

HANSER



Leseprobe
zu
Handbuch
Mensch-Roboter-Kollaboration

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

ISBN (Buch): 978-3-446-45016-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-45376-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45016-5>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
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 Literaturverzeichnis	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
2.5	Literaturverzeichnis	69
3	Sensortechnik	71
3.1	Sensortechnik als Grundlage für die Mensch-Roboter-Kooperation	71
3.1.1	Messaufgaben für die Mensch-Roboter-Kooperation	71
3.1.2	Physikalische Sensoreffekte, Sensorsysteme und Signalverarbeitung in MRK-Systemen	73
3.1.3	Messunsicherheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit bei Sensoren	75
3.2	Sensoren zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung (externe Sensoren)	77
3.2.1	Resistive Sensoren	77
3.2.2	Kapazitive Sensoren	79
3.2.3	Induktive Sensoren	82
3.2.4	Akustische Sensoren	83
3.2.5	Optische Sensoren	85
3.2.6	Pneumatische Sensoren	93
3.2.7	Radarsensoren	96
3.2.8	Bioelektrische Sensoren	98
3.3	Sensoren zur Messung der inneren Zustandsgrößen eines Robotersystems (interne Sensoren)	102
3.3.1	Kraft- und Momentenmessung	102
3.3.2	Positions-, Weg- und Winkelmessung	108
3.3.3	Beschleunigungs- und Drehratenmessung	109
3.4	Literaturverzeichnis	112
4	Steuerungstechnik	117
4.1	Industrielle Steuerungen	117
4.1.1	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	118
4.1.2	Bewegungssteuerung	120
4.1.3	Sichere Steuerung	122
4.1.4	Sichere Antriebsfunktionen	124
4.2	Steuerungssimulation	133
4.2.1	Virtuelle Methoden der digitalen Fabrik	133
4.2.2	Erweiterung auf die Mensch-Roboter-Kooperation	166
5	Mensch-Roboter-Interaktion	169
5.1	Einleitung	169
5.2	Modalitäten zur Interaktion	173
5.2.1	Unimodale Interaktion unter Nutzung auditiver Schnittstellen	174
5.2.2	Unimodale Interaktion unter Nutzung taktiler Schnittstellen	177
5.2.3	Unimodale Interaktion unter Nutzung visueller Schnittstellen	178
5.2.4	Multimodale Interaktion unter Nutzung verschiedener Schnittstellen	179

5.3	Programmierung von Robotern	182
5.3.1	Roboter-zentrierte Programmierung	183
5.3.2	Aufgaben-zentrierte Programmierung	189
5.3.3	Führungs-zentrierte Programmierung	195
5.3.4	Benutzer-zentrierte Programmierung	199
5.4	Erkennung von möglichen Mensch/Roboter-Kollisionen	203
5.4.1	Grundlagen	206
5.4.2	Binäre Lokalisation	208
5.4.3	Lokalisation mit Einzelsensor	210
5.4.4	Lokalisation mit Sensorfusion	222
5.4.5	Vergleich der Methoden	235
5.5	Reaktion auf mögliche Mensch-Roboter-Kollisionen	235
5.5.1	Kollisionsentschärfung	237
5.5.2	Geschwindigkeitsregelung	240
5.5.3	Lokale Ausweichbewegung	245
5.5.4	Globale Ausweichbewegung	249
5.5.5	Vergleich der Verfahren	254
5.5.6	Systemstudie SIMERO	255
5.6	Koordinierung hybrider Mensch-Roboter-Teams	260
5.6.1	Grundlagen	261
5.6.2	Statische Team-Organisation	265
5.6.3	Semi-dynamische Team-Organisation	267
5.6.4	Dynamische Team-Organisation	269
5.7	Literaturverzeichnis	272
6	Planung, Simulation und Inbetriebnahme	277
6.1	Stand der Simulationstechnik und der virtuellen Inbetriebnahme	277
6.1.1	Ziele und Nutzen der Simulation	277
6.1.2	Roboter- und Arbeitszellensimulationssysteme	279
6.2	Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter	279
6.3	Prozesssimulation	284
6.3.1	Einordnung in bestehende Definitionen	284
6.3.2	Softwaresysteme zur ganzheitlichen Simulation von MRK-Produktionsprozessen ..	287
6.3.3	Innovative Ansätze zur virtuellen Auslegung von Mensch-Roboter-Umgebungen ...	293
6.4	Von der Simulation zur Inbetriebnahme	297
6.4.1	Virtuelle Inbetriebnahme mittels durchgängiger Planungskette	297
6.4.2	Unzureichende Absolutgenauigkeit von Industrierobotern	299
6.4.3	Steigerung der Absolutgenauigkeit durch Kalibriermethoden	300
6.4.4	Lokale kameragestützte Referenzierung zur Steigung der Positioniergenauigkeit ..	301
6.4.5	Automatisierte Greif- und Bahnplanung	301
6.5	Planung und Simulation von Sicherheit – Sensorsimulation	303
6.6	Austauschformate, CAX-Werkzeugkette	305
6.7	Literaturverzeichnis	308

