

HANSER



Leseprobe

zu

Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration

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

Print-ISBN: 978-3-446-47411-6
E-Book-ISBN: 978-3-446-47460-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446474116>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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).

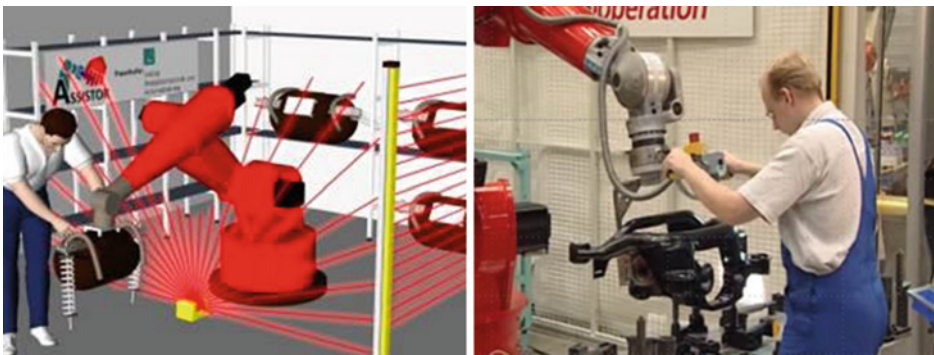


Bild 1.1
MRK-System zur Getriebemontage im Rahmen des BMBF-Projektes ASSISTOR (Quelle: Fraunhofer IPA)

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 Thiernermann in (Thiernermann 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 (Thiernermann 2005)):
- Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an geänderte Umgebungsbedingungen
 - Sensorische Fähigkeiten
 - Manipulationsfähigkeit unterschiedlicher Materialstrukturen (z. B. biegschläffer Teile)

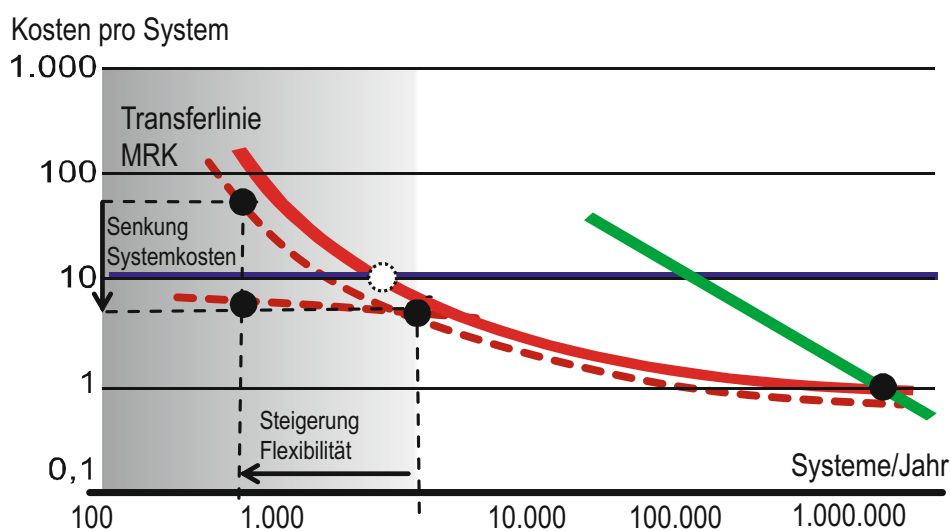
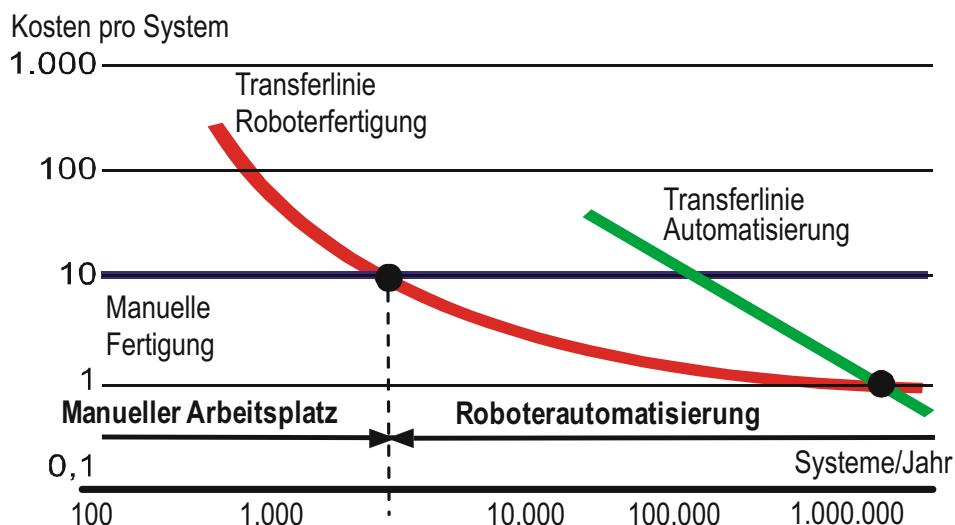


Bild 1.2
Sinkende Rentabilitätsschwelle zwischen manueller und roboterbasierter Fertigung durch MRK (Hägele, Schaaf et al. 2002)

- 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.

