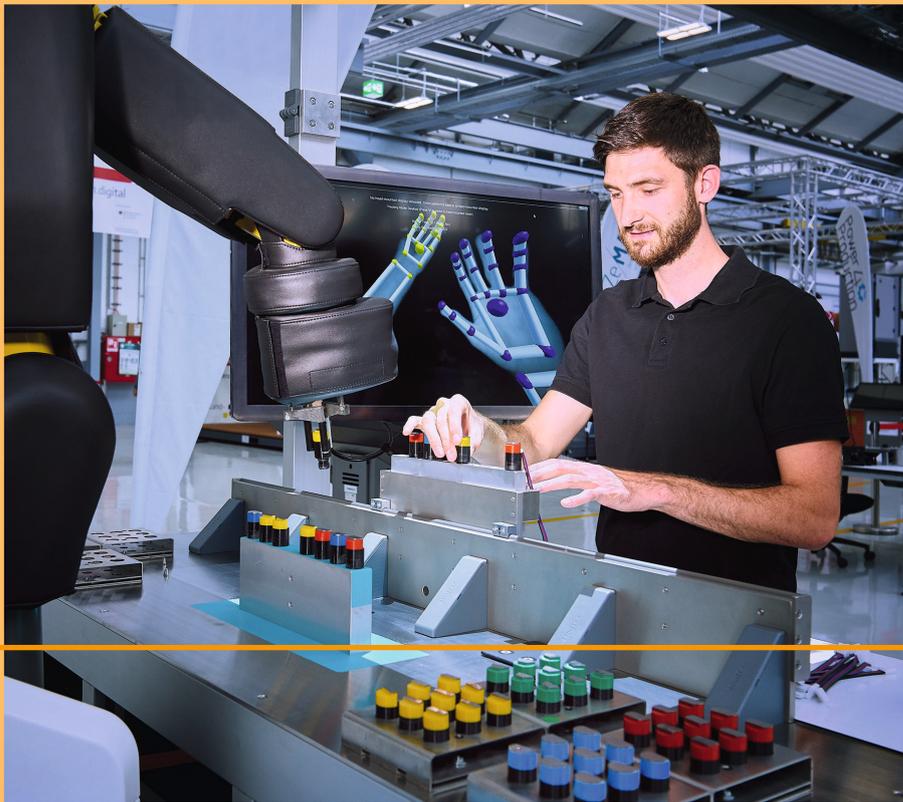


Rainer Müller · Jörg Franke
Dominik Henrich · Bernd Kuhlenkötter
Annika Raatz · Alexander Verl

Handbuch Mensch-Roboter- Kollaboration



2., aktualisierte Auflage

HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Rainer Müller

Jörg Franke

Dominik Henrich

Bernd Kuhlenkötter

Annika Raatz

Alexander Verl

Handbuch Mensch-Roboter- Kollaboration

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Die Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, Leiter des Lehrstuhls Montagesysteme, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Prof. Dr. Dominik Henrich, Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz, Leiterin des Instituts für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl, Institutsleitung, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart



Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dr. Philippa Söldenwagner-Koch, Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Umschlagrealisation: Max Kostopolous

Titelbild: © Uwe Bellhäuser/Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47411-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47460-4

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Vorwort | XI |
| Verzeichnis der Autorinnen und Autoren | XIII |
| 1 Einführung in die industrielle Robotik mit Mensch-Roboter-Kooperation | 1 |
| 1.1 Mensch-Roboter-Kooperation als Trend für die Zukunft der Robotik | 1 |
| 1.2 Einsatzpotenziale und Klassifikation der Mensch-Roboter-Kooperation | 4 |
| 1.2.1 Automatisierungspotenzial durch MRK-Anwendungen | 4 |
| 1.2.2 Formen der Mensch-Roboter-Kooperation | 6 |
| 1.2.3 Beispielapplikationen mit Mensch-Roboter-Kooperation | 8 |
| 1.3 Robotersicherheit | 14 |
| 1.3.1 Anlagensicherheit und Risikobeurteilung für Robotersysteme | 14 |
| 1.3.2 Zielkonflikt zwischen Produktivität und Sicherheit | 15 |
| 1.3.3 Unfallanalyse in der Industrierobotik | 16 |
| 1.3.4 Sicherheitsvorgaben für MRK-Systeme in der Normung | 19 |
| 1.3.5 Sicherheitsstrategien in der direkten physischen MRK | 21 |
| 1.3.6 Kollisionsfolgenabschätzung in der Robotik | 23 |
| 1.3.7 Bewertungsstrategie zur Steuerung des Verletzungspotenzials in MRK-Anwendungen | 28 |
| 1.4 Literatur | 32 |
| 2 Hardwareseitige MRK-Systemgestaltung | 37 |
| 2.1 Grundlagen der Industrierobotik | 37 |
| 2.1.1 Aufbau der Mechanik | 38 |
| 2.1.2 Sicherheitstechnik im und am Roboter | 40 |
| 2.1.3 Programmierung von IR | 41 |
| 2.2 Kollaborationen unter Einsatz konventioneller Roboter | 44 |
| 2.2.1 Kollaborationsarten | 44 |
| 2.2.2 Erweiterte Sicherheitstechnik | 46 |
| 2.3 Kollaborationsfähige Roboter | 48 |
| 2.3.1 Biomechanische Grenzen | 48 |
| 2.3.2 Anwendungsbereiche von kollaborationsfähigen Robotern | 49 |
| 2.3.3 Sicherheitstechnik in kollaborationsfähigen Robotern | 50 |
| 2.3.4 Systeme zur Unterstützung bei der Programmierung von kollaborationsfähigen Robotern | 59 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.4 | Peripherie | 60 |
| 2.4.1 | Endeffektoren als Bestandteil von MRK-Systemen | 62 |
| 2.4.2 | Greifer – Grundlagen | 62 |
| 2.4.3 | MRK-Greifsysteme und Schraubsysteme | 64 |
| 2.4.4 | Neuartige Greifertypen | 67 |
| 2.4.5 | Roboterwagen | 69 |
| 2.5 | Literatur | 70 |
| 3 | Sensortechnik | 73 |
| 3.1 | Sensortechnik als Grundlage für die Mensch-Roboter-Kooperation | 73 |
| 3.1.1 | Messaufgaben für die Mensch-Roboter-Kooperation | 73 |
| 3.1.2 | Physikalische Sensoreffekte, Sensorsysteme und Signalverarbeitung in MRK-Systemen | 75 |
| 3.1.3 | Messunsicherheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit bei Sensoren | 77 |
| 3.2 | Sensoren zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung (externe Sensoren) | 79 |
| 3.2.1 | Resistive Sensoren | 79 |
| 3.2.2 | Kapazitive Sensoren | 81 |
| 3.2.3 | Induktive Sensoren | 84 |
| 3.2.4 | Akustische Sensoren | 85 |
| 3.2.5 | Optische Sensoren | 87 |
| 3.2.6 | Pneumatische Sensoren | 95 |
| 3.2.7 | Radarsensoren | 98 |
| 3.2.8 | Bioelektrische Sensoren | 100 |
| 3.3 | Sensoren zur Messung der inneren Zustandsgrößen eines Robotersystems (interne Sensoren) | 104 |
| 3.3.1 | Kraft- und Momentenmessung | 104 |
| 3.3.2 | Positions-, Weg- und Winkelmessung | 110 |
| 3.3.3 | Beschleunigungs- und Drehratenmessung | 111 |
| 3.4 | Literatur | 114 |
| 4 | Steuerungstechnik | 119 |
| 4.1 | Industrielle Steuerungen | 119 |
| 4.1.1 | Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) | 120 |
| 4.1.2 | Bewegungssteuerung | 122 |
| 4.1.3 | Sichere Steuerung | 124 |
| 4.1.4 | Sichere Antriebsfunktionen | 126 |
| 4.2 | Steuerungssimulation | 135 |
| 4.2.1 | Virtuelle Methoden der digitalen Fabrik | 135 |
| 4.2.2 | Erweiterung auf die Mensch-Roboter-Kooperation | 168 |
| 5 | Mensch-Roboter-Interaktion | 171 |
| 5.1 | Einleitung | 171 |
| 5.2 | Modalitäten zur Interaktion | 175 |
| 5.2.1 | Unimodale Interaktion unter Nutzung auditiver Schnittstellen | 176 |
| 5.2.2 | Unimodale Interaktion unter Nutzung haptischer Schnittstellen | 180 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.3 | Unimodale Interaktion unter Nutzung visueller Schnittstellen | 181 |
| 5.2.4 | Multimodale Interaktion unter Nutzung verschiedener Schnittstellen | 183 |
| 5.3 | Programmierung von Robotern | 186 |
| 5.3.1 | Roboterzentrierte Programmierung | 187 |
| 5.3.2 | Aufgabenzentrierte Programmierung | 193 |
| 5.3.3 | Führungszentrierte Programmierung | 200 |
| 5.3.4 | Benutzerzentrierte Programmierung | 204 |
| 5.3.5 | Hybride Programmiersysteme | 208 |
| 5.4 | Erkennung von möglichen Mensch-Roboter-Kollisionen | 209 |
| 5.4.1 | Grundlagen | 212 |
| 5.4.2 | Binäre Lokalisation | 214 |
| 5.4.3 | Lokalisation mit Einzelsensor | 215 |
| 5.4.4 | Lokalisation mit Sensorfusion | 229 |
| 5.4.5 | Vergleich der Methoden | 241 |
| 5.5 | Reaktion auf mögliche Mensch-Roboter-Kollisionen | 242 |
| 5.5.1 | Kollisionsentschärfung | 244 |
| 5.5.2 | Geschwindigkeitsregelung | 246 |
| 5.5.3 | Lokale Ausweichbewegung | 251 |
| 5.5.4 | Globale Ausweichbewegung | 255 |
| 5.5.5 | Vergleich der Verfahren | 260 |
| 5.5.6 | Systemstudie SIMERO | 261 |
| 5.6 | Koordinierung hybrider Mensch-Roboter-Teams | 266 |
| 5.6.1 | Grundlagen | 267 |
| 5.6.2 | Statische Team-Organisation | 271 |
| 5.6.3 | Semi-dynamische Team-Organisation | 274 |
| 5.7 | Literatur | 278 |
| 6 | Planung, Simulation und Inbetriebnahme | 285 |
| 6.1 | Stand der Simulationstechnik und der virtuellen Inbetriebnahme | 285 |
| 6.1.1 | Ziele und Nutzen der Simulation | 285 |
| 6.1.2 | Roboter- und Arbeitszellensimulationssysteme | 287 |
| 6.2 | Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter | 287 |
| 6.3 | Simulation der Mensch-Roboter-Interaktion | 291 |
| 6.3.1 | Einordnung in bestehende Definitionen | 292 |
| 6.3.2 | Bestehende Softwaresysteme | 295 |
| 6.3.3 | Innovative Ansätze zur virtuellen Auslegung von Mensch-Roboter-Umgebungen | 301 |
| 6.4 | Von der Simulation zur Inbetriebnahme | 305 |
| 6.4.1 | Virtuelle Inbetriebnahme mittels durchgängiger Planungskette | 306 |
| 6.4.2 | Unzureichende Absolutgenauigkeit von Industrierobotern | 307 |
| 6.4.3 | Steigerung der Absolutgenauigkeit durch Kalibriermethoden | 307 |
| 6.4.4 | Lokale kameragestützte Referenzierung zur Steigerung der Positioniergenauigkeit | 309 |
| 6.4.5 | Automatisierte Greif- und Bahnplanung | 310 |
| 6.5 | Sicherheits- und Sensorsimulation | 311 |
| 6.6 | Austauschformate, CAX-Werkzeugkette | 315 |
| 6.7 | Literatur | 318 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Methoden zur erfolgreichen Einführung von MRK | 323 |
| 7.1 | Technische Randbedingungen | 323 |
| 7.1.1 | CE-Zertifizierung | 323 |
| 7.1.2 | Risikobeurteilung | 328 |
| 7.1.3 | Sicherheitsfunktionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration | 328 |
| 7.1.4 | Durchführung einer Kraftmessung | 332 |
| 7.2 | Planung einer MRK-Anwendung | 335 |
| 7.2.1 | Vorgehensweise für die Planung | 335 |
| 7.2.2 | Dokumentation der Anforderungen | 335 |
| 7.2.3 | Morphologischer Kasten | 336 |
| 7.2.4 | Anforderungen | 336 |
| 7.2.5 | Beurteilung der Betriebsmittel | 340 |
| 7.2.6 | Bewertung der Ergonomie bei MRK-Anwendungen | 341 |
| 7.3 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 345 |
| 7.3.1 | Einordnung von MRK im Kontext der Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen | 345 |
| 7.3.2 | Wirtschaftliche Vorteile von MRK im Vergleich zu klassischen Formen der Automatisierung | 347 |
| 7.3.3 | Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus von Roboteranlagen | 348 |
| 7.3.4 | Anwendungsbeispiele | 350 |
| 7.3.5 | Entlohnung | 353 |
| 7.3.6 | Ausblick | 355 |
| 7.4 | Menschzentrierte Einführungsstrategie | 357 |
| 7.4.1 | Bedürfnisse des Menschen und Widerstände gegenüber Veränderung | 357 |
| 7.4.2 | Durchführung von Veränderungsprozessen und Steigerung der Mitarbeiterakzeptanz für MRK-Lösungen | 359 |
| 7.4.3 | Akzeptanzfaktoren für die Einführung von MRK-Systemen | 362 |
| 7.4.4 | Best Practice | 365 |
| 7.4.5 | Halbautomatisierte MRK | 368 |
| 7.4.6 | Menschliche Intentionserkennung | 369 |
| 7.4.7 | Kognitive Assistenzsysteme zur Unterstützung der Mitarbeiter in der Produktion | 370 |
| 7.4.8 | Zusammenfassung und Chancen für die Zukunft | 372 |
| 8 | Branchenspezifische Applikationen | 375 |
| 8.1 | MRK-Applikationen in der Automobilmontage | 375 |
| 8.1.1 | Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen | 375 |
| 8.1.2 | Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze | 378 |
| 8.1.3 | Illustrierung von Beispielen | 380 |
| 8.1.4 | Zusammenfassung und Fazit | 390 |
| 8.2 | Flexible Automatisierung in der Elektronikmontage mithilfe von MRK-Systemen | 391 |
| 8.2.1 | Rahmenbedingungen und Herausforderungen in der Elektronikmontage | 391 |
| 8.2.2 | Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze | 393 |
| 8.2.3 | Beispielhafte Anwendungen von MRK-Systemen in der Elektronikproduktion | 394 |
| 8.3 | Anwendungsbeispiel: Montage von Hydraulikventilen | 400 |
| 8.3.1 | Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen | 400 |
| 8.3.2 | Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze | 401 |
| 8.3.3 | Illustrierung von Beispielen | 405 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.4 | Montage von Großgeräten | 408 |
| 8.4.1 | Darstellung der Anforderung und Rahmenbedingungen | 408 |
| 8.4.2 | Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze | 410 |
| 8.4.3 | Illustrierung von Beispielen | 410 |
| 8.4.4 | Zusammenfassung | 412 |
| 8.5 | Anwendungsbeispiel: Intralogistik | 413 |
| 8.5.1 | Beweggründe für den MRK-Einsatz in der Intralogistik | 413 |
| 8.5.2 | Umsetzungsbeispiel zur Autonomisierung des Materialflusses im Hauptwertstrom | 414 |
| 8.5.3 | Umsetzungsbeispiel zur automatisierten Logistik von Verbrauchs- und Verbauteilen | 415 |
| 8.5.4 | Umsetzungsbeispiel zur Effizienzsteigerung der Kommissionierung | 416 |
| 8.5.5 | Zusammenfassung und Fazit | 418 |
| 8.6 | Anwendungsbeispiel: Robotergestützte Systeme in der Medizin | 418 |
| 8.6.1 | Normativer Rahmen | 419 |
| 8.6.2 | Einteilung medizinischer Robotersysteme | 420 |
| 8.6.3 | Umsetzungsbeispiele | 421 |
| 8.6.4 | Zusammenfassung und Fazit | 424 |
| 8.7 | Anwendungsbeispiel: Servicerobotik im Haushalt | 426 |
| 8.7.1 | Anforderungen und Rahmenbedingungen | 426 |
| 8.7.2 | Konzeptionelle branchenspezifische Lösungen | 428 |
| 8.7.3 | Umsetzungsbeispiele | 430 |
| 8.7.4 | Zusammenfassung und Fazit | 431 |
| 8.8 | Individuelle und aufgabenabhängige Unterstützung bei physisch beanspruchenden Tätigkeiten durch anziehbare Systeme | 432 |
| 8.8.1 | Einführung | 432 |
| 8.8.2 | Anforderungen und Rahmenbedingungen | 434 |
| 8.8.3 | Exemplarische Systemansätze | 437 |
| 8.8.4 | Entwicklungsvorgehen für körpergetragene physische Unterstützungssysteme | 437 |
| 8.8.5 | Potenziale | 439 |
| 8.9 | Anwendungsbeispiel: Roboterbasierte Vorfertigung für Losgröße Eins im Holzbau | 441 |
| 8.9.1 | Rahmenbedingungen und Herausforderungen für die Automatisierung im Holzbau | 441 |
| 8.9.2 | Forschungsansatz zur Automatisierung im Holzbau | 442 |
| 8.9.3 | Robotische Vorfertigung und Mensch-Roboter-Interaktion im Holzbau | 443 |
| 8.9.4 | Illustrierung von Umsetzungsbeispiele | 447 |
| 8.9.5 | Zusammenfassung und Fazit | 449 |
| 8.10 | Vielfältiger Einsatz von MRK-Systemen bei einem global tätigen Automobil- und Industriezulieferer | 450 |
| 8.10.1 | Koexistenz | 450 |
| 8.10.2 | Kooperation | 451 |
| 8.10.3 | Kollaboration | 452 |
| 8.10.4 | Mobile Cobots | 452 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 9 | Entwicklungsrichtungen für aktuelle und zukünftige Anwendungen | 455 |
| 9.1 | Soft Robotics | 455 |
| 9.1.1 | Übersicht | 455 |
| 9.1.2 | Komponenten | 456 |
| 9.1.3 | Entwurfs- und Beschreibungsmethoden | 461 |
| 9.1.4 | Anwendungsgebiete | 464 |
| 9.2 | Software für die Roboterinteraktion mit dem LBR iiwa | 469 |
| 9.2.1 | Einführung | 469 |
| 9.2.2 | Eine Quelltext-offene Zustandsmaschine für die sichere MRK | 470 |
| 9.2.3 | OpenIGTLink-Schnittstelle | 471 |
| 9.2.4 | Medizinische Therapieplanung mit 3D-Slicer | 472 |
| 9.2.5 | Teleoperation mittels ROS-Schnittstelle und OpenIGTLink | 474 |
| 9.2.6 | Tablet-PC, Smartwatch und Mikro-PC-basierter Zustandswechsler am Endeffektor | 474 |
| 9.2.7 | Zusammenfassung und Ausblick | 476 |
| 9.2.8 | Literatur | 476 |
| | Index | 479 |

Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

Vorwort

Wie sieht die Automatisierung im Zeitalter von zunehmender Digitalisierung, Produktindividualisierung, und globaler Vernetzung aus? Wie muss sich die Produktion unter Aspekten des demografischen Wandels weiterentwickeln? Wie arbeiten Mensch und Roboter in den Produktionssystemen und Fabriken von morgen zusammen? Diese und viele weitere Fragen sind aktuell bedeutende Themen in der Industrie. Sie müssen für die Zukunftsfähigkeit des Produktionsstandortes Deutschland beantwortet werden und in leistungsfähige und wirtschaftliche Lösungen in der Produktionslandschaft – vom KMU bis zum Großunternehmen – umgesetzt werden. Das Spektrum der Produktionsprozesse ist gekennzeichnet durch komplexe und hochgradig anwendungsspezifische Prozesse auf der einen Seite und die mit der zunehmenden Produktindividualisierung einhergehende Produktvariantenvielfalt auf der anderen Seite. Zudem steht die Produktion in diesem Kontext in einem besonderen Spannungsfeld, denn sie muss sowohl aus Qualitätsgründen sehr präzise und wiederholungsgenau sein, als auch aus wirtschaftlichen Gründen taktzeitoptimiert, investitions- und ressourceneffizient sein.

Für die zunehmende kundenindividuelle Produktion mit sehr schnellen Time-To-Market-Forderungen geht der Trend zu hybriden Mensch-Roboter-Systemen mit variabler Aufgabenteilung unter Ausnutzung der jeweiligen Stärken der einzelnen Akteure: die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Mit der MRK gehen vielfältige neue Einsatzmöglichkeiten von Robotern – ohne die strikte Trennung von Mensch und Roboter durch aufwändige Sicherheitszäune – einher, die von der variablen Aufgabenteilung im Produktionsanlauf und zur Abfederung von Produktionsspitzen über die Steigerung der Produktionsqualität durch eine gezielte Automatisierung von Teilprozessen bis hin zur Steigerung der Ergonomie am Arbeitsplatz durch Hebehilfen und Werkerassistenzen reichen.

Neben der breiteren Verfügbarkeit von Robotersystemen verschiedener Hersteller, die nach geltenden Sicherheitsbestimmungen zur kollaborativen Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ausgelegt sind, hat sich in der letzten Zeit auch die Sicherheitstechnik weiterentwickelt und einen sehr hohen Stand erreicht. Unterstützt werden MRK-Systeme zudem durch hochentwickelte Sensorsysteme im Bereich der Werkstückaufnahme und der Interaktion mit den Menschen. Begleitend wurden durch Normen und Richtlinien rechtliche Randbedingungen geschaffen, die eine direkte Kollaboration von Mensch und Roboter in gemeinsamen, überschneidenden Arbeitsbereichen zulassen.

Mit der MRK steht schon jetzt eine Zukunftstechnologie zur Erhöhung des Automatisierungsgrades zur Verfügung, die durch hochentwickelte Systeme die Produktvariantenvielfalt beherrschbar macht und die erforderlichen hohen Geschwindigkeits- und Genauigkeitsanforderungen sicher abbilden kann. Der Erfolg der Mensch-Roboter-Kollaboration in den kommenden Jahren wird neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung der beteiligten Systemkomponenten insbesondere durch neue technische Lösungen zur einfachen Planung, Programmierung und Inbetriebnahme bestimmt. Ein enger Schulterschluss zwischen Forschung und Industrie ist und bleibt ein entscheidender Faktor, um der Mensch-Roboter-Kollaboration weiterhin Wachstum und Erfolg zu sichern.