7	Methoden zur erfolgreichen Einführung von MRK	311
7.1	Technische Randbedingungen	311
7.1.1	CE-Zertifizierung	311
7.1.2	Risikobeurteilung	316
7.1.3	Sicherheitsfunktionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration	316
7.1.4	Durchführung einer Kraftmessung	320
7.2	Planung einer MRK-Anwendung	323
7.2.1	Methodik von der Prozessanalyse zum Betriebsmittel	323
7.2.2	Dokumentation der Anforderungen	323
7.2.3	Morphologischer Kasten	324
7.2.4	Anforderungen	326
7.2.5	Beurteilung der Betriebsmittel	330
7.2.6	Bewertung der Ergonomie bei MRK-Anwendungen	332
7.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	334
7.3.1	Einordnung von MRK im Kontext der Wirtschaftlichkeit von Produktionsanlagen	335
7.3.2	Wirtschaftliche Vorteile von MRK im Vergleich zu klassischen Formen der Automatisierung	337
7.3.3	Wirtschaftliche Vorteile von MRK entlang des Lebenszyklus von Roboteranlagen	338
7.3.4	Anwendungsbeispiele	340
7.3.5	Entlohnung	343
7.3.6	Ausblick	345
7.4	Menschzentrierte Einführungsstrategie	347
7.4.1	Bedürfnisse des Menschen und Widerstände gegenüber Veränderung	347
7.4.2	Durchführung von Veränderungsprozessen und Steigerung der Mitarbeiterakzeptanz für MRK-Lösungen	349
7.4.3	Akzeptanzfaktoren für die Einführung von MRK-Systemen	352
7.4.4	Best Practice	354
7.4.5	Zusammenfassung und Chancen für die Zukunft	358
8	Branchenspezifische Applikationen	361
8.1	MRK-Applikationen in der Automobilmontage	361
8.1.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	361
8.1.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	364
8.1.3	Illustrierung von Beispielen	366
8.1.4	Zusammenfassung und Fazit	376
8.2	Flexible Automatisierung in der Elektronikmontage mithilfe von MRK-Systemen	377
8.2.1	Rahmenbedingungen und Herausforderungen in der Elektronikmontage	377
8.2.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	379
8.2.3	Beispielhafte Anwendungen von MRK-Systemen in der Elektronikproduktion	380
8.3	Anwendungsbeispiel: Montage von Hydraulikventilen	386
8.3.1	Darstellung der Anforderungen und Rahmenbedingungen	386
8.3.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	387
8.3.3	Illustrierung von Beispielen	391
8.4	Montage von Großgeräten	394
8.4.1	Darstellung der Anforderung und Rahmenbedingungen	394
8.4.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungsansätze	396

8.4.3	Illustrierung von Beispielen	396
8.4.4	Zusammenfassung	398
8.5	Anwendungsbeispiel: Intralogistik	399
8.5.1	Beweggründe für den MRK-Einsatz in der Intralogistik	399
8.5.2	Umsetzungsbeispiel zur Autonomisierung des Materialflusses im Hauptwertstrom	400
8.5.3	Umsetzungsbeispiel zur automatisierten Logistik von Verbrauchs- und Verbauteilen	401
8.5.4	Umsetzungsbeispiel zur Effizienzsteigerung der Kommissionierung	402
8.5.5	Zusammenfassung und Fazit	404
8.6	Anwendungsbeispiel: Robotergestützte Systeme in der Medizin	404
8.6.1	Normativer Rahmen	405
8.6.2	Einteilung medizinischer Robotersysteme	406
8.6.3	Umsetzungsbeispiele	407
8.6.4	Zusammenfassung und Fazit	410
8.7	Anwendungsbeispiel: Servicerobotik im Haushalt	412
8.7.1	Anforderungen und Rahmenbedingungen	412
8.7.2	Konzeptionelle branchenspezifische Lösungen	414
8.7.3	Umsetzungsbeispiele	416
8.7.4	Zusammenfassung und Fazit	417
8.8	Individuelle und aufgabenabhängige Unterstützung bei physisch beanspruchenden Tätigkeiten durch anziehbare Systeme	418
8.8.1	Einführung	418
8.8.2	Anforderungen und Rahmenbedingungen	420
8.8.3	Exemplarische Systemansätze	423
8.8.4	Entwicklungsvorgehen für körpergetragene physische Unterstützungssysteme	423
8.8.5	Potenziale	425
9	Entwicklungsrichtungen für aktuelle und zukünftige Anwendungen	429
9.1	Soft Robotics	429
9.1.1	Übersicht	429
9.1.2	Komponenten	430
9.1.3	Entwurfs- und Beschreibungsmethoden	435
9.1.4	Anwendungsgebiete	438
9.2	Software für die Roboterinteraktion mit dem LBR iiwa	443
9.2.1	Einführung	443
9.2.2	Eine Quelltext-offene Zustandsmaschine für die sichere MRK	443
9.2.3	OpenIGTLink-Schnittstelle	443
9.2.4	Medizinische Therapieplanung mit 3D-Slicer	444
9.2.5	Teleoperation mittels ROS-Schnittstelle und OpenIGTLink	447
9.2.6	Tablet-PC, Smartwatch und Mikro-PC-basierter Zustandswechsler am Endeffektor	447
9.2.7	Zusammenfassung und Ausblick	449
9.2.8	Literaturverzeichnis	450
	Stichwortverzeichnis	451

Autorenverzeichnis

Die Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller,
Geschäftsführer des ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, 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

Die Autoren

Dr.-Ing. Matthias Bartelt
Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

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

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

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

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

Dipl.-Ing. Matthias Brossog
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dirk Burkhard, M.Sc.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. Arnd Buschhaus
Hochschule Reutlingen, Fakultät Technik, Studienbereich Mechatronik, vormals Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Akos Csiszar
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Thomas Dietz
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

Miriam Drieß, M.Eng.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Adrian Fehrle, M.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Shan Fur, M.Sc.
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dipl.-Phys. Michael Gradmann
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Aaron Geenen, M.Eng.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Leenhard Hörauf
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Dr.-Ing. Alfred Hypki
Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Florian Jaensch, M.Sc.
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Anna Ketschau, M. A.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dipl.-Ing. Karl Kübler
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Lüder A. Kahrs
Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. Maximilian Landgraf
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Max-Heinrich Laves, M.Sc.
Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

Kai Lemmerz, M.Sc.
Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Ing. Ortwin Mailahn, B. A. RWTH
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Tobias Masiak, M.Eng.
ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Maximilian Metzner, M.Sc., M.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