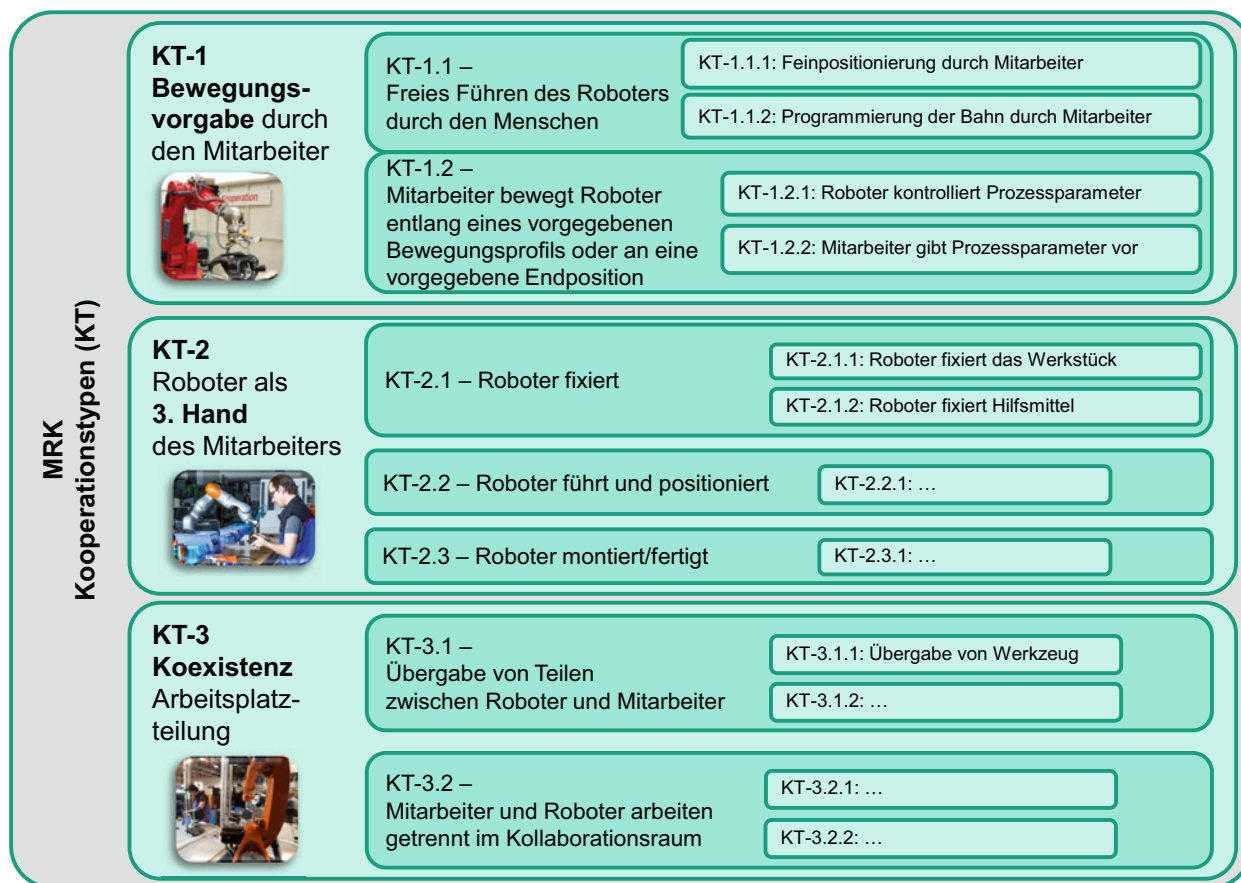


Bild 1.3 MRK-Taxonomie zur Auswahl und Bewertung von MRK-Kooperationstypen in einer Anwendung (Dietz, Oberer-Treitz 2015)

- **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 Bewegungsvergabe (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