Für vielfältige MRK-Themenfelder entwickeln die Industrie und die Forschung Lösungen, die schon erfolgreich in verschiedensten Applikationen ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt haben. Aber es gibt immer noch eine Vielzahl von Anforderungen, die für einen breit akzeptierten, wirtschaftlich belastbaren und vor allem sicheren Einsatz der MRK beachtet werden müssen. In diesem Handbuch werden dazu alle Teilkomponenten und -systeme einer MRK-basierten

Produktion systematisch dargestellt und in ihrer einzelnen Funktion als auch ihrem Zusammenwirken ausgeführt.

Es bleibt die Herausforderung, die geeignete Kombination der Stärken von Mensch und Roboter umzusetzen: die Präzision, Dynamik, die hohen Traglasten und die nahezu ununterbrochenen Einsatzzeiten der Roboter müssen in idealer und sicherer Weise mit den hohen sensorischen, motorischen und kognitiven Fähigkeiten des Menschen kombiniert werden.

Das Handbuch ist für Praktiker – industrielle Planer und Entwickler sowie Anwender von MRK-Lösungen – ausgelegt und soll bei den genannten Herausforderungen systematisch begleiten und im kompletten Prozess – von der Idee über die Planung und Komponentenauswahl bis zur erfolgreichen Einführung und Absicherung von MRK-Lösungen – unterstützen.

Das Handbuch beginnt in Kapitel 1 mit einer allgemeinen Einführung in die MRK, die sowohl die grundlegenden Potenziale der MRK und die Ausprägungen der Mensch-Roboter-Kooperation aufzeigt und gleichzeitig auch die Sicherheitsanforderungen thematisiert. In Kapitel 2 wird dann der aktuelle Entwicklungsstand der MRK-fähigen Hardware dargestellt, mit besonderer Berücksichtigung der Peripherie. Kapitel 3 geht nochmals speziell auf die Grundlagen der Sensortechnik ein, welche in Roboter-externe und -interne Sensoren unterteilt ist. In Kapitel 4 wird ein Überblick über die heutigen Techniken zur Ansteuerung von Robotern gegeben, wobei insbesondere die Steuerungssimulation betrachtet wird. Kapitel 5 beleuchtet dann das sehr breite Spektrum der Interaktion zwischen Mensch und Roboter, welche von der initialen Roboterprogrammierung über die Kollisionserkennung bzw. -vermeidung bis hin zur Koordinierung hybrider Mensch-Roboter-Teams reicht.

Das Kapitel 6 ist den verfügbaren Simulations- und Planungssystemen gewidmet, denn diese Systeme sind für die zeit- und kosteneffiziente Entwicklung von MRK-Lösungen von besonderer Bedeutung. Neben den rein technologischen Aspekten betrachtet Kapitel 7 dann die Einführung von MRK-Systemen ins Produktionsumfeld. Abschließend werden in Kapitel 8 einige branchenspezifische MRK-Lösungen vorgestellt und in Kapitel 9 die möglichen Entwicklungsrichtungen für aktuelle und zukünftige Anwendungen aufgezeigt.

Durchgängig werden in diesem MRK-Handbuch begleitend industrielle und praxisnahe Beispiele zur Veranschaulichung der dargestellten Themenbereiche aufgezeigt und eine Vielzahl von Literaturreferenzen ermöglicht die zielgerichtete Vertiefung der Inhalte.

Die Idee zu diesem Handbuch entstand in der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik (MHI). Die MHI ist eine Vereinigung leitender Universitätsprofessorinnen und -professoren aus dem deutschsprachigen Raum. Die Mitglieder forschen sowohl grundlagenorientiert als auch anwendungsnah in einem breiten Spektrum aktueller Themen aus dem Bereich der Montage, Handhabung und Industrierobotik. Der MHI versteht sich als enger Partner der deutschen Industrie.

Wir, die Herausgeber dieses MRK-Handbuches, möchten uns an dieser Stelle ganz herzlich bei allen Beteiligten bedanken, denn nur durch ihre Einzelbeiträge und insbesondere durch den Austausch und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen zur Strukturierung und Ausführung der Inhalte konnte dieses Handbuch in seinem vorliegenden Stand entstehen.

*Rainer Müller, Jörg Franke, Dominik Henrich,
Bernd Kuhlenkötter, Annika Raatz, Alexander Verl*

Verzeichnis der Autoren und Autorinnen

Herausgeber und Herausgeberin

Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller,
Leiter des Lehrstuhls Montagesysteme, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke,
Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Prof. Dr. Dominik Henrich,
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter,
Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz,
Leiterin des Instituts für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl,
Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Autoren und Autorinnen

Dr. techn. Felix Amtsberg, M. Sc., Dipl.-Ing.
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung, Universität Stuttgart

Dr. Andreas Argubi-Wollesen
Ehemals Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU)

Dr.-Ing. Matthias Bartelt
Ehemals Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum; aktuell Rethink Robotics GmbH, Bochum

Attique Bashir, M. Sc.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

M.Sc Jochen Bauer, M.Comp.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Miriam Benyakoub (geb. Drieß), M. Eng.
Ehemals ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell ZF Friedrichshafen AG, Saarbrücken

Dipl.-Ing. Andreas Blank
Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Sebastian Blankemeyer, M. Sc.
Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Josua Bloeb, M. Sc.
Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth; aktuell Ferchau GmbH, Freiburg

Anne Blum, M.Sc.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT

Dipl.-Ing. Matthias Brossog

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Dirk Burkhard

Ehemals ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell HYDAC New Technologies, Sulzbach/Saar

Prof. Dr.-Ing. Arnd Buschhaus

Fachbereich Industrieroboter und Produktionsautomatisierung, Fakultät Technik, Hochschule Reutlingen

Dr.-Ing. Akos Csiszar

Ehemals Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Thomas Dietz

Ehemals Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Shan Fur, M. Sc.

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Aaron Geenen

Ehemals ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell EFS Gesellschaft für Hebe- und Handhabungstechnik mbH, Nordheim

Dr.-Ing. Paul Glogowski

Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Phys. Michael Gradmann

Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth; aktuell Huawei Deutschland, München

Johannes Hartwig, M. Sc.

Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Werner Herfs

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen

Sebastian Hirschmann, M. Sc.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Erlangen

Nico Höllerich, M. Sc.

Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Leenhard Hörauf

Ehemals ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell Miele & Cie. KG, Euskirchen

Dr.-Ing. Alfred Hypki

Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Florian Jaensch, M. Sc.

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Lüder A. Kahrs

Assistant Professor, Mathematical and Computational Sciences, University of Toronto, Mississauga, Kanada

Benjamin Kaiser, M. Sc.

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Ali Kanso

Professor für Robotik, Technische Hochschule Ingolstadt

Dr.-Ing. Karl Kübler

Ehemals Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Maximilian Landgraf

Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Max-Heinrich Laves
Ehemals Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover; aktuell ImFusion GmbH, München

Dr.-Ing. Kai Lemmerz
Ehemals Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum; aktuell RIF Institut für Forschung und Transfer e. V., Dortmund

Dipl.-Ing. Ortwin Mailahn, B. A. RWTH
Ehemals ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell Bosch Rexroth AG, Stuttgart

Dr.-Ing. Tobias Masiak
Ehemals ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken; aktuell ZF Friedrichshafen AG, Saarbrücken

Prof. Achim Menges
Leiter des Instituts für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung, Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Maximilian Metzner
Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Susanne Oberer-Treitz
Ehemals Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Dipl.-Inform. Eric M. Orendt
Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier
Ehemals Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

Bernward Otten, M. Sc.
Ehemals Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU)

Jan Peters, M. Sc.
Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Dr.-Ing. Christina Ramer
Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Tobias Recker, M. Sc.
Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Dr.-Ing. Sebastian Reitelshöfer
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Khansa Rekik, M. Sc.
ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Dr. Dominik Riedelbauch
Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Dr. Michael Riedl
Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth; aktuell TNG Technology Consulting GmbH, Unterföhring

Dr.-Ing. Hannah Riedle
Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Simon Roggendorf, M. Sc.
Ehemals Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen - Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Dr. Gundula Runge-Borchert
IAV GmbH, Braunschweig

Lukas Sauer, M. Sc.
Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Eike Schäffer
Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Christian Scheifele

Ehemals Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Stefan Scheifele

Ehemals Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Edgar Schmidt, M. Sc.

Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Prof. Dr.-Ing. Matthias Scholer

Professor für Robotik und Automation an der Ostschweizer Fachhochschule, Buchs, Schweiz

Dr. Michael Scholz

Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Prof. Dr. Michael Sedlmair

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme (VIS), Universität Stuttgart

Dr. Julian Seßner

Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Aimée Sousa Calepso, M. Sc.

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme (VIS), Universität Stuttgart

Prof. Dr. Michael Spangenberg

Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Simon Storms, M. Sc.

Ehemals (Oberingenieur), Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen – Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Sascha Sucker, M. Sc.

Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Sebastian Tauscher

FORWARDttc GmbH, Hannover

Prof. Dr.-Ing. Matthias Vette-Steinkamp

Professor für umweltgerechte Produktionsverfahren und industrielle Robotik, Hochschule Trier

Kornelius Wächter, M. Sc.

Ehemals Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Dr.-Ing. Maximilian Wagner

Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner

Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU), Professur für Fertigungstechnik (Pff), Institut für Mechanik, Universität Innsbruck

Tobias Werner, M. Sc.

Ehemals Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Mats Wiese, M. Sc.

Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg

Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU)

Dipl.-Ing. In Seong Yoo

Ehemals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Andreas Zeug, M. Sc.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Erlangen

Einführung in die industrielle Robotik mit Mensch-Roboter-Kooperation

Susanne Oberer-Treitz, Alexander Verl

1.1 Mensch-Roboter-Kooperation als Trend für die Zukunft der Robotik

In seinen Anfängen in den 1970er Jahren stand der Begriff Roboter für massige, hydraulisch betriebene Maschinen, die in Produktionsanlagen schwere Tätigkeiten verrichteten. Die schweren Maschinen konnten große Massen mit hoher Geschwindigkeit bewegen und hoben sich von Anfang an durch ihre universelle Einsetzbarkeit von den bis dahin bekannten Fertigungsmaschinen ab (Fryman, Matthias 2012). In den 1990er Jahren hatte sich der Industrieroboter in der Produktion als klassisches Arbeitsmittel verbreitet und obwohl für das Robotersystem aus damaliger Sicht viele seiner heutigen Einsatzgebiete und Anwendungen noch undenkbar waren, wurde seine Entwicklung schon damals als eine Revolution im industriellen Zeitalter gefeiert (Schraft 2003).

Der große Bewegungsraum des Robotersystems und seine für einen Menschen nicht einsehbaren Bewegungsabläufe der mechanischen Strukturen, die rein durch Steuerungssignale koordiniert wurden, ergaben allerdings trotz der hohen Arbeitserleichterung für den Werker ein enormes Gefährdungspotenzial. Dieses ging über die bekannten Gefahren der bis dahin üblichen Maschinenanlagen hinaus (Engelberger 1981). Gleichzeitig war es gerade dieses offensichtliche Gefährdungspotenzial, das zu einer einfachen Gestaltung einer Sicherheitslösung für die Roboteranwendung führte: Die Roboterzellen wurden mit einer Umhausung versehen und das gesamte Robotersystem durfte nur alleine hinter Schutzzäunen arbeiten. Mit so einfachen Mitteln konnte die direkte Gefährdung für den Menschen im Betrieb ausgeschaltet werden.