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

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

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

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

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

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

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

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

Michael Riedl, M.Sc.
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Hannah Riedle, M.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Simon Roggendorf
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen - Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gundula Runge-Borchert, M.Sc.
Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Eike Schäffer, M.Sc., M.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Christian Scheifele, M.Sc.
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Stefan Scheifele
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart

Matthias Scholer, M.Sc. RWTH
ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Dipl.-Ing. (FH) Michael Scholz, M.Eng.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr. Michael Spangenberg
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Simon Storms, M.Sc.
(Oberingenieur), Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen - Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Sebastian Tauscher, M.Sc.
Institut für Mechatronische Systeme, Leibniz Universität Hannover

Julian Seßner, M.Sc.
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

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

Dr.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Matthias Vette-Steinkamp
ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gemeinnützige GmbH, Saarbrücken

Kornelius Wächter
 Brandenburgische Technische Universität
 Cottbus-Senftenberg

Maximilian Wagner, M.Eng.
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner
Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU), Professur für Fertigungstechnik (Pff), Institut für Mechatronik, Universität Innsbruck

Tobias Werner, M.Sc.
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

Mats Wiese, M.Sc.
Institut für Montagetechnik, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

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

Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg
Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT), Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU)

Dipl.-Ing. In Seong Yoo
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

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 Steu-

erungs- 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).

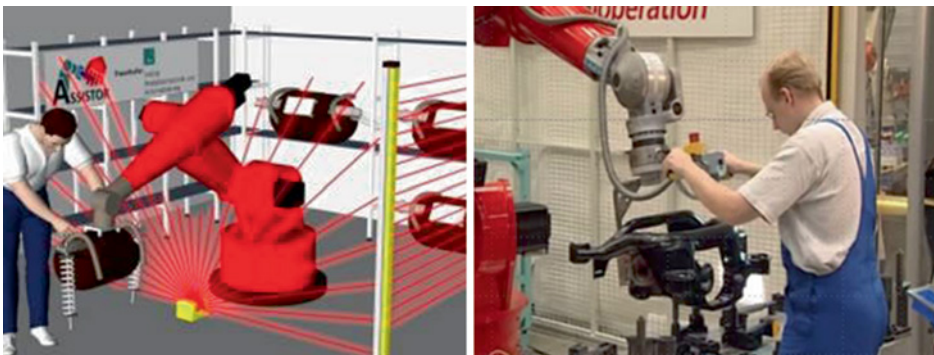


Bild 1.1
MRK-System zur Getriebemontage im Rahmen des BMBF-Projektes ASSISTOR (Quelle: Fraunhofer IPA)

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 Kapitel 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)

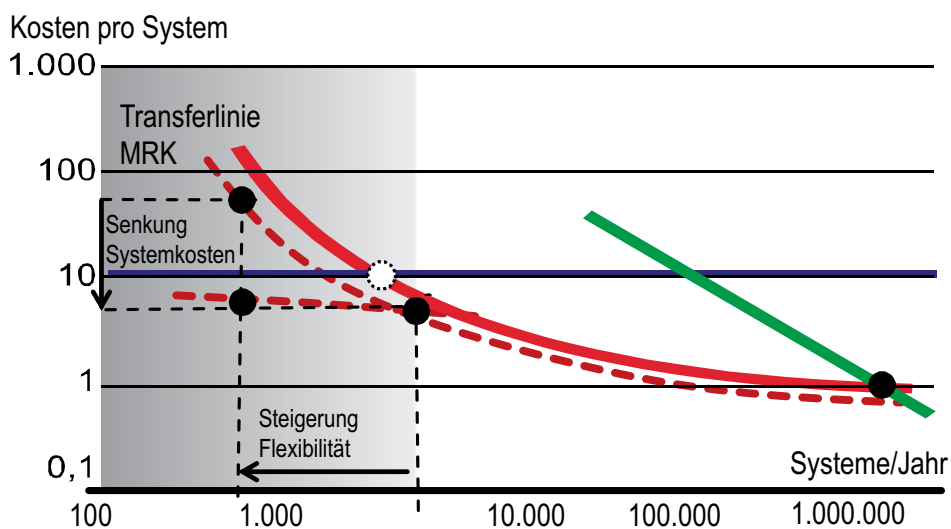
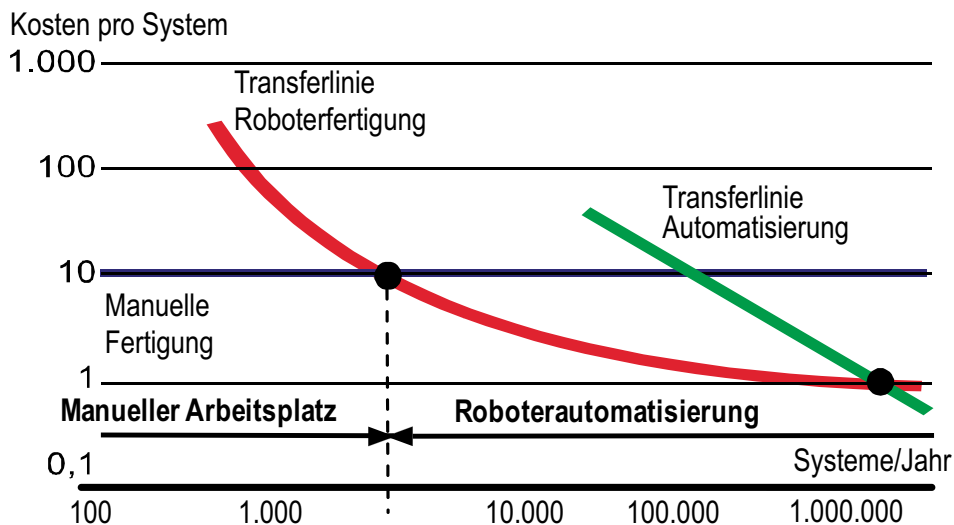