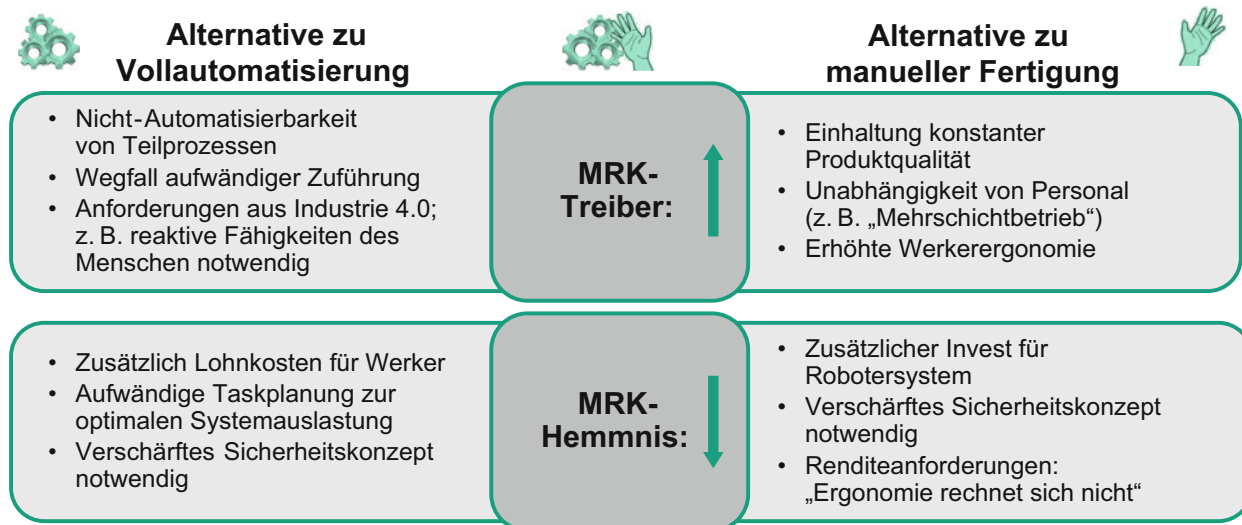


Bild 1.5 MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung

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

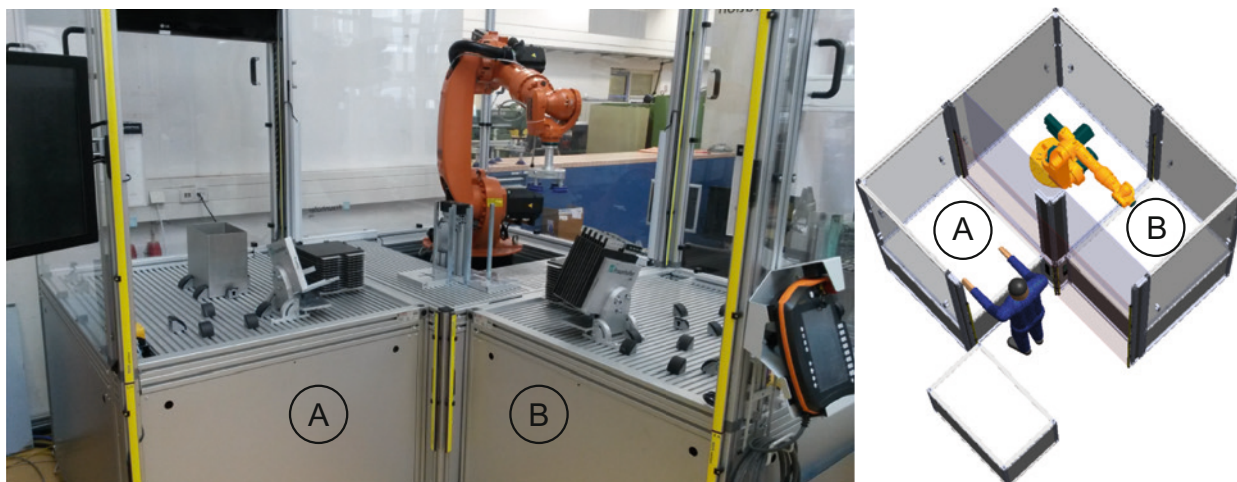


Bild 1.6 MRK-Montagezelle mit zeitlich versetzt genutzten kooperativen Arbeitsräumen (Quelle: Fraunhofer IPA)



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.

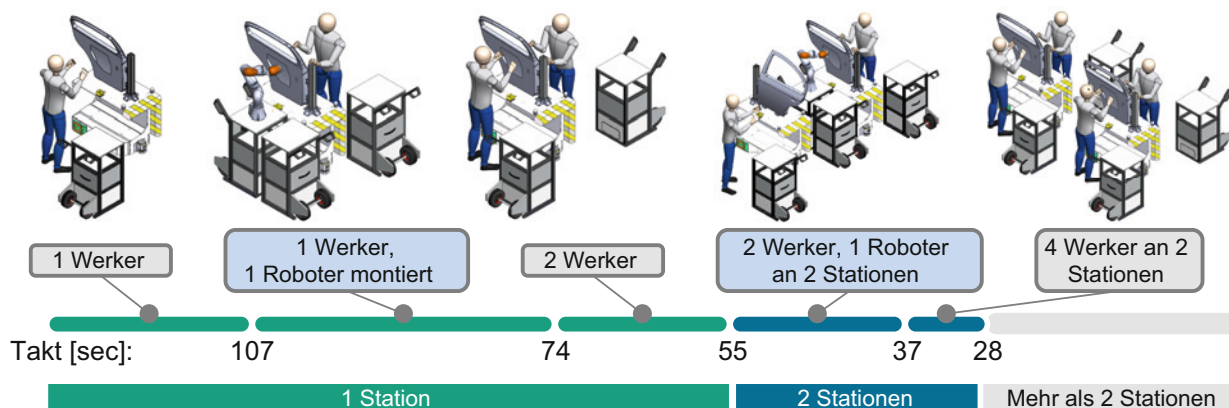


Bild 1.8 Skalierbarkeit, Modularität und Mobilität am Beispiel der Türmontage (Quelle: Fraunhofer IPA)

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)

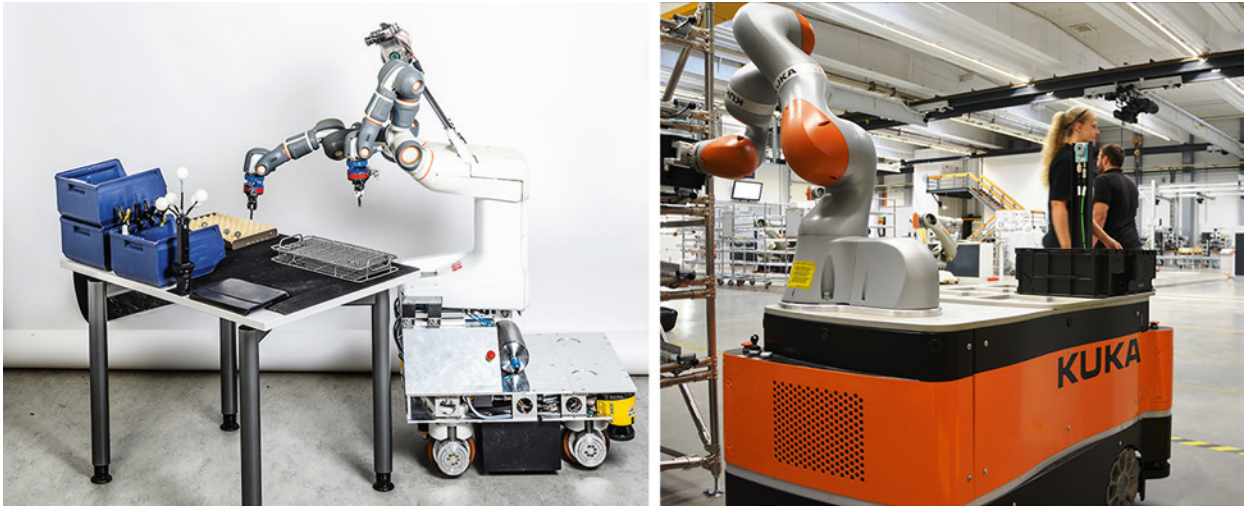


Bild 1.10 Frei navigierende mobile Roboter rob@work 3 und KMR iiwa (Quelle: Fraunhofer IPA, KUKA AG)

