten zu fertigen.

## Literatur

- 1 Rückert, P.; Meiners, F.; Tracht, K.: Augmented Reality for teaching collaborative robots based on a physical simulation. In: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. 1. Auflage 2018. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, 2018, S. 41–48.
- 2 Rückert, P.: Kollaborative Montage will geübt sein – Virtual Reality zur Arbeitsplanung und Schulung. In: Handling – industriell fertigen – systemisch lösen, Ausgabe 3/2019, Seite 6–7.



Projekt KoMPI

# WERKZEUG ZUR REALITÄTSNAHEN MRK-SIMULATION

Dr. Alfred Hypki, Paul Glogowski, Kai Lemmerz, Prof. Dr. Bernd Kuhlenkötter (Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, LPS); Marcus Kaiser, Carsten Otto (imk automotive GmbH); Janina Horlebein (ISRA VISION AG)

**Mit einem Simulationswerkzeug, das sowohl die Mensch- als auch die Roboter- und die Peripheriesimulation beinhaltet, lassen sich kollaborative Montagesysteme effizient planen.**

Ein wesentliches Hemmnis für den Einsatz von kollaborativen Montagesystemen ist der Mangel an entsprechender Planungs- und Simulationssoftware. Insbesondere ist es für Unternehmen schwierig, die Wirtschaftlichkeit eines MRK-Szenarios ohne eine entsprechende Planungs- und Simulationsunterstützung zu beurteilen, da viele Unterbrechungen und Sicherheitsanforderungen, wie z.B. Geschwindigkeitsreduzierungen oder Sicherheitsstopps, die zuvor berechnete Produktivität beeinflussen. Ein enormer Modellierungsaufwand ist erforderlich, um ein kollaboratives Montagesystem zu planen und zu gestalten, seine technisch-wirtschaftliche Machbarkeit zu bewerten und das Potenzial des MRK-Systems zu ermitteln. Dies verhindert bisher den breiten Einsatz solcher Technologien.

Daher haben sich die KoMPI-Projektpartner mit der Entwicklung eines ganzheitlichen Simulationswerkzeugs für MRK beschäftigt. Im Fokus stand dabei die Integration von Automatisierungskomponenten, wie einer Roboterbahnplanung und Greif- und Sensorsimulation, in eine bestehende proprietäre Simulationssoftware der manuellen Montagearbeit. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Planung und Simulation von kollisionsfreien Mensch-Roboter-Bewegungen. Eine realitätsnahe Simulation von MRK mit kollisionsfreier Bahnplanung liefert bereits weit vor der eigentlichen Inbetriebnahme der MRK-Anwendung zuverlässige Informationen, beispielsweise über die Zykluszeit oder technische Machbarkeit, die u.a. für die Prozess- und Layoutgestaltung entscheidend sind.

## Simulationswerkzeug für MRK

Die Systemarchitektur des MRK-Simulationswerkzeugs besteht aus den zwei zentralen Systemkomponenten, der Menschsimulation sowie der Roboter- und Peripheriesimulation, die zu einem einzigen Softwaresystem gekoppelt werden.

Die Menschsimulation wird durch den Editor menschlicher Arbeit (ema) des Unternehmens imk automotive GmbH abgedeckt. ema Work Designer liefert eine zeitliche Bewertung und eine ergonomische Analyse des geplanten Arbeitsablaufs sowie eine realistische Visualisierung der menschlichen Körperbewegungen. Obwohl Robotersysteme bereits in ema integriert sind, werden bisher nur eingeschränkte Funktionalitäten für die Simulation von Roboter- und Peripheriekomponenten angeboten - insbesondere in Zusammenarbeit mit dem integrierten Menschmodell.

Die Roboter- und Peripheriesimulation basiert auf dem Open-Source-Software-Framework Robot Operating System (ROS). ROS ermöglicht die ganzheitliche Simulation von Robotern, Sensoren und Umgebung und liefert eine Vielzahl von Treibern zur Steuerung von Sensoren, Aktoren und ganzen Robotersystemen. Ergänzt wird dies durch grundlegende Robotik-Algorithmen für die Bahnplanung, die Sensordatenverarbeitung sowie die Kollisionsprüfung und -überwachung.

Ein wesentlicher Bestandteil des Simulationswerkzeugs für MRK ist die Datenschnittstelle zwischen ema und ROS. Der gesamte Montagearbeitsplatz mit allen Mensch-, Roboter- und Umgebungsmodellen wird vom Planenden virtuell in ema modelliert (Bild 1) und anschließend in Form eines virtuellen Abbildes an

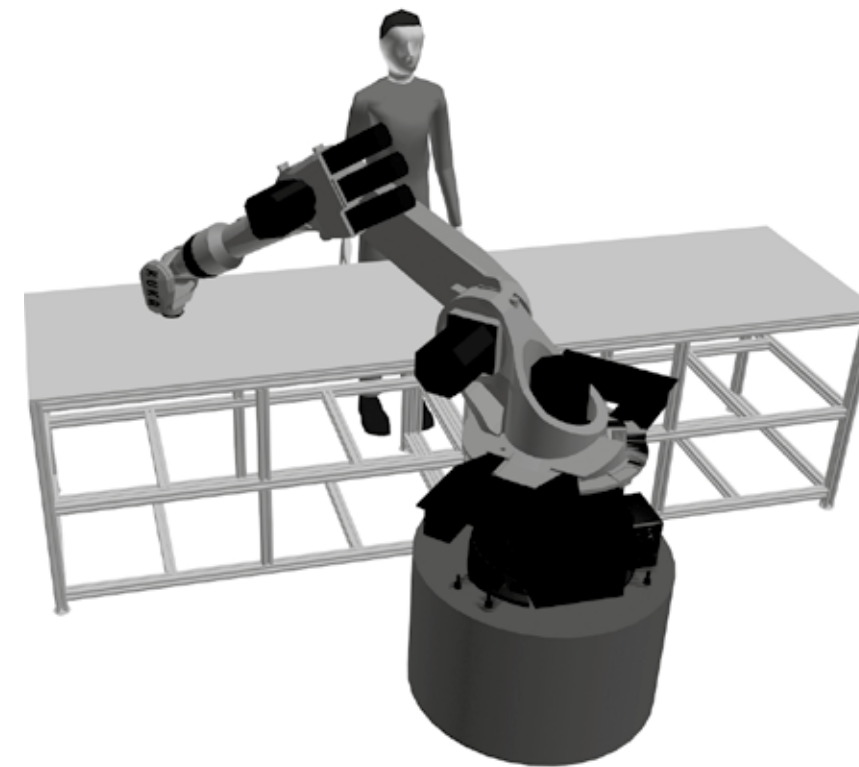


Bild 1: Modelliertes MRK-Montageszenario in ema mit Mensch-, Roboter- und Umgebungsmodellen

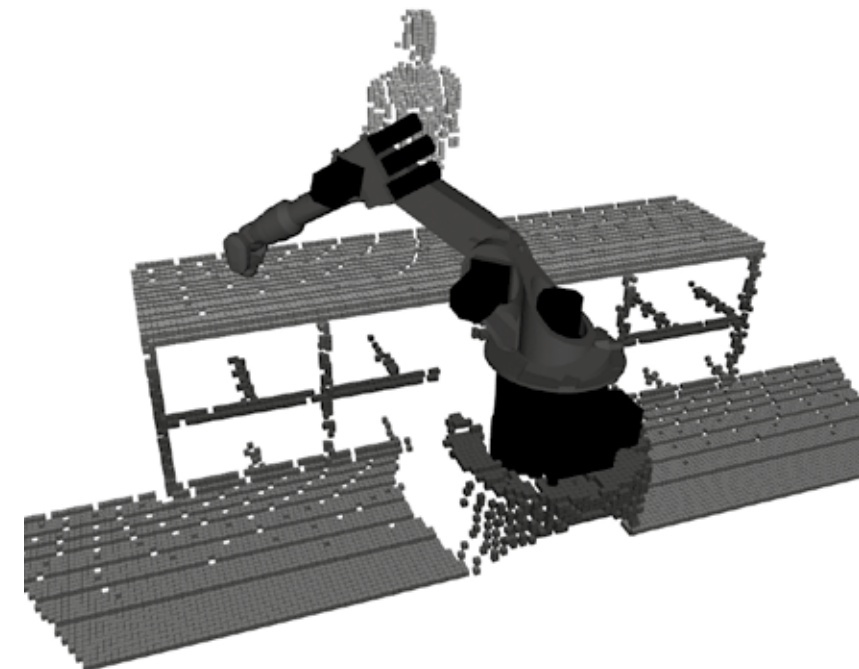


Bild 2: Übertragung der Umgebungs- und Menschdaten als virtuelles Abbild von ema nach ROS

die Robotersimulation in ROS übergeben. Um die Bewegungen des Menschen und alle in ema modellierten Umgebungsobjekte in der Robotersimulation während des Montageprozesses zu berücksichtigen, werden die Bewegungsdaten des Menschen sowie alle Umgebungsinformationen über eine Methode zur Darstellung von 3-D-Simulationen von ema nach ROS übertragen (Bild 2). Diese 3-D-Darstellung visualisiert diejenigen Punkte, die während des Montageprozesses belegt sind, und liefert somit die erforderlichen Umgebungsdaten für die kollisionsfreie Bahnplanung.

Nachdem sämtliche Umgebungs- und Bewegungsdaten an ROS übertragen wurden, erfolgt die Roboter- und Peripheriesimulation. Dabei werden die berechneten Roboter- und Peripheriedaten von ROS über die Daten- und Kommunikationsschnittstelle zurück an ema geschickt. Der Roboter wird anschließend in der Simulationsumgebung von ema angesteuert und visualisiert, wodurch eine ganzheitliche Simulation eines MRK-Montageszenarios realisiert wird.

In MRK-Systemen kommt neben Robotern und entsprechend angebotenen Endeffektoren (z.B. Greifer oder Schweißzangen) auch Sensorik (z.B. Kameras) zum Einsatz. Deren Funktionalitäten und Eigenschaften sollten auch in der Planung von MRK-Systemen Berücksichtigung finden. Für eine vollständige Sensorsimulation ist eine Abbildung der statischen (z.B. 3-D-Daten oder Gewicht) und dynamischen Eigenschaften (z.B. Taktzeit) erforderlich. Die Abbildung aller relevanten Eigenschaften definiert den Digitalen Zwilling des Systems. Statische Eigenschaften lassen sich dabei in geeigneten Datenformaten, wie z.B. Automation ML (Automation Markup Language), beschreiben. Dynamische Eigenschaften werden simuliert, um Erkenntnisse über Detektionsraten und Taktzeiten beschreiben zu können.

## Weitere Forschungsarbeiten stehen an

Die Validierung des entstandenen ganzheitlichen MRK-Simulationswerkzeugs erfolgte an industriellen Szenarien der drei Anwendungspartner im KoMPI-Projekt: Albrecht JUNG GmbH & Co. KG, Leopold Kostal GmbH & Co. KG und Karl Dungs GmbH & Co. KG. Zukünftige Forschungsarbeiten beschäftigen sich intensiv mit der Einbettung der MRK-Betriebsarten Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung sowie der Leistungs- und Kraftbegrenzung in das vorgestellte Simulationswerkzeug.

# KONZEPTION

## KAPITEL 4

Gegenüber der hochkomplexen und spezialisierten Vollautomatisierung erscheint die Konzeption von MRK-Systemen auf den ersten Blick durch ihren vermeintlich geringeren Funktionsumfang oft „einfach“. Doch hier trägt der Schein. Bei MRK-Systemen handelt es sich um soziotechnische Systeme, die in ihren Wechselwirkungen bezüglich des Zusammenspiels zwischen Mensch, Technik, Organisation und Information äußerst komplex sind. Sie können ihr Potenzial nur entfalten, wenn dies bereits in der Konzeption mitbetrachtet wird.

In einem ersten Schritt gilt es, mit einer Potenzialanalyse abzuschätzen, wo, wie und mit welchem Funktionsumfang das kollaborative Montagesystem überhaupt eingesetzt werden soll. Im nächsten Schritt müssen innerhalb des Systems die Aufgaben zwischen Mensch und Roboter so gestaltet werden, dass der Wirkungsgrad des kollaborativen Systems optimal ist.

Erfordert das System weitere Funktionalitäten, wie z.B. eine räumliche und/oder zeitliche Flexibilität oder ein passendes Informationsmanagement, ist dies in der Konzeption und Gestaltung ebenfalls zu berücksichtigen.

## KONZEPTION UND GESTALTUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

- 82** Wortwechsel
- 88** Potenzialanalyse für MRK  
(KoMPI + SafeMate)
- 92** Aufgabenorientierte Zuordnung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter  
(SafeMate + KoKoMo + KoMPI)
- 98** Kollaborative Montagearbeitsplätze gestalten – ein Fallbeispiel  
(ROKOKO)
- 102** Sharing-Konzept mit mobilen Assistenzrobotern  
(ARIZ)
- 106** Mensch-Maschine-Kommunikation für räumlich flexible Roboterprozesse  
(KUKoMo)





*„Ein zentrales Ziel ist für uns, die Gesundheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu stärken, indem der Roboter unergonomische Tätigkeiten ausführt.“*



**DENNIS KREUTZER**  
Lean Experte bei der Lenze Operations GmbH



Dr.  
**AXEL SCHMIDT**  
Director Engineering bei der Sennheiser electronic GmbH & Co. KG

*„Ein Erfolgsfaktor ist die Auswahl des zu automatisierenden Prozesses, der in Verbindung mit einer MRK-Integration eine deutliche Verbesserung für die Anwender ergeben muss.“*



**MICHAEL VOSS**  
MRK-Projektleiter bei der Festo AG & Co. KG

*„Bei MRK ist es uns wichtig, das System nicht nur als Betriebsmittel oder Arbeitsplatz, sondern als eigenes neues Produktionssystem zu betrachten.“*



**TOBIAS STUKE**  
Prozessingenieur in der Montagetechnik bei der Weidmüller Interface GmbH & Co. KG

*„Bei der Prozessgestaltung sollte man sich überlegen, was der Roboter und was der Mensch besser kann.“*



# WORTWECHSEL

*Konzeption und Gestaltung kollaborativer Montagesysteme*



DENNIS  
KREUTZER

DR.  
AXEL SCHMIDT

## WAS SIND DIE ERFOLGSFAKTOREN BEI DER EINFÜHRUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME?

Wir haben eine ganze Reihe von Erfolgsfaktoren identifiziert. Zunächst spielt die Akzeptanz der Mitarbeiter, die sich insbesondere durch eine einfache Handhabung der kollaborativen Montagesysteme erhöht, eine wichtige Rolle. Die Auswahl der Tätigkeiten für die Teilautomatisierung mit MRK ist ebenfalls von Bedeutung. Besonders geeignet sind monotone, unergonomische und gefährliche Arbeiten, bei denen der Roboter entlasten kann. Damit sich kollaborative Montagesysteme auch rechnen, sollte der MRK-Einsatz gemäß dem Motto „einer - also ein Roboter - für alles“ möglichst flexibel gestaltet sein. Und über allem steht natürlich, dass die komplexen Sicherheitsanforderungen für MRK einzuhalten sind.

Es ist erfolgsentscheidend, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie den Betriebsrat von Beginn an in die Gestaltung der neuen Arbeitssysteme einzubeziehen. Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die Auswahl des zu automatisierenden Prozesses, der in Verbindung mit einer MRK-Integration eine deutliche Verbesserung für die Anwender ergeben muss. Zudem ist es wichtig, dass die Organisation über die notwendigen Kenntnisse zur Integration von MRK-Systemen verfügt, um diese sicher und flexibel einzusetzen und das damit verbundene Effizienzpotenzial nachhaltig zu realisieren. Nicht zuletzt ist die Akzeptanz von MRK-Systemen - neben dem Unterstützungsgrad für die Anwender - maßgeblich von der Einfachheit des Bedienkonzeptes (Handhabung, Programmierung) und einer schnellen und aufwandsarmen Rekonfigurierbarkeit abhängig.

## WELCHE ZIELE LASSEN SICH MIT KOLLABORATIVEN MONTAGESYSTEMEN ERREICHEN? WIE ERMITTELT MAN DIE POTENZIALE ZUR PRODUKTIONSSTEIGERUNG, DIE SICH AUS DEM EINSATZ KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME ERGEBEN?

Ein zentrales Ziel ist für uns, die Gesundheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu stärken, indem der Roboter unergonomische Tätigkeiten ausführt. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit geht es uns darum, Abläufe zu parallelisieren und Arbeitsschritte zu identifizieren, bei denen der Roboter schneller als der Mensch montieren kann. Dabei handelt es sich meist um Arbeitsschritte, die auch bei variantenreichen Produkten gleich sind. Die Potenziale dafür lassen sich mithilfe einer detaillierten Prozessanalyse ermitteln.

MRK ist eine Low Cost Automation zur Teilautomatisierung manueller Tätigkeiten und bietet das Potenzial, die Produktivität in den Montageprozessen durch Qualitätserhöhung, Wegfall von Wartezeiten sowie reduzierten Ressourceneinsatz zu steigern. Darüber hinaus können wir mit dem Einsatz von MRK-Systemen die Ergonomie am Arbeitsplatz weiter verbessern und die Arbeitsfähigkeit unserer Belegschaft langfristig erhalten - ein Aspekt, der vor dem Hintergrund des demografischen Wandels besonders wichtig ist. Damit stellt der Einsatz von MRK-Systemen einen wichtigen Baustein dar, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit von Hochlohnländern wie Deutschland zu erhalten.

## WIE LÄSST SICH DIE MENSCH-MASCHINE-KOMMUNIKATION SO EFFIZIENT WIE MÖGLICH GESTALTEN?

Eine intuitive Bedienung und das einfache Teachin, das keine Programmierkenntnisse erfordert, sind wichtige Elemente einer effizienten Mensch-Maschine-Kommunikation. Hierzu wären noch intelligentere Roboter erforderlich, die sich sicher mit Gesten und Sprachen steuern lassen.

Wichtig ist es, die zukünftigen MRK-Nutzer frühzeitig einzubinden und agile Projektmanagement-Methoden bei der Technologieeinführung anzuwenden. Wie Herr Kreutzer bereits sagte, sind zudem ein einfaches und intuitives User-Interface sowie akustische, optische und taktile Rückmeldungen vom Roboter wünschenswert.

Die Lenze Operations GmbH bietet Produkte, Antriebslösungen, Automatisierungssysteme und Engineering-Dienstleistungen für den Maschinenbau an.

Die Sennheiser electronic GmbH & Co. KG entwickelt und fertigt Audiotechnik für private und geschäftliche Zwecke.



MICHAEL  
VOSS

TOBIAS  
STUKE

Bei uns kommen MRK-Systeme vor allem bei mittleren Losgrößen zum Einsatz. Dabei ist es uns wichtig, das System nicht nur als Betriebsmittel oder Arbeitsplatz, sondern als eigenes neues Produktionssystem zu betrachten - gerade auch in Bezug auf die organisatorische Umsetzung. Den Ausgangspunkt bildet die Analyse der bestehenden Arbeitsplätze. Im Anschluss daran werden die Abläufe in automatisierungsgerechte Prozesse zerlegt und geprüft, welche neue Abfolge bzw. Zusammensetzung dieser Prozesse eine optimale Roboterauslastung ermöglicht. Dabei ist es wichtig, die Rollen der Menschen zu definieren, die mit dem MRK-System arbeiten. Diese Rollendefinition bildet die Basis für passgenaue Qualifizierungsangebote. Um auf technischer Ebene eine reibungslose Kommunikation zu gewährleisten, ist zudem ein geeignetes Schnittstellen- und Kommunikationskonzept erforderlich.

Ich kann meinen Vorrednern in vielen Punkten zustimmen. Für uns stellt die Akzeptanz den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Die Technik darf nicht aufgezwungen sein. Es ist entscheidend, den Nutzen und die Motivation für kollaborative Montagesysteme klar zu kommunizieren. Bei der Prozessgestaltung sollte man sich überlegen, was der Roboter und was der Mensch besser kann. In diese Überlegungen sollten auch die durch MRK möglichen Verbesserungen in der Ergonomie eingehen. Bei der praktischen Handhabung sind uns kurze Umrüstzeiten - sie sollten kürzer als fünf Minuten sein - sowie eine einfache und intuitive Bedien- und Programmierbarkeit besonders wichtig.

Wir wollen mit MRK die Wirtschaftlichkeit durch einen erhöhten Automatisierungsgrad verbessern. Wir sehen die Roboter als flexible Fachkräfte, die die Stammbeschaft bei ihren Aufgaben unterstützen. Ein weiterer Vorteil kollaborativer Montagesysteme besteht darin, dass sie den Anteil monotoner Tätigkeiten für den Menschen reduzieren. Bei der Ermittlung der Potenziale gehen wir eher erfahrungsbasiert als methodisch vor. Hat man sich zur Einführung von MRK entschlossen, hat sich die prototypische Nachbildung der zu automatisierenden Arbeitsplätze bewährt. Diese Möglichkeit zum Anfassen und Probieren ist sehr förderlich für die Systemintegration.

Für uns stehen bei MRK vor allem die Ergonomie- und Qualitätsverbesserungen im Fokus. Aus der Entlastung des Personals folgen indirekte Produktivitätssteigerungen. Im optimalen Zusammenspiel von Mensch und Roboter ergeben sich weitere Potenziale in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit. Dazu ist es z.B. denkbar, dass ein Mensch mit mehreren Robotern interagiert und dabei nur noch die komplizierteren Tätigkeiten ausführt. Infolge einer intelligenten Arbeitsplanung könnte er dem Roboter so viel Arbeit vorbereiten, dass dieser in der dritten Schicht autonom arbeiten kann. Bei der Potenzialanalyse haben wir uns die manuellen Montagestunden angeschaut und Cluster für manuelle, teilweise und ganz zu automatisierende Tätigkeiten gebildet.

Das Bedienkonzept sollte ausgereift sein, also über eine anschauliche Bedienoberfläche und eine gute Benutzerführung verfügen. Das bedeutet, dass der Werker Betriebszustände klar und eindeutig erkennen kann und eine einfache Programmierung sowie eine funktionale Handhabung möglich sind.

Dem kann ich mich nur anschließen. Ein weiterer Aspekt ist, dass eine vernünftige Roboterführung auch nur mit einer Hand möglich sein sollte. Die visuellen Statusanzeigen sollten zudem so gestaltet sein, dass auf dem Display nur das angezeigt wird, was für den aktuellen Arbeitsschritt wichtig ist. Diese nutzerorientierte Informationsverdichtung hilft bei der Zusammenarbeit und fördert die Akzeptanz für die Robotertechnologie.

Die Festo AG & Co. KG ist ein Anbieter von Steuerungs- und Automatisierungstechnik sowie von technischer Aus- und Weiterbildung.

Die Weidmüller Interface GmbH & Co. KG bietet Produkte und Dienstleistungen im industriellen Umfeld von Energie, Signalen und Daten.

# „DIE KÜNFTIGE GESTALTUNG DER MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION IST EINER DER WICHTIGEN SCHLÜSSEL ZU LEISTUNGSFÄHIGEN MRK-SYSTEMEN.“

Prof. Dr.  
Annika Raatz

## KONZEPTION KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME AUS SICHT DER WISSENSCHAFT

Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass MRK-Systeme besonders gut dort eingesetzt werden können, wo Mitarbeitende vorher unter ergonomisch ungünstigen Bedingungen gearbeitet haben. Der Roboter hat hier die Möglichkeit, die Belastung für den Mitarbeitenden deutlich zu senken. Auch in Branchen oder Regionen, in denen Unternehmen Probleme haben, qualifiziertes Personal zu bekommen, kann die Mensch-Roboter-Kollaboration die Lücke in der Produktion schließen, indem bestehende Arbeitsplätze umgestaltet und teilautomatisiert werden. Ebenso lassen sich Schwankungen in der Produktion, beispielsweise durch saisonale Einflüsse, ausgleichen.

### MRK-Potenziale methodisch ermitteln

Um das Potenzial von Mensch-Roboter-Kollaborationen bestimmen zu können, müssen vorab die eigentlichen Ziele klar sein, die das Unternehmen mit der Umgestaltung des Arbeitsplatzes erreichen möchte. So kann die Steigerung der Stückzahl unter Umständen nicht das Hauptziel der Unternehmen sein, sondern z.B. die Bewältigung von neuen Varianten. Im SafeMate-Projekt haben wir ein Vorgehen entwickelt, das Unternehmen zeigt, ob und wie MRK in diesem Fall als Unterstützungssystem eingesetzt werden kann. So kann man beispielsweise über gezielte Fragen ermitteln, ob ähnliche bzw. sich wiederholende Prozessinhalte vorliegen, die eine (Teil-)Automatisierung im Hinblick auf eine höhere Variantenvielfalt begünstigen. Anschließend gilt es natürlich die Wirtschaftlichkeit der manuellen mit einer (teil-)automatisierten Variante zu vergleichen, um eine finale Entscheidung über die Umsetzung treffen zu können.

### Mensch-Maschine-Kommunikation essenziell für Akzeptanz

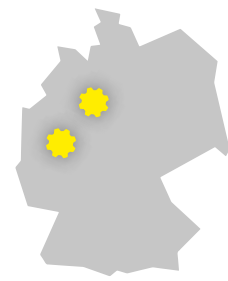
Die Mensch-Maschine-Kommunikation ist ein essenzieller Faktor bei der Gestaltung von MRK-Systemen. So zeigen in unserem Projekt durchgeführte Interviews, dass gerade dieser Aspekt einen großen Einfluss auf die Akzeptanz durch die Mitarbeitenden hat. Diese wollen eine gleichwertige „Partnerschaft“, ohne dass sie vom Roboter getrieben werden oder lange Wartezeiten für sie während des Prozesses entstehen. Ein weiterer Aspekt betrifft vor allem die Programmierung der kollaborationsfähigen Roboter, die nach Möglichkeit schnell, einfach und ohne das Fachwissen von speziell geschultem Personal durchgeführt werden soll.



Prof. Dr.  
**ANNIKA RAATZ**  
Leiterin des Instituts für Montagetechnik an der Leibniz Universität Hannover

Das Institut für Montagetechnik erarbeitet Konzepte und Lösungen für die Produktion mit Fokus auf die automatisierte und robotergestützte Montage und die Handhabungstechnik.





Projekte KoMPI  
und SafeMate

# POTENZIALANALYSE FÜR MRK

KoMPI: Ann-Kathrin Ermer, Tatjana Seckelmann, André Barthelmey, Vanessa Weißkamp, Prof. Dr. Jochen Deuse (Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, IPS)

SafeMate: Sebastian Blankemeyer (Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik); Dennis Pischke (Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik); Volker Grabs (Lenze Operations GmbH); Andreas Noack (ATN Hölzel GmbH); Uwe-Karsten Vett (Sennheiser electronic GmbH & Co. KG)

## Zwei praxisorientierte Methoden ermöglichen es Unternehmen, mit wenig Aufwand und ohne tiefgreifende MRK-Kenntnisse die Erfolgsaussichten für die Einführung eines kollaborativen Montagesystems einzuschätzen.

Um qualifizierte Aussagen zur Umsetzbarkeit und zu den Potenzialen von MRK-Projekten treffen zu können, fehlt in vielen Unternehmen - insbesondere in KMU - häufig das notwendige Fachwissen. In den Projekten KoMPI und SafeMate haben die Projektpartner Abhilfe geschaffen und Methoden entwickelt, MRK-Potenziale zu identifizieren und abzuschätzen. Die beiden Herangehensweisen verfolgen einen unterschiedlichen Ansatz. Der Quick-Check von KoMPI setzt auf ein Punktesystem, das die Anwenderin oder der Anwender auf Basis von Prozesskriterien vergibt. Beim SafeMate-Potenzialcheck wird zunächst anhand von Fragen der finanzielle und sicherheitstechnische/ergonomische Mehrwert der MRK-Anwendung ermittelt. Im Anschluss daran erfolgt die technologische Eignung der Anwendung anhand einer Modellierung.

### Methode 1: KoMPI-Quick-Check

Die Anwendung des Quick-Checks erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird der betrachtete Arbeitsvorgang in Teilprozesse unterteilt, die anschließend anhand verschiedener Kriterien bewertet werden. Diese Kriterien umfassen Aspekte, die für den Erfolg einer MRK-Einführung entscheidend sind. Als Letztes erfolgt eine Ergebnisauswertung.

Vorkenntnisse in der Automatisierungstechnik sind nicht erforderlich, allerdings muss das zu bewertende Arbeitssystem gut bekannt sein. Erfahrungsbasiert wird dieses in Teilabschnitte untergliedert. Da eine schnelle Überprüfung des Arbeitssystems möglich sein soll - im Projekt KoMPI wurde ein Zeitraum von einer Stunde als Zielgröße festgelegt -, ist es empfehlenswert, maximal zehn Teilprozesse mit jeweils ein bis zwei Handlungen auszuwählen. Im Fall der Montage von Bauteilen zu einer Baugruppe ist es beispielsweise sinnvoll, die Montage jedes Bauteils einzeln als Teilprozess zu betrachten und ggf. notwendige Schritte zur Handhabung der Baugruppe zusätzlich zu bewerten.

Im Anschluss wird für die ausgewählten Teilprozesse jedes Kriterium bewertet. Die insgesamt dreizehn Kriterien sind in fünf Kategorien unterteilt (Bild 1). Die erste Kategorie „Bauteile“ dient dabei der Überprüfung, ob alle Bauteile des Arbeitsvorgangs für die Handhabung durch einen Roboter geeignet sind. Durch eine Bewertung der Greifflächen und der Bauteilstabilität wird z.B. überprüft, ob ein Roboter die Bauteile des jeweiligen Teilprozesses aufnehmen und handhaben kann. Mit der zweiten Kategorie „Zu- und Abführung“ wird überprüft, ob der aktuelle Materialfluss des jeweiligen Teilprozesses technisch auch für einen Roboter geeignet wäre. Die dritte Kategorie „Verbesserungspotenzial“ zielt auf die Ergonomie und potenzielle Zeiteinsparungen ab. In der vierten Kategorie geht es um die „Sicherheit“, die durch die Beurteilung der Schneid- und Quetschgefahr sowie der Kollisionsgefahr bewertet wird. Um auch anwendungsspezifische Bedingungen zu berücksichtigen, ist in der fünften Kategorie „Sonstiges“ die Definition eines eigenen Kriteriums möglich.

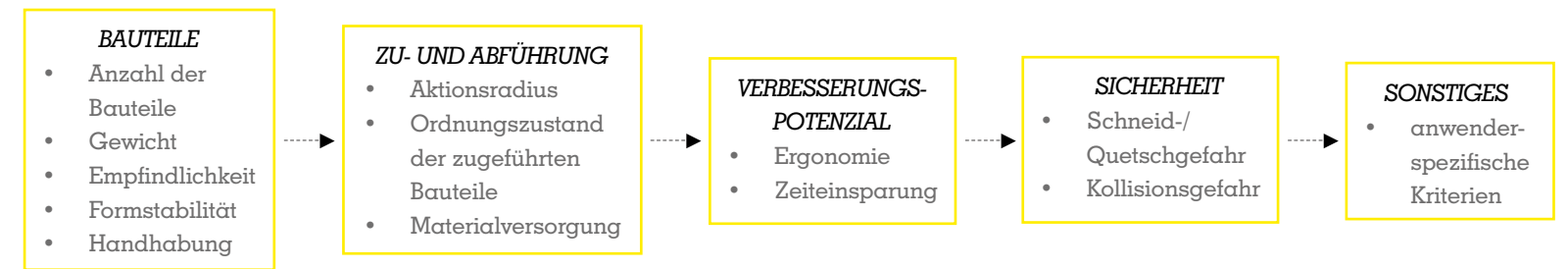


Bild 1: Übersicht über alle Quick-Check-Kategorien und -Kriterien

Nach der Bewertung der einzelnen Teilprozesse und Kriterien erfolgt die Auswertung des Quick-Checks. Hierfür werden die Punkte der Teilprozesse addiert und die Summe prozentual an der maximal möglichen Punktzahl bewertet. Ein Teilprozess, der für mindestens drei Kriterien gleicher oder unterschiedlicher Kategorien null Punkte erhalten hat, wird dabei insgesamt auf

0 Prozent gesetzt. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass eine Automatisierung mit hohem Aufwand verbunden ist. Das unter „Sonstiges“ festgelegte Kriterium kann darüber hinaus als alleiniges K.o.-Kriterium ausgewählt werden. Das heißt, sobald dieses Kriterium mit 0 Punkten bewertet wird, wird der betreffende Teilprozess sofort auf 0 Prozent gesetzt.




ZU- UND ABFÜHRUNG (Bewerten Sie die Ist-Situation des Arbeitssystems)					
AKTIONSRADIUS	<p>Wie hoch ist <u>aktuell</u> die <u>maximale</u> Distanz zwischen zwei Aufnahme-/Ablageorten?</p> <p>Beispiel Teilprozess Verpackung von vier Produkten: Abstand zwischen Bereitstellung des Produkts und der Ablagefläche für verpackte Produkte</p>				
	> 260 cm 0 PUNKTE	160–260 cm 1 PUNKT	120–160 cm 2 PUNKTE	60–120 cm 3 PUNKTE	0–60 cm 4 PUNKTE
ORDNUNGSZUSTAND DER ZUGEFÜHRTEN BAUTEILE	<p>Was ist der <u>schlechteste</u> Orientierungszustand, der in dem betrachtenden Teilprozess <u>aktuell</u> vorkommt?</p> <p>Beispiel Teilprozess Verpackung von vier Produkten: Produkte liegen vermischt in KLT vor, Füllmaterial und Verpackung sortiert → chaotisch</p>				
	<p>chaotisch (z.B. „Griff in die Kiste“)</p> 	<p>orientiert in einer Ebene (2-D)</p> 	<p>lagerichtig (z.B. auf Werkstückträger)</p> 		
	0 PUNKTE	2 PUNKTE	4 PUNKTE		

Bild 2: Die Umsetzung des Quick-Checks anhand von zwei Beispielkriterien

Basierend auf den Teilprozessergebnissen wird ein Ranking der Teilprozesse in Bezug auf die Automatisierbarkeit erstellt. Zusätzlich wird das Gesamtautomatisierungspotenzial des Arbeitssystems als Durchschnittswert der Prozentwerte aller Teilprozesse berechnet. Da der Einsatz von Mensch und Roboter in einem Arbeitssystem besonders dann vielversprechend ist, wenn einige Prozesse gut und andere besonders schlecht zu automatisieren sind (diese Prozesse erfordern Fähigkeiten des Menschen), wird darüber hinaus noch ein MRK-Potenzial berechnet. Dieses berücksichtigt die Spannbreite und die Standardabweichung der Teilprozessergebnisse. Dadurch ist eine Abgrenzung zwischen Prozessen möglich, die generell gut zu automatisieren sind, und solchen, die besonders für MRK geeignet sind.

Der Quick-Check liefert keine absoluten Kennzahlen, die Ergebnisse sind vielmehr relativ im Vergleich mehrerer Arbeitssysteme auszuwerten. Somit kann aus mehreren Arbeitssystemen, die für MRK infrage kommen, mittels des Quick-Checks eine sehr gute Vorauswahl getroffen werden. Das vielversprechendste Arbeitssystem durchläuft anschließend die weiteren Schritte der KomPI-Planungssystematik (siehe Beitrag „Werkzeug zur realitätsnahen MRK-Simulation“ in Kapitel 3).

Der vollständige Quick-Check kann unter <https://kompi.org/quickcheck/> heruntergeladen werden. Anwenderinnen und Anwender können sich mithilfe von Schulungsmodulen (siehe Beitrag „Befähigung von operativen Mitarbeitern und Planungsingenieuren“ in Kapitel 6) mit der Methode vertraut machen.

## Methode 2: SafeMate – arbeitsplatzspezifische Potenzialanalyse für MRK

Um eine schnelle Potenzialermittlung zu ermöglichen, ist die im SafeMate-Projekt entwickelte Methode einfach und intuitiv konzipiert. Der SafeMate-Potenzialcheck erfolgt in zwei Stufen: Auf der ersten Stufe findet eine schnelle Abschätzung des finanziellen und sicherheitstechnischen/ergonomischen Mehrwerts der zukünftigen Umsetzung statt. Auf der zweiten Stufe wird das technologische Potenzial für eine einfache Umsetzung betrachtet.

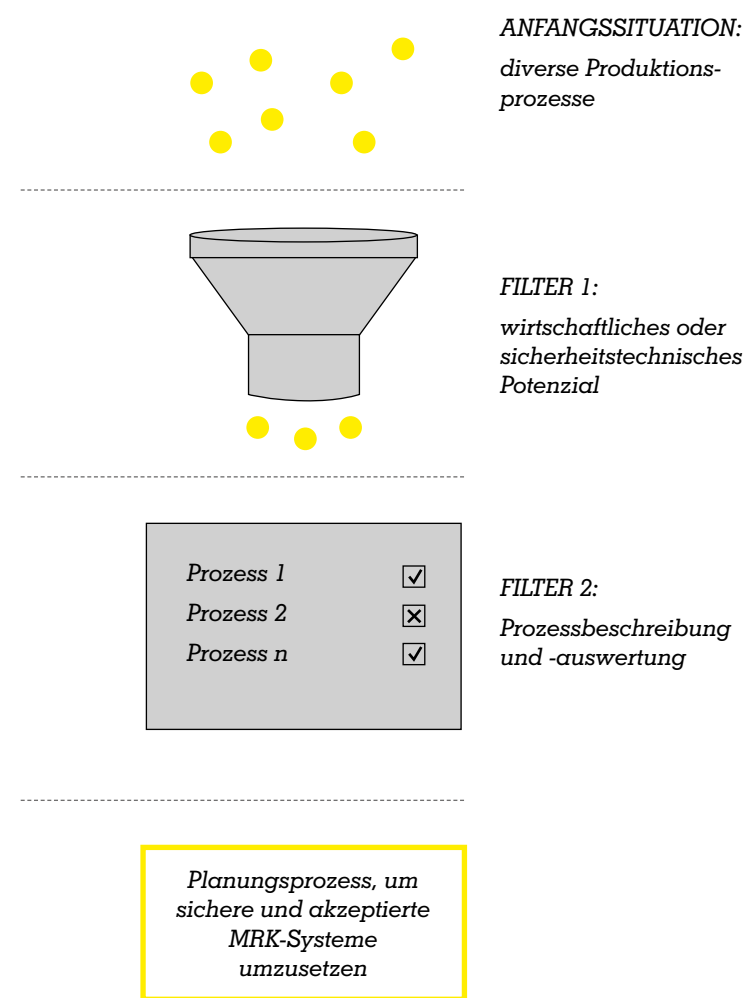


Bild 3: Schematische Darstellung der SafeMate-Potenzialanalyse

### Stufe 1: Mehrwert der MRK-Anwendung abschätzen

Um möglichst viele Arbeitsplätze effizient zu untersuchen, ist für die erste Stufe ein Zeitrahmen von 15 Minuten vorgesehen. Zu Beginn der ersten Stufe ist es notwendig, die unternehmensindividuelle Motivation für die MRK-Einführung zu analysieren. In den meisten Fällen haben Unternehmen bereits eine Problemstellung an einem infrage kommenden Arbeitsplatz evaluiert, sodass sie diesen genauer auf eine mögliche Optimierung hin prüfen wollen. Mögliche Problemstellungen können die Ergonomie, die Effizienz oder die Kosten sein. Erstere zeigen dabei oft, dass die Mitarbeitenden häufiger krankheitsbedingt ausfallen als an anderen Arbeitsplätzen oder dass es entsprechende Hinweise gibt, die von den Betroffenen an die Verantwortlichen weitergegeben werden. Hohe Kosten werden beispielsweise durch schwankende Qualität aufgrund von nicht stabil ablaufenden Prozessen hervorgerufen. Eine (Teil-)Automatisierung kann die Unternehmen dabei unterstützen, das jeweilige Problem zu lösen, wobei MRK eine mögliche Lösungsalternative darstellt.

Diese Problemanalyse ist notwendig, um ermittelte Kriterien im Hinblick auf die Unternehmensziele gewichten zu können. Die Kriterien ergeben sich aus elf Fragen und befassen sich vor allem mit den wirtschaftlichen und arbeitssicherheitstechnischen Rahmenbedingungen, die am Arbeitsplatz vorherrschen. So ist z.B. die Frage nach der Taktzeitrelevanz des Arbeitsplatzes entscheidend für eine wirtschaftliche Betrachtung. In dem Fall, dass der Arbeitsplatz nicht den Takt vorgibt, führt eine Optimierung hinsichtlich einer größeren Ausbringungsmenge zu keinem Mehrwert, da der Prozess von einem anderen vor- oder nachgelagerten Schritt negativ beeinflusst wird.

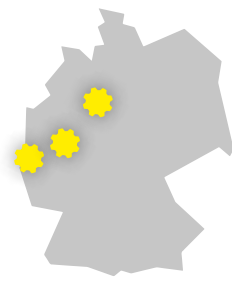
Das Ergebnis der ersten Stufe liefert einen zielgrößenspezifischen Prozentwert, der angibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für eine einfache und wirtschaftliche Umsetzung mithilfe von MRK ist. Anhand des Ergebnisses kann das Unternehmen entscheiden, ob es eine weitere Planung des MRK-Arbeitsplatzes vorantreiben möchte oder nicht.

### Stufe 2: Technische Umsetzung bewerten

Im Rahmen der Betrachtung der Arbeitsinhalte wird überprüft, ob die Gegebenheiten des Arbeitsplatzes gut mit den technologischen Möglichkeiten von MRK übereinstimmen. Hierfür haben die SafeMate-Projektpartner ein einheitliches Schema der Prozessbeschreibung auf Basis von acht Elementarprozessbausteinen entwickelt. Es gewährleistet, dass alle betrachteten Prozesse den gleichen Detaillierungsgrad aufweisen und unterschiedliche Anwender zu einem ähnlichen Ergebnis kommen. Die Zerlegung des Gesamtprozesses in Elementarprozesse ermöglicht es, den Arbeitsplatz differenziert zu betrachten und auf die relevanten Eigenschaften einzugehen.

Im nächsten Schritt werden den Teilprozessen Attribute zugeordnet, die den Prozess genauer charakterisieren. So ist z.B. der Ordnungszustand der Bauteile bei der Zuführung nur beim Prozessbaustein „Aufnehmen“ relevant, da dieser für die anschließenden Prozesse hinreichend definiert ist. Die Attribute werden vom Anwendenden entsprechend der Teilprozessauswahl abgefragt. Sie oder er muss anschließend selbst die Attribute durch die Zuordnung einer Ausprägung bewerten. Pro Attribut existieren mehrere Auswahlmöglichkeiten, die einen entscheidenden Einfluss auf die Eignung als MRK-Arbeitsplatz haben. So können die Anwendenden beispielsweise beim Attribut „Bauteilsteifigkeit“ zwischen den Ausprägungen „biegeschlaff“, „elastisch“ und „starr“ unterscheiden.

Im Rahmen der Auswertung wird abschließend überprüft, ob die angegebenen Eigenschaften mit den gegebenen technologischen Möglichkeiten vereinbar sind. Darüber hinaus wird eine Einschätzung getroffen, ob die geltenden Sicherheitsaspekte eingehalten werden können. Die zweite Stufe des Potenzialchecks gibt somit eine Einschätzung, wie gut der vorliegende Prozess technologisch umsetzbar ist. In Kombination mit den Erkenntnissen aus der ersten Stufe können die Anwendenden nun entscheiden, ob der Einsatz von MRK an diesem Arbeitsplatz einen Mehrwert für die eigene Produktion bringt.



Projekte SafeMate/  
KoKoMo/KoMPI

# AUFGABENORIENTIERTE ZUORDNUNG VON ARBEITS- INHALTEN ZWISCHEN MENSCH UND ROBOTER

**SafeMate:** Sebastian Blankemeyer (Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik); Dennis Pischke (Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik); Tobias Stuke (Weidmüller Interface GmbH & Co. KG); Christoph Ridder (Miele & Cie. KG)

**KoKoMo:** Dr. Werner Herfs, Simon Storms, Simon Roggendorf, Oliver Petrovic (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL)

**KoMPI:** Vanessa Weßkamp, Tatjana Seckelmann, André Barthelmey, Ann-Kathrin Ermer, Prof. Dr. Jochen Deuse (Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, IPS)

**Mithilfe dreier unterschiedlicher Ansätze ist es möglich, Mensch und Roboter die Aufgaben innerhalb eines kollaborativen Montagesystems so zu zuweisen, dass die Fertigung effizient ablaufen kann.**

Der Prozess der Aufgabenzuordnung beginnt, nachdem der Arbeitsplatz mittels Potenzialcheck hinsichtlich seiner MRK-Eignung bewertet wurde (siehe Beitrag „Potenzialanalyse für MRK“ in diesem Kapitel). Anschließend müssen die Daten der Produktionsprozesse, wie beispielsweise Montagezeiten, erfasst werden. Zur Erhebung der Daten kommen sowohl Zeitanalysen am Arbeitsplatz als auch Abschätzungsverfahren, wie beispielsweise das MTM (Methods-Time-Measurement)-Verfahren, zum Einsatz. Es können aber auch Simulationsergebnisse, z.B. aus der Software ema Work Designer des KoMPI-Projektpartners imk Automotive GmbH herangezogen werden. Ein Montagevorranggraph dient dazu, zulässige Verschiebungen von Teilprozessen im Gesamtprozess zu benennen und unter Einhaltung der Reihenfolgerestriktionen umzusetzen. Im Ergebnis entsteht eine detaillierte Beschreibung des Prozesses, die für eine systematische Durchführung benötigt wird.

## Zuordnung der Aufgaben orientiert sich an MRK-Ziel

Die Zuordnung der Aufgaben erfolgt anschließend anhand mehrerer Kriterien. So werden die Taktzeit, die jeweilige Wartezeit der Ressource und die Fähigkeitskennzahl als Zielgröße herangezogen. Die Taktzeit beschreibt dabei eine Abschätzung, wie lange

der Prozess nach der Umgestaltung dauern wird. Die Wartezeit gibt die Zeitdauer an, wie lange eine Ressource, beispielsweise Mensch oder Roboter, im Prozess warten muss. Dabei gilt es, sowohl die Taktzeit als auch die Wartezeit möglichst gering zu halten, um eine hohe Produktivität und eine hohe Auslastung der Ressourcen zu erreichen. In Bezug auf die Ergonomie muss dieser Wert differenziert betrachtet werden: Eine zu hohe Wartezeit für den Menschen könnte zu einer Unterforderung führen, wohingegen eine Wartezeit für den Roboter einen höheren Stresslevel beim Mitarbeitenden hervorrufen kann.

## SafeMate-Ansatz: Fähigkeitskennzahl bewertet Automatisierungspotenzial und Ergonomie

Die im Projekt SafeMate entwickelte Fähigkeitskennzahl gibt an, wie gut eine Aufgabe aufgrund der Gegebenheiten und Rahmenbedingungen für den Menschen oder Roboter geeignet ist. Sie vereint damit den Aspekt der Automatisierbarkeit durch einen Roboter mit den ergonomischen Aspekten des Menschen sowie zu einem gewissen Grad mit der Akzeptanz des Systems durch den Mitarbeitenden. Ein hoher Wert bedeutet dabei, dass die Ressource sinnvoll einsetzbar ist.

Um die jeweilige Fähigkeitskennzahl zu bestimmen, wurden die Elementarprozesse mit den unterschiedlichen Ausprägungskombinationen durch ein Gremium von Expertinnen und Experten – aus MRK-Anwenderunternehmen, Systemintegratoren mit mehrjähriger, praktischer Erfahrung und wissenschaftlichen Einrichtungen – bewertet.

Vor der eigentlichen Zuordnung wird zunächst geprüft, warum die Anwendenden diesen Arbeitsplatz ausgewählt haben. Beispielsweise sollte bei einem Arbeitsplatz, der aufgrund von ergonomischen Problemen ausgewählt wurde, das Thema Ergonomie im Fokus stehen. Folglich würde der entsprechende Teilprozess der Ressource zugeordnet, die eine Verbesserung der ergonomischen Bedingungen am Arbeitsplatz ermöglicht. In einem zweiten Schritt werden anschließend die verbleibenden Teilprozesse entsprechend der Optimierungsziele zugeordnet. Die Fähigkeitskennzahl liefert einen guten Indikator dafür, wie einfach sich ein System (teil-)automatisieren lässt. Ein System mit einem hohen Wert wird wahrscheinlich eher durch den Mitarbeitenden akzeptiert, da es die Bedürfnisse des Menschen berücksichtigt.

Für eine niedrige Taktzeit ist es zwingend notwendig, eine hohe Parallelität von Teilprozessen im MRK-System zu haben. Dafür sollten die parallelisierbaren Prozesse so auf die Ressourcen aufgeteilt sein, dass diese zeitgleich an dem Produkt arbeiten oder entsprechende Blöcke von Tätigkeiten nacheinander abgearbeitet werden können. Die Anordnung und Verteilung der auftretenden Wartezeiten sind wichtige Aspekte: Es muss zum einen darauf geachtet werden, dass die Wartezeit des Menschen gering ist, damit der Prozess schnell und effektiv ablaufen kann. Zum anderen ist es wichtig, dass beim Menschen nicht das Gefühl entsteht, vom Roboter getrieben zu werden, wenn für den Roboter zu lange Wartezeiten entstehen.

Ein genetischer Algorithmus – ein Optimierungsverfahren, das sich an der natürlichen Evolution orientiert – ermittelt anschließend für jedes dieser Optimierungsziele die bestmögliche Kombination und gibt die entsprechenden Kennwerte an. Der Algorithmus setzt hierbei die Zielstellung in ein Optimierungsproblem um und löst dieses unter Berücksichtigung der Reihenfolgerestriktionen aus dem Montagevorranggraphen. Als Ergebnis erhält man eine Reihe möglicher Prozessabläufe mit

entsprechenden Zuordnungen und Kennzahlen. Anhand dieser Kennzahlen kann man den am besten geeigneten Prozessablauf auswählen. Besonders im Hinblick auf den Umsetzungsaufwand (und die damit verbundenen Kosten) ist für einige Anwendenden die Variante mit der geringsten Taktzeit nicht immer vorzuziehen, da hierbei ein hoher initialer Aufwand entstehen kann, der sich erst sehr spät rechnet. Ein Fallbeispiel am Ende des Beitrags veranschaulicht die Ergebnisauswertung.

## KoKoMo-Ansatz: Mathematische Beschreibung der Zuordnung

Das Projekt KoKoMo verwendet für die Zuordnung von Aufgaben einen ähnlichen fähigkeitsbasierten Ansatz. Der Fokus in diesem Projekt lag auf einer mathematischen Beschreibung des Problems, um eine Zuordnung mithilfe des maschinellen Lernens und eine Optimierung mithilfe eines numerischen Computerprogramms zu realisieren. Die Problemstellung sowie die Optimierungskriterien waren also nahezu identisch wie im SafeMate-Projekt, der Lösungsweg weist jedoch Unterschiede auf.

Die Zuordnung der Ressourcen, Eigenschaften, Anforderungen und Aufgaben erfolgt auf Basis des Assoziationsmodells (siehe Bild 1).

Ressourcen besitzen Eigenschaften; Aufgaben besitzen Anforderungen – Eigenschaften und Anforderungen müssen also miteinander verknüpft bzw. assoziiert werden. Eigenschaften von technischen Ressourcen können Nutzlast, Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Reichweiten sein. Im Bereich der menschlichen Ressourcen sind dies insbesondere durch Schulungen nachweisbare Qualifikationen, z.B. zur Montage eines bestimmten Produkts oder zur Durchführung einer Qualitätsmessaufgabe. Anforderungen an Aufgaben können quantitativ bestimmbare Werte (z.B. Kräfte oder Drehmomente) oder kategorisierbare Größen (z.B. Festigkeit oder Fügekomplexität) sein.

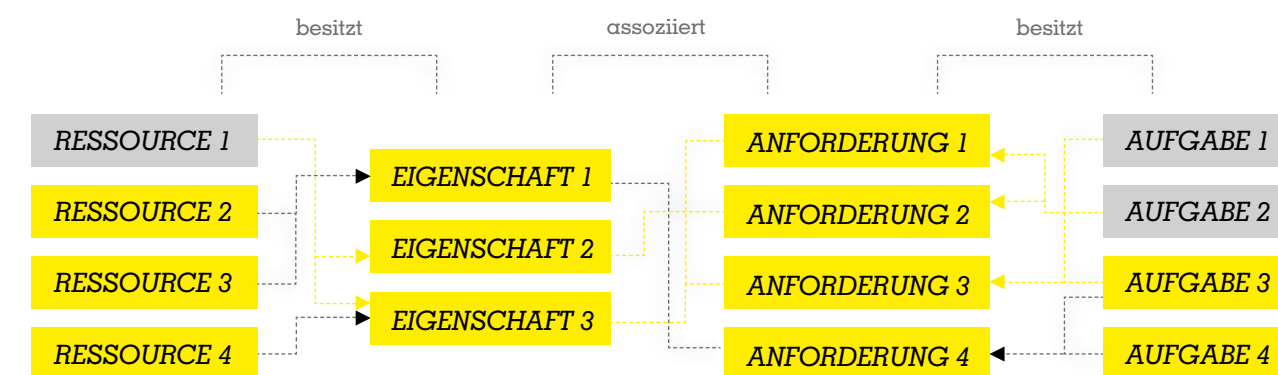


Bild 1: Assoziationsmodell mit Ressourcen, Eigenschaften, Anforderungen und Aufgaben





Schließlich besteht die Aufgabe der in KoKoMo realisierten Methode darin, Eigenschaften und Anforderungen einander zuzuordnen. Auf diese Weise wird das Hauptproblem (Zuordnung Ressource und Aufgabe) in viele kleine Probleme aufgeteilt, die sich methodisch lösen lassen. Ziel ist dabei, das Problem auf Basis einer objektiven Entscheidung zu lösen. Dies kann als Pendant der Fähigkeitskennzahl aus dem SafeMate-Projekt gesehen werden.

Zur Lösung des Assoziierungsproblems gibt es nun zwei grundlegend verschiedene Ansätze, die im Projekt KoKoMo verfolgt wurden. Eine mögliche Methode basiert auf einem definierten Algorithmus, der Eigenschaften und Anforderungen miteinander vergleicht und einer Zuordnung zustimmen oder sie ablehnen kann. Dabei muss jede mögliche Eigenschaft und Anforderung eine Berücksichtigung im Algorithmus finden. Zudem müssen Ressourcen und Aufgaben detailliert genug beschrieben sein, um die gesamte Komplexität des Problems zu berücksichtigen.

Eine weitere Methode basiert auf der Idee des maschinellen Lernens. Dabei werden Montagelösungen wie zuvor modelliert und dienen fortan als Lernbasis für die Künstliche Intelligenz. Dazu wird zunächst aufgrund der geringen Datenmenge ein Assoziierungsalgorithmus (Apriori-Algorithmus) verwendet, der - sobald eine größere Datenmenge vorliegt - durch ein neuronales Netz ergänzt werden kann. Basierend auf einer möglichen Aufgabenzuordnung sowie Zeitabschätzungen der Aufgaben und einem

Montagevorranggraphen wird im nächsten Schritt die finale Zuordnung unter Berücksichtigung der Optimierungskriterien (z.B. Ressourcenauslastung oder Durchlaufzeit) durchgeführt.

KoMPI-Ansatz: Iteratives Vorgehen auf Basis von ema-Simulationsergebnissen

Die KoMPI-Planungssystematik besteht aus fünf Schritten (siehe Bild 2). Sie eignet sich zur Anpassungsplanung von bestehenden Arbeitssystemen und nutzt die Software ema.

Nach der Potenzialanalyse mittels Quick-Check (siehe Beitrag „Potenzialanalyse für MRK“ in diesem Kapitel) wird der existierende Arbeitsplatz in der ema-Software simuliert. Die Simulationsergebnisse, wie z.B. Ist-Zeiten und die ergonomische Bewertung, dienen u.a. der unten detailliert beschriebenen fähigkeitsorientierten Aufgabenzuteilung. Nach der Zuteilung der Aufgaben für Mensch und Roboter erfolgt die iterative Simulation des MRK-Arbeitsplatzes. Durch eine Schnittstelle zwischen der Software ema Work Designer und dem Software-Framework Roboter Operating System (ROS) ist eine reale Bahnplanung und Kollisionserkennung möglich (siehe Beitrag „Werkzeug zur realitätsnahen MRK-Simulation“ in Kapitel 3). In der sich anschließenden arbeitswissenschaftlichen Bewertung werden die verschiedenen Szenarien bezüglich der Aspekte Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Ergonomie und Organisation bewertet (siehe Beitrag „Arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Planungsszenarien“ in Kapitel 9).

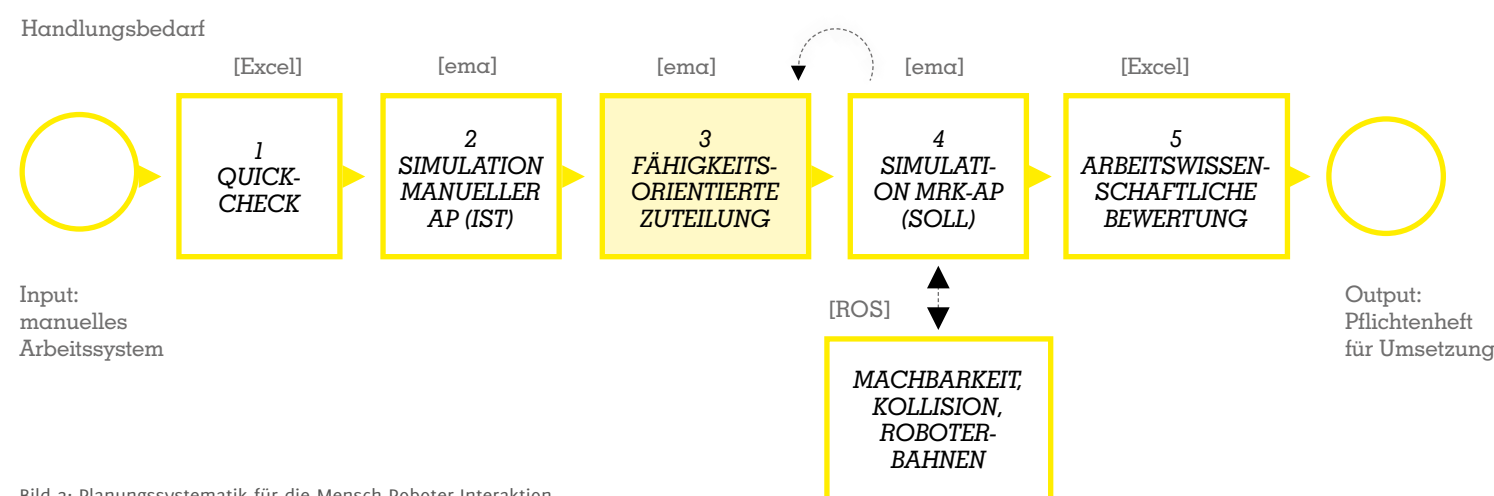


Bild 2: Planungssystematik für die Mensch-Roboter-Interaktion



Wesentliche Prämisse bei der Entwicklung der Aufgabenzuteilung war die einfache Anwendbarkeit und gute Nachvollziehbarkeit. Die erforderlichen Informationen für die Zuteilung (Quick-Check-Ergebnis, Ist-Zeiten und Ergonomie-Indikator) ergeben sich aus den vorherigen Planungsschritten. Zusätzlich wird Wissen über die Parallelisierbarkeit von Teilprozessen benötigt, da häufig nur auf diesem Weg eine Zeiteinsparung erreicht werden kann.

Auf dieser Basis erfolgt die Zuteilung nach drei verständlichen Regeln:

1. Zuteilung ergonomisch kritischer Teilprozesse (roter Ergonomie-Indikator) an den Roboter (sofern die Automatisierbarkeit laut Quick-Check über 50 Prozent beträgt)
2. Zuteilung der Teilprozesse mit höchster Automatisierbarkeit nach Quick-Check an den Roboter
3. individuelle Drag-and-drop-Optimierung entsprechend des gewünschten Ziels (Zeiteinsparung, Mitarbeiterauslastung oder ergonomische Verbesserung)

Die Teilprozesse lassen sich per „drag and drop“ zwischen Mensch und Roboter verschieben. Durch die Regeln entsteht eine belastbare und nachvollziehbare Zuteilung, wobei die abschließende Entscheidung beim Anwender liegt. Der Prozess der Zuteilung wird am folgenden Fallbeispiel erläutert.

**Fallbeispiel: Albrecht JUNG GmbH & Co. KG**

Ein Ziel bei der Aufgabenzuteilung kann in einer zeitlichen Optimierung der Arbeitsabläufe bestehen. Beim KoMPI-Projektpartner Albrecht JUNG GmbH & Co. KG bestand das Ziel darin, die stationsbezogene Zykluszeit an einer manuellen Montagelinie durch den Einsatz eines Leichtbauroboters zu verkürzen. Dazu wurde der Arbeitsplatz in die in Bild 3 dargestellten Teilprozesse unterteilt, um auf dieser Basis den Quick-Check anzuwenden.

Aufgabenzuordnung mit der KoMPI-Methode

Eine Vollautomatisierung erwies sich nach dem Quick-Check-Ergebnis als nicht zielführend - ein hohes Potenzial bestand jedoch in der Verbindung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter im Rahmen eines kollaborativen Montagesystems. Mithilfe der Drag-and-drop-Funktion in ema erfolgte eine Aufgabenzuteilung, die durch den Einsatz eines Leichtbauroboters für einen Schraubprozess (Teilprozess 2 in Bild 3) die Zykluszeit um 12 Sekunden reduziert.

Motivation: Zykluszeitreduzierung - Albrecht JUNG GmbH & Co. KG

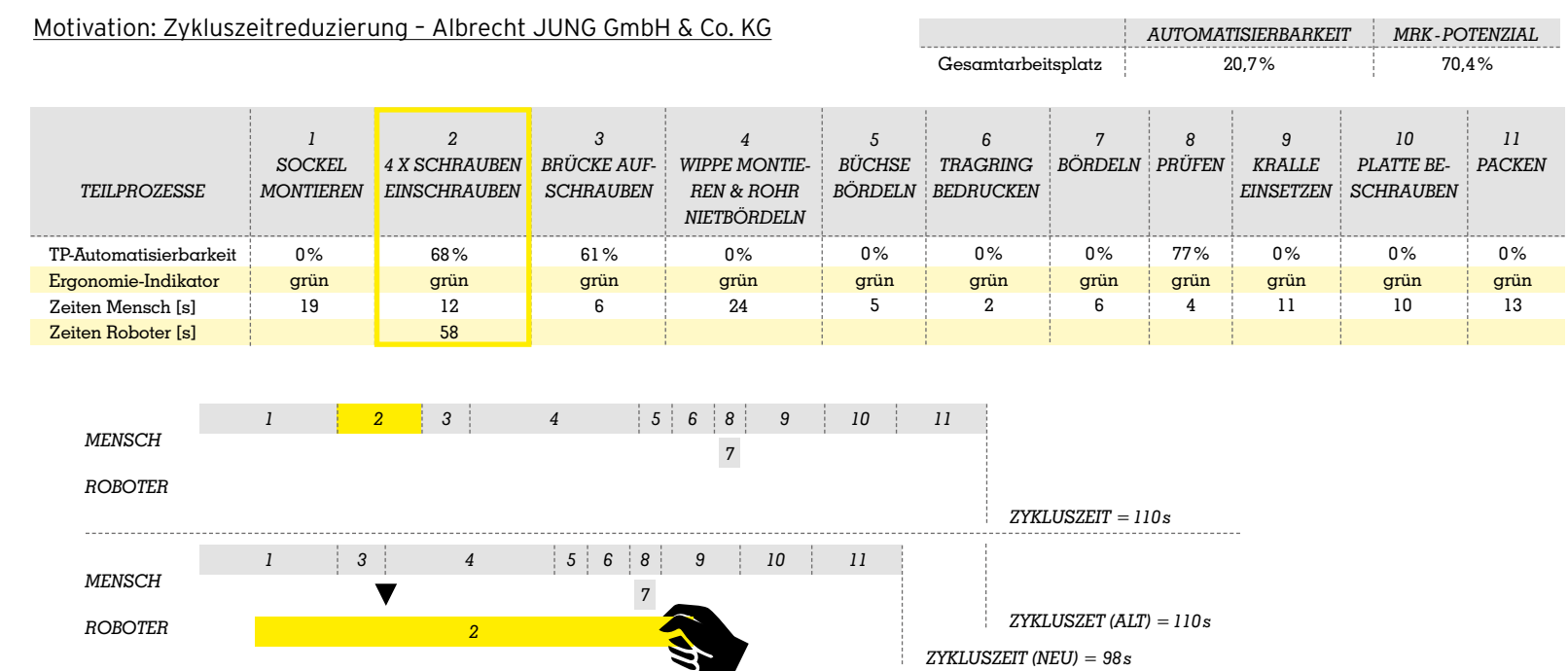


Bild 3: Anwendungsbeispiel mit Zykluszeitreduzierung als Ziel



### Fallbeispiel: Kollaborativer Montagearbeitsplatz in der Pumpenmontage

Beim KoKoMo-Projektpartner KSB SE & Co. KGaA wurde eine MRK-Lösung in der Pumpenmontage implementiert. Dabei haben die Projektpartner lediglich die letzten vier Arbeitsschritte betrachtet, zu denen das Einsetzen einer Dichtung, das Fügen der Pumpe in den Behälter, das Verschrauben der beiden Elemente sowie eine Druckprüfung gehören.

#### Aufgabenzuordnung mit der SafeMate-Methode

Das Ergebnis für die Zuordnung der Pumpenmontage bei KSB nach der SafeMate-Methode ist in Bild 4 dargestellt. Die Zeiten von Mensch ( $t_M$ ) und Roboter ( $t_R$ ) wurden analysiert. Die Fähigkeitskennzahlen ( $e_M$  und  $e_R$ ) wurden anhand der Ausprägungen der Prozesse ermittelt und der Anwendende gibt die Montageabfolge vor. Als Ergebnis erhält der Anwendende für jede Variante ein Balkendiagramm mit der Zuordnung und einer Zeitübersicht. Zusätzlich werden die Kennzahlen Durchlaufzeit (ZDL), Fähigkeitsausnutzung (EG), Auslastung und Wartezeit angegeben.

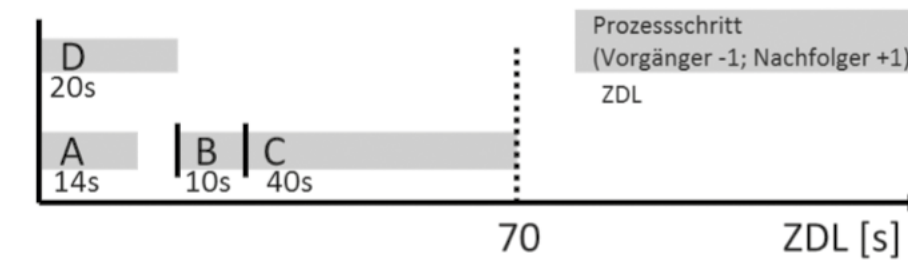
#### Aufgabenzuordnung mit der KoKoMo-Methode

Die KoKoMo-Methode weist das Einsetzen der Dichtung aufgrund deren fehlender Steifigkeit dem Menschen zu - schlaffe Bauteile sind für den Roboter eher ungeeignet. Da am Arbeitsplatz kein geeigneter Greifer vorhanden ist, wird das Fügen der Pumpe vom Assoziierungssystem dem Menschen zugeordnet. Das Verschrauben der beiden Objekte ist eine Aufgabe, die von beiden Ressourcen durchgeführt werden kann; daher wird dieser Arbeitsschritt erst im Laufe der Optimierung final zugeordnet. Die finale Druckmessung kann prinzipiell von beiden Ressourcen durchgeführt werden. Im Fallbeispiel übernimmt diese Aufgabe jedoch der Roboter, weil an dem Arbeitsplatz ein roboterbasierendes Messinstrument verfügbar ist.



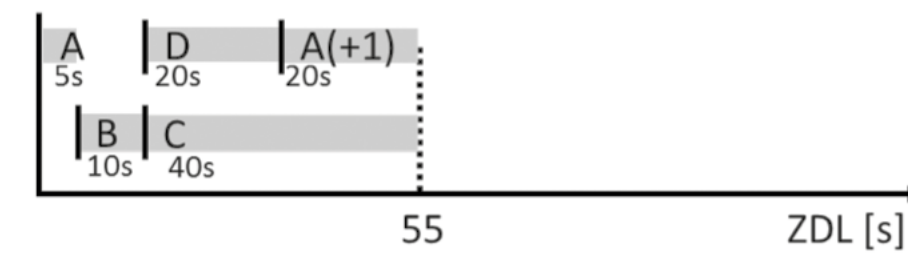
Prozessschritt	$t_M$ [s]	$t_R$ [s]	$e_M$ [%]	$e_R$ [%]	zwingend vor	zwingend nach	nicht parallel zu
A - Dichtring einlegen	14	25	67	33	B		
B - Pumpe fügen	10	30	51	49	C	A	D
C - Pumpe verschrauben	40	90	49	51		B	
D - Druckprüfung Pumpe	60	20	34	66			B

#### Variante 1:



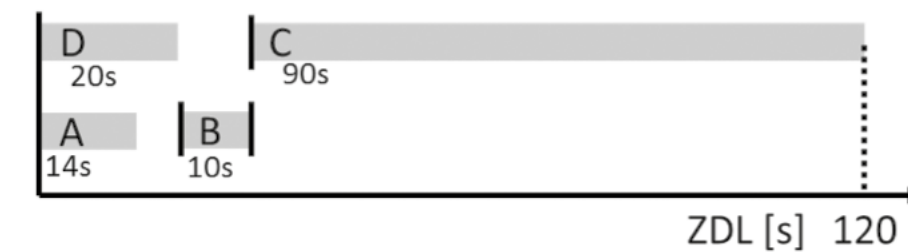
ZDL [s]	70
EG [%]	99,1
Auslastung M [%]	91,4
Auslastung R [%]	28,6
Wartezeit M [s]	6
Wartezeit R [s]	50

#### Variante 2:



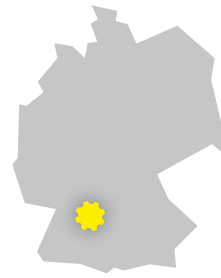
ZDL [s]	55
EG [%]	84,7
Auslastung M [%]	90,9
Auslastung R [%]	81,8
Wartezeit M [s]	5
Wartezeit R [s]	10

#### Variante 3:



ZDL [s]	120
EG [%]	100
Auslastung M [%]	20
Auslastung R [%]	91,7
Wartezeit M [s]	96
Wartezeit R [s]	10

Bild 4: Darstellung der Ergebnisse der SafeMate-Aufgabenzuordnung



Projekt ROKOKO

# KOLLABORATIVE MONTAGEARBEITS- PLÄTZE GESTALTEN – EIN FALLBEISPIEL

Peter Rally und Oliver Scholtz (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO); Marc Wenzelburger (Metabowerke GmbH); Viktor Berns (HandlingTech Automations-Systeme GmbH)

**MRK kann bei schweren körperlichen Tätigkeiten entlasten und höhere Stückzahlen ermöglichen. Am Beispiel eines Montagearbeitsplatzes zum Konfektionieren von Elektrowerkzeugen wird gezeigt, wie das funktionieren kann.**

Wie läuft die Planung eines MRK-Arbeitsplatzes ab? Welche Tools haben sich dabei bewährt? Antworten darauf lassen sich anhand des Beispiels „Konfektionieren von Akku-Maschinen“ beim Unternehmen Metabowerke GmbH, einem Hersteller von Elektrowerkzeugen, anschaulich darstellen. Der Anwendungsfall ist typisch für die Mehrzahl der MRK-Fälle, bei denen Mensch und Roboter nicht kollaborativ – also zeitgleich gemeinsam –, sondern zeitversetzt an einem Produkt arbeiten.<sup>1</sup>

## Ausgangssituation – Konfektionier-Arbeitsplatz

An dem Arbeitsplatz, an dem der Einsatz von MRK vorgesehen ist, führt der Mitarbeiter derzeit folgende Tätigkeiten manuell durch:

1. einen leeren Koffer von einer Palette holen und auf den Tisch legen,
2. den Koffer öffnen und mit dem am Arbeitsplatz bereitgestellten Produkt (Ladegerät, Akkus und Zubehör) bestücken,
3. den befüllten Koffer verschließen und auf einer zweiten Palette ab stapeln.

Der Arbeitsplatz weist derzeit zwei wesentliche Schwachpunkte auf, die letztlich auch die Motivation zur Einführung eines

kollaborativen Montagesystems waren. Der erste Schwachpunkt besteht in der hohen Arbeitsbelastung beim Ab stapeln der Koffer. Bei einer Tagesmenge von ungefähr 500 Koffern stellt das Ab stapeln der befüllten Koffer auf die Palette eine große körperliche Belastung dar. Der Mitarbeiter muss die Koffer dazu in große, auf Paletten stehende Kartons hineinstellen – in einer Schicht sind ca. drei Tonnen Gewicht abzustapeln. Dieser Vorgang geht mit sehr ungünstigen Körperhaltungen einher – insbesondere beim Ab stapeln auf die hinteren Plätze im Karton (siehe Bild 1). An diesem Punkt soll die MRK-Lösung ansetzen und die ergonomischen Bedingungen an diesem Arbeitsplatz gerade im Hinblick auf die älter werdende Belegschaft verbessern.