Bild 1.2
Sinkende Rentabilitätsschwelle zwischen manueller und roboterbasierter Fertigung durch MRK (Hägele, Schaaf et al. 2002)

- 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 Kapitel 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

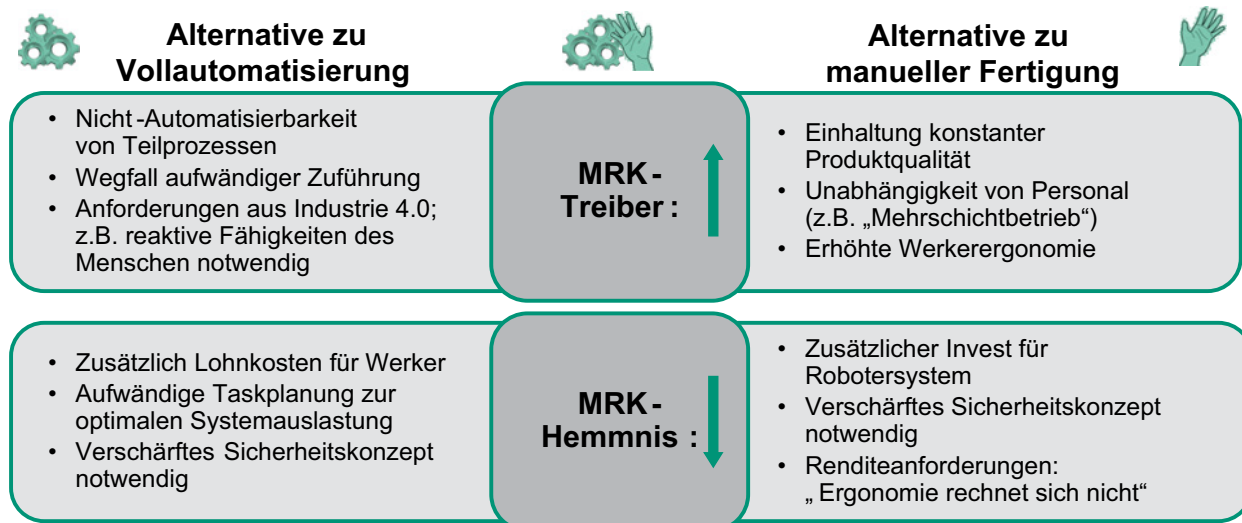


Bild 1.5 MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung

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. Kapitel 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

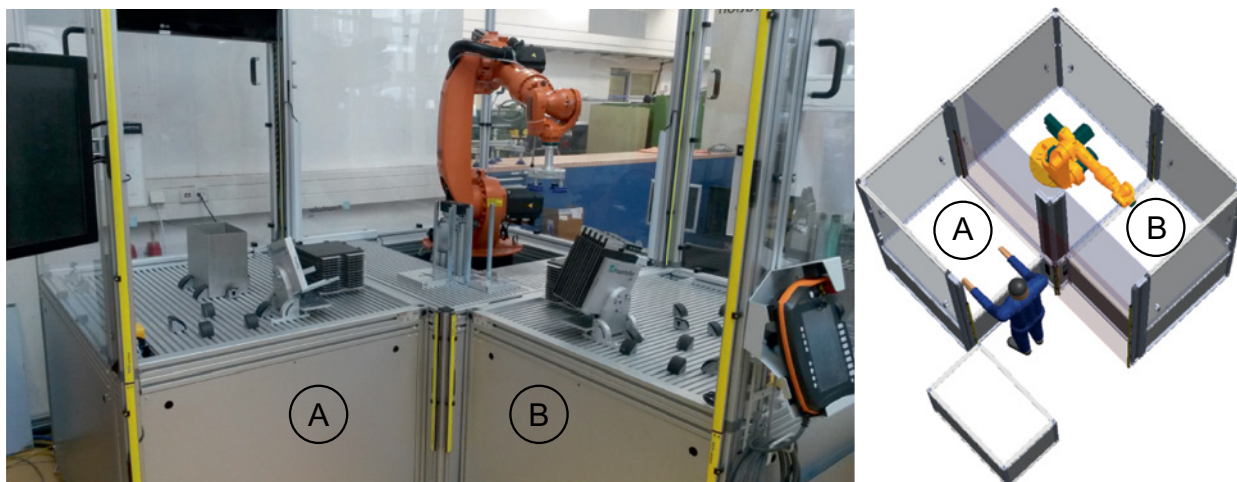


Bild 1.6 MRK-Montagezelle mit zeitlich versetzt genutzten kooperativen Arbeitsräumen (Quelle: Fraunhofer IPA)



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.

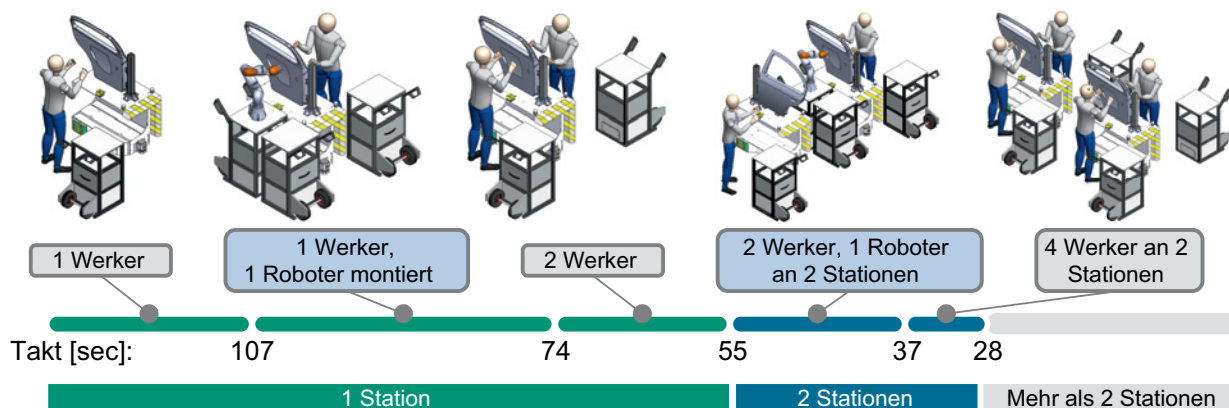


Bild 1.8 Skalierbarkeit, Modularität und Mobilität am Beispiel der Türmontage (Quelle: Fraunhofer IPA)