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-

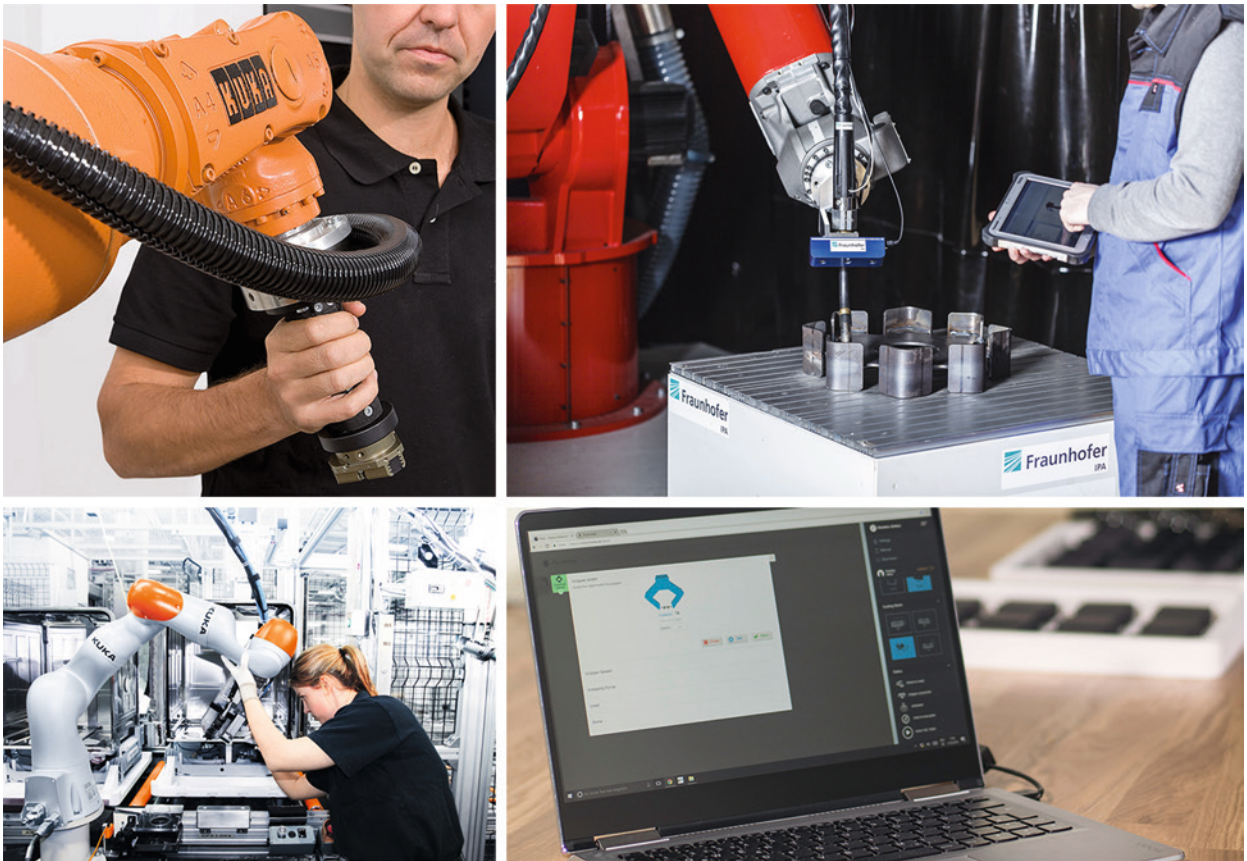


Bild 1.11 Handgeführte Robotersysteme (Quelle: MRK-Systeme, Fraunhofer IPA, KUKA, FRANKA EMIKA GmbH)



Bild 1.12
MRK-Großroboter zur Handlingsunterstützung im Future Work Lab (Quelle: Fraunhofer IPA, Rainer Bez)

tungen eine große Anzahl von Bauteilen mit demselben Robotersystem bearbeitet werden kann.

Vielfach lassen sich MRK-Anwendungen sicher und effizienter gestalten, wenn der Roboter mithilfe einer Arbeitsraumüberwachung über die Anwesenheit eines Bedieners in Kenntnis gesetzt wird. Neben dem Effekt, dass dadurch ein MRK- und ein vollautomatischer Betrieb am gleichen System implementiert werden kann, kann auch die Prozessstabilität erhöht werden. So können dem Bediener Angaben über den Status des Roboters und angegliederter Maschinen angezeigt und die Auslastung der Anlage besser geplant werden. Dazu stellt z. B. (Bdiwi 2017) eine zonenbasierte Roboterregelung vor, indem aus einer Kombination von sicherer Sensorik und kamerabasierter Überwachung Geschwindigkeit und Reichweite des Roboters im Betrieb angepasst werden können, um eine störungsfreie Kooperation von Bediener und Roboter umzusetzen.

1.3 Robotersicherheit

Bei Robotersystemen in der Fertigung handelt es sich um Maschinenanlagen, die sich als mit einem Antriebssystem ausgestattete bewegliche Einheiten definieren, die für eine konkrete Anwendung aufgebaut werden. Robotersysteme fallen somit unter den Zuständigkeitsbereich der Maschinenrichtlinie (MRL) (Maschinenrichtlinie 2006). Dadurch ist für den Einsatz eines Robotersystems in der Fertigung in der Europäischen Union (EU) geregelt, welche grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen einzuhalten sind. Die Vorgaben, die daraus für den Betrieb eines Robotersystems gelten, müssen genauso für die Anwendung von MRK-Systemen berücksichtigt werden. Die sich daraus ergebenden Aspekte werden im Folgenden herausgearbeitet.

1.3.1 Anlagensicherheit und Risikobeurteilung für Robotersysteme

Das Kernelement der Vorgabe aus der MRL (die in den jeweiligen EU-Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt ist) ist eine Risikobeurteilung für jedes Robotersystem. Ziel der Durchführung dieser umfassenden Risikobeurteilung ist es zunächst, dass sich der Betreiber bewusst mit allen möglichen Gefährdungen, die mit dem Betrieb der Anlage verbunden sind, sowie

daraus resultierenden Risiken auseinandersetzt. Zudem muss er Schutzmaßnahmen umsetzen, die die Risiken minimieren. Dazu wird im ersten Schritt eine Risikoanalyse durchgeführt, um Gefährdungen an der Anlage zu identifizieren und das damit verbundene Risiko einzuschätzen. In einer anschließenden Risikobewertung wird dann beurteilt, ob eine ausreichende Risikominderung durch technische oder organisatorische Schutzmaßnahmen erreicht wird, sodass ein sicherer Betrieb der Anlage gewährleistet werden kann (DIN EN ISO 12100:2011-03 2011).

Dabei definiert sich die Sicherheit einer Maschine nach DIN EN ISO 12100 als:



Sicherheit einer Maschine

Fähigkeit einer Maschine ihre vorgesehene Funktion während ihrer Lebensdauer auszuführen, wobei das Risiko für Personen hinreichend verringert wurde (DIN EN ISO 12100:2011-03 2011).