Der zweite Schwachpunkt des aktuellen Arbeitsplatzes besteht darin, dass er an seinen Stückzahlgrenzen und damit an seinen Produktivitätsgrenzen angelangt ist.

Um diese Schwachpunkte zu beheben, soll zukünftig ein Leichtbauroboter das Ab stapeln der schweren befüllten Koffer übernehmen. Diese schutzzaunlose Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter bietet sich aufgrund der begrenzten Fläche und der Notwendigkeit zum schnellen Behälterwechsel an. Die MRK-Lösung hat zwei Vorteile:

1. Entlastung der Mitarbeiter durch Übernahme des ergonomisch sehr belastenden Ab stapelns durch den Roboter
2. Verkürzen der Taktzeit und Erhöhung der Stückzahlen bei gleichbleibender Fläche



Bild 1: Ausgangssituation für den Konfektionier-Arbeitsplatz bei Metabo, Quelle: Metabowerke GmbH

## Allgemeingültige Gestaltungsgrundsätze zur MRK-gerechten Planung und Gestaltung

Bei der Planung eines MRK-gerechten Arbeitsplatzes können die im ROKOKO-Projekt entwickelten Hinweise bereits in einer sehr frühen Planungsphase berücksichtigt und für eine Machbarkeitsprüfung herangezogen werden.

### 1. Hinweis:

#### Wirtschaftlichkeit bereits zu Projektbeginn abschätzen

In einer frühen Phase im Planungsprozess sollte die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems überprüft bzw. abgeschätzt werden. Dazu ist es notwendig, Investitionen und Einsparungen in Form einer Amortisationsrechnung gegenüberzustellen. Einsparungen ergeben sich beispielsweise aus der Übernahme von manuell durchgeführten Tätigkeiten durch den Roboter. Weitere Ausführungen dazu, u.a. auch die Vorstellung eines Hilfsmittels zur schnellen Investitionsabschätzung, sind in Kapitel 9 des Projektatlas enthalten.

### 2. Hinweis:

#### Möglichst geringen Kollaborationsgrad anstreben

Je geringer der Kollaborationsgrad, desto einfacher sind die Anforderungen an die Sicherheit einzuhalten. Damit reduzieren sich der Planungsaufwand für die Sicherheitsfeatures sowie der Umfang der Sicherheitsausstattung (z.B. Anzahl der Abstandssensoren und Programmieraufwand). Roboter und Mensch

sollten im Regel-Arbeitsablauf örtlich und zeitlich möglichst getrennt arbeiten. Das bedeutet, dass der gemeinsam genutzte Arbeitsbereich so klein wie möglich sein und ein zeitgleiches Arbeiten an einem Produkt vermieden werden sollte.

### 3. Hinweis:

#### Robotern möglichst gleichartige Aufgaben übertragen

Roboter sollten möglichst wenig unterschiedliche Tätigkeiten bzw. Aufgaben ausführen, bei denen sie unterschiedliche Werkzeuge oder Greifergeometrien nutzen. In der Regel benötigt ein schutzzaunloser Roboter für die Ausführung solcher Tätigkeiten viel mehr Zeit als ein Mensch. Zudem steigen der Aufwand für die Planung und die Gewährleistung der Sicherheit und damit auch die Kosten.

## Abschätzung der Zeitersparnis

Ein im ROKOKO-Projekt entwickeltes Tool ermöglicht eine einfache und aufwandsarme Abschätzung der Zeiten, die ein Roboter für die Montage eines Teils braucht. Die Basis dafür ist eine Tabelle, die Standardtätigkeiten des Roboters (z.B. Fahren zum Bauteil und zum Produkt, Greifen und Loslassen) sowie Standardzeiten eines Roboters enthält – siehe Bild 2. Fallabhängig ist zu entscheiden, ob der Roboter aus Sicherheitsgründen mit hoher, mittlerer oder niedriger Geschwindigkeit fahren kann – also ob die Tabelle mit der kürzesten, mittleren oder größten Taktzeit für die Planung zur Anwendung kommt.

Literatur

1 Bauer, W., et al.: Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. Stuttgart, IRB, 2016.





Abschnitt	Tätigkeit Roboter	Greifer Vakuum	s s kürzeste Taktzeit			mittlere Taktzeit			größte Taktzeit		
			hohe Geschwindigkeit	500 mm/s	mittlere Geschwindigkeit	250 mm/s	geringe Geschwindigkeit	100 mm/s			
Teil holen	Hinfahren zu Teil		500	1.000	2,0	250	1.000	4,0	100	1.000	10,0
	Beschleunigungen (Anfahren und Abbremsen)				1,0			1,0			1,0
	Absenken zu Teil - schnell (bis 4cm)		250	200	0,8	250	200	0,8	250	200	0,8
	Absenken zu Teil - langsam (bis 4 mm)		100	40	0,5	100	40	0,5	100	40	0,5
	Absenken zu Teil - langsam ohne Begrenzung		100	4	0,5	100	4	0,5	100	4	0,5
Greifen	Teil greifen				1,0			1,0			1,0
	Vakuum erzeugen				0,0			0,0			0,0
Teil bringen	Anheben - schnell		250	100	0,4	250	100	0,4	250	100	0,4
	Hinfahren zum Zielort		500	1.000	2,0	250	1.000	4,0	100	1.000	10,0
	Beschleunigungen (Anfahren und Abbremsen)				1,0			1,0			1,0
	Absenken zu Zielort - schnell (bis 4cm)		250	100	0,4	250	100	0,4	250	100	0,4
	Absenken zu Zielort - langsam (bis 4 mm)		100	40	0,5	100	40	0,5	100	40	0,5
Prozesszeit (Einfädeln, positionieren, montieren, anschrauben, ...)											
	Loslassen				1,0			1,0			1,0
zu Start	Vorposition anfahren		250	200	0,8	250	200	0,8	250	200	0,8
	Hinfahren Homeposition		500	1.000	2,0	250	1.000	4,0	100	1.000	10,0
	Beschleunigungen (Anfahren und Abbremsen)				1,0			1,0			1,0

■ = Eingabewerte

15,4 s                      21,4 s                      39,4 s

Bild 2: Tool zur Abschätzung der Roboter-Zeiten – Metabo-Fallbeispiel

Damit kann man die Zeit, die der Roboter für eine Tätigkeit benötigt, hinreichend genau abschätzen und entscheiden, ob der Roboter in der restlichen noch zur Verfügung stehenden Zeit weitere Tätigkeiten übernehmen kann.

Bild 3 zeigt den zeitlichen Gesamtarbeitsablauf von Mensch (gelb) und Roboter (grau) für das Metabo-Fallbeispiel. Dadurch lassen sich die Abläufe anschaulich darstellen und auf möglichst geringe gegenseitige Wartezeiten hin überprüfen und optimieren.

Auf diese Weise lässt sich gut erkennen, ob der Mitarbeiter womöglich auf den Roboter warten muss. Dies ist der Fall, wenn die Summe der hellgrauen Zeitbalken (Zeitbedarf des Roboters für seine Tätigkeiten) kleiner als die der gelben Zeitbalken (Zeitbedarf des Mitarbeiters für seine Tätigkeiten) ist. Weiterhin kann man sehen, dass der Mensch zum Abstackeln des befüllten Koffers auf der Palette nur 3,5 Sekunden benötigt (Position 13, grau dargestellter Zeitbalken), während der Roboter (der diese Auf-

gabe übernehmen wird) für diese Aufgabe 31 Sekunden braucht (Position 13 a bis 13 j, Summe der hellgrauen Zeitbalken. Da die Tätigkeit des Abstackelns (Position 13 - Koffer auf die Palette legen) zukünftig vom Roboter übernommen wird (Positionen 13 a bis 13 j), ergibt sich eine Zeitersparnis für den Menschen von ca. 7 Prozent (3,5 von 47 Sekunden).

Der Mensch ist mit seinen restlichen Tätigkeiten (Positionen 1 bis 12) künftig noch 43,5 Sekunden beschäftigt, während der Roboter für das Abstackeln 31 Sekunden braucht. Damit steht dem Roboter noch Zeit zur Verfügung (12,5 Sekunden), um - neben dem Abstackeln - weitere Tätigkeiten vom Mitarbeiter zu übernehmen. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass der Roboter für die gleichen Tätigkeiten viel mehr Zeit als ein Mensch benötigt - Erfahrungen weisen einen Faktor 4 aus. Braucht ein Mensch zehn Sekunden für eine bestimmte Tätigkeit, so braucht der Roboter (unter der Annahme, dass er die vierfache Zeit benötigt) 40 Sekunden dafür.

Arbeitschritt	Dauer Mensch		Dauer Roboter	
	(min)	(sec)	(min)	(sec)
1 Mensch Koffer aus Palette aufnehmen, auf Tisch ablegen	0,083	5	0,000	
2 Mensch kleine Aufkleber auf Koffer aufkleben	0,067	4	0,000	
3 Mensch große Aufkleber auf Koffer aufkleben	0,183	11	0,000	
4 Mensch Koffer umdrehen und öffnen	0,050	3	0,000	
5 Mensch Ladegerät aufnehmen und in Koffer ablegen	0,050	3	0,000	
6 Mensch Akku-Maschine aufnehmen	0,050	3	0,000	
7 Mensch Akku aufnehmen und in Akkuschacht an der Maschine einschieben	0,050	3	0,000	
8 Mensch Maschine in Koffer ablegen	0,033	2	0,000	
9 Mensch Zer Akku aufnehmen und in Koffer ablegen	0,033	2	0,000	
10 Mensch Haken und Bithalter aufnehmen und in Koffer ablegen	0,067	4	0,000	
11 Mensch Bedienungsanleitung mit Beileger aufnehmen und in Koffer ablegen	0,033	2	0,000	
12 Mensch Koffer schließen	0,020	1,5	0,020	
13 Mensch Koffer auf Palette ablegen		3,5		
13 a Roboter zum Koffer fahren				4
13 b Roboter Absenken zum Koffer				2
13 c Roboter Koffer greifen oder Unterdruck erzeugen				2
13 d Roboter Anheben Koffer				1
13 e Roboter Koffer zur Palette bringen				10
13 f Roboter Ecke der Palette anfahren				3
13 g Roboter Position anfahren				1
13 h Roboter Vakuum ablassen				2
13 i Roboter Vorposition anfahren				1
13 j Roboter Ausgangsposition anfahren				5
<b>SUMME</b>	<b>0,720</b>	<b>47</b>	<b>0,103</b>	<b>31</b>

Bild 3: Zeitlicher Gesamtarbeitsablauf von Mensch (gelb) und Roboter (grau)

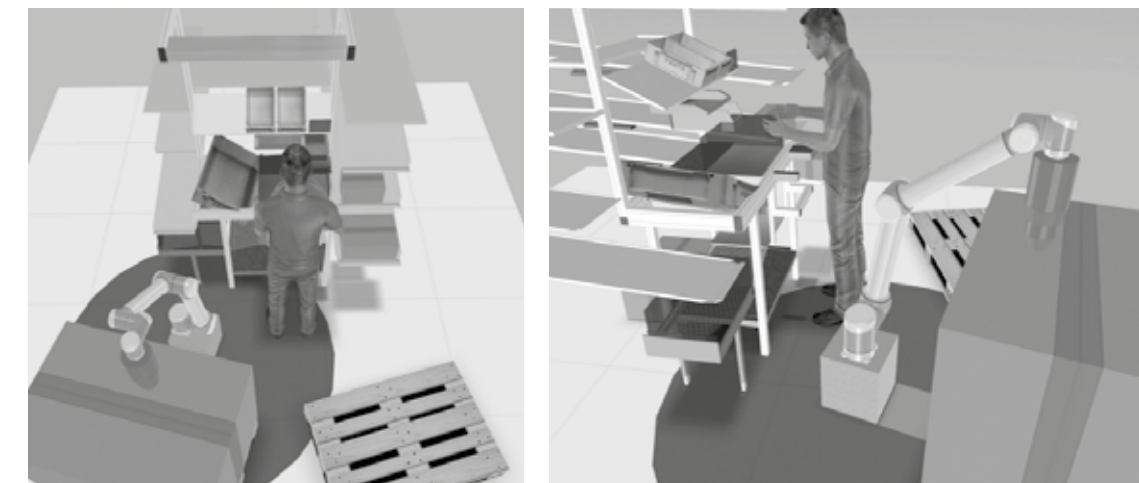


Bild 4: Geplanter MRK-Arbeitsplatz bei Metabo

### Vorgehen zur Arbeitsplatzgestaltung

Auf Basis dieser Gestaltungsgrundsätze wurde der in Bild 4 dargestellte MRK-Arbeitsplatz entwickelt.

Bei der Arbeitsplatzgestaltung war es besonders wichtig, dass sich der Bewegungsbereich des Roboters beim Koffertransport nicht mit dem Bewegungsbereich des Menschen überschneidet. Dafür gibt es zwei Gründe: Erstens führt das Koffergewicht von bis zu 7 Kilogramm zu einem langen Nachlaufweg und damit zu einem großen Impuls im Kollisionsfall. Zweitens muss der Platz zügig für den neuen, noch leeren Koffer freigemacht werden, weil der Mitarbeiter nur ca. 3 Sekunden benötigt, um einen neuen leeren Koffer zu holen.

Der Roboter braucht für den Abtransport vom Tischbereich ca. 10 Sekunden - dies würde eine Wartezeit von 7 Sekunden für den Mitarbeiter bedeuten. Um diese Wartezeiten zu vermeiden, wurde ein Konzept zum automatischen Abtransport entwickelt (siehe Bild 5). Es ist geplant, dass der fertige Koffer von der Tischoberfläche (Position 1) automatisch zunächst senkrecht nach unten (Position 2) und dann seitlich bzw. schräg unterhalb

des Tisches horizontal in Richtung des Roboters transportiert wird (Position 3). Außerhalb des Bewegungsbereichs des Mitarbeiters kann der Roboter dann auf den Koffer zugreifen, ohne den Mitarbeiter zu behindern.

Auf diese Weise lassen sich die beiden Ziele des MRK-Einsatzes einhalten:

- kürzere Taktzeiten des Gesamtablaufs, ohne dass Wartezeiten für den Mitarbeiter entstehen
- kein größerer Flächenbedarf des neuen Systems, sodass Stückzahlsteigerungen bei gleichbleibendem Flächenbedarf möglich sind

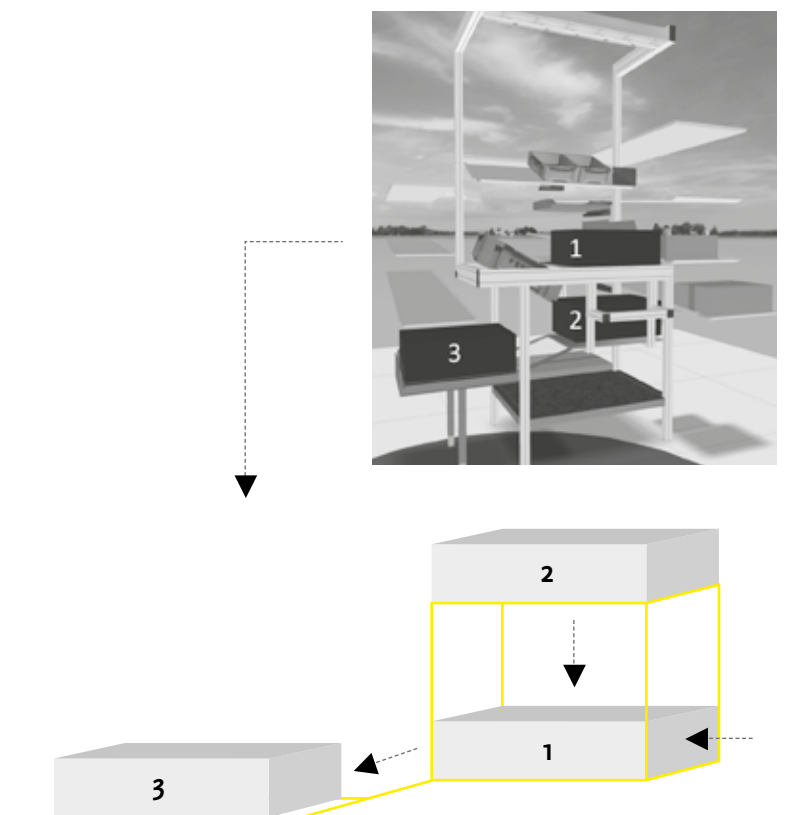
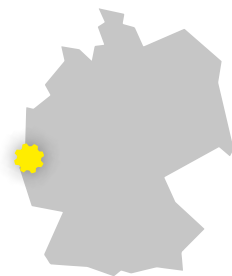


Bild 5: Automatischer Abtransport des Koffers auf Position Nr. 3, bei der der Roboter den Mitarbeiter nicht behindert





Projekt ARIZ

# SHARING-KONZEPT MIT MOBILEN ASSISTENZROBOTERN

Michael Voß und Kristina Wolf (Festo AG & Co. KG); Philipp Ennen (Institut für Unternehmenskybernetik e.V., IfU); Tristan Langer (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau)

**Mit flexiblen, an verschiedenen Arbeitsplätzen einsetzbaren Robotern lassen sich Kapazitätsengpässe überbrücken und monotone Arbeitsbelastungen verringern.**

Assistenzroboter können auf vielfältige Weise Unterstützung leisten - insbesondere bei Kapazitätsengpässen, die sich aufgrund von Personalmangel oder konjunkturellen Schwankungen ergeben. Ihr Einsatz bietet sich auch an, wenn monotone Arbeitsbelastungen für das Montagepersonal durch einzelne Aufträge mit großen Losgrößen entstehen. Im Projekt ARIZ haben die Projektpartner ein Einsatzkonzept für Assistenzroboter entwickelt, das sich am Car-Sharing-Konzept orientiert. Die Anforderungen an ein funktionierendes Robot-Sharing-Konzept sind hoch. Umfassende Sicherungssysteme und eine entsprechende Sensorik sind notwendig, damit Assistenzroboter universell einsetzbar sind.

Im Sinne der wandlungsfähigen Produktion ist der Assistenzroboter mobil und lässt sich adaptiv für die Aufgaben der jeweiligen Arbeitsplätze umrüsten. Er ist mit dem übergeordneten IT-System vernetzt, um eigenständig Informationen abzurufen und dadurch dem Bedienpersonal die Konfiguration zu vereinfachen.

## Neue Organisationsstruktur und Abläufe sind gefragt

Beim Projektpartner Festo AG & Co. KG wurde der Einsatz eines Assistenzroboters erfolgreich in der Prozessanlaufstufe getestet - einem Bereich, in dem neue Technologien getestet werden, bevor sie in die Produktion überführt werden. Dort hilft der Roboter APAS des Unternehmens Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH bei der Qualitätsprüfung von Leiterplatten und beim Umschichten von Ventilgehäusen. Zukünftig soll er auch in

der Fertigung und in der Elektronikmontage zum Einsatz kommen. Dort soll er flexibel an unterschiedlichen Montage- und Vormontagearbeitsplätzen unterstützen.

Die erfolgreiche Implementierung eines solchen Assistenzroboters hängt von einer Vielzahl von technischen und organisatorischen Faktoren ab. Der Einsatz einer flexiblen Ressource innerhalb eines Unternehmens hat Einfluss auf die Organisationsstruktur und bedarf neuer Abläufe, um die flexiblen Ressourcen wirtschaftlich einsetzen zu können. Im Folgenden werden drei Zukunftsszenarien zur Umsetzung des Robot-Sharing-Konzepts vorgestellt und die Organisationsstruktur jedes Szenarios erläutert.

### Szenario A: Internal Robot

Das Szenario „Internal Robot“ basiert auf einem abteilungsinternen Sharing-Konzept, bei dem der Assistenzroboter (als Investitionsgut) vom Werk beschafft und einer Montageabteilung zugeordnet wird. Hierbei wird der Assistenzroboter innerhalb der Abteilung an verschiedenen Arbeitsstationen zeitweilig eingesetzt. Das Ziel besteht darin, einen effizienten Einsatz und eine hohe Auslastung aller Ressourcen zu gewährleisten.

- **Organisationsstruktur:** Die Anzahl der potenziellen Arbeitsstationen und eingesetzten Assistenzroboter steht in einem Verhältnis von mindestens 3:1. Der Assistenzroboter kann entweder innerhalb einer Montageabteilung, temporär an verschiedenen Arbeitsplätzen eingesetzt oder - in Ausnahmefällen - an andere Abteilungen verliehen werden.
- **Rollen- und Tätigkeitsbeschreibung:** Jede Montageabteilung verfügt über die Rollen Abteilungsleiter, Operator und Werker. Demnach sind jedem Abteilungsleiter mehrere



Bild 1: Assistenzroboter im Einsatz, Quelle: Festo AG & Co. KG

Werker und mindestens ein Operator zugeordnet. Der Abteilungsleiter ist für die Planung, Organisation und Koordination des flexiblen Arbeitssystems und demzufolge für die Einsatzplanung von Assistenzroboter, Operator und Werker zuständig. Der Einsatz- und Aufgabenbereich des Assistenzroboters umfasst monotone, repetitive und ergonomisch ungünstige Tätigkeiten, wie z.B. Pick-and-Place-Aufgaben bei der Maschinenbestückung oder die Palettierung. Der Operator ist an den Arbeitsstationen der jeweiligen Abteilung universell geschult. Zudem ist er für die Überwachung, Wiederinbetriebnahme und einfache Bedienung des Assistenzroboters qualifiziert. Der Werker ist auf allen Arbeitsplätzen einer Abteilung trainiert und führt alle Aufgaben aus, die auftragsbedingt an einer Arbeitsstation anfallen.

Das Szenario A erweist sich dann als rentabel, wenn die Auslastung des Assistenzroboters hoch bis sehr hoch ist. Der Assistenzroboter wird in diesem Szenario als Betriebsmittel gesehen.

### Szenario B: Robot Sharing

Das Konzept „Robot Sharing“ steht für eine eigenständige Abteilung im Produktionswerk, die Ressourcen zum Einsatz eines flexiblen Arbeitssystems verwaltet. Hierzu zählen Assistenzroboter, Operatoren und Servicepersonal. Diese Ressourcen werden nach Bedarf zeitweise an die Montageabteilungen verliehen. Folglich ist das Ziel der Robot-Sharing-Abteilung, insbesondere bei Kapazitätsengpässen effiziente Arbeitsabläufe in den Montageabteilungen zu schaffen.





- **Organisationsstruktur:** Die Abteilung „Robot Sharing“ stellt den Montageabteilungen fehlende Ressourcen zur Verfügung. Die Montageabteilungen entscheiden im Vorfeld selbst, welche zusätzlichen Ressourcen sie in einem bestimmten Zeitraum benötigen, und senden hierfür eine Buchungsanfrage an die Robot-Sharing-Abteilung. Bei diesem Konzept kann jede Ressource einzeln gebucht werden. Der Zeitpreis bzw. die Gesamtkosten eines Auftrags werden der jeweiligen Montageabteilung in Rechnung gestellt.
- **Rollen- und Tätigkeitsbeschreibung:** Der Abteilungsleiter des „Robot Sharing“ ist für die Einsatzplanung, Organisation, Koordination und Dokumentation des Ressourceneinsatzes verantwortlich. Der Operator ist auf allen Arbeitsplätzen und im Umgang mit dem Assistenzroboter geschult. Das Servicepersonal ist für die Wartung, Fehlerbehebung und Systemaktualisierung des Assistenzroboters verantwortlich.

Im Szenario B werden sich die Montageabteilungen nur dann für die Inanspruchnahme der Robot-Sharing-Services entscheiden, wenn sie an ihre Kapazitätsgrenzen gestoßen sind.

#### Szenario C: Resource Sharing

„Resource Sharing“ steht für eine vollkommen neue Form der Arbeitsorganisation im Produktionswerk. Hierbei handelt es sich um eine Dienstleistungsabteilung, die als übergeordnete und zentrale Instanz dem gesamten Produktionswerk dient und somit mehrere Funktionsbereiche zusammenfasst. Bei diesem Szenario werden alle Ressourcen von der Resource-Sharing-Dienstleistungsabteilung verwaltet. Ferner stellt die Abteilung „Resource Sharing“ den Montageabteilungen neben Assistenzrobotern und Operatoren auch Werkerpersonal bereit.

- **Organisationsstruktur:** Im zentralen „Resource Sharing“ sind weitere Funktionsbereiche wie „Resource Support“ und „Resource Service and Maintenance“ integriert. Die Montageabteilungen können nach Bedarf die benötigten Ressourcen für ihre Arbeitsstationen buchen oder bei Störfällen eine Fachkraft aus dem Support- bzw. dem Service-and-Maintenance-Bereich hinzuziehen. Bei diesem Szenario kann jede Ressource einzeln oder als Paket gebucht werden. Der Zeitpreis bzw. die Gesamtkosten eines Auftrags werden der jeweiligen Montageabteilung zugeteilt.
- **Rollen- und Tätigkeitsbeschreibung:** Das zentrale „Resource Sharing“ ist für die Einsatzplanung aller Ressourcen einschließlich des Instandhaltungs- und Servicepersonals

verantwortlich. Der Abteilungsleiter ist für die Planung, Organisation und Koordination des Ressourceneinsatzes zuständig. Der Werker ist auf alle Arbeitsaufgaben der verschiedenen Arbeitsstationen im Werk trainiert. Der Operator ist ebenfalls universell auf allen Arbeitsstationen sowie im Umgang mit dem Assistenzroboter geschult. Zudem ist der Operator in der Lage, einfache Störungen am Assistenzroboter zu beheben.

Szenario C ist ein Zukunftsszenario, das annimmt, dass Menschen und Roboter als Ressourcen mit Kompetenzen und Fähigkeiten gemeinsam organisiert sind. Die Montageabteilungen müssen zur Bewältigung ihrer Aufgaben Ressourcen in Anspruch nehmen und bekommen den Zeitpreis in Rechnung gestellt. Daraus folgt, dass eine Montageabteilung ggf. die Ressource wählt, die die Aufgaben zum günstigsten Preis erfüllen kann. Die Dienstleistungsabteilung „Resource Sharing“ muss dafür sorgen, sowohl geeignete menschliche als auch technische Ressourcen anbieten zu können.

#### Bedarfsgerechte Einsatzplanung und Wiederinbetriebnahme

Ein Robot-Sharing-Konzept weist die Besonderheit auf, dass eine bedarfsgerechte Wiederinbetriebnahme und Einsatzplanung erforderlich sind. Die Wiederinbetriebnahme wird hierbei maßgeblich vom Operator ausgeführt. Der Operator bringt den Assistenzroboter an den geplanten Arbeitsort. Dort überprüft er, ob der Arbeitsplatz noch den Vorgaben der Erstinbetriebnahme entspricht, rüstet bei Bedarf den Arbeitsplatz um und schließt den Roboter an die Medienversorgung an. Anschließend startet er den Roboter und begleitet die ersten Arbeitsabläufe.

Erst dann beginnt die produktive Tätigkeit durch Assistenzroboter und Werker. Zwecks weitergehender Analysen werden die dabei anfallenden Maschinendaten des Assistenzroboters zunächst aufgezeichnet. Anhand dieser Daten können Rückschlüsse über die tatsächliche Nutzung des Assistenzroboters, aber auch über auftretende Störungen gezogen werden. Je nach Organisationsform werden diese Daten verwendet, um die Nutzungszeit des Roboters abzurechnen. Darüber hinaus bieten diese Informationen eine Grundlage, um über das Vorgehen zur Behebung etwaiger Störungen zu entscheiden. Leichte Störungen lassen sich ggf. vom Operator beheben – schwere Fehler hingegen erfordern den Austausch des Assistenzroboters.

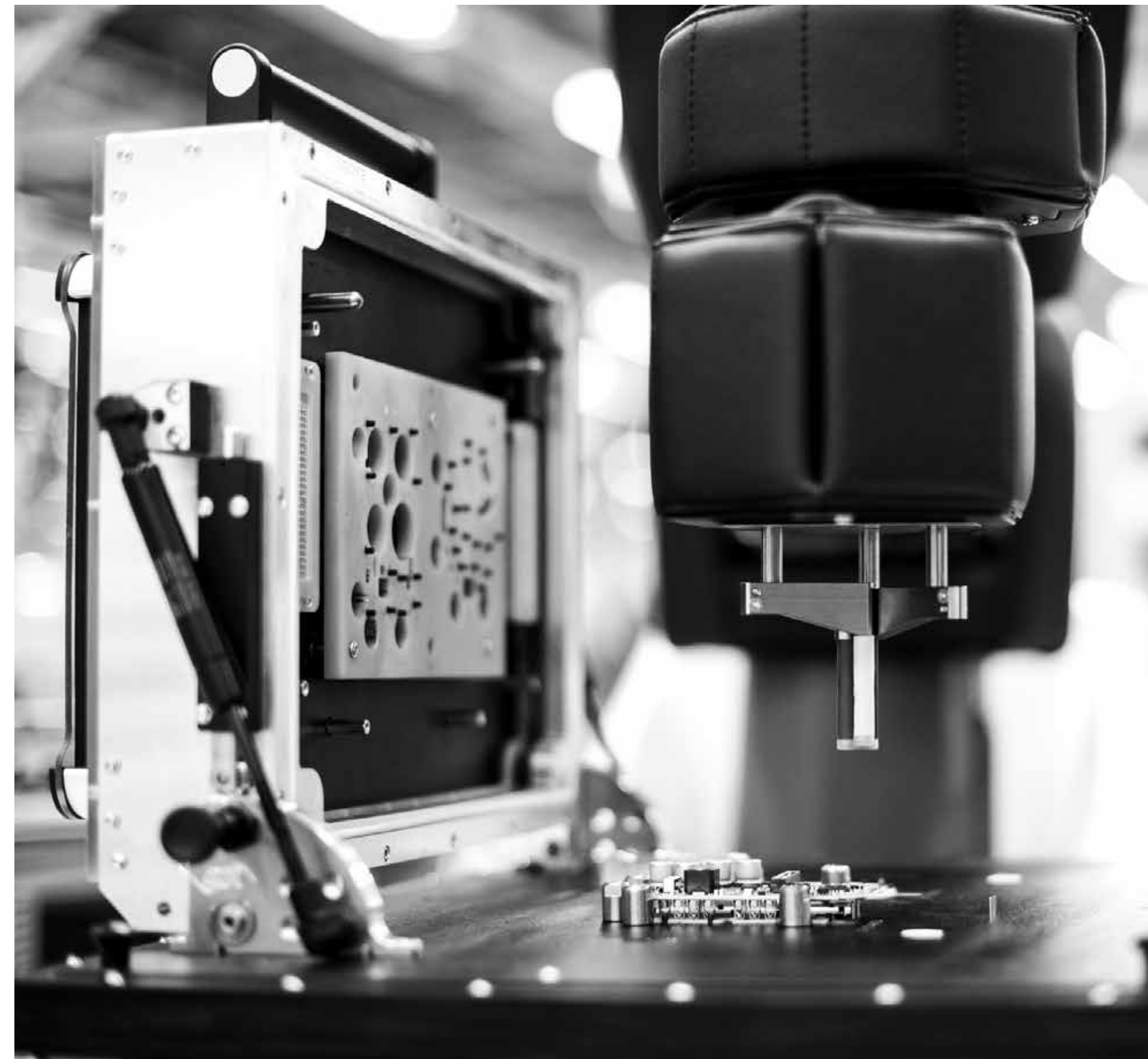
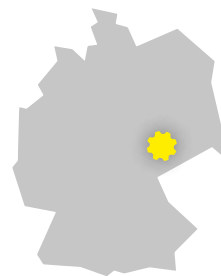


Bild 2: Nahaufnahme eines Assistenzroboters, Quelle: Festo AG & Co. KG





Projekt KUKoMo

# MENSCH-MASCHINE-KOMMUNIKATION FÜR RÄUMLICH FLEXIBLE ROBOTERPROZESSE

Dr. Ulrich Scharschmidt und Stefan Liebl (IGF Chemnitz mbH)

**Gestensteuerungen können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, den Umgang mit kollaborativen Montagesystemen insbesondere für KMU zu erleichtern. Dafür sind neue Lösungen zur Erweiterung der Schnittstellen der Robotersteuerung gefragt.**

Zentraler Engpass für den Einsatz von Industrierobotern bei KMU ist häufig die manuelle Programmierung. Sie erfordert einen erhöhten Personalaufwand und die fortlaufende programmtechnische Weiterqualifizierung der ausführenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. KMU können jedoch oft nicht das Personal mit einer derart hohen spezifischen Qualifikation bereithalten und daher die technische Betreuung der Roboter nicht im gewünschten Maße leisten. Darüber hinaus werden bei KMU i.d.R. stationäre sowie auch mobile Robotersysteme häufig als Insellösungen betrieben, die nicht über ein zentrales Leitsystem gesteuert werden. Daher sind Lösungen gefragt, die die spezifischen Anforderungen sowie auch die begrenzten Mittel von KMU berücksichtigen und die Technik für mittelständische Unternehmen insgesamt attraktiver und intuitiv handhabbar machen.

## Praxistaugliche Gestensteuerung zur freihändigen Interaktion

Für den Großteil der mittelständischen Anwendungen im Bereich der Robotersysteme müssen Lösungen entwickelt werden, die definierte und gleichzeitig einfach handhabbare menschliche Eingriffs- bzw. Einrichtungsmöglichkeiten bieten. Die Herausforderung liegt darin, über bisherige auditive, visuelle und sen-

sorische Signale hinaus eine objekt- und umgebungsgebundene praxis- und KMU-taugliche Gestensteuerung zu entwickeln. Durch eine solche Gestensteuerung wird eine berührungslose Mensch-Maschine-Interaktion für Personen im Industriefeld ermöglicht. Die KUKoMo-Projektpartner haben dazu eine entsprechende Lösung zur freihändigen Interaktion mit einem oder mehreren Industrierobotern entwickelt.

Ausgangspunkt waren Überlegungen, über welche Fähigkeiten die Gestensteuerung verfügen sollte. Als relevant wurden die folgenden Aspekte ausgewählt:

- Auswahl verschiedener Objekte
- Bedienung von Steuerungs- und Serviceprozessen mithilfe der ausgewählten Objekte
- Gestenerkennung mithilfe einer sogenannten Armbandlösung, die Hand- bzw. Armgesten detektieren kann

Um diese Anforderungen umzusetzen, mussten die Schnittstellen der Robotersteuerung erweitert werden. Die erweiterten Schnittstellen bilden die softwaretechnische Voraussetzung für eine objektübergreifende Mobilität sowie für die schnelle und sichere Nachverfolgung menschlicher Gesten. Die dazugehörigen Forschungsarbeiten konzentrierten sich darauf, eine objektübergreifende Schnittstelle zur Einrichtung, Musterkontrolle und Abstimmung von Montage- und mobilen Robotern zu entwickeln. Dabei waren Eingriffe in automatisierte Programmabläufe unter Nutzung spezieller Programmierfunktionen möglich.



Bild 1: Anwendungsszenario für die Gestensteuerung, Quelle: IGF Chemnitz mbH

## Integration der Gestensteuerung

Der erste Schritt bestand in der Analyse der Steuerungskonzepte für Robotersysteme. Diese Voruntersuchungen bezogen sich vor allem darauf, die Eignung von statischen und dynamischen Gesten zur Robotersteuerung zu prüfen. Deren Vor- und Nachteile wurden unter den im Projekt gegebenen Anforderungen bewertet und mögliche Schnittstellen zur Ansteuerung herausgearbeitet.

Ein weiteres Projektergebnis ist ein automatisiertes Fehlererkennungsmodell, mit dem sich etwaige Fehlerquellen frühzeitig erkennen und beheben lassen. Das Fehlermodell prüft, ob die aus der Gestensteuerung kommenden Befehle mit dem derzeit laufenden Programm des Roboters korrelieren und damit der Gestenbefehl richtig interpretiert und ausgeführt werden kann. Das Ziel besteht darin, mit der Geste vordefinierte Serviceprogramme in der Robotersteuerung zu starten. Serviceprogramme sind die Grundlage dafür, dass der Roboter bestimmte Funktionen ausführt.

Folgende Funktionen lassen sich über die neu entwickelten Schnittstellen mittels Gestensteuerung durch kollaborative Industrieroboter-Montagesysteme ausführen:

- Eingriff in die Bewegungsabläufe bei Einrichtungsprozessen zur Sortimentsumstellung,
- gezielte und bedarfsorientierte Unterbrechung der Bewegungsabläufe (z.B. für Qualitätskontrolle),
- laufende Kontrolle der automatisierten Abläufe,
- Werkzeug-Wechsel oder -Korrektur,
- Überwachung mehrerer Roboter im Einsatz (Ausführung von Nothandlungen) und
- Steuerung von mobilen Robotersystemen für Logistikprozesse.



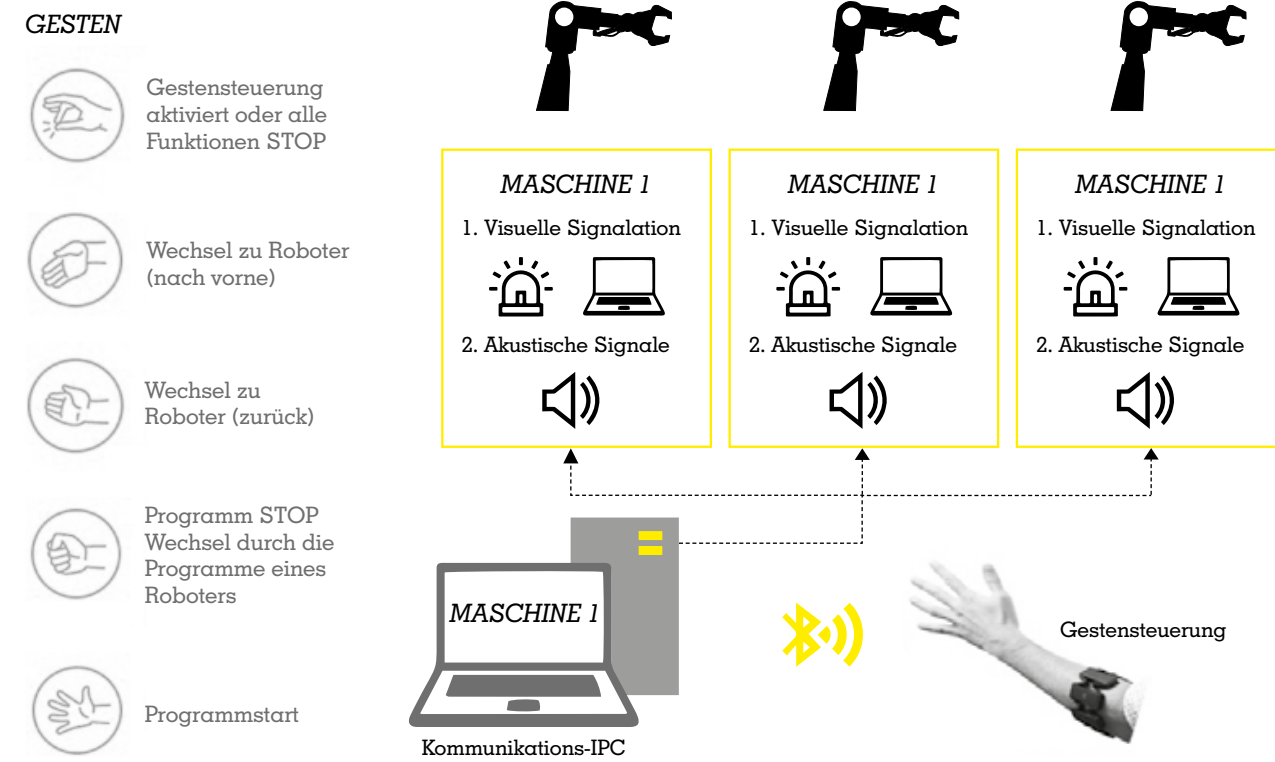


Bild 2: Kommunikationskonzept für Steuergesten, Quelle: IGF Chemnitz mbH



Bild 3: Anwenderszenario Mehrmaschinenbedienung/mobiler Roboter, Quelle: IGF Chemnitz mbH

### Optimierte Roboterprogrammierung

Durch die Integration der Gestensteuerung konnte der gesamte Prozess optimiert werden. Dazu wurden bestimmte programmtechnische Funktionen vereinfacht und intelligent gestaltet. Darüber hinaus ist es mithilfe der neuen Lösung möglich, notwendige manuelle Eingriffe in die programmierten Abläufe des Roboters vorzunehmen. Das objektübergreifende Konzept ermöglicht zudem eine Mehrmaschinenbedienung und nutzt die im Bild 2 dargestellten Steuergesten.

Die ausgewählten Gesten sollten möglichst logisch, einprägsam und zahlenmäßig begrenzt - im Projekt sind es vier Steuergesten - sein. Die Begrenzung ist im Sinne einer komfortableren Bedienung und Fehlervermeidung sinnvoll. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Handlungsfähigkeit einer jeden Maschine in einem komplexen System der Mehrmaschinenbedienung gewährleistet sein muss.

### Praxistest bestanden

Um die Praxistauglichkeit der KUKoMo-Gesteuerung zu überprüfen, wurden Tests an Fahrrobotern im Schulungs- und Anwendungszentrum (SchAz) des ICM e.V. (siehe Beitrag in Kapitel 6) durchgeführt. Die Testergebnisse belegen die Wirksamkeit der Gestensteuerung und lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- gewünschte Roboterreaktionen nach Gestenerkennung unter realen Bedingungen
- Erkennen und Unterdrücken bewusst falsch provozierten Gesten
- funktionierende Bluetooth-Verbindung im Industrieumfeld metallverarbeitender Betriebe mit einer Reichweite von ca. 30 Metern

Die erfolgreichen Tests führten dazu, dass das Unternehmen Beldrive Engineering GmbH die Gestensteuerung für die mobilen Robotersysteme im Anwendungszentrum des ICM e.V. umgesetzt hat. Sie sind zudem ein vielversprechendes Indiz dafür, dass durch eine gestenbasierte Steuerung eine einfache Handhabung von Roboterlösungen insbesondere für KMU möglich ist und dass sich eine Vielzahl von Steuerungs- und Serviceprozessen vereinfachen lässt.

# HUMAN FACTORS

## KAPITEL 5

Human Factors umfassen die menschlichen Einflussfaktoren in soziotechnischen Systemen. Hierbei steht die menschengerechte Arbeitsgestaltung von MRK im Vordergrund. In der Praxis spielen die Human Factors häufig eine der Technik und Wirtschaftlichkeit untergeordnete Rolle. Die folgenden Beiträge zeigen, dass es bei der Einführung von MRK darauf ankommt, die Aspekte Akzeptanz und Partizipation frühzeitig zu betrachten. Sie erhöhen die Motivation sowie die Veränderungs- und Entwicklungsbereitschaft der Mitarbeitenden und führen so wiederum zu einer hohen Leistungsbereitschaft, die sich in Produktivität und Wirtschaftlichkeit niederschlägt.

## HUMAN FACTORS IM RAHMEN DER NUTZUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

- 112** Wortwechsel
- 118** Mitarbeitende für MRK begeistern  
(SafeMate und ARIZ)
- 124** Nutzerorientierte Gestaltung und  
Integration von MRK am Praxisbeispiel  
(KUKoMo)
- 126** Betriebliche Mitbestimmung bei der  
Einführung von MRK-Systemen  
(KoMPI)





„Eine offene und transparente Kommunikation der Unternehmensstrategie führt zu mehr Akzeptanz.“



**TORSTEN ENDERS**

Geschäftsführer der Wärmetauscher Sachsen GmbH



**ALEXANDRA LINDHORST**

Betriebsrätin bei der Weidmüller Interface GmbH & Co. KG

„Innovationen entstehen in einem Umfeld, in dem Probieren erlaubt und Austausch erwünscht ist.“



**SIMON FRISCHEMEIER**

Head of Global Operations Digitization bei der LSG Lufthansa Service Holding AG

„Akzeptanz der Mitarbeitenden ist das A und O.“



# WORTWECHSEL

*Human Factors im Rahmen der Nutzung kollaborativer Montagesysteme*



## WIESO IST DIE AKZEPTANZ KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME WICHTIG?

**TORSTEN ENDERS**

In unserem KUKoMo-Projekt haben wir die für uns überraschende Erkenntnis gewonnen, dass der Gesamtaufwand für die Integration eines MRK-Systems zu einem Drittel auf die Entwicklung und zu zwei Dritteln auf dessen Integration in den bestehenden Fertigungsprozess entfällt. Das heißt, dass vor allem die Veränderungen in der Arbeitsorganisation eine große Herausforderung darstellen. Daher ist es besonders wichtig, die gesamte Belegschaft zu einer aktiven und konstruktiven Mitarbeit am MRK-Projekt zu motivieren. Schlussendlich sind es die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Fertigung, die mit der neuen Technologie umgehen müssen.

Die Wärmetauscher Sachsen GmbH stellt Wärmetauscher-Systeme für unterschiedlichste industrielle Anwendungen her.

**ALEXANDRA LINDHORST**

In Bezug auf die Einführung von Industrie-4.0-Technologien konnten wir in unserem Unternehmen bereits umfangreiche Erfahrungen sammeln. Daher wissen wir, dass der Einsatz einer neuen Technologie nur dann erfolgreich ist, wenn sie von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern akzeptiert wird. Deshalb ist es wichtig, die Belegschaft von Anfang an mit an Bord zu holen. Dies gilt insbesondere für die kollaborative Montage, bei der Mensch und Maschine direkt zusammenarbeiten. Die frühzeitige Einbindung derjenigen, die mit dem Roboter interagieren, ist nicht nur sinnvoll, um Berührungängste abzubauen. Sie gibt auch die Möglichkeit, Impulse und Ideen zur Gestaltung der MRK-Arbeitsabläufe sozusagen aus „erster Hand“ zu bekommen.

Die Weidmüller Interface GmbH & Co. KG bietet Produkte und Dienstleistungen im industriellen Umfeld von Energie, Signalen und Daten.

**SIMON FRISCHEMEIER**

MRK-Systeme werden zukünftig in immer mehr produzierenden Unternehmen eingesetzt. Mit zunehmender Marktdurchdringung entfallen aktuell bestehende Limitierungen und neue Technologien kommen hinzu. Die Programmierung wird einfacher und flexibler und insgesamt dürften die Preise für MRK-Systeme fallen. Daher ist die Akzeptanz dieser Technologien essenziell für deren erfolgreiche Einführung.

Die LSG Lufthansa Service Holding AG ist ein Tochterunternehmen der Deutschen Lufthansa AG und hat sich auf das Catering in der Luftfahrt spezialisiert.



## WELCHE ZIELGRUPPEN SOLLTEN IN DEN IMPLEMENTIERUNGSPROZESS EINGEBUNDEN WERDEN?

Es sollten alle Gruppen im Unternehmen - vom Management bis zum Werker - eingebunden sein. Aus technischer Sicht ist es zudem sinnvoll, auch die vor- und nachgelagerten Prozesse in das Projekt einzubeziehen. Durch den Einsatz der Robotertechnologie ergeben sich neue Anforderungen an Bauteilqualitäten, die insbesondere in der Arbeitsvorbereitung für die MRK-Applikation berücksichtigt werden müssen. So sind beispielsweise die vom Roboter akzeptierten Geometrietoleranzen bei unseren Anwendungen geringer als die in einer manuellen Montage.

Es ist in jedem Fall sinnvoll, größer zu denken. Wir empfehlen, auch das Fertigungspersonal einzubeziehen, das nicht unmittelbar in das MRK-Projekt involviert ist. Das sorgt für Transparenz, weil alle wissen, was passiert. Wir haben auch schon erlebt, dass es Einzelne dazu motiviert, sich Gedanken über das MRK-Potenzial ihres eigenen Arbeitsplatzes zu machen. Darüber hinaus sind natürlich die Forschungs- und Entwicklungsabteilung sowie das Management weitere wichtige Gruppen in einem MRK-Implementierungsprozess.

Unsere Erfahrungen zeigen, dass für die Einführung kollaborativer Montagesysteme die Akzeptanz durch alle von der neuen Technologie direkt oder indirekt betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eine zentrale Rolle spielt. Die Akzeptanz oder Nicht-Akzeptanz spiegelt sich im Verhalten der Mitarbeitenden gegenüber einer MRK-Anwendung wider - und ihr Verhalten bestimmt wiederum den Erfolg einer MRK-Anwendung. Um herauszufinden, wie man diese Akzeptanz schaffen kann, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Dabei sollten Antworten auf folgende Fragen gefunden werden: Welche Stellschrauben gibt es? Und wie kann man an diesen Stellschrauben drehen?



## WIE SCHAFFT MAN ES, DIE MITARBEITER OPTIMAL EINZUBINDEN? WELCHEN EINFLUSS HABEN DIE RAHMENBEDINGUNGEN DER BETRIEBLICHEN MITBESTIMMUNG AUF DIE AKZEPTANZ KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME?

Eine offene und transparente Kommunikation der Unternehmensstrategie führt zu mehr Akzeptanz - die Belegschaft soll verstehen, wieso und weshalb MRK überhaupt eingeführt werden soll. Um das zu erreichen, haben wir zahlreiche Workshops durchgeführt, in denen wir das MRK-Projekt erklärt sowie Fragen und Bedenken diskutiert haben. Wichtig ist es, schnell von der Theorie zur Praxis zu kommen. Wenn sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter praktisch mit MRK auseinandersetzen können - z.B. durch Probieren mit einem Demonstrator -, sind sie viel eher bereit, die Technologie anzunehmen. Letztendlich ist hierbei vor allem das Management gefragt, die für diesen Prozess notwendigen Ressourcen bereitzustellen bzw. entsprechende Freiräume zu schaffen.

Bei uns hat sich das Infopoint-Format als äußerst erfolgreich erwiesen. Dabei handelt es sich um Workshop-artige Veranstaltungen für die Fertigungsbelegschaft, in denen das Management und die Forschungs- und Entwicklungsabteilung neue Technologieprojekte erklären und Fragen beantworten. So kommen Bedenken, Ängste, aber auch Ideen und Anregungen frühzeitig auf den Tisch. Das Format wird nach einer gewissen Zeit wiederholt, um Ergebnisse zu reflektieren und offengebliebene Punkte zu klären. Der Betriebsrat als vertrauensbildende Instanz sollte den Integrationsprozess aktiv mitgestalten. Dieser Prozess läuft umso reibungsloser, je offener die Unternehmenskultur ist. Innovationen entstehen in einem Umfeld, in dem Probieren erlaubt und Austausch erwünscht ist.

Unsere aktuellen Aktivitäten zielen darauf ab, einen Demonstrator aufzubauen, mit dessen Hilfe die Mitarbeitenden gezielt informiert werden können. Ziel ist es, ihnen neue Technologien näherzubringen und einen offenen Umgang damit zu fördern. Ängste um den Arbeitsplatz oder um die eigene Gesundheit sollen ihnen genommen und somit die Akzeptanz gesteigert werden. Auch gilt es, dem Management die Möglichkeiten aufzuzeigen, die durch neue Technologien entstehen. Außerdem sollen die Grenzen der Technologien ausgetestet und neue Anwendungsfälle zusammen mit den Anwendern vor Ort identifiziert werden.



Prof. Dr.

**MARTINA ZIEFLE**

Leiterin des Lehrstuhls für Communication Science, Institut für Sprach- und Kommunikationswissenschaft und des Human-Computer Interaction Center der RWTH Aachen University

Das Human-Computer Interaction Center an der RWTH und der Lehrstuhl Communication Science (Leitung: Prof. Dr. phil. Martina Ziefle) beschäftigen sich mit Themen wie der Interaktion und Kommunikation von Mensch und Technik, der Risikowahrnehmung und der Technikakzeptanz.

## ! HUMAN FACTORS AUS SICHT DER WISSENSCHAFT

Akzeptanz ist bei jeder Einführung technischer Innovationen der zentrale „Stolperstein“ für den Erfolg. Studien haben gezeigt, dass die frühzeitige Auseinandersetzung mit den Veränderungen durch MRK in hohem Maße zielführend ist. Das bedeutet, dass man mit den Arbeitnehmern und den Führenden in einem Unternehmen gemeinsam erarbeitet, an welchen Stellen MRK sinnvoll ist, und dann gezielt den Transformationsprozess definiert und umsetzt. Entscheidend ist auch, dass man versteht, an welchen Stellen und warum die Beteiligten Akzeptanzschwierigkeiten haben, und gemeinsam überlegt, ob und wie man sie in den Griff kriegen kann. Akzeptanz kann nicht erzwungen werden, sie wird geschenkt. Akzeptanz lebt von Augenhöhe in der Information und der Kommunikation und ist dann zu erreichen, wenn die Innovation nachvollziehbar nützlich ist.

### Information und Transparenz für alle im Unternehmen

Letztendlich sollten alle Beteiligten in den Implementierungsprozess einbezogen werden, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß und in unterschiedlichen Rollen. Es gilt: Information und Transparenz für alle im Unternehmen. Entscheider und Arbeitnehmer sollten im Hinblick auf die zu erwartenden Vor- und Nachteile (ökonomisch, Effizienz, Sicherheit, Komfort) informiert werden, die sich durch die MRK ergeben. Zugleich sind Arbeitnehmer eine entscheidende Quelle für das Verständnis des Arbeitsprozesses (den sie am besten kennen) und die Ableitung der Transformationschritte.

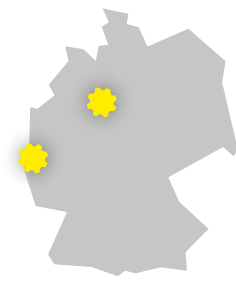
### Mit authentischer und offener Kommunikation die Transformation gestalten

Die Einbindung der Mitarbeiter gelingt nur mit einer transparenten Information und Kommunikationstrategie in allen Phasen des Einführungsprozesses. Je authentischer ein Unternehmen auf seine Mitarbeiter zugeht und je offener es ist für die Ideen, Wünsche, Bedürfnisse der Beteiligten, desto besser und effizienter wird die Transformation vor sich gehen können. Hier spielen die Rahmenbedingungen natürlich eine zentrale Rolle. Eine Top-down-Verordnung als Einführungsstrategie ist ineffizient – nicht nur, weil die Wahrscheinlichkeit für Reibungen erhöht wird, sondern auch, weil sie das Wissen der Arbeitnehmer und die Kreativität in der Transformation ignoriert. Je eher ein Unternehmen eine agile Transformation zulässt, desto höher ist deren Akzeptanz.

# „AKZEPTANZ KANN NICHT ERZWUNGEN WERDEN, SIE WIRD GESCHENKT“

Prof. Dr.  
Martina Ziefle





Projekte SafeMate und ARIZ

# MITARBEITENDE FÜR MRK BEGEISTERN

SafeMate: Dr. Angelika Trübswetter, Antonia Meißner, Mathias Jenny (YOUSE GmbH); Assem Oubari (Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik)

ARIZ: Simon Himmel (RWTH Aachen University, Human-Computer Interaction Center); Sarah Müller-Abdelrazeq (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau)

## Die konsequente Nutzerorientierung bei der Konzeption und Einführung kollaborativer Montagesysteme sorgt für einen reibungslosen Integrationsprozess.

Traditionell liegt bei der Betrachtung von Technikakzeptanz ein starker Fokus auf den Objektfaktoren, also den technischen Gestaltungsfaktoren. So auch bei einem der meistzitierten Modelle der Technikakzeptanz, dem Technology Acceptance Model (TAM; Fred D. Davis, 1989). Es identifiziert die wahrgenommene Nützlichkeit sowie die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung eines technischen Artefakts als Einflussfaktoren auf die Akzeptanz. Auf diesem validierten und in der Forschung weitverbreiteten Vorgehen baut das Projekt ARIZ auf. Das Projekt SafeMate arbeitet mit einem weiterführenden Ansatz, der über das TAM hinausgeht. Das hier zugrundeliegende Akzeptanzverständnis basiert auf dem Ansatz von Schäfer und Keppler (2013) und orientiert sich an drei Komponenten: Akzeptanzobjekt (technisches System), -subjekt (Mitarbeitende) sowie -kontext (organisationale Rahmenbedingungen). Mit diesem Ansatz greifen die SafeMate-Projektpartner den nicht freiwilligen Charakter der Techniknutzung im Kontext „Arbeitsplatz“ auf und legen damit die Annahme zugrunde, dass Organisationen soziotechnische Systeme darstellen, in denen technische Systeme nicht losgelöst vom organisatorisch-sozialen Kontext betrachtet werden können.

## DATENBASIS

Die Ergebnisse basieren auf qualitativen und quantitativen Studien. In SafeMate führten die Projektpartner 45 leitfadengestützte Interviews mit relevanten Akteuren aus den Anwenderunternehmen sowie eine Fragebogenstudie mit 253 Mitarbeitenden durch. In ARIZ erhielten 131 Personen einen szenariobasierten Fragebogen (der auf fünf richtungsgebenden Interviews basierte) und es wurde eine experimentelle Studie mit insgesamt 66 Teilnehmenden durchgeführt.

## Akzeptanzhemmnisse in Bezug auf Automatisierung und Industrie 4.0 (ARIZ)

Im Projekt ARIZ ließen sich anhand der qualitativen Erhebungen zunächst drei grundsätzliche Befürchtungen in Bezug auf die Automatisierung von Produktionsprozessen und die Kollaboration mit einem Roboter ausmachen: (I) Sicherheitsbedenken, (II) Angst vor Arbeitsplatzverlust und eine eher diffuse (III) Angst vor Robotern an sich. Die beiden Erstgenannten wurden von den Befragten als die beiden wichtigsten akzeptanzmindernden Faktoren angegeben. Die Arbeitsplatzsicherheit nannten sie allerdings als eine grundsätzliche Voraussetzung für jegliches arbeitsrelevantes Werkzeug: Mit der Implementierung einer neuen Technologie an einem Arbeitsplatz scheint vonseiten der Arbeitnehmer darauf vertraut zu werden, dass die Arbeitsplatzsicherheit gegeben ist, die wahrgenommene Verantwortlichkeit liegt hier also vollständig beim Arbeitgeber.

In Bezug auf die Erwartungen an die Roboter und mögliche Einflüsse der Robotik auf die Produktionsarbeit zeigte sich, dass die Wahrnehmung von Robotern tatsächlich eine andere ist als die von traditionellen Produktionsmaschinen. In Anlehnung an (III) bestehen hier gestalterische Möglichkeiten, um die Akzeptanz zu

beeinflussen. Die Aussagen der Befragten zeigen eine Priorisierung von vier Faktoren: (a) die Relevanz des MRK-Einsatzes für den eigenen Arbeitsplatz, (b) die wahrgenommene Nützlichkeit, (c) die wahrgenommene Kontrolle über die Technologie (den Roboter) und (d) die Hierarchie, also eine übergeordnete Stellung des menschlichen Arbeiters in Relation zum Roboter. Die meisten dieser Faktoren sind im klassischen TAM wiederzufinden.

## Individuelle Einstellungen zu MRK (ARIZ)

Auf Basis von Experteninterviews haben die ARIZ-Projektpartner Nutzergruppen bzw. Personas entwickelt (siehe Bild 1). Das Kernergebnis der Analyse der individuellen Voraussetzungen der Anwender von MRK ist, dass eine hohe Diversität in Alter und Qualifizierungsgrad herrscht, wie in den Produktionsabteilungen eines Projektpartners festgestellt werden konnte. Daraus lässt sich ableiten, dass für die Gestaltung der Arbeitsplätze, insbesondere in großen Unternehmen, die Berücksichtigung der Subjektfaktoren eine wesentliche Rolle spielt. Bezüglich MRK-Arbeitsplätzen wurde festgestellt, dass die Akzeptanzfaktoren weitestgehend allgemeingültig sind und insofern die individuellen Nutzereigenschaften und Bedürfnisse aus Unternehmensperspektive keine Hindernisse darstellen.

### Clemens Nowak

- 42 Jahre
- Sägewerksmeister
- Seit 15 Jahren im Unternehmen
- Begeistert von Technik und Robotern

„Ein Roboter ist nicht viel anders als die Maschinen, mit denen wir eh schon arbeiten – es würde eine große Hilfe für meine Mitarbeiter sein.“

Clemens arbeitet seit 15 Jahren im Unternehmen und hat vor ca. 5 Jahren die Leitung der Sägerei übernommen. Robotik ist auch in seiner Abteilung ein Thema, welches für ihn persönlich von besonderer Bedeutung ist. Die Arbeit in der Sägerei ist oft körperlich belastend und er kann sich gut vorstellen, dass Roboter eine Erleichterung für seine Mitarbeiter sein könnten. Besonders weil der Nachwuchs in der Sägerei immer schwerer zu finden ist und er einige ältere Mitarbeiter hat. Für Clemens gehören Roboter bei einer modernen Firma einfach dazu. Sie sind flexibler als die herkömmlichen Fertigungsmaschinen und würden ihm ermöglichen, sie immer dort einzusetzen, wo sie gerade gebraucht werden. Clemens stellt sich den Roboter der Zukunft als eine Art Assistent für seine Mitarbeiter vor, mit dem optimalerweise jeder unabhängig von seinen technischen Kenntnissen umgehen kann. Wichtig ist für ihn, dass der Roboter Arbeiter nicht ersetzt, sondern ihnen eine Hilfe ist. Das beinhaltet seiner Meinung nach, dass der Mensch hierarchisch über dem Roboter steht. Ansonsten sieht er die Gefahr, dass seine Mitarbeiter sich kontrolliert fühlen könnten oder ihr Arbeitstempo dem Roboter anpassen müssen.

Arbeitsbelastung: <mittel>  
Verantwortung: <hoch>

Sicherheitsbedürfnis:

Lernbedürfnis:

Technikaffinität:

Innovationsfreude:

### Gisela Schmidt

- 47 Jahre
- Mitarbeiterin Montage
- Quereinsteigerin nach langer Kindererziehungspause
- Seit 10 Jahren im Unternehmen

„Wenn der Roboter mich ersetzt, finde ich bestimmt keinen neuen Job mehr.“

Nachdem Gisela lange Zeit nicht mehr gearbeitet hat, fing sie als Teilzeitarbeiterin in der Montage an. Die Einarbeitung verlief schnell und die derzeitige Arbeit empfindet sie als leicht, wenn auch teilweise etwas monoton. Vor Kurzem wurde für ihre Abteilung ein Roboter angeschafft, der den Mitarbeitern bei der Montage helfen soll. Gisela empfindet den Roboter ein wenig als Konkurrenz. Wenn sie sich nach einer so langen Arbeitspause rasch einarbeiten konnte, dann ist ihr Job bestimmt auch komplett durch einen Roboter zu ersetzen. Sorgen bereitet ihr auch, dass Firmen in Zukunft wahrscheinlicher einen Roboter anschaffen als sich die Mühe zu machen, ältere Mitarbeiter neu anzulernen. Auch ist sie ein wenig skeptisch, mit dem Roboter zu interagieren. Ähnlich wie bei ihrem PC zu Hause ruft sie lieber jemand jüngeren, um ihr die Bedienung zu zeigen, als aus Versehen etwas kaputt zu machen. Generell braucht sie oft ein bisschen länger, um mit neuen Technologien umgehen zu können. Sie würde sich wünschen, dass es ihr langsamer erklärt wird.

Arbeitsbelastung: <mittel>  
Verantwortung: <gering>

Sicherheitsbedürfnis:

Lernbedürfnis:

Technikaffinität:

Innovationsfreude:

### Sabine Dahmen

- 26 Jahre
- Montagemitarbeiterin
- Gelernte Frisörin
- Seit 3 Jahren im Unternehmen

„Mehr Abwechslung in meinem Job wäre schön.“

Sabine hat erst vor drei Jahren als Quereinsteigerin in der Montageabteilung angefangen. Ihre Ausbildung hat sie als Frisörin gemacht. Sabines tägliche Aufgaben bestehen aus dem Bestücken und Einstücken der Maschinen in der Montageabteilung. Hin und wieder rotiert sie auch zur Kontrolle der erstellten Teile. Der Einführung eines Roboters sieht sie gelassen entgegen. Sie hofft, dass ihre Arbeit dadurch weniger monoton wird und sie sich vielleicht auf eine höhere Position qualifizieren kann. An eine Zukunft mit menschenleeren Fabriken glaubt sie nicht. Auch wenn Sabine erst seit ihrem Job in der Montage angefangen hat, sich etwas für Technik zu interessieren, macht sie sich keine Sorgen, dass sie mit der Bedienung von einem Roboter überfordert sein könnte. Bisher ist sie mit neuen Technologien immer recht schnell klar gekommen, schließlich ist sie mit Handys und Computern aufgewachsen.

Arbeitsbelastung: <mittel>  
Verantwortung: <gering>

Sicherheitsbedürfnis:

Lernbedürfnis:

Technikaffinität:

Innovationsfreude:

### Jürgen Conrad

- 52 Jahre
- Mitarbeiter in der Sägerei
- Fachkraft für Metalltechnik
- Seit über 20 Jahren im Unternehmen
- Arbeitet gerne handwerklich

„Es geht manchmal einfach schneller, wenn ich die Arbeit eben selber mache.“

Jürgen arbeitet seit seiner Ausbildung in der Sägerei. Seit einiger Zeit ist das Thema Robotik und Vollautomatisierung auch in seiner Abteilung ein Thema. Während gegen die physische Belastung an seinem Arbeitsplatz schon einiges getan wurde und die Abteilung bereits hochmodern ausgestattet ist, hatte er bislang keinen Kontakt zu Robotern. Er ist momentan noch skeptisch, was die Einführung von Robotern betrifft. Da er schon viele Jahre im Unternehmen ist und die Arbeitsabläufe in- und auswendig kennt, sorgt ihn der Gedanke, wie sich seine Arbeit in Zukunft verändern wird. Er fragt sich, ob er zukünftig mehr Aufgaben bekommt oder ganz im Gegenteil seine Arbeit eventuell so leicht wird, dass er ganz ersetzt werden kann. Generell ist er technikaffin und repariert zu Hause alles lieber selber, als einen Handwerker zu bestellen. Mit Programmierung kennt er sich allerdings nicht aus und hat Sorge, dass er die neuen Roboter nicht bedienen kann. Er kann sich vorstellen, dass er es als leichter empfindet, die Aufgaben selber zu erledigen, als umständlich einen Roboter zu programmieren. Auf der anderen Seite würde er eine körperliche Entlastung begrüßen, da ihm das Tragen schwerer Gegenstände nicht leichtfällt.

Arbeitsbelastung: <mittel>  
Verantwortung: <gering>

Sicherheitsbedürfnis:

Lernbedürfnis:

Technikaffinität:

Innovationsfreude:

Bild 1: Personas im ARIZ-Projekt – individuelle Nutzerfaktoren für MRK-Mitarbeiter

## Validierung der Akzeptanzfaktoren mittels Technik-Akzeptanz-Modell (ARIZ)

Die Ergebnisse der Interviewstudie weisen darauf hin, dass viele der Faktoren des klassischen TAM bei der anwenderseitigen Adaption von MRK-Systemen eine entscheidende Rolle spielen. Die szenariobasierte Fragebogenstudie zielte darauf ab, das TAM-Modell um die qualitativ ermittelten Faktoren zu erweitern, den Einfluss der Faktoren auf die MRK-Akzeptanz zu validieren sowie mögliche Einstellungsunterschiede zwischen Nutzergruppen zu identifizieren. Bei der Betrachtung der Kernergebnisse zeigt sich, dass insbesondere zwei Faktoren für die positive Bewertung von MRK-Arbeitsplätzen eine Rolle spielen:

### Ergebnisqualität verbessern/Nützlichkeit

Insbesondere Personen mit Roboter- und/oder Industrieerfahrung – nicht jedoch die Kontrollgruppe ohne jedweden Bezug zur Industrie – bewerten ein MRK-Szenario dann besser, wenn sie davon überzeugt sind, dass sich durch die neue Technologie auch die Ergebnisqualität verbessert und – gemäß dem TAM-Modell – dadurch auch die wahrgenommene Nützlichkeit steigt. Eine Steigerung der Effektivität und Effizienz sollte also auch aus Perspektive der Mitarbeitenden oberstes Ziel bei der Einführung von Robotern am Arbeitsplatz sein.

### Spaßfaktor berücksichtigen!

Das empfundene Vergnügen bei der Nutzung kollaborativer Montagesysteme zählt zu den ausschlaggebendsten Bedingungen für die Akzeptanz. Daher sollte dieser Faktor bei der Gestaltung und dem Design eines kollaborativen Roboters unbedingt berücksichtigt werden. Dieses Ergebnis ist für alle Probanden gültig und gleichermaßen wichtig für Menschen mit und ohne Roboter- oder Industrieerfahrung. Wenn der Roboter so entworfen ist, dass der Nutzer Freude während der Arbeit mit dem Roboter erfährt, ist eine grundlegende Voraussetzung für die Akzeptanz kollaborativer Robotik in der Industrie erfüllt. Diese Erkenntnis aus der quantitativen Studie widerspricht Aussagen aus den Experteninterviews, wonach kollaborative Roboter lediglich als ein Werkzeug angesehen werden – einen besonderen Spaßfaktor bei der Nutzung hatten die Teilnehmenden der qualitativen Umfragen nicht erwartet.

### Grundsätzliche Einstellung gegenüber MRK (SafeMate)

Im Hinblick auf die Gestaltung einer akzeptanzförderlichen Implementierung von MRK ist es hilfreich, die vorherrschenden Einstellungen der Mitarbeitenden näher zu beschreiben und zugänglich zu machen. Die Ergebnisse der Interviews im Projekt SafeMate erlauben es, die Mitarbeitenden in der Produktion bezüglich ihrer grundsätzlichen Einstellungen und Akzeptanz von MRK zu kategorisieren. Folgende drei Gruppen haben sich dabei ergeben:

- **Die Optimisten** freuen sich auf die Einführung von MRK in ihrem Unternehmen. Sie sehen den Mehrwert von MRK darin, dass ihnen der Roboter körperlich belastende und monotone Arbeiten abnimmt.
- **Die Unentschlossenen** sind gegenüber der Einführung von MRK indifferent eingestellt. Sie sehen durchaus die Vorteile dieser technischen Neuerung, wie ergonomische Verbesserungen und Arbeitserleichterung, fühlen sich aber auch teilweise durch die Technik bedroht.
- **Die Pessimisten** sind gegenüber der Einführung von MRK negativ eingestellt. Dieser Einstellung liegt oftmals die Angst vor Arbeitsplatzverlust zugrunde, aber auch fehlendes Wissen oder Kommunikation über die Bedeutung der Einführung von MRK spielen eine Rolle.

Über alle beteiligten Anwenderunternehmen hinweg zeigte sich, dass 25 Prozent der Befragten den Pessimisten, 50 Prozent den Unentschlossenen und 25 Prozent den Optimisten zuzuordnen sind. Diese Ausgangssituation birgt großes Potenzial, da die Mitarbeitenden MRK nicht generell ablehnen. Gelingt es, die Unentschlossenen für MRK einzunehmen, indem man ihre Bedürfnisse besonders berücksichtigt, ist ein wichtiger Schritt in Richtung Akzeptanz gegangen.

### Qualitatives Akzeptanzmodell (SafeMate)

Basierend auf den Befragungen der Mitarbeitenden in den Anwenderunternehmen wurde im Projekt SafeMate ein qualitatives Akzeptanzmodell entwickelt, das spezifische Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von MRK aus Sicht der Mitarbeitenden identifiziert. Mitarbeitende verbinden mit der Einführung von MRK sowohl verschiedene Hoffnungen (z.B. physische Entlastung, persönliche Weiterentwicklung) als auch Ängste (z.B. höhere Arbeitsanforderungen, potenzieller Arbeitsplatzverlust) und nehmen MRK dementsprechend als Chance oder Bedrohung wahr. Diese Wahrnehmung wird durch verschiedene äußere Faktoren beeinflusst, die sich in Objekt-, Subjekt- und Kontextfaktoren gruppieren lassen. Die Komplexität dieser Einflussfaktoren verdeutlicht Bild 2.

**Die Objektfaktoren** beziehen sich auf die **Gestaltung des MRK-Systems**. Grundvoraussetzung für die Akzeptanz von MRK sind Sicherheit und Prozessstabilität. Weitere zentrale Faktoren sind die Kontrollierbarkeit des Systems und ein selbstbestimmter Arbeitsfluss. Auch die Anpassbarkeit an den Menschen (z.B. in ergonomischer Hinsicht), an die Aufgabe sowie die Umgebung werden als wichtig angesehen.