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-

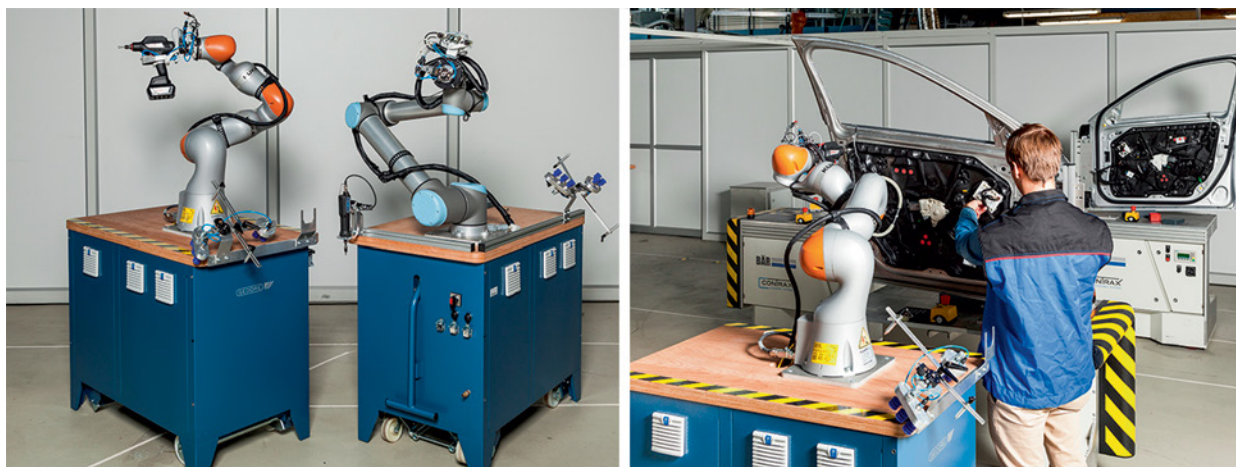


Bild 1.9 Entwicklung einer mobilen Türmontagestation mit einem MRK-Robotersystem (Quelle: ARENA2036/Rainer Bez)

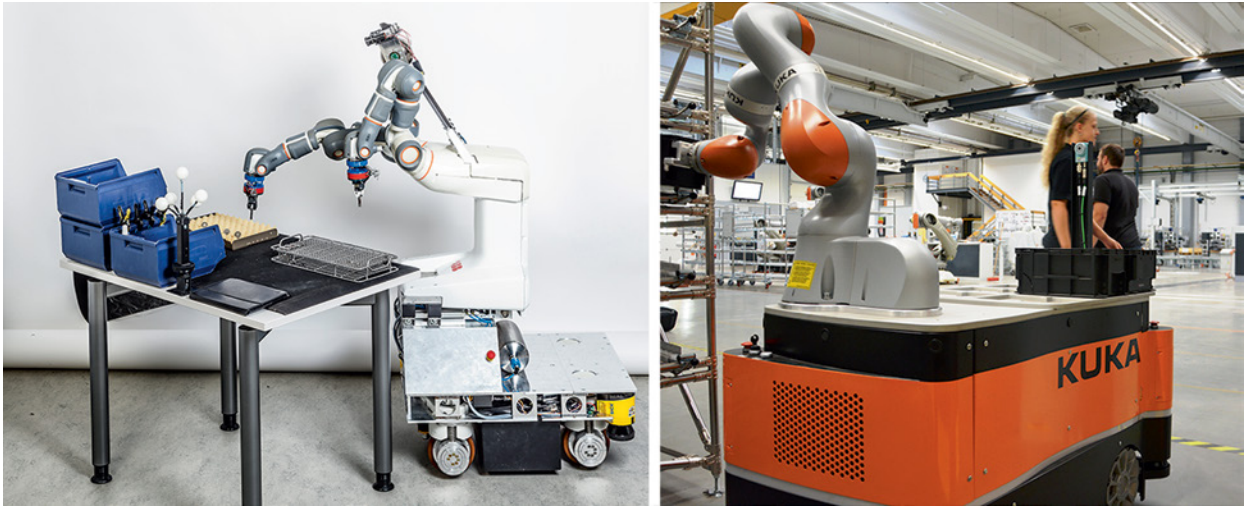


Bild 1.10 Frei navigierende mobile Roboter rob@work 3 und KMR iiwa (Quelle: Fraunhofer IPA, KUKA AG)

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 aufgebraachten 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-

Stichwortverzeichnis

Symbole

3D-Druck 436
3D-Kinematiksimulation 289

A

Abbildungsfunktionen 202
Absolutgenauigkeit 299
Abstandsberechnung
– hierarchische 242
Abstandsbestimmung 240
Abstandssensor 88
Abstandsüberwachung 45, 317
Abwechslungsreichtum 348
Achsgetriebemontage 366
Aktionsprimitivnetz 262
Aktoren 432
– pneumatische 433
Akzeptanzfaktoren 352
Anforderungen
– produktionstechnische 364
– sicherheitstechnische 363
Anforderungsdokumentation 323
Anlagenprojektierung 145
Annäherungsdetektoren 81
Anthropometrie
– individuelle 421
Antriebe 38
Antriebsfunktionen
– sichere 124
Anytime-Fähigkeit 237
APAS assistant 55
Applikationsplanung 323
Arbeitshandlungen 419
Arbeitsraumüberwachung 22
Arbeitsteilung 328
Arbeitszellensimulationssysteme 279
Artis-pheno-System 408