Als Risiko gilt dabei:



Risiko

Kombination aus Schadensausmaß infolge der Gefährdung und der Eintrittswahrscheinlichkeit des zugrundeliegenden Schadens (DIN EN ISO 12100:2011-03 2011).

Die Risikoanalyse einer Anlage, wie in (DIN EN ISO 12100:2011-03 2011) beschrieben, ergibt nach einem iterativen Zyklus von Risikoabschätzung und Risikominderung durch Schutzmaßnahmen eine Einschätzung dazu, welches Restrisiko an der Anlage verbleibt (s. Bild 1.13 links). Für dieses Restrisiko muss der Hersteller der Roboter- oder Maschinenanlage dann abwägen, ob dieses als tolerierbares Risiko hingenommen werden kann.

Nach DIN EN 61508 definiert sich das tolerierbare Risiko, oft auch als vertretbares Risiko bezeichnet, durch:



Tolerierbares Risiko

Das tolerierbare Risiko ist das Risiko, das in einem bestimmten Zusammenhang nach den gültigen Wertvorstellungen einer Gesellschaft tragbar ist.

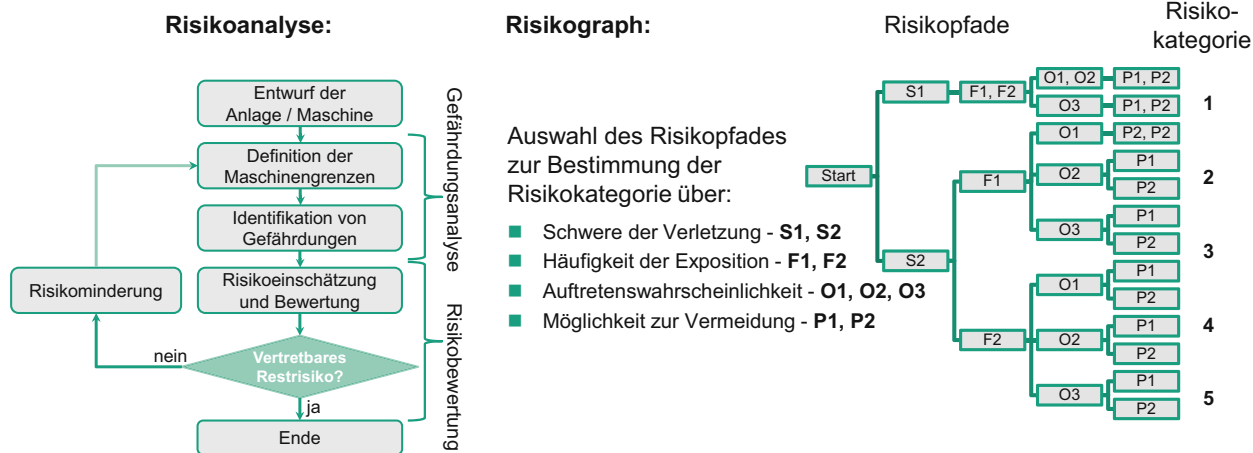


Bild 1.13 Links: Ablauf der Risikobeurteilung für Roboteranlagen nach ISO 12100; rechts: schematische Darstellung eines Risikographen zur Ermittlung einer Risikokategorie

Der Formulierung als „tolerierbares Risiko“ liegt zugrunde, dass es bei der Anwendung vieler technischer Systeme kein „Nullrisiko“ gibt. Um das Risiko der Gefährdungen an der Anlage zu bewerten, gibt es methodische Hilfsmittel, wie z. B. die Evaluierung mit einem Risikographen, wie in Bild 1.13 rechts aufgezeichnet. Allerdings gibt es keine mathematischen Vorgaben, ab wann ein „tolerierbares Risiko“ erreicht ist.

Dabei gilt generell für Roboteranlagen ein besonders hohes Sicherheitsniveau, da Robotersysteme für Unbeteiligte beliebige, nicht vorhersehbare Bewegungen im freien Raum durchführen können (Nicolaisen 1986). Bei voller Autonomie des Roboterprozesses kann das Leistungsspektrum des Robotersystems ganz ausgenutzt werden. Allerdings muss dazu gegebenenfalls die räumliche Trennung von Mensch und Roboter abgesichert werden. Wenn das Robotersystem räumlich geöffnet wird, führt dies zu einem möglichen Zielkonflikt: Einerseits ist das Robotersystem dann maximal produktiv, wenn es maximal viel leistet. Andererseits muss das Sicherheitsrisiko begrenzt werden, indem die Leistung des Robotersystems gedrosselt wird.

In Kapitel 7 wird das Vorgehen, wie die Sicherheitsabnahme bei der Umsetzung einer Industrieroboteranwendung durchgeführt wird, noch detaillierter aufgezeigt

1.3.2 Zielkonflikt zwischen Produktivität und Sicherheit

Bei der Auslegung von Roboteranlagen mit MRK-Systemen ist die Balance zwischen ausreichendem Bedie-

nerschutz und höchstmöglicher Ausnutzung der Systemleistung des Roboters entscheidend.

Dazu lässt sich definieren:



Sicherheitsmerkmal eines Robotersystems

Je schwächer ein Roboter ausgelegt ist und je langsamer er sich bewegt, desto geringer sind die Schäden, die er in seiner Umgebung anrichten kann.

Gleichzeitig gilt für die Effizienz eines Robotersystems in den herkömmlichen industriellen Zielanwendungen in der Fertigung das im Folgenden definierte Produktivitätsmerkmal.



Produktivitätsmerkmal eines Robotersystems

Je stärker und steifer die Roboterstruktur gestaltet ist und je höher die Geschwindigkeit, in der die Bewegungen und damit die Aufgaben durchgeführt werden, desto produktiver ist sein Einsatz und desto schneller amortisiert sich die Investition.

Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Produktivität und Sicherheit (analog dem „Safety-Performance Tradeoff“ in (Bicchi, Tonietti 2004), den es zu lösen gilt und der in Bild 1.14 aufgezeigt wird (s. auch (Oberer-Treitz, Dietz et al. 2013)).