**Die Subjektfaktoren** beziehen sich auf die **individuellen Voraussetzungen der Mitarbeitenden**. Hierzu gehören einerseits Persönlichkeitsmerkmale und individuelle Wertvorstellungen, aber auch Wissen und persönliche Erfahrungen – nicht nur in Bezug auf Technik und MRK, sondern auch in Bezug auf das

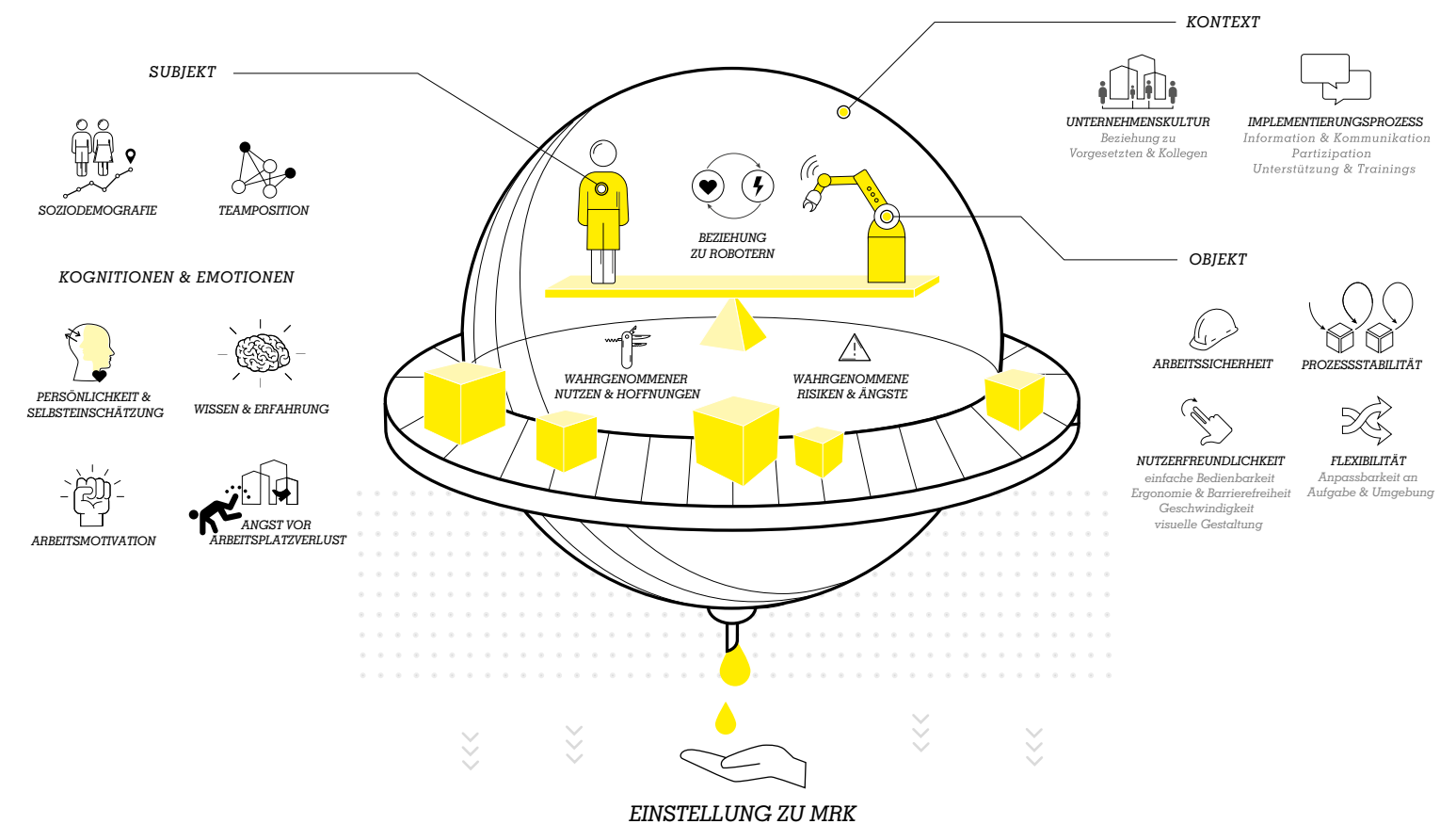


Bild 2: Qualitatives Akzeptanzmodell mit Subjekt-, Objekt- und Kontextfaktoren (Projekt SafeMate, YOUSE GmbH)

Unternehmen selbst. Auch die Selbsteinschätzung, wie die Implementierung von MRK bewältigt wird, die Einstellung zu Robotern und die Einstellung zur Arbeit allgemein sind Faktoren, die für die Akzeptanz von MRK eine Rolle spielen.

**Die Kontextfaktoren** beziehen sich auf die **organisationalen Rahmenbedingungen**. Hierzu zählt das soziale Netzwerk innerhalb des Unternehmens, d.h. die Beziehung der Mitarbeitenden zum Team, aber auch zu anderen Abteilungen, insbesondere zu den Vorgesetzten. Diese werden stark durch die Unternehmenskultur geprägt. Neben diesen langfristigen Faktoren spielt auch die Gestaltung des Implementierungsprozesses des MRK-Systems eine Rolle. Wichtig sind hierbei besonders Kommunikation und Partizipation.

### Validierung der Akzeptanzfaktoren aus dem qualitativen Modell (SafeMate)

Da das qualitative Akzeptanzmodell keine generalisierbaren Aussagen zulässt, wurde in der quantitativen Fragebogenstudie die Relevanz der Faktoren aus dem qualitativen Akzeptanzmodell statistisch überprüft. Basierend auf den Interviewergebnissen kam ein validierter Fragebogen zum Einsatz. Die Kernergebnisse der multiplen Regression sind:

- **Stereotype über Bord werfen!** Unveränderliche, personenbezogene Faktoren (Subjekt) – wie Alter, Geschlecht oder Technikkompetenz – sind nicht oder nur marginal entscheidend für die Zustimmung zu MRK. Dieses Ergebnis sollte Unternehmen dazu ermutigen, die weitverbreitete stereotype Vorstellung abzulegen, wonach alte Mitarbeitende nicht technikkompetent seien und sowieso nichts von Technik wissen wollten.
- **Nutzen von MRK aufzeigen!** Den statistisch größten Effekt auf die Akzeptanz von MRK hat die wahrgenommene Nützlichkeit für die Mitarbeitenden. Es gilt also sicherzustellen, dass die Einführung der Technologie tatsächlich einen konkreten Nutzen für die Mitarbeitenden hat. Daher nimmt die Auswahl zukünftiger MRK-Arbeitsplätze einen wichtigen Stellenwert ein. Abhilfe schafft hierbei das in Kapitel 4 beschriebene Vorgehen zur Potenzialanalyse von MRK-Anwendungen.
- **Kontext einbeziehen – Unternehmenskultur im Blick haben!** Kontextbezogene Faktoren, wie die wahrgenommene Partizipation, die wahrgenommene Unterstützung und Kommunikation, aber auch die Angst davor, den Arbeitsplatz zu verlieren, haben einen bedeutsamen Effekt auf die Akzeptanz von MRK.



## Erhöhung der Akzeptanz durch Erstkontakt (ARIZ)

Um die Auswirkungen der (erstmaligen) Benutzung eines kollaborativen Montagesystems zu untersuchen, wurde die Einstellung des Nutzers vor und nach einem kollaborativen Montagevorgang dokumentiert und verglichen. Während die Einstellung vor einer realen Begegnung mit Robotern auf Erwartungen basiert, die z.B. durch Medien oder das soziale Umfeld geprägt sein können, basiert die Einstellung nach einer Interaktion auf eigenen Erfahrungen.

Der quantitative Vorher-Nachher-Vergleich der Einstellung zeigte, dass die allgemeine Einstellung gegenüber MRK nach der Interaktion positiver war als vorher. Dies war erst mal unabhängig davon, ob der Roboter fehlerfrei agierte und ob es eine Taktung gab oder nicht. Diese positive Einstellung wurde durch das erwartungskonforme, also fehlerfreie, Agieren des Roboters, das zusätzlich von vorhersehbaren Bewegungen gefördert wird, durch einen hohen wahrgenommenen Nutzen und eine wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit weiter gefördert. Zudem ließ sich nach dem Abschluss des Versuchs feststellen, dass die Angst vor einem Arbeitsplatzverlust teilweise geringer war.

Die Auswertung der qualitativen Aussagen zeigte, dass Erfolgsfaktoren bei der Arbeit mit MRK in einer ansprechenden Instruktion, einer passenden Arbeitsplatzgestaltung und einer guten Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter liegen. Positiven Einfluss haben zudem eine kurze Anlernphase, ein wahrgenommenes Vergnügen in der Interaktion, Erfolgserlebnisse sowie ein intrinsisches Interesse der Anwender. Die akzeptanzförderlichsten objektbezogenen Faktoren aufseiten des Roboters sind eine hohe Benutzerfreundlichkeit und vorhersehbare Bewegungen. Akzeptanzmindernd bei MRK wirkt es sich aus, wenn die Interaktion als stressig wahrgenommen wird (z.B. durch Zeitdruck), die Instruktionen und die Kommunikation mit dem Roboter nicht einwandfrei sind, der Roboter häufig Fehler macht und der Anwender nicht genug Training vor der Arbeit mit dem Roboter bekommt. Ein einschüchterndes Design kann ebenfalls zu Akzeptanzhemmnissen führen.

Trotz einer bereits zufriedenstellend positiven Grundeinstellung zu MRK konnte das Experiment zeigen, dass eigene Erfahrungen zumindest kurzfristig zu einer weiteren Steigerung der Akzeptanz führen. Durch eine stressfreie und gestalterisch durchdachte Arbeitsumgebung und -abläufe kann dieser positive Trend verstärkt werden. Unerlässlich ist es dabei, dass den Mitarbeitenden der Mehrwert des Roboters bewusst ist.

### Die Erfahrungen von anderen Unternehmen einbeziehen!

Die Sensibilisierung für MRK-Systeme kann bereits vor der Einführung gefördert werden, indem Mitarbeitende aus anderen Unternehmen, die bereits über die Einführungsphase hinaus sind, über ihre Erfahrungen in der Anwendung berichten.

Vor allem die unentschlossenen Mitarbeitenden könnten durch die Erfahrungen anderer für MRK sensibilisiert werden.

### Verbesserung der Ergebnisqualität gewährleisten!

Wie im ARIZ-Projekt hat sich auch im SafeMate-Projekt gezeigt, dass – bezogen auf die Gesamtstichprobe – die Ergebnisqualität beim Einsatz von MRK eine wesentliche, wenngleich der Spaß-Komponente untergeordnete Rolle spielt. Je mehr Industrieerfahrung die Mitarbeitenden haben, desto wichtiger ist der Qualitätsfaktor.

## Akzeptanz aus Sicht der Entscheider (SafeMate)

Entscheidungsträger in produzierenden Unternehmen betrachten die Kollaboration zwischen Mensch und Roboter als zukunfts-trächtige Technologie mit hohem Potenzial. Diese ist in der Lage, einer Vielzahl aktuell vorherrschender Herausforderungen, wie physisch belastenden Tätigkeiten, sich verändernden Bedürfnisse der alternden Belegschaft oder dem generellen Mangel an Fachkräften, zu begegnen.

Die Mehrheit der Entscheidungsträger legt der Einführung oder dem Betrieb von MRK-Systemen nicht nur ein Motiv zugrunde. Vielmehr bewegen sich die Motive im Spannungsfeld zwischen Ergonomie und Ökonomie. Entgegen der weitverbreiteten Ansicht haben das Interesse an MRK und die Motivation zu deren rascher Umsetzung oftmals nicht ausschließlich ökonomische Gründe.

Vielen unternehmerischen Entscheidungsträgern ist dabei durchaus bewusst, dass ein rein technokratischer Implementierungsansatz nicht zielführend sein kann. Gleichzeitig scheint es jedoch eine Herausforderung zu sein, diese Erkenntnis in der Praxis umzusetzen.

## Strategien für die Umsetzung (SafeMate)

Organisationen sind soziotechnische Systeme: Die Implementierung von Technik kann nicht losgelöst vom Organisationskontext betrachtet, sondern muss als Veränderungsprozess verstanden werden. Diesen wiederum gilt es von Unternehmensseite verantwortungsvoll und aktiv zu gestalten. Der vom Projektpartner YOUSE GmbH (YOUSE) entwickelte User-centred-Change-Ansatz (UCC) versteht sich als menschenzentrierte, partizipative Vorgehensweise, der Akzeptanz für die Technologie und den Veränderungsprozess gleichermaßen schafft. Anstatt eines reinen Top-down-Ansatzes forciert UCC eine bottom-up-geleitete, iterative Herangehensweise, die Betroffene zu Beteiligten im Veränderungsprozess macht und durch schnelle Evaluationszyklen gekennzeichnet ist. Dabei baut UCC auf den SafeMate-Forschungsergebnissen sowie auf Erkenntnissen und Methoden aus dem Design und dem partizipativen Change-Management auf.

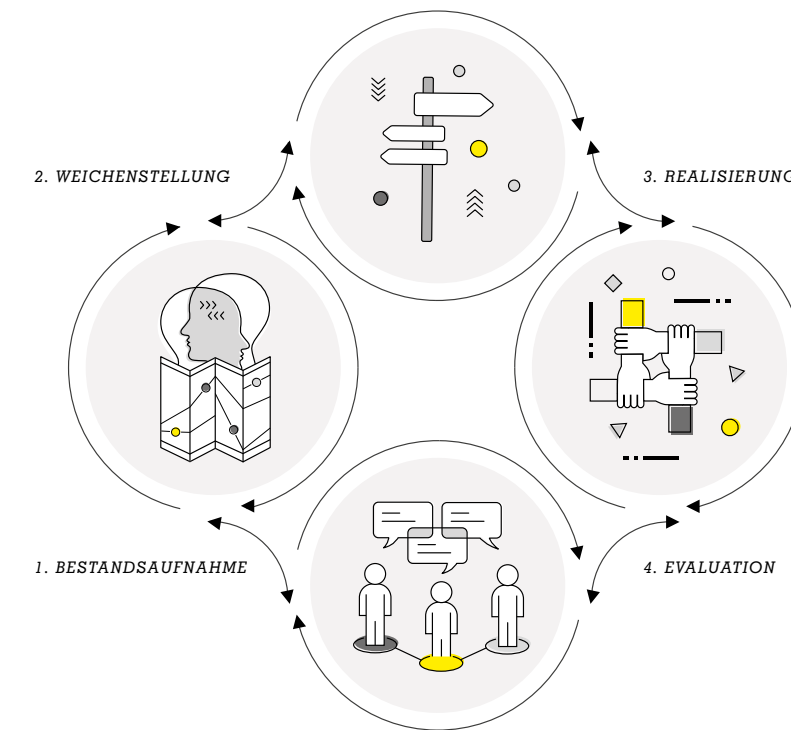


Bild 3: User-centred-Change-Ansatz zur akzeptanzförderlichen Implementierung von MRK (Projekt SafeMate, YOUSE GmbH)

- **Bestandsaufnahme:** umfassende Analyse des Status quo, sowohl auf objekt- als auch auf subjekt- und kontextbezogener Ebene, also Potenzialcheck infrage kommender Arbeitsplätze sowie Erfassung von Wissen und Einstellungen der Beteiligten, um potenzielle Konflikte im Unternehmen offenzulegen und vorhandene Stereotype sichtbar zu machen. Durch die Bestandsaufnahme wird die Komplexität der subjekt-, objekt- und kontextbezogenen Faktoren erfasst sowie ein aktuelles und realistisches Bild der Organisation aufgezeigt.
- **Weichenstellung:** Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses für die Umstrukturierung sowie einer gemeinsamen Vision zu deren Ausgestaltung. Neben der Entwicklung des technologischen Konzepts auf Objektebene gilt es, auf Subjekt- und Kontextebene eine Roadmap für die Beteiligung der Akteure zu gestalten, d.h., den individuell passenden Weg für die Transformationsaktivitäten zu identifizieren.
- **Realisierung:** Gestaltung und Durchführung der Umstrukturierung. Auf Objektebene wird die akzeptanzförderliche Implementierung der Technologie adressiert. Auf Subjekt- bzw. Kontextebene geht es um die Umsetzung der in der Weichenstellung erstellten Roadmap zur Begleitung des Veränderungsprozesses. Bei der Technikimplementierung spielt das Fortbestehen partizipativer Elemente eine entscheidende Rolle: Stetige Partizipationselemente stellen sicher, dass die Implementierung gemäß den Anforderungen des Arbeitsplatzes und den Bedarfen der Mitarbeitenden erfolgt.
- **Evaluation:** kontinuierliche Evaluation der getroffenen Maßnahmen, um den angestoßenen Veränderungsprozess und dessen Wirkung bewerten zu können. Geeignete Evaluationsmaßnahmen sind nötig, um die Technik an die

unternehmensinternen Besonderheiten anzupassen und so ihre Akzeptanz sicherstellen zu können. Gleichzeitig müssen aber auch organisatorische Abläufe und partizipative Prozesse auf ihre Effektivität geprüft werden. Engmaschige Evaluationszyklen sind sinnvoll, um Prozesse und Strukturen rechtzeitig und zielgerichtet anpassen zu können.

## Fazit

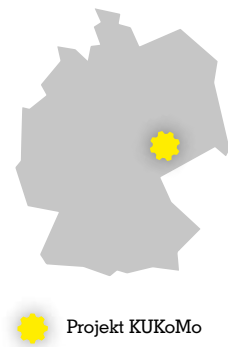
Die Ergebnisse aus ARIZ zeigen, dass in der Produktion keine generelle Ablehnung der Mitarbeitenden bezüglich MRK besteht. Eine grundsätzliche Akzeptanz für MRK-Arbeitsplätze ist gegeben, sofern den Mitarbeitenden offen und transparent versichert wird, dass mit der Einführung von Robotern im Unternehmen nicht ihre Anstellung in Gefahr ist und die Einführung einen Nutzen mit sich bringt. Die Sicherheit muss hierbei natürlich gewährleistet sein, allerdings ist das Vertrauen in den Arbeitgeber bereits hoch. Können diese Sorgen ausgeklammert werden, stellen sich die Mitarbeitenden die Zusammenarbeit mit einem Roboter weitestgehend positiv vor, insbesondere wenn sich dadurch der Spaß an der Arbeit und die Ergebnisqualität erhöhen. Diese Faktoren sollten also bei der Implementierung von MRK-Arbeitsplätzen dringend berücksichtigt werden. Diese Ausgangslage gilt es, aktiv zu nutzen und zu gestalten. Experimentell ließ sich darüber hinaus zeigen, dass sich Erfahrungen mit MRK grundsätzlich positiv auswirken. Dies hat breite Implikationen für Trainings- und Sensibilisierungsmaßnahmen.

Die SafeMate-Ergebnisse erweitern die Erkenntnisse aus dem Projekt ARIZ dahingehend, dass sie auch dafür sensibilisieren, dass neben dem technischen System selbst auch der mit der Implementierung verbundene Veränderungsprozess im Unternehmen akzeptiert werden muss. Damit liegt die Akzeptanz der Anwender durchaus auch in den Händen des Unternehmens. Kontextfaktoren, die sich von den organisatorischen Rahmenbedingungen und der Unternehmenskultur ableiten (z.B. gelungene Unternehmenskommunikation und das Schaffen von Partizipationsmöglichkeiten), sind wichtige Quellen für Akzeptanz und können von Unternehmen gestaltet werden. Hier stellt der von YOUSE entwickelte UCC-Ansatz, der Akzeptanz für die Technologie und den Veränderungsprozess gleichermaßen schafft, eine förderliche Strategie dar.

Literatur:  
Davis, F. D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. In: MIS Quarterly 13(3), pp. 319-340.

Schäfer, M.; Keppler, D. (2013): Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung. Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen.





Projekt KUKoMo

# NUTZERORIENTIERTE GESTALTUNG UND INTEGRATION VON MRK AM PRAXISBEISPIEL

Dr. Astrid Oehme, Prof. Dr. Thomas Jürgensohn, Sandra Böhm, Vaishnavi Upadrasta (HFC Human-Factors-Consult GmbH); Manuela Göbel, Manuela Blechschmidt (Neustädter Gardinenkonfektion GmbH)

## Die konsequente Nutzerorientierung bei der Konzeption und Einführung kollaborativer Montagesysteme sorgt für einen reibungslosen Integrationsprozess.

Damit die MRK-Einführung erfolgreich verläuft, müssen sich Unternehmen frühzeitig mit der Gestaltung des Arbeitsplatzes und der -abläufe beschäftigen. Insbesondere der Einsatz partizipativer Entwicklungsmethoden (siehe Moser, 2012; Unger & Chandler, 2012) hat sich dabei bewährt. Im Projekt KUKoMo haben sich die Projektpartner (KUKoMo Steckbrief) an einem Prozess orientiert, der diese etablierten Konzepte berücksichtigt. Der Prozess besteht aus Entwicklungsabschnitten, die durch Unternehmen erarbeitet werden, und Arbeitsschritten, mit denen sich ein Entwicklungs- oder Umsetzungsdienstleister beschäftigt. Bei der Planung, Entwicklung und Einführung arbeiten Unternehmen und Entwickler eng zusammen, z.B. bei der Übergabe der Nutzeranforderungen und bei der Evaluation der Umsetzungsergebnisse (siehe Bild 1). Eine Begleitung des Prozesses durch Experten im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion ist empfehlenswert.

Am Beginn des Entwicklungsprozesses steht immer eine Idee für ein Produkt oder ein neues Betriebskonzept, wie z.B. die MRK-Einführung. Im KUKoMo-Anwendungsfall wurde sowohl das robotische Montagesystem neu eingeführt als auch eine echte Zusammenarbeit zwischen Roboter und Mensch etabliert. Die beteiligten Projektpartner (siehe Steckbrief Projekt KUKoMo) haben dabei je nach betrieblichen Anforderungen eine unterschiedliche Vision bzgl. des Einsatzes der robotischen Unterstützung entwickelt.

## MRK-konkret: Einsatz in der Textilproduktion

Für den Projektpartner Neustädter Gardinenkonfektion GmbH (NeuGa) war es wichtig, durch den Roboter eine körperliche Entlastung und verbesserte Ergonomie speziell für die Übernahme des Bügelprozesses zu erreichen. Roboter und Mitarbeiterin sollten dabei in Kollaboration arbeiten, indem Aufgaben von beiden Partnern gemeinsam erledigt werden. Die Idee war, dass der Roboter die körperlich schwere Tätigkeit des Bügeleisens auf dem Stoff übernimmt, während die Mitarbeiterin diesen Vorgang steuert und kontrolliert. Die Mitarbeiterin legt den Stoff auf und faltet ihn nach dem Bügelprozess zusammen. Da diese Vision bereits stark auf eine Entlastung der Mitarbeiterinnen abzielte, waren auch die Bedenken zum Einsatz eines Roboters und damit verbundene Ängste vor einem Arbeitsplatzverlust eher gering.

Ist eine Vision wie diese skizziert, werden Details der Umsetzung in der Phase der Planung erarbeitet. Dabei spielt die sogenannte Nutzerforschung eine wichtige Rolle. Zu diesem Zweck werden zukünftige Nutzerinnen und Nutzer des Systems in ihrem Arbeitsumfeld beobachtet und befragt. Nur so ist es möglich, den Nutzungskontext zu verstehen und das System optimal auf die neuen Aufgaben und den späteren Arbeitsplatz auszulegen. In KUKoMo erfolgte dies im Rahmen eines Workshops, um physisch und psychisch beanspruchende Aspekte an den aktuellen Arbeitsplätzen der fünf Unternehmen zu identifizieren, die Arbeitsprozesse zu evaluieren und auf Verbesserungspotenziale hin zu überprüfen. Am Workshop nahmen sowohl Arbeitsplatzinhaber als auch Vorgesetzte teil. Nach dem Workshop erfolgten

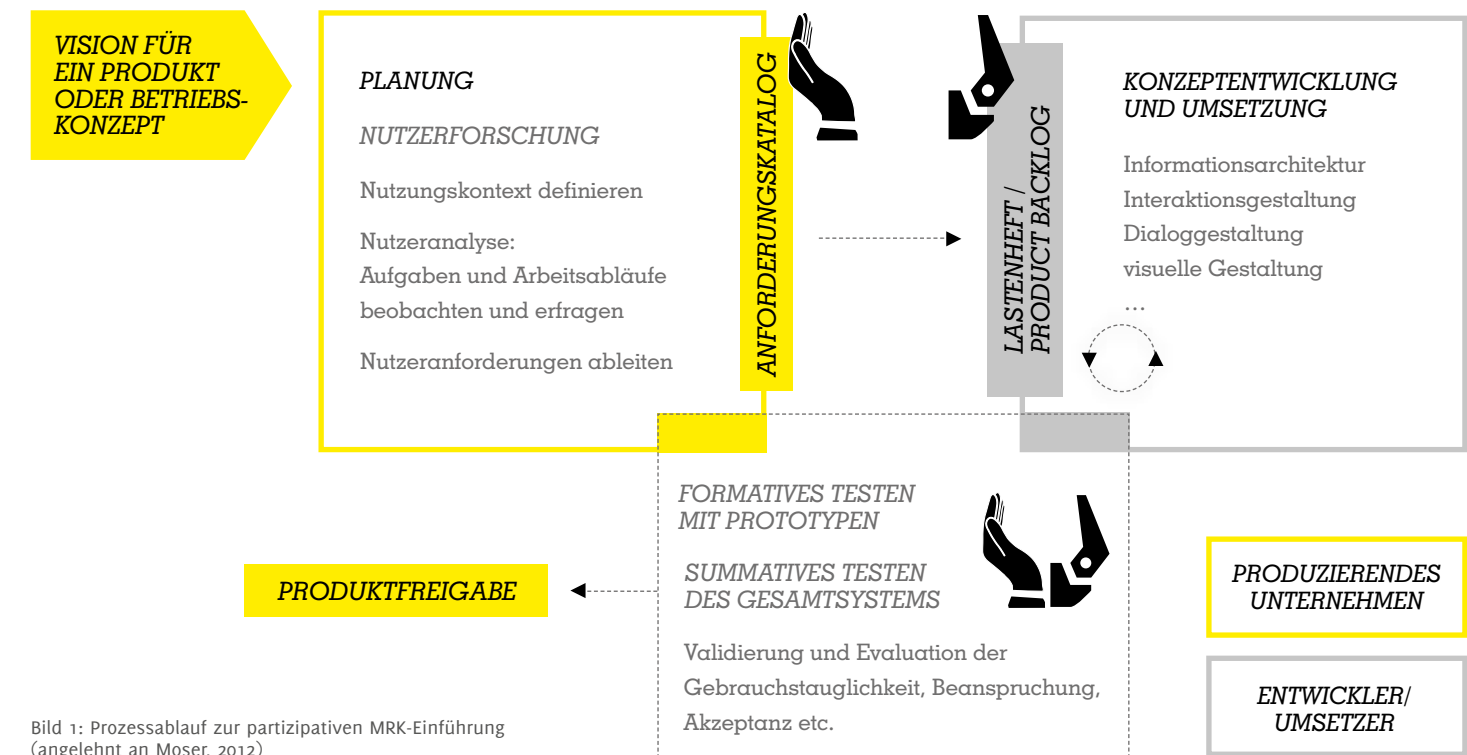


Bild 1: Prozessablauf zur partizipativen MRK-Einführung (angelehnt an Moser, 2012)

Vor-Ort-Analysen der für die MRK-Lösungen infrage kommenden Arbeitsplätze, in denen die Ergebnisse des Workshops validiert sowie mögliche MRK-Lösungsansätze gemeinsam mit den Anwenderfirmen diskutiert wurden.

Sind die Nutzeranforderungen auf diese Weise definiert, werden sie im Product Backlog oder Lastenheft hinterlegt. Diese werden in technische Anforderungen übersetzt, die z.B. den Entwicklern als Umsetzungsbasis dienen. An diesem kritischen Punkt des Übersetzungsprozesses ist es hilfreich, gemeinsame Workshops oder Fokusgruppen mit zukünftigen Nutzern und den Umsetzern der MRK-Lösung durchzuführen. Auch in KUKoMo wurden Workshops mit den Arbeitsplatzinhaberinnen durchgeführt, um Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Roboter für eine einfache und sichere Kommunikation in den MRK-Lösungen zu erarbeiten. Die im Projekt beteiligten Entwickler waren hospitierend anwesend. Diese Einbindung war nicht nur im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit sinnvoll, sondern auch in Bezug auf die Praktikabilität der MRK-Lösung.

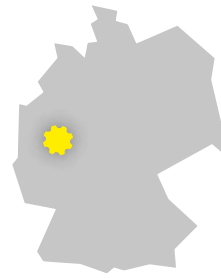
Die Konzeptentwicklung und Umsetzung widmen sich anschließend den verschiedenen Aspekten des Systems. Auch hier können Teilkonzepte der Entwicklung zusammen mit den zukünftigen Nutzern erarbeitet werden, z.B. durch das gemeinsame Anfertigen von einfachen Prototypen. Im KUKoMo-Projekt standen die Experten für Mensch-Maschine-Kommunikation in engem Kontakt mit den produzierenden Unternehmen und den

Entwicklern, um Fragen zur nutzergerechten Systemauslegung zu beantworten.

## Evaluation nach Praxistest

Ist eine finale Version des Gesamtsystems verfügbar, wird abschließend geprüft, inwieweit der vormals beschriebene Zielzustand des Systems erreicht wurde. Dazu dienten im KUKoMo-Projekt Beobachtungen, Aufgabenanalysen und Interviews mit den Nutzerinnen. Es wurde untersucht, inwiefern sich die Umsetzung auf die physische und psychische Beanspruchung auswirkt und wie akzeptabel die neuen MRK-Lösungen in der Praxis sind. Sind diese Testphasen erfolgreich, können die MRK-Lösungen freigegeben und als Arbeitsmittel eingesetzt werden. Die konsequent nutzerzentrierte Entwicklung stellt die Nützlichkeit, Gebrauchstauglichkeit und Zufriedenheit der Nutzerinnen mit dem neuen Interaktionspartner Roboter sicher. Für die NeuGa war das Projekt KUKoMo dadurch mit einer durchweg positiven Erfahrung verbunden: Anfängliche Bedenken, die Mitarbeiterinnen in den Prozess einzubinden, wurden schnell ausgeräumt, da sich diese aktiv und selbstbewusst an den Workshops und Interviews beteiligten. Auch die anfängliche Skepsis zur technischen Umsetzbarkeit hat sich gelegt. Da die Steuerung und Kontrolle des Roboters weiterhin in den Händen der Mitarbeiterinnen liegen, sind die Ängste vor einem Arbeitsplatzverlust ausgeräumt und die Erleichterung der schweren Arbeit wird sehr begrüßt.

Literatur:  
Moser, C. (2012): User Experience Design. Berlin: Springer Vieweg.  
Unger, R.; Chandler, C. (2012): A Project Guide to UX Design: For user experience designers in the field or in the making. Berkeley: New Riders.



Projekt KoMPI

# BETRIEBLICHE MITBESTIMMUNG BEI DER EINFÜHRUNG VON MRK-SYSTEMEN

Dr. Claudia Niewerth, Marvin Schäfer (Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Sozialwissenschaft); Michael Miro (Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme, LPS)

**Für ein Unternehmen lohnt es sich, seine Betriebsräte rechtzeitig für MRK zu schulen. Diese können bei der MRK-Einführung als Partner wertvolle Unterstützung leisten.**

Die Entwicklung, Gestaltung und Einführung innovativer Systemlösungen zur Montage komplexer Güter stellen Unternehmen, Beschäftigte und Interessenvertretungen vor große Herausforderungen.

Die Beschäftigten sind hier eine entscheidende Akteursgruppe, nicht nur im Hinblick auf ihre individuellen fachlichen Kompetenzen und Fertigkeiten, sondern auch im Hinblick auf die Motivation, den Entwicklungs- und Veränderungsprozess aktiv zu unterstützen. Denn für die Beschäftigten bedeutet die Genese kollaborativer Arbeitsplatzsysteme sowohl Chancen als auch Herausforderungen: Zum einen haben sie mehr Handlungsspielräume, können Kompetenzen entwickeln und finden bessere Arbeits- und Beschäftigungsbedingungen vor. Zum anderen sehen sie sich einer Arbeitsverdichtung, entgrenzter Flexibilisierung und unstenen Beschäftigungsverhältnissen gegenüber.

In diesem Kontext spielen die Organe der betrieblichen Interessenvertretung eine wesentliche Rolle, denn im Rahmen der Wahrnehmung ihrer Schutz- und Gestaltungsfunktionen sind sie an der Ausgestaltung von MRK zu beteiligen, sofern regelungsrelevante Bereiche, die über das Betriebsverfassungsgesetz geregelt sind, betroffen sind. Dazu gehören Felder wie Qualifizierung, Datenschutz, Arbeits- und Beschäftigungsbedingungen, Softwareergonomie und vielerlei mehr.

Die Unterrichts-, Beratungs- und Mitbestimmungsrechte der Betriebsräte bei der Einführung moderner Mensch-Roboter-Systeme sind in §§ 90 und 91 des Betriebsverfassungsgesetzes (BetrVG) geregelt (siehe auch Beitrag „Mitbestimmung des Betriebsrats bei betrieblicher Qualifizierung“ in Kapitel 6).

Aber nicht allein die rechtlichen Aspekte sprechen dafür, den Betriebsrat früh in den Veränderungsprozess einzubinden. Die betrieblichen Interessenvertreter und die Mitarbeitenden frühzeitig einzubeziehen sorgt für Transparenz und Akzeptanz und hilft, den Innovationsprozess für alle Beteiligten erfolgreich zu gestalten.

## Betriebsräte für MRK schulen

Spätestens zu dem Zeitpunkt, wenn der Arbeitgeber den Einsatz des MRK-Systems und dessen Auswirkungen auf die Arbeitnehmer mit der betrieblichen Interessenvertretung berät, ist es sinnvoll, dass der Betriebsrat hinreichend über das Thema MRK informiert ist und sich qualifiziert mit dem potenziellen betrieblichen Anwendungsfall auseinandersetzen kann. Dabei stellt sich für die Betriebsräte eine Reihe von Fragen, wie der Einsatz dieser Systeme zu gestalten ist und mit welchen Chancen und Risiken er für die Beschäftigten wie auch für das Unternehmen verbunden ist. Hier empfiehlt es sich, diese Fragen im Rahmen einer Betriebsvereinbarung sozialpartnerschaftlich zu behandeln.

Der erste wesentliche Schritt in Richtung einer kooperativen und sozialpartnerschaftlichen Implementierung von Mensch-Roboter-Kollaboration beginnt mit der Vermittlung grundlegender Kenntnisse über das Thema MRK für die Betriebsräte. Unternehmen

tun gut daran, ihre betrieblichen Interessenvertreter im Rahmen einer Schulung in die MRK-Grundlagen einzuführen: Dazu zählen zum einen Grundlagen der Automatisierung in Abgrenzung zur Mensch-Roboter-Kollaboration, aber auch ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von MRK und die Bestimmung der Grade der Zusammenarbeit von Koexistenz bis Kollaboration. So zeigt die betriebliche Praxis, dass es sich beim Einsatz eines MRK-Systems i.d.R. um ein System der Koexistenz handelt. In keinem der untersuchten Fälle handelt es sich um eine Mensch-Roboter-Kollaboration im eigentlichen Sinne, bei der Werker und Roboter gleichzeitig gemeinsam an einem Bauteil arbeiten. Für die Beteiligung von Betriebsräten beim Einsatz von MRK ist dies ein wesentliches Merkmal, denn der Grad der Zusammenarbeit bestimmt maßgeblich die Einschätzung über Gefährdungen und Belastungen der Beschäftigten in diesem Arbeitssystem.

Um mögliche Fehleinschätzungen in Bezug auf die potenziellen Gefährdungen im Umgang mit Robotern im benachbarten oder gleichen Arbeitsraum zu vermeiden, sollten auch die zur Anwendung kommenden Sicherheitskonzepte vorgestellt sowie ein Einblick in die Normen und Richtlinien im Zusammenwirken von Mensch und Roboter gegeben werden. Dies hilft den Betriebsräten, sich einen Eindruck vom Einsatz eines MRK-Systems zu machen, ohne dass es dabei bereits um die betriebliche Spezifik geht. Mit einer Einführungsschulung werden zum einen erste Bedenken und/oder Vorbehalte ausgeräumt und zum zweiten die potenziellen Regulierungsthemen identifiziert.

Wie eingangs beschrieben, liegen in der Genese kollaborativer Arbeitsplatzsysteme sowohl Chancen als auch Herausforderungen für die Beschäftigten. Der Betriebsrat als Vertretungsorgan der Beschäftigten muss sich hier zu einem kompetenten Akteur entwickeln, der im Sinne seiner Schutzfunktion für die Beschäftigten diese vor den negativen Effekten des MRK-Einsatzes bewahrt und gleichermaßen die Chancen dieser Systeme für die Beschäftigten erkennt und nutzbar macht.

## Regulierungsrelevante Themen

Im KoMPI-Projekt wurden Workshops mit diversen Betriebsratsgremien durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, welche Themen beim Einsatz von MRK im Unternehmen für die betrieblichen Interessenvertreter von großer Bedeutung und welche Themen eher von nachrangiger Bedeutung sind. Insgesamt konnten zehn regulierungsrelevante Themen identifiziert werden, die für die betriebliche Interessenvertretung beim Einsatz von MRK wichtig sind. Dabei handelt es sich sicherlich nicht um eine abschließende Sammlung, sondern um Themenfelder, die aus Sicht der Betriebsräte beim Einsatz und der Implementierung von MRK zunächst eine zentrale Rolle spielen.

### 1. Taktzeit und Taktzeitermittlung

Für die Betriebsratsgremien korrespondiert das Thema Taktzeit eng mit den Themen Leistungsverdichtung und Leistungsbedingungen. Handelt es sich um ein Pull- oder Push-System, ist die Taktzeit des Roboters von großer Bedeutung: Der Takt des Roboters soll sich – so die aus Sicht der Betriebsräte wünschenswerte Ausgestaltung – an den Arbeitsvorgängen des Werkers ausrichten und diese weder indirekt noch direkt beschleunigen oder verlangsamen.

### 2. Qualifizierung

Aus Sicht der Betriebsratsgremien geht es zum einen um die Qualifizierung von Beschäftigten, die dem neuen Arbeitssystem zugeordnet sind und den Umgang mit dem Arbeitsmittel Roboter erlernen müssen. Zum anderen sollten auch weitere Beschäftigte in Kurzschulungen zum Thema MRK qualifiziert werden – und zwar sowohl Beschäftigte in angrenzenden Arbeitssystemen als auch die Betriebsräte selbst. Die Beschäftigten sollten darüber hinaus nicht nur den fachlichen Umgang mit dem Roboter erlernen, sondern auch in ihren sozialen und methodischen Kompetenzen geschult werden. Dazu gehört der reflektierte Umgang mit Belastungs- oder Isolationswahrnehmungen sowie der Umgang mit Stressoren, die durch den „Kollegen Roboter“ ausgelöst werden können.

### 3. Tätigkeitsprofile

Aus Sicht der Betriebsräte ist der Einsatz eines Roboters im Arbeitssystem als Anreicherung des Tätigkeitsspektrums zu verstehen. Selbst wenn im Idealfall körperlich belastende oder auch monotone Tätigkeiten durch den Roboter übernommen werden und damit entfallen, kommen neue Tätigkeiten für den Werker hinzu. Dies können Aufgaben wie das Befüllen von Arbeitsstationen sein, aber auch das Bedienen des Roboters selbst. Für die Betriebsräte ist dies in zweierlei Weise von Bedeutung: Die Berücksichtigung der Tätigkeitsprofile signalisiert den Beschäftigten zum einen die Relevanz des MRK-Systems für das Unternehmen und gilt zugleich als Wertschätzung und Anerkennung ihrer Bereitschaft, sich mit dem Roboter im Arbeitssystem zu bewegen. Zum anderen vermuten Betriebsräte mit der Anpassung der Tätigkeitsprofile eine Aufwertung der Tätigkeiten, die sich in der Arbeitsbewertung und schlussendlich in der Eingruppierung der Beschäftigten positiv niederschlagen kann.

### 4. Substitution

Die Sorge, der Einsatz eines Roboters würde den Beschäftigten an seinem Arbeitsplatz ersetzen, ist zwar ein denkbare Szenario, wird aber von den Betriebsräten als eher unbegründet eingestuft. Allerdings gewinnt das Thema Substitution mit zunehmender





mender Betriebsgröße an Bedeutung. Möglicherweise hat dies auch mit der Eigentümerstruktur zu tun: Betriebsräte kleinerer Betriebe, die häufiger eigentümergeführt sein dürften, hegen weniger oft die Befürchtung, Arbeitsplätze könnten durch Roboter substituiert werden, als Betriebsräte von Konzernen.

#### 5. - 10. Weitere Themen

Als weitere regulierungsrelevante Themen wurden „Ergonomie“, „Psychische Belastungen“ und „Arbeitsschutz/Arbeitssicherheit“ genannt. Hierbei ist es den Betriebsräten wichtig, die Verbesserung der Ergonomie als positiven Effekt des Einsatzes von MRK-Systemen zu nutzen: Besonders die Arbeitssysteme sollten bevorzugt mit MRK ausgestattet werden, bei denen eine hohe körperliche Belastung der Beschäftigten nachweislich ist. Bei der „psychischen Belastung“ geht es eher um die negativen Auswirkungen von MRK-Systemen, wenn der Roboter zu Stress, Arbeitsverdichtung oder Isolation führt. Hiervor sollen die Beschäftigten durch Regelungen geschützt werden. Gleiches gilt für das Thema „Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit“, wobei hier der Regelungsbedarf durch die betrieblichen Interessenvertretungen weniger dringend eingestuft wird, da bereits hohe Sicherheitshürden bei der Inbetriebnahme eines MRK-Systems genommen werden müssen. Dies belegen auch die empirischen Befunde: Die Bedeutsamkeit des Themas Arbeitsschutz sinkt mit steigendem MRK-Umsetzungsstand, da hier hinreichende Erfahrungen mit dem Arbeitssystem vorliegen. Je größer die Unkenntnis über das MRK-System, desto größer der Wunsch nach Regelungen zu Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit. Der gleiche Effekt lässt sich beim Thema Datenschutz beobachten. In Projekten, in den sich der Roboter im (Test-)Betrieb befindet, ist die Bedeutung des Themas Datenschutz am geringsten.

Als weitere regulierungsrelevante Themen wurden die Bereiche „Entgelt“ und „Kommunikation“ ermittelt. Das Thema „Entgelt“ ist besonders für die Betriebsräte von Interesse, die in ihrem Unternehmen bereits weitreichende Erfahrungen mit MRK gemacht haben. Erst nach der erfolgreichen Einführung wird über potenziell monetäre Auswirkungen des MRK-Einsatzes nachgedacht. Zeigt sich die Relevanz des Themas „Entgelt“ bereits beim Thema „Tätigkeitsprofile“, wird es mit zunehmendem MRK-Umsetzungsstand ein zentrales und regulierungsrelevantes Thema. Last, but not least ist das Thema „Kommunikation“ zu nennen. Für die Betriebsräte ist sowohl die kontinuierliche Information der Beschäftigten als auch der Kommunikationsprozess zwischen Arbeitgeber und Betriebsrat sehr wichtig, schlussendlich ist dies aber weniger ein Feld, das über Betriebsvereinbarungen zu regulieren ist, sondern vielmehr ein Thema der Betriebs- bzw. Unternehmenskultur. Je weniger das Verhältnis zwischen Arbeitgeber und Betriebsrat von Auseinandersetzungen und Konflikten belastet ist, desto geringer ist der Bedarf nach Regulierung - nahezu identisch verläuft dazu der Kommunikationsbedarf: Eine frühe und umfängliche Kommunikation über die Implementierung von MRK-Systemen erhöht nicht nur die Akzeptanz des Systems bei den Beschäftigten, sondern erleichtert auch den Einführungs- und Umsetzungsprozess mit dem Betriebsrat.

Die Berücksichtigung der Mitbestimmung beim Einsatz von Mensch-Roboter-Kollaboration im Sinne einer frühzeitigen Einbindung der betrieblichen Interessenvertretung ist ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Einführung neuer Technologien und liefert nachhaltig positive Effekte für eine betriebliche Innovationskultur.



## FALLBEISPIEL

Die Firma Karl Dungs GmbH & Co. KG entwickelt und fertigt Systemlösungen für die Heiz- und Prozesswärmeindustrie sowie für die Kraft-Wärme-Kopplung. Am Standort Urbach bei Schorndorf wurde in einer Montagelinie ein MRK-System eingeführt: Ursprünglich arbeiteten in der Linie 1,6 Beschäftigte. Der nur zu 60 Prozent ausgelastete Mitarbeiter wurde durch den Roboter ersetzt und einem anderen Linienplatz zugeteilt (siehe Beitrag in Kapitel 8 „MRK in Montagelinien von KMU“). Der vorherrschende Zusammenarbeitsgrad mit dem Roboter ist die Koexistenz – der Roboter fügt Teile zusammen, die von der Mitarbeiterin in der Montagelinie befüllt werden. Sowohl die betroffenen Beschäftigten als auch der Betriebsrat waren frühzeitig über die Erprobungsphase des MRK-Systems informiert worden. Dies führte zu einer grundsätzlichen Akzeptanz der Idee. Allerdings gab es auch Kritik an dem neuen Arbeitssystem: Der Roboter, der von den Mitarbeiterinnen „Höbi“ genannt wird, war besonders in der Einführungsphase sehr störungsanfällig. Dies führte anfänglich zu einer geringen Akzeptanz für den Roboter seitens der Beschäftigten. Sie fühlten sich durch die vielen Störungen in ihrem Arbeitsablauf eingeschränkt und behindert; die Mitarbeiterinnen waren persönlich frustriert. Hier zeigt sich eine besondere Herausforderung bei der Einführung von Techniksystemen: Besonders im laufenden Betrieb scheint es wichtig zu sein, dass sich neue Systeme „bewähren“ – wenn dies allerdings nicht geschieht, ist mit einer geringen Frustrationstoleranz zu rechnen. Für diesen Fall ist es notwendig, einen konstruktiven Umgang mit den Beschäftigten zu entwickeln. Der Betriebsrat erwies sich in diesem Fall als guter Ansprechpartner, da er sich offen für die Belange der Montagebeschäftigten zeigte. Bei Dungs wurden die Beschäftigten durch den Systemintegrator hinreichend für die Arbeit mit dem Roboter geschult, bei Störungen waren sie jedoch nicht befähigt, Abhilfe zu schaffen.



# QUALI- FIZIERUNG

## KAPITEL 6

Das Thema Qualifizierung spielt mit Blick auf den Einsatz kollaborierender Robotersysteme schon heute eine große Rolle und wird noch weiter an Bedeutung gewinnen. Bei den meisten Unternehmen herrscht jedoch noch viel Unklarheit, welche betrieblichen Personengruppen wann und mit welchen Lernzielen hierfür qualifiziert werden müssen. Da MRK-Systeme meist von technisch-orientierten Führungskräften geplant und eingeführt werden, finden Qualifizierungsmaßnahmen oft viel zu spät und als reine „Anpassungsqualifizierung“ statt. Im Fokus der Qualifizierungsmaßnahmen steht dann oft ausschließlich der „Werker“ oder „Maschinenbediener“. Ein Unternehmen sollte dagegen unter Berücksichtigung seiner spezifischen Organisationsstruktur parallel zur technischen Einführungsstrategie eine passgenaue, zielgruppenorientierte und modulare Qualifizierungsstrategie entwickeln. Wie deren zielführende Umsetzung gelingen kann, zeigen die Beiträge in diesem Kapitel.

## QUALIFIZIERUNG IM KONTEXT VON INDUSTRIE 4.0

- 132** Wortwechsel
- 138** Mitbestimmung des Betriebsrats bei betrieblicher Qualifizierung (KoMPI)
- 142** Schulungs- und Anwendungszentrum für MRK (KUKoMo)
- 144** MRK in der Lernfabrik (SafeMate)
- 148** Lernprojekt Mensch-Roboter-Kollaboration (ROKOKO)
- 150** Befähigung von operativen Mitarbeitern und Planungsingenieuren (KoMPI)
- 154** Arbeitsplatznahe Qualifizierung (ARIZ)



*„Die Einführung von MRK-Lösungen erfordert Qualifizierungsmaßnahmen über alle Funktionsbereiche eines Unternehmens hinweg.“*



Dr. **ULRICH BOBE**

Projektleiter beim ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V



Dr. **DIRK PENSKY**

*„Das Prinzip Gießkanne hat ausgedient – für eine effiziente und individuelle Qualifizierung brauchen wir adaptierbare und modularisierte Schulungsangebote.“*

# SEL



# WORTWECHS

*Qualifizierung  
im Kontext von  
Industrie 4.0*

DR.  
ULRICH BOBE

DR.  
DIRK PENSKY

## WIE SCHÄTZEN SIE DEN QUALIFIZIERUNGSBEDARF DER MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER EIN?

Mit kollaborativen Montagesystemen beschreiten die Unternehmen einen Weg von der manuellen zur teilautomatisierten Montage. Die Einführung solcher Systeme zieht tiefgreifende Veränderungen in allen Unternehmensbereichen nach sich. Dadurch ergibt sich ein umfassender Qualifizierungsbedarf, der die gesamte Personalstruktur und alle Funktionen eines Unternehmens umfasst. Unternehmen sind gefragt, diese Bedarfe genau zu ermitteln, um ihr Personal durch passgenaue Schulungsangebote fit für die technischen und organisatorischen Herausforderungen zu machen. Der erste Schritt besteht darin, für das Thema MRK zu sensibilisieren und Berührungspunkte abzubauen. Die frühzeitige Einbindung aller betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist dabei essenziell.

Bei der Ermittlung des Qualifizierungsbedarfs setzen wir auf den klassischen Ansatz, der auf einem Vergleich des Soll- und Ist-Zustands von Kompetenzprofilen basiert. Das Soll-Kompetenzprofil definiert diejenigen Kompetenzen, die innerhalb einer Funktion bzw. Rolle für die Ausführung einer bestimmten Handlung notwendig sind. Wie Dr. Bobe bereits sagte, erfordert MRK ein unternehmensweites Qualifizierungskonzept, da eine Vielzahl von Rollen - vom Werker über die Anlagenplanerin bis hin zur Produktionsleitung - betroffen ist. Insofern ergeben sich mit der Einführung von MRK-System viel komplexere Qualifizierungsanforderungen, als das z.B. bei der Integration klassischer Automatisierungslösungen der Fall ist. Um die nötige Akzeptanz zu schaffen, sind wir ebenfalls davon überzeugt, dass die Sensibilisierung Ausgangspunkt aller Qualifizierungsmaßnahmen sein sollte.

## WELCHE SCHULUNGSINHALTE SOLLTEN IM FOKUS STEHEN?

Für uns spielt die adressatengerechte Aufarbeitung der Inhalte eine zentrale Rolle. So ist es beispielsweise für die Unternehmensleitung wichtig, die sich durch den MRK-Einsatz ergebenden Potenziale bewerten zu können. Dazu können der im KUKoMo-Projekt entwickelte Schnelltest zur Potenzialanalyse sowie der Leitfaden zur Nutzwertanalyse und zur Wirtschaftlichkeitsbewertung sinnvolle Impulse geben. Ein weiterer wichtiger Schulungsinhalt besteht in der Arbeitssicherheit. Damit sollten sich insbesondere Hersteller und Systemintegratoren beschäftigen. Die Simulation ist zudem ein geeignetes Instrument, um den Umgang mit der Technologie virtuell zu trainieren.

Auch wir sind der Meinung, dass die Themen Arbeitssicherheit und Wirtschaftlichkeit eine wichtige Rolle bei den Schulungen spielen sollten. Dabei haben sich Simulationen in Bezug auf die Arbeitsplatzgestaltung und -organisation sowohl für die Planung als auch für die Schulung als nützlich erwiesen. Im Sinne eines ganzheitlichen Qualifizierungsansatzes bauen wir auf ein dreistufiges Kompetenzmanagement, das allgemeine MRK- sowie unternehmens- und rollenspezifische Kompetenzen berücksichtigt. Das Prinzip Gießkanne hat dabei ausgedient - für eine effiziente und individuelle Qualifizierung brauchen wir adaptierbare und modulierte Schulungsangebote.

Das ICM ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung für Innovationen und Systemlösungen aus dem Maschinen- und Anlagenbau.

Die Festo Didactic SE ist ein Unternehmen der Festo Gruppe, das Ausrüstungen und Dienstleistungen rund um die technische Aus- und Weiterbildung anbietet.

DR.  
ULRICH BOBE

DR.  
DIRK PENSKY

## WELCHE DIDAKTIKKONZEPTE HABEN SICH ALS ERFOLGREICH ERWIESEN?

Wir haben dazu ein gestuftes Konzept entwickelt, das in Bezug auf die Inhalte immer detaillierter und konkreter wird. Den Startpunkt bildet eine Auftakt- und Sensibilisierungsveranstaltung, bei der die Vermittlung der Motivation für MRK im Fokus steht. Ein Management-Workshop dient dazu, Methoden und Instrumente zur MRK-Potenzialanalyse und -bewertung kennenzulernen. Weitere Bausteine bilden Seminare zu Programmierung, Planung und Betrieb sowie eine Netzwerkveranstaltung zum Austausch über Unternehmensgrenzen hinweg. Praxisnahe Anwendungsaufgaben, die z.B. anhand von Demonstratoren oder Lernfabriken zu lösen sind, runden unser Angebot ab.

Für uns sind kleinteilige und gezielte Lernangebote, die auf einen didaktischen Medienmix setzen, sehr wichtig. Nur so können wir eine individuelle und effiziente Schulung sicherstellen. In unserem Projekt ARIZ haben wir dazu modulare, adaptierbare Lernpfade entwickelt, die mithilfe sogenannter Lernnuggets - abgegrenzter Lernangebote wie kurze E-Learning-Inhalte oder Videosequenzen, aber auch Simulationsanwendungen oder Webinare - Kompetenzen individuell vermitteln. Praktische Kompetenzen schulen wir nach dem Prinzip der vollständigen Handlung anhand von projektartigen Aufgaben. Diese können sowohl virtueller Natur sein als auch im Rahmen eines Hardware-Lernsystems, z.B. innerhalb einer Lernfabrik, gelöst werden.



Quelle: Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau der RWTH Aachen University



# „FRÜHZEITIGE QUALIFIZIERUNG IST EIN WICHTIGER ERFOLGSFAKTOR FÜR DIE UMSETZUNG KOMPLEXER, ÜBERFACHLICHER UND INTERDISZIPLINÄRER INDUSTRIE-4.0-PROJEKTE IM UNTERNEHMEN.“

Prof. Dr.  
Wilhelm Bauer

## QUALIFIZIERUNG 4.0: DIE SICHT DER WISSENSCHAFT

Um die Mitarbeitenden optimal auf die Herausforderungen der Industrie-4.0-Arbeitswelt vorzubereiten, sollte ihr Qualifizierungsbedarf möglichst früh ermittelt werden. Dazu bieten sich z.B. gezielte Analysen von Tätigkeiten im Unternehmen an, die besonders von der Digitalisierung und Industrie-4.0-Anwendungen betroffen sind. Alternativ empfiehlt sich eine systematische Ermittlung von Ist- und Soll-Stand der Kompetenzen in der gesamten Belegschaft. So können Defizite im Kompetenzportfolio des Unternehmens zielgenau erkannt und behoben werden.

### Überfachliche Inhalte und neue Lernformen werden wichtiger

Die Schulungsinhalte für Industrie 4.0 gliedern sich in drei Bereiche. Erstens geht es um einen allgemeinen Überblick über Technologien und Anwendungsfelder von Industrie 4.0, zweitens darum, je nach unternehmensspezifischem Interesse Themen zu vertiefen, wie z.B. Robotik, Big Data und Künstliche Intelligenz. Drittens müssen überfachliche Inhalte vermittelt werden, z.B. zur interdisziplinären Zusammenarbeit über Funktions- und Unternehmensgrenzen hinweg oder zum ganzheitlichen Denken in komplexen Wertschöpfungsketten. Die entsprechenden Lerninhalte für Industrie-4.0-Anwendungen sollten inhaltlich und zeitlich „auf den Punkt“ abrufbar sein, d.h. bedarfsgerecht auf den Arbeitsschritt bezogen, in dem der Mitarbeitende sich aktuell befindet. Neben diesem arbeitsintegrierten Lernen gewinnen Teamlernen, kurzzyklisches Lernen und die Vermittlung von Selbstlernkompetenz immer mehr an Bedeutung.

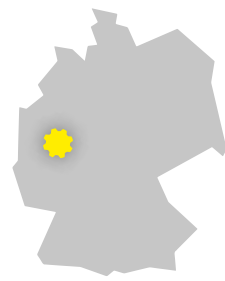
### Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter optimal gestalten

Ein wichtiger Erkenntnisgewinn unserer Mitarbeit im Forschungsverbund „Kompetenz Montage“ ist, dass neben der Qualifizierung vor allem die Gestaltung der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter ein klarer Erfolgsfaktor für die Akzeptanz von MRK-Projekten ist. Um dies zu erreichen, setzen wir im Projekt ROKOKO z.B. das „Lernprojekt Mensch-Roboter-Kollaboration“ zur partizipativen Qualifizierung ein, in dem die Mitarbeitenden die gemeinsamen Arbeitsschritte mit dem Roboter spielerisch nachvollziehen und die Arbeitsqualität bewerten. Denn zur Akzeptanzförderung gehören auch die aktive Gestaltung der Arbeitsorganisation an den betreffenden Arbeitsplätzen, die ergonomische Entlastung durch den Roboter und die frühe Einbindung der betroffenen Mitarbeitenden. Das technisch Machbare ist nicht gleichzeitig die gute Lösung, es muss immer noch der Arbeitsinhalt des Menschen betrachtet und bewertet werden.



Prof. Dr.  
**WILHELM BAUER**  
Geschäftsführender Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart

Das Fraunhofer IAO entwickelt gemeinsam mit Unternehmen, Institutionen und Einrichtungen der öffentlichen Hand Strategien, Geschäftsmodelle und Lösungen für die digitale Transformation.



Projekt KoMPI

# MITBESTIMMUNG DES BETRIEBSRATS BEI BETRIEBLICHER QUALIFIZIERUNG

Prof. Dr. Manfred Wannöfel und Dr. Claudia Niewerth (Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Sozialwissenschaft)

**Der Betriebsrat ist ein wichtiger Akteur bei der Gestaltung der betrieblichen Qualifizierung. Das Betriebsverfassungsgesetz und das Qualifizierungschancengesetz weisen ihm umfassende Rechte und Pflichten für die betriebliche Bildung zu.**

Die Einführung neuer Technologien im Unternehmen führt in der Regel unmittelbar zur Frage der betrieblichen Qualifizierung. Dabei interessiert das Unternehmen in erster Linie, welche Beschäftigten wie und wann zu welchen Themen, Praktiken oder Techniken zu qualifizieren sind, damit die neue Technologie sicher, effizient und fehlerfrei zum Einsatz kommt. In Betrieben, in denen ein Betriebsrat existiert, sind diese Fragen nicht nur allein für den Arbeitgeber von Bedeutung – beim Thema Qualifizierung ist der Betriebsrat selbst ein wichtiger Akteur, der über das Betriebsverfassungsgesetz mit zum Teil weitreichenden Rechten und Pflichten ausgestattet ist.

## Betriebsverfassungsgesetz bildet die Basis

Das Betriebsverfassungsgesetz (BetrVG) ist die rechtliche Grundlage für die Arbeit des Betriebsrats. Es definiert die Zusammenarbeit zwischen dem Arbeitgeber und dem Betriebsrat, regelt die Ausgestaltung von Arbeits- und Beschäftigungsbedingungen und bestimmt Rechte und Pflichten des Betriebsrats. Die Rechte reichen von Informationsrechten über Anhörungs- und Beratungs-

rechte (den sog. Mitwirkungsrechten) bis hin zu Mitbestimmungsrechten. Das weitreichendste Recht des Betriebsrats, das im BetrVG festgelegt ist, ist das Mitbestimmungsrecht: Entweder handelt es sich dabei um ein sogenanntes Zustimmungsverweigerungsrecht oder um ein Widerspruchsrecht. Von seinem Zustimmungsverweigerungsrecht kann der Betriebsrat Gebrauch machen, um zu verhindern, dass der Arbeitgeber eine bestimmte Maßnahme durchführt. Der Betriebsrat kann seine Zustimmung hierbei aus bestimmten Gründen verweigern.

Beim Widerspruchsrecht kann der Betriebsrat einer Kündigung widersprechen, sofern er Gründe vorlegen kann. In beiden Formen kann der Arbeitgeber nicht ohne die Zustimmung des Betriebsrats handeln – sofern keine Einigung hergestellt werden kann, entscheidet eine Einigungsstelle den Sachverhalt. Das Vorliegen eines Mitbestimmungsrechtes bedeutet daher für die betriebliche Ebene, dass manche Maßnahmen nicht ohne die Zustimmung des Betriebsrats durchgeführt werden dürfen.

## WAS EINEN BETRIEBSRAT AUSMACHT UND WIE ER ZUSTANDE KOMMT

1. Ein Betriebsrat ist ein Organ zur Mitbestimmung und Vertretung der Arbeitnehmerinteressen.
2. Ein Betriebsrat kann in jedem Betrieb mit fünf oder mehr Arbeitnehmern gewählt werden.
3. Die Wahl zum Betriebsrat findet seit 1990 alle vier Jahre in der Zeit von Anfang März bis Ende Mai statt.
4. Die Wahl eines Betriebsrats wird von einem Wahlvorstand geleitet, damit diese ordnungsgemäß durchgeführt werden kann.
5. Das Amt des Betriebsrats wird nicht vergütet – es handelt sich um ein Ehrenamt. Es ist das Arbeitsentgelt fortzuzahlen, das ohne die Betriebsrats-tätigkeit erzielt worden wäre.
6. Für seine Arbeit als Betriebsrat muss das Betriebsratsmitglied vom Arbeitgeber von seinen eigentlichen Aufgaben freigestellt werden.
7. Ab einer Mitarbeiteranzahl von 200 Beschäftigten muss der Arbeitgeber Betriebsratsmitglieder generell von der Arbeit freistellen.
8. Eine der wichtigsten Aufgaben des Betriebsrats ist es, die Durchführung der zugunsten der Arbeitnehmer geltenden Gesetze, Verordnungen, Vorschriften und Betriebsvereinbarungen zu überwachen.
9. Der Betriebsrat hat diverse Beteiligungsrechte, dazu gehören Anhörungs-, Informations-, Beratungs- und Zustimmungsrechte.
10. Neben seinen Rechten hat der Betriebsrat Pflichten wie Verschwiegenheitspflichten oder die Pflicht zur Fortbildung.
11. Zu den allgemeinen Pflichten gehört die Pflicht des Betriebsrats, zum Wohle der Belegschaft mit dem Arbeitgeber vertrauensvoll zusammenzuarbeiten.

## Die Größe eines Betriebsrats (Anzahl der Betriebsratsmitglieder) ist abhängig von der Beschäftigtenanzahl des Unternehmens.



MIT STEIGENDER MIT-ARBEITERZAHL ERHÖHT SICH DIE ANZAHL DER BETRIEBSRATSMITGLIEDER.



## Rechte des Betriebsrats bei der betrieblichen Berufsbildung

Qualifikation und Weiterbildung spielen für Beschäftigte eine immer größere Rolle. Sie können der Schlüssel zur Arbeitsplatzsicherheit sein und entscheiden darüber hinaus über die beruflichen Möglichkeiten eines jeden Einzelnen. Aber auch für das Unternehmen ist die Qualifikation der Beschäftigten ein wesentlicher Faktor: Durch sie können Anforderungen an Qualität, Produktivität, Effizienz, Kundenzufriedenheit oder Innovationsfähigkeit im Unternehmen sichergestellt werden. Damit ist sowohl aus Sicht des Arbeitnehmers als auch aus Sicht des Arbeitgebers eine berufliche und betriebliche Weiterbildung notwendig. Die betrieblichen Strategien zur Qualifizierung und Weiterbildung werden aber nicht allein dem Arbeitgeber überlassen, sondern der Betriebsrat ist hier ein wesentlicher Akteur und kann dafür sorgen, dass die Interessen der Beschäftigten in die betriebliche Planung einfließen.

Das Betriebsverfassungsgesetz regelt an verschiedenen Stellen Sachverhalte zum Thema Bildung und Qualifizierung. Als prominenteste Paragraphen sind hier §§ 96 bis 98 BetrVG zu nennen, die sich auf den Bereich der betrieblichen Berufsbildung beziehen. Der Begriff der betrieblichen Berufsbildung umfasst alle Maßnahmen der Berufsbildung im Sinne von § 1 Abs. 1 BBiG (Berufsbildungsgesetz) und damit solche der Berufsausbildung, der beruflichen Fortbildung und der beruflichen Umschulung. Dies bedeutet, dass die Einführung eines Systems der Mensch-Roboter-Kollaboration diesen Bereich berührt, denn die Mitarbeiter müssen hinreichend für die Arbeit an einem MRK-Arbeitsplatz qualifiziert sein.

### Betriebsrat hat Informations-, Beratungs- und Vorschlagsrecht

§ 96 BetrVG bezieht sich auf die Förderung von Berufsbildung. Hier ist geregelt, dass Arbeitgeber und Betriebsrat im Rahmen der betrieblichen Personalplanung die Berufsbildung der Arbeitnehmer zu fördern haben (§ 96 BetrVG (1)). Dies muss in Zusammenarbeit mit den für die Berufsbildung und den für die Förderung der Berufsbildung zuständigen Stellen geschehen. Zudem muss der Arbeitgeber auf Verlangen des Betriebsrats den Berufsbedarfsbedarf ermitteln und sich mit diesem in Fragen der Berufsbildung der Arbeitnehmer des Betriebs beraten. Hierzu kann der Betriebsrat Vorschläge machen. Er hat

also ein sogenanntes Informations- und Beratungs- sowie ein Vorschlagsrecht. Der Betriebsrat kann zum einen den Arbeitgeber auffordern, den Berufsbedarfsbedarf zu ermitteln, d.h. im konkreten Fall den Berufsbedarfsbedarf für das Arbeitssystem, in dem die Mensch-Roboter-Kollaboration eingesetzt ist. Mit dem ermittelten Bildungsbedarf kann der Betriebsrat zum anderen konkrete Forderungen erarbeiten und sich für Bildungsmaßnahmen stark machen. Der Arbeitgeber ist verpflichtet, sich mit dem Betriebsrat über erforderliche Maßnahmen der Berufsbildung zu beraten - der Betriebsrat darf selbst Vorschläge dazu machen.

In § 97 BetrVG (1) ist ein weiteres Beratungsrecht des Betriebsrats verankert. So hat der Arbeitgeber mit dem Betriebsrat über die Errichtung und Ausstattung betrieblicher Einrichtungen zur Berufsbildung, die Einführung betrieblicher Berufsbildungsmaßnahmen und die Teilnahme an außerbetrieblichen Berufsbildungsmaßnahmen zu beraten (§ 97 (1) BetrVG). Berufsbildungsmaßnahmen sind z.B. Lehrgänge oder Kurse; Einrichtungen sind z.B. Schulungsräume oder eine Abteilung für Weiterbildung. In § 97 BetrVG wird auch festgelegt, dass zunächst der Arbeitgeber entscheidet, ob eine solche Einrichtung errichtet oder eine bestimmte Maßnahme angeboten wird. Erst wenn dieser sich dafür entscheidet, kann der Betriebsrat von seinem Mitbestimmungsrecht Gebrauch machen. Wichtig ist hier, dass der Betriebsrat das Gespräch und die Verhandlung suchen kann und der Arbeitgeber mit ihm zu beraten hat. Zum Beratungsrecht des Betriebsrats gehört im Vorfeld die umfassende Information durch den Arbeitgeber.

Eine Besonderheit regelt § 97 BetrVG in Absatz 2: Hat der Arbeitgeber Maßnahmen im Betrieb ergriffen, die die Tätigkeiten eines Beschäftigten derart verändern, dass seine bestehende Qualifikation nicht mehr ausreicht, so erhält der Betriebsrat für diesen Fall ein Mitbestimmungsrecht bei der Einführung von Bildungsmaßnahmen. Das bedeutet nicht, dass der Betriebsrat mitentscheiden kann, ob Bildungsmaßnahmen durchgeführt werden, sondern, welche Maßnahmen ergriffen werden. Ein typisches Beispiel hierfür ist der Einsatz einer neuen Maschine oder Produktionsanlage im Betrieb. Leider werden hier oft nur wenige Beschäftigte geschult und andere „wurschteln“ sich mehr recht als schlecht mit großen Problemen durch. Bekanntermaßen ist mangelnde Qualifikation einer der wichtigsten Stressfaktoren im Betrieb. Daher ist die Qualifizierung in der Bedienung und Handhabung neuer Maschinen und Anlagen ein

wesentlicher Bestandteil bei der erfolgreichen Einführung neuer Technologien. Bei der Einführung eines MRK-Systems kommt also u.a. das Mitbestimmungsrecht nach § 97 (2) BetrVG zum Tragen: Zunächst muss geprüft werden, ob a) die bestehende Qualifikation noch ausreicht, und wenn b) der Arbeitgeber festlegt, dass eine Qualifizierungsmaßnahme durchgeführt werden soll, hat c) der Betriebsrat ein Mitbestimmungsrecht darüber, welche Maßnahme durchgeführt wird. Er kann also der Maßnahme zustimmen oder die Zustimmung verweigern.

### Keine Bildungsmaßnahme ohne Zustimmung des Betriebsrats

Nach § 98 BetrVG hat der Betriebsrat zudem ein Mitbestimmungsrecht, wenn der Arbeitgeber entscheidet, Maßnahmen zur betrieblichen Bildung durchzuführen. Absatz 1 von § 98 BetrVG regelt die Mitbestimmung des Betriebsrats bei Maßnahmen der betrieblichen Berufsbildung, Absatz 6 weitet die Mitbestimmung auf sonstige Bildungsmaßnahmen aus. Somit ist davon (voraussichtlich) jede Bildungsmaßnahme betroffen, die der Arbeitgeber bei der Einführung von MRK-Systemen vorsieht.

Für den Fall von Streitigkeiten zwischen Arbeitgeber und Betriebsrat sieht § 98 BetrVG zwei verschiedene Wege vor: Bei Fragen der Durchführung der Berufsbildungsmaßnahmen oder im Hinblick auf die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ist - wie im BetrVG häufig - die Einigungsstelle zuständig. Sie entscheidet dann über den Sachverhalt. Bei Streitigkeiten über die mit der Berufsbildung beauftragten Personen kann sich der Betriebsrat an das Arbeitsgericht wenden.

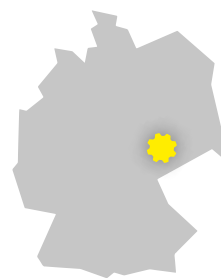
Neben §§ 96 bis 98 BetrVG, die die Berufsbildung regeln, tauchen die Aspekte Bildung und Qualifizierung immer wieder auch in anderen Zusammenhängen in den Regelungen des BetrVG auf. Weitere Rechtsgrundlagen für Mitbestimmungsrechte in der beruflichen Bildung finden sich z.B. in § 75 BetrVG (Gleichbehandlungsgrundsatz), in § 92 BetrVG (Personalplanung) oder auch in § 102 (3) Nr. 4 BetrVG mit Blick auf die Themen Umschulung und Fortbildung.

### Betriebsrat als strategischen Partner verstehen

Insbesondere das am 1. Januar 2019 in Kraft getretene Qualifizierungschancengesetz fördert den Zugang zur Weiterbildung für beschäftigte Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer. Die Maßnahmen zielen auf die Beschäftigtengruppen, die berufliche Tätigkeiten ausüben, die durch Technologien verändert werden können, wie es im Kontext der Mensch-Roboter-Kollaborationen angezeigt ist. Die Beschäftigten sollen ihre beruflichen Kompetenzen leichter fortentwickeln und anpassen können. Der Betriebsrat nimmt im Rahmen des neuen Gesetzes eine Schlüsselrolle ein, da Qualifizierungsmaßnahmen elementar sind, um Beschäftigte auf neue Tätigkeitsfelder vorzubereiten und somit auch die Arbeitsplatzsicherheit zu gewährleisten. Dies gilt auch für die Einführung von MRK-Systemen: Der Betriebsrat ist hierbei nicht nur im Sinne des Betriebsverfassungsgesetzes zu beteiligen, er wird vielmehr auch strategischer Partner bei der Umsetzung des Qualifizierungschancengesetzes sein.







Projekt KUKoMo

# SCHULUNGS- UND ANWENDUNGSZENTRUM FÜR MRK



Bild 1: Die Phasen der Wissensvermittlung (eigene Darstellung in Anlehnung an Koch 2010)

Die geplanten **Workshops** werden nach Bedarf durchgeführt. Sie generieren konkrete Lösungen für die definierten Zielgruppen und werden damit insbesondere der Phase drei der Wissensvermittlung („Lösungsorientierung“) zugeordnet. Es wurden zwei unterschiedliche Workshop-Konzepte entwickelt, die sich an den heterogenen Zielgruppen orientieren und deren Bedarfe maßgeschneidert adressieren. Die Zielgruppe des ersten Workshop-Konzepts sind Mitarbeitende auf Entscheidungsebene. Der thematische Schwerpunkt liegt dabei auf der Einführung von MRK-Systemen sowie den damit verbundenen Herausforderungen und Lösungsansätzen im eigenen Unternehmen. Das zweite Workshop-Konzept richtet sich an Programmierer und Werker und zeigt Lösungsansätze zur Sensibilisierung und Einbindung der Mitarbeitenden in Entscheidungsprozesse auf. Diese Lösungsansätze werden gemeinsam mit den Teilnehmenden entwickelt und diskutiert.