Assistenzroboter 439
Assistenzsysteme 409
Assistenzsystem für Werker 340
Aufgabenmodell 261, 265, 271
Aufgabenplanung 285
Aufgabenrepräsentation
– modellbasierte 194
– operationsbasierte 193
– zustandsbasierte 191
Aufgabenspezifikation 190
– bedingungsbasierte 193
Auflagekontrolle
– pneumatische 95
Ausfallwahrscheinlichkeit 76
Ausgabealphabet 194
Austauschformate 305
Ausweichbewegung
– globale 249
– lokale 245
Automatisierungslösungen 2
Automobilmontage 361
Automobilproduktion
– MRK-Einsatz 364
Autonomie 348
Autonomiegrad 172

B

Bahnplanung 301
– globale 235
– lokale 235
Balg-Aktor 433
Basisstandard P7000 352
Baukasten 139
Bauteilführung 371
Bedürfnisse des Menschen 348
Behaviour Unit 142
Belohnungsfunktion 203
Berechnungsaufwand 243

Beschleunigungsbereich
 - sicherer 129
 Beschleunigungsmessung 109
 Beschleunigungssensor 109
 Best Practice 354
 Betriebsaufwand 208
 Betriebsmittelauswahl 366
 Betriebsrat 350
 Bewegungsrichtung
 - sichere 129
 Bewertung
 - ergonomische 332
 Bezier-Splines 248
 Bildgebung
 - robotergestützte 408
 Biomechanische Grenzen 48
 BionicCobot 59
 BioRob 54
 Bremsenansteuerung
 - sichere 131
 Bremstest 131
 Brownfield-Planung 323
 Brushfire-Verfahren 240

C

CAD-Systeme 287
 capability indicator 267
 Care-O-bot 416
 Casero 416
 CAST Werkzeug 155
 CE-Kennzeichnung 311, 315
 Chirurgiesysteme
 - robotische 408
 CNC-Steuerung 135
 Cobot 315
 Codebook-Verfahren 216
 Condition Monitoring 83
 Co-Simulation 137
 CR-35iA 57
 Crash-Tests 25

D

Dauerstrich-Radar 96
 Dehnungsmessstreifen 104
 DES
 - Discrete Event System 194
 Design
 - in Soft Robotics 435

Dichtigkeitsprüfung 374
 Digitale Fabrik 287
 Digitaler Zwilling 134
 DIN EN 60601 405
 DIN EN ISO 12100 363
 Discrete Event Systems 194
 diskrete Ereignissysteme 194
 Drehgeber 39, 109
 Drehmomentenbegrenzung 50
 Drehmomentenmessung 106
 Drehmomentsensor 51, 57
 Drehratenmessung 109
 Drehratensensor 110
 Drucküberwachung 57

E

Ebenheitsmessung 372
 EG-Konformitätserklärung 315
 Eignungsgrade 282
 Einführungsstrategie 311
 - menschenzentrierte 347
 Eingabemethodik 183
 Einrichtaufwand 207
 Elastic Bands 248
 Elastic Strips-Ansatz 245
 Elastomeraktoren
 - dielektrische 432
 Elastomere 431
 Elektronikproduktion 377
 Endeffektor 40, 62
 Endeffektorairbag 69
 Engineering-Prozess 144
 Entlohnung 343
 Entwicklungsprozess
 - digitaler 145
 Ergonomie 332
 Ergonomieanalyse 396
 Ergonomiesimulation 291
 Exoskelett 419, 423
 Explorationseinsatz 440

F

Fähigkeitsindex 267
 Fahrzeugendmontage 374
 Fast Research Interface 188
 Fehlerhandhabung 389
 Fertigung
 - in Soft Robotics 436

Flächenkamera 89
 Flexibilität 236
 FlexshapeGripper 68
 Formgedächtnislegierungen 432
 Formhand 67
 Forschungscampus ARENA2036 10
 Fügeprozesse 366, 369
 Führen 195
 Führung 350
 Functional Mock-up Interface 137
 Funktionale Sicherheit 76
 Funktionsobjekte 148
 Funktionsobjektstruktur 148
 Funktionsprüfung 381
 Fuzzy-Logic 75

G

Gefährdungsanalyse einer MRK-Anwendung 28
 Gefährdungsrisiko 31
 Gehäuseverschraubung 382
 Geschwindigkeitsregelung 235, 240
 Geschwindigkeitsüberwachung 45, 126, 317
 Gestaltungsansatz
 - menschenzentrierter 355
 Gewinnabschätzung 203
 Gewinnfunktion 203
 GidK-Simulator 161
 GidK-Systeme 160
 Gießen von Aktoren 436
 Glattheit 237
 Greifer 40
 - bionische 67
 - nachgiebige 67
 Greifertechnik 62
 Greiferwechselsysteme 61
 Greifplanung 301
 „Griff in die Kiste“ 160
 Großgerätemontage 394

H

Handführung 12, 42, 44, 316
 Handhabung 439
 Handhabungsgerät 340
 Handhabungsprozess 371
 Handhabungstechnik 147
 Harmonisierte Normen 314
 Hidden Markov Modelle 268
 Hierarchical Task Network 270

Hilfsprozesse 368
 HiL-Simulation 134
 HiLS-Modellgenerierung 143
 Hindernisdetektion 205, 212
 Hindernislokalisierung 205
 - probabilistische 258
 HTN 270
 Hydraulikventile
 - Montage 386
 HyLight 393