Symbole

3D-Druck *462*
3D-Kinematiksimulation *297*

A

Abbildungsfunktionen *206*
Absolutgenauigkeit *307*
Abstandsberechnung
– hierarchische *249*
Abstandsbestimmung *247*
Abstandssensor *90*
Abstandsüberwachung *45, 329*
Abwechslungsreichtum *359*
Achsgetriebemontage *380*
Aktionsprimitivnetz *269*
Aktoren *458*
– pneumatische *458*
Akzeptanzfaktoren *362*
Anforderungen
– produktionstechnische *378*
– sicherheitstechnische *377*
Anforderungsdokumentation *335*
Anlagenprojektierung *147*
Annäherungsdetektoren *83*
Anthropometrie
– individuelle *435*
Antriebe *38*
Antriebsfunktionen
– sichere *126*
Anytime-Fähigkeit *243*
APAS assistant *55*
Applikationsplanung *335*
Arbeitshandlungen *433*
Arbeitsraumüberwachung *22*
Arbeitsteilung *338*
Arbeitszellensimulationssysteme *287*

Artis-pheno-System *422*
Assistenzroboter *465*
Assistenzsysteme *423*
Assistenzsystem für Werker *350*
Aufgabenmodell *267, 271*
Aufgabenplanung *293*
Aufgabenrepräsentation
– modellbasierte *198*
– operationsbasierte *197*
– zustandsbasierte *195*
Aufgabenspezifikation *194*
– bedingungs-basierte *198*
Auflagekontrolle
– pneumatische *97*
Ausfallwahrscheinlichkeit *78*
Ausgabealphabet *199*
Austauschformate *315*
Ausweichbewegung
– globale *255*
– lokale *251*
Automatisierungslösungen *2*
Automobilmontage *375*
Automobilproduktion
– MRK-Einsatz *378*
Autonomie *359*
Autonomiegrad *174*

B

Bahnplanung *310*
– globale *242*
– lokale *242*
Balg-Aktor *459*
Basisstandard P7000 *363*
Baukasten *141*
Bauteilführung *385*
Bedürfnisse des Menschen *358*
Behaviour Unit *144*

Belohnungsfunktion 208
 Berechnungsaufwand 249
 Beschleunigungsbereich
 - sicherer 131
 Beschleunigungsmessung 111
 Beschleunigungssensor 111
 Best Practice 365
 Betriebsaufwand 213
 Betriebsmittelauswahl 380
 Betriebsrat 361
 Bewegungsrichtung
 - sichere 131
 Bewertung
 - ergonomische 342
 Bezier-Splines 254
 Bildgebung
 - robotergestützte 422
 Biomechanische Grenzen 48
 BionicCobot 59
 BioRob 54
 Bremsenansteuerung
 - sichere 133
 Bremstest 133
 Brownfield-Planung 336
 Brushfire-Verfahren 247

C

CAD-Systeme 295
 capability indicator 273
 Care-O-bot 430
 Casero 430
 CAST Werkzeug 157
 CE-Kennzeichnung 323, 327
 Chirurgiesysteme
 - robotische 422
 CNC-Steuerung 137
 Cobot 327
 Codebook-Verfahren 222
 Condition Monitoring 85
 Co-Simulation 139
 CR-35iA 57
 Crash-Tests 25

D

Dauerstrich-Radar 98
 Dehnungsmessstreifen 106
 DES
 - Discrete Event System 198

Design
 - in Soft Robotics 461
 Dichtigkeitsprüfung 388
 Digitale Fabrik 295
 Digitaler Zwilling 136
 DIN EN 60601 419
 DIN EN ISO 12100 377
 Discrete Event Systems 198
 diskrete Ereignissysteme 198
 Drehgeber 39, 111
 Drehmomentenbegrenzung 50
 Drehmomentenmessung 108
 Drehmomentsensor 51
 Drehratenmessung 111
 Drehratensensor 112
 Drucküberwachung 57

E

Ebenheitsmessung 386
 EG-Konformitätserklärung 327
 Eignungsgrade 290
 Einführungsstrategie 323
 - menschenzentrierte 357
 Eingabemethodik 186
 Einrichtaufwand 213
 Elastic Bands 254
 Elastic Strips-Ansatz 251
 Elastomeraktoren
 - dielektrische 458
 Elastomere 457
 Elektronikproduktion 391
 Endeffektor 40, 62
 Endeffektorairbag 68
 Engineering-Prozess 146
 Entlohnung 353
 Entwicklungsprozess
 - digitaler 147
 Ergonomie 341
 Ergonomieanalyse 410
 Ergonomiesimulation 299
 Erweiterte Realität 182
 Exoskelett 433, 437
 Explorationseinsatz 465

F

Fähigkeitsindex 273
 Fahrzeugendmontage 388

Fast Research Interface 192
 Fehlerhandhabung 403
 Fertigung
 - in Soft Robotics 461
 Flächenkamera 91
 Flexibilität 242
 FlexshapeGripper 68
 Formhand 67
 Forschungscampus ARENA2036 10
 Fügeprozesse 380, 383
 Führen 200
 Führung 360
 Functional Mock-up Interface 139
 Funktionale Sicherheit 78
 Funktionsobjekte 150
 Funktionsobjektstruktur 150
 Funktionsprüfung 395
 Fuzzy-Logic 77

G

Gefährdungsanalyse einer MRK-Anwendung 28
 Gefährdungsrisiko 31
 Gehäuseverschraubung 396
 Geschwindigkeitsregelung 242, 246
 Geschwindigkeitsüberwachung 45, 128, 329
 Gestaltungsansatz
 - menschenzentrierter 365
 Gewinnabschätzung 208
 Gewinnfunktion 208
 GidK-Simulator 163
 GidK-Systeme 162
 Gießen von Aktoren 462
 Glattheit 243
 Greifer 40
 - bionische 68
 - nachgiebige 67
 Greifertechnik 62
 Greiferwechselsysteme 61
 Greifplanung 310
 „Griff in die Kiste“ 162
 Großgerätemontage 408