Seit dieser Zeit haben sich die Robotersysteme, ihr Anwendungsspektrum und die dabei eingesetzten Steue-

rungs- und Sicherheitstechnologien in allen Bereichen weiterentwickelt. Dabei kommt der Robotik der Einsatz elektro- und informationstechnischer Komponenten aus dem Computer- und Konsumgütermarkt zugute, der ein immer besseres Preis-Leistungs-Verhältnis ermöglicht (Hägele et al. 2008).

In den herkömmlichen Einsatzgebieten im Automobilbau, bei dem das Fahrzeug in Großserien als Massenprodukt hergestellt wird, ist der Industrieroboter seit vielen Jahren in großer Anzahl im Einsatz (Fersen 1986). Dabei ist die Automobilindustrie durch kapitalintensive Fabriken und eine qualitativ hochwertige Produktion gekennzeichnet und gilt deshalb seit jeher als Treiber der Automatisierung. Längst ist dabei der Industrieroboter selbst ein Serienprodukt und aus der Fertigung nicht mehr wegzudenken. Jedoch verursacht der Industrieroboter üblicherweise lediglich ein Viertel der Investitionen des kompletten Robotersystems, die für einen Fertigungsschritt in der Produktionsanlage umgesetzt werden müssen (Bolhouse, Daugherty 1999). Gerade diese zusätzlichen Investitionen für Zuführungen, Bereitstellungen und Greifwerkzeuge und die mangelnde Flexibilität der werkstückspezifischen Sonderanfertigungen sind dafür ausschlaggebend, dass der Industrieroboter nach wie vor meist nur in der Serienfertigung anzutreffen ist.

Anders sieht es in Produktionsprozessen aus, in denen die Fertigung durch Kleinserien oder sogar Einzelprodukte gekennzeichnet ist. Dort werden selbst technisch einfach automatisierbare Prozesse vielerorts noch manuell ausgeführt. Genauso gilt dies auch in komplexen Montageprozessen, in denen der Einsatz von Robotersystemen möglicherweise eine deutlich höhere Zuverlässigkeit bezüglich der Produktionsgüte erlaubt, diese allerdings nur durch zusätzliche Sensorik sowie Positionier- und Zuführtechnik erreicht werden kann (Jörg et al. 2000). Selbst wenn die Prozesse hierbei automatisiert umsetzbar sind, scheitern in vielen Fällen die in-

dustriellen Realisierungen an der Wirtschaftlichkeit der spezifischen Applikation. Mit dem herkömmlichen Industrieroboter alleine kann die Wirtschaftlichkeit aufgrund der zusätzlichen Peripherie- und Integrationskosten oft nicht erreicht werden. Dabei ist die Anzahl potenzieller Applikationen und einzelner Varianten für ein starres Automatisierungssystem oftmals nicht groß genug (Naumann, Fechter 2015).

Vermeehrt werden Automatisierungslösungen benötigt, die anpassungsfähiger an verschiedene Applikationen sind. Sie sollen einen vielfältigeren Einsatz erlauben, ohne bei einer geringfügig geänderten Anwendung nach einer kompletten Neuentwicklung des Robotersystems zu verlangen. Die Mensch-Roboter-Kooperation, teilweise auch als Mensch-Roboter-Kollaboration bezeichnet, kurz MRK, eröffnet genau für diese Anforderungen neue Möglichkeiten, die Potenziale des Roboters zu nutzen, die Flexibilität des Menschen in der Prozesskette zu erhalten und Peripherie einzusparen (Krüger et al. 2009). Dabei sollen im kooperativen Betrieb der Mensch und das Robotersystem ihre jeweiligen Stärken optimal ausspielen und dadurch die Anwendungsmöglichkeiten der Industrieroboter auf ein vielfältigeres Einsatzspektrum als im vollständig autonomen Betrieb erweitert werden. Mit Hilfe geeigneter Wissensmodellierung und entsprechender Hardware lässt sich zusätzlich eine einfachere Rekonfigurierbarkeit von Robotersystemen erreichen, um auch erhöhten Anforderungen bei hoher Variantenvielfalt oder in Kleinserien gerecht zu werden (Verl und Naumann 2008). Stand anfangs in der Industrierobotik bei der Sicherheit die konsequente Trennung von Mensch und Roboter an oberster Stelle, werden für Robotersysteme mit notwendigen physischen Interaktionen mit dem Menschen neue Sicherheitsaspekte wichtig (Graham 1988).

Die aktuellen Zahlen des Robotermarktes zeigen, dass die Anzahl der verkauften Robotersysteme, neben dem Einsatz in der automobilen Serienfertigung, in neuen Märkten hohe Zuwächse verzeichnet, wie z.B. in der Elektronikindustrie oder der Metallbearbeitung, und damit im Jahr 2016 Höchstzahlen bei den verkauften Robotersystemen erreicht wurden (IFR 2017).

Diesen Trend haben auch die großen Roboterhersteller erkannt, die oftmals an der Entwicklung neuartiger Verfahren und Systemkomponenten beteiligt sind. So stellte Elan Ende der 1990er Jahre mit Reis Robotics die Gemeinschaftsentwicklung des ESALAN-Safety Controllers vor, der es erstmals ermöglichte, eine sicherheitsgerichtete Überwachung von Geschwindigkeiten und Positionen des Roboters umzusetzen. Damit war es möglich, die Gefährdungen seitens der Kinematik des Roboters softwareseitig einzugrenzen, indem eine sichere räumliche Begrenzung des Roboterbetriebes innerhalb seines Arbeitsbereiches umgesetzt werden konnte (Som 2000). Im Rahmen des BMBF-Projektes ASSISTOR – assistierende, interaktive und sicher im industriellen Umfeld agierende ortsflexible Roboter – wurde dazu eine entsprechende Referenzanwendung zum Handling von Getrieben an einem MRK-Arbeitsplatz umgesetzt (Bild 1.1). In dieser Anwendung wurden sichere nicht-trennende Schutzeinrichtungen mit der Sicherheitssteuerung des eingesetzten Roboters kombiniert und so die geltenden normativen Vorgaben zur Umsetzung der geforderten funktionalen Sicherheit für Robotersysteme erreicht (s. auch Kapitel 3 zur Einordnung von Schutzeinrichtungen für kollaborative Roboteranwendungen). Dazu realisierten die am Projekt Beteiligten unterschiedliche Arbeitsräume, um bei überwachter Position des Menschen autonomen und Handführbetrieb wechselseitig zu betreiben (Schraft, Meyer 2005).

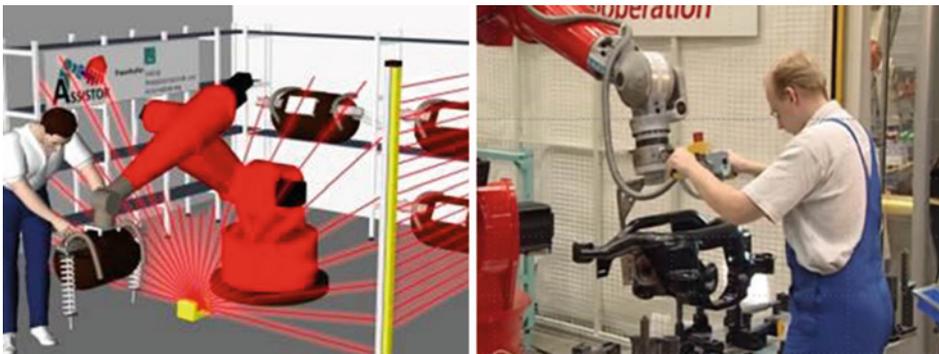


Bild 1.1
MRK-System zur Getriebemontage im Rahmen des BMBF-Projektes ASSISTOR (Quelle: Fraunhofer IPA)

Inzwischen bieten viele Hersteller serienmäßig frei konfigurierbare Sicherheitssteuerungen an, mit denen unterschiedliche Arbeits- und Geschwindigkeitsbereiche in einer Applikation für den Bediener abgesichert werden können. So bieten z. B. ABB SafeMove 2 (ABB 2017), Comau RobotSAFE (Comau 2017a), Denso Safety Motion (Denso 2017), FANUC Dual Check Safety (Fanuc 2017a), KUKA.SafeOperation (KUKA 2017a), Stäubli CS9 (Stäubli 2017) oder Yaskawa Functional Safety Unit (Yaskawa 2017) unterschiedliche Funktionen zur sicherheitsgerichteten Überwachung von Achsen, Räumen und Geschwindigkeiten, mit denen sich MRK-Anwendungen für spezifische Prozesse realisieren lassen. Zusätzlich kamen in den letzten Jahren auch komplett neue Robotersysteme auf den Markt, die gezielt für den Einsatz als sicheres Robotersystem für die MRK in der Produktion gedacht sind. So präsentierte ABB 2011 auf der Hannover Messe erstmals das System YuMi[®], einen zweiarmigen Leichtbauroboter, der für das Handling und die Montage von Kleinteilen (Traglast 500 g) in einer agilen Produktionsumgebung mit einem intrinsischen Sicherheitskonzept für die MRK ausgelegt ist. Hierbei ergibt sich die Sicherheitsauslegung nicht durch die Umsetzung einer sicheren Steuerungstechnik, sondern durch die Realisierung niedriger bewegter Massen (Kock et al. 2011).

Mit dem Begriff „Leichtbauroboter“ werden oftmals Robotersysteme beschrieben, die im Gegensatz zu herkömmlichen Robotersystemen ein stark verbessertes Verhältnis von Eigengewicht zu Traglast aufweisen. So erreicht z. B. der KUKA LBR iiwa mit Traglasten von 7 oder 14 kg durch seine Hülle aus Aluminium und in den Achsen integrierten Motoren ein Traglast-Gewicht-Verhältnis von bis zu 1:2. Zusammen mit einem strukturellen Design des Armes mit abgerundeten Kanten und durch Vermeidung von Klemm- und Scherstellen werden dadurch optimale Bedingungen für die sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter geschaffen (KUKA 2017b).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch weitere Hersteller. Hierzu gehören z. B. der dänische Roboterhersteller Universal Robots, mit seinen seit 2009 auf dem Markt verfügbaren, anwendungsfreundlichen Kleinrobotern UR3, UR5 und UR10 (UR 2017), der amerikanische Roboterhersteller Rethink Robotics mit dem Robotersystem Sawyer (RethinkRobotics 2017) und das erst 2016 herausgebrachte Robotersystem Panda von Franka Emika (FrankaEmika 2017).

Mit dem CR-35iA stellte Fanuc 2015 das erste Robotersystem mit höheren Traglasten und sicherer Kontaktdetektion für den schutzzaunlosen Einsatz in der MRK bereit, das inzwischen auch mit Traglasten für 4 und 7 kg angeboten wird (Fanuc 2017b). Hier wird die bewährte Sicherheitssteuerung um eine passive Kontaktdämpfung erweitert und dadurch das Verletzungsrisiko für einen Bediener beim Kontakt vermindert. Ein neues System im gleichen Traglastbereich stellt Comau mit seinem System AURA - Advanced Use Robotic Arm - vor, das neben der Sicherheitssteuerung auch hier mit einer Sensorschutzhülle versehen ist (Comau 2017b).