An **Firmenbesuchstagen** können interessierte Unternehmen an einer auf ihre Bedarfe zugeschnittenen Führung durch den Demonstrationsbereich des SchAz teilnehmen. Es werden konkrete Beispiele diskutiert, potenzielle Lösungen getestet und Einsatzmöglichkeiten für den eigenen Betrieb reflektiert. Die Teilnehmenden erhalten eine direkte Rückmeldung bezüglich ihrer Ideen und der entwickelten Lösungsansätze. Diese Veranstaltungsform wird damit hauptsächlich in die Phase vier der Wissensvermittlung („Feedback“) eingeordnet.

Die Entwicklung des didaktischen Konzepts im SchAz basiert auf der didaktischen Analyse nach Klafki (2007), bei der die Gegenwartsbedeutung, die Zukunftsbedeutung und die exemplarische Bedeutung eine zentrale Rolle spielen. Als primäre Lehrmethode für die Wissensvermittlung im SchAz wird die **Moderationsmethode** angewendet, da es zur Qualifizierung und Akzeptanzförderung im Rahmen des SchAz einer anleitenden Person in neutraler Position, eines sogenannten Moderierenden, bedarf. Der erfahrene Moderierende besitzt in Anlehnung an Erpenbeck und von Rosenstiel personale Kompetenzen, aktivitäts- und um-

setzungsorientierte Kompetenzen, fachlich-methodische sowie sozial-kommunikative Kompetenzen. Die Moderationskompetenz setzt sich aus all diesen Kompetenzklassen zusammen.

Interessierte Unternehmen können im SchAz interaktiv das notwendige Wissen zur Einführung von MRK-Technologien im eigenen Unternehmen erwerben und somit eine persönliche Einstellung zur kollaborativen Arbeit entwickeln. Der Moderierende hält sich dabei selbst zurück und befähigt die Gruppenmitglieder, neue Ideen vor dem Hintergrund ihres eigenen Wissens- und Erfahrungsstands zu entwickeln und in das eigene Unternehmen zu übertragen.

## Evaluation und Monitoring

Im Sinne des angestrebten kontinuierlichen Verbesserungsprozesses im SchAz überprüfen die Mitarbeitenden des ICM regelmäßig die Wirksamkeit der erbrachten Bildungsdienstleistungen. Parallel dazu erfolgt ein kontinuierliches Monitoring. Diese Maßnahmen dienen der Qualitätssicherung sowie der Überprüfung der Bewertungsergebnisse und deren Ausrichtung an den vereinbarten Lernzielen. Die Beurteilung bestimmter Aktivitäten wiederum erfolgt durch die Teilnehmenden (externe Beurteilungsperspektive) sowie ggf. durch die Organisatoren (interne Beurteilungsperspektive). Je nach dem gewünschten Evaluierungsgrad basiert die Evaluierung der Aktivitäten im SchAz auf folgenden Faktoren:

- dem (unmittelbaren) Feedback der Teilnehmenden nach einer Veranstaltung,
- dem ermittelbaren Lernerfolg der Teilnehmenden,
- der anschließenden Übertragung der erlernten Inhalte auf den realen Unternehmenskontext,
- den langfristigen wirtschaftlichen Auswirkungen und
- den Auswirkungen auf den Return on Investment (sowohl bei den teilnehmenden Unternehmen als auch beim SchAz selbst).

Literatur:  
Erpenbeck, J.; von Rosenstiel, L. et al. (2017): Handbuch Kompetenzmessung. Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.  
Klafki, W. (2007): Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik: Zeitgemäße Allgemeinbildung und kritisch-konstruktive Didaktik. Beltz, Weinheim.  
Koch, E. (2010): Entwicklung interkultureller Managementkompetenz: Das Vier-Stufen-Prozess-Modell. München/Mering: Rainer Hampp Verlag.

Anzhela Preissler, Melanie Vielstich (Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW); Isabell Grundmann (ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.)

## Anhand eines didaktischen Konzepts können sich insbesondere KMU mit kollaborativen Montagesystemen vertraut machen.

Am Arbeitsplatz der Zukunft arbeiten Menschen und Maschinen Hand in Hand. Um das Personal auf die neuen, kollaborativen Formen der Arbeitsorganisation vorzubereiten, sind neue Lernprozesse gefragt, die sowohl allgemeine Inhalte als auch aufgabenspezifische Besonderheiten berücksichtigen. Herkömmliche didaktische Konzepte stoßen hier an ihre Grenzen. Im KUKoMo-Projekt haben die Projektpartner ein innovatives Lernkonzept entwickelt. Dies erfolgte in enger Kooperation mit dem neu konzipierten Schulungs- und Anwendungszentrum (SchAz), das sich mit der Qualifizierung rund um den Umgang mit kollaborativen Montagesystemen beschäftigt. Damit übernimmt das SchAz – das institutionell dem ICM zugeordnet ist – Funktionen der Information, der Qualifikation und der Erprobung von Beispiellösungen für die Mensch-Roboter-Kollaboration. Zum Aufgabenrepertoire des SchAz gehören neben Hardware, Software und Infrastruktur die Didaktik für Qualifizierungs- und Informationsmaßnahmen sowie die Organisation zur Verbreitung der Angebote.

## Sensibilisieren, informieren und ausprobieren

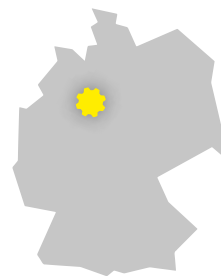
Die Angebote des SchAz richten sich insbesondere an KMU. Mithilfe von ausgewählten Veranstaltungsformaten werden Mitarbeitende auf Entscheidungs- bzw. Leitungsebene sowie Maschinenbediener/-innen, Arbeitsvorbereiter/-innen und sonstige Interessentinnen und Interessenten für das Thema Mensch-Roboter-Kollaboration sensibilisiert und aufgeklärt.

Dabei werden Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekte berücksichtigt. Demonstratoren vor Ort zeigen allgemeine, aber auch unternehmensspezifische Anwendungsfälle und ermöglichen Mitarbeitenden, die selbst Programmierungsversuche unternehmen, sich auszuprobieren und zu lernen. Somit werden Unternehmen Möglichkeiten aufgezeigt, innovative Technologien in der Realität zu testen und die Einsatzmöglichkeiten im eigenen Betrieb zu prüfen.

## Lehrformate und Lehrmethoden

Basierend auf einer inhaltlichen Analyse wurden konkrete und zielgruppenspezifische Konzepte für die drei Lehrformate der Wissensvermittlung im SchAz erarbeitet. Dazu zählen: (1) Informationsveranstaltungen (bspw. in Form von Thementagen oder World Cafés), (2) zielgruppenspezifische Workshops sowie (3) Firmenbesuchstage. Die Phasen der Wissensvermittlung (vgl. Bild 1) orientieren sich dabei an der Sensibilisierung, die vor der Problematisierung des Themas stattfindet, an der anschließenden Lösungsorientierung und dem abschließenden Feedback (Koch 2010).

Die geplanten **Informationsveranstaltungen** zu festgelegten Themenschwerpunkten sind den ersten beiden Phasen der Wissensvermittlung („Sensibilisierung“ und „Problematisierung“) zugeordnet. Diese Veranstaltungsform richtet sich an die beteiligten Akteure mit dem Ziel eines gemeinsamen und offenen Austausches. Neben Impulsvorträgen werden Anwendungsfälle dargestellt, Best-Practice-Fälle erläutert und aktuelle Themen diskutiert. Demonstratoren laden zudem zum Erproben und zum Expertenaustausch ein.



Projekt SafeMate

# MRK IN DER LERNFABRIK

Dennis Pischke (Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik); Stefan Stüring (LIVINGSOLIDS GmbH)

## Anhand konkreter Montageaufgaben können Interessierte den Umgang mit MRK – von der Planung bis zur konkreten Umsetzung – in praxisnaher Umgebung erlernen.

Viele KMU verfügen über keinerlei Erfahrungen mit MRK. Um insbesondere diesen Unternehmen praktische Einblicke in kollaborative Montagesysteme zu geben, wurde am Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Montagetechnik (match) – beide gehören zur Leibniz Universität Hannover und sind Partner im Projekt SafeMate – ein entsprechendes Angebot geschaffen, das in die bereits am IFA bestehende Lernfabrik integriert ist.

### Montageobjekt Modellhubschrauber als Beispiel für variantenreiches Produkt

Die IFA Lernfabrik wurde im Jahr 2000 gegründet und umfasst einen Hallenbereich von ca. 150 Quadratmetern. Die Schulungsschwerpunkte liegen im Bereich der Fabrikplanung, der Produktionsplanung und -steuerung sowie der Lean Production. Die IFA Lernfabrik bildet den Herstellungsprozess eines Montageobjekts über alle Schulungsangebote hinweg ab und greift zu diesem Zweck auf zwei CNC-Fräsmaschinen, sechs manuelle Montagestationen sowie einen eigenen Lagerbereich zurück. Die Montagestationen sowie sämtliche Vorrichtungen zur Materialweitergabe und -bereitstellung lassen sich beliebig anordnen. Dadurch können die Teilnehmer das Produktionssystem flexibel umgestalten. Als Montageobjekt kommt ein Modellhubschrauber mit den Abmaßen 34x16x15 Zentimeter zum Einsatz. Er kann aus 13 verschiedenen Komponenten in vier unterschiedlichen Varianten

montiert werden. Die variantenbildenden Produktbestandteile umfassen die Frontscheibenfarbe sowie die Anzahl der Heckrotorblätter. Eine Taktzeitpreizung resultiert aus den vorhandenen Varianten bisher nicht.

### Schulungskonzept zur Vermittlung MRK-relevanter Grundlagen

Der Aufbau der im Projekt SafeMate konzipierten eintägigen Schulung gliedert sich in drei aufeinanderfolgende Schulungsrunden (siehe Bild 1). In der ersten 45-minütigen Spielrunde haben die Teilnehmer in einer definierten Ausgangslage die Aufgabe, so viele bestellte Hubschrauber wie möglich in der vorgegebenen Lieferzeit von jeweils zwei Minuten zu montieren. Nach der ersten Spielrunde erfolgt zunächst eine gemeinsame systematische Problemaufnahme, bevor die Teilnehmer eine Einführung zu ausgewählten Methoden zur Optimierung der Produktion und in die theoretischen Grundlagen von MRK erhalten.

Basierend auf den Inhalten der Theorieeinheit erhalten die Teilnehmer vor der zweiten Spielrunde die Möglichkeit, potenzielle Lösungen zu diskutieren und umzusetzen. Die Teilnehmer genießen bei der Umgestaltung der Produktion einen hohen Freiheitsgrad, wodurch die Effekte der eigenen Entscheidung in der folgenden Spielrunde direkt erlebbar werden. Mögliche Anpassungen in Vorbereitung der nächsten Spielrunde umfassen u.a. das Verschieben von Arbeitsinhalten zur Austaktung der Montagelinie, die Anpassung der verwendeten Art der Materialbereitstellung, die Anpassung des Produktionslayouts, das Verschieben des Kundenentkopplungspunktes sowie die Einführung

## SCHULUNGSAGENDA

8.15 UHR	Vorstellung Teilnehmer
8.45 UHR	Einführung Planspiel
9.30 UHR	1. SPIELRUNDE (45 MIN.)
10.15 UHR	Pause
10.20 UHR	Auswertung und Problemaufnahme
10.45 UHR	1. THEORIEBLOCK
11.30 UHR	Problemlösung
12.00 UHR	Mittag in der Mensa
12.45 UHR	Umbau
13.25 UHR	2. SPIELRUNDE (45 MIN.)
14.10 UHR	Pause
14.15 UHR	Auswertung und Problemaufnahme
14.40 UHR	2. THEORIEBLOCK
15.25 UHR	Problemlösung
15.55 UHR	Pause
16.05 UHR	Umbau
16.45 UHR	3. SPIELRUNDE (45 MIN.)
17.30 UHR	Pause
17.35 UHR	Auswertung
17.50 UHR	Feedback

Bild 1: Agenda der MRK-Grundlagenschulung

eines Produktions-Kanbans (Kanban ist eine Methode der Produktionssteuerung, die sich am Materialverbrauch orientiert). Darüber hinaus treffen die Teilnehmer die Entscheidung, inwieweit MRK in den kommenden Spielrunden eingesetzt werden soll. Die Teilnehmer erhalten als Entscheidungsgrundlage die Methoden zur Potenzialbestimmung und Aufgabenzuordnung (siehe Kapitel 4 „Konzeption und Gestaltung kollaborativer Montagesysteme“), Informationen zur ergonomischen Belastung an den einzelnen Montagestationen sowie allgemeine organisatorische Informationen zu dem Arbeitsplatz, die für den Potenzialcheck von Relevanz sind, wie beispielsweise die Betriebsstunden pro Jahr. Die Teilnehmer führen zunächst die ersten beiden Stufen des Potenzialchecks durch und prüfen somit, an welchen Arbeitsplätzen ein entsprechendes Potenzial vorhanden ist und welche Teilprozesse sich gut eignen, um diese dem Roboter zu übergeben. Darüber hinaus erhalten die Teilnehmer zu den einzelnen Teilprozessen jeweils eine Methods-Time-Measurement (MTM)-Analyse sowie den Montagevorranggraphen, um abzuschätzen, inwieweit sich die Taktzeit durch den MRK-Einsatz

reduzieren lässt und ob ggf. Arbeitsinhalte verschoben werden müssen. Soweit möglich, ist es Aufgabe der Teilnehmer, einen der beiden zur Verfügung stehenden Roboter selbst für die Verwendung in der zweiten Spielrunde zu programmieren.

Die Spielrunden 2 und 3 laufen wie Spielrunde 1 ab, d.h., dass nach Abschluss der zweiten Spielrunde erneut eine gemeinsame Auswertung erfolgt. Basierend auf dieser Einschätzung besteht zur dritten Spielrunde die Möglichkeit, weitere Maßnahmen zu ergreifen und den gewählten Anwendungsfall für die Roboter noch einmal zu verändern, bis sich die Produktion in der letzten Runde in einem optimierten Zustand befindet, der den geforderten Kundentakt einhält und so die vom Kunden gewünschte Produktionsmenge in der gewünschten Lieferzeit abbilden kann.

### Technische Integration flexibler MRK-Systeme in die Lernfabrik

Zum Einsatz kommen dabei zwei unterschiedliche Roboter – der Panda der FRANKA EMIKA GmbH und der LBR iiwa der KUKA AG. Sie repräsentieren die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten, die Leichtbauroboter aktuell bieten. Die Teilnehmer sollen unterschiedliche Arten der Roboterprogrammierung erfahren, die unterschiedlichen Stärken und Schwächen der jeweiligen Systeme kennenlernen und ein Gefühl dafür bekommen, inwieweit sich unterschiedliche Investitionsvolumina auf den Anwendungsbereich und jeweilige Vor- und Nachteile des gewählten Systems auswirken.

Jeder der beiden Roboter befindet sich auf einem mobilen, höhenverstellbaren Tisch, sodass sich die Roboter flexibel in der Produktionsumgebung anordnen lassen. Jede der sechs vorhandenen, ebenfalls höhenverstellbaren Montagestationen verfügt über eine Dockingstation, über die sich die beiden Robotertische pneumatisch mit der Montagestation koppeln lassen. Zusätzlich passen sich die Tische der Roboter über einen Sensor automatisch an die Höhe des Montageplatzes an, sodass die einzelnen Teilprozesse zur dauerhaften Verwendung nur einmal programmiert werden müssen.

Um eine möglichst große Anzahl an Prozessen durch den MRK-Einsatz zu unterstützen, sind drei Applikationsarten am System installiert – eine Schraubapplikation, ein Vakuumgreifer sowie ein Backengreifer. Ein Greiferschnellwechselsystem ermöglicht zudem einen schnellen Wechsel zwischen den Applikationen. Zusätzlich dazu verfügen beide Tische über einen definierten Bereich zur Materialbereitstellung bzw. Produktanlieferung. Die Materialbereitstellung erfolgt über eine standardisierte Box, in der – je nach bereitzustellendem Bauteil – unterschiedliche Inlays verwendet werden. Diese wurden bauteilspezifisch im 3-D-Druckverfahren hergestellt.





Bild 2: Mobiler Einsatz des kollaborativen Roboters in der IFA-Lernfabrik, Quelle: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik

### Gestaltung MRK-tauglicher Teilprozesse

Um weitere MRK-Prozesse zu integrieren, wurde das Montageobjekt um drei weitere variantenbildende Bauteile ergänzt. Damit ist es möglich, an dem Modellhubschrauber einen zweiten Sitz, einen Suchscheinwerfer und spezielle Kufen zur Wasserlandung zu montieren. Insgesamt ergeben sich durch diese Erweiterung 32 unterschiedliche Produktvarianten.

Um die Teilnehmer vor eine weitere Herausforderung zu stellen, kann eine Taktzeitspreizung eingeführt werden. Sie bietet die Möglichkeit, den Engpass des Produktionssystems zwischen den Spielrunden gezielt zu verändern. Mithilfe von MRK sind die Teilnehmer in der Lage, diesen Engpässen gezielt entgegenzuwirken.

Darüber hinaus wurden die neuen Varianten so gestaltet, dass es für die Teilnehmerin oder den Teilnehmer teilweise nicht möglich ist, das entsprechende Bauteil ohne zusätzliche Montagevorrichtung bzw. ohne dritte Hand zu montieren. So lassen sich die neuen Kufen nur von unten an den Hubschrauber montieren. Dies

hat zur Folge, dass die vorhandenen Montagevorrichtungen für diesen Montageschritt nicht mehr verwendbar sind. Die Lösung bietet der Einsatz des Roboters, der den Hubschrauber aufnimmt und in der für die Montage notwendigen Position bereithält. In dieser Position ist es für die Teilnehmer darüber hinaus deutlich einfacher, die Verkabelung des Hubschraubers vorzunehmen, sodass auch ergonomische Vorteile erlebbar werden. Optional können sich die Teilnehmer mithilfe eines Alterssimulationsanzugs<sup>1</sup> in die Lage eines älteren Mitarbeitenden versetzen. So können sie erfahren, wie MRK Alterserscheinungen - z.B. eingeschränktes Sehvermögen und schlechtere Feinmotorik - abmildern und die resultierende gestiegene Bearbeitungszeit reduzieren kann.

Da die Produktionsumgebung in der zweiten und dritten Spielrunde durch die Teilnehmerentscheidungen immer individuell gestaltet ist, sollten die Roboter ein möglichst breites Spektrum an potenziellen Prozessen abdecken. Durch die Ausrichtung der Schulung auf maximale Flexibilität ist es nur folgerichtig, diesen Aspekt auch bei der MRK-Integration im Rahmen der Beispiel-

aufgabe zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck erfolgt die Bewertung der einzelnen Arbeitsplätze und -stationen gemäß dem in SafeMate erarbeiteten Potenzialcheck. Die daraus resultierenden Prozessbausteine werden in einem nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Eignung entweder dem Menschen oder dem Roboter zugeordnet. Die Bandbreite an resultierenden Prozessen deckt dabei Kooperationsformen von der reinen Koexistenz - in Form einfacher Pick-&-Place-Anwendungen - bis hin zur unmittelbaren Kollaboration ab, bei der beispielsweise der Roboter dem Menschen das Montageobjekt in der benötigten geometrischen Ebene bereitstellt und der Mensch zeitgleich seine Arbeiten am Montageobjekt durchführen kann.

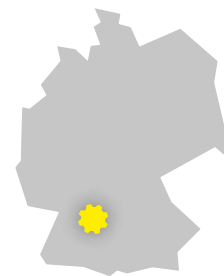
### Ausblick: MRK-Spezialthemen und Demoaanwendungen für Unternehmen

Es ist geplant, das beschriebene Schulungskonzept zukünftig noch um spezielle Themen zu erweitern. Diese Erweiterung zielt vor allem auf einzelne MRK-Aspekte ab - z.B. den Einsatz unterschiedlicher Sicherheitstechniken - und richtet sich an fortge-

schriftene Anwender. Darüber hinaus wurde ein MRK-Arbeitsplatz konzipiert, der interessierten Unternehmen für Demonstrationsanwendungen zur Verfügung steht. Dieser Arbeitsplatz umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Roboter und Sicherheitslösungen und bietet Unternehmen die Möglichkeit, ihre Ideen für einen MRK-Einsatz prototypisch umzusetzen und auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit hin zu überprüfen.

<sup>1</sup> Weitere Informationen unter [www.agesuit.com](http://www.agesuit.com)





Projekt ROKOKO

# LERNPROJEKT MENSCH-ROBOTER- KOLLABORATION

David Kremer (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO); David Kling (ZF Friedrichshafen AG)

## Kollaborative Mensch-Roboter-Arbeitsprozesse in drei Schritten kennenlernen – ein neues Lernkonzept erläutert und veranschaulicht den Umgang mit MRK mithilfe eines systematischen Ansatzes.

Unternehmen verändern sich auf dem Weg zu Industrie 4.0 nicht nur in technologischer Hinsicht. Auch die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Technik wandelt sich: Neue Technologien übernehmen Aufgaben, die bisher Mitarbeiter ausgefüllt haben; gleichzeitig entstehen neue Aufgaben für Mitarbeiter. Dieser Aufgabewandel erfordert eine gezielte Qualifizierung der Mitarbeiter.

**Digitalisierung verlangt neue Qualifizierungskonzepte**  
Mehr Qualifizierung ist auch erforderlich, weil die Digitalisierung und die Automatisierung die Transparenz der Arbeitsabläufe verringern. In der digitalen Produktion verrät der Anblick einer Anlage oder eines Roboters wenig über die komplexen Datenströme und Steuerungsvorgänge, die dem Produktionsablauf zugrunde liegen. Das Wissen über diese abstrakten Zusammenhänge entzieht sich dem intuitiven Verständnis und muss über den Weg des Theorielernens aufgebaut werden. Dies verlangsamt und verteuert den Kompetenzaufbau und schließt viele Beschäftigte vom Verständnis der digitalen Produktion aus. Erforderlich sind im Kontext von Industrie 4.0 deshalb Methoden, die intuitives Lernen unterstützen und Mitarbeiter in die Planung, Qualifizierung und Optimierung neuer Arbeitsprozesse einbinden.

### Lernerfolg durch Partizipation

Dieses Ziel unterstützt das „Lernprojekt Mensch-Roboter-Kollaboration“, das vom Fraunhofer IAO für die partizipative Gestal-

tung und Qualifizierung in MRK-Projekten entwickelt wurde. In drei Schritten führt die Methode die Teilnehmer wie z.B. Planer, Meister und Mitarbeiter durch die Entwicklung kollaborativer Mensch-Roboter-Arbeitsprozesse (Bild 1).

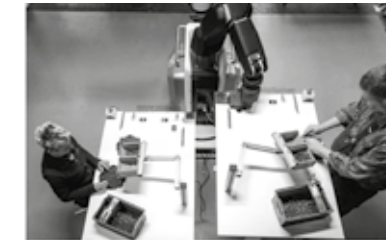
In Phase 1 werden die Abläufe des MRK-Arbeitsplatzes im (manuellen) Ist- und im (MRK-)Plan-Zustand in Form von Prozessmodellen veranschaulicht. Das Besondere: Das Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik steht im Vordergrund und wird allgemeinverständlich und anschaulich dargestellt.

### Menschen übernehmen Rolle des Roboters

In Phase 2 werden die modellierten Prozessschritte in ein Rollenspiel überführt. Darin übernehmen die Teilnehmer die vorher modellierten Prozess-Rollen, z.B. von Montage- und Kommissionier-Mitarbeitern, aber auch von Robotern, Mess- und Steuerungssystemen oder Zuführtechnik. Das bedeutet, dass die späteren MRK-Nutzer auch in die Rolle der technischen Elemente des MRK-Arbeitsplatzes schlüpfen, sich wie diese verhalten und diese in ihrer Interaktion erleben. Übernimmt eine Teilnehmerin oder ein Teilnehmer z.B. die Rolle des Roboters, erhält sie oder er zunächst Eingangsdaten (z.B. Aufforderung „Zahnrad greifen“) von der Prozesssteuerung, führt Bewegungen des Greifarms und des Greifers durch, erhält von den Sensoren Rückmeldungen (z.B. „Zahnrad mit Durchmesser X gegriffen“), führt Berechnungen durch, entscheidet auf dieser Basis über die Einhaltung von Zielwerten (z.B. „Einklemmen von menschlichem Finger ausgeschlossen“) und versendet am Ende des Prozesses Ergebnisdaten an die Prozesssteuerung (z.B. „Zahnrad erfolgreich an Mitarbeiter übergeben“).

## 1 ARBEITSPROZESS MODELLIEREN

Unterschiede zwischen IST- und SOLL-Arbeitsplatz erkennen



ABLÄUFE DES DIGITALISIERTEN, BZW. TEILAUTOMATISIERTEN ARBEITSPLATZES VERSTEHEN

## 2 ROLLENSPIEL DURCHFÜHREN

Zusammenspiel von Mensch, Technik und Software nachvollziehen



BEDIENUNG UND KOOPERATION IM NEUEN ARBEITSPROZESS SPIELERISCH TESTEN

## 3 MRK-ARBEITSPROZESS BEWERTEN

Arbeitsqualität, Prozessqualität, Zusammenarbeit, Fehlerquellen u.a.



ARBEITSPROZESS BEWERTEN UND VERBESSERN – SYSTEMKOMPETENZ UND AKZEPTANZ STEIGERN

Bild 1: Vorgehen im „Lernprojekt Mensch-Roboter-Kollaboration“, Quelle: Fraunhofer IAO

Zusammenhänge zwischen den technischen Komponenten und den menschlichen Arbeits- und Steuerungsvorgängen werden im Rollenspiel spielerisch erfahren und intuitiv nachvollzogen. Aus Karton nachgebaute Arbeitsgegenstände wie Material und Werkzeug helfen, sich in den Arbeitsablauf am MRK-Arbeitsplatz hineinzusetzen. Bild 2 zeigt die Durchführung des Rollenspiels mit Mitarbeitern der ZF Friedrichshafen AG an einem Cardboard-Nachbau des MRK-Arbeitsplatzes.

### MRK-Prozesse technisch und arbeitswissenschaftlich bewerten

In Phase 3 werden die modellierten Prozessschritte in eine Bewertungssystematik überführt. Die Bewertung, die die Teilnehmenden gemeinsam vornehmen, macht die Unterschiede zwischen dem manuellen und dem MRK-Zustand des Arbeitsplatzes sichtbar, z.B. im Hinblick auf Ergonomie, Sicherheit, funktionale Unterstützung, Zeit oder Qualität. Die Bewertungsergebnisse sensibilisieren auch für die arbeitswissenschaftlichen Gestaltungsziele gesundheits- und motivationsförderlicher Arbeit. Auf diese Weise bilden sie einen Ausgangspunkt für die nachträgliche Optimierung der MRK-Arbeitsprozesse. So gibt beispielsweise das Bewertungsmerkmal „Vollständigkeit der Aufgabe“ Auskunft darüber, ob der Arbeitsprozess nur durchführende oder auch vorbereitende, kontrollierende oder organisierende Aufgaben enthält.

Der Vergleich zwischen dem manuellen Ausgangs- und dem teilautomatisierten MRK-Arbeitsplatz macht zudem deutlich, wie viele und welche Aufgaben vom Menschen zur Technik wandern und umgekehrt (Bild 3).

Die Erfahrungen aus der Anwendung des Lernprojekts Mensch-Roboter-Kollaboration bei der ZF Friedrichshafen AG zeigen, dass die Mitglieder des MRK-Projekteams (Meister, Planer

und Technologen) von der Strukturierung und spielerischen Darstellung der Mensch-Technik-Interaktion auf der Planungsebene profitieren. Auf der Ebene der operativen Mitarbeiter wurde ersichtlich, dass der Detaillierungsgrad der Informationen über die (digitalen) Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des MRK-Arbeitsplatzes bedarfsgerecht an den Wissensbedarf der Mitarbeiter und die Qualifizierungsstrategie des Unternehmens angepasst werden muss.

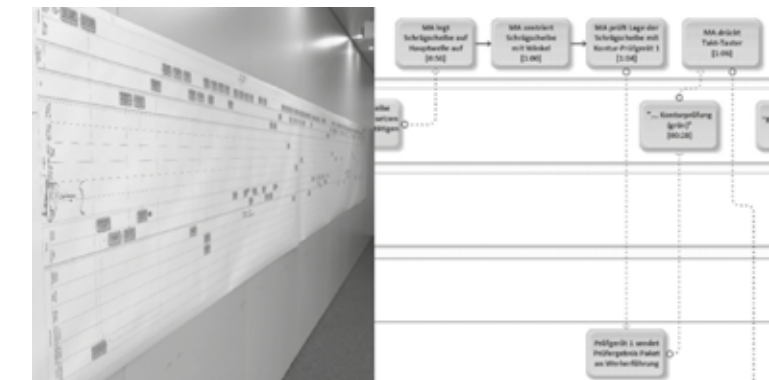
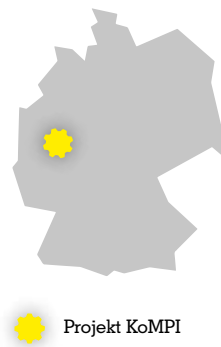


Bild 2: Gesamtmodell und Ausschnitt des Prozessmodells zum Arbeitsablauf am MRK-Arbeitsplatz für die Getriebemontage der ZF Friedrichshafen AG, Quelle: Fraunhofer IAO



Bild 3: Durchführung des Rollenspiels zum Arbeitsablauf des MRK-Arbeitsplatzes mit Mitarbeitern der ZF Friedrichshafen AG, Quelle: Fraunhofer IAO



Projekt KoMPI

# BEFÄHIGUNG VON OPERATIVEN MITARBEITERN UND PLANUNGSINGENIEUREN

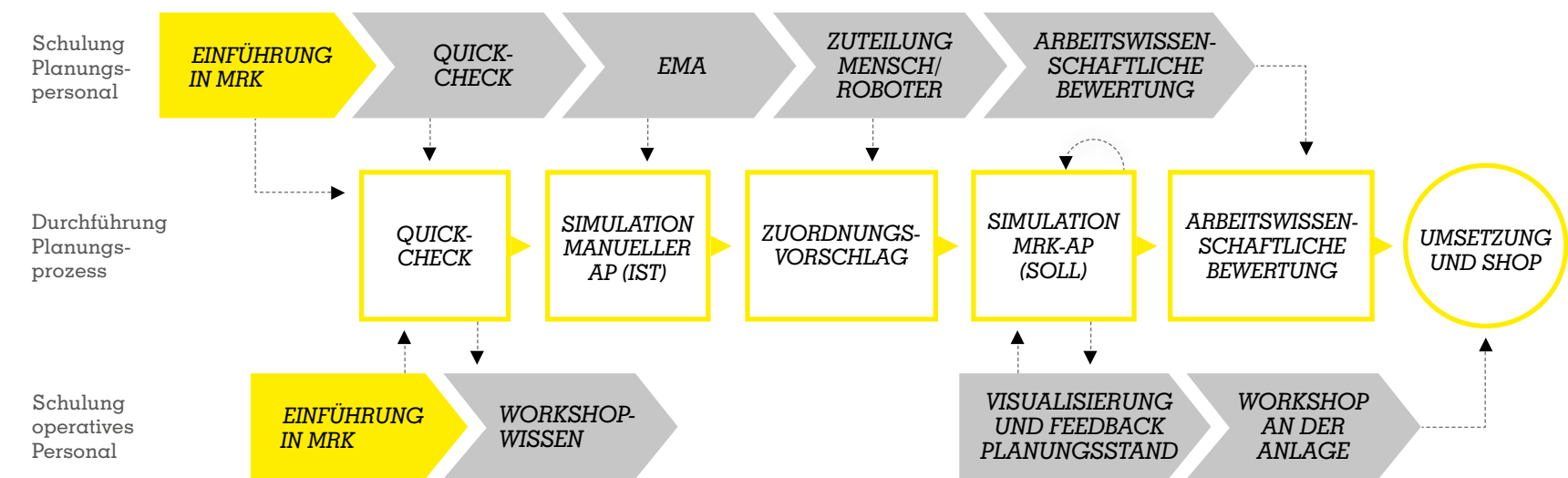


Bild 1: Schulungen entlang des Planungsprozesses

Vanessa Weßkamp, Ann-Kathrin Ermer, Tatjana Seckelmann, André Barthelmey, Prof. Dr. Jochen Deuse (Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, IPS); Martin Jung, Michael Wissing (cognitas Gesellschaft für Technik-Dokumentation GmbH)

**Schulungen sollten ganz oben auf der Agenda von Unternehmen stehen, die über MRK nachdenken. Frühzeitig qualifizieren und dabei auf einen Mix aus internetbasierten und klassischen Lernmethoden setzen – so könnte ein sinnvolles Konzept aussehen.**

Der Einsatz kollaborativer Montagesysteme ist nur dann erfolgreich, wenn das Personal in der Lage ist, die neue Technologie sinnvoll einzusetzen. Eine entsprechende Befähigung hat mehrere Vorteile:

1. Obwohl MRK in den Medien sehr präsent ist, sind detaillierte Informationen über den wirtschaftlichen Einsatz und die Integration in bestehende Arbeitssysteme nur begrenzt verfügbar. Je früher diese Informationen aber einem Unternehmen zur Verfügung stehen, desto erfolgversprechender ist der gesamte Planungsprozess.
2. Der Einsatz von MRK könnte insbesondere für Unternehmen interessant sein, für die die bisher verfügbaren Vollautomatisierungslösungen nicht wirtschaftlich waren. Gerade solche Unternehmen mit wenig Automatisierungserfahrung sind gefordert, die Grundlagen für MRK schon möglichst früh im Planungsprozess zu schaffen.
3. Die Qualifizierung hinsichtlich der Technologie ist ein Schlüsselfaktor für die Akzeptanz durch die Mitarbeitenden und somit für den späteren Erfolg im laufenden Betrieb.

## Zielgruppen und Qualifikationsbedarfe identifizieren

Um eine bedarfsgerechte Qualifizierung zu ermöglichen, muss festgelegt werden, welche Beschäftigten wann und in welchem Umfang zu befähigen sind. Hierfür sind sowohl die verschiedenen Stufen des Planungsprozesses als auch die im Prozess beteiligten Rollen zu untersuchen. Der Planungsprozess der im Projekt KoMPI entwickelten Systematik besteht aus den Schritten Quick-Check, Simulation des manuellen Arbeitssystems, Zuordnung der Aufgaben zu Mensch und Roboter, Simulation des MRK-Arbeitsplatzes und arbeitswissenschaftliche Bewertung (siehe Bild 1). Für diese Schritte haben die Projektpartner ein entsprechendes Schulungsprogramm entwickelt. Bei der Simulation kam die Simulationssoftware ema Work Designer der imk automotive GmbH zum Einsatz.

Hauptzielgruppe der Qualifizierung sind Planungsingenieurinnen und -ingenieure. Eine weitere Zielgruppe ist das operative Personal, das mit dem realisierten System arbeitet. Die Werkerinnen und Werker müssen i.d.R. zwar nicht jedes Detail der Technologie kennen, jedoch wirkt sich ein Verständnis der Technologie akzeptanzfördernd aus.

## Mit Blended Learning effizient schulen

Das Ziel bei der Entwicklung des MRK-Schulungsprozesses bestand darin, einen schnellen Einstieg in den Planungsprozess ohne vorherige Teilnahme an zeitaufwendigen und kostenintensiven Trainings zu ermöglichen. Hier bietet E-Learning einen

guten Ansatz, ein zeit- und ortsunabhängiges Lernen umzusetzen. Einige Bestandteile des Schulungsprozesses, wie beispielsweise die Bedienung der physischen Anlage, lassen sich jedoch mittels E-Learning nur schwer vermitteln. Aus diesem Grund wurde ein Blended-Learning-Konzept gewählt, das auf einen Mix aus internetgestützten Lernmethoden und klassischen Methoden, z.B. Workshops, setzt. Mit E-Learning lassen sich sowohl operative Mitarbeitende als auch Planungsingenieurinnen und -ingenieure an die Themen MRK und Quick-Check heranzuführen. Mithilfe von kurzen Texten, Videos und Übungen ist das Training interaktiv gestaltet und für verschiedene Lerntypen geeignet. Ein weiteres Training an der fertig geplanten Anlage komplettiert den Lernprozess.

## MRK-Initialschulung

Das erste Modul des Qualifizierungskonzepts bildet die MRK-Initialschulung, die als E-Learning konzipiert ist. Diese Schulung setzt in einer sehr frühen Phase des Planungsprozesses an und ist für das Planungs- und für das operative Personal konzipiert. Die MRK-Initialschulung behandelt drei wesentliche Themen:

- Allgemeine Einführung
- Sicherheit
- Planung und Einführung

In jedem Themenbereich sind explizite Lernziele für die entsprechenden Rollen definiert. In der allgemeinen Einführung werden insbesondere die eingesetzten Roboter in Abgrenzung

zu klassischen Industrierobotern, ihre Anwendungsgebiete sowie ihr Einfluss auf die Arbeitsplätze vorgestellt. Während Planungsingenieurinnen und -ingenieure einen allgemeinen Überblick erhalten sollen, werden den operativen Mitarbeitenden vor allem mögliche Auswirkungen auf ihren Arbeitsplatz aufgezeigt. Dabei ist es wichtig, offen mit Vor- und Nachteilen umzugehen.

Beim Thema Sicherheit werden Roboter-inhärente sowie externe Sicherheitstechnologien vorgestellt. Während dabei für das Planungspersonal eher Normen und Richtlinien relevant sind, steht für das operative Personal die sichere Zusammenarbeit mit dem Roboter im Fokus sowie die Akzeptanzförderung durch Information und den Abbau von Ängsten.

Im dritten Themenbereich, der Planung und Einführung, wird die erarbeitete Planungssystematik erläutert. Die Lernenden erfahren, was auf sie zukommt, aber auch an welcher Stelle welche Rollen oder betriebsinterne Organe beteiligt sind und mitwirken können. In der Schulung für Planungsingenieurinnen und -ingenieure werden Strategien thematisiert, die nicht nur der technischen Planung dienen, sondern auch die Beteiligung und Akzeptanz der operativen Mitarbeitenden fördern sollen.

## Quick-Check-Schulung

Entsprechend dem im KoMPI-Projekt entwickelten Planungs-vorgehen erfolgt als nächster Schritt die Durchführung einer MRK-Potenzialanalyse für bestehende, manuelle Arbeitsplätze. Als geeignetes Werkzeug hierfür wurde ein Quick-Check entwi-



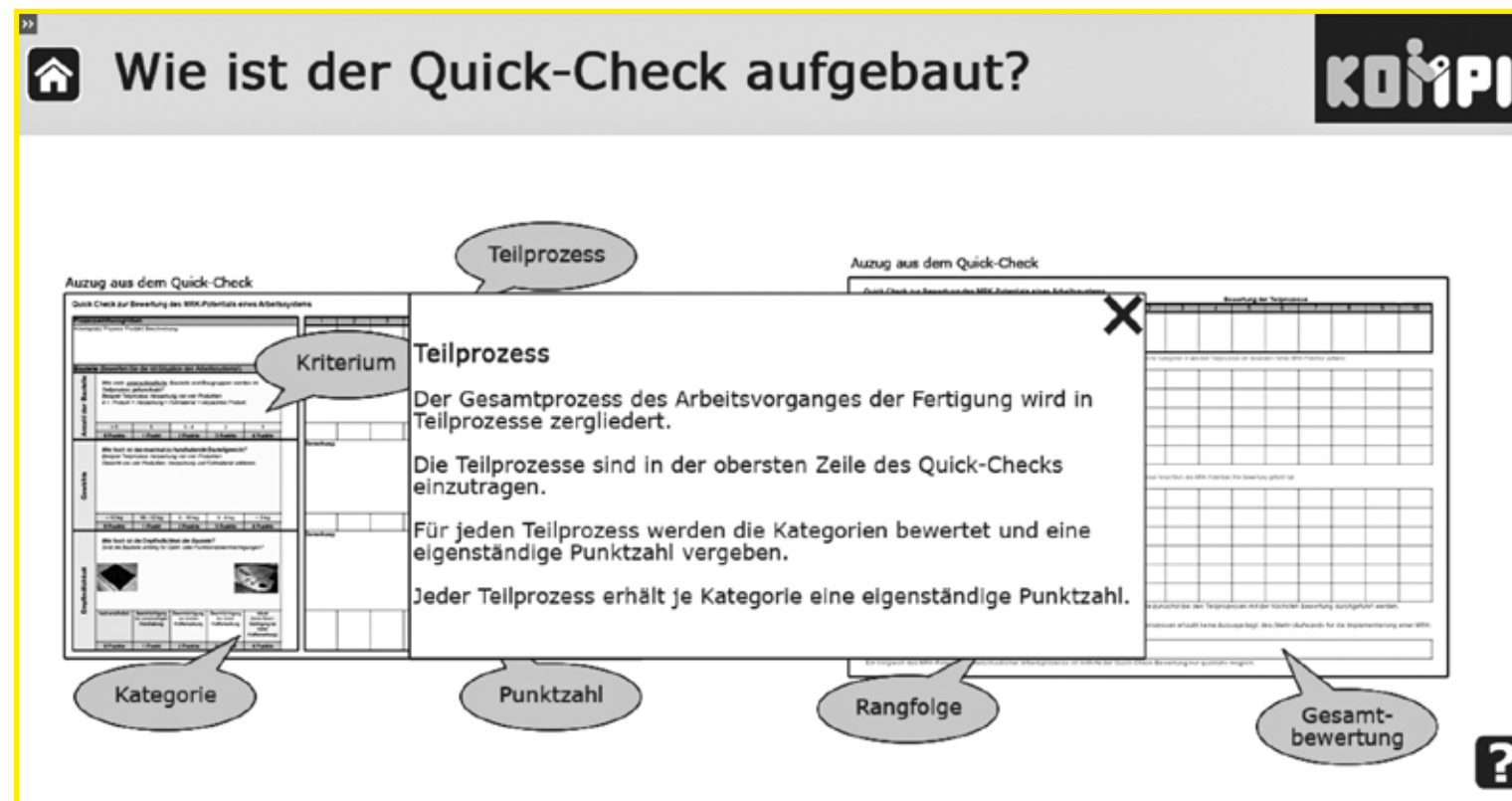


Bild 2: Interaktive Funktionalität

ckelt. Obwohl der Quick-Check auch ohne Schulung anwendbar ist, erleichtert ein zusätzliches Schulungsmodul den korrekten Einsatz. Insbesondere wird so sichergestellt, dass die Bewertungen intersubjektiv vergleichbar ausfallen; beispielsweise bei „relativen“ Begriffen wie „Formstabilität“ können unterschiedliche Einschätzungen reduziert werden. In der Schulung werden daher die verschiedenen Kategorien und Fragen aus dem Quick-Check anhand von Beispielen erläutert. Wie auch bei der MRK-Initialschulung ist die Schulung interaktiv gestaltet, sodass der Nutzer bedarfsgerechte Informationen erhält, wenn er auf die entsprechenden Felder oder Gegenstände eines Bildes klickt (siehe Bild 2).

In der Schulung werden verschiedene Medien zur Vermittlung der Inhalte eingesetzt. Teil beider E-Learning Module (MRK-Initialschulung und Quick-Check-Schulung) sind Übungsaufgaben, die sowohl zur Einübung des Erlernten als auch zur Lernkontrolle dienen.

Obwohl das E-Learning-Modul „Quick-Check“ für Planungsingenieurinnen und -ingenieure gedacht ist, ist es empfehlenswert, bei der Durchführung der Potenzialanalyse auch das operative Personal, beispielsweise in Form eines Workshops, einzubinden. Wenn diese Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter über wichtiges Prozesswissen in Bezug auf ihren jeweiligen Arbeitsplatz verfügen, können sie wichtige Hinweise zu Prozess- oder Ausführungsdetails geben.

### Mensch-Maschine-Schnittstellen unterstützen die Qualifizierung

Lernförderliche Mensch-Maschine-Schnittstellen können ebenfalls einen Beitrag zur Befähigung des Personals leisten. Sie ermöglichen beispielsweise den Einsatz einer speziell entwickelten Augmented-Reality(AR)-Anwendung, in der Realbild und simuliertes Arbeitssystem gemeinsam dargestellt werden (siehe Bild 3). Der Einsatz von AR führt zu einem besseren Verständnis der Technologie. Zudem sind über diese Technologie weitere Assistenzsysteme möglich, die z.B. zum selbstständigen Beheben von Störungen an der Anlage anleiten.

### Schulungen an realen Anlagen

Erfahrungen während der Projektlaufzeit sowie eine Studie mit einem kleinen Probandenkreis haben gezeigt, dass insbesondere die Besichtigung und die Bedienung realer MRK-Anlagen die Akzeptanz erhöhen. Daher ist es empfehlenswert, vor der Umsetzung der eigentlichen Anwendung bereits Anlagen auf Messen, bei Instituten oder Herstellern zu besichtigen. Exemplarisch ausgestaltete und durchgeführte modulare Schulungen an realen Anlagen haben gezeigt, dass es möglich ist, innerhalb eines Tages die Grundlagen der Bedienung zu erlernen. Modular aufgebaute realitätsnahe Schulungen lassen sich einfach auf verschiedene Zielgruppen anpassen, auch über die Schulung der operativ Mitarbeitenden hinaus.

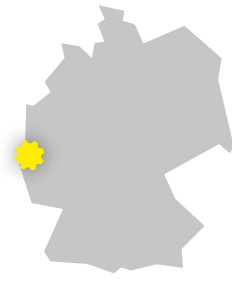


Bild 3: Der simulierte Arbeitsplatz in der AR-Anwendung Quelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme

### Fazit

Die erfolgreiche Planung und Einführung neuer Technologien im Unternehmen kann nur gelingen, wenn alle Beschäftigten entsprechend befähigt werden. Hierzu müssen Planungsingenieurinnen und -ingenieure die technologischen Grundlagen und die korrekte Durchführung der einzelnen Prozessstufen kennen. Außerdem ist es empfehlenswert, operativ Mitarbeitende ebenfalls zu schulen und in den Planungsprozess einzubeziehen. Zu diesem Zweck wurden im KoMPI-Projekt Module u.a. zur MRK-Einführung und für einen Quick-Check entwickelt und in einem Blended-Learning-Konzept umgesetzt. Darüber hinaus wurden Konzepte für Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickelt, die es durch zusätzliche Technologien wie AR ermöglichen, operativ Mitarbeitende zu schulen, sodass diese umfangreichere Aufgaben übernehmen können.





Projekt ARIZ

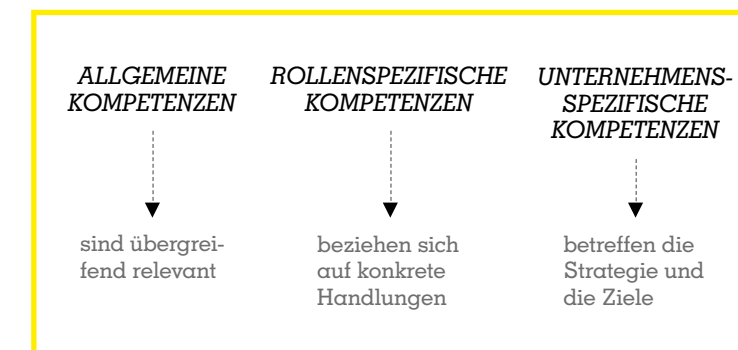
# ARBEITSPLATZNAHE QUALIFIZIERUNG

ZIELGRUPPE	ZIELGRUPPE	ZIELGRUPPE
<b>DIREKTE PRODUKTIONS-MITARBEITER</b>	<b>INDIREKTE PRODUKTIONS-MITARBEITER</b>	<b>FÜHRUNGS-KRÄFTE</b>
Werker Anlagenbediener Logistiker Instandhalter Wartungstechniker	Arbeitsplaner Betriebsmittelplaner Qualitätsingenieure Arbeitssicherheitsfachkräfte Produktionsplaner	Teamleiter Schichtleiter Produktionsleiter Werkleiter Oberes Management

Tabelle 1: Beispielhafte Zielgruppen für die Qualifizierung mit relevanten Rollen

## Relevante Handlungen der Rollen ermitteln und erforderliche Kompetenzen ableiten

Basierend auf den zu ermittelnden Handlungen der identifizierten Rollen, kann für jede Rolle ein Soll-Kompetenzprofil aufgebaut werden. Dabei lassen sich die erforderlichen Kompetenzen aller Rollen wie folgt klassifizieren:



Von besonderer Bedeutung für die MRK-Einführung sind rollenspezifische Kompetenzen in den Bereichen Arbeitsorganisation, Wirtschaftlichkeitsrechnung und Arbeitsschutz. Die allgemeinen und unternehmensspezifischen Kompetenzen sind dagegen für alle Rollen relevant. Während die allgemeinen Kompetenzen das Grundlagenwissen über die MRK-Technologie beinhalten, zielen die unternehmensspezifischen Kompetenzen vorrangig auf die Sensibilisierung der Mitarbeiter. Dies beinhaltet auch, Vorbehalten und Ängsten gegenüber der neuen Technologie zu begegnen.

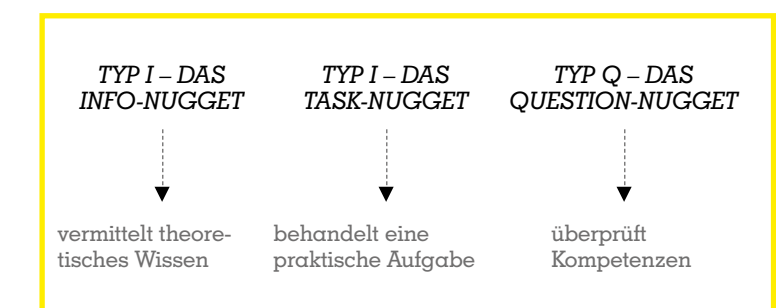
Ganz konkret bedeutet dies, allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter den Sinn und Zweck der MRK-Einführung im Unternehmen und damit die kurz-, mittel- und langfristigen Ziele zu verdeutlichen. Auf einer überfachlichen Ebene sollten darüber hinaus auch persönliche und soziale Kompetenzen berücksichtigt werden. Diese Kompetenzen befähigen dazu, selbstgesteuerte Lernprozesse aktiv mitzugestalten, sich kritisch mit neuen

Technologien auseinanderzusetzen, kreative Problemlösungen für neue Herausforderungen zu entwickeln sowie erfolgreich in zunehmend interdisziplinären und interorganisationalen Teams zu kommunizieren und zu arbeiten.

## Multimediale adaptive Lernpfade aufbauen

Auf Basis der Soll-Kompetenzprofile können entsprechende Qualifizierungsmaßnahmen entwickelt werden, z.B. anhand des Konzepts der multimedialen adaptiven Lernpfade. Kompetenzorientierte, kuratierte Lernpfade, die sich an das individuelle Lernverhalten anpassen, setzen sich dabei aus wiederverwendbaren Lernnuggets zusammen, die verschiedenartige didaktische Medien nutzen. Bild 1 zeigt, wie sich Standardlernpfade zu einzelnen Kompetenzbereichen aus Lernnuggets zusammensetzen.

Der Begriff Lernnugget entstammt dem sogenannten Microlearning, das auf kurzen Lernschritten von Sekunden bis wenigen Minuten sowie pragmatischen, einfach dargestellten Lerninhalten basiert. In der erweiterten Definition muss ein Lernnugget mindestens eine Kompetenz vermitteln oder abfragen. Dazu lassen sich drei Typen von Lernnuggets ableiten:



Die Multimedialität bezieht sich bei dem vorliegenden Konzept darauf, welches didaktische Medium in den einzelnen Lernnuggets eines Lernpfads eingesetzt wird. Der didaktische Medienmix

Lea Daling, Anas Abdelrazeq (RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau); Dr. Dirk Pensky (Festo Didactic SE)

## MRK am eigenen Arbeitsplatz erlernen: Die arbeitsplatznahe Qualifizierung baut auf der Definition von Rollen und Kompetenzprofilen auf und setzt auf multimediale, adaptierbare Lernpfade sowie auf einen Didaktikmix.

Die Mensch-Roboter-Kollaboration ist ein Beispiel für neuartige Technologien, die zukünftig in Produktionsunternehmen verstärkt zum Einsatz kommen werden. Um die Auswirkungen auf die bestehende Arbeitsorganisation und die individuellen Arbeitsplätze zu verstehen und um diese Technologien effizient zu nutzen, sind im Vergleich zu bereits eingeführten Verfahren differenzierte Qualifizierungsmaßnahmen erforderlich. Das arbeitsplatznahe Lernen „on the job“ ist eine solche Maßnahme, denn sie schafft die effiziente Verbindung von theoretischem Wissen und dessen praktischer Anwendung. Um den Transfer der gelernten Inhalte und Arbeitsabläufe in die reale Arbeitsplatzumgebung zu ermöglichen, sollten die vermittelten Lerninhalte einen hohen Praxisbezug aufweisen.

## Lernen im eigenen Tempo

Erfahrungen zeigen, dass Berührungängste der Belegschaft im Umgang mit Robotern bzw. neuen Technologien häufig den Lernprozess hemmen. Daher ist es wichtig, diesen Ängsten zu begegnen, beispielsweise durch die Möglichkeit des Lernens in einem sicheren und geschützten Rahmen. Das Lernen am Arbeitsplatz ermöglicht - vor allem in Verbindung mit modernen Lerntechnologien - eine direkte Projektion von Montageschritten oder wichtigen Instruktionen für einen sicheren Umgang mit Robotern. Dabei können die Anwender einzelne Arbeitsschritte im „eigenen Tempo“ wiederholen und an ihr jeweiliges Lern- und Arbeitstempo anpassen.

Das arbeitsplatznahe Lernen kann insbesondere im Hinblick auf die Arbeitssicherheit vorteilhaft sein. Die Lernenden können komplexe und möglicherweise gefährliche Vorgänge so lange üben, bis sie sich sicher genug fühlen, diese selbstständig auszuführen. Die Überprüfung einzelner Arbeitsschritte ermöglicht zudem ein konstantes Feedback über einzelne Montageschritte. Diese Hinweise können zu einer gesteigerten Performanz und einer geringeren Fehlerrate beitragen:

Im Folgenden werden wichtige Schritte und Maßnahmen zur erfolgreichen Qualifizierung im Umgang mit MRK erläutert. Dies beinhaltet auch die Definition und Identifikation relevanter Rollen, die Ableitung von (neuartigen) Kompetenzfeldern im Kontext von MRK sowie die Präsentation möglicher Vorgehensweisen zur mediendidaktischen Vermittlung von Lerninhalten.

## Zielgruppen für Qualifizierung definieren und Rollen identifizieren

Die Einführung von MRK führt zu tiefgreifenden Änderungen im Produktionssystem, sodass eine Vielzahl von Rollen sensibilisiert und - teils intensiv - fachlich qualifiziert werden muss. Der erste Schritt besteht in der Zuordnung relevanter Rollen zu definierten Zielgruppen.

Tabelle 1 enthält die drei Hauptzielgruppen sowie die wesentlichen Rollen in einem beispielhaften Produktionsunternehmen. Von der Einführung eines MRK-Systems ist in diesem Fall eine Vielzahl verschiedener Rollen betroffen. Hier gilt es, in einem nächsten Schritt zu klären, welche Rolle in welchem Umfang Wissen und Können benötigt.

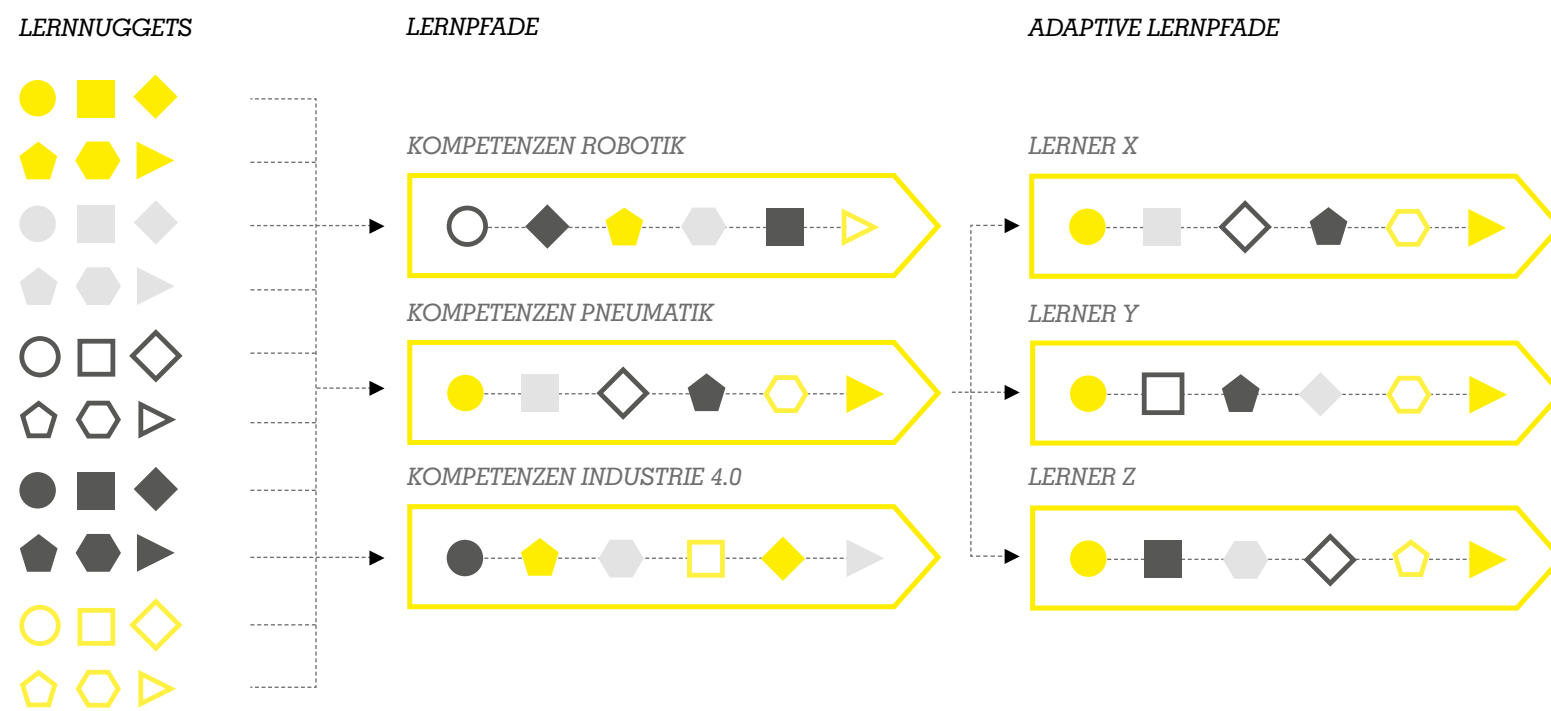


Bild 1: Konzept adaptiver Lernpfade

beinhaltet dabei nicht nur klassische Medien aus E-Learning-Kursen wie Videos, Animationen und Simulationen, sondern auch praktische Aufgaben an realen Einrichtungen sowie die Teilnahme an Webinaren und Seminaren. Für den individuellen Lernenden können die Standardlernpfade angepasst werden. Dabei ist die Auswahl für ein konkretes Lernnugget beispielsweise abhängig davon, welches Vorwissen vorhanden ist, welche didaktischen Medien der Lernende bevorzugt und welche Ausstattung (Hardware/Software) zur Verfügung steht.

### Auswahl und Einsatz didaktischer Medien

Das arbeitsplatznahe Lernen kann durch Technologien unterstützt werden, die die Bereitstellung von Informationen in Echtzeit ermöglichen. So lassen sich beispielsweise mithilfe von Augmented Reality (AR) virtuelle Objekte, wie Animationen oder Hinweise, in das reale Sichtfeld des Nutzers einblenden. Dabei können verschiedene Medien, wie z.B. Tablets, Smartphones oder spezielle AR-Brillen, zum Einsatz kommen.

### Augmented Reality für MRK-Anlernprozess geeignet

Wie die Ergebnisse einer im Rahmen des ARIZ-Projekts durchgeführten Studie zeigen, wird die Verwendung von AR-gestützten Lernmedien allgemein als positiv und unterstützend wahrgenommen. In Sachen Benutzerfreundlichkeit der einzelnen Medien schnitt jedoch die HoloLens - eine vom Unternehmen Microsoft angebotene AR-Brille - im Vergleich zum Tablet und zum 2-D-Touchpad noch eher schlechter ab. Besonders ältere

Mitarbeiter merkten an, dass sie durch die Kombination mit vorhandenen Sehhilfen (z.B. Gleitsichtbrillen) große Schwierigkeiten mit der AR-Brille hatten. Im Gegensatz zu Neulingen fühlten sich erfahrene Mitarbeiter, die gut mit dem Montageprozess vertraut waren, durch die Nutzung neuer Technologien insgesamt weniger (mental) beansprucht. Abseits jeglicher Herausforderungen, die sich durch die Benutzung der Hardware ergaben (z.B. Gewicht der Brille, umständliches Bewegen des Tablet-Arms), wurden von fast allen Studienteilnehmern die sich ergebenden Chancen und Potenziale von AR in komplexen Montageprozessen hervorgehoben.

Mit Blick auf die Anlernprozesse bei MRK kann die Zugabe von Echtzeitinformationen im Arbeitsprozess also eine große Unterstützung bieten - auch wenn die Verwendung neuer Technologien im ersten Moment die Ausführung von sonst routiniert ablaufenden Tätigkeiten verlangsamen kann. Dabei gilt: Je komplexer und neuartiger die Technologie, desto eher sollte die Nutzung des Mediums vorab in einem arbeitsunabhängigen Kontext erlernt und gefahrlos getestet werden können.

### Handlungsorientierten didaktischen Ansatz nutzen

Basierend auf den modularen Lernnuggets ist es möglich, verschiedene didaktische Ansätze zu realisieren. Für den Bereich der technischen Aus- und Weiterbildung wird ein handlungsorientierter didaktischer Ansatz empfohlen, der den Lernenden Freiheiten zur selbstständigen Qualifizierung und weitreichende Möglichkeiten zur individuellen Förderung bietet.

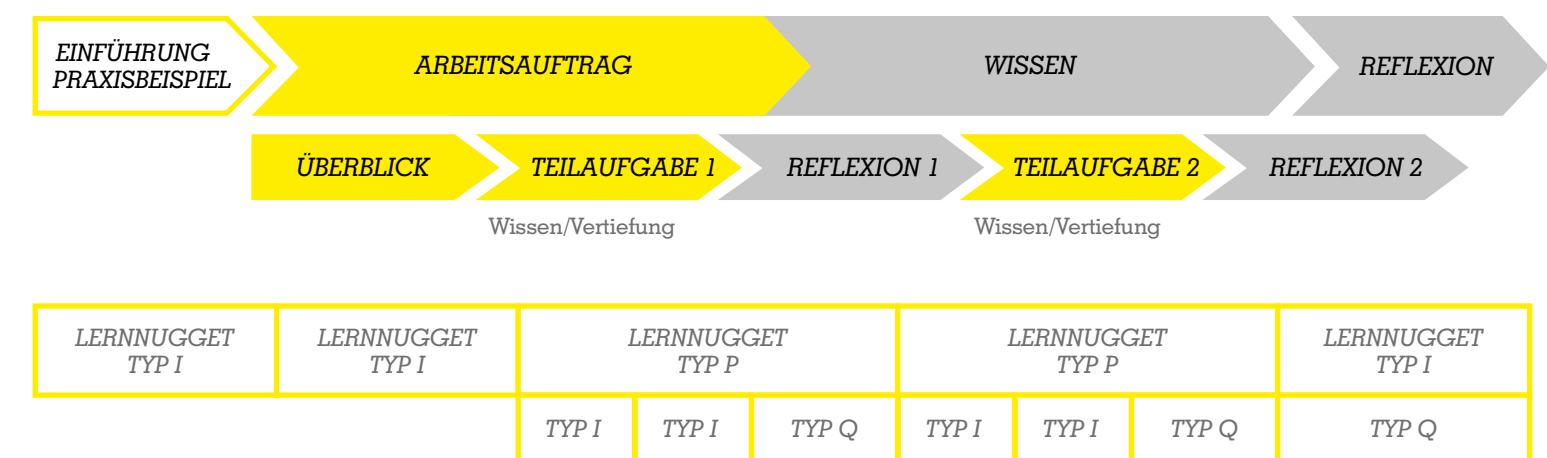


Bild 2: Struktur einer Lerneinheit basierend auf einem handlungsorientierten didaktischen Ansatz

Beginnend mit einem Praxisbeispiel und einem Überblick über den Arbeitsauftrag durchläuft der Lernende eigenständig die Teilaufgaben und kann dabei bei Bedarf auf das notwendige Wissen oder sogar auf Vertiefungswissen zugreifen (siehe Bild 2). Die Konstruktion der Lerneinheit auf Basis der Lernnuggets ermöglicht es, Teilaufgaben und Wissensbausteine flexibel auszutauschen oder für neue Lerneinheiten entsprechen anzuordnen.

### Kompetenzprofile erstellen und kontinuierlich pflegen

Für den Fall, dass für die jeweilige Mitarbeiterin bzw. den jeweiligen Mitarbeiter ein Soll- und ein Ist-Kompetenzprofil vorliegen, kann sie oder er die Differenzen in den Kompetenzbereichen

selbst ermitteln und den individuellen Lernpfad eigenständig aufbauen. Hierzu ist allerdings eine systematische Zuordnung von Kompetenzen zu Lernnuggets und Teillernpfaden erforderlich. Die Differenzen in den Kompetenzbereichen lassen sich beispielsweise in Form klassischer Netzdiagramme darstellen (siehe Bild 3). Über die Kompetenzbereiche ist der Zugriff auf die Kompetenzfelder und auf konkrete Kompetenzen denkbar, für die geeignete Lernnuggets oder sogar Lernpfade hinterlegt werden können. Der Aufwand für das Kompetenzmanagement wiegt dabei in der Regel den Aufwand dafür auf, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter durch die Personalentwicklung individuell zu betreuen.

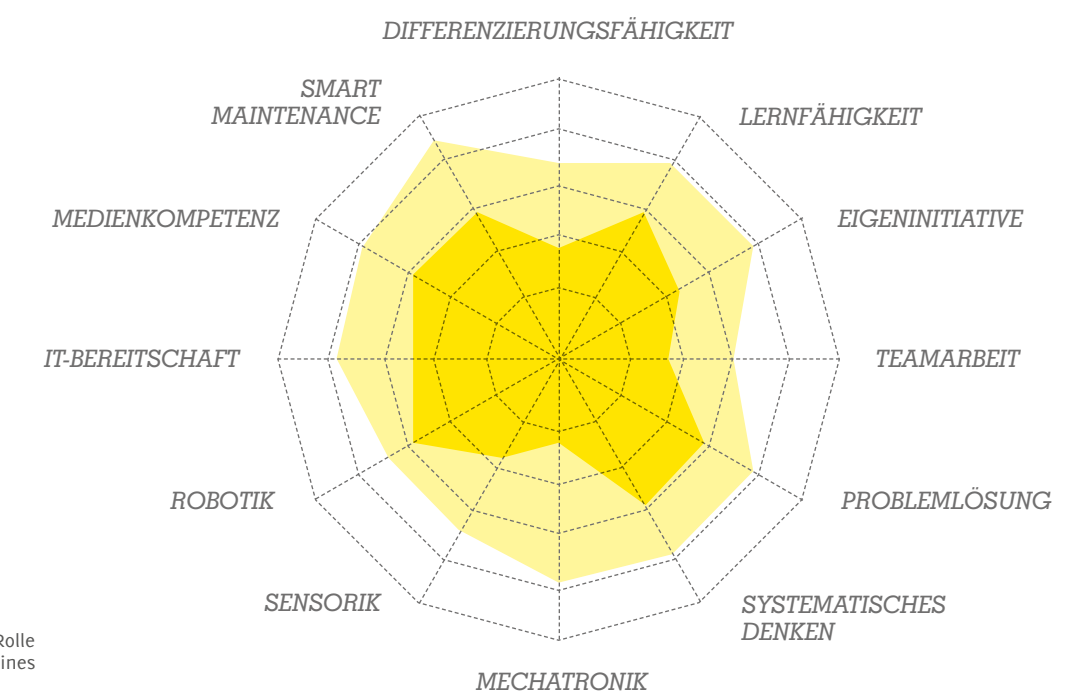


Bild 3: Soll-Kompetenzprofil (hellgelb) für die Rolle Instandhalter und Ist-Kompetenzprofil (gelb) eines Mitarbeiters in einem Beispielunternehmen

# SICHERHEIT

## KAPITEL 7

Wenn Mensch und Roboter ohne trennende Schutzzäune zusammenarbeiten, besteht ein Gefährdungspotenzial für den arbeitenden Menschen. Obwohl die dynamischen Wirkungen der Kräfte von Leichtbaurobotern aufgrund ihrer baulichen Eigenschaften geringer sind als die von herkömmlichen Industrierobotern, kann dieses Risiko nicht ausgeschlossen werden. Eine Reduzierung der Geschwindigkeit des Roboters tritt oft in Konflikt mit der Wirtschaftlichkeit der Lösung, da u.U. die erforderliche Taktzeit nicht mehr gehalten werden kann und das MRK-System dann keinen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber der manuellen Lösung bietet. Selbst wenn es gelingt, dies in Einklang zu bringen und zudem den Roboter und seine Greifer bzw. Werkzeuge nach den einschlägigen Bestimmungen „sicher zu machen“, treten beim Umgang mit spitzen oder scharfkantigen Bauteilen weitere Gefährdungspotenziale auf.

Die Beachtung der einschlägigen Normen sowie eine erfolgreiche CE-Kennzeichnung sind erste Schritte in Richtung Garantie der Sicherheit des Menschen. Zwei Anwendungsbeispiele zeigen, dass dazu für jede betriebsspezifische Applikation ein maßgeschneidertes Sicherheitskonzept entwickelt werden muss. Die Kosten hierfür beeinflussen ebenfalls die Wirtschaftlichkeit des Systems.

## SICHERHEIT IN KOLLABORATIVEN MONTAGESYSTEMEN

- 160 Wortwechsel
- 164 Empfehlungen zur Gewährleistung der Sicherheit bei MRK  
(KUKoMo)
- 166 Vorgehensmodell für eine erfolgreiche CE-Kennzeichnung  
(SafeMate)
- 168 Sichere Montage schwerer Getriebezahnräder mit MRK  
(ROKOKO)
- 170 MRK und Arbeitssicherheit – ein Fallbeispiel  
(KoKoMo)





*„Das Erleben von Sicherheit ist entscheidend für die Akzeptanz durch die Beschäftigten.“*



Dr. **LARS ADOLPH**

wissenschaftlicher Leiter des Fachbereichs 2 Produkte und Arbeitssysteme, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)



Dr. **MATTHIAS UMBREIT**

Leiter der Abteilung Maschinen, Robotik, Holzverarbeitung bei der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM)

*„Die Sicherheit von MRK-Lösungen sollte bereits im Planungsprozess eine zentrale Rolle spielen.“*



Dr. **HARALD GRÜBEL**

Technischer Leiter bei der EUCHNER GmbH + Co. KG

*„Die Wirtschaftlichkeit einer MRK-Lösung ergibt sich aus einem Trade-off zwischen Sicherheit und Produktivität.“*



# WORTWECHSEL

*Sicherheit in kollaborativen Montagesystemen*



## WARUM IST DIE SICHERHEIT IN KOLLABORATIVEN MONTAGESYSTEMEN SO WICHTIG?

DR. LARS ADOLPH

Kollaborative Montagesysteme zeichnen sich durch eine enge, schutzzaunlose Zusammenarbeit von Mensch und Roboter aus, die andere Sicherheitskonzepte verlangt als klassische Industrierobotik. Zwei Aspekte möchte ich hervorheben: Grundlegend ist der Schutz vor Verletzungen, hierfür ist z.B. die Anwendung der Normen relevant. Zudem ist auch das Erleben von Sicherheit entscheidend für die Akzeptanz durch die Beschäftigten: Wenn die Handlungen des Roboters für sie nicht vorhersehbar und somit nicht einschätzbar sind, entstehen Sicherheitsbedenken, die die Zusammenarbeit hemmen können.

Die BAuA ist eine Ressortforschungseinrichtung des Bundes, die das Bundesministerium für Arbeit und Soziales in allen Fragen von Sicherheit und Gesundheit berät und zur menschengerechten Gestaltung der Arbeit beiträgt.