H

Handführung 12, 42, 44, 328
 Handhabung 465
 Handhabungsgerät 350
 Handhabungsprozess 385

Handhabungstechnik 149
 Harmonisierte Normen 326
 Hidden Markov Modelle 274
 Hierarchical Task Network 276
 Hilfsprozesse 382
 HiL-Simulation 136
 HiLS-Modellgenerierung 145
 Hindernisdetektion 211, 218
 Hindernislokalisation 211
 - probabilistische 264
 HTN 276
 hybrides Team 266
 Hydraulikventile
 - Montage 400
 HyLight 407

I

Implementierung 379
 Implementierungsaufwand 213, 221, 244
 Implementierungsphase 366
 Inbetriebnahme
 - virtuelle 307
 Industrial Robot Language 192
 Inertialsensoreinheit 113
 inkrementelle Planung 243
 Interaktion 175
 - auditive 176
 Interaktionsformen 172
 Interaktionsrollen 172
 Intralogistik 413
 IRL 192
 ISO/TS 15066 377

J

Jamming 458
 Jamming-Mechanismus 67

K

Kalibrierung 307
 Kamerakalibrierung 217
 Kausalitätsbeziehungen 278
 Kinematiksimulation 297
 Klassifikationsmethoden 207
 Kollaborationsarten 44, 73
 Kollisionsentschärfung 242, 244
 Kollisionsfolgenabschätzung 23

Kollisionspotenzial 27
 Kollisionspunkte 48
 Kollisionssensor 58
 Kollisionstest 26
 Kommissionierung 416
 Kommunikation 359, 429
 Kommunikationskanäle 174
 Kompetenz 358
 Komponentenprüfung 394
 Konformitätserklärung 327
 Koordinierungsverfahren 272, 277
 Körperhaltungsanalysen 299
 Kosten
 - einer Überwachungslösung 221
 Kraftbegrenzung 45, 64, 329
 Kraftmessung 104, 332
 Kraft-Momentensensorsystem 109
 Kraftsensorik 57
 KRL 189
 Kuka-proprietäre Sprache 189

L

LBR iiwa 51
 LdV 206
 Lebenszyklus 348
 Leichtbauroboter 3
 Leistungsbegrenzung 45, 329
 Leistungsmerkmale 4
 Lernen durch Vormachen 204, 206
 Lichtgitter 89
 Lichtschranke 89
 Lichtschrankenzaun 214
 Lichtvorhang 89
 LIDAR-Sensor 91
 Logistik 413
 - automatisierte 415
 Lokalisation
 - binäre 214
 - mit Einzelsensor 215
 - mit Sensorfusion 229
 - mit Tiefenkamera 224
 - probabilistische 227
 Lokalisationsstrategie 214
 Lösungsstruktur 152

M

Manipulatorsystem 422
 Maschinenlernen 207
 Master-Slave-Programmierung 42
 Materialien
 - in Soft Robotics 456
 Medizinische Therapieplanung 472
 Medizinroboter 419
 Medizintechnik 464
 - robotergestützte Systeme 418
 Menschmodell 299, 303, 411
 Mensch-Roboter-Fähigkeiten 338
 Mensch-Roboter-Kollisionserkennung 209
 Mensch-Roboter-Kooperation
 - Formen der 6
 Mensch-Roboter-Teams 266
 Mentale Modelle 266
 Messaufgaben 74
 Messfehler 77
 Minimalsteuerung 151
 Mitarbeiterakzeptanz 358 f.
 Mitarbeiterbindung 366
 Mitarbeiterschulungen 361
 Mobilität 429
 Modalitätskompetenz 184
 Modellierung
 - dynamische 463
 - kinematische 462
 Momentenmessung 104
 Momentensensor 107
 Montageablaufplanung 288
 Montageanwendungen 64
 Montagelinien 379
 Montagevorrangraph 290
 Montagezellen 9
 Morphologie
 - des Robotersystems 174
 Motion Capturing-Systeme 303
 Motivation 360
 MRK-Anwendung 335
 MRK-Applikationen 376
 MRK-Arbeitsplätze 353
 MRK-Planung 294
 Multiagenten-Bahnplanung 265
 MultichoiceGripper 68
 Mykie 430

N

Näherungssensor *54, 82*
 Nocken
 – sicherer *132*
 Notfallbremsung *244*
 Nutzwertanalyse *340*

O

OctArm VI *458*
 OctopusGripper *68*
 Offline-Programmierverfahren *43*
 OpenIGTLink *471*
 OpenIGTLink-Kommunikation *474*
 Owako Work Analyse System *410*

P

Parallelkinematik *39*
 PARO *424*
 PdV *205*
 Pepper *421*
 Peripherie *60*
 Pervasiveness *213, 215, 221*
 Pflegeroboter *424*
 Photohülle *238*
 plan recognition *278*
 Planungssystem *194, 196*
 Playback-Programmierung *200, 202*
 PLM-Systeme *287*
 Pneumatische Aktoren *58*
 Pneumatische Netzwerke *459*
 Polymere *457*
 Positioniergenauigkeit *309*
 Positionserkennung *85*
 Potenzialbewertung *379*
 Potenzialfeld-Ansatz *251*
 Präzedenzbeziehung *271*
 Probabilistic Roadmaps *256, 258*
 Product Lifecycle Management-Systeme *287*
 Produktanalyse *379*
 Programmablauf
 – in einer SPS *122*
 Programmieren durch Vormachen *205*
 Programmiersprachen *188*
 – für SPS *120*
 Programmierung
 – aufgabenorientierte *43*

– Aufgaben-zentrierte *193*
 – Benutzer-zentrierte *203*
 – kinästhetische *202*
 Programmierung von IR *41*
 Programmierunterstützung *59*
 Programmierverfahren
 – hybride *59*
 Programmsynthese *194*
 Prozessanalyse *337*
 Prozessdesign *332*
 Prozessentwicklung *380*
 Pseudo-Likelihood *239*