I

Implementierung 365
 Implementierungsaufwand 208, 215, 237
 Implementierungsphase 355
 Inbetriebnahme
 - virtuelle 298
 Industrial Robot Language 188
 Inertialsensoreinheit 111
 inkrementelle Planung 237
 Interaktion 173
 - auditive 174
 Interaktionsformen 170
 Interaktionsrollen 170
 Intralogistik 399
 IRL 188
 ISO/TS 15066 363

J

Jamming 432
 Jamming-Mechanismus 67

K

Kalibrierung 300
 Kamerakalibrierung 211
 Kausalitätsbeziehungen 272
 Kinematiksimulation 289
 Klassifikationsmethoden 202
 Kollaborationsarten 44, 71
 Kollisionsentschärfung 235, 237
 Kollisionsfolgenabschätzung 23
 Kollisionspotenzial 27
 Kollisionspunkte 48
 Kollisionssensor 57
 Kollisionstest 26
 Kommissionierung 402
 Kommunikation 349, 415

Kommunikationskanäle 172
 Kompetenz 348
 Komponentenprüfung 380
 Konformitätserklärung 315
 Koordinierungsverfahren 266, 271
 Körperhaltungsanalysen 291
 Kosten
 - einer Überwachungslösung 216
 Kraftbegrenzung 45, 64, 318
 Kraftmessung 102, 320
 Kraft-Momentensensorsystem 107
 Kraftsensorik 57
 KRL 185
 Kuka-proprietäre Sprache 185

L

LBR iiwa 51
 LdV 202
 Lebenszyklus 338
 Leichtbauroboter 3
 Leistungsbegrenzung 45, 318
 Leistungsmerkmale 4
 Lernen durch Vormachen 200, 202
 Lichtgitter 87
 Lichtschranke 87
 Lichtschrankenzaun 209
 Lichtvorhang 87
 LIDAR-Sensor 89
 Logistik 399
 - automatisierte 401
 Lokalisation
 - binäre 208
 - mit Einzelsensor 210
 - mit Sensorfusion 222
 - mit Tiefenkamera 219
 - probabilistische 221
 Lokalisationsstrategie 208
 Lösungsstruktur 150

M

Manipulatorsystem 408
 Maschinenlernen 202
 Master-Slave-Programmierung 42
 Materialien
 - in Soft Robotics 430
 Medizinische Therapieplanung 444
 Medizinroboter 405

Medizintechnik 439
 - robotergestützte Systeme 404
 Menschmodell 291, 295, 397
 Mensch-Roboter-Fähigkeiten 327
 Mensch-Roboter-Kollisionserkennung 203
 Mensch-Roboter-Kooperation
 - Formen der 6
 Mensch-Roboter-Teams 260
 Mentale Modelle 260
 Messaufgaben 72
 Messfehler 75
 Minimalsteuerung 149
 Mitarbeiterakzeptanz 347, 349
 Mitarbeiterereinbindung 356
 Mitarbeiterschulungen 351
 Mobilität 415
 Modalitätskompetenz 181
 Modellierung
 - dynamische 437
 - kinematische 437
 Momentenmessung 102
 Momentensensor 105
 Montageablaufplanung 280
 Montageanwendungen 64
 Montagelinien 365
 Montageplanung 266
 Montagevorrangraph 282
 Montagezellen 9
 Morphologie
 - des Robotersystems 172
 morphologischer Kasten 324
 Motion Capturing-Systeme 294
 Motivation 350
 MRK-Anwendung 323
 MRK-Applikationen 362
 MRK-Arbeitsplätze 343
 MRK-Planung 286
 Multiagenten-Bahnplanung 259
 MultichoiceGripper 68
 Mykie 416

N

Näherungssensor 54, 80
 Nocken
 - sicherer 130
 Notfallbremsung 238
 Nutzwertanalyse 332

O

OctArm VI 433
 OctopusGripper 68
 Offline-Programmierverfahren 43
 OpenIGTLink 444
 OpenIGTLink-Kommunikation 447
 Owako Work Analyse System 396

P

Panda 53
 Parallelkinematik 39
 PARO 410
 PdV 200
 Pepper 407
 Peripherie 60
 Pervasiveness 207, 209, 215
 Pflegeroboter 410
 Photohülle 231
 plan recognition 272
 Planungssystem 190, 192
 Playback-Programmierung 195, 198
 PLM-Systeme 279
 Pneumatische Aktoren 58
 Pneumatische Netzwerke 433
 Polymere 431
 Positioniergenauigkeit 301
 Positionserkennung 83
 Potenzialbewertung 365
 Potenzialfeld-Ansatz 245
 Präzedenzbeziehung 265
 Probabilistic Roadmaps 249, 251
 Product Lifecycle Management-Systeme 279
 Produktanalyse 365
 Programmablauf
 – in einer SPS 120
 Programmieren durch Vormachen 200
 Programmiersprachen 184
 – für SPS 118
 Programmierung
 – aufgabenorientierte 43
 – Aufgaben-zentrierte 189
 – Benutzer-zentrierte 199
 – kinästhetische 198
 Programmierung von IR 41
 Programmierunterstützung 59
 Programmierverfahren
 – hybride 59
 Programmsynthese 190

Prozessanalyse 326
 Prozessdesign 320
 Prozessentwicklung 366
 Pseudo-Likelihood 233