Den Entwicklungen dieser neuen Generation von Robotersystemen für die MRK liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die Sicherheit von Robotern im direkten physischen Kontakt maßgeblich durch die Geschwindigkeit des bewegten Systems und bei möglichen Klemmstellen durch die Detektion des Kontaktes beeinflusst wird. Dies wurde in wissenschaftlichen Kollisionsuntersuchungen mit Robotern z. B. in (Haddadin et al. 2009) und (Oberer-Treitz 2018) aufgezeigt und lässt sich systematisch zur Bewertung der Sicherheit sowohl sogenannter Leichtbauroboter als auch größerer Roboter in der MRK nutzen. Für die relevanten Kontaktstellen zwischen Mensch und Roboter in einer Anwendung sind meist nicht die bewegte Masse, sondern die Geschwindigkeit und die Detektions- und Reaktionszeiten des Robotersystems die Faktoren, die die Grenze für den sicheren Betrieb festlegen.

In Abschnitt 2.3 werden unterschiedliche technische Spezifikationen einiger hier vorgestellter und weiterer Robotersysteme detailliert aufgezeigt.

Zusammen mit informatorischen Beschreibungen in der Fertigung und der Digitalisierung von Prozessen ergeben sich durch physische MRK neue Interaktionsmodi von Mensch und Maschine. Gleichzeitig entsteht ein erhöhter Bedarf an Sensortechnik und Sicherheitstechnologien, um die Anforderungen aus dem Bediener-schutz zu gewährleisten (Naumann, Dietz et al. 2014). Weil die räumlichen Grenzen zwischen Mensch und Roboter aufgehoben sind, ergeben sich für die sichere Auslegung der Robotersysteme in der MRK Fragestellungen bezüglich des Umgangs mit Gefährdungen für den Menschen, die so bisher noch nicht allgemeingültig beschrieben, modelliert und geregelt sind.

1.2 Einsatzpotenziale und Klassifikation der Mensch-Roboter-Kooperation

In der Produktion ist eine der Hauptaufgaben des Roboters, Werkstücke innerhalb oder zwischen einzelnen Fertigungsstationen zu handhaben. Fast die Hälfte der weltweit genutzten Industrierobotersysteme wird dafür eingesetzt und dient somit oft rein als Zuführeinrichtung innerhalb einer Automatisierungskette (IFR 2017). Die Tätigkeit des Roboters beschränkt sich dabei bisher auf das Aufnehmen, Bewegen und Ablegen eines Werkstückes. Voraussetzung dafür, dass das Robotersystem diese Tätigkeit ausführen kann, ist, dass die Umgebung die erforderlichen Strukturen für eine geordnete Aufnahme und Ablage aufweist. Dadurch entsteht ein hoher Konfigurationsaufwand bei der Einrichtung einer Roboteranlage. Trotz der universellen Einsatzmöglichkeiten des Roboters wird so ein unflexibles Automatisierungssystem erzeugt. Einfache Montagetätigkeiten, die zusätzlich zur Handhabung ausgeführt werden können, erfordern weitere Vorrichtungen und Sensortechnik, um wenigstens in einem vordefinierten Bereich auf Abweichungen, wie z. B. Fertigungstoleranzen der Werkstücke, reagieren zu können. Dies erhöht jedoch zusätzlich die Investitionskosten für die Applikation (Dore und Lo 1991).

Die Leistungsmerkmale eines herkömmlichen Robotersystems, wie sie in den Datenblättern gelistet werden, sind Traglast, Reichweite und Arbeitsgeschwindigkeit. Zusammen mit weiteren Kenngrößen bezüglich der Positioniergenauigkeit und der Steifigkeit lässt sich daraus das passende Robotersystem für den Einsatz in einer spezifischen industriellen Anwendung aus dem Produktportfolio der Roboterhersteller ableiten. Die Hersteller konzentrieren sich in ihrer Systementwicklung darauf, für die identifizierten Einsatzbereiche ihrer Robotersysteme das Kosten-Leistungs-Verhältnis durch Abstimmung von Roboterstruktur und -komponenten auf die entsprechende Steuerungstechnik zu optimieren (Brogardh 2009).

Für einfache, monotone Tätigkeiten, die mit dem Heben großer Lasten verbunden sind, erfüllen autark arbeitende Industrieroboter oftmals die Voraussetzung, Arbeitsabläufe effektiv und kostengünstig umzusetzen. Anders sieht es bei komplexeren Handlungsabläufen, z. B. bei Montagetätigkeiten, und dem Einsatz in wenig strukturierten Umgebungen aus. Selbst wenn es tech-

nisch möglich ist, dabei einen Arbeitsprozess mithilfe eines Robotersystems umzusetzen, ergibt sich oft mit vielfachem Aufwand nur eine sehr unflexible Automatisierungslösung, die dadurch kein ausreichendes wirtschaftliches Potenzial aufzeigt (Nof, Wilhelm et al. 1997; Michalos, Makris et al. 2010).

In klassischen Automatisierungsbereichen, wie z. B. Schweißanwendungen im Karosserierohbau in der Serienfertigung der Automobilindustrie, liegen nach wie vor hohe Einsatzzahlen von Industrierobotern. 2016 wurden etwa 22 % aller Robotersysteme weltweit zum Schweißen eingesetzt. Allerdings zeigt sich auch gerade in neuen Anwendungsfeldern wie z. B. in der Montage eine stark steigende Anzahl von Installationen von 47 % gegenüber dem Vorjahr (IFR 2017). Dies verlangt nach neuen Lösungen, für die die Kooperationsfähigkeit des Robotersystems eine Kernkompetenz liefert (Naumann und Fechter 2015).

1.2.1 Automatisierungspotenzial durch MRK-Anwendungen

Der Roboter zeigt seine Stärken im Einsatzpotenzial in industriellen Anwendungen durch seine steife, mechanische Struktur, seine starken Motoren sowie seine zuverlässige und unermüdliche Bewegungs- und Ablaufsteuerung. Daraus bringt er, wie generell Maschinen für die Automatisierung, spezifische Charakteristiken mit, in denen er dem Menschen überlegen ist. Diese ergeben sich z. B. nach dem MABA-MABA-Ansatz – „Mensch are better at – machines are better at“ – in (Fitts 1951) oder nach Thiernemann in (Thiernemann 2005) zu:

- Kraft, Ausdauer und Geschwindigkeit
 - Berechnungsfähigkeit und hoher Zuverlässigkeit
 - großer Reichweite
 - hoher Präzision auch und gerade bei monotonen Aufgaben
 - Ausführung simultaner Tätigkeiten.
- Gleichzeitig ist der Mensch gerade bei komplexeren Manipulationstätigkeiten bisher dem Roboter und seinen Steuerungsmöglichkeiten weit überlegen. Dabei zeichnet er sich aufgrund seiner physischen und mentalen Besonderheiten aus durch (s. z. B. MABA-MABA-Ansatz in (Fitts 1951) oder (Thiernemann 2005)):
- Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an geänderte Umgebungsbedingungen
 - Sensorische Fähigkeiten
 - Manipulationsfähigkeit unterschiedlicher Materialstrukturen (z. B. biegschläffer Teile)

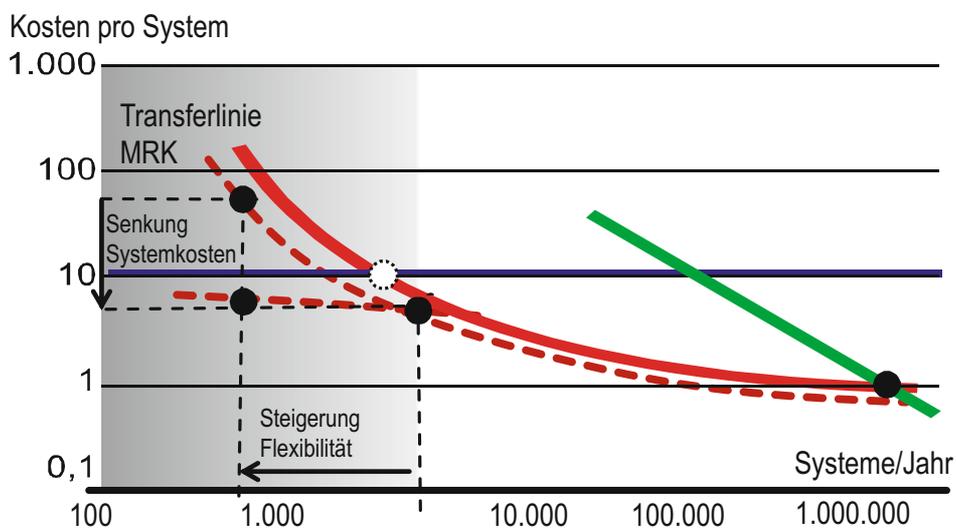
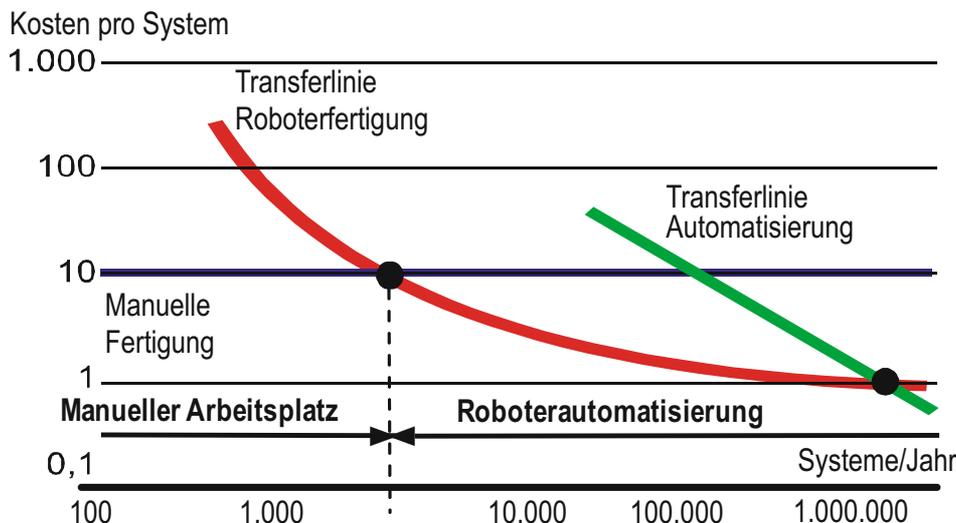


Bild 1.2
Sinkende Rentabilitätsschwelle zwischen manueller und roboterbasierter Fertigung durch MRK (Hägele, Schaaf et al. 2002)

- Manipulationsfähigkeit in kleinen Arbeitsräumen
- Reaktionsfähigkeit und Interpretationsfähigkeit von Fehlerzuständen.

Indem Mensch und Roboter kooperieren, lassen sich mögliche Einsatzpotenziale von Robotersystemen über den heutigen Einsatz von Automatisierungssystemen hinaus nutzen. Dafür werden unterschiedliche Methoden analysiert, um in einer Fertigungsanwendung die optimale Verteilung der Aufgaben auf die beiden Partner zu erreichen bzw. die beiden Partner in einer Anwendung optimal zu koordinieren, wie z. B. in (Dekker und Woods 2002) diskutiert.

Da in der MRK die menschlichen Fähigkeiten weiterhin effektiv eingesetzt werden, lassen sich neben den herkömmlichen Anwendungen neuartige Automatisierungs-

systeme umsetzen. Zudem sind wirtschaftliche Automatisierungslösungen auf einen Fertigungsbereich mit kleineren Losgrößen und höherer Variantenvielfalt erweiterbar. Wie in Bild 1.2 aufgezeigt, verschiebt sich die Rentabilitätsschwelle zwischen manueller und roboterbasierter Fertigung, indem die Anlage bei geringeren Systemkosten des MRK-Systems gegenüber einer vollautomatisierten Lösung flexibler sein kann (Hägele, Schaaf et al. 2002).