Q

Qualifikation *361*
 Qualitätskontrolle *404*

R

Radarsensoren *98*
 RAPID *190*
 Rapidly-Exploring Random Trees *255*
 Raycast-Verfahren *166*
 Reaktion *211*
 Rechenaufwand *242*
 Rechenzeit *213, 221*
 Regelung
 – bei Soft Robotics *464*
 Regressionsmethoden *207*
 Rehabilitation *424*
 Rehabilitationstechnik *464*
 Risiko *14*
 Risikobeurteilung *14, 328*
 Risikobewertung *325*
 Robot Design *331*
 Roboter
 – nachgiebiger *244, 246*
 Roboterfähigkeiten *267*
 Roboterkinematik *39*
 Roboterprogrammierung *186*
 Robotersicherheit *14*
 Robotersimulationssysteme *287*
 Robotersteuerung
 – Architektur *123*
 Roboterunfälle *17*
 Roboterzelle *95*
 Robotics 2020 *171*
 Robot Operating System *474*

- ROS 474
Rückprojektion des Roboters 224
- S**
- Safe Acceleration Range 131
Safe Brake Control 133
Safe Brake Test 133
Safe Cam 132
Safe Direction 131
Safely Limited Speed 128
Safe Maximum Acceleration 131
Safe Maximum Speed 131
Safe Operating Stop 127
Safe Speed Monitor (SSM) 131
Safe Speed Range (SSR) 128
Safe Stop 1 (SS1) 127
Safe Stop 2 (SS2) 128
Safe Torque Off 127
SafetyEye 411
SAR 131
Sawyer 56
SBC 133
SBT 133
SCA 132
Schulungsmaßnahmen 361
Schutzeinrichtungen 41
Schweißaufgaben 352
SDI 131
Semantik-Mapping 159
Sensordatenfusion 76
Sensoreffekte 75
Sensoren 330
- akustische 85
- bioelektrische 100
- hochflexible 459
- induktive 84
- kapazitive 81, 460
- optische 87
- optoelektronische 460
- pneumatische 95
- resistive 79, 460
Sensorfusion 229
- probalistische 239
Sensorfusion zur Photohülle 236
Sensorsysteme 75
Sensortechnik 73
Serviceroboter 419, 428, 465
Servicerobotik
- im Haushalt 426
Sicher abgeschaltetes Moment 127
Sicherer Betriebshalt 127
Sicherer Stopp 127
Sicherer Stopp 2 128
Sichere Steuerungen 124
Sicherheit 242, 245
Sicherheit einer Maschine 14
Sicherheitsbewertung 246
Sicherheitsfunktionen 328
Sicherheitsplanung 311
Sicherheitsprinzipien der MRK 20
Sicherheitsstrategien 21
Sicherheitstechnik 40
Signalverarbeitung 76
SIMERO 261
Simulationsschnittstelle 159
Simulationsstudie 286
Simulationstechnik 285
Skillparametrierung 406
SLS 128
SMA 131
Smart Home 429
SMRobotics1 400
SMS 131
Soft Robotics 455
Solver-Systeme 197
SOS 127
soziale Aspekte 363
Spaltmessung 386
Speicheraufwand 243
Speicherprogrammierbare Steuerungen 120
Spracheingabe 183
SPS 120
SPS-Programmcode
- testen 154
SS1 127
SS2 128
SSM 131
SSR 128
Statistisches Lernen 207
Steuerungssimulation 135
Steuerungstechnik 119
STO 127
Stoßdämpfermontage 389
Stückkosten 346
Systemmodell 207

- T**
- Task Frame Formalismus 269
 - TCN 276
 - Teach-In Programmierung 202
 - Team-Organisation 270
 - dynamische 276
 - semi-dynamisch 274
 - Technische Dokumentation 327
 - Technologieeinführung 360
 - Telemanipulationssysteme 422
 - Teleoperation 200
 - Telepräsenzsysteme 421
 - Temporal Constraint Networks 276
 - Testbench 156
 - Testframework
 - Schnittstellen 158
 - Testumgebung 366
 - Tiefenkamera 92
 - Tolerierbares Risiko 14
 - Transportroboter 417
 - Transportsystem
 - autonome 415
 - Triangulation 93
 - Triangulationssensor 90
 - Türeneinbau 385
 - Türmontagestation 11
- U**
- UAS-Analyse 300
 - Überlebenswahrscheinlichkeit 77
 - Überwachungslösung 212
 - Einrichtaufwand 220
 - Ultraschallsensoren 85
 - Umgebungswahrnehmung 270
 - Umrüstbarkeit 347
 - Umweltmodellierung 194
 - Undichtigkeitsprüfung 382
 - UND-/ODER-Baum 272
 - Unfallanalyse 16
 - Universal Research System for varioUs LAParoscopic interventions 475
 - Unterstützungssystem 434, 437
 - UR3 56
 - URScript 190
 - URSULA-System 474
 - UWB-Radar 99
- V**
- Vakuumgreifer 66
 - Validierung 326
 - Variantengenerierung 151
 - VDI-Richtlinie 4499 292
 - Veränderungsmodell 360
 - Veränderungsprozesse 359
 - Verbundenheit 358
 - Verletzungskriterien 25
 - Verletzungspotenzial 28
 - Verletzungsrisiko 28
 - VIBN 136
 - Virtuelle Inbetriebnahme 136, 153
 - Virtuelle Steuerungstestbench 156
 - visuelle Hülle 229
 - Vollständigkeit 243
 - Vordergrund-Hintergrund-Trennung 216
 - Vorhersagbarkeit 243
 - Vormachen 59
 - Voxel 230, 249
- W**
- Walk-Through 202
 - Weggeber 111
 - Weltmodell-Komplexität 243
 - Werkerinformationssysteme 304
 - Werkzeuge
 - MRK-fähige 67
 - Wiederverwendbarkeit 141, 356
 - Wirtschaftlichkeit 345
 - Wörterbuch-Verfahren 222
 - WYSIWYG-Prinzip 12
- Y**
- YuMi 51
- Z**
- Zielkonflikt 16
 - Zustandsautomaten 198
 - Zustandsmaschine 470
 - Zustandsübergangsfunktion 199
 - Zuverlässigkeit 77