DR. MATTHIAS UMBREIT

Die europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist die maßgebliche Vorschrift in Bezug auf die Sicherheit kollaborativer Montagesysteme. Das bedeutet z.B., dass die EG-Konformitätserklärung, eine Risikobeurteilung, eine Betriebsanleitung sowie ein Typenschild mit Namen und Anschrift des Integrators zur Verfügung gestellt werden müssen. Zusätzlich können in harmonisierten Normen weitere Anforderungen festgelegt sein – z.B. gelten für die Automation mit Industrierobotern die Normen EN ISO 10218-1, EN ISO 10218-2 und die Technische Spezifikation ISO TS 15066.

Eine Übersicht über die Anforderungen an kollaborative und traditionelle Industrieroboter enthalten die Broschüren „DGUV-Information 209-074“ und „FBHM 080“. Diese und weitere Informationen können auf der BGHM-Homepage ([www.bghm.de](http://www.bghm.de), Webcode: 601 und 462) heruntergeladen werden.

DR. HARALD GRÜBEL

H.G.: Da sich Mensch und Maschine einen Arbeitsraum teilen, können sie im Gegensatz zu Systemen mit trennenden Schutzeinrichtungen miteinander in Berührung kommen. Aus diesem Gefährdungspotenzial resultieren folgende Anforderungen: Erstens muss die Maschine funktional sicher sein, also der europäischen Maschinenrichtlinie genügen. Zweitens darf die Maschine keine Kräfte auf den Menschen ausüben, die zu einer Verletzung führen. Diese Vorgaben – die in ISO-Normen festgelegt sind – bestimmen auch die Roboter-Taktzeiten, die für die Produktivität einer MRK-Lösung maßgeblich sind. So ergibt sich deren Wirtschaftlichkeit letztlich aus einem Trade-off zwischen Sicherheit und Produktivität.

Die EUCHNER GmbH + Co. KG ist ein mittelständisches Familienunternehmen, das Produkte der industriellen Sicherheitstechnik für den Maschinen- und Anlagenbau herstellt.



## WELCHE SICHERHEITS-KONZEPTE HABEN SICH BESONDERS BEWÄHRT?

Der rechtliche Rahmen – beschrieben durch die Maschinenrichtlinie und weitere Arbeitsschutzvorschriften, wie z.B. die Betriebssicherheitsverordnung – sorgt für ausreichend Sicherheit bei der Nutzung eines MRK-Systems. Allerdings ist die Maschinenrichtlinie nicht für flexible und wandelbare Systeme ausgelegt und schränkt daher deren flexible Nutzung ein. Deshalb sehen wir in der Praxis aktuell vor allem kooperative Szenarien, bei denen eine direkte Berührung von oder die gleichzeitige Arbeit an einem Werkstück nicht die Regel sind. Eine mögliche Lösung sind hier Kraft- und Geschwindigkeitsbegrenzungen, die aktiv sind, wenn Mensch und Roboter sich zeitweise im gleichen Arbeitsbereich aufhalten.

Aktuell wird zwischen vier Kollaborationsarten unterschieden: 1. Handführung, 2. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, 3. sicherheitsgerichteter Stopp und 4. Leistungs- und Kraftbegrenzung. Während für die ersten drei Arten auch traditionelle Industrieroboter zum Einsatz kommen können, basiert die Kollaborationsart Leistungs- und Kraftbegrenzung auf eigens für diese Technologie konzipierten Robotern. Diese sind durch eingebaute Sensoren in der Lage, bei Kontakt mit einem Menschen sofort zu stoppen und so Verletzungen zu verhindern.

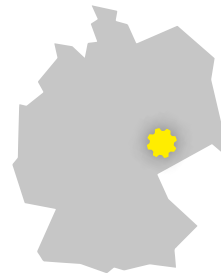
Bewährte Sicherheitskonzepte für kollaborative Montagesysteme sind aktuell noch nicht verfügbar. Die gibt es nur für die klassische Industrierobotik mit getrennten Arbeitsräumen von Mensch und Maschinen. In unserem Projekt haben wir für den konkreten Anwendungsfall ein entsprechendes Sicherheitskonzept erarbeitet. Das sieht z.B. Lichtgitter vor, die für eine Abbremsung des Roboters bei der Annäherung an den Übergabepunkt sorgen. Am Übergabepunkt kommt es zur direkten Interaktion zwischen Mensch und Maschine.

## WORAUF KOMMT ES BEI DER TECHNISCHEN UMSETZUNG DER SICHERHEITSKONZEPTE VOR ALLEM AN?

Grundlegend sind die zuverlässigen technischen Eigenschaften des Systems. Erst mit der Transparenz der technischen Eigenschaften und der Funktionalitäten lässt sich der sichere Einsatz abschätzen. Weiter gilt es, den Menschen und seine individuellen Nutzungsvoraussetzungen zu beachten: Gibt es zum Beispiel technische Maßnahmen, die bei bestimmten Nutzerinnen und Nutzern keine ausreichende Sicherheit bieten? Hier gilt es, sie und ihre konkreten Arbeitssituationen in den Blick zu nehmen, um ggf. mögliche Sicherheitsrisiken von vornherein ausschließen zu können.

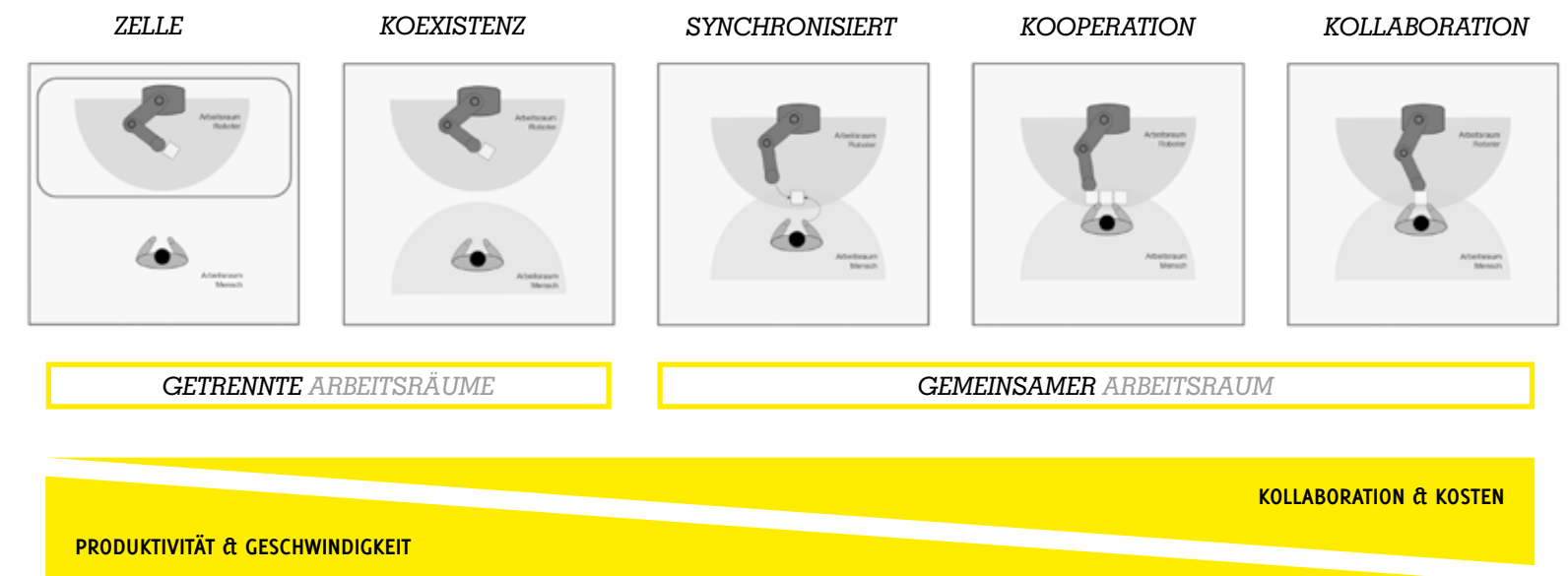
Vor der technischen Umsetzung sollte sorgfältig geplant werden, um kostspielige Nachrüstungen von Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Dies ist besonders wichtig, weil die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) an Randbedingungen geknüpft ist: beispielsweise die beim Kontakt mit Menschen geltenden biomechanischen Grenzwerte. Das sind Kraft- und Druckgrenzwerte, die bei Kontakt des Roboters, des Werkzeugs oder des Bauteils mit Körperteilen des Menschen nicht überschritten werden dürfen. Zudem spielen die äußeren Konturen des Robotersystems einschließlich des Werkzeugs und Bauteils eine wichtige Rolle – sie sollten nicht zu scharfkantig sein. Erfahrungsgemäß eignen sich z.B. Schraubapplikationen, das Anreichen oder Ablegen von Bauteilen oder Klebeapplikationen (Kleberauftrag) sehr gut für MRK.

In unserem Projekt haben wir zunächst überlegt, welche Montagetätigkeiten eher für den Menschen – z.B. beim Einfädeln von Kabeln – und welche für eine automatisierte Roboterbearbeitung geeignet sind. Der Mensch übergibt die vorgefertigten Teile an den Roboter, der diese an verschiedene automatisierte Stationen weiterreicht und damit eine parallele Bearbeitung ermöglicht. Der kollaborative Roboter wird damit zum Interface zwischen Mensch und Industrieroboter. Taktbestimmend ist die manuelle Tätigkeit des Menschen; wenn der Roboter weit genug weg vom Menschen ist, darf er schneller laufen. Mit dieser aufeinander abgestimmten Fahrweise des Produktionsprozesses optimieren wir die Produktivität unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Sicherheitsvorgaben.



Projekt KUKoMo

# EMPFEHLUNGEN ZUR GEWÄHRLEISTUNG DER SICHERHEIT BEI MRK

Bild 1: Kollaborationsgrad der Mensch-Roboter-Interaktion, angelehnt an Bauer et. al. (2016)<sup>1</sup>

Alexander Kunert (ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.); Andreas Thun, Thomas Göckeritz (iris-GmbH infrared &amp; intelligent sensors)

## Eine Vielzahl von Normen regelt die Sicherheit im Umgang mit kollaborativen Montagesystemen. Die Sicherheitsanforderungen hängen stark vom Grad der Mensch-Roboter-Interaktion ab.

Bei der Zusammenarbeit von Menschen und Robotern müssen die Sicherheit gewährleistet und Gefährdungen vermieden werden. Dies ist die Aufgabe von Herstellern, Entwicklern und Inverkehrbringern der technischen Lösungen. Dabei spielt die Art der Mensch-Roboter-Interaktion eine entscheidende Rolle. Neben der klassischen Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Roboter (Zelle) lassen sich vier weitere Formen mit zunehmendem Kollaborationsgrad differenzieren (Bild 1).

## Je höher der Kollaborationsgrad, desto höher die Sicherheitsanforderungen

Von Koexistenz spricht man, wenn trennende Schutzeinrichtungen entfallen, die Trennung beider Arbeitsräume jedoch bestehen bleibt. Darüber hinaus gibt es drei Arten von Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen mit gemeinsamem Arbeitsraum. Wenn Mensch und Roboter ihre Teilaufgaben „synchronisiert“ erledigen, befinden sie sich niemals gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum. Sowohl bei einer Kooperation als auch einer Kollaboration interagieren beide im gemeinsamen Arbeitsraum. Die Kollaboration setzt zusätzlich gleichzeitige Handhabungen am selben Bauteil voraus. Mit steigendem Kollaborationsgrad erhöhen sich die Sicherheitsanforderungen und damit häufig auch die Kosten.

## Rechtlicher Rahmen: Normen und Regelwerke

Um die Sicherheit zu gewährleisten, ist die Auseinandersetzung mit geltenden Richtlinien und Normen unerlässlich. Formal gelten für Robotersysteme jeder Art die Anforderungen der Maschinenrichtlinie - MRL - (2006/42/EG). Damit regelt die EU ein einheitliches Recht für das Inverkehrbringen von Maschinen im Europäischen Wirtschaftsraum. Maschinen müssen demnach mit einer EG-Konformitätserklärung und einer CE-Kennzeichnung ausgestattet sein, bevor sie in den europäischen Markt eingeführt werden. Da der Roboter selbst ohne bestimmungsgemäße Verwendung ausgeliefert wird, ist er als unvollständige Maschine definiert und trägt keine CE-Kennzeichnung gemäß MRL. Der Hersteller der vollständigen Maschine definiert die Roboterapplikation und trägt somit die Verantwortung für die Einhaltung der MRL.

Die EN ISO 12100 enthält die zu verwendende Terminologie und legt die Gestaltungsgrundsätze für sichere Maschinen fest. Zudem ist die allgemeine Sicherheit der Maschine oder des Fertigungssystems zu gewährleisten. Hierbei gilt es, eine Vielzahl von Sicherheitsfach- bzw. Typ-B-Normen zu beachten. Bei der Einbindung von Industrierobotern in Maschinensysteme gelten Sicherheitsanforderungen für integrierte Fertigungssysteme (IMS) gemäß EN ISO 11161 sowie weiterführende C-Normen. Für den Anwendungsfall der MRK werden sowohl „bestimmungsgemäße Verwendungen“ als auch „vorhersehbare Fehlanwendungen“ im Einflussbereich des Roboters in der ISO/TS 15066 definiert.

## Mit vier Konzepten zur sicheren MRK-Anwendung

Die ISO/TS 15066 definiert den kollaborierenden Betrieb zwischen Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum (Kollaborationsraum) und legt die dafür notwendigen Rahmenbedingungen fest. Die technische Spezifikation beschreibt vier Konzepte, um die Sicherheit der MRK-Anwendung zu gewährleisten:

### 1. Sicherheitsgerechter Halt

Bei diesem Verfahren geht es um den sicherheitsbewerteten überwachten Halt des Roboters. Es gilt, die Roboterbewegung im Kollaborationsraum anzuhalten, bevor eine Bedienperson den Kollaborationsraum betritt, um mit dem Robotersystem zusammenzuwirken und eine Aufgabe auszuführen (z.B. Bestückung des Endeffektors mit einem Werkstück). Hält sich keine Bedienperson im Kollaborationsraum auf, darf der Roboter nicht kollaborierend arbeiten. Wenn sich der Roboter im Kollaborationsraum befindet, die sicherheitsbewertete überwachte Funktion aktiv und die Roboterbewegung angehalten ist, darf die Bedienperson den Kollaborationsraum betreten. Die Bewegung des Roboters kann ohne zusätzliches Eingreifen erst wiederaufgenommen werden, nachdem die Bedienperson den Kollaborationsraum verlassen hat.

### 2. Handführung

Bei dieser Betriebsweise nutzt eine Bedienperson eine handbetätigte Einrichtung, um Bewegungsbefehle an den Roboter zu übermitteln. Bevor die Bedienperson den Kollaborationsraum be-

treten darf, um die Aufgabe mit Handführung auszuführen, führt der Roboter einen sicherheitsbewerteten überwachten Halt aus. Die Aufgabe wird durch eine manuelle Betätigung der Führungseinrichtungen ausgeführt, die sich am Endeffektor des Roboters oder in dessen Nähe befinden.

### 3. Geschwindigkeits- und Abstandsregulierung

Bei dieser Betriebsweise dürfen sich Roboter und Bedienperson gleichzeitig im Kollaborationsraum bewegen. Die Risikominderung wird durch die ununterbrochene Aufrechterhaltung des Mindestsicherheitsabstandes zwischen Bedienperson und Roboter erreicht. Wird der Sicherheitsabstand unterschritten, stoppt der Roboter. Wenn sich die Bedienperson vom Roboter bewegt, kann dieser die Bewegung automatisch wiederaufnehmen, solange der Sicherheitsabstand eingehalten wird. Wenn der Roboter seine Geschwindigkeit herabsetzt, verringert sich der Sicherheitsabstand entsprechend.

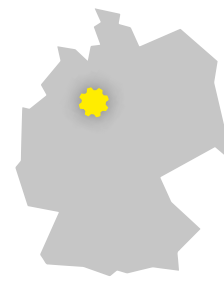
### 4. Kraft- und Leistungsreduzierung

Bei dieser Betriebsweise kann physischer Kontakt zwischen dem Roboter (einschließlich des Werkstücks) und einer Bedienperson entweder absichtlich oder unabsichtlich auftreten. Ein in Bezug auf Leistung und Kraft begrenzter kollaborierender Betrieb erfordert Roboter, die speziell für diese spezifische Betriebsweise ausgelegt sind. Eine Risikominderung wird entweder durch inhärent sichere Mittel im Roboter oder durch ein sicherheitsbezogenes Steuerungssystem erreicht, wobei mit dem Roboter verbundene Gefährdungen unterhalb der Belastungsgrenzwerte gehalten werden, die bei der Risikobeurteilung bestimmt werden.

Literatur:

1 Bauer, W.; Bender, M.; Rally, P. (2016): Mitarbeiterorientierte Mensch-Roboter-Kollaboration. In: wt Werkstattstechnik online, 106 (2016), Nr. 3, S.100–105.





Projekt SafeMate

# VORGEHENSMODELL FÜR EINE ERFOLGREICHE CE-KENNZEICHNUNG

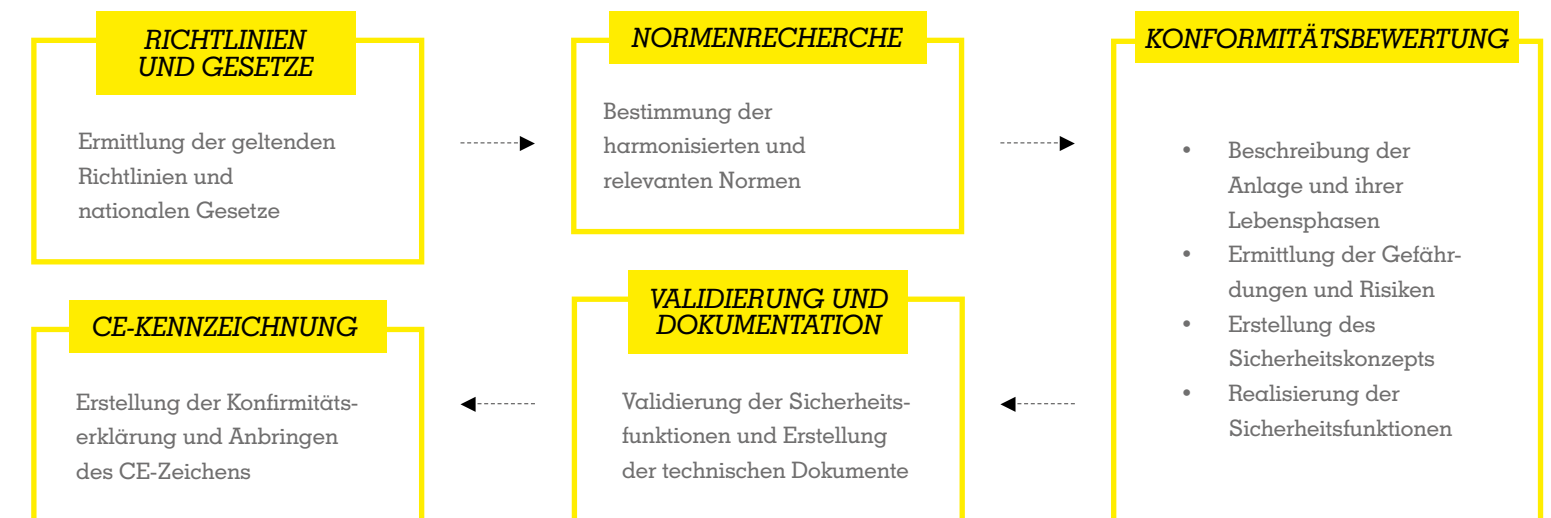


Bild 1: Ablauf der CE-Kennzeichnung in fünf Schritten

Tobias Recker (Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik); Ender Dogan (innotec GmbH)

**Um die Sicherheit einer MRK-Anwendung zu gewährleisten, müssen alle Risiken identifiziert und bewertet sowie Maßnahmen zu deren Minimierung implementiert werden.**

Der für das Inverkehrbringen von MRK notwendige CE-Kennzeichnungsprozess lässt sich grob in fünf Schritte unterteilen (siehe Bild 1). Für Anwender, die mit dem Zertifizierungsprozess nicht vertraut sind, haben die SafeMate-Projektpartner ein Vorgehensmodell für die erfolgreiche CE-Kennzeichnung entwickelt.

## Bestimmung der harmonisierten und relevanten Normen

Über die für jeden MRK-Arbeitsplatz relevanten Normen hinaus – EN 12100, EN 13849 und EN 10218 sowie die technische Spezifikation ISO/TS 15066 (siehe vorheriger Beitrag) – sind abhängig vom betrachteten Anwendungsfall mehrere weitere Normen zu berücksichtigen. Das SafeMate-Tool unterstützt dabei, diese Normen zu identifizieren. Die Projektpartner haben eine Datenbank aller bestehenden Normen im Bereich Maschinenbau erstellt und mit einer Liste aus Komponenten und Wirkprinzipien verknüpft, mit deren Hilfe Nutzer ihre Prozesse virtuell nachbilden können. Wählt ein Nutzer z.B. aus, dass in seinem Prozess ein pneumatischer Greifer zum Einsatz kommt, wird die für Pneumatik relevante Norm zur Fluidtechnik (DIN EN ISO 4414) angezeigt.

## Konformitätsbewertung

Das Verfahren zur Konformitätsbewertung beginnt i.d.R. mit der Beschreibung der Anlage inklusive ihrer Lebensphasen und sollte am besten bereits während der Planung der Anlage durchgeführt werden. Der Begriff „Anlage“ umfasst den gesamten manuellen Arbeitsplatz sowie den MRK-Roboter und die Peri-

pherie. Auf Grundlage dieser Beschreibung lassen sich sowohl die enthaltenen Komponenten als auch ihre Schnittstellen und Grenzen bestimmen.

Zur Vereinfachung dieses Vorgangs empfiehlt es sich, eine einheitliche Prozessbeschreibung zu verwenden, beispielsweise basierend auf den im Rahmen der Potenzialermittlung (siehe Beitrag „Potenzialanalyse für MRK“ in Kapitel 4) entwickelten Prozessbausteinen. Jede Schnittstelle zwischen Mensch und Anlagenkomponente stellt eine potenzielle Gefahr dar, der entsprechende Risiken zuzuordnen sind. Es müssen alle Schnittstellen untersucht werden, auch wenn sie kein offensichtliches Risiko beinhalten. Jedem Risiko wird abhängig von der Schwere einer potenziellen Verletzung, der Häufigkeit bzw. Expositionsdauer der Gefahr und der Möglichkeit zur Vermeidung dieser Gefährdung ein sogenannter Performance Level (PL) von a bis e zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt anhand eines Risikographen (gemäß EN ISO 13849-1), wobei a dem geringsten und e dem höchsten Risiko entspricht. Wichtig ist, dass bei der Ermittlung von Risiken alle Lebensphasen der Anlage (siehe DIN EN ISO 12100) betrachtet werden, da Gefährdungen nicht nur im Betrieb des Roboters auftreten können. Insbesondere die Wartung und die Störungsbehebung bergen ebenfalls ein erhöhtes Risiko für Unfälle.

### Erstellung eines Sicherheitskonzepts

Um Risiken zu minimieren, können sicherheitsgerichtete Roboterfunktionen (Sicherheitsebenen, Gelenkgrenzen, Kraftgrenzen etc.) und externe Sicherheitstechnik eingesetzt sowie bauliche und organisatorische Maßnahmen umgesetzt werden. Bei sicherheitsgerichteten Bauteilen (Sensoren, Aktoren) ist es wichtig,

dass der vom Hersteller angegebene PL des Bauteils höher oder gleich dem errechneten (erforderlichen) PL ist. Außerdem sollte stets die gesamte Sicherheitskette betrachtet werden, d.h. neben dem eigentlichen Bauteil auch der Signalweg sowie die Auswertung bzw. Ansteuerung des Bauelements in der SPS (speicherprogrammierbaren Steuerung).

Häufig eingesetzte Sensoren zur Risikominimierung bei (MRK-) Robotern sind u.a. Lichtgitter, Laserscanner, Kamerasysteme oder Trittschutzmatten. Laserscanner und sichere Kamerasysteme sind häufig teurer als Lichtgitter und Trittschutzmatten, eignen sich aber besser zur Absicherung eines großen offenen Bereichs. Ist der Gefahrenbereich nur von einer Seite zugänglich, ist die Anbringung eines Lichtgitters i.d.R. am einfachsten.

Viele neue Anwender betrachten einen kollaborativen Roboter fälschlicherweise als intrinsisch sicher und gehen daher bei der Risikobewertung ausschließlich auf die Anwendung ein. Dabei hat auch die Wahl des Roboters einen entscheidenden Einfluss auf das Sicherheitskonzept. Besonders das Fehlen kritischer Sicherheitsfunktionen beeinflusst den Aufwand für die Arbeitsplatzabsicherung signifikant. Wenn der Roboter nicht bereits durch die Anwendung vorgegeben ist, sollte daher besonders auf das Vorhandensein zertifizierter Sicherheitsfunktionen mit ausreichendem PL sowie sicherheitsgerichteter Ein- und Ausgänge oder Bussysteme geachtet werden. Vor allem kostengünstige Roboter verwenden oft nur einkanalige Positions- oder Kraftsensoren bzw. unsichere Bussysteme und erreichen deshalb nicht PLd oder PLe. Im Zweifelsfall sollte man einen Nachweis über die Zertifizierung der Sicherheitsfunktionen vom Hersteller einholen.

### Beurteilung und Umsetzung der Maßnahmen

Grundsätzlich ist jede zugelassene Schutzeinrichtung geeignet, die Sicherheit bei MRK zu erhöhen. Der Einsatz externer Schutzeinrichtungen schränkt jedoch die Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Roboter ein und erhöht die Kosten der

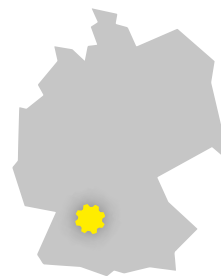
Anwendung. Oftmals ist deshalb sinnvoller, die Gefahrenstelle organisatorisch oder durch eine mechanische Schutzeinrichtung aus dem Kollaborationsbereich auszuschließen.

Sind risikominimierende Maßnahmen festgelegt, muss eine Beurteilung des geminderten Risikos erfolgen. Dafür werden das Schadensausmaß, die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Vermeidungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen betrachtet und anschließend ggf. weitere Maßnahmen definiert. Dieser Ablauf wird so lange wiederholt, bis das Restrisiko ausreichend minimiert werden konnte.

## Validierung der Sicherheitsfunktionen und Dokumentation

Den letzten Schritt auf dem Weg zur CE-Kennzeichnung bilden der Abschluss der Dokumentation und die Validierung aller Sicherheitsfunktionen. Jeder Schritt im CE-Prozess sollte dokumentiert werden, wobei die Dokumentation nicht von einer zentralen Stelle aus überprüft wird und daher auch kein einheitliches Vorgehen vorgeschrieben ist. Auf der SafeMate-Website [www.Safe-Mate.de](http://www.Safe-Mate.de) ist ein Beispiel für das Vorgehen anhand eines Musterprozesses inklusive Dokumentation hinterlegt. Für Unternehmen, die einen bestehenden manuellen Arbeitsplatz auf MRK umrüsten wollen, empfiehlt es sich, das für den manuellen Arbeitsplatz bereits durchgeführte Konformitätsverfahren zu erweitern.

Allgemein gilt für MRK, dass sich jeder Arbeitsplatz mit entsprechendem Aufwand sicherheitstechnisch nachrüsten lässt. Dies erfordert allerdings oftmals den Einsatz aufwendiger und kostspieliger Sicherheits- und Steuerungstechnik oder das Herabsenken der Robotergeschwindigkeit. Folglich ist die Arbeitssicherheit bei MRK-Arbeitsplätzen häufig eher ein wirtschaftliches als ein technisches Problem. Deshalb sollte die Arbeitssicherheit möglichst frühzeitig in die Planung einbezogen werden.



Projekt ROKOKO

# SICHERE MONTAGE SCHWERER GETRIEBE- ZÄHRÄDER MIT MRK

Thomas Äckermann (ZF Friedrichshafen AG); Benjamin Schell (SCHUNK GmbH & Co. KG); Michael Mohre (MRK-Systeme GmbH)

**Mit verschiedenen Funktionalitäten – von einem Leichtbauroboter mit Kraft-/Leistungsbegrenzung bis zu einem Freigabekonzept für die Übergabe – lassen sich ergonomisch belastende Montagetätigkeiten sicher teilautomatisieren.**

## Projekt ROKOKO

Der ROKOKO-Projektpartner ZF Friedrichshafen AG baut u.a. große Getriebe für Nutzkraftwagen (NKW), für deren Montage zukünftig eine im Projekt entwickelte MRK-Lösung zum Einsatz kommt. Diese dient dazu, die hohe körperliche Belastung für das Montagepersonal zu reduzieren, die sich durch das Handling der schweren Getriebezahnräder bei der Hauptwellenmontage ergibt. Wegen der hohen Gewichte und der kantigen Zahnradprofile sind die Sicherheitsanforderungen an eine solche Applikation innerhalb der geforderten Zykluszeit besonders hoch.

## MRK-Lösung im Überblick

Für den Aufbau von NKW-Getrieben ist es notwendig, unterschiedliche Zahnräder und Scheiben auf eine senkrecht stehende Hauptwelle zu montieren. Vor der Einführung der MRK-Lösung hat ein Werker diese Aufgabe ausgeführt. Die Zahnräder wiegen zwischen 5 und 9 Kilogramm. Zukünftig soll sie ein Roboter automatisch aus einer Kommissionierbox greifen, dem Werker anreichen und gemeinsam mit dem Werker auf der Hauptwelle fügen. Nach Erreichen der Montageposition öffnet der Greifer und fährt zum nächsten Zahnrad. Während der Roboter sich ein neues Zahnrad holt, montiert der Werker Zwischenscheiben auf der Welle.

## Risikobeurteilung als Startpunkt

Die für die Einhaltung der Sicherheit notwendigen Funktionalitäten ergeben sich aus der Risikobeurteilung, die durch die EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG vorgegeben ist. Aus der Risikobeurteilung lassen sich Anforderungen an die eingesetzte Technik ableiten, z.B. welchen Güteklassen die Sicherheitsbauteile entsprechen müssen, sodass ein sicherer Betrieb nach dem Stand der Technik gewährleistet ist.

## Geeigneten Leichtbauroboter auswählen

Der einzige kommerziell verfügbare Leichtbauroboter (LBR), der für den prognostizierten Lastfall (9 Kilogramm Bauteil + 5 Kilogramm Greifer) geeignet ist, ist der LBR iiwa von KUKA. Dieser Roboter besitzt die Kollaborationsart „Kraft-/Leistungsbegrenzung“ als integrales Sicherheitskonzept, das externe Einflüsse (z.B. Kontakt mit dem Menschen) im Hinblick auf die Sicherheit erkennt. Das Konzept gewährleistet, dass im Kollisionsfall Mensch-Roboter der Mensch nicht zu Schaden kommt und die Maximalbelastungen nach der ISO TS 15066 eingehalten werden.

Zur Anwendung kommen im LBR iiwa auch die nachfolgenden parametrierbaren Sicherheitseinrichtungen, wie z.B.:

- Definition der Arbeits-, Überwachungs- und Schutzräume, d.h. quaderförmige Zonen und/oder Ebenen, die einen Bereich räumlich beschreiben: In solchen Räumen gelten spezifische Größen, wie z.B. die Drehmomentgrenze zum Auslösen eines Stopps.

- Festlegung maximaler Geschwindigkeiten: Die Grenzwerte der zulässigen Geschwindigkeit werden basierend auf biomechanische Limits gemäß ISO/TS 15066 iterativ mittels Kraft-/Druckmessungen ermittelt. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf markanten bzw. eckigen Konturen (z.B. Schrägradflanken).
- Auslegung der Drehmomentgrenzen/-werte jeder Roboterachse: Die vertretbaren Kräfte sind dabei so zu definieren, dass der Roboter so sensibel und verfügbar wie möglich agiert. Die Ermittlung dieser Grenzen ist ebenfalls durch Kraft-/Druckmessungen gemäß ISO/TS 15066 nachzuweisen.

## Greifer sorgt für sicheren Betrieb

Eine weitere zentrale MRK-Komponente und Schnittstelle stellt der elektrische Großhubgreifer Co-act EGL-C des ROKOKO-Projektpartners SCHUNK GmbH & Co. KG dar. Der Greifer stellt sicher, dass die Zahnräder form- und kraftschlüssig von der Kommissionierbox zur Montageposition gebracht werden. Während die wirkende Greifkraft bei den DGUV(Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung)-zertifizierten SCHUNK-Greifern bislang auf 140 Newton pro Greiferfinger begrenzt war, eröffnet der neue Greifer das Potenzial, MRK erstmals für Handling-Gewichte jenseits der Kleinteilemontage einzusetzen.

Um trotz der hohen Greifkraft die in der ISO/TS 15066 definierten biomechanischen Grenzwerte einzuhalten, ist der neue Greifer mit einer kombinierten Kraft- und Wegmessung ausgestattet: In die Grundbacken integrierte Kraftmessbacken sowie das Wegmesssystem überwachen permanent die jeweilige Greifkraft

sowie die Position der Greiferfinger. Die auf dem Greifer abgelegte Greifprozedur wiederum ist in mehrere Phasen unterteilt: Bis zu einer absoluten Distanz von 4 Millimetern zwischen Finger und Werkstück – deutlich weniger als die Dicke eines Fingers also – ist die Greifkraft auf unter 140 Newton pro Greiferfinger begrenzt. Kommt es in dieser Annäherungsphase zu einer Kollision, geht der Greifer sofort in den sicheren Halt, sodass keine Gefahr einer Verletzung besteht. Erst in der zweiten Phase, also bei einer Werkstückdistanz von weniger als 4 Millimetern, greifen die Finger mit der frei definierbaren Kraft von bis zu 450 Newton zu. Misst das System in dieser Schließphase eine Nachgiebigkeit – etwa weil ein zu kleines Werkstück gegriffen wird, das der Bediener gerade per Hand entfernen will –, stoppt auch diese Bewegung automatisch. Gleiches gilt, wenn die erwarteten Werkstückmaße um 2 Millimeter überfahren werden, weil beispielsweise kein Teil vorhanden ist. In der dritten Phase detektiert der Greifer schließlich, ob das Teil sicher gegriffen ist, und aktiviert die integrierte Greifkraftreihaltung. So kann das gegriffene Teil auch bei einem Not-Aus nicht verloren gehen.

## Ohne Freigabe keine Übergabe

Sichere Zustimmungstaster geben das Freigabesignal für den Roboter, damit die Übergabe des Schrägrads an den Werker erfolgen kann. Diese Zustimmungstaster sind ergonomisch in die Griffstücke am Greifer integriert und nur nach deren Betätigung kann der Werker die Bauteile – in Kombination mit der eigenen Auge-Hand-Koordination – zielgerichtet an die Montageposition über die Hauptwelle führen.

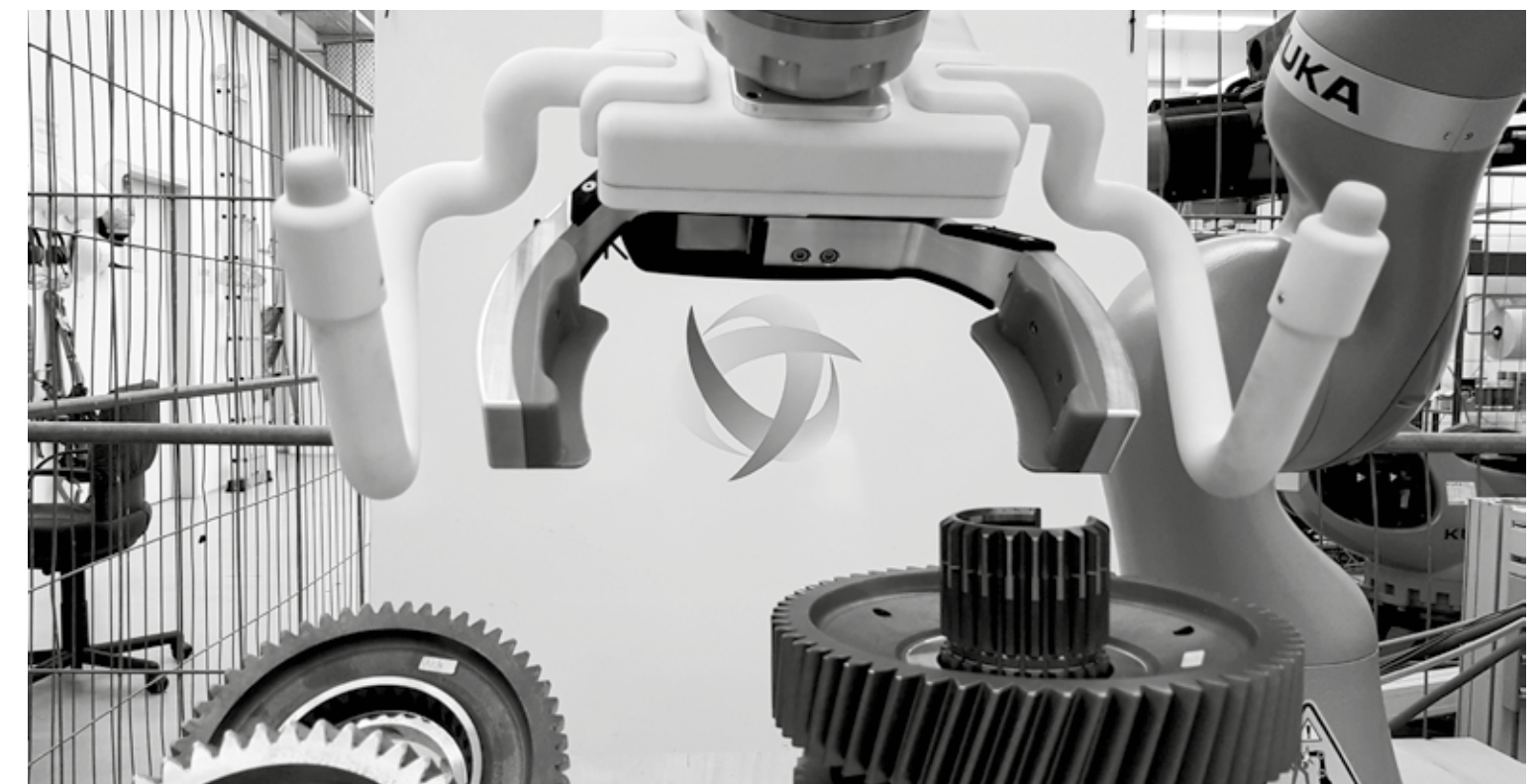
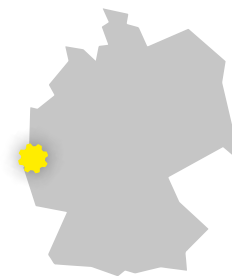


Bild 1: Prototypische Realisierung der MRK-Montage für schwere Getriebezahnräder, Quelle: ZF Friedrichshafen AG





Projekt KoKoMo

# MRK UND ARBEITSSICHERHEIT – EIN FALLBEISPIEL

Dr. Harald Grübel, Peter Dieterich (Euchner GmbH + Co. KG); Dr. Werner Herfs, Simon Storms, Simon Roggendorf, Oliver Petrovic (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL); Kurt Heinen (Heinen Automation GmbH & Co. KG)

**Durch eine intelligente Sicherheitssensorik lässt sich die Produktivität eines Fertigungsprozesses deutlich verbessern. Zudem sind digitale Daten für die Anlagensteuerung von Vorteil.**

Der KoKoMo-Projektpartner EUCHNER GmbH + Co. KG stellt Sicherheitskomponenten für den Maschinenbau her. Im Rahmen des Projekts wurde eine MRK-Lösung für die Montage eines neu entwickelten Schließsystems – eine Zugangssicherung für Automatisierungsanlagen – entwickelt. Das System ist in Teilmodulen realisiert, die dem Anwender eine einfache Veränderung der Zielfunktionen und einen einfachen Serviceablauf ermöglichen. Dazu wurden Steckmodule für Befehlsmeldegeräte entwickelt, die sich per „hot plugging“, also ohne Betriebsunterbrechung, in ein Basismodul einschieben lassen (siehe Bild 1). Für diese Steckmodule existieren mehr als tausend Varianten, die auftragsspezifisch zu montieren sind. Die ursprünglich geplante vollständig automatisierte Modulmontage musste verworfen werden, da einzelne Prozessschritte des Gerätezusammenbaus mit einer manuellen Montage wirtschaftlicher sind. Dazu gehören z.B. das Verarbeiten biegeschlaffer Teile oder das Einfädeln von Baugruppen in Gehäuseöffnungen. Einfache lineare Fügeprozesse, Schraubprozesse und Prüfschritte sind jedoch gut und wirtschaftlich automatisierbar. Das Anlagenkonzept sieht deshalb eine Verkettung manueller und automatisierter Arbeitsplätze mithilfe eines kollaborativen Montagesystems vor.

## MRK-Lösung im Überblick

Das Stecken und anschließende Verschrauben der Befehlsmeldegeräte in die Öffnungen der Frontplatte bleiben weiterhin manuelle Tätigkeiten. Ein MRK-Roboter übernimmt danach die

montierte Frontplatte und übergibt sie im weiteren Fertigungsprozess dem automatisierten Anlagenteil. Zeitgleich mit den automatisierten Prozessen wird am manuellen Arbeitsplatz das nächste Werkstück bearbeitet.

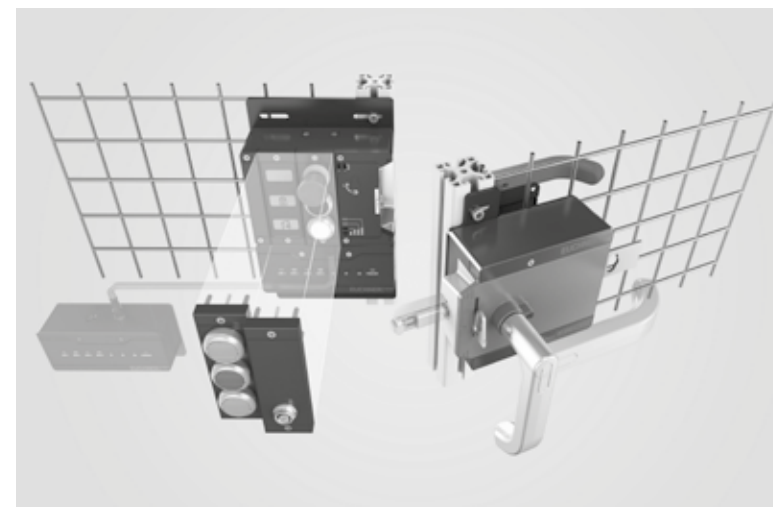


Bild 1: Modular aufgebautes Schließsystem mit Einschubelementen (beispielhafte Produktkonfiguration), Quelle: Euchner GmbH + Co. KG

Im Hinblick auf die Frage nach der Art der Verkettung des manuellen und des automatisierten Teils sowie nach der Wahl eines geeigneten Kollaborationsmodus, ergab sich folgende Erkenntnis:

Während der Montage der Produktvarianten ist keine direkte Verkettung des manuellen und automatisierten Teils der Montage möglich. Dadurch wäre der Roboter von der taktzeitbestimmenden Hauptzeit des Menschen abhängig. Aus wirtschaftlichen Gründen ist das jedoch nicht sinnvoll – es sollte mit einem Puffer gearbeitet werden.

## Sicherheitskonzept: Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Für die Auswahl der Kollaborationsart wurden zahlreiche Simulationen, insbesondere zur Taktzeitabschätzung, durchgeführt. Das Konzept sieht vor, dass Mensch und Roboter ein Bauteil sequenziell bearbeiten und die Arbeitsräume voneinander getrennt sind. Lediglich die Übergabzone kommt als Kontaktbereich zum Montagepersonal infrage, in der die produktivitätshemmende reduzierte Bahngeschwindigkeit des MRK-fähigen Robotersystems für den Anlagendurchsatz eine untergeordnete Rolle spielt. Eine Sicherheitssensorik soll garantieren, dass der Roboter außerhalb des Übergabebereichs mit der von Industrierobotern bekannten Bahngeschwindigkeit arbeiten kann. Es handelt sich hierbei nach DIN ISO/TS 15066 um die Betriebsweise der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung.

Der Arbeitsbereich ist durch zwei Lichtvorhänge in zwei Zonen aufgeteilt: Hinter dem Übergabebereich arbeitet der Roboter mit voller Geschwindigkeit. Dringt der Roboter in den Übergabebereich ein, so wird seine Geschwindigkeit sicherheitsgerichtet auf einen normkonformen Wert reduziert und der Lichtvorhang vor der Übergabzone aktiviert. Ein Eindringen der Werkerin oder des Werkers in den ersten Vorhang erzeugt einen sicherheitsbewerteten Halt des Roboters. Diese Sicherheitsfunktion im Roboter wird unter anliegender Energieversorgung im Brems- und im Haltebereich ausgeführt. Deshalb ist ein Wiederanlauf der

Anlage nach einem Freigabesignal einfach möglich. Der große Vorteil dieser Anordnung ist es, dass Industrieroboter mit integrierten Sicherheitsfunktionen wie z.B. „sicherheitsbewerteter Halt“ oder „sicherheitsgerichtet reduzierte Geschwindigkeit“ ohne den Einsatz einer sicheren Kraft- und Drehmomentüberwachung in allen Achsen verwendet werden können. Das reduziert die MRK-Kosten bei gleichzeitig hoher Produktivität drastisch.

## Keine Rüstzeiten durch effizienten Datenaustausch

Darüber hinaus spielte der Datenaustausch der Anlage eine große Rolle. Um die Variantenvielfalt wirtschaftlich zu gestalten, muss ein Auftragswechsel im System ohne Rüstzeiten möglich sein. Dazu ist ein effizienter Datenaustausch essenziell. Es müssen sowohl die Arbeitsanweisungen des manuellen Arbeitsplatzes als auch die Parameterversorgung der Automatikstationen als digitale Daten vorliegen. Um die Datenversorgung der Anlagensteuerung in der Fertigung zu garantieren, waren der Aufbau von Übergabestufen und Interpretationsprozesse erforderlich.

Bild 2 zeigt die Anlagenübersicht aus dem Simulationsprogramm, das zur virtuellen Inbetriebnahme eingesetzt wurde. Die hinteren Roboter arbeiten im nicht kollaborativen Betrieb (sicherheitsbewerteter überwachter Halt). Der vordere Roboter, dessen Arbeitsraum durch eine Kugel gekennzeichnet ist, arbeitet im Kooperationsbereich geschwindigkeits- und abstandsüberwacht mit dem Menschen zusammen.

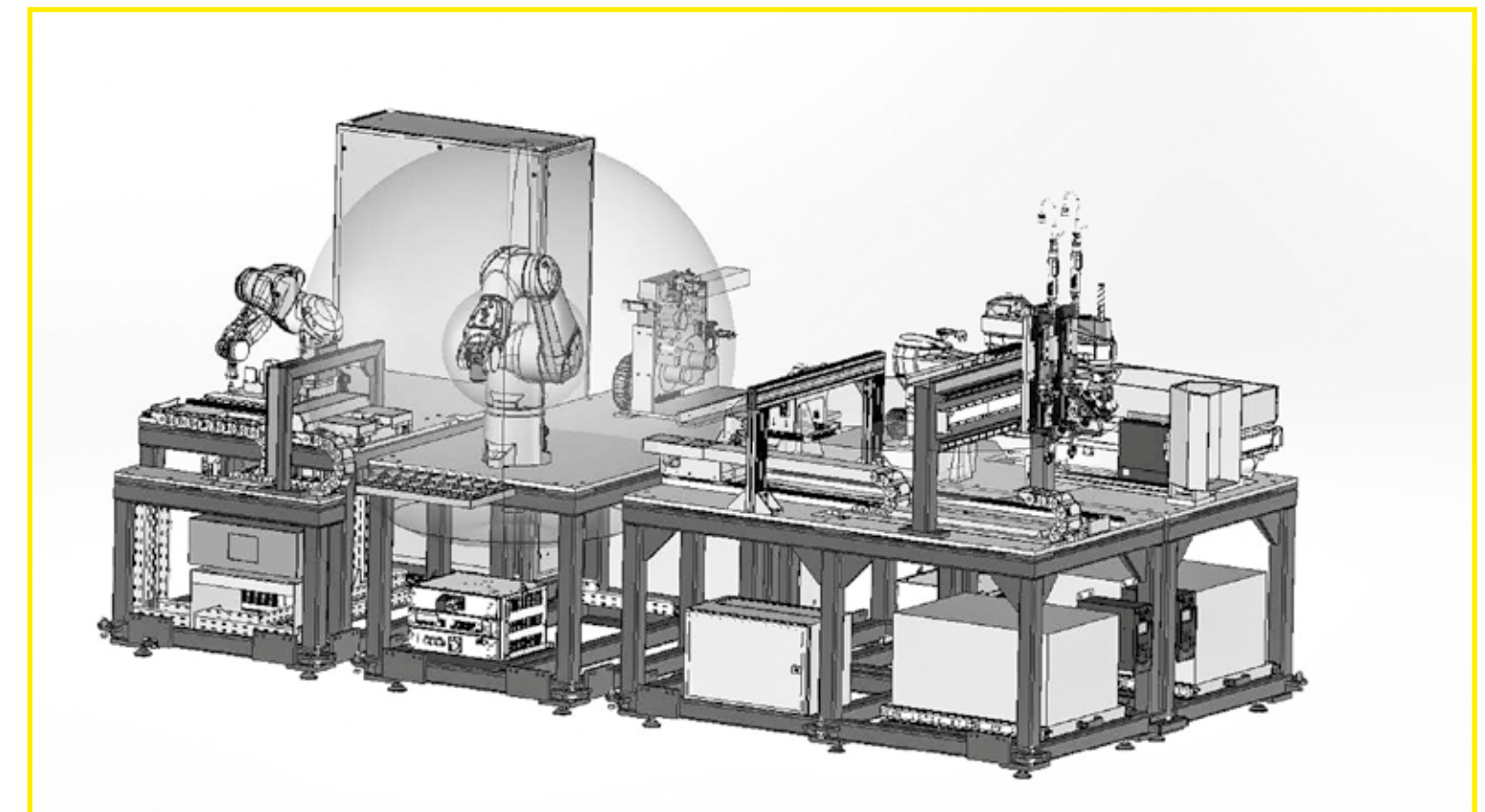


Bild 2: Gesamtanlage mit integrierter MRK-Lösung



# SYSTEM- INTEGRATION

## KAPITEL 8

Bereits seit einigen Jahren ist auf einschlägigen Fachmessen ein großes Angebot von Leichtbaurobotern unterschiedlicher Funktionalität zu sehen, die prinzipiell für die Mensch-Roboter-Kollaboration geeignet sind. Trotzdem ist der Durchdringungsgrad an MRK-Applikationen im montierenden Gewerbe in Deutschland nach wie vor gering. Denn: Zwischen dem Kauf eines Roboters und der Realisierung eines funktionsfähigen und wirtschaftlichen kollaborativen Montagesystems liegen viele Planungsschritte und viele Entscheidungen. Die Systemintegration der technischen Komponenten ist für Anwender und Ausrüster eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, die neben technischen auch personale und organisationale Herausforderungen beinhaltet.

Eine Vielzahl von Funktionsanforderungen ist zu erfüllen, die eine strukturierte Vorgehensweise und viele Testphasen erfordern. Dies wird in der Praxis oft unterschätzt und ist der Grund dafür, warum gestartete Projekte scheitern oder nicht den gewünschten Erfolg bringen. Auch der Sachverhalt, dass die Kosten der Gesamtapplikation meist ein Mehrfaches des Roboterpreises betragen, ist vielen betrieblichen Entscheidungsträgern nicht bewusst. Doch es kann gelingen – wie die Beispiele in diesem Kapitel zeigen.

## SYSTEMINTEGRATION KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME

- 174 Wortwechsel
- 184 Fallbeispiel Greifermontage mit MRK-Befettungsapplikation (ROKOKO)
- 188 Peripherieplanung für MRK-Applikationen (ROKOKO)
- 192 MRK bei einem mittelständischen Automobilzulieferer (KUKoMo)
- 196 MRK in Montagelinien von KMU (KoMPI)



„Die Auswahl der geeigneten Applikation sowie die frühzeitige Einbindung des betroffenen Personals sind sehr wichtig.“



Dr. **ROBIN SCHULZE**  
Leiter für Forschung und Entwicklung bei der SITEC Industrietechnologie GmbH



**GABRIELE HÖPTNER**  
Projektleiterin im Bereich Produktion Komponenten bei der Karl Dungs GmbH & Co. KG

„Die simulationsgestützte Planung hat uns sehr dabei geholfen, das MRK-System optimal in die bestehende Infrastruktur einzubetten.“



Dr. **PETER HEILIGENSETZER**  
Geschäftsführer der MRK-Systeme GmbH

„Zur effizienten Planung von MRK-Systemen haben sich Machbarkeitsstudien mit detaillierten Risikoanalysen als sinnvoll erwiesen.“



Dr. **HENRY ARENBECK**  
Leiter Forschung und Entwicklung bei der Boll Automation GmbH

„Die erste MRK-Applikation sollte möglichst einfach sein, damit die Risiken überschaubar bleiben.“



# WORTWECHSEL

Systemintegration  
kollaborativer  
Montagesysteme

DR. ROBIN  
SCHULZE

GABRIELE  
HÖPTNER

DR. PETER  
HEILIGENSETZER

DR. HENRY  
ARENBECK



## WIE LÄUFT EINE ERFOLGREICHE SYSTEMINTEGRATION AB?

Im Forschungsprojekt KUKoMo haben wir uns erstmals mit der Integration von MRK-Systemen auseinandergesetzt. Am Anfang stand die Auswahl einer für MRK geeigneten Applikation in unserer Serienfertigung. Diese Auswahl haben wir im Rahmen von Workshops gemeinsam mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Fertigung vorgenommen. Diese frühzeitige Einbindung des betroffenen Personals hat sehr zur Akzeptanz der neuen Technologie und zur effizienten Systemintegration beigetragen.

Bei uns war die Ausgangssituation ganz ähnlich. Auch wir konnten durch unsere Mitarbeit im KoMPI-Projekt unsere Pläne zur Integration eines MRK-Systems in unsere Produktion umsetzen. Das Projekt hat uns in die Lage versetzt, diese neue Technologie zunächst erst mal auszuprobieren, ohne dass dabei Wirtschaftlichkeitsaspekte im Vordergrund standen. Dieser Spielraum ist gerade bei einer Erstanwendung von MRK sehr hilfreich.

Das Lastenheft, das die Aufgabe der MRK-Applikation definiert, bildet den Startpunkt für die Systemintegration. Der nächste Schritt besteht in Konzept- bzw. Machbarkeitsuntersuchungen. Darin werden Taktzeiten ermittelt und technische Rahmenbedingungen abgesichert. Da die Sicherheit bei MRK-Systemen ein zentrales Thema ist, sollte man bereits in der Machbarkeitsstudie besonderes Augenmerk auf die Risikobeurteilung legen. Gibt es schließlich grünes Licht für die Umsetzung, folgen die elektrische und mechanische Konstruktion, Fertigung und Inbetriebnahme.

Herr Heiligensetzer hat den Prozess vom Konzept bis zur Umsetzung gut beschrieben. Bei der Definition des Lastenhefts tun sich viele Anwender noch schwer - hier fehlen einfach noch die Erfahrungen im Umgang mit MRK. Daher müssen wir als Systemintegrator den Prozess viel früher als bei klassischen Automatisierungsprojekten begleiten, z.B. bereits bei der Potenzialanalyse. Aufgrund des Reifegrads der MRK-Technologie halten auch wir Vorstudien und Risikoanalysen für zentrale Planungsinstrumente.



## WELCHE FAKTOREN BEEINFLUSSEN DIE INTEGRATION KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME?

Wir haben dazu drei Handlungsfelder identifiziert. Erstens geht es um die Arbeitsorganisation und die Frage, für welche Applikation MRK nutzbringend ist. Das zweite Handlungsfeld beinhaltet die sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich zum Teil aus Normen - wie z.B. ISO 10218 und ISO TN 15066 - ergeben. Drittens sind strategische Themen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit von MRK und erfolgversprechende Geschäftsmodelle zu bearbeiten.

Wichtig ist es, einen geeigneten Montagebereich für die MRK-Anwendung auszuwählen. Das bedeutet, die Prozesse und die Bauteilbeschaffenheit in Bezug auf ihre MRK-Tauglichkeit genau zu analysieren. Eine Herausforderung stellten bei uns die hohe Variantenvielfalt - mit komplexen Produkten, die aus vielen kleinen Einzelbauteilen bestehen - sowie die kleinen Losgrößen dar. Für zukünftige Projekte wird die Wirtschaftlichkeit an Bedeutung gewinnen. So kann es durchaus sein, dass sich der Einsatz von MRK eher für eine neu zu planende als für eine existierende durchoptimierte Produktionslinie lohnt.

Die technischen Rahmenbedingungen in der Produktion sind ein zentraler Faktor bei der Systemintegration. Wie Frau Höptner bereits sagte, spielt die Bauteilbeschaffenheit eine wichtige Rolle. So sind scharfkantige Bauteile eher ungeeignet für MRK-Anwendungen. Zudem können weitere technische Parameter, wie z.B. hohe Taktzeiten oder ein geringeres Platzangebot, den Einsatz von MRK hemmen.

Das bisher Gesagte kann ich nur bestätigen. Es sind gerade die Sicherheitsanforderungen, die die Systemintegration besonders anspruchsvoll machen. Wir empfehlen, bei diesem Thema auch auf den Austausch mit den Berufsgenossenschaften zu setzen. Ein weiterer Punkt ist die Flexibilität der Produktion, die durch den Einsatz von MRK beeinflusst wird. Eine hohe Variantenvielfalt mit unterschiedlichen Fertigungstoleranzen stellt MRK-Systeme vor Herausforderungen. Hier sollte man genügend Zeit in der Konzeptionsphase einplanen, um die Qualität durch entsprechende Testläufe abzusichern.



## WELCHE KONZEPTE UND TOOLS HABEN SICH BEWÄHRT?

Die Auswahl der geeigneten Applikation sowie die frühzeitige Einbindung des betroffenen Personals sind sehr wichtig. Bei der Planung haben sich Simulationswerkzeuge bewährt, mit denen die neue Arbeitsumgebung und die -abläufe vorgedacht werden können. Die vielfältigen und unterschiedlichen Anwendungen in der Montage sind mit hohen Sicherheitsanforderungen verbunden, die relativ hohe Hürden für den MRK-Einsatz darstellen. Auf dem Weg von der Kooperation zur echten Kollaboration von Mensch und Roboter gibt es daher unseres Erachtens noch viel zu tun.

Die simulationsgestützte Planung hat uns sehr dabei geholfen, das MRK-System optimal in die bestehende Infrastruktur einzubetten. So konnten wir die räumliche Anordnung festlegen und die Fahrwege des Leichtbauroboters vorab ermitteln. Diese Erkenntnisse waren insbesondere für die Sicherheitskonzepte zur Kollisionsvermeidung und zur Gestaltung der Arbeitsabläufe von Nutzen. Zudem haben wir ebenfalls die Erfahrung gemacht, dass eine frühzeitige Einbindung aller beteiligten Personen - vom Werker bis zur Geschäftsführung - akzeptanzstiftend und damit essenziell für den Projekterfolg ist.

Auch wir halten Simulationen für überaus sinnvoll. Die verfügbaren Werkzeuge kommen jedoch an ihre Grenzen, wenn es um sicherheitstechnische Bewertungen geht. Sie sind nicht in der Lage, Kollisionen zwischen Mensch und Roboter zu simulieren. Dafür braucht man entsprechende Testsysteme, die mit einer Kraft- und Druckmesstechnik versehen sind. Diese Testsysteme ermöglichen es, Kollisionsfolgen zu analysieren und damit die sicherheitstechnische Bewertung des MRK-Systems zu validieren.

Wir sehen ebenfalls dringenden Handlungsbedarf bei den Kontaktsimulationen. Sie wären ein äußerst hilfreiches Tool, um Gefährdungsanalysen effizienter zu machen. Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind erforderlich, um die Taktzeiten simulativ zu analysieren und damit den Planungsaufwand zu reduzieren. Unabhängig davon empfiehlt es sich, frühzeitig das erforderliche Know-how rund um MRK aufzubauen und dabei insbesondere das Thema Sicherheit im Blick zu haben.

### SYSTEMANWENDER

Die SITEC Industrietechnologie GmbH entwickelt, fertigt und liefert als Erstausrüster weltweit kundenspezifische Sonderanlagen im Bereich Montage, Laser und ECM.

### SYSTEMANWENDER

Die Karl Dungs GmbH & Co. KG entwickelt und fertigt Systemlösungen für die Heiz- und Prozesswärmeindustrie sowie für die Kraft-Wärme-Kopplung.

### SYSTEMINTEGRATOR

Die MRK-Systeme GmbH liefert Automatisierungslösungen für unterschiedliche Industriebereiche.

### SYSTEMINTEGRATOR

Die Boll Automation GmbH bietet Roboterlösungen entlang der gesamten industriellen Wertschöpfungskette an.



# „SIMULATIONS- GESTÜTZTE PLANUNG UND INTUITIV BEDIEN- BARE ROBOTER ERLEICHTERN DIE SYSTEM- INTEGRATION.“

Prof. Dr.  
Bernd Kuhlenkötter

## SYSTEMINTEGRATION AUS SICHT DER WISSENSCHAFT

Simulationssysteme kommen vor einer geplanten Investition in eine Automatisierungsanwendung zum Einsatz. Dies hat zum einen den Vorteil, dass alle beteiligten Akteure zu einem sehr frühen Zeitpunkt zusammenkommen. Zum anderen besteht die Möglichkeit, sich über die technischen Randbedingungen zu informieren, die Performance einer automatisierten Anlage beispielsweise in Richtung Ausbringung und Zykluszeit zu testen und auch das erforderliche Investment abzuschätzen.

### Simulationsgestützte Planung ist wichtiger Erfolgsfaktor

Am Simulationssystem lassen sich mit den unterschiedlichen Kompetenzträgern im Unternehmen, wie beispielsweise den Mitarbeitenden mit tiefem Prozess-Know-how oder den Planern zur Integration der erforderlichen Logistik, mithilfe der grafischen 3-D-Darstellung Ideen und Entwürfe diskutieren und weiter ausdetaillieren. Dadurch ist es schon sehr früh möglich, die grundlegenden Funktionsideen abzuschätzen. Nahezu alle heute verwendeten Simulationssysteme sind PC-basiert, sodass keine spezielle IT-Infrastruktur mehr erforderlich ist.

Simulationen eignen sich sehr gut dazu, die räumlichen Anforderungen der Automatisierungslösung vorherzusagen und festzulegen, an welcher Stelle eine automatisierte Lösung in die bestehende Infrastruktur integriert werden kann. Aus der Simulation der resultierenden Bewegungszonen ergeben sich die erforderlichen Sicherheitsräume, um Kollisionen mit bestehenden Aufbauten oder mit Menschen zu vermeiden. Essenzielle Voraussetzung für die Planung einer Automatisierungslösung sind die - von den Roboterherstellern in der erforderlichen Qualität und Genauigkeit bereitgestellten - Daten der eingesetzten Robotersysteme. Ein weiterhin unternehmensbezogener manueller Aufwand ist die Übernahme der Produktdaten der zu montierenden Produkte, z.B. aus den unternehmensinternen Konstruktions- und Planungswerkzeugen.

### Reduzierter Schulungsaufwand durch intuitive Bedienung

Eine Vielzahl von Entwicklungen - u.a. auch aus dem KoMPI-Projekt - trägt dazu bei, dass sich Simulationslösungen neben der gegebenen Integrierbarkeit auch besonders durch eine intuitive Benutzerführung auszeichnen, sodass der Schulungs- und Einarbeitungsaufwand beim Anwender gering ist. So kann der Bediener sehr schnell belastbare Ergebnisse mit der Simulation erzielen und für die spätere Realisierung ein Höchstmaß an Qualität und Planungssicherheit erwarten.



Prof. Dr.  
**BERND  
KUHLINKÖTTER**

Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme (LPS) an der Ruhr-Universität Bochum

Der Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) an der Ruhr-Universität Bochum, beschäftigt sich mit der Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren (Bachelor/Master) und der Entwicklung von innovativen und anwendungstauglichen Lösungen für die produzierende Industrie.



Dr.  
**ANDREAS WOLF**  
Geschäftsführer der  
robomotion GmbH

Die robomotion GmbH bietet Roboterlösungen für die gesamte industrielle Wertschöpfungskette mit den Schwerpunkten Montage und Verpackung.

## SYSTEMINTEGRATION AUS SICHT EINES INTEGRATORS

Grundsätzlich ist eine Systemintegration erfolgreich, wenn die Anforderungen des Kunden mit einem passenden technischen Konzept wirtschaftlich umgesetzt werden. Um die Wirtschaftlichkeit einer MRK-Anwendung darzustellen, muss man im Vergleich zu herkömmlichen Automatisierungslösungen oft neue Wege gehen.

Ein Beispiel dafür ist unser ARIZ-Projekt, in dem wir das MRK-System als „Wanderarbeiter“ in der Montage unterschiedlicher Produkte mit kleinen Losgrößen einsetzen. Durch diesen flexiblen Einsatz an verschiedenen Arbeitsplätzen steigen die Auslastung und damit die Wirtschaftlichkeit des MRK-Systems.

### Handlungsbedarf bei sicherheitstechnischen Regularien

Um einen optimalen Arbeitsablauf zu ermöglichen, müssen die von Mensch und Roboter gemeinsam genutzten Arbeitsplätze ertüchtigt werden. Bei deren Planung haben sich Simulationen und Ablauftests bewährt. Oft ist man der Konzeption mit gegenläufigen Zielen konfrontiert. So kann beispielsweise eine bestimmte Beleuchtung in Bezug auf die Ergonomie für den Menschen sehr gut sein, jedoch die Kamerafunktionalität des Roboters negativ beeinflussen. Gleiches gilt für die Taktzeiten: Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sind hohe Taktzeiten wünschenswert – sie erhöhen jedoch das Gefährdungspotenzial für den Menschen, weil sich der Roboter schneller bewegt.

Hinzu kommt, dass die sicherheitstechnischen Regularien für MRK-Systeme noch viel Interpretationsspielraum lassen. Momentan ist man dann auf der sicheren Seite, wenn man die Arbeitsräume von Mensch und Roboter konsequent trennt – d.h., wenn man auf Kooperation statt auf Kollaboration setzt.

## SYSTEMINTEGRATION AUS SICHT EINES INTEGRATORS

Automatisierungslösungen lassen sich umso einfacher in eine Produktionsanlage integrieren, je mehr Know-how und Kompetenzen auf Kundenseite vorhanden sind. Dies ist derzeit bei kollaborativen Montagesystemen eher selten der Fall. Deshalb ist es bei der Einführung solcher Systeme besonders wichtig, die betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die neue Technologie zu sensibilisieren und von Anfang an in den Integrationsprozess einzubinden.

### Nutzen in Bezug auf Kosten, Zeit und Qualität bewerten

Der mit einer Automatisierung verbundene Nutzen sollte nicht nur betriebswirtschaftlich, sondern auch in Bezug auf die Zeit und Qualität bewertet werden. MRK-Systeme können vor allem mit höheren Produktqualitäten und einer passenden Ergonomie punkten. Die verbesserten Arbeitsbedingungen sind neben der Substitution manueller Tätigkeiten Aspekte, die die MRK-Technologie in Zeiten des Fachkräftemangels vor allem auch für KMU attraktiv machen.

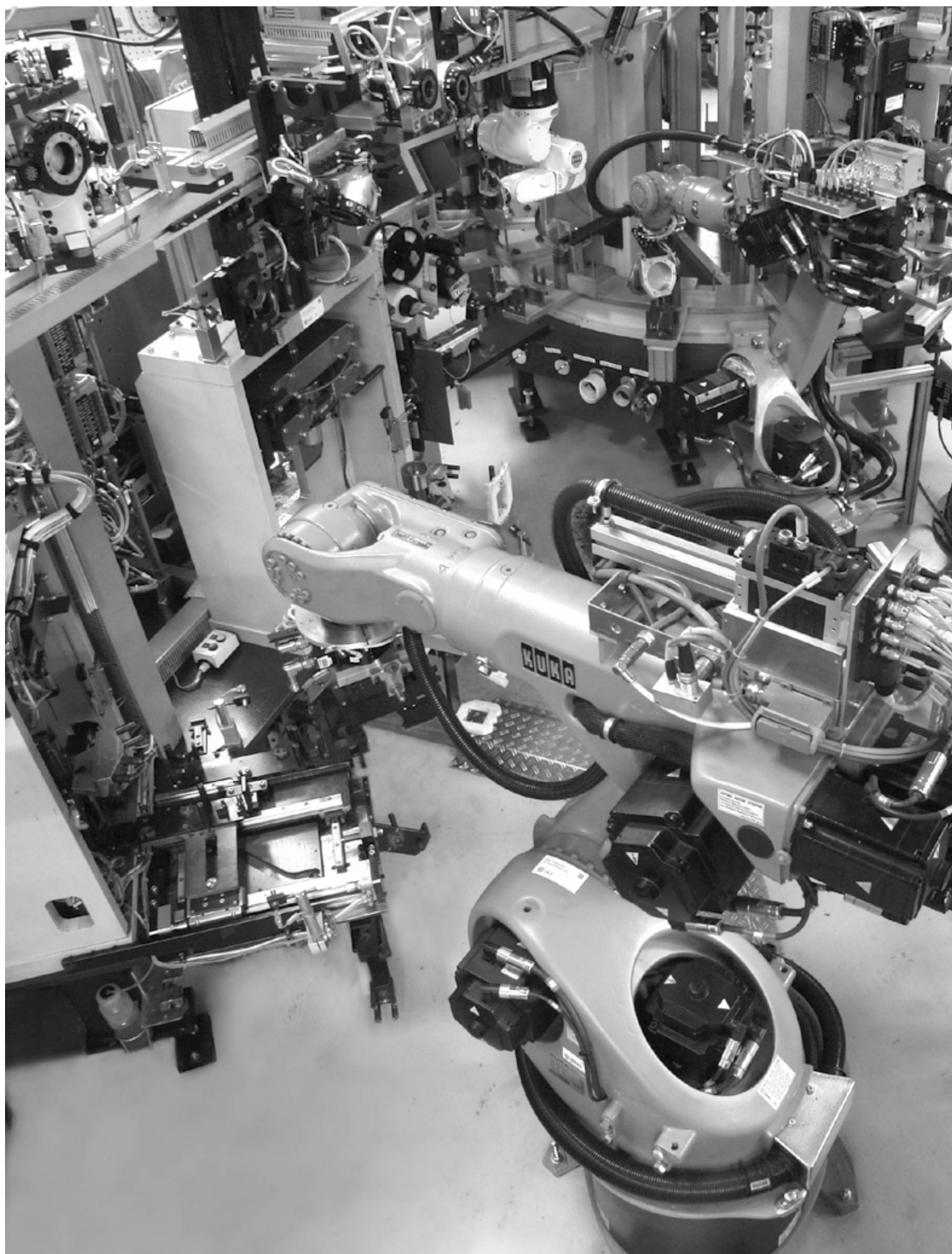
Um böse Überraschungen bei der Systemintegration zu vermeiden, sollte bereits in einer frühen Projektphase die technische Machbarkeit bewertet werden. Dazu haben wir im ROKOKO-Projekt eine Bewertungsmethodik entwickelt, die den automatisierten Prozess mithilfe von Funktionsbausteinen abbildet, denen technische und betriebswirtschaftliche Parameter zugeordnet sind. Auf dieser Basis lassen sich Aussagen zur Machbarkeit und zur Höhe der erforderlichen Investition ableiten. Zur effizienten Planung und Umsetzung eines MRK-Systems haben sich zudem das virtuelle Engineering in Form von Bewegungsablaufsimulationen sowie eine intuitive Roboterprogrammierung als hilfreich erwiesen.



**RALF STEINMANN**  
Geschäftsführer der Schnaithmann Maschinenbau GmbH

Die Schnaithmann Maschinenbau GmbH ist ein Systemlieferant und bietet Automatisierungslösungen in der Montage-, Materialfluss- und Handhabungstechnik.





Quelle: ZF Friedrichshafen AG

## SYSTEMINTEGRATION AUS SICHT EINES INTEGRATORS

Eine gelungene Systemintegration, sowohl in alltäglichen Kundenprojekten als auch in einem Forschungsprojekt, bedeutet in erster Linie, „ein gemeinsames Ziel zu verfolgen“. Dies beginnt üblicherweise mit der Ist-Aufnahme vor Ort und reicht bis zur Definition des Soll-Zustandes, der die technischen Anforderungen an Roboter, Greifer, Speichermedien, Taktzeiten etc. aufzeigt. Für ein MRK-Projekt müssen ebenfalls gemeinsame Ziele sowie die klassischen Faktoren Kosten, Zeit und Qualität klar definiert sein. Sie dienen als Leitlinien für alle Projektphasen, von der Konzeption über die Konstruktion und Montage bis hin zur Inbetriebnahme.