Der Einsatz von Industrierobotern in der Fertigung lohnt sich besonders in Ländern mit hohen Lohnstückkosten. Dies zeigt sich neben der hohen Anzahl der eingesetzten Robotersysteme ebenfalls an einer großen Anzahl von Entwicklern und Herstellern von Robotersystemen in Japan, den USA, Deutschland und Schweden (Warnecke

1980). Durch den Einsatz von Robotersystemen zur Automatisierung einfacher Produktionstätigkeiten in personalintensiven Bereichen z. B. im Automobilbau bekam der Roboter Anfang der 1980er Jahre den Ruf eines Jobkillers, da er durch die Automatisierung von Arbeitsprozessen und Produktivitätssteigerungen zu massiven Personaleinsparungen führte (Wolfsteiner 1983).

In MRK-Anwendungen wird das Robotersystem nicht mehr genutzt, um die menschliche Arbeitskraft zu ersetzen. Vielmehr steht der Roboter als mitarbeiterzentriertes Assistenzsystem oder als Arbeitsmittel für den Mitarbeiter im Fokus der Entwicklungen. Gegenüber herkömmlichen Assistenzsystemen für physisch belastende Tätigkeiten, wie z. B. manuellen Hebehilfen, versprechen solche MRK-Systeme eine höhere Akzeptanz der Mitarbeiter durch geringeren Umstellungsbedarf, intuitivere Bedienung und eine höhere Effizienz, weil es mehr Automatisierungsmöglichkeiten gibt (Hölzel et al. 2015). Deshalb ist bei MRK-Anwendungen nicht mehr nur die Wirtschaftlichkeit von Robotersystemen interessant, sondern auch, welchen organisatorischen oder ergonomischen Mehrwert das MRK-System bietet (Bengler et al. 2012; Thomas et al. 2015).

Ein Ziel bei der Umsetzung heutiger MRK-Systeme als Assistenzsystem ist es, die Fähigkeiten des Menschen in der Fertigung durch den Roboter zu unterstützen. Gleichzeitig soll dabei eine größtmögliche Entscheidungsfreiheit für den Menschen bei der Gestaltung seiner Tätigkeit beibehalten werden (Christaller et al. 2001). Daneben werden MRK-Systeme in Anwendungen umgesetzt, in denen der Roboter nur als Arbeitsmittel in der Fertigung dient und dabei in direkter Nähe des Menschen in der Produktion arbeiten soll. Heutzutage wird als ein Treiber des Anstiegs der MRK-Entwicklungen häufig der demographische Wandel angeführt, der in den Industrienationen durch mehr ältere Arbeitnehmer danach verlangt, die Arbeitswelt neu zu ordnen. Gerade im produzierenden Gewerbe zeigt sich ein großes Potenzial, mit MRK-Systemen auf Leistungswandlungen älterer Arbeitnehmer einzugehen. Ziel dabei ist es, möglichen physischen Einschränkungen so weit entgegenzuwirken, dass die Erfahrung der Arbeitskräfte möglichst lange für einen wertschöpfenden Beitrag im Unternehmen erhalten bleibt (Spillner 2015).

In den letzten Jahren werden in der Industrie aufgrund der oben genannten Vorteile zunehmend wirtschaftliche MRK-Anwendungen konzipiert. Oft werden die Robotersysteme dabei im Kontext der vierten industriellen Revolution – Industrie 4.0 – als Technologie

genannt, mit der sich Produktionstechnologien als cyber-physische Systeme umsetzen und in der wandlungsfähigen Produktion der Zukunft optimal vernetzen lassen (Bauernhansl 2014). Die informatorische Kooperationsfähigkeit von Robotersystemen durch erweiterte Datenmodellierung bildet den Kern, um MRK-Systeme in die Produktionsumgebung zu integrieren, und ermöglicht so, Assistenzsysteme als physisch kooperierende Robotersysteme in der Fertigung umzusetzen (Naumann et al. 2014).

1.2.2 Formen der Mensch-Roboter-Kooperation

Bei der Umsetzung eines Fertigungsprozesses mit einer MRK-Anwendung in der Produktion stehen, analog zu einer herkömmlichen Automatisierung, folgende Aspekte im Vordergrund:

- Wirtschaftlichkeit der Lösung unter Berücksichtigung von Rentabilitätsanforderungen und Amortisationszeiten
- Zuverlässigkeit mit hoher Anlagenverfügbarkeit und Fehlertoleranz
- Hohe und gleichbleibende Produktqualität
- Arbeits- und Gesundheitsschutz
- Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Die Auslegung und Bewertung eines MRK-Systems hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu den genannten Aspekten variieren dabei mit dem zugrundeliegenden Kooperationsstyp in der MRK-Anwendung. Dabei können sich Kooperationsstypen durch die Art der Kooperation zwischen Mensch und Roboter bezüglich des Informations- und Materialaustausches, der Zuständigkeit bezüglich der Tätigkeit innerhalb des Prozessschrittes sowie der räumlichen und zeitlichen Form der Kooperation spezifizieren lassen, wie z. B. auf unterschiedliche Weise in (Thiemermann 2005), (Spillner 2015) und (Yanco, Drury 2004) vorgenommen.

Die wie in (Oberer-Treitz 2017) definierten übergeordneten MRK-Kooperationsstypen (KT) eignen sich für eine interaktionsorientierte Klassifikation von MRK-Systemen in der direkten physischen Kooperation:

- KT-1 Direkte Bewegungsvorgabe durch den Mitarbeiter:
Darunter fallen Robotersysteme, die z. B. durch Kraftunterstützung den Mitarbeiter physisch entlasten oder bei denen die manuelle Bewegungsführung des Robotersystems eingesetzt wird, um zur Programmierung von Positionen oder Bahnen zu dienen.

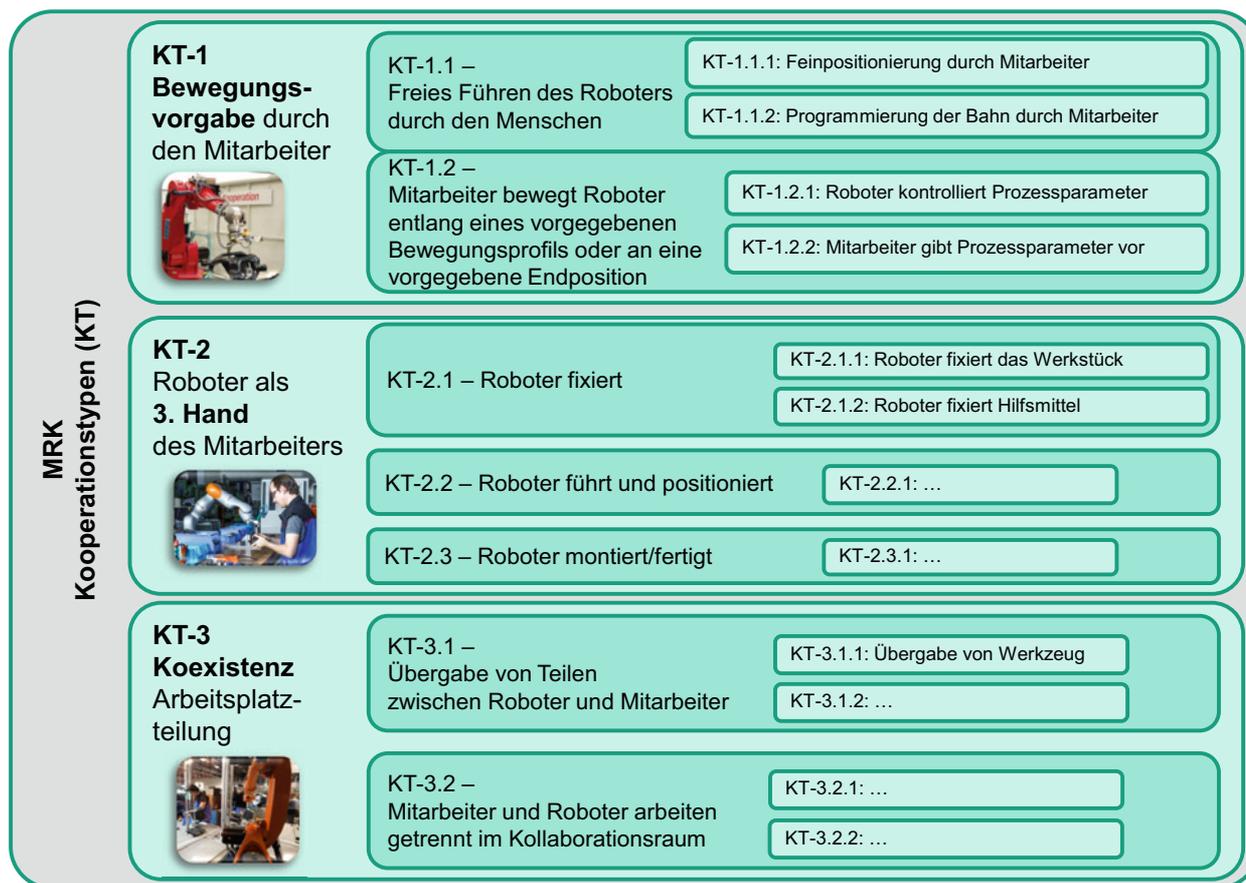


Bild 1.3 MRK-Taxonomie zur Auswahl und Bewertung von MRK-Kooperationstypen in einer Anwendung (Dietz, Oberer-Treitz 2015)

- **KT-2** Robotersystem als dritte Hand des Mitarbeiters: Hierbei unterstützt das Robotersystem den Mitarbeiter gezielt bei einem Fertigungsschritt. Diese Teilautomatisierung kann z. B. bedeuten, dass der Roboter Bauteile für den Menschen positioniert oder aktiv Fertigungsaufgaben ausführt.
- **KT-3** Mitarbeiter und Roboter in Koexistenz: Wenn sich Roboter und Menschen im gleichen Arbeitsraum bewegen, um getrennte Arbeitsschritte auszuführen, entspricht das im Rahmen der MRK einer Koexistenz. Dabei kann es zwischen einzelnen Fertigungsschritten an definierten Übergabestationen zum Austausch von Bauteilen oder Zubehör zwischen dem Roboter und dem Mitarbeiter kommen.

Wenn man die MRK-Kooperationstypen bezüglich der Arbeitsaufgabe oder der genutzten Arbeitsmittel des Robotersystems weiter unterteilt, führt dies zu vielen Untertypen, aus denen sich eine MRK-Taxonomie aufbauen lässt, wie in Bild 1.3 aufgezeigt und in (Dietz, Oberer-Treitz 2015) näher beschrieben. Diese Taxonomie eignet sich dazu, ein MRK-System für eine spezifi-

sche Zielanwendung bezüglich oben genannter Aspekte in der Fertigung zu bewerten und gegebenenfalls die Bewertung durch Priorisierung einzelner Kriterien anzupassen.

Bild 1.4 links zeigt zum Kooperationstyp KT-1 beispielhaft ein Industrierobotersystem, das der Mensch durch direkte Bewegungsvorgabe steuern kann. Dieser Kooperationstyp mit einem direkten physischen Kontakt durch den Bediener kann sowohl zur intuitiven Programmierung des Roboters genutzt werden, wie in (Meyer 2011) und (Heiligensetzer 2003) ausgeführt, als auch zur Gestensteuerung des Robotersystems während des Prozesses (Haddadin et al. 2010). Die Autonomie der Bewegung des Roboters kann dabei auf verschiedene Weisen eingeschränkt werden: von der Vorgabe einzelner Parameter, z. B. der Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit, über die Begrenzung einzelner Achsen bis hin zur Vorgabe fester Einzelpositionen oder der kompletten Bahn.