Q

Qualifikation 351
 Qualitätskontrolle 390

R

Radarsensoren 96
 RAPID 186
 Rapidly-Exploring Random Trees 249
 Raycast-Verfahren 164
 Reaktion 206
 Rechenaufwand 236
 Rechenzeit 208, 215
 Regelung
 – bei Soft Robotics 438
 Regressionsmethoden 202
 Rehabilitation 410
 Rehabilitationstechnik 439
 Reinforcement Learning 203
 Risiko 14
 Risikobeurteilung 14, 316
 Risikobewertung 313
 Robot Design 320
 Roboter
 – nachgiebiger 238, 239
 Roboterfähigkeiten 261
 Roboterkinematik 39
 Roboterprogrammierung 182
 Robotersicherheit 14
 Robotersimulationssysteme 279
 Robotersteuerung
 – Architektur 121
 Roboterunfälle 17
 Roboterzelle 93
 Robotics 2020 169
 Robot Operating System 447
 ROS 447
 Rückprojektion des Roboters 218

S

Safe Acceleration Range 129
 Safe Brake Control 131
 Safe Brake Test 131

- Safe Cam 130
 Safe Direction 129
 Safely Limited Speed 126
 Safe Maximum Acceleration 129
 Safe Maximum Speed 129
 Safe Operating Stop 125
 Safe Speed Monitor (SSM) 129
 Safe Speed Range (SSR) 126
 Safe Stop 1 (SS1) 125
 Safe Stop 2 (SS2) 126
 Safe Torque Off 124
 SafetyEye 397
 SAR 129
 Sawyer 56
 SBC 131
 SBT 131
 SCA 130
 Schulungsmaßnahmen 351
 Schutzeinrichtungen 41
 Schweißaufgaben 341
 SDI 129
 Seilzugaktoren 433
 Semantik-Mapping 157
 Sensordatenfusion 74
 Sensoreffekte 73
 Sensoren 319
 - akustische 83
 - bioelektrische 98
 - hochflexible 434
 - induktive 82
 - kapazitive 79, 434
 - optische 85
 - optoelektronische 435
 - pneumatische 93
 - resistive 77, 434
 Sensorfusion 223
 - probalistische 233
 Sensorfusion zur Photohülle 230
 Sensorsysteme 73
 Sensortechnik 71
 Serviceroboter 405, 414, 439
 Servicerobotik
 - im Haushalt 412
 Sicher abgeschaltetes Moment 124
 Sicherer Betriebshalt 125
 Sicherer Stopp 125
 Sicherer Stopp 2 126
 Sichere Steuerungen 122
 Sicherheit 236, 239
 Sicherheit einer Maschine 14
 Sicherheitsbewertung 239
 Sicherheitsfunktionen 316
 Sicherheitsplanung 303
 Sicherheitsprinzipien der MRK 20
 Sicherheitsstrategien 21
 Sicherheitstechnik 40
 Signalverarbeitung 74
 SIMERO 255
 Simulationschnittstelle 157
 Simulationsstudie 278
 Simulationstechnik 277
 Skillparametrierung 392
 SLS 126
 SMA 129
 Smart Home 415
 SMRobotics1 386
 SMS 129
 Soft Robotics 429
 Solver-Systeme 192
 SOS 125
 soziale Aspekte 352
 Spaltmessung 372
 Speicheraufwand 236
 Speicherprogrammierbare Steuerungen 118
 Spracheingabe 179
 SPS 118
 SPS-Programmcode
 - testen 152
 SS1 125
 SS2 126
 SSM 129
 SSR 126
 Statistisches Lernen 202
 Steuerungssimulation 133
 Steuerungstechnik 117
 STO 124
 Stoßdämpfermontage 375
 Stückkosten 336
 Systemmodell 202

T

- Task Frame Formalismus 262
 TCN 270
 Teach-In Programmierung 198
 Team-Organisation 264
 - dynamische 269
 - semi-dynamisch 267

Technische Dokumentation 315
 Technologieeinführung 350
 Telemanipulationssysteme 408
 Teleoperation 196
 Telepräsenzsysteme 407
 Temporal Constraint Networks 270
 Testbench 154
 Testframework
 – Schnittstellen 156
 Testumgebung 356
 Tiefenkamera 90
 Tolerierbares Risiko 14
 Transportroboter 403
 Transportsystem
 – autonome 401
 Triangulation 91
 Triangulationssensor 88
 Türeineinbau 371
 Türmontagestation 11

U

UAS-Analyse 292
 Überlebenswahrscheinlichkeit 75
 Überwachungslösung 206
 – Einrichtaufwand 215
 Ultraschallsensoren 83
 Umgebungswahrnehmung 263
 Umrüstbarkeit 337
 Umweltmodellierung 190
 Undichtigkeitsprüfung 368
 UND-/ODER-Baum 265
 Unfallanalyse 16
 Universal Research System for varioUs LAParoscopic
 interventions 448
 Unterstützungssystem 420, 423
 UR3 56
 URScript 188
 URSULA-System 447
 UWB-Radar 97

V

Vakuumgreifer 66
 Validierung 314
 Variantengenerierung 149
 VDI-Richtlinie 4499 285
 Veränderungsmodell 350
 Veränderungsprozesse 349
 Verbundenheit 348

Verletzungskriterien 25
 Verletzungspotenzial 28
 Verletzungsrisiko 28
 Verstärkendes Lernen 203
 VIBN 134
 Virtuelle Inbetriebnahme 134, 151
 Virtuelle Steuerungstestbench 154
 visuelle Hülle 224
 Vollständigkeit 237
 Vordergrund-Hintergrund-Trennung 211
 Vorhersagbarkeit 237
 Vormachen 59
 Voxel 224, 242

W

Walk-Through 198
 Weggeber 109
 Weltmodell-Komplexität 236
 Werkerinformationssysteme 295
 Werkzeuge
 – MRK-fähige 66
 Wiederverwendbarkeit 139, 346
 Wirtschaftlichkeit 335
 Wörterbuch-Verfahren 216
 WYSIWYG-Prinzip 12

Y

YuMi 51

Z

Zielkonflikt 16
 Zustandsautomaten 194
 Zustandsmaschine 443
 Zustandsübergangsfunktion 195
 Zuverlässigkeit 75