### Faktoren und Tools, die die Integration von MRK beeinflussen

Im Wesentlichen soll eine Kollaborative-Montage-Applikation einen Vorteil gegenüber der Vollautomatisierung hinsichtlich Raumersparnis, Ergonomie sowie Flexibilität mit sich bringen. Bei den schutzzaunlosen Lösungen spielen Themen wie Sicherheit und die Akzeptanz durch die Mitarbeiter eine besonders große Rolle. Um die Sicherheit zu gewährleisten, müssen die gemeinsamen Arbeitsbereiche zwischen Mensch und Roboter definiert und darauf aufbauend entsprechende Sicherheitskonzepte entwickelt und umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang spielt die Norm ISO TS 15066 eine wichtige Rolle.

In der Planungs- und Konzeptphase haben sich die gängigen 3-D-Anwendungen bewährt. Ein weiteres in unserem ROKOKO-Projekt entwickeltes Tool bietet zudem Unterstützung bei der Abschätzung des Investitionsaufwands für ein MRK-Projekt.

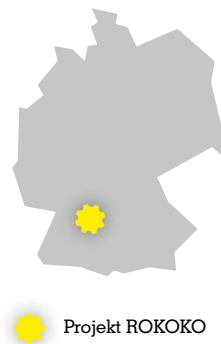


### VIKTOR BERNS

Leiter des Projektmanagements bei der HandlingTech Automations-Systeme GmbH

Die HandlingTech Automations-Systeme GmbH realisiert Automationsysteme, die eine Vollautomatisierung von industriellen Prozessabläufen ermöglichen.





# FALLBEISPIEL GREIFER-MONTAGE MIT MRK-BEFETTUNGSAPPLIKATION

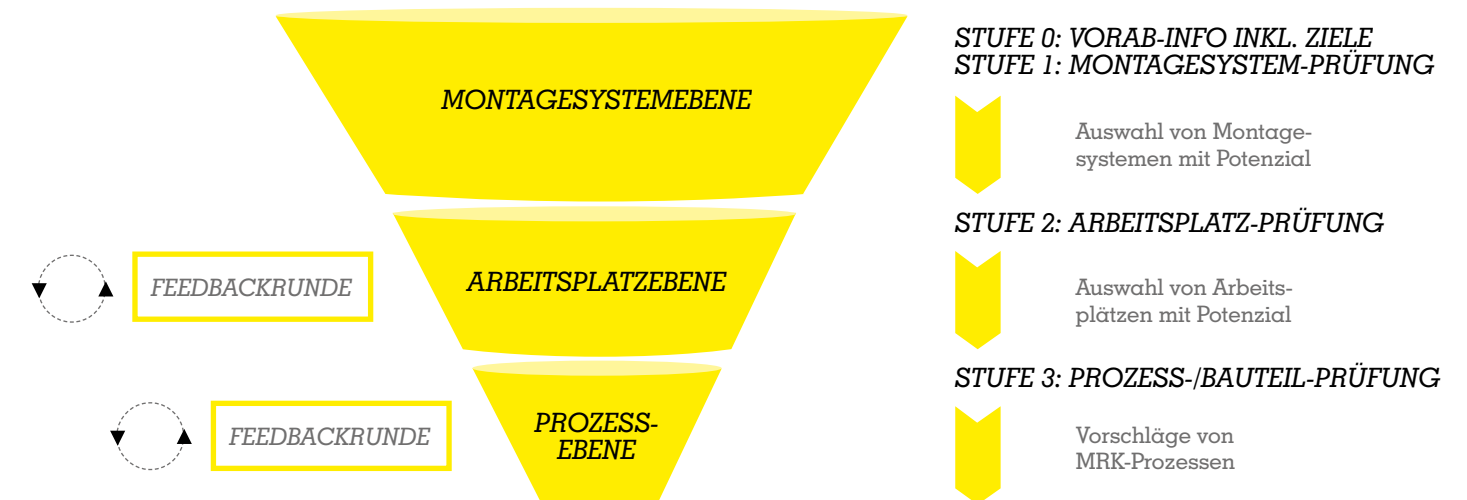


Bild 2: Ebenenmodell des Applikationssuchers

Julia Berg (Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik, IGCV); Prof. Dr. Matthias Haag (SCHUNK GmbH & Co. KG); Peter Rally und Oliver Scholtz (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO); Volker Sieber (Schnaithmann Maschinenbau GmbH)

**Die Integration eines MRK-Systems startet bei der Suche nach einer geeigneten Applikation und endet mit der Realisierung einer wirtschaftlichen Lösung. Sie erfordert insbesondere bei Bestandsanlagen eine gründliche Planung.**

In dem vorliegenden Fallbeispiel geht es um einen pneumatischen Greifer, der in mittleren Stückzahlen an zwei Arbeitsplätzen montiert, geprüft und verpackt wird. Das Material wird halbgeordnet oder in Form von Schüttgut bereitgestellt. Die Montage stellt hohe Ansprüche an die Sensomotorik des ausführenden Personals – vor allem die Montage eines innenliegenden Quadrings ist eine Herausforderung. Zudem müssen nahezu alle Teile vor der Montage eingefettet werden. Dieser Vorgang erfolgt mithilfe eines Pinsels und eines Fetttopfs. Da es zwei unterschiedliche Fette gibt, muss eine Verwechslung ausgeschlossen werden. Pinselhaare, die eventuell beim Fetten im Produkt hängenbleiben, sind ein Qualitätsmangel, der zu einem undichten Produkt führen kann. Bild 1 zeigt den Arbeitsplatz in der Ausgangssituation. Das Ziel des ROKOKO-Projekts bestand darin, dass ein Roboter die Tätigkeit des Befettens übernimmt.

## MRK-Integration in Bestandsanlagen

Im Fokus des ROKOKO-Projekts stand die Integration von MRK in Bestandsanlagen bzw. sogenannte Brownfield-Applikationen. Die Herausforderungen sind hierbei ungleich größer als bei einer Neuplanung, da der schutzzaunlose Roboter gegen jahrelang optimierte manuelle Abläufe konkurrieren muss und typischerweise keine hohen Geschwindigkeiten fahren darf.

Im Fallbeispiel Greifermontage wurde die MRK-Integration sukzessive anhand der verschiedenen Planungsphasen – 1. Vorplanung (inkl. Zieldefinition), 2. Grobplanung, 3. Feinplanung und Realisierung – vorbereitet.



Bild 1: Ausgangssituation der Greifermontage, Quelle: SCHUNK GmbH &amp; Co. KG

## 1. Vorplanung:

### Applikationssucher findet geeignete MRK-Anwendung

Viele Unternehmen sind sich nicht im Klaren darüber, an welcher Stelle der Einsatz eines kollaborativen Montagesystems sinnvoll ist. Um geeignete Applikationen für MRK-Anwendungen zu finden, haben die ROKOKO-Projektpartner den sogenannten Applikationssucher entwickelt. Er richtet sich vor allem an Unternehmen, die noch über keine oder wenig Erfahrung mit der MRK-Technologie verfügen und die MRK-Applikation in ihrer Bestandsanlage einsetzen wollen. Der Begriff „Applikationssucher“ bezieht sich auf ein Ebenenmodell (Bild 2), das auf Basis festgelegter Kriterien das Suchfeld so weit eingrenzt, bis man Vorschläge für Prozesse erhält, die sich prinzipiell für eine MRK-Anwendung eignen. Um die Zielsetzungen der Anwender abzubilden, werden relevante Informationen vorab abgefragt.

Bei dieser Methode kann es passieren, dass potenziell geeignete Prozesse unberücksichtigt bleiben, weil z.B. das zugehörige Montagesystem in der Stufe 1 verworfen wurde. Bei den bisherigen Anwendungsfällen ließen sich solche Prozesse jedoch stets in Feedbackrunden – in Gesprächen und Workshops mit Expertinnen und Experten aus der Montage und der Produktentwicklung – identifizieren.

### Eingrenzung der gewählten Prozesse

Auf Basis einer Abschätzung der Zeitersparnis (siehe Beitrag „Kollaborative Montagearbeitsplätze gestalten – ein Fallbeispiel“ in Kapitel 4) und der Investitionskosten (siehe Beitrag „Investitionsabschätzung für MRK-Anwendungen“ in Kapitel 9) lassen sich die Prozesse bewerten. Roboter können ein wesentlicher Kostentreiber der notwendigen Investitionen sein. Daher enthält die Investitionsabschätzung eine Roboterübersicht mit Kennwerten wie Reichweite, Traglast und Genauigkeit.

### Machbarkeit und erster Kostenvoranschlag

Im Fallbeispiel fiel die Wahl auf den Befettungsprozess, der aus Qualitäts- und Ergonomiegründen automatisiert werden sollte. Die Befettung kommt allerdings mehrfach im Montageprozess vor und ist zudem keine einfache Greif- oder Fügeanwendung, sodass eine vertiefte Untersuchung der technischen Machbarkeit und der Montagesequenz von Mensch und Roboter notwendig war. Die Peripherieplanung hatte in diesem Projekt eine besondere Bedeutung, sodass sie in einem eigenen Beitrag behandelt wird (siehe folgenden Beitrag in diesem Kapitel).

Die Untersuchung der Montagesequenz erfolgte mithilfe eines Vorranggraphen, in dem die jeweils dem Menschen und dem Roboter zugeordneten Teilverrichtungen abgebildet sind. Aus dieser Darstellung ließ sich ableiten, wo eine Entkopplung der Mensch- und der Roboterprozesse möglich ist. Das bedeutet, dass alle Roboterprozesse vor der manuellen Montage erfolgen können – vorausgesetzt, der Mensch stellt dem Roboter alle Teile bereit. Dieser Ablauf hat zudem den Vorteil, dass man auf eine kostenintensive, automatisierungsgerechte Teilebereitstellung für den Roboter verzichten kann.

Die Ergebnisse der technischen Machbarkeitsuntersuchung zeigten, dass sowohl die Befettung als auch die Montage der Quadrings (teil-)automatisiert möglich sind.

Diese ersten Planungsgrundlagen bildeten die Grundlage für die detailliertere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (siehe Beitrag „Wirtschaftlichkeit von MRK bewerten“ in Kapitel 9) und den Einstieg in die Grobplanung.



## 2. Grobplanung

In der Grobplanung wird das bisherige Konzept so weit ausgearbeitet, dass der Systemintegrator dem Anwender ein konkretes Angebot unterbreiten kann.

### Einbindung des Anwenders

In einem nächsten Schritt wurden die für die weitere Planung erforderlichen Daten mit den Mitarbeitenden der Montage auf Richtigkeit und Vollständigkeit abgeglichen. Die so erarbeitete Übersicht war die Basis, um unterschiedliche Strategien für die automationsgestützte Befettung abzuleiten. Dabei bestätigte sich, das Lose, Chargen, aber auch Einzelteile montageparallel oder vorbereitend gefettet und mit den Quadringen bestückt werden können.

Unterschiedliche Konzepte zur Gestaltung der Arbeitsplätze wurden im Rahmen von Workshops mit der Montageleitung und den Mitarbeitenden diskutiert. Dabei zeigte sich, dass der manuelle Bereich, einschließlich der Materialbereitstellung, so wenig wie möglich vom bisherigen Montagearbeitsplatz abweichen sollte (siehe Bild 1). Die Position des Roboters in Bezug zum manuellen Arbeitsplatz wurde mithilfe eines Augmented-Reality-Systems überprüft und optimiert.

### Montageablauf und Sicherheitskonzept

Beim Montagekonzept orientierte man sich ebenfalls an den bisherigen Gegebenheiten und setzte einen One-Piece-Flow um, der Losgröße 1 zulässt. Beim One-Piece-Flow wird immer nur ein Produkt zum nächsten Arbeitsplatz - in diesem Fall zum Roboter und wieder zurück - weitergereicht. Im vorliegenden Fallbeispiel sind maximal zwei bestückte Werkstückträger im Umlauf - einer zum Befetten und einer fertig befettet bereit für die Montage. Daraus resultiert folgender Ablauf:

1. Der Werkstückträger wird mit Teilen bestückt und dem Roboter zugeführt.
2. Der Werkstückträger mit bereits fertig befetteten Bauteilen kommt an den manuellen Arbeitsplatz.
- 3a. Der Roboter befettet die neuen Teile und montiert die Quadringe.
- 3b. Parallel dazu werden manuell die vom Roboter vorbereiteten Teile zum Endprodukt montiert.
4. Das montierte Produkt geht zu einer Prüfstation.
5. Der jetzt leere Werkstückträger wird - mit neuen Teilen bestückt - dem Roboter zugeführt; der Vorgang startet erneut bei 1.

Für die Auswahl eines tatsächlich MRK-tauglichen Konzepts spielt die Sicherheit die entscheidende Rolle. Viele der Sicherheitsanforderungen ließen sich mit „gängiger“ Sicherheitstechnik

bzw. den Sicherheitsfunktionen des Roboters abdecken. Lediglich für den Bereich der Befettungsdüsen war eine spezielle Lösung erforderlich. Diese besteht darin, dass die vom Roboter geführte Düse im Fall eines Kontakts nachgibt.

Anhand des Montage- und Sicherheitskonzepts konnten ein erstes Groblayout, ein Lastenheft und eine konkretere Kostenkalkulation erstellt werden. Auf dieser Basis gab es grünes Licht für die Feinplanung und Realisierung.

## 3. Feinplanung und Realisierung

### Montageablauf

In den beiden ersten Planungsschritten hatte sich gezeigt, dass der Roboter so schnell arbeitet, dass er sogar zwei Montagearbeitsplätze mit vorbereiteten Teilen versorgen könnte. Auf diese Weise ließe sich die Wirtschaftlichkeit der Applikation enorm steigern. Bisher war für das betrachtete Produkt nur ein Arbeitsplatz vorgesehen. In dieser Planungsphase (Feinplanung) wurde ein zweiter Arbeitsplatz (Bild 3) konzipiert, an dem ein anderes Produkt montiert wird. Dafür mussten die entsprechenden Konzepte für die Werkstückträger, die Programmierung und die Sicherheit angepasst und erweitert werden. Die einzige Voraussetzung, um die MRK-Applikation an beiden Arbeitsplätzen nutzen zu können, bestand darin, dass die gleichen Fette zum Einsatz kommen.

### Programmierschnittstelle und Programmierung

Im Anschluss an die Feinplanung folgte die Programmierung des Robotersystems. Eine Reihe von Leichtbaurobotern, die vorrangig in MRK-Konzepten zum Einsatz kommen, verfügt bereits über vereinfachte grafische Programmieroberflächen. Entsprechende Peripheriegeräte, wie z.B. Greifer, können dabei direkt in die Programmierung des Roboters über die grafische Programmierschnittstelle integriert werden.

Daneben gibt es Systemanbieter, die vereinfachte Programmiersysteme anbieten. Diese bieten den Vorteil, dass sich damit unterschiedliche Roboter programmieren lassen. Dabei bleibt jedoch die Herausforderung bestehen, dass Roboter unterschiedlicher Hersteller auf unterschiedliche Weise programmiert werden müssen. Herstellerübergreifende Systeme stellen den Arbeitsablauf des Roboters über eine Software zusammen, deren einzelne Module dann das Roboterprogramm ergeben. Bei einigen Anbietern ist es sogar möglich, den generierten Ablauf zu simulieren - beispielsweise mit dem Ziel, Kollisionen zu vermeiden.

MRK-Arbeitssysteme bringen die Herausforderung mit sich, dass durch die Zuordnung der Aufgaben zu den Ressourcen Mensch und Roboter Abhängigkeiten zwischen Aufgaben entstehen. Dies

bedeutet z.B., dass eine Aufgabe erst dann begonnen werden kann, wenn die vorherige abgeschlossen wurde. Wenn der Mensch allein arbeitet, bildet er diese Sequenzen quasi automatisch, in der Zusammenarbeit mit dem Roboter muss der Roboter jeweils zum aktuellen Arbeitsstand synchronisiert werden. Um dieser Herausforderung zu begegnen, haben die Projektpartner ein aufgabenorientiertes Programmiersystem speziell für MRK erarbeitet. Dieses Programmiersystem ermöglicht es, den in der Feinplanung ausgearbeiteten Ablauf mithilfe der Benutzerschnittstelle aufzunehmen und im Roboterprogramm abzubilden. Die Besonderheit besteht darin, dass sich bereits während der Programmerstellung die Abhängigkeiten zwischen zwei Aufgaben integrieren lassen. Ein kamerabasiertes System detektiert während des Betriebs, ob eine Aufgabe bereits erfüllt wurde. Ist das der Fall, wird über eine integrierte Schnittstelle im Roboterprogramm die nächste Aktion beim Roboter ausgelöst.

### Realisierung

Die Realisierung des Fallbeispiels war während der Drucklegung des KoMo-Projektatlas noch nicht abgeschlossen. Folgende Aussagen lassen sich dazu dennoch bereits treffen:

- Die MRK-spezifischen Teile des CE-Prozesses (sicherheitstechnische Bewertung, siehe Kapitel 7), z.B. die Ermittlung der biometrischen Kraft- und Druckwerte, werden an einen Dienstleister übergeben, bis beim Systemintegrator genügend Erfahrungen für diesen Teil der Sicherheitsbewertung vorliegen.
- Die detaillierte Arbeitsplatzgestaltung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Montageleitung und den Mitarbeitenden in der Montage.
- Die manuelle Endprüfung zur Qualitätskontrolle wurde montageparallel automatisiert. Diese Änderung verkürzt die Zeit, die dem Roboter für das Befetten zur Verfügung steht - und zwar um den Teil, der bisher für die manuelle Qualitätsprüfung vorgesehen war. Daraus resultieren hohe Zeitanforderungen für die Realisierung des Doppelarbeitsplatzes (Bild 3).

Die Realisierung der neuen MRK-Arbeitsplätze soll bis Ende 2019 abgeschlossen sein.

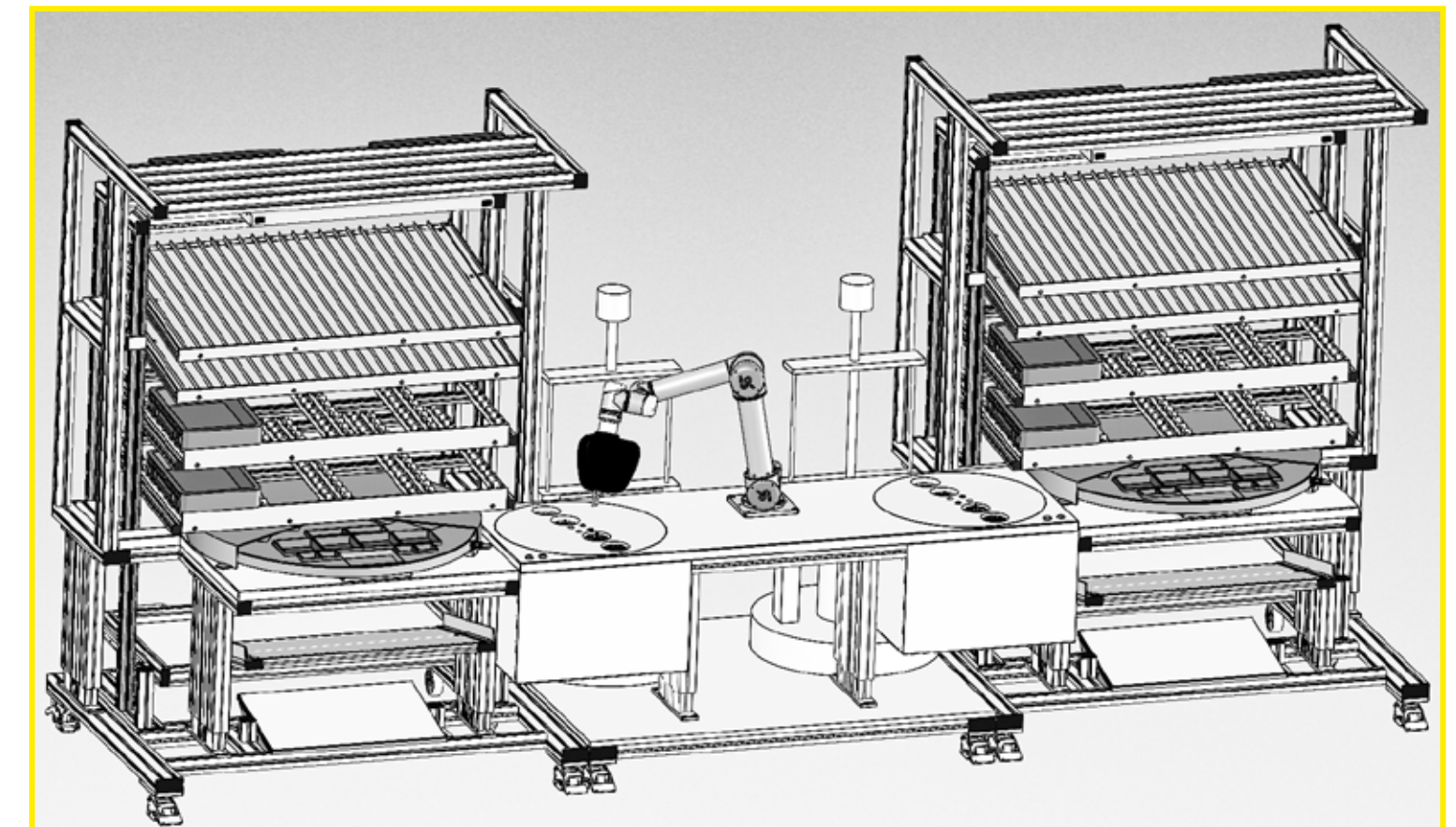
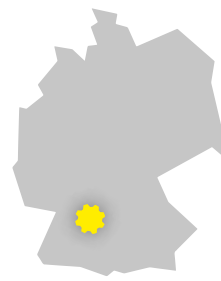


Bild 3: Neue Lösung mit zwei manuellen Arbeitsplätzen



Projekt ROKOKO

# PERIPHERIE- PLANUNG FÜR MRK- APPLIKATIONEN

Prof. Dr. Matthias Haag (SCHUNK GmbH & Co. KG); Peter Rally (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO); Volker Sieber (Schnaithmann Maschinenbau GmbH)

## Eine erfolgreiche Systemintegration erfordert einen ganzheitlichen Planungsansatz, der neben der Roboterwahl auch Endeffektoren, die Materialbereitstellung und notwendige Zusatzeinrichtungen berücksichtigt.

Im Fallbeispiel „Greifermontage mit MRK-Befettungsapplikationen“ des vorherigen Beitrags kam ein speziell für den Anwendungsfall konzipierter Greifer zum Einsatz. Die dazugehörige Peripherieplanung ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

Ein Leichtbauroboter allein stellt noch keine echte MRK-Anwendung dar. Diese entsteht erst durch die Integration von Anbauten und der Peripherie. Das spiegelt sich auch in den Kosten wider – die Gesamtinvestitionen vieler MRK-Applikationen betragen oft das Vier- bis Fünffache des Roboterpreises. Deshalb ist es schon allein aus Gründen der Wirtschaftlichkeit unerlässlich, sich intensiv mit der Planung der Roboterumgebung zu befassen. Diese war Gegenstand der Untersuchungen im Projekt ROKOKO. Dabei stellten sich folgende Bereiche als besonders relevant für die Peripherieplanung heraus:

1. Arbeitsplatz mit dem Produkt bzw. den Bauteilen
2. Endeffektoren bzw. Greifer
3. robotergeeignete Materialbereitstellung oder eventuell vorhandene Verkettung
4. ergänzende Steuer- und Sicherheitseinrichtungen

In den ROKOKO-Untersuchungen wurde der Arbeitsplatz mit dem Produkt (1) nicht betrachtet, da dieser durch den Anwendungspartner SCHUNK GmbH & Co. KG vorgegeben war.

Dennoch bietet dieser Bereich gerade im Hinblick auf Abstände, Arbeitsräume und Sicherheitsprobleme vielfältige Anknüpfungspunkte zur Optimierung der MRK-Applikation.

Die weiteren Bereiche (2) bis (4) betreffen zumeist kommerziell verfügbare Komponenten. Ideal ist es, wenn diese bereits für den MRK-Betrieb geeignet sind. Je mehr MRK-taugliche Funktionalität der Peripherie-Lieferant in seine Produkte eingearbeitet hat, desto stärker reduziert sich der Integrationsaufwand für den Systemintegrator (Bild 1).

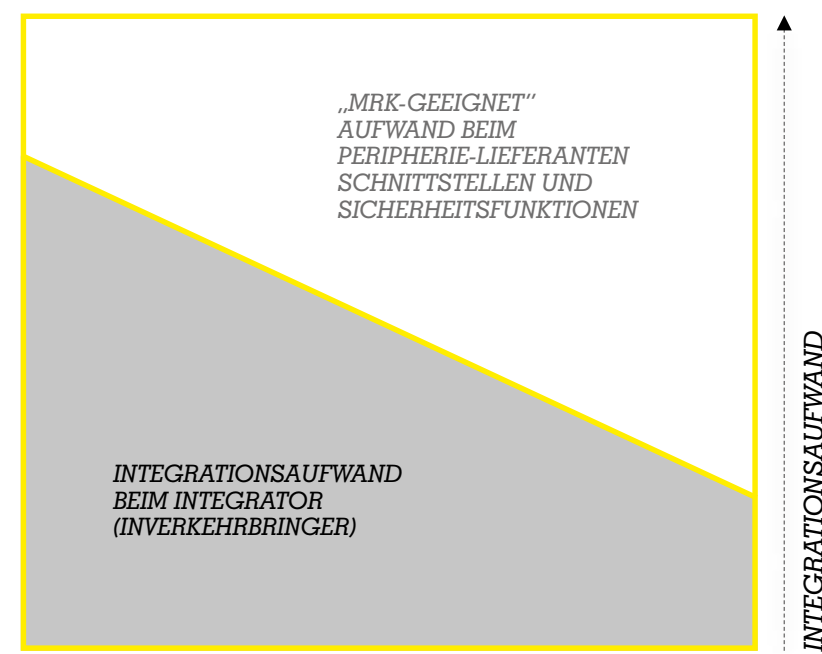


Bild 1: MRK-gerechte Peripherie senkt den Integrationsaufwand beim Integrator

## Endeffektoren sind von zentraler Bedeutung

Endeffektoren (2) sind bei der Gestaltung von MRK-Applikationen genauso wichtig wie der Roboter. Als „Werkzeug“ am Ende des Roboterarms interagieren sie direkt mit dem Objekt oder sind für den in der Applikation definierten Prozess verantwortlich. Damit sind sie in ihrer Gestalt so vielfältig wie die Aufgaben selbst. Auch in puncto Sicherheitsbetrachtung verlangen Endeffektoren ganz besonderes Augenmerk. Zwischenzeitlich ist eine ganze Reihe an Greifern verfügbar, die von den Komponentenherstellern speziell auf MRK-Tauglichkeit hin entwickelt wurden und somit den Vorschriften der ISO/TS 15066 genügen. Gehen die Anforderungen aber über einfache Greif- oder Fügeaufgaben und damit über die Verwendung käuflicher Standardkomponenten hinaus, wird es schnell beliebig komplex.

So auch im vorliegenden Anwendungsfall: Der für den Schmierstoffauftrag benötigte Endeffektor besteht im Wesentlichen aus zwei recht dünnen Befettungsdüsen und ist damit für MRK eher ungeeignet. Bereits bei der Vorbetrachtung wurde insbesondere die vertikale Bewegung dieser Applikationsdüsen am Roboter als gefährdend erkannt. An senkrechten Führungen weichen die Düsen bei Berührung entgegen ihrer Schwerkraft nach oben aus, wobei aufgrund der geringen Eigenmasse dabei zulässige Berührkräfte entstehen. Um die Prozesssicherheit zu erhöhen, wurden in den Sicherheitskreis des Roboters zwei redundante Näherungsschalter (als Öffner) zur Überwachung der Düsenposition integriert.

Die endgültige Konzeption des Endeffektors kann schnell alle vorhergehenden Planungen zur Gesamtapplikation obsolet machen und im schlechtesten Fall sind sämtliche vorhergehenden Planungsmaßnahmen in einer Iterationsschleife erneut zu durchlaufen: Wird der Endeffektor schwerer als zunächst angenommen, ist eventuell ein größerer Roboter nötig, der wiederum einen ganz anderen Platzbedarf hat. Im Anwendungsfall sah, nach Hinzunahme aller Funktionsbauteile, die Einheit für den Schmierstoffauftrag gänzlich anders aus als in den Vorüberlegungen angenommen. Erst ein Feldversuch konnte sicherstellen, dass der für die Applikation im Vorfeld ausgewählte Roboter hinsichtlich Traglast und Kräfte ausreichend ist. Da diese anwendungsspezifische Gestaltung zeit- und damit kostenintensiv ist, sollte der Endeffektor bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (siehe Kapitel 9) unbedingt berücksichtigt werden.

## Robotergeeignete Materialbereitstellung sicherstellen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen einer manuellen und einer automatisierten Montage ist die Materialbereitstellung (3). Nahezu alle Arbeitsplätze für manuelle Montagetätigkeiten sind heute nach Lean-Kriterien aufgebaut. Das Material wird von hinten und zumeist in Kleinladungsträgern angedient und nach dem Kanban-Prinzip – einer Methode zur Produktionssteuerung, die sich ausschließlich am Materialverbrauch orientiert – bereitgestellt. Ein Großteil der zu montierenden Bauteile hat bis hierher einen intensiven Wertschöpfungsprozess durchlaufen und ist meist empfindlich gegen Beschädigung. Aus diesem Grund sind diese i.d.R. geordnet und eventuell auch lageorientiert bevorratet. Untergeordnetes Montagematerial, wie z.B. Schrauben oder andere C-Teile, liegt typischerweise als Schüttgut vor.

Während dem Menschen der „Griff in die Kiste“ leichtfällt, ist bei einem Roboter hierfür eine umfangreiche Sensorik notwendig. Zudem ist der „Griff“ oftmals sehr zeitintensiv und insbesondere mit kleinem Schüttgut kann der Roboter selten gut umgehen. Ein Vakuumsauger ist oft eine günstige Alternative zum Greifer, eignet sich aber wiederum nicht zum Montieren und für einen zusätzlichen Greiferwechsel steht in den hybriden MRK-Montagen normalerweise keine Zeit zur Verfügung.

Um aufwendige Sensorsysteme zu vermeiden, sollte Schüttgut deshalb idealerweise vereinzelt, positioniert und lageorientiert dem Roboter bereitgestellt werden, z.B. in Form von Paletten. Dies wiederum erfordert Platz, der bei manuellen Arbeitsplätzen kaum vorhanden ist, da derartige Arbeitssysteme nach ergonomischen Gesichtspunkten gestaltet sind und hierbei der Greifraum eine wesentliche Rolle spielt. Das heißt, dass sämtliche Materialien innerhalb eines Bereichs bereitgestellt werden, der von einer Person mit gestrecktem Arm erreichbar ist. Um nicht permanent auffüllen zu müssen, ist allen Montagearbeitsplätzen gemeinsam, dass möglichst viel Material auf kleinstem Raum untergebracht ist. Dies allerdings widerspricht der Robotereignung, da diese Packungsdichte im Normalfall keinen Raum zum Greifen der Teile vorhält. Besonders anspruchsvoll und damit nur aufwendig automatisierbar ist das Handling biegeschlaffer Teile, wie z.B. Kabel, Dichtungen oder auch O-Ringe.





Bild 2: Vorrichtung mit aufgelegtem O-Ring und Bauteilen, Quelle: SCHUNK GmbH &amp; Co. KG

Um den oben genannten Schwierigkeiten zu entgehen, wurde im Anwendungsfall der Greifermontage bereits in einer frühen Phase der Applikationsplanung entschieden, die Befettungseinheit als Endeffektor auszubilden und die Teilebereitstellung dem Mitarbeiter zu übertragen. Eine zeitgleich durchgeführte Machbarkeitsstudie zur automationsgestützten O-Ring-Montage zeigte, dass sich eine ausgesprochen prozesssichere und schnelle Abfolge ergibt, wenn die zu montierenden Ringe zunächst händisch in die Finger eines nach oben stehenden O-Ring-Montagegreifers gelegt und anschließend die zu bestückenden Bauteile darüber positioniert werden:

- Der Werker bestückt die auf einem Schwenkteller angebrachte Vorrichtung zunächst mit den O-Ringen und anschließend mit den zu befettenden Bauteilen (Bild 2).
- Nach dem Betätigen eines Freigabetasters werden die Komponenten in den Arbeitsraum des Roboters geschwenkt und diesem zum Befetten bereitgestellt.

Auf diese Weise ist es möglich, ergonomische Anforderungen zu erfüllen und manuelle und automatisierte Abläufe zu parallelisieren.

#### Ergänzende Steuer- und Sicherheitseinrichtungen (4) berücksichtigen

Es gibt noch weitere Randbedingungen, die die Integration einer MRK-Applikation schwierig machen. Ist bereits die praktikable Unterbringung des Steuerschranks und des Bedienpanels vom Roboter eine große Herausforderung, wird die Integration von weiterem Equipment in ein bestehendes Arbeitsplatzsystem schnell zum K.-o.-Kriterium. Es gibt verschiedene Indikatoren, die die Notwendigkeit von zusätzlichen Einrichtungen nahelegen.

Sobald z.B. eine MRK-Applikation umfangreiche Sensorik benötigt oder die Ansteuerung zusätzlicher Aktoren verlangt, muss fast zwangsläufig eine übergeordnete SPS eingesetzt werden. Denn die vorhandene Robotersteuerung sieht meist nur sehr

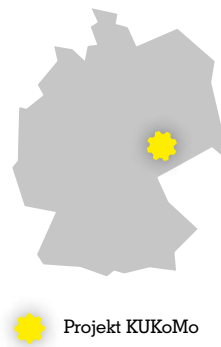
begrenzte Anschlussmöglichkeiten für externe Geräte vor. Dies bedeutet gleichzeitig, dass ein zusätzlicher Steuerschrank vorgehalten werden muss, der Platz braucht. Oft macht allein schon der Wunsch oder die Forderung des Kunden nach Einbindung des Arbeitsplatzes in ein übergeordnetes IT-System (z.B. in das Manufacturing Execution System) eine separate Steuerung erforderlich, da die Steuerung des Roboters oft nicht über die erforderlichen Schnittstellen verfügt.

Nicht zuletzt hängt es von der Wahl der Applikation selbst ab, ob zusätzliche aufwendige Peripherie notwendig ist. So ist der im ROKOKO-Anwendungsfall gewählte Befettungsprozess ein „Peripherie-Treiber“. Um das Befetten mit zwei unterschiedlichen Schmierstoffen zu ermöglichen, mussten zwei große Fasspumpen vorgehalten werden. Deren Ansteuerung, am Arbeitsplatz verbaute Aktorik sowie die Sensorik am Endeffektor erforderten einen zusätzlichen Schaltschrank von nicht unerheblicher Größe.

#### Aufwand für die Systemintegration realistisch einschätzen

Da es sich bei kollaborativen Montagesystemen um ein Hype-Thema handelt, wird deren Einführung häufig aktionistisch vorangetrieben. Das Management möchte „endlich auch einmal“ eine MRK-Applikation auf dem Shopfloor haben. Dabei denkt man vordergründig an einen Roboter mit ein „bisschen“ Greifer, der dann mal schnell in ein bestehendes Arbeitsplatzsystem integriert wird und dessen Produktivität sofort um das 1,5-Fache steigert.

Mit ihren Ergebnissen konnten die ROKOKO-Projektpartner zeigen, dass die Systemintegration eine strukturierte Planung und Testphasen erfordert. Endeffektor, Bauteilbereitstellung und Zusatzperipherie erfordern oft viele Iterationsschleifen und sind der Hauptgrund dafür, dass die Kosten der Gesamtapplikation meist ein Mehrfaches des Roboterpreises betragen.



Projekt KUKoMo

# MRK BEI EINEM MITTELSTÄNDISCHEN AUTOMOBILZULIEFERER

Dr. Robin Schulze (SITEC Industrietechnologie GmbH)

Durch die Einführung eines kollaborativen Montagesystems lassen sich notwendige Präsenzzeiten des Bedienpersonals verringern sowie die Qualität und Flexibilität der Fertigung erhöhen.

Ein Laserschweißprozess beim KUKoMo-Projektpartner SITEC Industrietechnologie GmbH diente als zentraler MRK-Anwendungsfall bei den Forschungsarbeiten. Dieser Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Fertigungstückzahlen pro Jahr keine Vollautomatisierung zulassen. Aus diesem Grund erfolgte die Bestückung der Anlage vor der MRK-Einführung manuell. Eine Herausforderung bestand darin, dass Bedienende eine Vielzahl von Einzelteilen, aus denen die Baugruppe gefertigt wird, lagerichtig in die Schweißvorrichtung einlegen mussten. Wurde ein Einzelteil vergessen oder falsch eingelegt, führte dies zu einer fehlerhaften Schweißung und Ausschusskosten von ca. 20 Euro pro Ausschussteil. Allein diese Tatsache führte zu dem Entschluss, eben diesen Anwendungsfall genauer zu betrachten und eine MRK-Lösung zu implementieren.

## Ist-Analyse und Anforderungsdefinition

Der erste Schritt bestand in einer Prozessanalyse, die insbesondere dazu dienen sollte, Ablaufschritte zu identifizieren, die durch den Roboter ausführbar sind.

Grob zusammengefasst, beinhaltet der Bearbeitungsprozess im Anwendungsfall die Entnahme von Einzelteilen aus unterschiedlichen Vorratsbehältern, das lagerichtige Einlegen der Einzelteile in die Bearbeitungsvorrichtung, deren automatisiertes Verschweißen mittels Laser durch die Anlage, die Entnahme

der fertigen Baugruppe, die abschließende Qualitätskontrolle der Schweißnähte sowie das Verpacken. In Bild 1 sind der detaillierte Prozessablauf sowie die Fertigungsszenarien für die Ist-Situation bzw. die Soll-Situation dargestellt. In der Soll-Situation werden die gelb hinterlegten Teilaufgaben vom Roboter ausgeführt.

Für die Bestimmung der durch den Roboter auszuführenden Tätigkeiten ist es ausschlaggebend, wie hoch die Bedienerin oder der Bediener der Anlage die Belastung empfindet. Dies wurde im Rahmen von Workshops ermittelt und damit auch die Akzeptanz für die erarbeitete Lösung durch die betroffenen Personen abgesichert. Insgesamt ist eine frühzeitige Einbindung aller Beteiligten unerlässlich für eine erfolgreiche Implementierung kollaborativer Montagesysteme (siehe Kapitel 5 „Human Factors“). Das Ergebnis der Workshops umfasste neben der Aufteilung der einzelnen Teilschritte des Prozessablaufs auch die Anforderungsdefinition, bei der in funktionale, nicht funktionale sowie optionale Anforderungen an die MRK-Lösung unterschieden wurde. Eine elementare Anforderung an das Lösungskonzept ist die Mobilität des Leichtbauroboters bzw. des MRK-Systems.

Hintergrund sind die unterschiedlichen Fertigungstückzahlen der vielfältigen Aufträge innerhalb der Serienfertigung bei SITEC. Da die Stückzahlen im betrachteten Anwendungsfall das MRK-System nicht vollständig auslasten, lohnt sich die Investition nur, wenn dieses auch für andere Fertigungsaufträge anwendbar ist. Hieraus leitete sich als weitere wichtige Anforderung die Notwendigkeit ab, dass sich das MRK-System einfach auf weitere Fertigungsszenarien adaptieren lassen musste. Beide Anforderungen stellten für die Erarbeitung von Konzepten im nächsten Schritt eine Herausforderung dar.

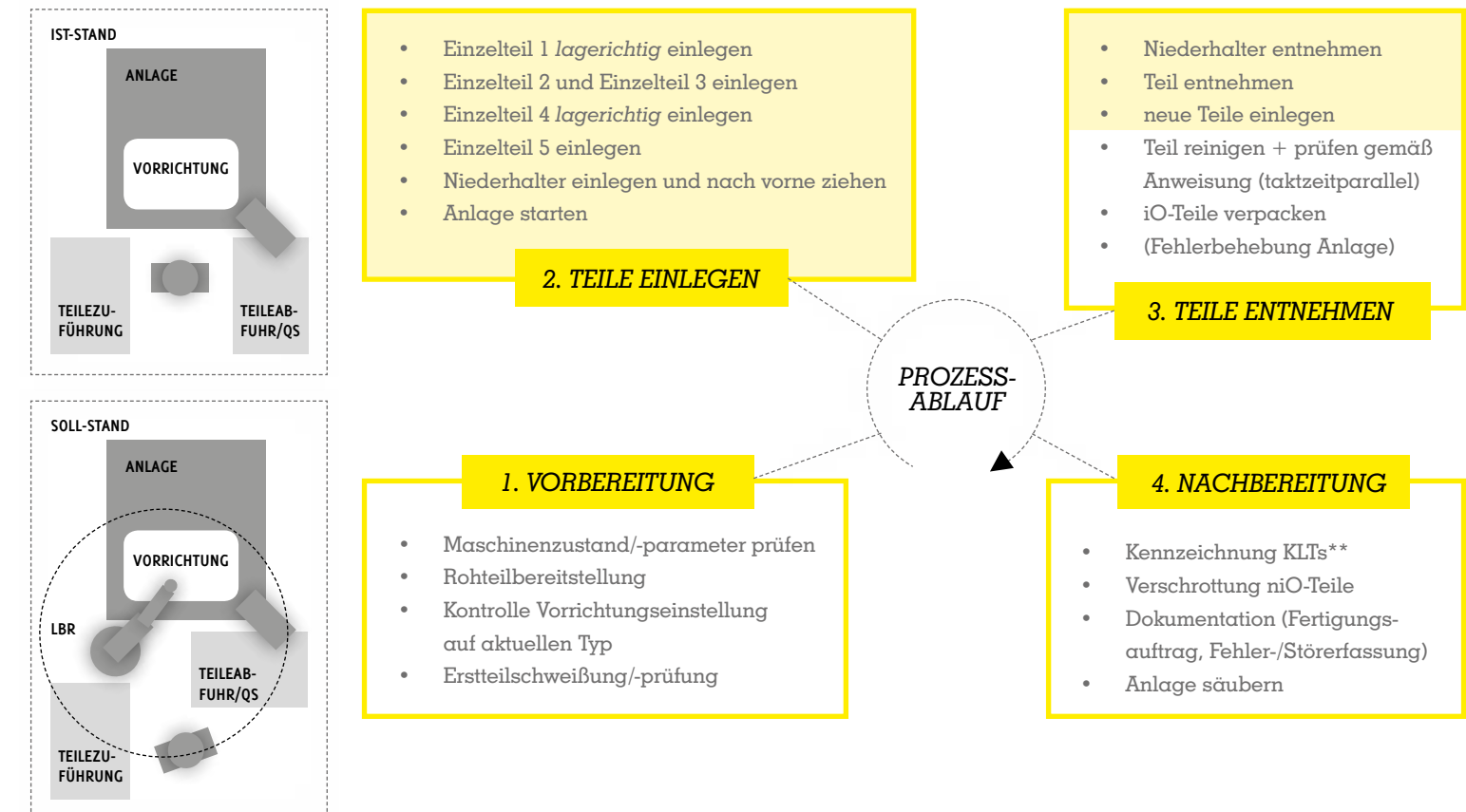
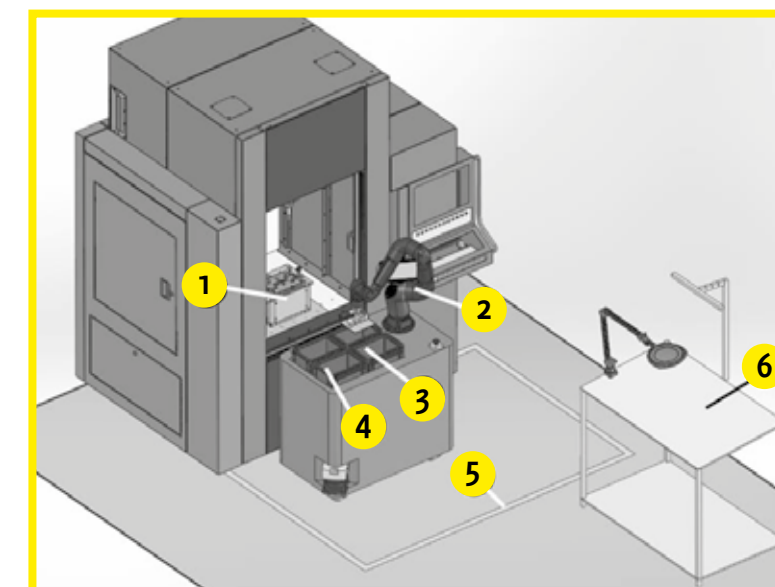


Bild 1: Prozessablauf und Fertigungsszenario für den Ist- sowie Soll-Zustand  
 \* LBR = Leichtbauroboter  
 \*\* KLT = Kleinladungsträger

## Sicherheit spielt zentrale Rolle bei der Umsetzung

Zunächst haben die Projektpartner eine mobile Plattform konzipiert und konstruiert. Auf dieser sind neben dem Leichtbauroboter - Modell Sawyer des Unternehmens HAHN Robotics GmbH - vor allem Magazine und Kleinladungsträger (KLT) für die in die Vorrichtung einzulegenden Einzelteile angebracht.

In Bild 2 ist das konstruktive Konzept für die Integration des Roboters in das MRK-Szenario abgebildet. Um eine Gefährdung des Bedienpersonals auszuschließen, kam dem Thema Sicherheit eine hohe Bedeutung zu.



- 1 *Bearbeitungsvorrichtung*
- 2 *Roboter*
- 3 *Teilevorrat*
- 4 *Teileabführung (Fertigteile)*
- 5 *Gefährdungsbereich*
- 6 *AP Qualitätskontrolle*

Bild 2: Konzept für die Integration des Roboters in das Demonstratorszenario



Grundsätzlich lässt sich ein Arbeitssystem hierfür in drei Zonen unterteilen, in denen unterschiedliche Sicherheitselemente zur Anwendung kommen können (Bild 3). Die Zone 1 (virtueller Arbeitsraum) kennzeichnet den Arbeitsplatz und umfasst demnach die notwendige Fläche und Ausrüstungsgegenstände. In Zone 2 (Gefährdungsraum) besteht aufgrund des Arbeitsbereichs des Roboters eine Gefährdung des Bedienpersonals durch Kollisionen. Daher ist dieser Bereich durch optische Sicherheitssysteme (Kameras, Scanner) oder mechanische Sicherheitssysteme (Trittmatte) abzusichern und bei einer Annäherung des Bedieners sind Sicherheitsfunktionen zu initiieren, z.B. eine Geschwindigkeitsreduktion oder ein sicherer Stopp. In Zone 3 (Kollaborationsraum) arbeiten Mensch und Roboter gemeinsam am Werkstück. Hierbei muss eine Verletzung des Bedienpersonals ausgeschlossen werden, z.B. durch die Einhaltung der zulässigen Momente im Kontaktfall bzw. durch die Anwendung eines sicheren Flansches.

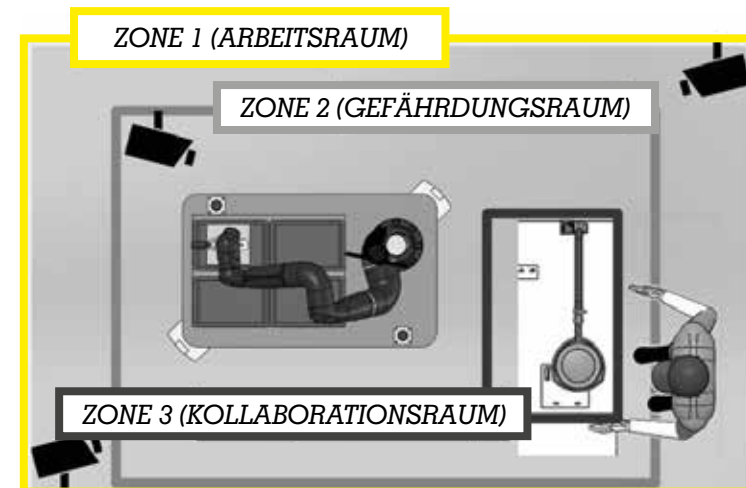


Bild 3: Einteilung des Arbeitssystems in drei Sicherheitszonen

Zur Überwachung des Gefährdungsraums bieten sich folgende Systeme an:

1. Laserscanner, die den Gefährdungsraum überwachen und bei einer Annäherung des Bedienpersonals, z.B. zur Entnahme von fertig geschweißten Baugruppen von der Plattform oder zum Nachfüllen von Einzelteilen, eine Geschwindigkeitsreduktion des Roboters initiieren. Die Schutzzonen sind ggf. um Warnzonen erweiterbar, um dem Bedienpersonal eine Annäherung des Roboters zu signalisieren.
2. Kameralösung inklusive entsprechender Software zur Beurteilung der Bewegungen von Mensch und Roboter: Eine besondere Herausforderung bei der Risikobeurteilung sind die Verschattungen des Kamerasichtbereichs durch den Roboter. Um eine Annäherung durch den Menschen zu signalisieren, ist auch bei dieser Variante eine Erweiterung der Schutzzone um Warnzonen möglich.

### Aufbau und Funktionsweise der Roboterplattform

Der Roboter ist seitlich auf der mobilen Plattform angeordnet, um innerhalb seines maximalen Arbeitsraums auf der Plattform einen Entnahme- und Ablagebereich zu schaffen. Die Höhe des Roboter-Befestigungspunkts ist nach der Höhe der Arbeitsplatte der Fertigungsanlage ausgerichtet, sodass beim Bewegen des Roboterarms in den Bearbeitungsraum der Anlage alle Positionen erreicht werden. Die Höhe der Befestigungsfläche für die Stapelmagazine und die KLT wird für ein ergonomischeres Arbeiten im Vergleich dazu etwas verringert. Zur Bereitstellung aller Einzelteile kommen vier Stapelmagazine zum Einsatz. Sie bestehen aus Aluminium- und Blechbauteilen und sind damit günstig und aufgrund der Gewichtseinsparung ergonomischer und sicherer für das Auswechseln.

Die Magazine für die Einzelteile 1 und 4 sind aufgrund der gleichen Außenkontur der Bauteile identisch. Für die filigranen Einzelteile 2, 3 und 5 kommen Auflageplatten sowie feststehende und flexible Anschlagbleche zum Einsatz. Die Befestigung der Stapelmagazine und KLT erfolgt über eine Grundplatte auf der Roboterplattform, in die für eine maximale Flexibilität der Anordnung ein Gewinderaster eingebracht ist. Als Anschläge für die Stapelmagazine und KLT helfen darauf verschraubte Anschlagleisten. Alle Magazine sind in der Höhe so dimensioniert, dass pro Schicht ein zweimaliges manuelles Auffüllen der Magazine notwendig ist, um die geforderte Anzahl an Fertigteilen pro Schicht zu realisieren. Äquivalent hierzu sind zwei KLT zur Aufnahme der Fertigteile notwendig, die beim Auffüllen der Magazine ebenfalls zu wechseln sind. Bild 4 veranschaulicht die Plattform in ihrem Grundaufbau sowie deren Funktionsbereiche.

Zur Umsetzung der zweiten wichtigen Anforderung – leichte Adaptierbarkeit auf andere Fertigungsszenarien – kam ein Industrie-Tablet zur Anwendung. Mithilfe der darin verbauten Kamera und an der Anlage bzw. der Plattform angebrachten Positionsmarkern ist ein schnelles Positionieren und Einrichten der Roboterplattform an verschiedenen Anlagen und Fertigungsszenarien möglich. Für die Szenarien (Fertigungsaufträge) sind hierfür im Tablet-Speicher neben den spezifischen Positionswerten für die Plattform noch weitere Parameter und Kenngrößen (Anlagenbezeichnung, Produkt, Vorrichtung) hinterlegt. Der Nutzer wird demnach beim Einrichten der Plattform an der Anlage visuell durch den Positionier- und Kalibrierprozess geführt.

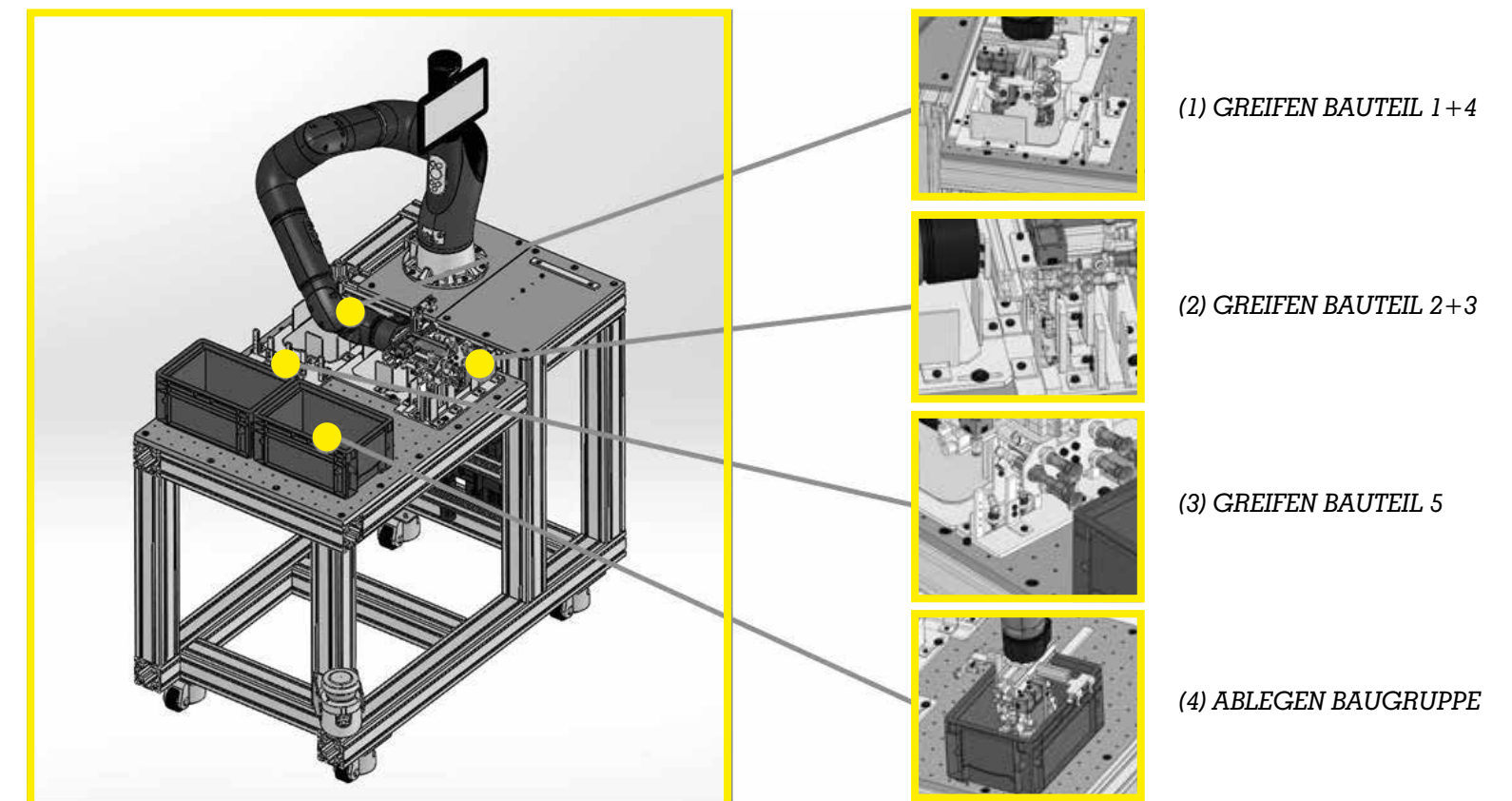


Bild 4: Aufbau und Funktionsbereiche der Roboterplattform

### MRK-System umsetzen und optimieren

Nachdem die konzipierte Roboterplattform aufgebaut und im Anwendungsszenario integriert war, folgten unterschiedliche Untersuchungen zur Validierung sowie zur Identifikation möglicher Optimierungspotenziale. Dies beinhaltete insbesondere die Bewertung der MRK-Lösung sowie des damit verbundenen Arbeitsablaufs nach ergonomischen und arbeitspsychologischen Aspekten. Dazu dienten u.a. auch Befragungen des Bedienpersonals. Neben dieser subjektiven Bewertung wurde das System auch nach wirtschaftlichen Aspekten beurteilt.

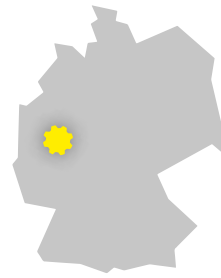
### Präsenzzeiten um 90 Prozent reduziert

Es hat sich gezeigt, dass die MRK-Lösung für SITEC eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Ein wichtiges Argument dafür ist vor allem die Möglichkeit der Parallelisierung von Prozessen, wodurch das Bedienpersonal seine Arbeitszeit wertschöpfend in andere Produktionsprozesse einbringen kann. Während das Per-

sonal vor der Umsetzung die ganze Zeit an der Anlage präsent sein musste, muss es jetzt nur noch für die Qualitätsprüfung, für Vor- und Nacharbeiten sowie das Auffüllen der Stapelmagazine an der Anlage anwesend sein. Simulationsuntersuchungen haben ergeben, dass sich die Anwesenheitszeit des Bedienpersonals an der Anlage um fast 90 Prozent reduzieren lässt. Gleichzeitig erhöht sich aufgrund der Präzision und der „Fehlerfreiheit“ des Roboters auch die Prozessqualität, wodurch sich die Kosten für Nacharbeit und Ausschuss verringern.

Die entscheidenden Vorteile der umgesetzten MRK-Lösung sind jedoch deren Mobilität und die damit einhergehende Flexibilität. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der variablen Stückzahlen innerhalb der Serienfertigung wesentlich, da diese oftmals eine flexible Reaktion und Planung personeller Kapazitäten erfordern. Mit der mobilen Roboterplattform ergeben sich für SITEC hierbei neue Möglichkeiten.





Projekt KoMPI

# MRK IN MONTAGELINIEN VON KMU

Dr. Henry Arenbeck (Boll Automation GmbH); Gabriele Höpner (Karl Dungs GmbH & Co. KG); Mirco Rogalla (Albrecht JUNG GmbH & Co. KG); Dr. Vignaesh Sankaran, Jonas Paul Hellmich (Leopold Kostal GmbH & Co. KG)

**Drei mittelständische Unternehmen konnten mithilfe von MRK Verbesserungen in ihren Fertigungsprozessen erzielen – diese reichen von höherer Qualität bis zu einem effizienteren Personaleinsatz.**

Anhand von drei Fallbeispielen konnten die KoMPI-Projektpartner Erfahrungen bei der Integration von MRK-Lösungen sammeln.

## Fallbeispiel 1: Karl Dungs GmbH & Co. KG

Der KoMPI-Projektpartner Karl Dungs GmbH & Co. KG entwickelt Systemlösungen für die Heizwärme- und Prozesswärmeindustrie sowie Gasmotoren. In dem auf Basis des KoMPI-Potenzialchecks (siehe Beitrag „Potenzialanalyse für MRK“ in Kapitel 4) für die MRK-Anwendung ausgewählten Bereich wurden die Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt. Der Leichtbauroboter (LBR) nimmt dem Menschen verschiedene Aufgaben ab, sodass das Montagepersonal andere, höherwertigere Tätigkeiten ausführen kann. In einer Fließlinie, in der Druckwächter montiert werden, übernimmt künftig eine MRK-Applikation die Endmontage. Bei Varianten, die der Roboter aufgrund der Teilebeschaffenheit nicht vollständig allein umsetzen kann, führt eine Werkerin oder ein Werker die fehlenden Montageschritte aus. Die Auswahl dieser Montagelinie erfolgte auf Basis einer Arbeitsablauf-Zeitanalyse – auch als Methods-Time Measurement (MTM) bekannt. Mithilfe einer im Projekt entwickelten Methode (siehe Beitrag „Arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Planungsszenarien“ in Kapitel 9) wurde das MRK-Potenzial abgesichert. Das Ziel

war, mit der MRK-Lösung eine der zwei an diesem Arbeitsplatz arbeitenden Personen so zu entlasten, dass sie eine andere Tätigkeit übernehmen kann. Die technischen Anforderungen an die MRK-Applikation lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- manuelle oder automatisierte Montage am selben Arbeitsplatz; angrenzender manueller Arbeitsplatz
- 30 Sekunden Taktzeit
- Variantenvielfalt (Grundaufbau, Haube, Anschluss; 162 theoretische Kombinationen)
- Vorrichtungen für Handbetrieb (Schüttgut, Positionierer, Schraubereinzeler)

Am MRK-Arbeitsplatz können in einer U-Linie sowohl die roboterbasierte als auch die manuelle Montage erfolgen. Der MRK-Roboter (LBR iiwa des Unternehmens KUKA Aktiengesellschaft) ist auf einem Rollwagen flexibel ein- und ausschierbar. Mensch und Roboter arbeiten in einer Koexistenz zusammen. Die Vereinzelung und Zuführung der Anbauteile erfolgt durch multiple Vibrationswendelförderer und Zuführschienen. Des Weiteren kommt ein Schraubereinzeler für den manuellen und automatisierten Betrieb zum Einsatz. Der Roboter führt ein Kombinationswerkzeug (Sonderbau) zum automatisierten und sensitiven Greifen, Aufnehmen und Schrauben. Zur Absicherung der Anlage dient ein Sicherheits-Laserscanner mit Flächenschutzfeld. Die Programmierung ermöglicht eine flexible Kombination verschiedener Anbauteile zum Produkt, woraus sich eine große Anzahl von Varianten ergibt, die sich durch die MRK-Applikation montieren lassen.

Ein Erfolgsfaktor bei der Systemintegration bestand in der frühzeitigen Einbindung des Montagepersonals. Dessen praktischer Sachverstand kann wertvolle Impulse bei der Umsetzung geben. Erste Betriebserfahrungen zeigen, dass die Montagelinie mit einer Person gut läuft und damit die Zielsetzung erreicht wurde.

## Fallbeispiel 2: Albrecht JUNG GmbH & Co. KG

Der KoMPI-Projektpartner Albrecht JUNG GmbH & Co. KG entwickelt Komponenten für Elektroinstallationen sowie intelligente Systeme für die Gebäudetechnik. Auch bei JUNG kam der in KoMPI entwickelte Potenzialcheck zum Einsatz. Dazu wurde der Gesamtprozess einer Fertigungslinie in Teilprozesse zerlegt (siehe Bild 1) und anhand einer Punkteskala bewertet. Im Ergebnis hat sich der Arbeitsplatz 2 „Schrauben einschrauben“ als für MRK geeignet herauskristallisiert.

Da Roboter i.d.R. langsamer als der Mensch sind, sollte der Zeitanteil manueller Prozesse höher als der des MRK-Systems sein. So entstehen keine Wartezeiten für das Montagepersonal. Im Rahmen der Simulationsstudie (siehe Beitrag „Werkzeug zur realitätsnahen MRK-Simulation“ in Kapitel 3) wurden der manuelle Tätigkeitsablauf analysiert und ein Konzept für eine Automation von vier Schraubvorgängen entwickelt. Als Roboter kam der UR3 des Unternehmens Universal Robots S/E zum Einsatz. Mithilfe der Simulationssoftware ema Work Designer des Projektpartners imk automotive GmbH war es möglich, Verrichtungen sowohl des Menschen als auch des Roboters in einer Koexistenzsituation abzubilden, zu analysieren und zu optimieren. Ein Ausschnitt der erstellten Simulation ist in Bild 2 dargestellt. In der entwickelten Lösung werden die Schrauben automatisch vereinzelt und an einer festen Abholposition für den Roboter bereitgestellt. Das Schraubwerkzeug (Sonderkonstruktion) wird durch eine Roboterachse angetrieben.

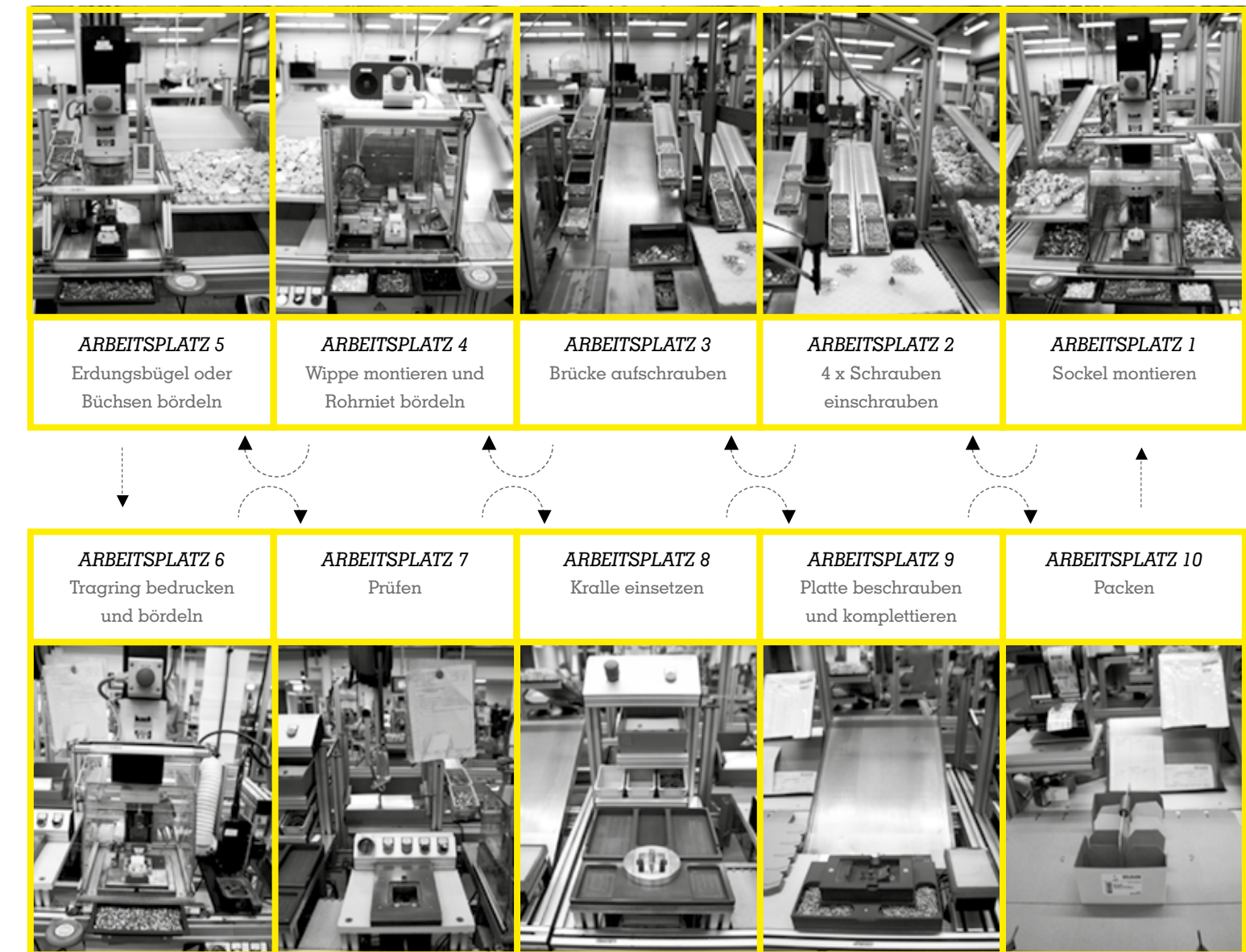


Bild 1: Arbeitsvorgänge in einer für MRK ausgewählten Fertigungslinie, Quelle: Albrecht JUNG GmbH & Co. KG





Bild 2: MRK-Lösung in der Simulation

Eine den Kontaktbereich umspannende Hülse, deren Auslenkung sicherheitsgerichtet abgefragt und verarbeitet wird, verhindert quasistatische Kontaktsituationen – Situationen, in denen ein Körperteil zwischen dem Roboter und einem anderen Anlagenteil eingeklemmt wird.

Mit dieser Lösung kann die Durchlaufzeit durch die gesamte Fertigungslinie um mehr als 10 Prozent verkürzt werden.

### Fallbeispiel 3: Leopold Kostal GmbH & Co. KG

Der KoMPI-Projektpartner Leopold Kostal GmbH & Co. KG ist ein Automobilzulieferer und hat im Rahmen des Vorhabens ein ortsflexibles Robotersystem eingeführt. In dem Anwendungsszenario wurde eine kollaborative Roboterlösungen in vorhandene manuelle Montageprozesse integriert, um damit

- die Flexibilität - Veränderungs- und Adaptierfähigkeit - zu erhöhen,
- die Qualität - Präzision und Wiederholgenauigkeit - zu erhöhen und
- die Zeit - Entwicklungs- und Implementierungszeit - zu reduzieren und damit die Wirtschaftlichkeit (Kapitalproduktivität) zu erhöhen.

Kostal hat einen Pareto-Automatisierungsansatz gewählt, um die überproportional hohen Kosten für „Nicht in Ordnung“(n.i.O.)-Abläufe und spezielle Handhabungen zu reduzieren und damit den Aspekten der Wirtschaftlichkeit nachkommen zu können.

Im Anwendungsszenario übernahm der Roboter die zyklische Prüftätigkeit sowie den sich an die Bauteilfertigung anschließenden Label-Auftrag. Das Fertigungspersonal war zuständig für die Sonderabläufe und nicht zyklische kooperierende Tätigkeiten, wie das Handling von n.i.O.-Teilen und die Vereinzeln von Bauteilen, sowie für daraus resultierende Aufgaben, wie den Tray-/Kleinladungsträger-Wechsel. Damit ergab sich für die Montagemitarbeiter eine neue Aufgabengestaltung innerhalb der Montagelinie. Mithilfe des Planungstools ema Work Designer der imk automative GmbH wurden die Auslastung und die Zielvorgaben vom Linientakt auch unter Berücksichtigung dieser neuen Aufgaben und des Wegfalls von bestehenden Prüftätigkeiten bewertet.

Neben der Bewertung des Kooperationsszenarios wurden zusätzlich Analysen mit variablen Ausbringungsmengen der Montagelinie (von 1,0 bis 1,8 Millionen Stück pro Jahr) durchgeführt, um eine mögliche Kapazitätserweiterung der gesamten Montagelinie zu prüfen.

Darüber hinaus wurde bei der Realisierung der Pilotanwendung die Voraussetzung geschaffen, das Robotersystem in anderen Anwendungen einzusetzen. Sollte sich das Robotersystem nicht am Arbeitsplatz befinden (anderer Einsatzort/Wartung/Reparatur), ist eine manuelle Montage nach wie vor möglich. So kann innerhalb der Fertigung flexibel agiert und ein Linienstillstand vermieden werden.

Mittlerweile haben MRK-Roboter bei passenden und wirtschaftlichen Anwendungen einen festen Platz in der Wertschöpfungskette bei Kostal gefunden. Um die entsprechenden Einsatzpotenziale zu identifizieren, kommt eine im KoMPI-Projekt entwickelte Bewertungssystematik für manuelle Arbeitsprozesse zum Einsatz. Damit dies gelingt, werden mögliche Anwendungsszenarien zukünftig nicht nur im CAD (Computer-aided Design) und/oder innerhalb einer Robotersimulation geplant (siehe Bild 4, Anwendungsszenario 3), sondern auch in einer Planungssystematik, die die mitarbeiterzentrierten Fragestellungen im MRK-Kontext (Ergonomie, Austattung, Abhängigkeiten, Zeitstudien, Risiko- und Gefährdungsbereiche, Integration von Sensorik in zyklische Abläufe) bewertet (siehe Bild 4, Anwendungsszenario 1).