Beim Kooperationstyp KT-2 liegt der Fokus der Assistenzfunktion des Robotersystems darin, durch MRK



Bild 1.4 Links: Handgeführte Steuerung eines Industrieroboters durch direkte Bewegungsvorgabe (Quelle: Fraunhofer IPA); rechts: der LBR als dritte Hand des Mitarbeiters (Quelle: Fraunhofer IPA)

zusätzliche Zuführ-, Vereinzelungs- oder Fixierungseinrichtungen überflüssig zu machen. Dabei können Teilfunktionen des Fertigungsprozesses beliebig als autonome Tätigkeiten auf den Mitarbeiter oder den Roboter verteilt werden und Übergaben und Kooperationen als Positionen in bestimmten Zeitfenstern definiert werden, wie z. B. in Bild 1.4 rechts als Blindniet-Anwendung aufgebaut. Gegenüber einer starren Automatisierungslösung ergibt sich hierbei ein sehr flexibles Anlagenkonzept bezüglich der räumlichen Anordnung und der Optimierung von ergonomischen Anforderungen an die vom Menschen auszuführenden Teilprozesse. Im Gegensatz zu KT-3 erfolgt bei KT-2 stets eine bewusste Kooperation, bei der es zwischen Mensch und Roboter zu bestimmten Zeitpunkten des Prozesses zu einem physischen Kontakt kommt, sei es mit der Roboterstruktur selbst oder mit einem Werkzeug oder Bauteil, das der Roboter führt oder hält. Andere Formen der MRK, die unter KT-3 gelistet werden, behandeln Robotersysteme, deren Fertigungstätigkeit nach wie vor autonom durchgeführt wird. Dabei kann es jedoch aufgrund der Zugänglichkeit des Arbeitsraumes zu einem Kontakt zwischen Mensch und Roboter kommen, ohne dass dieser Kontakt für den Fertigungsschritt notwendig ist. Diese Art der reinen Koexistenz erfordert eine andere Betrachtung für die organisatorische oder wirtschaftliche Bewertung des Anlagenkonzeptes als beim Typ KT-2. Allerdings ergeben sich oftmals die gleichen sicherheitstechnischen Anforderungen an das Robotersystem, wie in Abschnitt 1.3 erläutert wird.

1.2.3 Beispielapplikationen mit Mensch-Roboter-Kooperation

Nach wie vor gilt, dass MRK-Systeme nicht die Vollautomatisierung in der Fertigung ablösen sollen oder können. Vielmehr soll durch MRK der Lösungsraum technischer Systeme für die Umsetzung eines Fertigungsprozesses erweitert werden. Dabei gilt es bei der Bewertung eines MRK-Systems die Vor- und Nachteile gegenüber einer manuellen oder einer vollautomatisierten Umsetzung gleichermaßen abzuwägen (Bild 1.5), wenn es um die Abschätzung der Renditeanforderungen einer Anlage geht.

Als die 5 Nutzendimensionen der MRK lassen sich definieren:

- **Abstand:**
Verringerter Platzbedarf durch Integration manueller und automatisierter Arbeitsplätze innerhalb einer MRK-Station
- **Ergonomie:**
Verbesserte Ergonomie durch Kombination der Stärken von Mensch und Maschine und gezielte Anpassung des Roboters als Assistenzsystem für einen Bediener
- **Ortsflexibilität:**
Erhöhte Ortsflexibilität durch Reduzierung der Zäune hin zu einer wandlungsfähigen Produktion
- **Intuitivität:**
Anpassung der Bedienung durch einfache, effiziente und verlässliche Programmierung
- **Peripherie:**
Reduktion der Peripherie durch integrierte Systemlösungen für schlankere Arbeitssysteme

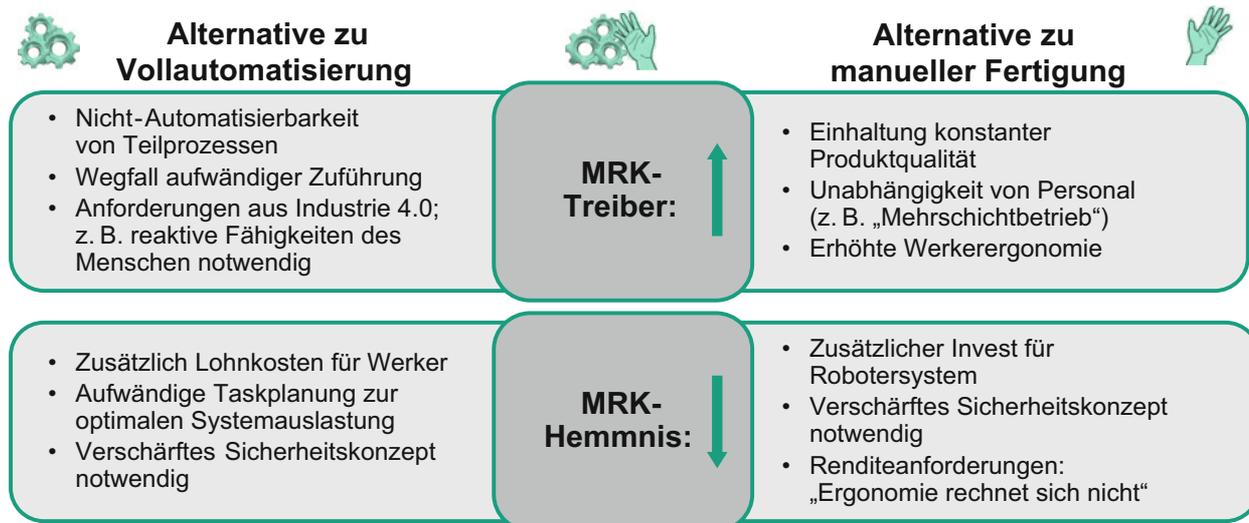


Bild 1.5 MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung

Erst durch die Zuordnung einer MRK-Lösung zu ihrem Beitrag in einer oder mehrerer dieser Nutzendimensionen ergibt sich die Motivation zur Umsetzung einer MRK-Applikation. Abschnitt 8.3 beschreibt dazu detailliert diese Nutzendimensionen und zeigt auf, welchen Einfluss dies bei der Implementierung von MRK-Systemen auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Robotersystems hat.

Im Folgenden werden MRK-Lösungen für konkrete Fertigungsaufgaben vorgestellt und die Stärken der Lösung gegenüber herkömmlichen Automatisierungssystemen diskutiert.

Montagezellen mit Arbeitsraumteilung zur sicheren Mensch-Roboter-Kooperation

Das Zellenkonzept, das im Rahmen des von der Baden-Württemberg Stiftung geförderten Projektes SILIA entwickelt wurde, beschreibt einen kooperativen Montageprozess auf engstem Raum. Dabei werden manuelle und automatisierte Arbeitsvorgänge an einem Bauteil – hier am Fraunhofer IPA implementiert für eine Batteriemontage – an einem Arbeitsplatz umgesetzt (Bild 1.6), indem zeitversetzt die Arbeitsräume A und B für den Menschen oder den Roboter freigegeben werden und somit ein paralleles Arbeiten innerhalb der

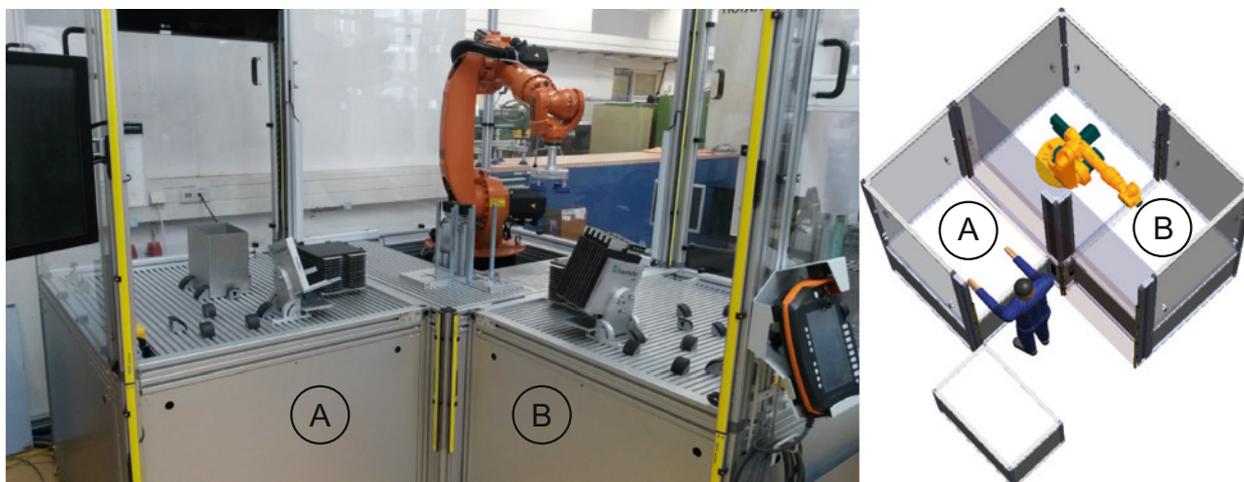


Bild 1.6 MRK-Montagezelle mit zeitlich versetzt genutzten kooperativen Arbeitsräumen (Quelle: Fraunhofer IPA)



Bild 1.7 MRK-Heckklappenmontage bei AUDI AG (Quelle: Audi AG)

Zelle ermöglicht wird. Dadurch können sensible Montageprozesse, deren Vollautomatisierung bisher an manipulativ komplexen Teilprozessen wie z.B. der Handhabung von biegeschlaffen Teilen scheitert, weiterhin an einem Arbeitsplatz umgesetzt werden.

Durch intelligente Kombination von sicheren Sensoren, von nicht sicherheitsgerechter, aber performanter 3D-Kameratechnik und von moderner Informations- und Kommunikationstechnologie kann dadurch ein sicheres, leistungsfähiges und adaptives Mensch-Roboter-Kooperationssystem entwickelt werden (Silia 2013). Sichere Lichtschranken zwischen den Arbeitsbereichen sowie deren Anbindung über eine Sicherheits-SPS an die Sicherheitssteuerung des Roboters garantieren, dass durch die Einhaltung von reduzierten Geschwindigkeiten des Roboters ein Auslösen der Lichtschranken zu jedem Zeitpunkt einen rechtzeitigen Stillstand aller gefahrbringenden Bewegungen des Roboters ermöglicht. Zusätzlich wird die Prozessstabilität dadurch verbessert, dass durch den Einsatz von Kameras die Position des Menschen relativ zum Robotersystem kontinuierlich überwacht wird und Abschätzungen bezüglich der zu erwartenden Bewegungen des Werkers in die Bahnplanung einbezogen werden. So werden Verletzungen der Arbeitsraumgrenzen, die zu einem Stopp des Prozesses führen würden, minimiert. Diese Form der intelligenten Arbeitsteilung des Roboters findet sich z.B. auch bei der von der Audi AG gezeigten MRK-Anwendung zum assistierten Einbau einer Heckklappe mit einem Schwerlastroboter, die in Bild 1.7 aufgezeigt wird. Der Roboter trägt das schwere Bauteil und positioniert es aufgrund von Sensordaten

exakt bezüglich der Karosserie, während sich die Aufgabe des Menschen auf die Verschraubung des Bauteils reduziert und er von den unergonomischen Hebetätigkeiten entlastet wird. Neben Laserscannern als sichere Sensorik, die zur Absicherung des Arbeitsraumes während der aktiven Bewegungen des Großroboters dient, wird dabei die Kommunikation zwischen Roboter und Mensch über Signalanzeigen und Projektionen umgesetzt, um die Kooperation nicht nur sicher, sondern auch effektiv zu gestalten (Huber 2015).

Integrierte mobile Systeme für die wandlungsfähige Produktion

Mobile Robotersysteme, die sich unabhängig von Festinstallationen mit ihrer Fertigungsfähigkeit unterschiedlichen Arbeitsstationen nach Bedarf anbieten können (Bild 1.8), versprechen den Durchbruch zur wandlungsfähigen Fabrik der Zukunft. Dazu werden hochintegrierte Systeme verlangt, die als skalierbare Produktionskomponente auf variierende Auftragsvolumina reagieren können (Bauernhansl 2016).

Im Rahmen des Forschungscampus ARENA2036¹ entwickelte das Fraunhofer IPA dazu ein Konzept eines mobilen Schraubassistenten für die Türmodulmontage, das in Bild 1.9 in verschiedenen Aufbauvarianten aufgezeigt ist. Als vollintegrierte mobile Arbeitsstation können auf einer flächenbeweglichen Plattform montierte Leichtbauroboter unterschiedliche Werkzeuge

¹ ARENA2036 – „Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles“. Die größte und führende Forschungsplattform für Mobilität in Deutschland in der die gesamte Wertschöpfungskette des künftig volldigitalisierten Fahrzeugs neu gedacht und umgesetzt wird.

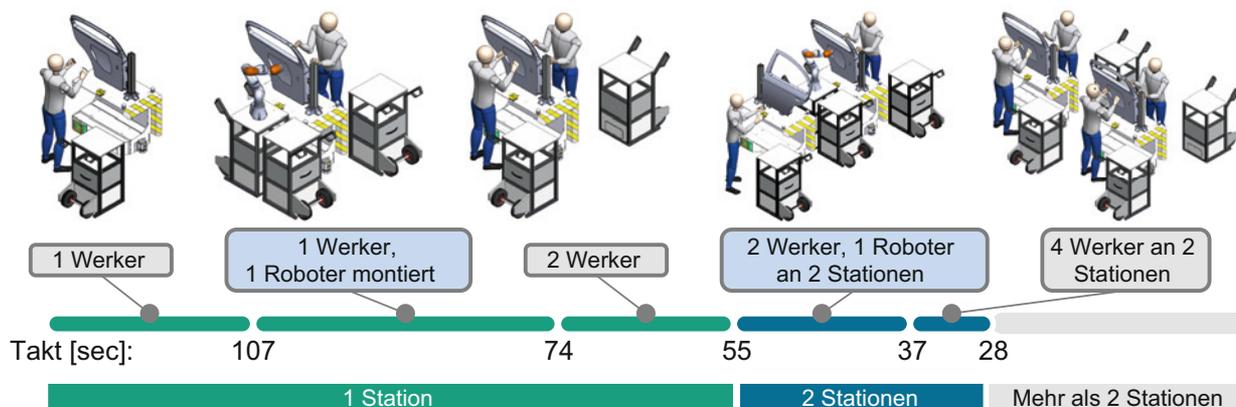


Bild 1.8 Skalierbarkeit, Modularität und Mobilität am Beispiel der Türmontage (Quelle: Fraunhofer IPA)

wie Greifer oder Schrauber nutzen. Durch die Anpassung der Werkzeuge und Aufnahmen an einen manuell ausgelegten Arbeitsplatz können Arbeitsinhalte entsprechend den Stärken von Mensch und Roboter systematisch aufgeteilt und eine dynamische Zuweisung an die Station entsprechend den verfügbaren Produktionskapazitäten angepasst werden (Verl 2016).

Weitere marktverfügbare mobile, integrierte Robotersysteme sind z. B. das System APAS assistant mobile von Bosch (Bosch 2017) (s. auch Kapitel 3) sowie der KUKA flexFELLOW (KUKA 2017c). Diese Systeme vereinen auch hier Roboter manipulator und Steuerungseinheit in einer mobilen Arbeitsstation und bieten je nach System zusätzliche integrierte Sensorik und Endeffektoren.

Einen noch höheren Grad an Mobilität des Produktionsmittels Roboter weisen frei navigierende mobile Robotersysteme auf, wie sie z. B. durch die Kombination Fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) mit Roboter manipulatoren entstehen. Dabei können nunmehr in-

tralogistische Prozesse auf die Steuerung der gesamten Fertigungsstraße erweitert werden.

So stellt z. B. die rob@work-Familie ein intelligentes Assistenzsystem zur Unterstützung des Werkers in der Fabrik dar (Bubeck 2014). Der rob@work 3, wie er in Bild 1.10 links abgebildet ist, besteht dabei aus einer omnidirektionalen mobilen Plattform und kann mit verschiedenen Roboterarmen zu einem vollständig integrierten Robotersystem umgesetzt werden, das mit dem Menschen an unterschiedlichen Arbeitssystemen kooperiert. Daneben bietet KUKA mit seinen mobilen Robotern KMR QUANTEC und KMR iiwa (Bild 1.10) eine Kombination aus ihrer mobilen Plattform omniMove und einem LBR iiwa an, die in ihrer Skalierbarkeit bezüglich Traglast und Reichweite ein vielfältiges Anwendungsspektrum abdecken (KUKA 2017d).

Für den Einsatz als MRK-System gilt es dabei, die unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen an die bewegte Plattform und die sichere Umsetzung der Mani-



Bild 1.9 Entwicklung einer mobilen Türmontagestation mit einem MRK-Robotersystem (Quelle: ARENA2036/Rainer Bez)

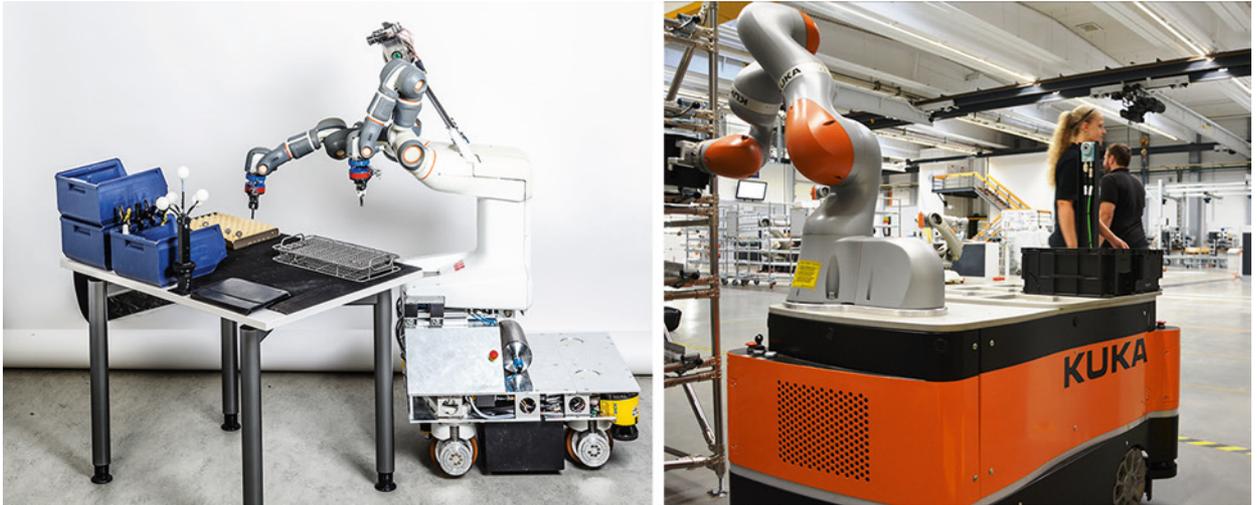


Bild 1.10 Frei navigierende mobile Roboter rob@work 3 und KMR iiwa (Quelle: Fraunhofer IPA, KUKA AG)

pulatorbewegungen aller an die Plattform angrenzenden Bereiche für einen gefahrungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Wie das in einer Fertigungsanwendung gelingt, zeigt KUKA beim Einsatz des KMR iiwa in seiner eigenen Produktion. Hierbei übernimmt der mobile Roboter KMR iiwa die Bereitstellung von Boxen mit Schrauben und anderen Kleinteilen an unterschiedlichen Arbeitsplätzen nach dem „Just-in-Sequence“-Prinzip. Laserscanner navigieren und sichern gleichzeitig Kollisionen der bewegten Plattform mit Menschen in der Produktionshalle ab, während die Kontaktregelung des Manipulators gefahrungsfreie Bewegungen des Roboterarmes ermöglicht (KE-NEXT 2016).

Handführung von Robotersystemen

Eine besonders intuitive Form der Programmierung eines Bewegungsablaufes eines Robotersystems ist das direkte Vormachen der gewünschten Bewegung durch Führen des Roboterarmes entlang der geforderten Bahn oder an einzelne Zielpunkte. Dabei ergeben sich durch die Möglichkeiten heutiger Robotersysteme, ihre Geschwindigkeit und Achspositionen sicher zu kontrollieren, vielfältige Möglichkeiten, Roboter einem größeren Bedienerkreis bereitzustellen und so auch Prozessexperten den Roboter als intelligentes Werkzeug an die Hand zu geben.

Der Grundgedanke dabei ist das WYSIWYG-Prinzip „What You See Is What You Get“, also die Überführung expliziter Vorgaben von Raum- oder Achskoordinaten in die Bedienung eines handgeführten Werkzeuges. Mit der handgeführten Programmierung – oder Programmierung durch Vormachen – beim Schweißen

kann z. B. der Zeitaufwand für einen ungeübten Bediener um ein Vielfaches gegenüber der herkömmlichen Programmierung durch Handbediengeräte reduziert werden (Meyer 2011).

Bild 1.11 zeigt unterschiedliche Systeme zur handgeführten Bewegungsvorgabe am Roboter. Dabei werden jeweils die vom Bediener am Roboter aufgebrauchten Kräfte nach Betrag und Richtung ausgewertet und als Bewegungsvorgaben für den Roboter umgesetzt. Auf die unterschiedlichen technischen Umsetzungen durch integrierte Sensorik in den Gelenken oder externe am Endeffektor angebrachte Kraftsensoren wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

Gerade handgeführte Prozesse bieten die Möglichkeit das Potenzial von Großrobotern für die MRK zu nutzen. So beschreibt z. B. (Kuss 2015) eine MRK-Zelle, in der durch intelligente Kombination von Handführung, automatischer Bauteillokalisierung und modellbasierter Bahnplanung für leistungsstarke Roboter auf effiziente Weise Schweißprogramme erzeugt werden können (Bild 1.11 oben rechts). Dabei werden neben der Handführung noch Eingabemodalitäten zur Parametrierung der Schweißbahn über ein Tablet angeboten.

Das Future Work Lab – Innovationslabor für Arbeit, Mensch und Technik in Stuttgart – präsentiert eine Applikation, in der ein Roboter das Teilehandling von Großbauteilen an einem manuellen Schweißarbeitsplatz vornimmt und dadurch dem Schweißer bei der Positionierung des schweren und sperrigen Bauteils assistiert (Bild 1.12). Solche Systeme bieten gerade für die Kleinserienfertigung den Vorteil, dass mit Standard-Arbeitstischen und flexiblen Aufnahmevorrich-