Bild 3: Fertigungslinie mit mobiler Roboterplattform, Quelle: Leopold Kostal GmbH &amp; Co. KG – Standort Halver

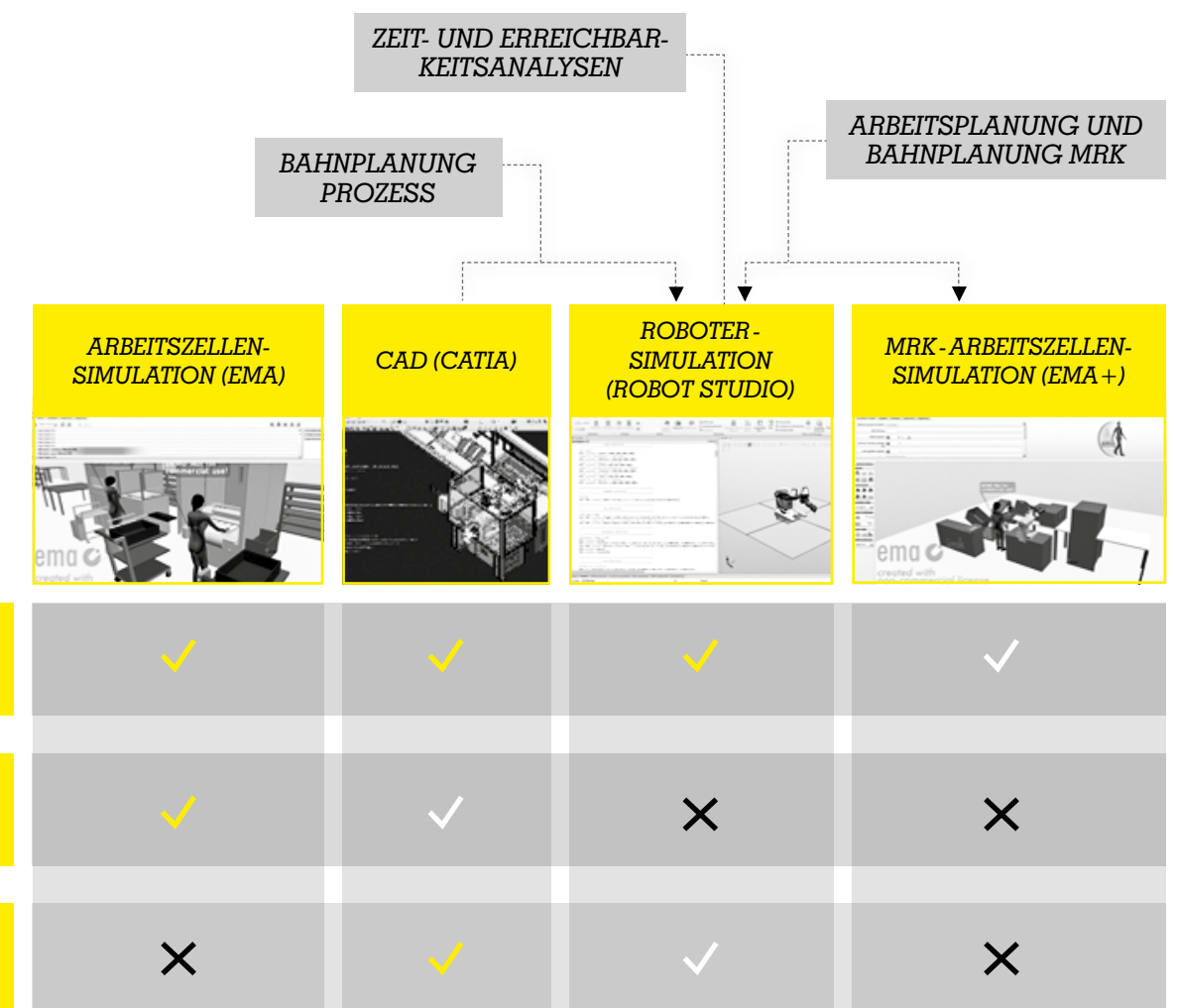


Bild 4: Planungstools im Realisierungsprozess von MRK-Arbeitsplätzen am Beispiel von drei weiteren MRK-Anwendungsszenarien

# BEWERTUNG

## KAPITEL 9

Die Zahl der gelungenen und erprobten Praxislösungen hat gezeigt: Kollaborative und wandlungsfähige Montagesysteme sind machbar. Doch wie steht es um die Wirtschaftlichkeit? Gleich vorweggenommen: Ein Patentrezept dafür existiert nicht. Die Realisierung eines wirtschaftlich optimalen Automatisierungsgrades in der Montage ist sehr betriebsspezifisch und von vielen Einflussfaktoren abhängig. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Atlas können auch noch keine Aussagen über den nachhaltigen Einsatz der Systeme getätigt werden, da diese nach der Erprobungsphase erst ab 2020 in den Dauerbetrieb gehen. Die Beispiele in diesem Kapitel zeigen aber jetzt schon, wie auch kleine Unternehmen mit einfachen Methoden unternehmerische Entscheidungen und Bewertungen zum Einsatz neuer innovativer Montagesysteme vornehmen können.

## BEWERTUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

- 202** Wortwechsel
- 210** Begünstigende und hemmende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit von MRK  
(KUKoMo)
- 212** Kosten- und Nutzenaspekte von MRK quantifizieren  
(KoKoMo)
- 216** Investitionsabschätzung für MRK-Anwendungen  
(ROKOKO)
- 218** Wirtschaftlichkeit von MRK bewerten  
(ROKOKO)
- 222** Arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Planungsszenarien  
(KoMPI)
- 224** Wirtschaftliche Bewertung der frei verketteten Montage  
(freeMoVe)





*„Man sollte die Einführung neuer Technologien wie kollaborativer Montagesysteme als strategische Herausforderung begreifen.“*



**HANS-PETER WALDMANN**

Produktionsmanager bei der KSB SE & Co. KGaA



Dr. **KARL-WERNER WITTE**

Geschäftsführer der PLATOS Planung technischer organisatorischer Systeme GmbH

*„Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von MRK-Systemen sollte auch qualitative Faktoren, wie geringere Absenzzraten durch bessere Ergonomie, berücksichtigen.“*



**CHRISTOPH RIDDER**

Projektleiter bei der Miele & Cie. KG

*„Ein Großteil der Investitionen ist nicht auf die Hardware, sondern auf die Bewertung und Freigabe der MRK-Systeme zurückzuführen.“*



# WORTWECHSEL

*Bewertung und Wirtschaftlichkeit*

## WAS KOSTET DIE EINFÜHRUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME UND WIE LÄSST SICH DEREN WIRTSCHAFTLICHKEIT ERMITTELN?

HANS-PETER WALDMANN

Die Kosten für die Einführung eines MRK-Systems hängen sehr stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Schon allein bei den Investitionskosten sind aufgrund der großen Preisunterschiede bei den Robotern keine allgemeingültigen Aussagen möglich. Zudem ist es oft schwierig, den mit MRK verbundenen Schulungsaufwand abzuschätzen – auch dieser hängt stark vom verwendeten Robotertyp ab. Eine Besonderheit von kollaborativen Montagesystemen besteht zudem in den hohen sicherheitstechnischen Anforderungen. Sie stellen häufig einen limitierenden Faktor dar, wenn es um eine höhere Auslastung des Roboters durch höhere Taktzeiten geht. Um MRK wirtschaftlich darzustellen, müssen weitere, qualitative Kriterien in die Bewertung einbezogen werden. Ein Vorteil von MRK besteht beispielsweise darin, dass eine definierte Verfügbarkeit für Montageaktivitäten des Roboters gegeben ist. Diese Planungssicherheit sollte man bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines MRK-Systems berücksichtigen.

DR. KARL-WERNER WITTE

Wir haben die gleichen Erfahrungen gemacht. Um die Wirtschaftlichkeit eines MRK-Systems zu bewerten, haben wir im ROKOKO-Projekt einen Ansatz entwickelt, der die klassische Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einer Nutzwertanalyse zur Bewertung qualitativer Kriterien kombiniert. Zu diesen qualitativen Faktoren zählen beispielsweise ein reduzierter Krankenstand durch bessere Ergonomie oder eine höhere Prozessstabilität durch die teilweise Automatisierung. Die mit der Einführung von MRK verbundenen Kosten hängen – wie Herr Waldmann bereits sagte – vom Anwendungsfall ab. Wichtige Aspekte hierbei sind die Komplexität der Aufgabenstellung und die bereits vorhandenen Erfahrungen in der Gestaltung teilautomatisierter Montagearbeitsplätze. Grundsätzlich gilt: Je mehr Sensorik eine Aufgabenstellung erfordert, desto teurer ist die MRK-Applikation. Bei der Entscheidung über die Einführung von MRK sollte man sich auch über das Risiko im Klaren sein, das man eingeht, wenn man die neuen Technologien nicht einführt. Der damit verbundene Know-how-Verlust könnte sich nachteilig auf die Innovationsfähigkeit des Unternehmens auswirken.

CHRISTOPH RIDDER

Ich sehe das genauso wie Sie. Im Verlauf unseres SafeMate-Projekts sowie im Rahmen unserer eigenen Aktivitäten haben wir festgestellt, dass die klassische Wirtschaftlichkeitsrechnung zu kurz greift. Auch wir nutzen das Instrument der Nutzwertanalyse, um andere Faktoren – wie die Entlastung des Mitarbeiters – zu berücksichtigen. Derzeit erarbeiten wir gemeinsam mit den Projektpartnern eine Methodik, die die relevanten Faktoren ausweist und bewertet. In Bezug auf die Kosten haben wir die Erfahrung gemacht, dass ein Großteil der Investitionen nicht auf die Hardware, sondern auf die Bewertung und Freigabe der MRK-Systeme zurückzuführen ist. Die Gründe dafür liegen in den hohen sicherheitstechnischen Anforderungen für MRK-Anwendungen, die vor allem Auswirkungen auf die maximalen Geschwindigkeiten und die Taktzeiten haben. Vor diesem Hintergrund haben unsere MRK-Projekte derzeit vor allem strategischen Charakter, um Erkenntnisse im Umgang mit dieser potenziellen Schlüsseltechnologie zu erlangen.

## LASSEN SICH ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN ZUR EINFÜHRUNG KOLLABORATIVER MONTAGESYSTEME ABLEITEN?

Ich möchte dazu noch einmal die Aussagen von Herrn Ridder aufgreifen. Man sollte die Einführung neuer Technologien wie kollaborativer Montagesysteme als strategische Herausforderung begreifen. Nur mit diesem Ansatz ist ein produzierendes Unternehmen in der Lage, zukunfts- und wettbewerbsfähig zu bleiben. Dazu braucht es auch Räume bzw. Projekte, in denen man Dinge ausprobieren kann. Ein weiterer wichtiger Punkt besteht darin, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die MRK später einmal nutzen sollen, in den Einführungsprozess einzubinden. Gemäß dem Motto „entlasten statt entlassen“ können dadurch Ängste abgebaut und Vorteile der Technologie, z.B. in Bezug auf die Ergonomie und die Reduzierung schwerer Arbeiten, vermittelt werden.

Bei der Einführung von MRK empfiehlt es sich, mit einer möglichst einfachen Aufgabe mit hohem Nutzenpotenzial zu starten. Ein Pilotprojekt sollte möglichst schnell Erfolge vorweisen, um für die Technologie zu begeistern und Verunsicherungen zu beseitigen. Bei der Projektplanung kann der Einsatz von Simulationen sinnvoll sein. Mit ihrer Hilfe kann man beispielsweise ausrechnen, wie gut eine MRK-Applikation sein muss, um definierte wirtschaftliche Ziele zu erreichen. Die Wirtschaftlichkeit sollte ganzheitlich anhand von quantitativen, qualitativen und strategischen Faktoren bewertet werden. Wenn in der Zukunft noch mehr Erfahrungen und Daten für MRK-Applikationen vorliegen, wird es auch möglich sein, qualitative Faktoren, wie geringere Absenkraten durch bessere Ergonomie, zu quantifizieren.

Wir empfehlen ebenfalls, sich im Rahmen von überschaubaren, nicht zu komplizierten Projekten mit den MRK-Technologien vertraut zu machen. Hohe Geschwindigkeiten und Taktzeiten eignen sich aus Sicherheitsgründen nicht als primäre Ziele der Teilautomatisierung mithilfe von MRK. Wir gehen ebenso wie Dr. Witte davon aus, dass wir qualitative Faktoren durch Langzeiterfahrungen viel fundierter bewerten können.

Mit einem wichtigen Punkt möchte ich abschließen: Auch wir haben gelernt, dass die frühzeitige Einbindung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sehr wichtig ist. Wenn man den Fokus nur auf die Technik legt, wird man mit dem MRK-Projekt scheitern. Akzeptanz durch Partizipation – so heißt das Motto, nach dem wir handeln.

Die KSB Aktiengesellschaft gehört zum KSB-Konzern, einem Anbieter von Pumpen, Armaturen und zugehörigen Serviceleistungen.

Die Platos GmbH ist eine Unternehmensberatung, deren Ziel es ist, Produktionsbetriebe auf eine erfolgreiche Zukunft vorzubereiten.

Die Miele & Cie. KG ist ein Hersteller von Haushalts- und Gewerbegeräten.





Dr.

**MARIJA RADIĆ**

stellv. Abteilungsleiterin Unternehmensentwicklung im internationalen Wettbewerb, Leiterin der Gruppe Preis- und Dienstleistungsmanagement am Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

Das Fraunhofer IMW ist ein sozioökonomisches Forschungsinstitut, das wissenschaftliche Lösungen für die Herausforderungen der Globalisierung entwickelt.

## LIFE CYCLE COSTING FÜR MRK

Die Kosten für die Einführung kollaborativer Montagesysteme sind von Unternehmen zu Unternehmen sehr individuell. Der Preis des Roboters ist davon abhängig, welche Tätigkeiten er verrichten soll. Dazu kommen eventuell noch spezielle Werkzeuge und unter Umständen muss auch der Arbeitsplatz angepasst werden. Deshalb empfiehlt es sich, vor der Anschaffung eine individuelle Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anzufertigen.

### Wirtschaftlichkeit mit Lebenszykluskostenrechnung ermitteln

Im Rahmen des KUKoMo-Projekts haben wir einen methodischen Ansatz für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ausgearbeitet, der auf der Lebenszyklusrechnung – auch Life Cycle Costing genannt – fußt. Diese Methodik gibt einen Überblick über die gesamten Lebenszykluskosten und ist individuell an die Bedingungen eines Unternehmens anpassbar. Zudem lassen sich u.a. der Amortisationszeitraum, die Discounted Cashflows und die Kosten pro Leistungseinheit ermitteln.

Die Validierung der errechneten Kennzahlen erfolgt mithilfe einer Sensitivitäts- und Nutzwertanalyse. Letztere dient dazu, qualitative Faktoren – wie die Entlastung der Arbeiter durch eine verbesserte Ergonomie – zu integrieren.

### Je höher der Grad der Kollaboration, desto größer die Zeitersparnis

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit stellt die Parallelisierung der Prozesse den wichtigsten Faktor dar. Je höher der Grad der Kollaboration, desto größer ist die Zeitersparnis. Im Sinne einer hohen Auslastung ist es vorteilhaft, wenn sich mehrere Prozessschritte durch eine MRK-Lösung vereinfachen lassen. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten aufgrund des Prozesses oder der Zykluszeit sprechen aus Sicherheitsgründen eher gegen eine Einführung von MRK. Ebenso können lange oder schwere Bauteile Probleme bereiten.



Quelle: robomotion GmbH



„FÜR DIE WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE GIBT ES KEINEN ALLGEMEINGÜLTIGEN LÖSUNGSANSATZ – SIE SOLLTE ANWENDUNGSFALLSPEZIFISCH ERFOLGEN.“

Prof. Dr. Mischa Seiter

## KOSTEN IDENTIFIZIEREN UND NUTZEN BEWERTEN

Bei den Kosten unterscheidet man zwischen Anschaffungskosten und Kosten des laufenden Betriebs. Im Rahmen der Anschaffungskosten sind neben den Kosten des Roboters vor allem die Kosten für die Integration zu berücksichtigen. Beispielsweise müssen bestehende Prozesse in der Montage angepasst, Schnittstellen zu verschiedenen IT-Systemen wie MES oder ERP geschaffen und Softwarelizenzen gekauft werden. Zudem müssen der Roboter auf den spezifischen Montagefall eingelernt und das Personal geschult werden. Im laufenden Betrieb entstehen u.a. Kosten im Rahmen von Wartungen und Reparaturen am Roboter, Kosten durch Stillstandszeiten, Energiekosten, Rüstkosten oder Versicherungskosten.

### Kennzahlen zur Bewertung des Nutzens

Im Vergleich zu den Kosten ist die Bewertung des Nutzens erheblich komplexer. Die meisten Nutzenaspekte sind nicht monetär bewertbar oder überhaupt nicht quantifizierbar. Die nachfolgenden Beispiele verdeutlichen diese Problematik. Die Messung von Taktzeiten sowie die Übersetzung in einen monetären Wert ist z.B. noch recht simpel. Schwieriger wird die Bewertung des Nutzens im Falle der Arbeitssicherheit. So ist der Roboter z.B. in der Lage, Arbeitsschritte mit hoher Verletzungsanfälligkeit oder zur Verarbeitung von Gefahrenstoffen durchzuführen. In diesem Fall eignen sich Kennzahlen wie die Unfallhäufigkeit, um den jeweiligen Nutzen zu quantifizieren. Werden durch den kollaborativen Montagearbeitsplatz unangenehme Aufgaben für die Mitarbeiter reduziert, kann auch die Zufriedenheit der Mitarbeiter als repräsentative Kennzahl dienen.

Abschließend gilt es zu bewerten, welchen Einfluss diese nicht monetären Kennzahlen auf monetäre Größen haben, damit eine Gegenüberstellung zu den identifizierten Kosten möglich ist. Bei der Bewertung des Nutzens ist es entscheidend, dass alle Kennzahlen objektiv bewertbar sind, der Erhebungsaufwand jedoch nicht zu hoch sein darf. Die Auswahl der richtigen Kennzahlen ist damit ein komplexer, jedoch für die Bewertung unerlässlicher Schritt in der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

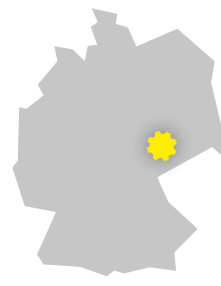
Insgesamt kann festgehalten werden, dass kein allgemeingültiger Lösungsansatz existiert. Vielmehr muss die Wirtschaftlichkeitsanalyse anwendungsfallspezifisch erfolgen.



Prof. Dr. MISCHA SEITER

Professor für Betriebswirtschaftslehre an der Universität Ulm sowie wissenschaftlicher Leiter des International Performance Research Instituts (IPRI)

Das IPRI ist ein gemeinnütziges Forschungsinstitut auf dem Gebiet der Betriebswirtschaftslehre, das angewandte Forschung mit dem Fokus auf Performance Management von Organisationen, Unternehmen und Unternehmensnetzwerken betreibt.



Projekt KUKoMo

# BEGÜNSTIGENDE UND HEMMENDE FAKTOREN FÜR DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT VON MRK

Dr. Marija Radić, David Drzewiecki, Tabea Esquinazi (Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW); Dr. Ulrich Bobe (ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.); Volker Schubert (WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH)

## Eine erste Abschätzung darüber, ob sich der Einsatz von MRK lohnt, kann anhand von begünstigenden und hemmenden Faktoren erfolgen.

Das wirtschaftliche Potenzial, das sich durch die Einführung von MRK ergibt, lässt sich anhand verschiedener Indikatoren bewerten. Dazu gehören Faktoren, die den Einsatz kollaborativer Montagesysteme begünstigen oder hemmen.

### Begünstigende Faktoren für den MRK-Einsatz

#### 1. Parallelisierung

Der wichtigste Treiber für die Wirtschaftlichkeit einer MRK-Lösung besteht in der Parallelisierung von Prozessen, die gleichberechtigt nebeneinander ablaufen. Je höher der Grad der Kollaboration, desto größer ist die Zeitersparnis beim Bedienereingriff.

#### 2. Ergonomische Bedingungen

Körperlich belastende und sehr monotone Arbeiten sind häufige Ursachen für krankheitsbedingte Personalausfälle. MRK-Lösungen können einen großen Beitrag zur Verbesserung der Ergonomie und damit zur Reduktion von Krankenständen, aber auch zur Erhöhung der Zufriedenheit der Mitarbeitenden leisten.

#### 3. Flexible Raumnutzung

Die Möglichkeit, ohne Schutzzäune mit einem Roboter Hand in Hand arbeiten zu können, bereitet den Weg für neue Prozess- und Raumkonzepte und damit für eine agile Produktion.

#### 4. Roboter als „dritte Hand“

Erfahrungen zeigen, dass sich der Einsatz von MRK insbesondere

im Zwei- bis Drei-Schicht-Betrieb lohnt. Der Roboter kann dabei als „dritte Hand“ für die Werkerin oder den Werker fungieren, sodass die Abläufe effizienter werden.

#### 5. Prozessabsicherung

Menschen verfügen über hohe optische und taktile Fähigkeiten, die insbesondere für die Qualitätsabsicherung wichtig sind. In der Vollautomatisierung führt das Übertragen dieser Fähigkeiten auf die Maschine oft zu hohen Kosten. Hier kann die MRK-Lösung ein optimaler Kompromiss sein.

#### 6. Zuführung

Bei der Zuführung kommen oft rein mechanische Lösungen zur Sortierung zum Einsatz. Da sie an die Geometrie des jeweiligen Werkstücks gebunden sind, sind sie oft unflexibel und teuer. Eine MRK-Lösung kann für die Zuführung eine kostengünstige Lösung sein.

#### 7. Prozessqualität durch Genauigkeit

Wenn die Prozessqualität stark von der Genauigkeit der Bewegungen im Prozess oder von der exakten Einstellung von Prozessparametern abhängt, kann die MRK-Lösung aufgrund der Wiederholungsgenauigkeit und Konstanz der Parameter helfen, den Prozessablauf zu stabilisieren und für weniger Ausschuss zu sorgen.

#### 8. Zugänglichkeit

Wenn Verbauorte eng oder schlecht zugänglich sind, das Einführen der Hand oder einzelner Finger notwendig ist oder bei manueller Tätigkeit umgegriffen werden muss, kann eine MRK-Lösung sinnvoll sein.

## Hemmende Faktoren für den MRK-Einsatz

#### 1. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten

Der MRK-Einsatz erfordert eine starke Reduktion der Handhabungsgeschwindigkeit im Prozess. Dies ist notwendig, um geringe Kontaktkräfte einzuhalten und damit die Sicherheit zu gewährleisten. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten sprechen daher eher gegen MRK.

#### 2. Lange und schwere Bauteile

Ein Bauteilgewicht von über 5 Kilogramm sowie eine Bauteillänge von mehreren Metern erschweren den Einsatz von MRK-Systemen.

#### 3. Biegeschlaffe Teile

Biegeschlaffe Teile wie Schläuche oder Kabel können vorrangig nur auf Zug belastet werden. Dies birgt große Schwierigkeiten bei der maschinellen Handhabung und ist nur mithilfe teurer Visualisierungssysteme umsetzbar.

#### 4. Gefährdung

In bestimmten Situationen, z.B. bei schädlichen Gasen, großer Hitze, Lärm oder bei Werkstücken mit scharfen Kanten, sollte aus Sicherheitsgründen auf eine MRK-Lösung verzichtet werden.

## MRK bei der WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH

WätaS beschäftigt sich mit der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb von Wärmeübertragern. Die Montage eines Sammlers für die hergestellten Wärmeübertrager erfolgt gegenwärtig an vier Handarbeitsplätzen. Das Ziel ist, durch die Einführung einer MRK-Lösung künftig einen arbeitsteiligen Prozess zu organisieren, eine höhere Prozesssicherheit zu gewährleisten und damit die Nacharbeit zu reduzieren. Zudem soll die Belastung für die Mitarbeitenden reduziert werden, die im jetzigen Arbeitsprozess durch die gebeugte Haltung, die umfangreichen Haltearbeiten, die Monotonie und das Erfordernis einer hohen Präzision körperlich und mental stark gefordert sind.

### Die MRK-Lösung

Der Prozess der Sammlermontage besteht aus fünf Arbeitsschritten, wovon vier weiterhin manuell ausgeführt werden und einer vom Roboter übernommen werden soll. Zuerst stellt die Werkerin oder der Werker die Materialien bereit und fügt anschließend das Sammelrohr in ein Aufspannelement ein. Dann positioniert der Roboter in beschriebener Ausrichtung die Füße für das Schweißen im Sammelrohr. Durch die hohe Präzision des Roboters wird der Prozessschritt deutlich verkürzt. Aufwendiges Nachjustieren und Prüfen entfällt. Das Schweißen der einzelnen Punkte übernimmt die Werkerin oder der Werker. Dabei wird der Fuß während des gesamten Heftprozesses vom Greifer des Roboters gehalten. Dies soll zu einer deutlichen Verringerung der Ungenauigkeit der Lage am oberen Ende des Fußes führen. Im Ablauf erfolgt eine Prozesskontrolle durch die Werkerin oder den Werker.

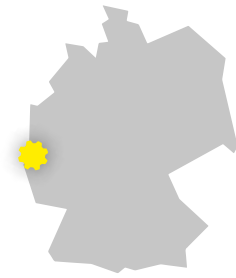
niert der Roboter in beschriebener Ausrichtung die Füße für das Schweißen im Sammelrohr. Durch die hohe Präzision des Roboters wird der Prozessschritt deutlich verkürzt. Aufwendiges Nachjustieren und Prüfen entfällt. Das Schweißen der einzelnen Punkte übernimmt die Werkerin oder der Werker. Dabei wird der Fuß während des gesamten Heftprozesses vom Greifer des Roboters gehalten. Dies soll zu einer deutlichen Verringerung der Ungenauigkeit der Lage am oberen Ende des Fußes führen. Im Ablauf erfolgt eine Prozesskontrolle durch die Werkerin oder den Werker.

### Wirtschaftlichkeit durch Zeitersparnis und Verbesserungen in der Qualität

Aktuell sind die Produktionskosten recht hoch, da an einem Produkt oft mehr als eine Stunde gearbeitet werden muss. Durch eine MRK-Lösung lassen sich die Gesamt- und Produktionskosten senken. Dass liegt vor allem daran, dass die prozessbeteiligten Mitarbeitenden durch Zeitersparnisse andere vor- und nachgelagerte Tätigkeiten zusätzlich ausführen können. Zudem ermöglicht die präzisere Arbeitsweise eine höhere Qualität.

Der Prozess der Sammlermontage eignet sich für ein kollaborierendes Arbeiten gut, da Prozesse parallel durchgeführt werden können, ein Eingreifen des Menschen in den Arbeitsraum des Roboters notwendig und eine Vollautomatisierung durch eine hohe Variantenvielfalt unwirtschaftlich ist. Die Taktzeit ist maßgeblich von der Präzision des Arbeitens abhängig, wodurch sich Nacharbeiten und eine aufwendige Qualitätskontrolle des Endprodukts vermeiden lassen. So kann an einem Arbeitsplatz mit der MRK-Lösung gearbeitet werden und Teile, die aufgrund ihrer Größe und Komplexität für den Roboter ungeeignet sind, können an einem weiteren Arbeitsplatz manuell gefertigt werden.

Dies spart Personal und Platz, was insgesamt die Produktionsorganisation verbessert. Zudem bietet der Roboter die Chance, die hohe ergonomische Belastung für den Menschen in einer vergleichbaren Tätigkeit zu verringern. Neben begünstigenden Faktoren gibt es dennoch einige erschwerende: Aufgrund der Hitze und der Lichtblitze durch den Schweißprozess müssen besondere Sicherheitsvorkehrungen am und im Umfeld des Arbeitsplatzes berücksichtigt werden. Zudem ist es notwendig, die Bauteile für den Roboter zu sortieren und lagegenau bereitzustellen. Insgesamt überwiegen bei der WätaS jedoch die begünstigenden Faktoren, was zu einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit durch die MRK-Lösung führt.



Projekt KoKoMo

# KOSTEN- UND NUTZEN- ASPEKTE VON MRK QUANTIFIZIEREN

Prof. Dr. Mischa Seiter, Marc Rusch (IPRI International Performance Research Institute gGmbH); Volker Grabs, Dennis Kreutzer (Lenze Operations GmbH); Hans-Peter Waldmann (KSB SE & Co. KGaA)

**Aus zwei Praxisbeispielen lassen sich Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Einführung kollaborativer Montagesysteme ableiten.**

## Herausforderungen bei der Erfassung von Kosten und Abschätzung des Nutzens

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse für kollaborative Montagesysteme setzt sich aus zwei wesentlichen Bestandteilen zusammen: (1) der Identifikation aller Kosten sowie (2) der Bewertung des Nutzens, der durch die MRK-Einführung entsteht.

Anfallende Kosten lassen sich in der Regel direkt quantifizieren. Die Hürde hierbei liegt darin, die Kosten vollständig zu erfassen. Oftmals sind auch vor- und nachgelagerte Prozesse der Einführung eines kollaborativen Montagesystems betroffen. Es gilt demnach im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse, die Systemgrenzen genau zu definieren.

Der monetäre Nutzen eines kollaborativen Montagesystems lässt sich vergleichsweise schwer bewerten. Viele Nutzenaspekte wie Transparenz, Arbeitssicherheit oder Mitarbeitermotivation sind nicht direkt quantifizierbar. Durch geeignete Kennzahlen können sie zwar erfasst werden, allerdings besteht eine Hürde in der objektiven Messung der Kennzahlen. Wurden geeignete Kennzahlen identifiziert und erhoben, gilt es zudem, die monetären Effekte der Nutzenaspekte zu bewerten.

## Praxisbeispiel Antriebstechnik

Im Rahmen des KoKoMo-Projekts hat das Unternehmen Lenze SE (kurz Lenze) - ein Hersteller und Entwickler für Antriebstechnik und Automation - Überlegungen zur Einführung von MRK in der Getriebemontage angestellt. Konkret soll der kollaborative Montageroboter bei der Messung des Getriebeispiels in der Getriebemontage unterstützen. Bislang wird diese Messung lediglich auf Kundenwunsch und rein manuell durchgeführt. Durch das kollaborative Montagesystem soll dieser Arbeitsschritt nun standardmäßig in den Montageprozess integriert werden. Lenze schafft hierdurch eine zusätzliche Information für den Kunden und erhöht gleichzeitig die Qualität der Getriebemontage. Das Unternehmen erwartet zudem einige zusätzliche Nutzenaspekte. Die Messung durch den Roboter eliminiert eine potenzielle Gefahrenquelle für leichte Verletzungen und gleichzeitig eine Aufgabe, die durch die Mitarbeitenden als monoton und lästig empfunden wird. Zugleich wird die Reproduzierbarkeit der Messung des Getriebeispiels erhöht, da der Mitarbeiter vom Roboter ein Feedback zur Einstellung des Getriebes erhält.

Vor der Einführung des kollaborativen Montagesystems hat Lenze alle potenziellen Kosten- und Nutzenaspekte sowie entsprechende Kennzahlen für die Bewertung identifiziert. Diese lassen sich in einer übersichtlichen „Evaluation Map“ zusammenfassen (siehe Bild 1). Bei den Kosten wird zwischen Anschaffungskosten und Kosten während des laufenden Betriebs unter-

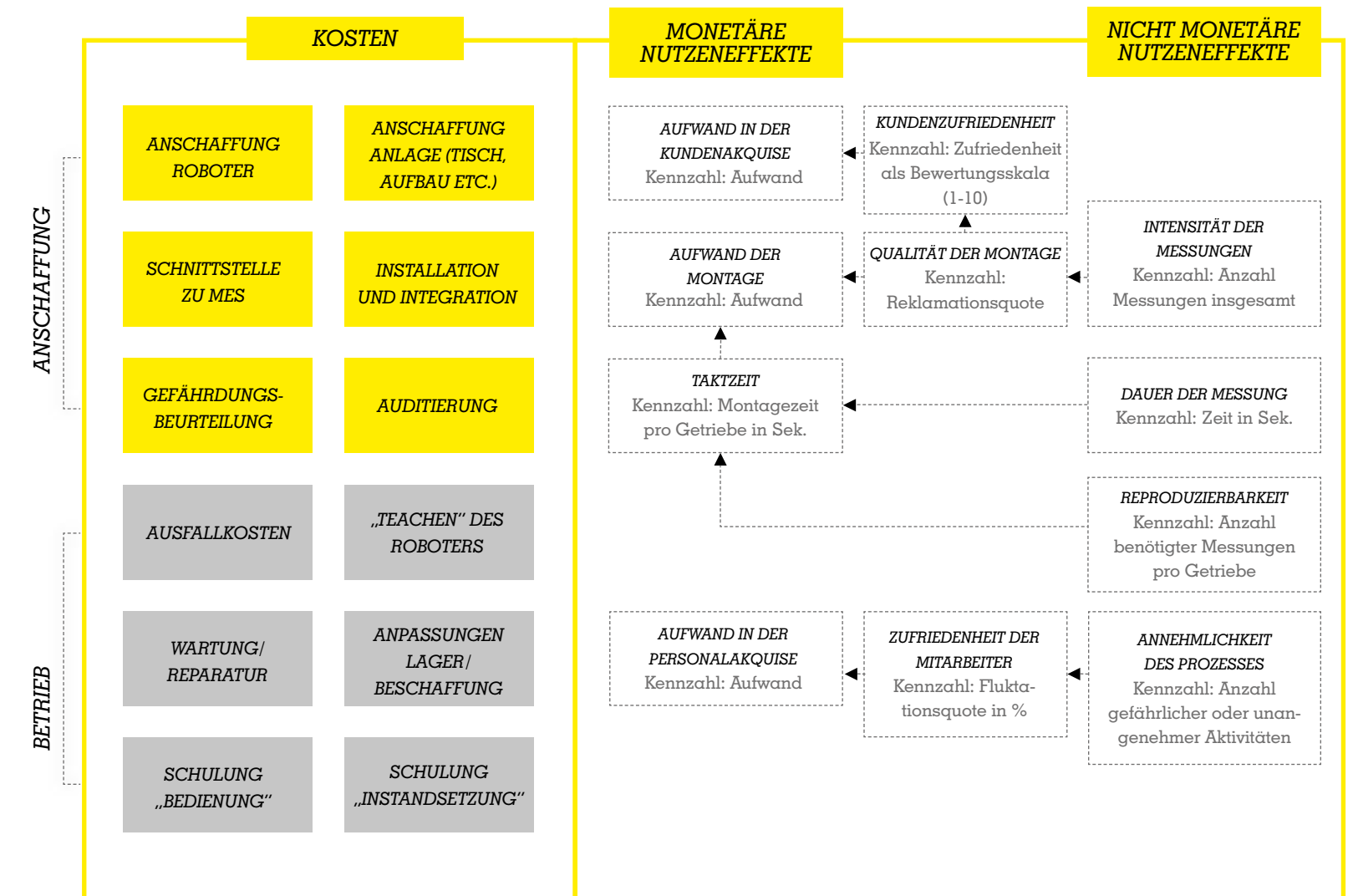


Bild 1: „Evaluation Map“ bei Lenze





schieden. Neben der Anschaffung des Roboters und der Anlage müssen Schnittstellen zum MES (Manufacturing Execution System) geschaffen werden, damit die Messwerte automatisch in der Datenbank hinterlegt werden. Zudem entstehen Kosten für die Installation und Integration des Roboters in den Montageprozess sowie für die Gefährdungsbeurteilung und Auditierung. Während des laufenden Betriebs entstehen Kosten durch Anpassungen in verschiedenen Bereichen wie Lager und Beschaffung, durch kontinuierliches „Teachen“ des Roboters, Schulungen, aber auch durch Ausfälle sowie Wartung und Reparatur. Nutzenstark ist besonders zu berücksichtigen, wie hoch der prozentuale Anteil der gemessenen Getriebe ist - dargestellt im Feld „Intensität der Messungen“. Je größer die Anzahl gemessener Getriebe ist, desto größer ist auch der Effekt auf nachgelagerte Kennzahlen wie die Kundenzufriedenheit und den Aufwand.

### Praxisbeispiel Pumpen und Armaturen

Auch das Unternehmen KSB SE & Co. KGaA (kurz KSB) - ebenfalls ein KoKoMo-Projektpartner - hat sich als Hersteller von Pumpen und Armaturen mit der Einführung kollaborativer Montagesysteme beschäftigt. Diese sollen bei der Montage überflutbarer Fäkalienhebeanlagen zum Einsatz kommen. Bei KSB werden diese Anlagen in mehr als 60 Varianten produziert.

Anders als im Fall von Lenze soll der kollaborative Roboter bereits bestehende Prozessschritte übernehmen. Diese beinhalten insbesondere körperlich belastende Tätigkeiten wie häufiges Heben sowie das Handling diverser Betriebsstoffe wie Kleber oder Dichtmittel. Das kollaborative Montagesystem soll damit insbesondere auch die Gesundheit und die Zufriedenheit der Mitarbeiter fördern. Dadurch, dass die manuellen und robotergestützten Prozessschritte parallel erfolgen, soll Zeit gespart werden. Zusätzlich sieht KSB die Option, größere Bedarfsschwankungen durch den Einsatz der Roboter flexibel lösen zu können.

Auch für KSB bildet die entsprechende „Evaluation Map“ Kosten- und Nutzenaspekte ab, um die Wirtschaftlichkeit abschätzen zu können (Bild 2). Die Kosten durch Anpassungen in den Montageprozessen oder durch die Einführung eines Sicherheitssystems sind zunächst nur grob schätzbar. Ähnlich verhält es sich mit Kosten im laufenden Betrieb, z.B. durch Ausfälle des Montagesystems oder durch benötigte Schulungen. Die rechte Seite der Abbildung verdeutlicht die Auswirkungen der Nutzenaspekte auf monetär messbare Größen wie den Aufwand. Die Parallelität der durch den Menschen und durch den Roboter durchgeführten Prozessschritte, aber auch die Steigerung der Prozesseffizienz haben einen starken Effekt auf die Taktzeit und damit auf den Aufwand in der Montage. Besonders hervorzuheben ist zudem die positive Auswirkung auf die Gesundheit und die Zufriedenheit der Mitarbeiter, die neben einem monetären Aspekt auch einen sozialen Mehrwert bietet.

### Fazit und Umsetzungsempfehlungen

Die Praxisbeispiele veranschaulichen, wie unterschiedlich die Anwendungsfälle kollaborativer Montagesysteme sein können. Allgemeingültige Schlüsse über anfallende Kosten oder über erwartete Nutzenaspekte lassen sich nicht ziehen. Vielmehr wird Unternehmen an dieser Stelle empfohlen, ein transparentes und nachvollziehbares Bewertungsschema zu entwickeln, das auf den konkreten Anwendungsfall zugeschnitten ist. Eine solche Abschätzung der wirtschaftlichen Effekte kann bei der MRK-Einführung unterstützen, sollte aber nicht als final angesehen werden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse muss in den Unternehmen vielmehr als fortlaufender Prozess erkannt und praktiziert werden. Im Laufe der Zeit gilt es, tatsächliche Werte für die verschiedenen Kennzahlen zu messen und zukünftig bei der Bewertung zu berücksichtigen.

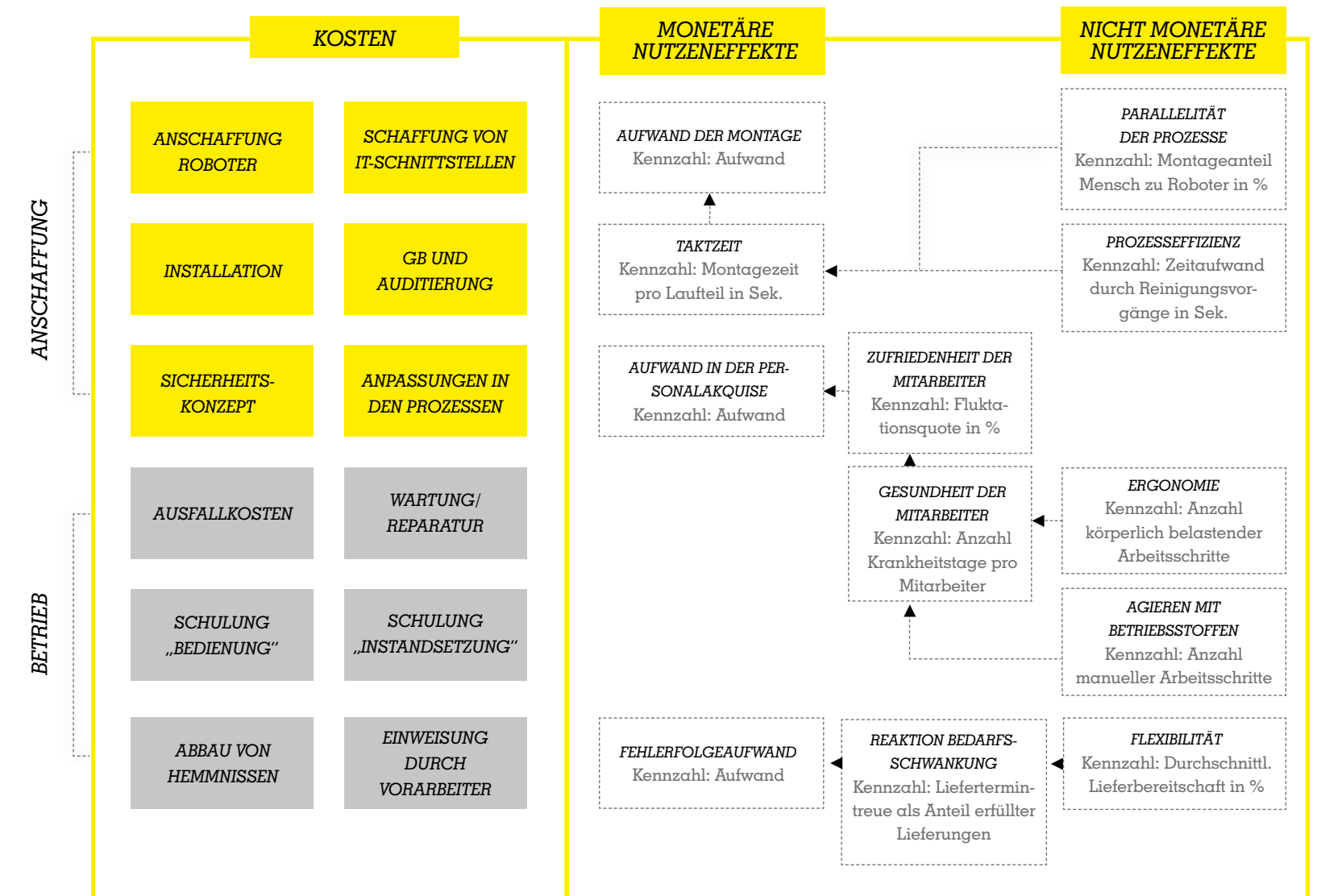
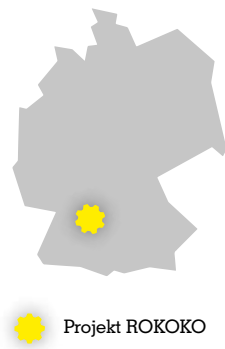


Bild 2: „Evaluation Map“ bei KSB



# INVESTITIONS-ABSCHÄTZUNG FÜR MRK-ANWENDUNGEN

Peter Rally und Oliver Scholtz (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO)

Welche Kostenpositionen bei einer Investition in MRK zu berücksichtigen sind und wie sich die Komplexität des Einsatzfalls darauf auswirkt, zeigt eine neu entwickelte Methodik, die in einer sehr frühen Planungsphase oder bereits in der Entscheidungsphase anwendbar ist.

Bei herkömmlichen Automatisierungen stellen die Kosten für den Roboter nur etwa ein Drittel der Gesamtinvestitionen dar. Diese Faustformel lässt sich jedoch nicht so ohne Weiteres auf kollaborative Montagesysteme übertragen - insbesondere mit Blick auf die große Preisspanne für Leichtbauroboter, die im Bereich von 10.000 bis 80.000 Euro liegt. Es gibt zudem eine Reihe von Kostenpositionen, deren Höhe nicht vom ausgewählten Roboter, sondern von anderen Randbedingungen abhängt. Es bedarf daher einer differenzierteren Betrachtung aller Kostenpositionen.

### Methodik mit ganzheitlichem Kostenansatz

Basierend auf den Erfahrungen der drei Planungsprojekte haben die ROKOKO-Projektpartner eine Methodik bzw. ein Tool zur schnellen Investitionsabschätzung erarbeitet, das bereits in frühen Planungsphasen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eingesetzt werden kann (siehe Bild 1).

In der Tabelle sind Kostenpositionen aufgeführt, die mit Blick auf den Komplexitätsgrad als hoch, mittel oder gering einzuordnen sind. Für jeden Komplexitätsgrad ist ein Kostenbetrag hinterlegt, der in den entsprechenden Spalten angezeigt wird. Mit der Definition der Komplexitätsstufe einer Kostenposition (in den gelben Auswahlfeldern der Tabelle) wird für den aktuellen Anwendungsfall der zutreffende Kostenbetrag in die Spalte

ganz rechts eingetragen und am unteren Ende dieser Spalte der Gesamtbetrag aller erforderlichen Investitionen berechnet.

Die Kostenwerte sind unternehmens- oder Integrator-spezifisch hinterlegt und lassen sich im Einzelfall einfach überschreiben. Folgende Kostenpositionen sind in der Tabelle enthalten.

### Kostenpositionen „Hardware“ (HW)

Die Roboter unterscheiden sich stark in ihrer Leistungsfähigkeit (Traglast, Reichweite, Positioniergenauigkeit, Anzahl der Achsen, Sensitivität oder eingebaute Sicherheitsfunktionen) und folglich auch in ihrem Preis. Soll der Roboter Teile greifen, sind Greifer erforderlich. Diese sind umso komplexer und damit teurer, je mehr Teile mit einem Greifer gegriffen werden sollen, je mehr geometrische Varianten die Teile aufweisen, je schwerer die Teile sind und je höher der Grad der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ist.

Die Anlage - bestehend aus Tisch, Rahmen, Verkettung -, in der der Roboter arbeiten soll, wird umso teurer, je größer und schwerer die Teile ausfallen, je höher der Automatisierungsgrad der Verkettung und je höher die Geschwindigkeit des Roboters ist. Der Schaltschrank beinhaltet die Netzgeräte, Sicherheits-SPS (speicherprogrammierbare Steuerung), Buskoppler, HMI, Reihen-klemmen, Busmodule und Ein-Ausgabe-Systeme. Der Preis der Anlage hängt wesentlich davon ab, ob eine separate Sicherheits-SPS erforderlich ist, ob der Roboter die Sicherheitssteuerung übernehmen kann und ob der Kunde viele spezielle Anforderungen (z.B. Kundenstandards) stellt.

Die Materialbereitstellung ist bei der Umstellung von rein manuellen Arbeitssystemen - mit ungeordneten Teilen in Behältern -

auf MRK eine nicht zu vernachlässigende Kostenposition. Große Teile lassen sich in Behältern mit Einlagen, kleine Teile z.B. über Wendelförderer bereitstellen. Je nach Teilegeometrie ist für das Robotersystem eine exakte Teilepositionsbestimmung erforderlich, z.B. mithilfe von Kameras. Ob die Materialbereitstellung automatisiert erfolgen sollte, ist im Einzelfall zu überprüfen bzw. zu ermitteln.

### Kostenpositionen „Dienstleistungen“

Das Projektmanagement beinhaltet den Informationsaustausch zwischen Kunde und Systemintegrator, die Zeit- und Aufwandsplanung sowie die Abstimmungen mit dem Kunden. Beim Systems Engineering wird das System inklusive Schaltschrank vom Systemintegrator mechanisch und elektrisch konstruiert. Der Systemintegrator hat den für das Montagepersonal sicheren kollaborativen Betrieb zu untersuchen und in Form einer CE-Konformitätsbewertung nach der Maschinenrichtlinie nachzuweisen und zu dokumentieren. Das Gesamtsystem einschließlich der CE-Nachweise ist in einer Dokumentation zu beschreiben.

Der Roboter und die gesamte Anlage sind zuerst beim Systemintegrator und anschließend beim Kunden aufzubauen und in

Betrieb zu nehmen (Aufbau, Montage, Inbetriebnahme). Je größer die Entfernung zum Kunden, desto höhere Reisekosten fallen an. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme beim Systemintegrator und der Vorabnahme durch den Kunden wird die Anlage abgebaut, verpackt und an den Kunden versendet (Verpackung, Versand, Versicherung).

### Kostenpositionen „Sonder-Hardware und -Dienstleistungen“

Sonder-Hardware, wie Kamerasysteme für Klebprozesse, variiert in den erforderlichen Investitionen und Implementierungsaufwänden so stark, dass diese nur anwendungsfallspezifisch angegeben werden können. Daher sind in der Tabelle keine Investitionen für diese Kostenpositionen vorgegeben.

Kombiniert man die vorgestellte Methodik der schnellen Investitionsabschätzung mit einer Abschätzung der Zeitersparnis (siehe Beitrag „Kollaborative Montagearbeitsplätze gestalten - ein Fallbeispiel“ in Kapitel 4) lassen sich Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der MRK-Lösung bereits in einer frühen Projektphase ableiten.

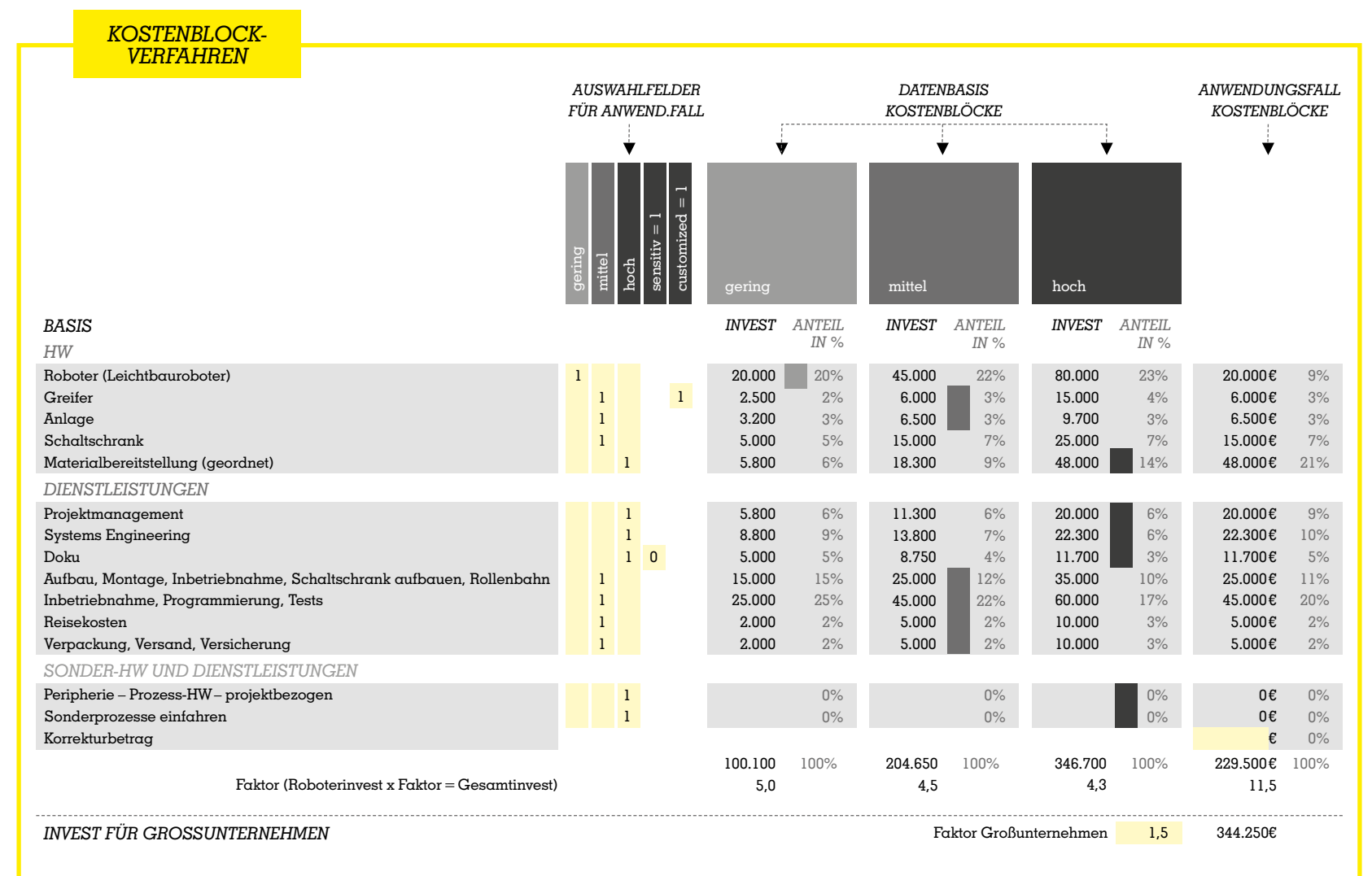
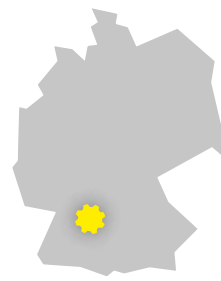


Bild 1: Tool zur ersten Abschätzung der Investitionen in ein MRK-System



Projekt ROKOKO

# WIRTSCHAFTLICHKEIT VON MRK BEWERTEN

Dr. Karl-Werner Witte (PLATOS Planung technischer organisatorischer Systeme GmbH)

Mithilfe eines Bewertungstools, das sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien berücksichtigt, lässt sich die Wirtschaftlichkeit einer MRK-Lösung berechnen.

Die Wirtschaftlichkeit beschreibt das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Bei der Umstellung eines rein manuellen Montagearbeitsplatzes auf eine Mensch-Roboter-Kollaboration besteht die besondere Herausforderung darin, den Wert bzw. den Nutzen der MRK-Lösung zu ermitteln. Der Nutzen kann zum einen durch Kosteneinsparungen gegenüber der manuellen Montage entstehen. Zum anderen bietet die Flexibilität der Leichtbauroboter strategische Vorteile, weil sich ihr Einsatz relativ schnell an veränderte Aufgabenstellungen anpassen lässt.

**Nutzen durch effizienteren Personaleinsatz, bessere Qualität und mehr Flexibilität**

Die Kostenvorteile sind im Wesentlichen auf einen geringeren bzw. effizienteren Personaleinsatz sowie eine bessere und stabilere Qualität zurückzuführen. Ein Grund für den effizienteren Personaleinsatz kann die bessere Austaktung des Montagesystems durch den Einsatz von Leichtbaurobotern sein. Aber auch der höhere Automatisierungsgrad und die ergonomischere Gestaltung der Arbeitsbedingungen für die weiterhin manuell durchzuführenden Tätigkeiten verfehlen ihre Wirkung nicht. Bekanntermaßen sind die Absenkratzen an ergonomisch gestalteten Arbeitsplätzen geringer als an stark belastenden. Allein wenn die krankheitsbedingte Absenkrate um nur einen Prozentpunkt zurückgeht, kann sich das positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.

Eine höhere Reproduzierbarkeit der Prozesse wirkt sich positiv auf die Qualität aus, denn die Materialkosten für Ausschuss

sinken ebenso wie der Personalaufwand für das Nacharbeiten und Herstellen des Ersatzes für Ausschussprodukte.

Die genannten Faktoren lassen sich mehr oder weniger gut quantitativ erfassen und machen damit die Berechnung von Wirtschaftlichkeitskenngrößen möglich. Anders sieht das bei den strategischen Vorteilen aus. Eine höhere Wandlungsfähigkeit lässt sich beispielsweise am einfachsten qualitativ bewerten. Zwar kann man die Rekonfigurationskosten eines wandlungsfähigen gegenüber einem nicht wandlungsfähigen System berechnen, wenn man die veränderten Anforderungen kennt. Diese in der Zukunft relevanten Anforderungen können jedoch zum Entscheidungszeitpunkt i.d.R. nur geschätzt werden.

**Taktzeiten durch MRK optimieren**

Von entscheidendem Einfluss auf die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Mensch-Roboter-Kollaboration ist auch, welcher Art der Robotereinsatz ist und ob die Montage in Losen oder im Mix erfolgen soll. Bei einem herkömmlichen, verketteten Montagesystem ohne MRK kann bei der Montage in Losen jede Variante mit minimalen Taktverlusten montiert werden. Verluste treten hier hauptsächlich beim Loswechsel durch Umrüstvorgänge und etwaiges Leerfahren des Systems auf. Bei einer Montage im Mix müssen demgegenüber die Taktzeiten der Produktvarianten so festgelegt werden, dass bei den verschiedenen Varianten keine Übertaktungen auftreten. Das hat i.d.R. Taktverluste an einzelnen Montagestationen zur Folge.

Wenn es durch geschickte Gestaltung der Mensch-Roboter-Kollaboration gelingt, die Zeiten an denjenigen Stationen zu reduzieren, die für die Taktzeiten maßgeblich sind, lassen sich dadurch

auch Taktverluste an anderen Stationen reduzieren. Auf diese Weise kann der Leichtbauroboter-Einsatz an nur einer Station zu Vorteilen an mehreren Stationen beitragen und damit zu einer höheren Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems.

Soll der Leichtbauroboter innerhalb des Montagesystems oder montagesystemübergreifend mobil eingesetzt werden, so ist die Montage in Losen meist die bessere Wahl, da das Verfahren der Roboter Zeit kostet, die man lieber einmal pro Los als bei jedem einzelnen Produkt aufwendet.

**Kenngrößen für die Wirtschaftlichkeit**

Um die Wirtschaftlichkeit zu bewerten, sind Kenngrößen erforderlich. Dabei unterscheidet man:

- quantitative Kenngrößen, die eindeutig ermittelbar sind, z.B. Amortisationszeit
- qualitative Kenngrößen, die bestimmte Vorteile beschreiben, z.B. Know-how-Zuwachs bezüglich einer neuen Technologie

Wirtschaftlichkeitsrelevante Daten des Montagesystems mit LBR-Einsatz

NORMALE EINGABEFELDER

EINGABEFELDER FÜR SIMULATION

PRODUKTVARIANTEN AUF DEM MONTAGESYSTEM

GM

NR.	BENENNUNG	LBR-EINSATZ	M	STÜCKZAHL/JAHR PLAN	STÜCKZAHL/JAHR KALK	TAKTZEIT (MIN)	ANZ. TAKTGEB. MONTEURE IM MS	ANZ. TAKTUNABH. MONTEURE IM MS	ANZ. LOSE/JAHR	UMRÜST-ZEIT (MIN)	BETR. ANZ. MONTEURE
1	Gerät XB201	ja	1,00	30.000	30.000	1,40	4,00		400	0,5	4,00
2	Gerät XB300	ja	1,00	22.000	22.000	1,60	4,00		100	2	4,00
3	Gerät XZ100	ja	1,00	17.000	17.000	1,40	4,00		80	4	4,00
4		0	ja	1,00	0	0					
5		0	ja	1,00	0	0					
6		0	ja	1,00	0	0					
7		0	ja	1,00	0	0					
8		0	ja	1,00	0	0					

INVESTITIONEN

M

DETAILKALKULATION GENUTZT?

11	Invest. LBR-AP, produktspezifisch	1,00	21.000	(EUR /Jahr)	21.000	nein
	AfA-Satz		20,00%	(%)	20,00%	
12	Invest. LBR-AP, produktneutral	1,00	55.000	(EUR /Jahr)	55.000	nein
	AfA-Satz		20,00%	(%)	20,00%	
13	Invest. LBR, produktneutral	1,00	15.000	(EUR /Jahr)	15.000	nein
	AfA-Satz		20,00%	(%)	20,00%	
14	Invest. LBR, produktspezifisch	1,00		(EUR /Jahr)	0	nein
	AfA-Satz			(%)	0,00%	
15	Planung, Installation, Inbetriebnahme	1,00	46.000	(EUR)	46.000	ja
	AfA-Satz		100,00%	(%)	100,00%	

KOSTEN ZUR AUFRECHTERHALTUNG DER BETRIEBSBEREITSCHAFT

M

KB1	Wartung & Instandhaltung	1,00	1.820	(EUR /Jahr)	1.820
	Proz. Anteil vom Invest		2,00%	(%)	2,00%
KB2	Rekonfigurationsaufwand ab Jahr 2	1,00	500	(EUR /Jahr)	500
KB3	Flächenkosten			(%)	234
	qm: 2 EUR/qm, Jahr:		117,12		

ERLÖSE, AUSSCHUSS, NACHARBEIT

NR.	PRODUKTVARIANTE	AUSSCHUSS-RATE (%)	NACHARBEITS-RATE (%)	MATERIAL-KOSTEN/STÜCK	ERLÖS/STÜCK
1	Gerät XB201	0,50%	1,00%	22,00	48,00
2	Gerät XB300	0,50%	1,00%	28,00	55,00
3	Gerät XZ100	0,60%	1,20%	30,00	54,00
4					0,00
5					0,00
6					0,00
7					0,00
8					0,00

Bild 1: Dateneingabe für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit





Zwischen der quantitativen und der qualitativen Bewertung gibt es noch Kenngrößen, die je nach der Datenverfügbarkeit im Unternehmen eher der quantitativen oder der qualitativen Bewertung zuzuordnen sind. Dabei kann die Aussagegenauigkeit stärker schwanken. So können Veränderungen von Ausschuss und Nacharbeit zwar quantitativ ausgedrückt werden; inwieweit sich die hierbei angenommenen Werte jedoch als zutreffend erweisen, muss die Zukunft zeigen.

### Tool zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von MRK

Ein im ROKOKO-Projekt entwickeltes Tool ermöglicht es, den Einsatz von Leichtbaurobotern an Montagearbeitsplätzen wirtschaftlich zu bewerten. Dieses Tool führt dazu quantitative Kennzahlen mit einer qualitativen Bewertung zu einer Gesamtbewertung zusammen. Es erfüllt folgende Anforderungen:

- Abbildung von losweiser Montage und Montage im Mix
- Ausweis der wirtschaftlichen Vorteile durch jährliche Kosteneinsparungen und Amortisationszeit (bei wechselndem Leichtbauroboter-Einsatz in zwei Montagesystemen Ausweis der Gesamtkosteneinsparungen und -amortisationszeit)
- Ausweis der potenziellen Kapazitätsreserve
- Bewertung qualitativer Kriterien abhängig von ihrer Ausprägung und Bedeutung in Form einer Nutzwertanalyse

Das Tool ist in die folgenden fünf Abschnitte untergliedert:

1. Eingabe der erforderlichen Daten
2. Berechnung der Zwischenergebnisse
3. quantitative Auswertung
4. qualitative Auswertung
5. Zusammenführung von quantitativer und qualitativer Auswertung

	JAHR 1	JAHR 2	JAHR 3	JAHR 4	JAHR 5
Liquiditätsvorteil mit LBR	-63.859	40.552	41.951	43.393	44.877
Liquiditätsvorteil kum	-63.859	-23.306	18.645	62.037	106.915
Kapitalwert bei ND von x Jahren	-66.632	-31.865	1.437	33.332	33.332
Kostenvorteil LBR	-17.859	29.052	30.451	31.893	33.377
Kostenvorteil kum	-17.859	11.194	41.645	73.537	106.915
durchschn. Personalkosten/Stck. o. LBR	4,33	4,45	4,59	4,37	4,87
durchschn. Personalkosten/Stck. m. LBR	3,77	3,88	4,00	4,11	4,24
durchschn. Personalkostenvorteil Syst. 1	%	12,95%			
Amortisationszeit	Jahre	2,56			
Gewonnene Kapazität	Std./Jahr	292			
Mehrerlöspotenzial	EUR	604.228			

Bild 2: Kenndaten des Wirtschaftlichkeitsvergleichs

Bild1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Eingabeteil eines Kalkulationsblatts. Wichtige Daten sind das Produktionsprogramm des betrachteten Montagesystems sowie Taktzeiten, Rüstzeiten und das eingesetzte Personal. Alle Eingabefelder sind blassgelb hinterlegt. Will man die Berechnung mit einer systematischen Variation der Eingabedaten durchführen, so kann man die gelb hinterlegten Felder mit Veränderungsfaktoren versehen, die bei einer möglichen Simulationsrechnung verwendet werden.

Der zweite Block an Eingabedaten nimmt die Zusatzinvestitionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration auf. Der Block ist in fünf Gruppen von Investitionen unterteilt, für die jeweils passende Abschreibungssätze zu vergeben sind. Auf diese Weise ist es möglich, den universell einsetzbaren Leichtbaurobotern eine der Nutzungszeit entsprechende längere Abschreibungszeit zuzuordnen. Dementsprechend kann man für produktspezifische Sonderbetriebsmittel kürzere Abschreibungszeiten eintragen. Innerhalb der einzelnen Gruppen können die Investitionsobjekte nach Zweckmäßigkeit frei gegliedert werden. Damit kann man auch die im Beitrag „Investitionsabschätzung für MRK-Anwendungen“ (in diesem Kapitel) dargestellte Gliederung verwenden. Weitere Eingabedaten beziehen sich auf Kosten zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft sowie auf Ausschuss und Nacharbeit. Stammdaten wie Personalkostensätze und Zinssätze werden separat erfasst.

Mithilfe der Eingabedaten lassen sich anschließend die Kennwerte für die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung berechnen (Bild 2). Dazu gehören:

- Kostenvorteile (Einsparungen) durch MRK
- Liquiditätsvorteile
- Kapitalwerte
- Amortisationszeit
- gewonnene Kapazität
- Mehrerlöspotenzial



### Nutzwertanalyse zur Bewertung qualitativer Kriterien

Das Bewertungsschema für die qualitative Bewertung unter Einsatz einer Nutzwertanalyse zeigt Bild 3. Die Aufgaben der Nutzwertanalyse bestehen darin, einzelne qualitative Kriterien zu gewichten (Stufen 1 = wenig wichtig bis 3 = sehr wichtig) und ihren Erfüllungsgrad zu bewerten (Bewertung 1 = kaum erfüllt bis 5 = vollständig erfüllt). Durch Multiplikation der Faktoren ergibt sich die Punktzahl je Kriterium. Im Rahmen der qualitativen Bewertung sollten Kriterien, die bereits zur quantitativen Bewertung herangezogen wurden, keine Berücksichtigung finden. Dies hätte sonst eine Doppelbewertung des entsprechenden Kriteriums zur Folge.

### Zusammenführung quantitativer und qualitativer Bewertung

Zur Gesamtbewertung der Ausprägung quantitativer und qualitativer Kriterien durch eine Master-Kennzahl sind zunächst einige Festlegungen zu treffen. Dies sind:

- Punktzahl bei Amortisationszeit 0 (sofortige Amortisation) = 100 Punkte
- Punktzahl bei Amortisationszeit 5 und mehr Jahre = 0 Punkte
- max. Punktzahl quantitativ = 100 Punkte
- max. Punktzahl für qualitative Bewertung, z.B. 50 Punkte (Die Bewertungspunktzahl wird damit auf die Skala von 1 bis 50 skaliert und kann dann mit der Punktzahl aus der quantitativen Bewertung addiert werden.)
- Entscheidungsschwelle bezogen auf die Gesamtpunktzahl, z.B. 60 Punkte

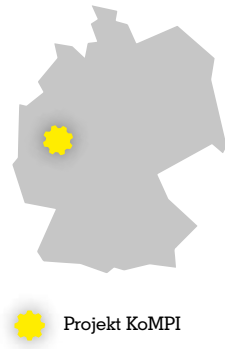
Im betrachteten Beispiel beträgt die qualitative Gesamtpunktzahl 36 (siehe Bild 3) - mit der entsprechenden Skalierung resultiert sie in einem Beitrag von 20 Punkten. Die in der quantitativen Bewertung ermittelte Amortisationszeit von 2,56 Jahren (siehe Bild 2) führt zu einem Punktebeitrag von 49. Damit ergibt sich eine Master-Kennzahl von 69, die über der Entscheidungsschwelle von 60 Punkten liegt. In dem Beispiel sollte sich das Unternehmen für die Investition entscheiden.

Für die beiden im ROKOKO-Projekt umgesetzten Anwendungsfälle konnte die Wirtschaftlichkeit mithilfe des Bewertungstools nachgewiesen werden. Dabei erwies sich eine Lösung allein auf Basis der quantitativen Bewertung als wirtschaftlich, während bei dem zweiten Anwendungsfall der Know-how-Gewinn zur positiven Bewertung beitrug.

Durch diese Zusammenführung qualitativer und quantitativer Kriterien ist sichergestellt, dass die qualitativen Merkmale ein (höheres) Gewicht bei der Entscheidungsfindung haben. Das ist besonders dann wichtig, wenn die bewertete Lösung Zugang zu neuem Know-how ermöglichen soll - ein Umstand, der mit Maßnahmen, die eine Amortisationsschwelle von einem Jahr haben sollen, eher selten der Fall ist. Am Ende ist es entscheidend, welche nachhaltigen Vorteile die Maßnahme in Zukunft für das Unternehmen bringt. Dazu tragen qualitative Faktoren ebenso bei wie quantitativ bewertbare Vorteile; im Laufe der Zeit schlagen sich erreichte qualitative Vorteile auch in quantitativen Ergebnissen nieder.

NR.	BEURTEILUNGSKRITERIEN	GEWICHTUNG 1 BIS 3	BEWERTUNG 1 BIS 5	GESAMTPUNKTZAHL: PUNKTZAHL:36
1	Bessere Ergonomie, geringere Mitarbeiterbelastung (physisch, bzgl. Aufmerksamkeit), weniger Absenzen	0	5	0
2	Bessere Prozessstabilität, höhere Qualität	0	3	0
3	Zusatzangebot an produktiv nutzbarer Kapazität = höhere Flexibilität bzgl. Stückzahlsteigerung = Potenzial zur Erzielung zusätzlicher Deckungsbeiträge	3	4	12
4	Höhere Wandlungsfähigkeit des Systems	1	3	3
5	Größere Flexibilität bzgl. Variantenmix	2	2	4
6	Geringerer Aufwand für Planung, Engineering, System-Rekonfiguration	1	1	1
7	Wichtigkeit der Know-how-Gewinnung bezüglich der Kollaboration von Mensch und LBR	3	5	15
8	Bessere Materialbereitstellung	1	1	1
9	Kriterium I	0	4	0
10	Kriterium J	0	5	0

Bild 3: Schema zur Bewertung qualitativer Kriterien



# ARBEITSWISSENSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON MRK-PLANUNGSSZENARIOEN

André Barthelmey, Tatjana Seckelmann, Vanessa Weißkamp, Ann-Kathrin Ermer, Prof. Dr. Jochen Deuse (Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, IPS); Marcus Kaiser (imk automotive GmbH)

**Mithilfe einer strukturierten Bewertung wichtiger sozio-technischer Aspekte ist es möglich, den Mehrwert einer Investition in MRK bereits in den früheren Planungsphasen zu ermitteln.**

Vor der Umsetzung einer MRK-Lösung sollte geprüft werden, ob sich die damit verbundene Investition auch wirklich lohnt. Zu diesem Zweck bietet sich der Einsatz einer Methode an, welche die KoMPI-Projektpartner zur Bewertung verschiedener MRK-Planungsszenarien erarbeitet haben. Die Bewertung orientiert sich an arbeitswissenschaftlichen Kriterien und berücksichtigt die Kategorien Ergonomie, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Organisation. Ergonomisch bedenkliche oder sicherheitskritische Situationen stellen bei der Bewertung ein K.-o.-Kriterium dar.

Alle Elemente der Bewertungssystematik sind in das Simulationswerkzeug „Editor menschlicher Arbeit (ema)“ integriert (siehe Beitrag „Werkzeug zur realitätsnahen MRK-Simulation“ in Kapitel 3). Das Ergebnis der Simulation beinhaltet die technische Machbarkeitsprüfung eines Planungsstands sowie arbeitswissenschaftliche Kennzahlen. Die Simulation bildet damit die Basis für die Umsetzung des MRK-Szenarios.

## Bewertung der Ergonomie anhand des Ergonomic Assessment Worksheet

Angelehnt an das Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) werden die ergonomischen Bedingungen für die Mitarbeiterin oder den Mitarbeiter innerhalb des hybriden Montageszenarios bewertet. Diese Analyse berücksichtigt Körperhaltungen und

-bewegungen mit geringen äußeren Lasten und Kraftaufwand, statische und dynamische Aktionskräfte und zusätzliche Belastungen sowie kurzzyklische repetitive Belastungen der oberen Extremitäten. Falls die ergonomische Beurteilung zu einem negativen Ergebnis kommt, ist das Szenario für den Menschen aus ergonomischer Perspektive ungeeignet. In diesem Fall sind weitere Planungsänderungen erforderlich.

## Wirtschaftlichkeitsbewertung auf Basis von Amortisationszeit und Kapitalwert

Die Güte der Wirtschaftlichkeitsbewertung hängt maßgeblich von der Datenausgangslage ab. Die KoMPI-Methode setzt bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung auf die Amortisationszeit und den Kapitalwert, die mithilfe eines neu entwickelten ema-Plug-in berechnet werden. Die von einem Szenario abhängigen Werte, wie z.B. Zykluszeit (Zeitdauer eines bestimmten Arbeitsvorgangs) oder Personaleinsatz (Anzahl der Personen, die einen bestimmten Arbeitsvorgang ausführen), stehen durch die Simulation zur Verfügung. Zusätzliche Angaben, wie Lohn-, Gemein- und Investitionskosten müssen individuell, aber nur einmal für ein Arbeitssystem eingegeben werden.

## Sicherheitsbewertung mittels erweiterter Simulation

Die Sicherheit stellt eine besondere Herausforderung für MRK dar (siehe Kapitel 7 „Sicherheit in kollaborativen Montagesystemen“). Um die Sicherheitsanforderungen zu berücksichtigen, wurde die ema-Software um eine Sensorbibliothek, die Ermittlung verschiedener Betriebsarten sowie die Bewertung von Risikobereichen erweitert. Das Simulationsergebnis enthält

MENSCH	ROBOTER
<ul style="list-style-type: none"> <li>Berechnung und Visualisierung der auftretenden Kräfte, die bei einer Kollision am betroffenen Körperteil wirksam werden</li> <li>Bewertung auftretender Kollisionen mit Roboter (nach ISO/TS 15066)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visualisierung von Bewegungs- und Sicherheitsräumen in 2-D und 3-D (geschwindigkeits- und nachlaufzeitabhängig gemäß ISO/TS 15066)</li> <li>Visualisierung und Bewertung von Risikobereichen (nach DIN EN 349)</li> <li>Auswertung von Quetsch- und Scherstellen nach DIN EN 349, Berechnung der empfohlenen maximalen Geschwindigkeit nach DIN ISO/TS 15066</li> <li>Darstellung von Geschwindigkeitsverläufen, Sensoraktivitäten und Arbeitshöhen in Diagrammen</li> </ul>

Tabelle: Sicherheitsrelevante Informationen des MRK-Berichts des ema-Prototyps

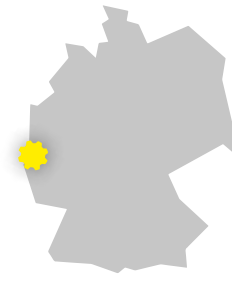
dadurch einen MRK-Bericht, der für Roboter und Mensch u.a. die in der Tabelle dargestellten sicherheitsrelevanten Zusatzinformationen liefert.

## Organisation: Komplexität, Auslastung und Abläufe berücksichtigen

Die Veränderung der Organisation ist eine nicht zu vernachlässigende Größe, um die Eignung eines MRK-Szenarios zu bewerten (siehe auch Kapitel 4 „Konzeption und Gestaltung kollaborativer Montagesysteme“). Diese Kategorie beschreibt in erster Linie, wie die Arbeit zwischen Mensch und Roboter gestaltet und aufgeteilt ist. Organisatorische Aspekte beinhalten das Layout, die Arbeitsauslastung von Mitarbeiter und Roboter sowie den Materialfluss einschließlich der Materialversorgung der Arbeitsplätze. Das neue Layout sollte beispielsweise keine langen Laufwege für die Mitarbeiterin oder den Mitarbeiter verursachen, Mensch und Roboter sollten optimal ausgelastet sein und die Anforderungen an die Materialbereitstellung sollten nicht erhöht werden. Die KoMPI-Methode bewertet diese Aspekte. Wegstrecken oder Auslastungen von Roboter und Mensch lassen sich direkt aus der Simulation übernehmen.

Die Wirksamkeit dieser arbeitswissenschaftlichen Bewertung konnte im KoMPI-Projekt anhand einiger Praxisbeispiele demonstriert werden (siehe Beitrag „MRK in Montagelinien von KMU“ in Kapitel 8). Beim Projektpartner Karl Dungs GmbH & Co. KG bildete die Wirtschaftlichkeit die größte Herausforderung. Mit der Umsetzung der MRK-Lösung konnte eine Verteilung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter erreicht werden, die zur optimalen Mitarbeiterauslastung führte. Die arbeitswissenschaftliche Bewertung dieser MRK-Lösung bestätigte die wirtschaftliche Verbesserung mit einer kurzen Amortisationszeit für die Investition. Ähnlich stellte sich die Situation beim Projektpartner Albrecht JUNG GmbH & Co. KG dar. Hier ließ sich die Wirtschaftlichkeit durch eine Verkürzung der Taktzeit nachweisen. Diese Verkürzung war durch die Parallelisierung der Arbeitsinhalte mithilfe der MRK-Lösung möglich.

Zudem liefert die arbeitswissenschaftliche Bewertung für beide Praxisbeispiele gleiche bzw. bessere Ergebnisse hinsichtlich Sicherheit, Ergonomie und Organisation.



Projekt freeMoVe

# WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG DER FREI VERKETTETEN MONTAGE

Amon Göppert (RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL)

**Ab wann rentiert sich eine Investition in ein frei verkettetes Montagesystem? Eine auf einer erweiterten Kapitalwertmethode basierende Methode gibt Antworten.**

Neben den technischen Herausforderungen bei der Umsetzung wandlungsfähiger und insbesondere frei verketteter Montagesysteme ist auch die Frage nach dem wirtschaftlichen Mehrwert zu betrachten. Im Vergleich zu konventionellen Montagesystemen ist eine freie Verkettung, also eine flexible Montageabfolge, mit einer höheren Erstinvestition verbunden.

## Szenarios definieren und deren Wirtschaftlichkeit ermitteln

Im Projekt freeMoVe diente die um einen szenariobasierten Ansatz erweiterte Kapitalwertmethode dazu, die Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Die Kapitalwertmethode betrachtet die Differenz aller abgezinsten Ein- und Auszahlungen eines Investitionsprojekts, um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit abzuleiten. Die Szenarien beziehen definierte Ereignisse, wie z.B. Produkt-, Technologiewechsel oder Skalierungen (Änderungen des Produktionsvolumens), in die Betrachtungen ein.

Die Szenarien lassen sich anhand von Prognosen und Erfahrungen ableiten. In einem nächsten Schritt werden diesen Szenarien entsprechende Zeiträume zugewiesen. Nun kann die wirtschaftliche Bewertung erfolgen: Über einen bestimmten Zeitraum werden die Ein- und Auszahlungen betrachtet, die für das jeweilige Investitionsprojekt - ein konventionelles (z.B. Anlagentyp AP) oder ein frei verkettetes Montagesystem (z.B. Anlagentyp FVP) - für das zugrunde gelegte Szenario anfallen.

Die Festlegung der Höhe der Einzahlungen (Kosten) und Auszahlungen (Umsatz) erfolgt auf Basis von Simulationen, Erfahrungen und Expertenwissen.

## Fallbeispiel: Freie Verkettung im Prototypenbau von Fahrwerkkomponenten

Der Prototypenbau beim freeMoVe-Projektpartner ZF Friedrichshafen AG ist durch geringe Losgrößen und eine hohe Variantenvielfalt gekennzeichnet. Daraus resultieren viele Produktwechsel und eine geringe Maschinenauslastung. Die Tabelle zeigt die Annahmen, die die Projektpartner für die Wirtschaftlichkeitsbewertung des frei verketteten Prototypenbaus (FVP) im Verhältnis zum aktuellen Prototypenbau (AP) getroffen haben.

Folgende weitere Annahme ist in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eingeflossen:

Ein großer Technologiewechsel bezieht sich auf die Einführung einer Station mit einer neuen Kerntechnologie - diese ist 1.000 Prozent teurer als ein kleiner Technologiewechsel.

Auf Basis dieser Annahmen wurden unterschiedliche Szenarien abgeleitet. In einem davon beginnt der Auftragseingang mit einer Größenordnung, die dem aktuellen Stand entspricht. Dieser Bestand wird in zwei Stufen, nach fünf und nach 13 Jahren, erhöht. Der Auftragseingang nach fünf Jahren entspricht ca. 260 Prozent der ursprünglichen Auftragseingänge, während die zweite Stufe - nach 13 Jahren - einem Niveau von ca. 350 Prozent der ursprünglichen Auftragseingänge entspricht. In Bild 1 sind der Kostenvergleich über 20 Jahre sowie die Auftragseingänge dargestellt.



ANNAHMEN	VERHÄLTNIS FVP/AP	ERKLÄRUNG
PRODUKTIONSLEISTUNG	1,33	Die Produktionsleistung des FVP ist um 33 Prozent höher als die des AP
INITIALE INVESTITIONSHÖHE	1,50	Die Kosten für den FVP sind um 50 Prozent höher als die für den AP
KOSTEN BEI PRODUKTWECHSEL	0,66	Die Kosten bei einem Produktwechsel betragen beim FVP nur 66 Prozent der Kosten, die dafür beim AP anfallen.
KOSTEN BEI SKALIERUNG	0,10	Die Kosten bei einer Skalierung beim FVP betragen nur 10 Prozent der Kosten, die dafür beim AP anfallen.
ERHÖHUNG DES PRODUKTIONS-VOLUMENS DURCH SKALIERUNG	1,25	Die Kosten bei einer Erhöhung des Produktionsvolumens beim FVP sind um 25 Prozent höher als beim AP
DEFINIERT EREIGNISSE		
KLEINER TECHNOLOGIEWECHSEL	0,66	Die Kosten des kleinen Technologiewechsels (z.B. Ausrüstung mit neuen Aktuatoren) entsprechen im FVP 66 Prozent der Kosten im AP
GROSSER TECHNOLOGIEWECHSEL	0,66	
EQUIPMENT-TRANSFER AN ANDERE STANDORTE	0,15	Die Kosten eines Equipment-Transfers an andere Standorte betragen beim FVP nur 15 Prozent der Kosten beim AP

Tabelle: Vergleich der Annahmen zwischen dem aktuellen (AP) und dem frei verketteten Prototypenbau (FVP)

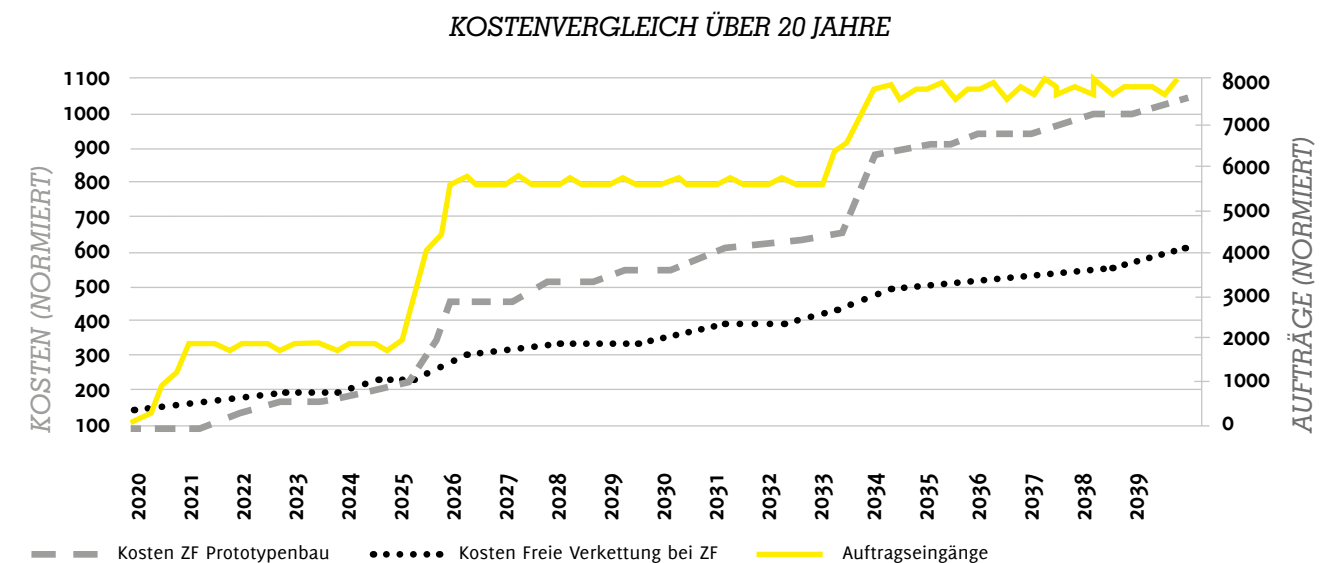


Bild 1: Entwicklung der Kosten für den aktuellen und einen frei verketteten Prototypenbau im vorgestellten Produktionsszenario

In der Darstellung ist die Zahl der Auftragseingänge auf anfangs 100 normiert. Die Kosten sind mit Bezug auf die Anfangskosten des aktuellen Prototypenbaus ebenfalls auf 100 normiert. Die Linien, die die Kosten des frei verketteten und des aktuellen Prototypenbaus darstellen, schneiden sich im zweiten Quartal des Jahres 2025 - ab diesem Zeitpunkt ist die freie Verkettung die wirtschaftlichere Variante für das zugrunde gelegte Szenario.

## Bei Investitionen ist Weitsicht gefragt

Die Ergebnisse dieses und anderer im Projekt untersuchter Fallbeispiele zeigten, dass sich die freie Verkettung in bestimmten

Szenarien als wirtschaftlichere Alternative erweist, z.B. wenn ein Skalieren des Montagesystems notwendig ist. Allerdings müssen in Bezug auf die Amortisationszeiten im Vergleich zu Investitionen in konventionelle Anlagen Abstriche gemacht werden. Während bei konventionellen Montagesystemen eine Amortisierung nach ca. zwei Jahren angestrebt wird, liegen diese Zeiten bei frei verketteten Systemen im Bereich von fünf bis sechs Jahren. Mit Blick auf immer kürzer werdende Produktlebenszyklen und die damit einhergehende steigende Anzahl an Produktgenerationen, die auf einer Anlage hergestellt werden müssen, sollte der entsprechende Mehrwert der freien Verkettung - flexible und agile Produktion - ebenfalls berücksichtigt werden.



# PROJEKT STECKBRIEFE

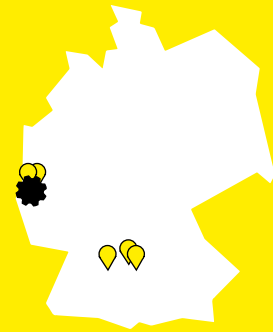
- 228** Systemische Arbeitsforschung für die Industrie der Zukunft  
(ARIZ)
- 230** Montage – frei vernetzt  
(freeMoVe)
- 232** Produkt- und Betriebsdaten in Planungssysteme integrieren  
(KoKoMo)
- 234** Mensch und Roboter in der Montage: Auf die Planung kommt es an!  
(KoMPI)
- 236** Mensch und Roboter Hand in Hand  
(KUKoMo)
- 238** Mikromontage – groß in Wandlungsfähigkeit  
(MIKROKOMO)
- 240** Smarte Planung von Montageanlagen  
(ProMoA)
- 242** Neue Arbeitsorganisation in der Montage – Helfer gehen zur Hand  
(ROKOKO)
- 244** Sicher und akzeptiert  
(SafeMate)



# 1 ARIZ



STECKBRIEFE



## FAKTEN

### PROJEKT

Arbeit in der Industrie der Zukunft (ARIZ)

### KOORDINATOR

RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau

### PARTNER

- ◆ **RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau (IMA) und Human-Computer Interaction Center (HCIC), Aachen**  
Gestaltung kooperativer Arbeitssysteme von Mensch und Technik in der Industrie 4.0
- ◆ **Institut für Unternehmenskybernetik e.V. (IfU e.V.), Aachen**  
Integration des Demonstrators basierend auf einem robotischen System
- ◆ **Festo AG & Co. KG, Esslingen**  
Entwicklung eines Vordemonstrators für die Montage
- ◆ **Festo Didactic SE, Denkendorf**  
Lernen und Kompetenzentwicklung für die Mensch-Roboter-Kollaboration
- ◆ **robomotion GmbH, Leinfelden-Echterdingen**  
Implementierung des Vordemonstrators

## SYSTEMISCHE ARBEITSFORSCHUNG FÜR DIE INDUSTRIE DER ZUKUNFT

Industrie 4.0 schafft die Rahmenbedingungen für eine intelligente Vernetzung in Produktion, Dienstleistung und Arbeitswelt. In den hieraus entstehenden smarten Arbeitsumgebungen werden Menschen, heterogene Roboter und virtuelle Agenten als eigenständige Entitäten verstanden. Diese können durch Künstliche Intelligenz lernen und ihre Umgebung erfassen. Sie sind durch intelligente Informations- und Kommunikationstechnologien vernetzt und arbeiten dadurch eng verzahnt miteinander. Sie agieren gemeinsam als Teile eines hybriden, lernenden Agentensystems. Für die Arbeit der Zukunft bedeutet dies, dass die traditionelle Steuerung und die statische Vorgabe von Zielen entfallen. Es müssen neue Kooperations- und Entscheidungsbeziehungen für das Zusammenarbeiten in einem hybriden System von Mensch, Roboter und virtuellen Agenten entwickelt werden, damit im laufenden Prozess Entscheidungen bewertet und getroffen werden können.

Ziel des Forschungsvorhabens ARIZ war die Analyse der Kooperationsbeziehung zwischen Mensch und Technik und deren Auswirkung auf die Arbeitswelt. Das Projekt trug der Heterogenität des aktuellen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wandels Rechnung, indem es die Implikationen für den Faktor Arbeit in Industrie und Gesellschaft der Zukunft untersuchte. Projektziel war es, einen Demonstrator zu entwickeln, der die Kommunikation und Kooperation hybrider Systeme im Kontext der Arbeit in der Industrie der Zukunft veranschaulicht.

Mithilfe des Demonstrators konnten Wege der Kommunikation, des Lernens und der Entscheidungsfindung von Arbeit in Industrie-4.0-Kontexten visualisiert und nachvollzogen werden. Anhand der Demonstration kooperativer Handlungen konnten Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft abgeleitet werden. In einer stufenweisen Entwicklung wurden die hybriden Agentensysteme realisiert und dadurch interdisziplinäre Erkenntnisse gewonnen.

Die wissenschaftlichen Einrichtungen haben, gemeinsam mit den Industriepartnern, den Demonstrator und die Anwendungsszenarien der hybriden Multiagentensysteme weiterentwickelt und für neue Felder und Branchen nutzbar gemacht. Der Demonstrator diente dabei als Grundlage für die Umsetzung und Übernahme in die industrielle Anwendung. Die Erkenntnisse zur Arbeitsplatzgestaltung und zur Akzeptanz von und durch hybride Systeme wurden an die relevanten Akteure und Arbeitsgestalter transferiert. Exemplarisch führte Festo Didactic auf dieser Grundlage Umsetzungs- und Adaptionsmaßnahmen durch.

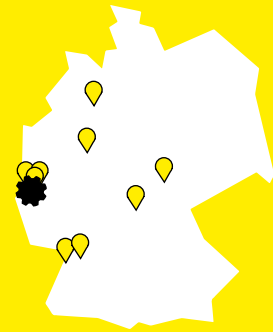


Quelle: Festo AG & Co. KG





# 2 freeMoVe



## FAKTEN

### PROJEKT

Wandlungsfähige Montage in frei vernetzten Montagesystemen (freeMoVe)

### KOORDINATOR

RWTH Aachen University,  
Werkzeugmaschinenlabor WZL

### PARTNER

- ◆ **RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Aachen**  
Planungsmethodik und Gestaltungsrichtlinien
- ◆ **Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen**  
Maschinennahe Steuerung und Informationsbereitstellung
- ◆ **Zimmer GmbH, Rheinau**  
Flexible Greifertechnik
- ◆ **Henkel+Roth GmbH, Ilmenau**  
Erprobung mobiler Roboter
- ◆ **Philips GmbH Innovation Services, Aachen**  
Zellkonzepte und Zellensteuerung
- ◆ **IFSYS Integrated Feeding Systems GmbH, Großbardorf**  
Flexible Zuführtechnik
- ◆ **ISTEC Industrielle Software-Technik GmbH, Ettlingen**  
Übergeordnete Steuerung
- ◆ **Infineon Technologies AG, Warstein**  
Pilotanwendung in der Halbleiterfertigung
- ◆ **ZF Friedrichshafen AG – Geschäftsfeld Fahrwerkskomponenten, Dielingen**  
Pilotanwendung in der Montage von Fahrwerkskomponenten

## MONTAGE – FREI VERKETTET

Die Montage ist der letzte Schritt in der Fertigungskette und damit besonders stark von schwankender Auftragslage und hoher Produktvarianz betroffen. Um dies aufzufangen, nehmen Betriebe des Öfteren aufwendige Anpassungen an ihren Montagesystemen vor. Sie verändern, entfernen oder fügen Montagestationen innerhalb der Montagelinie hinzu. Diese Anpassungen sind aufwendig und teuer, da sich die heute im Einsatz befindlichen Montagesysteme überwiegend durch starre Verkettung der Stationen sowie ortsgebundene Transportsysteme auszeichnen. Zudem sind die Kosten dieser Anpassungen meist nicht unerheblich. Auch können sie nur schlecht verursachungsgerecht auf die Montageaufträge umgelegt werden. Es gilt daher, Montagesysteme wandlungsfähig auszulegen, damit die erforderlichen Anpassungen kostenminimal und kostentransparent erfolgen können.

Das Forschungsprojekt freeMoVe entwickelte hierfür das Konzept der frei verketteten Montage, das auf der Möglichkeit eines freien Materialflusses zwischen den Montagestationen basiert. Durch die Aufhebung der zeitlich und örtlich starren Abfolge des Montagevorgangs werden Leerlaufzeiten reduziert und die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert.

Basierend auf dem Erfahrungswissen der Anwender aus der Halbleiter-, Elektro- und der Automobilindustrie wurden Anforderungen erfasst und darauf aufbauend das Konzept der frei verketteten Montage entwickelt und detailliert. Hierzu wurden u.a. die mit der Montage verknüpften Systeme im Unternehmen, die Intralogistik und die Einbindung der Mitarbeiter berücksichtigt. Hauptergebnisse des Vorhabens sind Befähigungstechnologien für die frei verkettete Montage. Neben einer Systemarchitektur mit einem passenden Leitsystem, Algorithmen für die Bestimmung des Materialflusses sowie der Zuordnung von Aufträgen zu Stationen wurden verschiedene Entwicklungen in der Montagetechnik durchgeführt. Ein mobiler Roboter für den Materialtransport und die Handhabung an bestehenden Maschinen, flexible und sichere Greifertechnik sowie Transportstrategien wurden entwickelt. Für die Einbindung der Mitarbeiter und das Informationsmanagement wurde zudem der Einsatz verschiedener Smart Devices für Montagemitarbeiter und Produktionsverantwortliche getestet.

Anhand der Ergebnisse aus den betrieblichen Erprobungen in der Halbleitermodulmontage sowie der Montage von Fahrwerkskomponenten konnte die Umsetzbarkeit des Prinzips der frei vernetzten Montage nachgewiesen werden. Allgemeine Gestaltungshinweise und Richtlinien in Form eines Leitfadens wurden abgeleitet und ermöglichen weiteren interessierten Anwendern den Weg in die frei verkettete Montage.

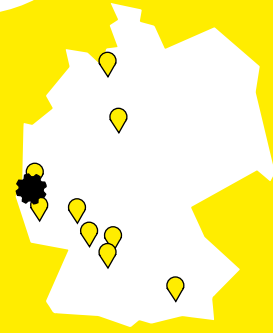
Quelle: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT







# 3 KoKoMo



## FAKTEN

### PROJEKT

Konsolidierung von Lebenszyklusinformationen für die kollaborative Montage variantenreicher Produkte (KoKoMo)

### KOORDINATOR

RWTH Aachen University,  
Werkzeugmaschinenlabor WZL

### PARTNER

- ♦ **RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Aachen**  
Prozess- und Produktdatenmodellierung und technische Ausgestaltung
- ♦ **Universität Bremen, Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (bime), Bremen**  
Virtuelle Absicherung der kollaborativen Montage und Schulungskonzepte
- ♦ **IPRI International Performance Research Institute gGmbH, Stuttgart**  
Bewertung der Einführung und Kompetenzanalyse
- ♦ **machineering GmbH & Co. KG, München**  
Simulationstechnische Abbildung kollaborativer Montage
- ♦ **Heinen Automation GmbH & Co. KG, Schleiden**  
Implementierung des kollaborativen Demonstrators und Integration in das PLM-System
- ♦ **Seeburger AG, Bretten**  
Ausgestaltung eines kollaborationsgerechten PLM-Konzepts
- ♦ **Euchner GmbH & Co. KG, Leinfelden-Echterdingen**  
Kollaborative Montage von Sicherheitssystemen & -schaltern
- ♦ **Lenze Operations GmbH, Aerzen**  
Kollaborative Montage und Spieleinstellung an Kegelradgetrieben
- ♦ **KSB SE & Co. KGaA, Frankenthal (Pfalz)**  
Kollaborative Montage von Abwasserhebeanlagen

## PRODUKT- UND BETRIEBSDATEN IN PLANUNGSSYSTEME INTEGRIEREN

Kollaborative Montagesysteme, bei denen der Facharbeiter mit einem Roboter interagiert, bieten ein großes Optimierungspotenzial bei der Montage variantenreicher Produkte. Der dauerhafte und wirtschaftliche Betrieb solcher Systeme setzt jedoch neue Methoden der Produktionsplanung voraus. Hierzu benötigt der Montageplaner Software-Werkzeuge, um Arbeitsbereiche des Roboters sowie die sich aus dem Ablauf der Montage ergebenden Taktzeiten ableiten zu können. Dies gilt in besonderem Maße für Arbeitsplätze, an denen sowohl Menschen als auch Roboter zum Einsatz kommen können. Besonders die Aufteilung der Arbeitsinhalte für Mensch und Roboter an kollaborativen Montagearbeitsplätzen stellt eine planerische Herausforderung dar. Zudem ist es derzeit nicht möglich, die für eine technische und wirtschaftliche Bewertung bzw. Systemoptimierung erfassten Betriebsdaten in der Planungsphase zu nutzen.

Ziel des Forschungsprojekts KoKoMo war es, Betriebsdaten aus dem Einsatz kollaborativer Montagesysteme sowie Produktdaten der zu fertigenden Produkte in das Planungssystem zurückzuführen und zu integrieren. Unter Nutzung und Bewertung dieser Daten wurden die Einführung und der Betrieb neuer interaktiver Montagearbeitsplätze vereinfacht. Die Möglichkeit zur flexiblen Anpassung von Montageprozessen an neue Produktvarianten war dabei der zentrale Ansatzpunkt. Erreicht wurde diese durch die Übertragung von Prozesswissen über Ähnlichkeiten, z.B. von Bauteilen und Vorgängen, und eine optimale Einbindung der Mensch- und Roboterfähigkeiten.

Bei drei mittelständischen Unternehmen mit einem variantenreichen Produktspektrum, wie z.B. Sicherheitssysteme, Getriebe und Pumpen, wurden kollaborative Montagesysteme durch die Auswahl geeigneter Technologien erprobt. Die Firmen wurden in die Lage versetzt, dauerhaft kollaborative Montagesysteme mit digitalen Planungs- und Bewertungswerkzeugen auch bei wechselnden Produktvarianten wirtschaftlich zu betreiben.

Als Ergebnis entstand ein Instrumentarium, das es insbesondere KMU ermöglicht, mit dem Einsatz kollaborativer Montagesysteme dauerhaft wandlungsfähig zu bleiben und sich binnen kürzester Zeit auf neue Produktvarianten einstellen zu können. Die beteiligten System- und Softwarefirmen überführten und integrierten die entwickelten Methoden zur digitalen Abbildung kollaborativer Montageprozesse in Softwareprodukte bzw. Beratungsangebote. Anwender komplexer mechatronischer Produkte verschiedener Branchen können an den Ergebnissen profitieren.

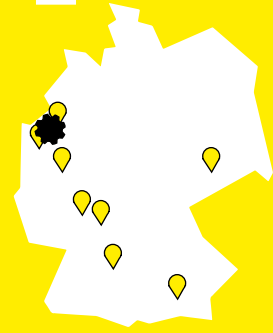
Quelle: Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University – Peter Winandy







# 4 KoMPI



## FAKTEN

### PROJEKT

Verrichtungsbasierte, digitale Planung kollaborativer Montagesysteme und Integration in variable Produktionsszenarien (KoMPI)

### KOORDINATOR

Ruhr-Universität Bochum,  
Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)

### PARTNER

- ◆ **Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS), Bochum**  
Funktionale Integration der Roboter- und Automatisierungskomponenten
- ◆ **imk automotive GmbH, Chemnitz**  
Digitales Planungssystem für Mensch-Roboter-Kollaboration
- ◆ **Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme (IPS), Dortmund**  
Planungssystematik unter arbeitswissenschaftlichen Gesichtspunkten
- ◆ **ISRA Vision AG, Darmstadt**  
Optische Sensorik
- ◆ **Boll Automation GmbH, Kleinwallstadt**  
Technische Integration der Roboter- und Automatisierungskomponenten
- ◆ **cognitas. Gesellschaft für Technik-Dokumentation mbH, Ottobrunn**  
Schulungs- und Trainingskonzepte
- ◆ **Albrecht JUNG GmbH & Co. KG, Lünen**  
Pilotanwendung bei der Montage von Schaltersystemen
- ◆ **Leopold Kostal GmbH & Co. KG, Lüdenscheid**  
Pilotanwendung bei der Montage mechatronischer Produkte
- ◆ **Karl Dungs GmbH & Co. KG, Urbach**  
Pilotanwendung bei der Montage von Regelungstechnik

## MENSCH UND ROBOTER IN DER MONTAGE: AUF DIE PLANUNG KOMMT ES AN!

Die Planung eines manuellen Montagearbeitsplatzes in Bezug auf Arbeitsinhalt und Arbeitszeit ist eine komplexe Aufgabe. Aufgrund der Vielfalt der dabei zu berücksichtigenden Daten geschah dies meistens mit dafür speziell entwickelter Software zur Modellierung, Simulation und Optimierung der Arbeitstakte der manuellen Montageprozesse. Erwog ein Unternehmen den Einsatz von Arbeitsplatzsystemen, an denen Menschen und Roboter miteinander kollaborieren, gab es bislang noch keine digitalen Planungswerkzeuge, die den Einsatz des Systems im Hinblick auf Automatisierbarkeit, technisch-wirtschaftliche Eignung, Ergonomie und Sicherheit simulieren und bewerten konnten. Dies war nicht nur für KMU eine starke Hemmschwelle für den Einsatz von kostengünstigen Robotern in Montagesystemen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts KoMPI wurde deshalb eine neue Methode zur integrierten Planung und Realisierung von kollaborativen Arbeitsplatzsystemen in der Montage bei variablen Produktszenarien entwickelt. Hierdurch wird sichergestellt, dass auch Unternehmen mit geringer Erfahrung und begrenzten Ressourcen befähigt werden, kollaborative Arbeitssysteme mit Erfolg einzuführen und auch bei stark schwankender Produkt- und Variantenvielfalt dauerhaft wirtschaftlich zu betreiben.

Die neue Methode unterstützt insbesondere die Arbeitsplaner im Planungs- und Gestaltungsprozess. Eine Auswahlmethodik identifiziert zunächst die Arbeitsplätze mit Potenzial für Kollaboration im Rahmen des im Projekt entwickelten Quick-Checks. Die digitale Gestaltung und Bewertung des kollaborativen Arbeitsplatzsystems wird mit einer allgemeingültigen Planungsmethode modelliert. Diese Planung wird gemäß den speziellen Montageaufgaben durchgeführt und durch Roboter- und Komponentenbibliotheken unterstützt. Die technische Integration des Roboters und seiner Komponenten kann damit simuliert werden. Ein Schulungs- und Trainingskonzept für die Mitarbeiter unterstützt die Einführung und Akzeptanz der Lösungen. In der laufenden Produktion können die Montagefachkräfte durch geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen jederzeit das System optimieren.

Durch die Piloterfahrungen bei den drei Anwenderfirmen in den Bereichen Automobilindustrie, Fördertechnik und Schaltersysteme mit ihren typischen variantenreichen Produktspektren wurden die Ergebnisse validiert und erfolgreiche Referenzprojekte geschaffen, die weitere Unternehmen zur Anwendung der Mensch-Roboter-Kollaboration motivieren. Diese Anwendungsszenarien decken unterschiedliche Industriezweige und Unternehmensgrößen ab, sodass eine Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse sichergestellt ist.

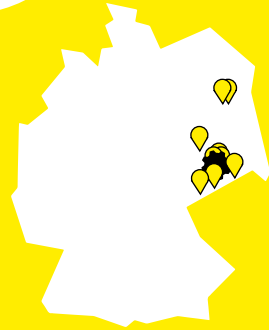
Quelle: Albrecht JUNG GmbH & Co. KG







# 5 KUKoMo



## FAKTEN

### PROJEKT

Neue Konzepte zur Umsetzung von kollaborativen Montagesystemen für kleine und schwankende Produktionsstückzahlen sowie deren erfolgreiche Einführung in KMU (KUKoMo)

### KOORDINATOR

ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.

### PARTNER

- ♦ **ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V., Chemnitz**  
Gesamtkoordinierung; Ergonomie; Schulungs- und Anwenderzentrum
- ♦ **Technische Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabrik-systeme, Chemnitz**  
Montageplanung; System-Layout
- ♦ **Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, Leipzig**  
Wirtschaftlichkeits- und Qualifizierungskonzept
- ♦ **IGF Chemnitz mbH, Chemnitz**  
Programmierung; Gestensteuerung
- ♦ **iris-GmbH infrared & intelligent sensors, Berlin**  
Sensorik, Arbeitsraumabschirmung
- ♦ **HFC Human-Factors-Consult GmbH, Berlin**  
Mensch-Technik-Interaktion
- ♦ **WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH, Olbernhau**  
MRK-Pilot-Anwendungsfall Gerätebau
- ♦ **Turck Beierfeld GmbH, Grünhain-Beierfeld**  
MRK-Pilot-Anwendungsfall Elektronikfertigung; Sicherheitstechnik
- ♦ **Neustädter Gardinenkonfektion GmbH, Neustadt**  
MRK-Pilot-Anwendungsfall Textilindustrie
- ♦ **SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz**  
MRK-Pilot-Anwendungsfall Automobilzulieferer elektronischer Komponenten
- ♦ **HTM Härtetechnik und Metallbearbeitung GmbH, Chemnitz**  
MRK-Pilot-Anwendungsfall Wärmebehandlung

## MENSCH UND ROBOTER HAND IN HAND

Produkte werden immer individueller. Es wird nicht mehr auf Vorrat produziert, sondern nach konkretem Bedarf und bei kurzen Lieferzeiten. Die Automatisierung der Montage ist daher ein wesentlicher Erfolgsfaktor, um wirtschaftlich fertigen zu können. Montageautomatisierungslösungen sind in produzierenden KMU mit kleinen Losgrößen und variantenreichem Produktionsumfang derzeit kaum vorhanden. Mensch-Roboter-Kollaborationsarbeitsplätze (MRK-Arbeitsplätze) können aber eine Möglichkeit darstellen, um gerade monotone und körperlich belastende Arbeitsabläufe effizient und kostengünstig zu gestalten. Die hohen Kosten bei der Einführung derartiger Lösungen, die Komplexität bei der Inbetriebnahme von MRK-Systemen durch hohe Sicherheitsanforderungen und die umfangreichen Anlern- und Schulungsphasen sind die derzeitigen Einführungsbarrieren.

Ziel des Forschungsprojekts war es, KMU-gerechte MRK-Montagearbeitsplätze auf Basis der am Markt vorhandenen Leichtbauroboter zu entwickeln und beispielgebende Anwendungen für komplexe Montageaufgaben bei schwankenden Produktionsmengen und hoher Produktvarianz zu demonstrieren. Diese Systeme mussten so gestaltet werden, dass sie leicht zu integrieren sind, eine einfache und intuitive Bedienung unter Gewährleistung relevanter Sicherheits- und Ergonomieaspekte ermöglichen und auch bei kleinen Losgrößen wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Um branchenübergreifende Lösungen zu entwickeln, wurden im Forschungsprojekt verschiedene Anwendungen analysiert, die in den Bereichen Automotive, Gerätebau, Textilindustrie, Elektronikfertigung und Wärmebehandlung typische Montagearbeitsplätze darstellten. Anhand technologischer, technischer Anforderungen und nach wirtschaftlichen Kriterien erfolgten die Auswahl geeigneter Leichtbauroboter und die Klassifizierung der Montagearbeitsplätze. Die spezifischen Bedingungen von mehreren identifizierten Anwendungsszenarien erforderten eine differenzierte Entwicklung und Anpassung der Roboterprogrammierung, der Sensorik und der Werkzeuge sowie die Konzipierung der Zuführsysteme. Einen wesentlichen Schritt stellten dabei die Integration der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der neue Ansatz einer dynamischen Programmierung über Gestensteuerung dar. Unter Einbeziehung von Anforderungen an die Arbeitssicherheit und an die Arbeitsplatzergonomie wurden die Anwendungsbeispiele konzipiert, erprobt und validiert. Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus den Beispiellösungen flossen in ein Schulungs- und Qualifizierungskonzept ein.

Das Schulungs- und Anwenderzentrum wurde als Anlaufstelle für MRK-Anwendungen eingerichtet. Mit den Erkenntnissen und Erfahrungen, den pilothaften Umsetzungsprojekten, dem Schulungszentrum und einem durchdachten Qualifizierungskonzept werden den Unternehmen, insbesondere den KMU, einfache und flexible Lösungen für die Montage komplexer, variantenreicher Güter bis zur Kleinserie an die Hand gegeben.

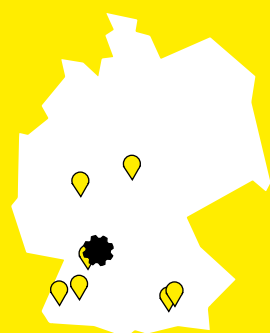
Quelle: ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.







# 6 MIKROKOMO



## FAKTEN

### PROJEKT

Methodische Werkzeuge zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Mikromontageanlagen bei Entwicklung, Konfiguration und Monitoring (MIKROKOMO)

### KOORDINATOR

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Institut für Mikroaufbautechnik

### PARTNER

- ◆ **Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Institut für Mikroaufbautechnik, Stuttgart**  
Methoden- und Prozessentwicklung, Erprobung in der TransferFab
- ◆ **Häcker Automation GmbH, Waltershausen**  
Anlagenplattform mit offengelegter Architektur und Schnittstellen
- ◆ **Actiworks Product Solutions GmbH, München**  
Softwaretechnische Umsetzung als internetbasierte Toolbox
- ◆ **Actiworks Application Solutions GmbH, München**  
Entwicklung der Planungsmethoden
- ◆ **Dr. Prautsch & Partner Ingenieure PPI - Informatik, Sindelfingen**  
Anlagenplanung und Simulation
- ◆ **LEA Medizintechnik GmbH, Gießen**  
Pilotanwendung mit Mikromontageprodukten der Medizintechnik
- ◆ **Schöllly Fiberoptic GmbH, Denzlingen**  
Pilotanwendung mit Mikromontageprodukten der Optik
- ◆ **Hengstler GmbH, Aldingen**  
Pilotanwendung mit Mikromontageprodukten der Sensorik

## MIKROMONTAGE – GROSS IN WANDLUNGSFÄHIGKEIT

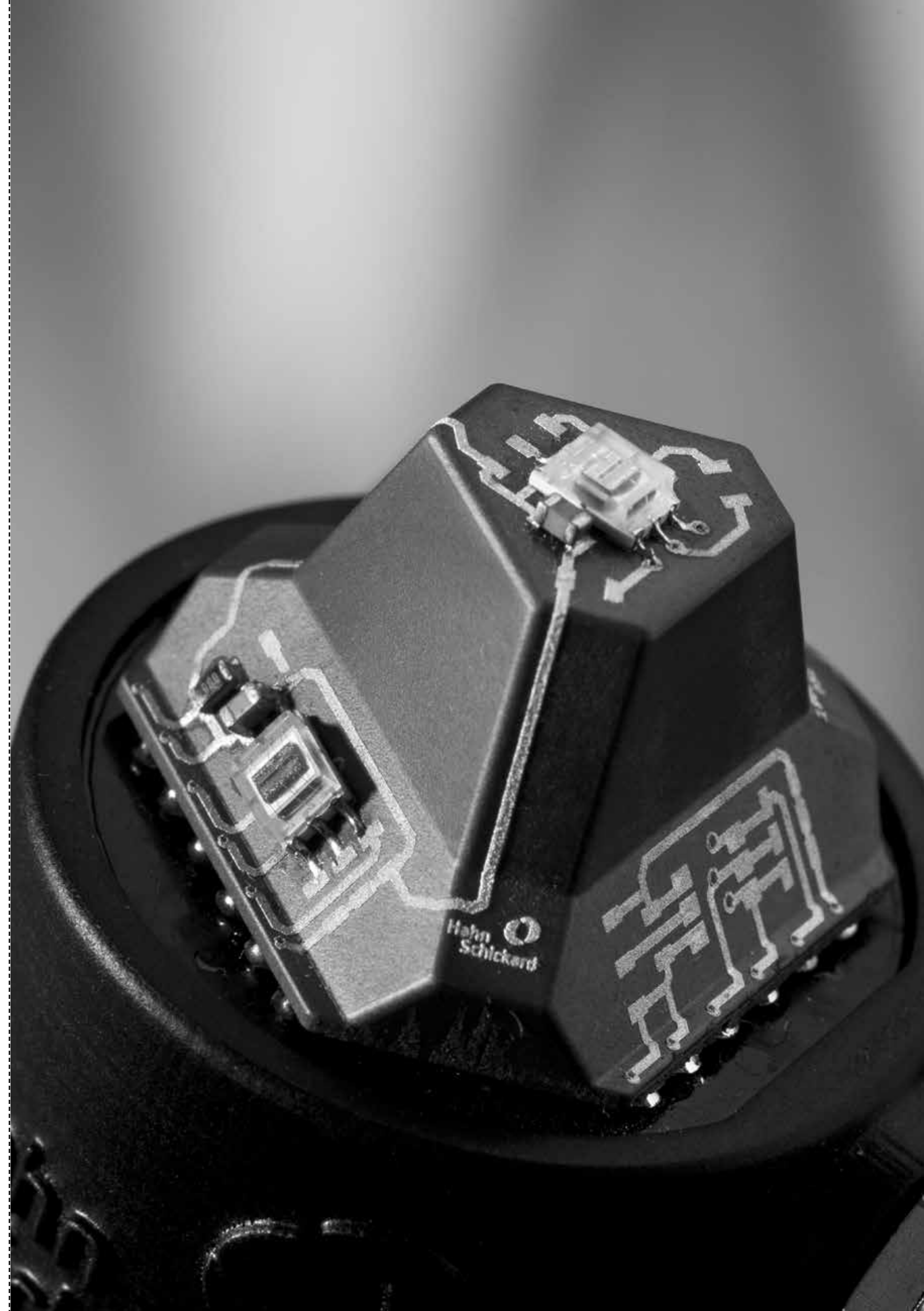
Von Mikromontage spricht man bei der Montage von Bauteilen mit Genauigkeiten im Mikrometer-Bereich. Sensoren, Optiken und andere elektronische oder mechanische Bauteile werden mittels Mikromontage hergestellt. Die Mikromontage ist eine relativ junge Disziplin mit hohem Innovationsdruck und vergleichsweise wenig Standardisierung. Viele Mikromontageaufgaben werden noch manuell oder mit Sondermaschinen gelöst. Inzwischen werden auch erste automatisierte, standardisierte modulare Montageanlagen angeboten. Diese sind jedoch ungefähr um den Faktor 10 teurer als normale Anlagen. Da viele Mikromontageprodukte, wie z.B. Sensoren, einen sehr schnellleibigen Markt bedienen, lassen sich die automatisierten Anlagen in der Regel nicht in der Produktlebenszeit eines einzigen Produkts amortisieren. Dies hat zur Folge, dass die erfolgreiche und schnelle Markteinführung vieler neuer durch Mikromontage herstellbarer Produkte, deren nachgefragte Stückzahlen schwer abschätzbar sind, aufgrund des zu hohen Investitionsrisikos für die automatisierte Fertigung verhindert wird.

Ziel des Forschungsvorhabens MIKROKOMO war die Entwicklung von ineinandergreifenden neuartigen Softwarewerkzeugen für die Entwicklung, Auslegung und den späteren Betrieb von Mikromontageanlagen. Diese Softwarewerkzeuge umfassen u.a. ein Beschreibungssystem für Mikromontageaufgaben, einen Lastenheftgenerator, eine Maschinendatenbank und ein Portal zur Kapazitätsplanung.

Als Grundlage wurde ein durchgängiges Daten- und Prozessmodell für den gesamten Lebenszyklus der Mikromontageanlagen, von der Produkt- und Anlagenplanung bis zum Anlagenbetrieb entwickelt. Die Softwarewerkzeuge zur Planung konnten anschließend anhand von drei konkreten Mikromontageprodukten aus der Medizintechnik, der Sensorik und der Optik durchgängig angewandt und evaluiert werden. Konkret realisiert wurden die Mikromontageprozesse sowohl in der Transfer-Fab bei Hahn-Schickard als auch bei den Anwendern. Dazu wurde eine modulare Mikromontage-Anlagenplattform mit offengelegter Architektur und Schnittstellen genutzt, auf der im Laufe des Projekts die drei exemplarischen Produkte gefertigt wurden. Im Rahmen des Projekts konnte die Plattform gemeinsam mit den Anwendungspartnern um Schnittstellen und Programmbibliotheken erweitert werden. Neben Standardmontagemodulen kamen auch neue, von den Anwendern gestaltete Module für spezifische Montageschritte zum Einsatz.

Die entwickelten Softwarewerkzeuge werden als nicht firmenspezifische, internetbasierte Toolbox von den Projektpartnern vermarktet. Zusammen mit der Transfer-Fab und der Mikromontage-Akademie bei Hahn-Schickard wird dies dazu beitragen, mehr potenzielle Anwender von den Möglichkeiten der automatisierten Mikromontage zu überzeugen.

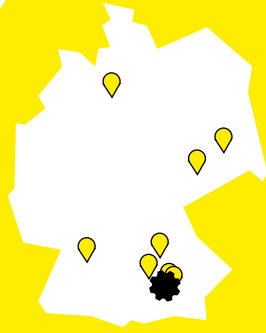
Quelle: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.







# 7 ProMoA



## FAKTEN

### PROJEKT

Produktbasierte automatische modellbasierte Anlagenentwicklung (ProMoA)

### KOORDINATOR

Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften

### PARTNER

- ◆ **Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Garching**  
Planungstool zur produktbasierten, simulationsgestützten Entwicklung von Montageanlagen
- ◆ **XENON Automatisierungstechnik GmbH, Dresden**  
Entwicklung und Erprobung von wandlungsfähigen Anlagenmodulen
- ◆ **Conti Temic microelectronic GmbH, Ingolstadt**  
Erprobung der Methodik in der Montage von variantenreichen Produkten
- ◆ **Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark**  
Erprobung in der Montage mechatronischer Akustikmodule
- ◆ **plavis GmbH, Chemnitz**  
Methodik zur automatischen Layoutplanung
- ◆ **Software Factory, Garching**  
Modellstrukturen, Datenhaltung und modellbasierte Anlagenentwicklung
- ◆ **TWT GmbH Science & Innovation, Stuttgart**  
Nutzeroberfläche; simulationsgestützte Auswahl von Betriebsmitteln
- ◆ **Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, Augsburg**  
Konzeption, Implementierung von Simulationsmodulen in ein Framework

## SMARTE PLANUNG VON MONTAGEANLAGEN

Flexibilität, Produktivität und Variantenvielfalt sind Herausforderungen für die Produktionstechnik der Zukunft. Unternehmen müssen auf Nachfrageschwankungen und die Einführung neuer Produktvarianten flexibel reagieren. Dafür ist einerseits eine flexible Nutzung bestehender Maschinen und Montageanlagen und andererseits eine vereinfachte Planung neuer Anlagen entscheidend.

Dabei sollen bereits während der Entwicklung neuer Produkte fundierte Aussagen über die Eignung bestehender bzw. der Entwurf neuer Anlagen für die Produktion möglich sein. Aktuell ist dies nur schwer möglich und mit hohen manuellen Aufwänden verbunden. Eine weitere Herausforderung bei der Planung ist die Kommunikation zwischen dem Hersteller und dem Käufer der Anlage.

Ziel des Verbundprojekts ProMoA war daher die Entwicklung neuer Methoden und IT-Werkzeuge für eine automatische, produktbasierte Planung neuer Anlagen. Gleichzeitig sollten eine simulationsgestützte Prüfung der Eignung und die Umplanung von Altanlagen möglich sein.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Softwareportal zum Datenaustausch ist sowohl für den Anlagenkunden als auch den Anlagenhersteller nutzbar. Auf Basis einer digitalen Produktbeschreibung sowie, in einer Datenbank zur Verfügung gestellten, Prozessbausteinen werden die Anforderungen an die zukünftige Anlage und ihre Prozesse definiert. Durch eine automatisierte Analyse von 3D-CAD-Daten des Produkts erhält der Nutzer dabei Hinweise zu möglichen Montagereihenfolgen. Die so entstandene Spezifikation bildet die Grundlage für das weitere Planungsvorgehen.

Zunächst werden geeignete Betriebsmittel für die durchzuführenden Prozesse ausgewählt. Dabei wird der Planer durch eine automatisierte Bewertung der in Frage kommenden Ressourcen unterstützt. Dies geschieht anhand quantitativer Eigenschaften sowie durch passende Simulationsmodule. Auf Basis der ermittelten, für die einzelnen Prozessschritte geeigneten, Ressourcen wird dann ein optimiertes Layout der Anlage entworfen. Auch hierbei wird der Planer durch Softwaretools unterstützt.

Ergebnis des Planungsvorgangs ist ein Anlagenentwurf incl. relevanter Kennzahlen, wie Taktzeiten oder Flächenbedarf, Angaben zum Produktionsprozess und einer 3D-Visualisierung die Produktionsanlage.

Das neue Planungssystem soll die Montageunternehmen befähigen, den Automatisierungsgrad bei der Anlagenplanung zu erhöhen, die Planungsprozesse zu beschleunigen und gleichzeitig die Planungsaufwände zu minimieren. Die Unternehmen erwarten eine Verkürzung der Produktentwicklungsprozesse von bis zu 10 v. H. und eine Reduzierung der Planungskosten von ca. 30 v. H.

Quelle: XENON Automatisierungstechnik GmbH

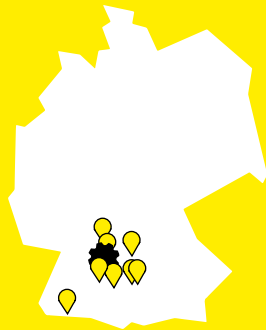




# 8 ROKOKO



STECKBRIEFE



## FAKTEN

### PROJEKT

Mensch-Roboter-Kollaborationen in der Montage kooperativ und ganzheitlich gestalten (ROKOKO)

### KOORDINATOR

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO

### PARTNER

- ◆ **Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO, Stuttgart**  
Arbeitsorganisation, Qualifizierung und Wirtschaftlichkeit
- ◆ **Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik, IGCV, Augsburg**  
Programmierung und Steuerung von Robotersystemen
- ◆ **Schnaithmann Maschinenbau GmbH, Remshalden**  
Systemintegration
- ◆ **HandlingTech Automations-Systeme GmbH, Steinenbronn**  
Komponenten für Robotersysteme
- ◆ **MRK-Systeme GmbH, Augsburg**  
Kollaborative Montagesysteme
- ◆ **Metabowerke GmbH, Nürtingen**  
Erprobung in der Elektrowerkzeugmontage
- ◆ **SCHUNK GmbH & Co.KG, Lauffen/Neckar**  
Sichere Greifersysteme und Erprobung in der Greifermontage
- ◆ **ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen**  
Erprobung in der Getriebemontage

## NEUE ARBEITSORGANISATION IN DER MONTAGE – HELFER GEHEN ZUR HAND

Die direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ohne Schutzzaun gewinnt bei der Montage variantenreicher Produkte immer mehr Bedeutung. Die neuen Automatisierungsmöglichkeiten, die sich mit kleinen, kostengünstigen Leichtbaurobotern ergeben, behalten jedoch das Risiko, dass ihr Einsatz ausschließlich unter technischen Gesichtspunkten erfolgt. Werden arbeitswissenschaftliche Aspekte außer Acht gelassen, kann es leicht passieren, dass das Zusammenspiel von Mensch und Roboter kritisch wird. Ein erfolgreicher Einsatz hängt somit stark davon ab, ob die Mitarbeiter bei der Planung und der Optimierung der Produktion mit einbezogen werden. Nicht nur für KMU ergeben sich daher viele Fragestellungen: Welcher Robotertyp soll wo und wie zum Einsatz kommen? Wie aufwendig sind seine Inbetriebnahme und Programmierung? Wie ist die Applikation zu gestalten, dass sie vom Mitarbeiter akzeptiert, von der Berufsgenossenschaft zertifiziert wird und auch noch wirtschaftlich ist?

Zielsetzung des Forschungsprojekts ROKOKO war die Entwicklung und Erprobung von Methoden und Werkzeugen zum sicheren, wirtschaftlichen und akzeptierten Einsatz von Robotern in kollaborativen Montageumgebungen, insbesondere unter arbeitswissenschaftlichen Aspekten. Bei der Montage von Getrieben und Bohrmaschinen wurden geeignete Vorgehensweisen erprobt.

Voraussetzung für den Erfolg beim Aufbau neuer Montagearbeitsplätze ist, dass die Arbeitsorganisation in der Montage neu konzipiert wird. Die dafür notwendigen Qualifizierungsmaßnahmen der Mitarbeiter wurden entwickelt und abschließend die Wirtschaftlichkeit der Montagekonzepte ermittelt. Die Ergebnisse sind in einer Handlungsanleitung aufbereitet. Um die Universalität der Anwendungen zu gewährleisten, wurden neue Robotergreifer entwickelt und bei den Anwendern erprobt. Durch entsprechende Sicherheitskonzepte sind diese betriebstauglich gestaltet. Eine erfolgreiche Zertifizierung der ausgewählten Montageapplikationen durch die Berufsgenossenschaft ist Voraussetzung für den späteren Praxis-einsatz.

Die am Projekt beteiligten Systemintegratoren erweitern ihr Produktportfolio um kollaborierende Montageumgebungen. Insofern liefern die Ergebnisse des Projekts wertvolle Impulse für Mensch-Roboter-Kollaborationen im montierenden Gewerbe Deutschlands. Für Anwender mit komplexen Aufgaben liegt eine praktikable Handlungsanweisung mit Beispielen vor. Herstellerunabhängige Systemintegratoren aus dem IT-Bereich garantieren hierbei mit neuen Produkten den Erfolg.

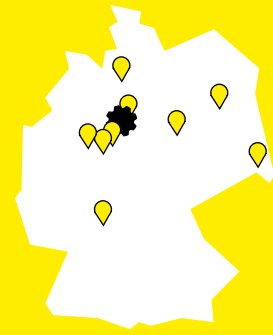
Quelle: © Ludmilla Parsyjak/Fraunhofer IAO







# 9 SafeMate



## FAKTEN

### PROJEKT

Einführung sicherer und akzeptierter Kollaboration von Mensch und Maschine in der Montage (SafeMate)

### KOORDINATOR

Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Fabrikanlagen und Logistik

### PARTNER

- ◆ **Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen & Logistik und Institut für Montagetechnik, Garbsen**  
Gestaltungs- und Qualifizierungskonzepte
- ◆ **ATN Hölzel GmbH, Oppach**  
Schnittstellen zwischen Sensorik und Steuerung
- ◆ **Innotec GmbH, Rosengarten**  
Sicherheitskonzepte für Mensch-Maschine-Kollaboration
- ◆ **LIVINGSOLIDS GmbH, Magdeburg**  
Simulationssoftware für virtuelle Inbetriebnahme
- ◆ **YOUSE GmbH, Berlin**  
Akzeptanzmodelle zur erfolgreichen Implementierung
- ◆ **Lenze Operations GmbH, Aerzen**  
Pilotanwendung in der Montage variantenreicher Getriebemotoren
- ◆ **Lufthansa Sky Chefs Frankfurt ZD GmbH, Frankfurt**  
Pilotanwendung bei der Bestückung von Lebensmitteln
- ◆ **Miele & Cie. KG, Gütersloh**  
Pilotanwendung in der Großserienmontage von Waschmaschinen
- ◆ **Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark**  
Pilotanwendung in der Verpackung von akustischen Baugruppen
- ◆ **Weidmüller Interface GmbH & Co. KG, Detmold**  
Pilotanwendung in der Montage von elektronischen Komponenten

## SICHER UND AKZEPTIERT

In produzierenden Unternehmen bildet die Montage den letzten Schritt der Wertschöpfungskette. Die hohen Kosten- und Zeitanteile der Montage an der gesamten Produktion zwingen die Unternehmen zur Einführung von Automatisierungslösungen und Industrierobotern. Um die Potenziale von Industrierobotern, die a priori eine geringe Flexibilität aufweisen, zu erschließen und gleichzeitig die Fähigkeiten und Erfahrungen der Mitarbeiter zu nutzen, sind sichere und flexible kollaborative Mensch-Roboter-Montagesysteme (MRK) gefragt. Der Einsatz derartiger MRK-Systeme ist gegenwärtig noch mit hohen monetären und personellen Aufwänden verbunden. Weitere Barrieren bestehen in der bisher unzureichenden Einbindung der Mitarbeiter in den Entscheidungs- und Gestaltungsprozess eines kollaborativen Arbeitsplatzes und der damit verbundenen Angst vor Verlust der Eigenverantwortung oder sogar des Arbeitsplatzes.

Ziel des Forschungsprojekts SafeMate war es daher, anhand von fünf beispielhaften Anwendungsszenarien in den Bereichen Antriebstechnik, Elektronik, Konsum- und Nahrungsgüterindustrie einen generischen Leitfaden zu entwickeln. Dieser ermöglicht es, mit einfachen und anwendungsgerechten Methoden und Vorgehensweisen MRK-Arbeitsplätze gemeinsam mit den Mitarbeitern zu gestalten und durch die MRK-Lösungen potenzielle Produktivitätssteigerungen zu erschließen. Damit können Unternehmen selbstständig das eigene Montagesystem hinsichtlich Kollaborationsfähigkeit untersuchen, auswählen und umsetzen.

Zu diesem Zweck wurden im Projekt für fünf Anwendungsfälle technologische, ergonomische und sicherheitstechnische Faktoren sowie Einsatzpotenziale identifiziert. So konnten anforderungsgerechte Lösungskonzepte entwickelt und erprobt werden, wie beispielsweise für eine Montage von Anbauteilen bei der Serienproduktion von Waschautomaten. Die Lösungen dienen der Unterstützung der Mitarbeiter bei belastenden manuellen Tätigkeiten. Sie geben Hinweise zur Sicherheit des interaktiven Miteinanders von Mensch und Roboter sowie zur Gestaltung des flexiblen Arbeitssystems. Um die Ergebnisse branchenübergreifend zur Verfügung zu stellen, wurden diese in einem Leitfaden zusammengeführt.

Mit den Erkenntnissen aus den untersuchten MRK-Lösungen konnte die Flexibilität der Unternehmen im Umgang mit Kundenanforderungen wesentlich gesteigert werden. Intern lassen sich die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter durch die Reduktion von physischen Belastungen gravierend reduzieren. Wichtig für die Akzeptanz ist dabei die sicherheitstechnische Abnahme der umgesetzten MRK-Anwendungsfälle durch entsprechende Stellen. Der Leitfaden wird zukünftig zur Senkung der Eintrittsbarrieren für den Einsatz von MRK-Lösungen beitragen. Zusätzlich wurde ein Lern- und Demonstrationszentrum am Produktionstechnischen Zentrum Hannover (PZH) der Leibniz Universität Hannover gegründet, an dem KMU eigene Ideen praktisch testen und im Umgang mit MRK-Systemen geschult werden.

Quelle: Institut für Montagetechnik der Leibniz Universität Hannover





# WER UND WO?



Dr. **FRANK HEES**  
RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau



**SARAH MÜLLER-ABDELRAZEQ**  
RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau



**TRISTAN LANGER**  
RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau



**MICHAEL VOSS**  
Festo AG & Co. KG

## ARIZ

## freeMoVe



Prof. Dr. **ROBERT H. SCHMITT**  
RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement



**GUIDO HÜTTEMANN**  
RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement



**KERSTIN ROOK-WEILER**  
ZF Friedrichshafen AG



Prof. Dr. **KIRSTEN TRACHT**  
Universität Bremen, Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen



Dr. **WERNER HERFS**  
RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL



**SIMON ROGGENDORF**  
RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL



**KURT HEINEN**  
Heinen Automation GmbH & Co. KG

## KoKoMo

## KoMPI



Prof. Dr. **BERND KUHLKÖTTER**  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)



Dr. **ALFRED HYPKI**  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)



Prof. Dr. **JOCHEN DEUSE**  
Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme (IPS)



**GABRIELE HÖPTNER**  
Karl Dungs GmbH & Co. KG

## KUKoMo



Dr. **SEBASTIAN ORTMANN**  
ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.



Dr. **ULRICH BOBE**  
ICM – Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.



Dr. **ROBIN SCHULZE**  
SITEC Industrietechnologie GmbH

## MIKROKOMO



Prof. Dr. **ANDRÉ ZIMMERMANN**  
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Institut für Mikroaufbautechnik



**CHRISTOPH GIELISCH**  
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Institut für Mikroaufbautechnik



Dr. **MAX KÖRNER**  
Häcker Automation GmbH

## ProMoA



Prof. Dr. **GUNTHER REINHART**  
Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften



**MAGDALENA PAUL**  
Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften



**TOBIAS REISSMANN**  
XENON Automatisierungstechnik GmbH

## ROKOKO



Prof. Dr. **WILHELM BAUER**  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO



**PETER RALLY**  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO



**VOLKER SIEBER**  
Schnaitmann Maschinenbau GmbH

## SafeMate



Prof. Dr. **PETER NYHUIS**  
Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik



Prof. Dr. **ANNIKA RAATZ**  
Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik



**SEBASTIAN BLANKEMEYER**  
Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik



Dr. **AXEL SCHMIDT**  
Sennheiser electronic GmbH & Co. KG

# IMPRESSUM

## ISBN 13:

978-3-948169-06-0

## HERAUSGEBER

Dr. Frank Hees, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau / ARIZ  
 Sarah Müller-Abdelrazeq, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau / ARIZ  
 Tristan Langer, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau / ARIZ  
 Michael Voss, Festo AG / ARIZ

Prof. Dr. Robert H. Schmitt, RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement / freeMoVe  
 Guido Hüttemann, RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement / freeMoVe  
 Kerstin Rook-Weiler, ZF Friedrichshafen AG / freeMoVe

Prof. Dr. Kirsten Tracht, Universität Bremen, Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen / KoKoMo  
 Dr. Werner Herfs, RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen / KoKoMo  
 Simon Roggendorf, RWTH Aachen University, Werkzeugmaschinenlabor WZL, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen / KoKoMo  
 Kurt Heinen, Heinen Automation GmbH & Co KG / KoKoMo

Prof. Dr. Bernd Kuhlenkötter, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme / KoMPI  
 Dr. Alfred Hypki, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme / KoMPI  
 Prof. Dr. Jochen Deuse, Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme / KoMPI  
 Gabriele Höpftner, Karl Dungs GmbH & Co. KG / KoMPI

Dr. Sebastian Ortmann, ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V. / KUKoMo  
 Dr. Ulrich Bobe, ICM - Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V. / KUKoMo  
 Dr. Robin Schulze, SITEC Industrietechnologie GmbH / KUKoMo

Prof. Dr. André Zimmermann, Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. / MIKROKOMO  
 Christoph Gielisch, Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. / MIKROKOMO  
 Dr. Max Körner, Häcker Automation GmbH / MIKROKOMO

Prof. Dr. Gunther Reinhart, TU München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) / ProMoA  
 Magdalena Paul, TU München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) / ProMoA  
 Tobias Reissmann, XENON Automatisierungstechnik GmbH / ProMoA

Prof. Dr. Wilhelm Bauer, Fraunhofer IAO / ROKOKO  
 Peter Rally, Fraunhofer IAO / ROKOKO  
 Volker Sieber, Schnaitthmann Maschinenbau GmbH / ROKOKO

Prof. Dr. Peter Nyhuis, Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik / SafeMate  
 Prof. Dr. Annika Raatz, Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik / SafeMate  
 Sebastian Blankemeyer, Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik / SafeMate  
 Dr. Axel Schmidt, Sennheiser electronic GmbH & Co. KG / SafeMate

## REDAKTION

Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau  
 RWTH Aachen University  
 Technologiezentrum am Europaplatz  
 Dennewartstraße 27  
 52068 Aachen

Tel.: 0241/80-91100  
 contact@ima-ifu.rwth-aachen.de  
 www.cybernetics-lab.de

## FÖRDERHINWEIS

Der Projektatlas Kompetenz Montage beinhaltet die Forschungsergebnisse der Verbundprojekte ARIZ 02L14Z00x, freeMoVe 02P15A14x, KoKoMo 02P15A04x, KUKoMo 02P15A02x, KoMPI 02P15A06x, MIKROKOMO 02P15A120, ProMoA 02P15A10x, ROKOKO 02P15A000 und SafeMate 02P15A080. Diese Forschungs- und Entwicklungsprojekte wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Sofern nicht durch die Nennung sowohl der weiblichen als auch der männlichen Form gekennzeichnet, werden Frauen und Männer gleichermaßen angesprochen.

Der Projektatlas gibt eine verdichtete Übersicht der Ergebnisse. Weitere und ergänzende Publikationen, die im Themenfeld „Kompetenz Montage - kollaborativ und wandlungsfähig“ entstanden sind, finden Sie hier:



## KONZEPT UND GESTALTUNG

wesentlich.com  
 Bachstraße 68, 52066 Aachen

## SCHRIFTEN

Delicious  
 Geometric Slabserif 703 BT  
 Interstate

## VERWENDETES PAPIER

Maxi Offset holzfrei weiß

## DRUCK

Schloemer & Partner GmbH  
 Fritz-Erlar-Straße 40, 52349 Düren

## FOTOS/BILDMATERIAL

Cover: wesentlich.com unter Verwendung einer Illustration von Salvat Steeven (steeven-salvat.com)  
 Innenteil: Material der Projektbeteiligten

August 2019

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fallen insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung bei Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.

## ARIZ

<http://ariz-ac.de/>

## freeMoVe

<http://www.projekt-freemove.de/>

## KoKoMo

<http://www.kokomo-projekt.de/>

## KoMPI

<http://kompi.org/>

## KUKoMo

<http://www.kukomo.de/>

## MIKROKOMO

<http://hahn-schickard.de/projekte-publikationen/projekte/mikrokomo/>

## ProMoA

<http://www.projekt-promoa.de/>

## ROKOKO

<http://s.fhg.de/rokoko>

## SafeMate

<http://www.safe-mate.de/>






# GLOSSAR

<b>Augmented Reality (AR)</b>	ist eine durch IT-Technologien erweiterte Realitätswahrnehmung, z.B. in Form von Datenbrillen, die bestimmte Informationen zu einer Anlage oder einem Bauteil einblenden.
<b>Business Intelligence</b>	ist ein Begriff aus der Wirtschaftsinformatik und bezeichnet Verfahren und Prozesse zur systematischen Analyse des eigenen Unternehmens.
<b>Digitaler Zwilling</b>	ist die digitale Abbildung eines realen Objekts, z.B. eines Bauteils, einer Maschine oder einer Anlage oder deren Komponenten; wird auch digitaler Schatten genannt.
<b>Effektor</b>	ist Teil eines Industrieroboters, der sich am Ende des Roboterarms befindet, beispielsweise in Form eines Greifers oder eines Werkzeugs.
<b>Enterprise Resource Planning (ERP)</b>	beinhaltet die Planung und Steuerung sämtlicher zur Wertschöpfung notwendiger unternehmerischer Ressourcen, wie Personal, Betriebsmittel und Material; erfolgt i.d.R. auf Basis von IT-Systemen.
<b>Ergonomic Assessment Worksheet</b>	ist ein Verfahren, das Arbeitsprozesse in einem frühen Designstadium in Bezug auf ergonomisch relevante Faktoren wie Körperhaltung, Aktionskräfte, Lastenhandhabung und Belastungen der oberen Extremitäten bewertet.
<b>Freie Verkettung</b>	bedeutet den Verzicht auf eine räumliche und zeitlich starre Verkettung der einzelnen Montageressourcen, sodass eine individuelle und flexible Montageabfolge für jeden Auftrag möglich ist.
<b>Greifer</b>	Komponente zur Handhabung diverser Bauteile, kann am Ende eines Roboterarms montiert werden und ist ein Beispiel für einen Effektor.
<b>Industrie 4.0</b>	bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie.
<b>Koexistenz</b>	ist eine Form der Mensch-Roboter-Interaktion, bei der trennende Schutzeinrichtungen entfallen, die Trennung beider Arbeitsräume jedoch bestehen bleibt.

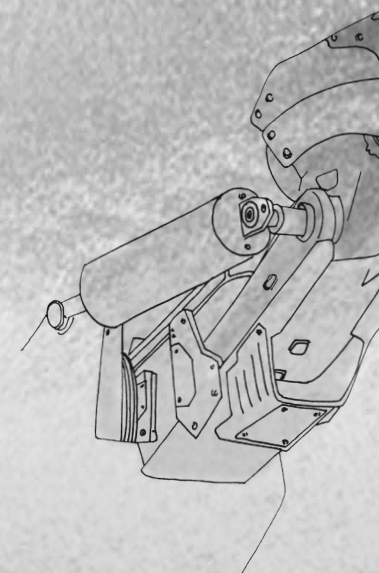
<b>Kollaboration</b>	ist eine Form der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, bei der beide im gemeinsamen Arbeitsraum miteinander interagieren und gleichzeitig am selben Bauteil arbeiten.
<b>Kollaborative Montage(-systeme)</b>	sind Systeme, in denen Mensch und Roboter ohne Schutzzaun zusammenarbeiten, wobei unterschiedliche Ausprägungen der Zusammenarbeit möglich sind (siehe Koexistenz, Kollaboration und Kooperation).
<b>Kooperation</b>	ist eine Form der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, bei der beide im gemeinsamen Arbeitsraum miteinander interagieren, jedoch nicht notwendigerweise am selben Bauteil arbeiten.
<b>Leichtbauroboter</b>	ist ein Industrieroboter, mit dem Menschen ohne trennende Schutzgitter - in kollaborativen Montagesystemen - zusammenarbeiten; wird auch kollaborativer Roboter genannt.
<b>Manufacturing Execution System (MES)</b>	steht für das Prozessleitsystem, das direkt mit der Betriebsebene verbunden ist und sämtliche Fertigungsprozesse steuert.
<b>Maschinenrichtlinie</b>	ist die „Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG“ - sie regelt ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen beim Inverkehrbringen innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums.
<b>Mensch-Maschine-Kommunikation</b>	bezieht sich auf die Interaktion zwischen Mensch und Maschine und schließt die technische Gestaltung der Schnittstelle ein.
<b>Methods-Time Measurement (MTM)</b>	ist ein Verfahren zur Arbeitsablaufanalyse und zur Festlegung von Planzeiten; bedeutet auf Deutsch Arbeitsablauf-Zeitanalyse.
<b>Mikromontage</b>	bezeichnet die Montage von Bauteilen (z.B. Sensoren oder Optiken) mit Genauigkeiten im Mikrometer-Bereich.
<b>Montagevorranggraph</b>	ist eine grafische Darstellung der Montageabfolge und der Beziehung der einzelnen Montageschritte zueinander.



# GLOSSAR

<b>Nutzwertanalyse</b>	ist eine Methode zur Wirtschaftlichkeitsbewertung, die qualitative Faktoren berücksichtigt, diesen einen zahlenmäßigen Wert zuweist und so in die Kosten-Nutzen-Analyse einbezieht.
<b>Parallelisierung</b>	bezieht sich auf das gleichzeitige Ablaufen von Montageprozessen, die ohne den Einsatz eines Leichtbauroboters seriell abgewickelt werden.
<b>Produktlebenszyklusmanagement</b>	steht für einen Ansatz, alle über den Lebenszyklus eines Produkts anfallenden Informationen zur Entwicklung bzw. Planung, zum Gebrauch und ggf. zum Recycling zu nutzen.
<b>Soziotechnische Systeme</b>	sind Systeme, in denen Technik nicht losgelöst vom organisatorisch-sozialen Kontext betrachtet werden kann.
<b>Systemintegration</b>	steht für die Einführung eines kollaborativen Montagesystems in den Fertigungsprozess eines Unternehmens.
<b>Taktzeit</b>	Taktzeit ist die Zeit, in der eine Mengeneinheit das Montagesystem verlässt.
<b>Teilautomatisierung</b>	ist die Verbindung von manuellen und automatisierten Montageabläufen, z.B. in Form kollaborativer Montagesysteme.
<b>Virtual Reality (VR)</b>	bezieht sich darauf, dass man eine durch IT-Technologien erzeugte interaktive virtuelle Umgebung als real wahrnimmt.
<b>Vollautomatisierung</b>	bezeichnet Prozesse, die ohne manuelle Arbeitsschritte ablaufen.
<b>Wandlungsfähige Produktion</b>	umfasst Montagesysteme, die ihre Organisation und Technik schnell an Schwankungen der Losgrößen sowie an Produkt- oder Variantenwechsel anpassen können.





## PROJEKTATLAS

Deutschland ist im Weltmaßstab eine bedeutende Industrienation. Bei der Herstellung komplexer Industriegüter hat die Montage einen entscheidenden Anteil an der Wertschöpfung. Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2015 den Ideenwettbewerb „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig“ ausgerufen. Wissenschaft und Praxis haben in dreijährigen gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten viele neue Systemlösungen für die Montage erarbeitet. Dabei war es den 80 Projektpartnern ein besonderes Anliegen, ihre Ergebnisse direkt in der betrieblichen Praxis auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen.

Der vorliegende Projektatlas bereitet die Ergebnisse in einer neuartigen, anschaulichen Form auf. Mit dem Format des „Atlas“ wird der Versuch unternommen, alle Aspekte der Montageautomatisierung aus dem jeweiligen Blickwinkel verschiedener betrieblicher Akteure zu betrachten. Der Atlas wendet sich damit vor allem an Management, Betriebsrat, Arbeitsplanung, Arbeitssicherheitsverantwortliche, Controlling, Produktionsleitung, Personalplanung und Fachkräfte in der Montage. Damit die Gestaltung zukünftiger Montagesysteme ein Erfolg wird, sollten möglichst alle relevanten Personengruppen angemessen beteiligt werden. Wie dies gelingt, zeigen wir in den einzelnen Kapiteln des Atlas.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung