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

Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration

HANSER

Müller / Franke / Henrich / Kuhlenkötter / Raatz / Verl
Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration

Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

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

Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration

HANSER

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

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz- Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN: 978-3-446-45016-5
eBook-ISBN: 978-3-446-45376-0

© 2019 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg
Herstellung und Satz: le-tex publishing services GmbH
Umschlagrealisation: Stephan Rönigk
Titelbild: SCHUNK GmbH & Co. KG
Druck und Bindung: Firmengruppe Appl, aprinta druck, Wemding
Printed in Germany

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C004592
FSC
www.fsc.org

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 beteiligen 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 Kettschau, 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)

1 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 Steuerungs- 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).

Vermehrt 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. Mithilfe 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).

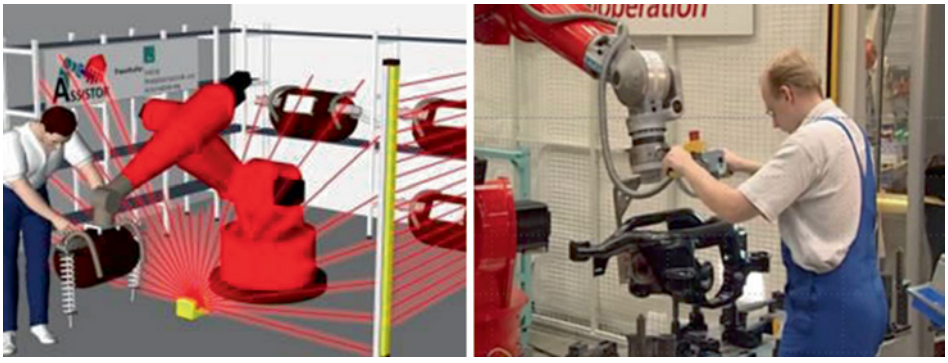

Bild 1.1
MRK-System zur Getriebemontage im Rahmen des BMBF-Projektes ASSISTOR (Quelle: Fraunhofer IPA)

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 Bedienerschutz 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

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 technisch 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 – „Men-are-better-at – machines-are-better-at“ – in (Fitts 1951) oder nach Thiemermann in (Thiemermann 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 (Thiemermann 2005)):

- Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an geänderte Umgebungsbedingungen
- Sensorische Fähigkeiten
- Manipulationsfähigkeit unterschiedlicher Materialstrukturen (z. B. biegeschlaffer Teile)

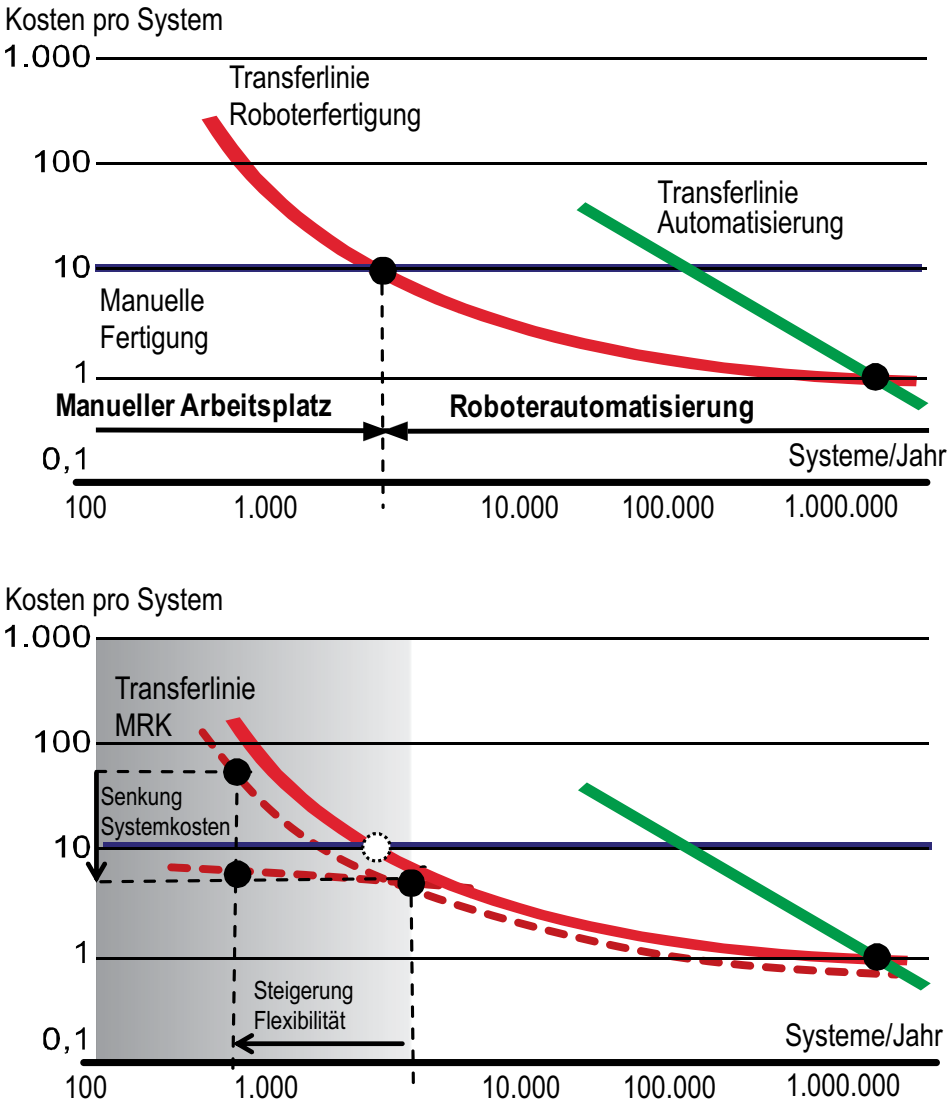

Bild 1.2
Sinkende Rentabilitätsschwelle zwischen manueller und roboterbasierter Fertigung durch MRK (Hägele, Schaaf et al. 2002)

- 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 Automatisierungssysteme 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 Kooperationstyp in der MRK-Anwendung. Dabei können sich Kooperationstypen 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-Kooperationstypen (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.

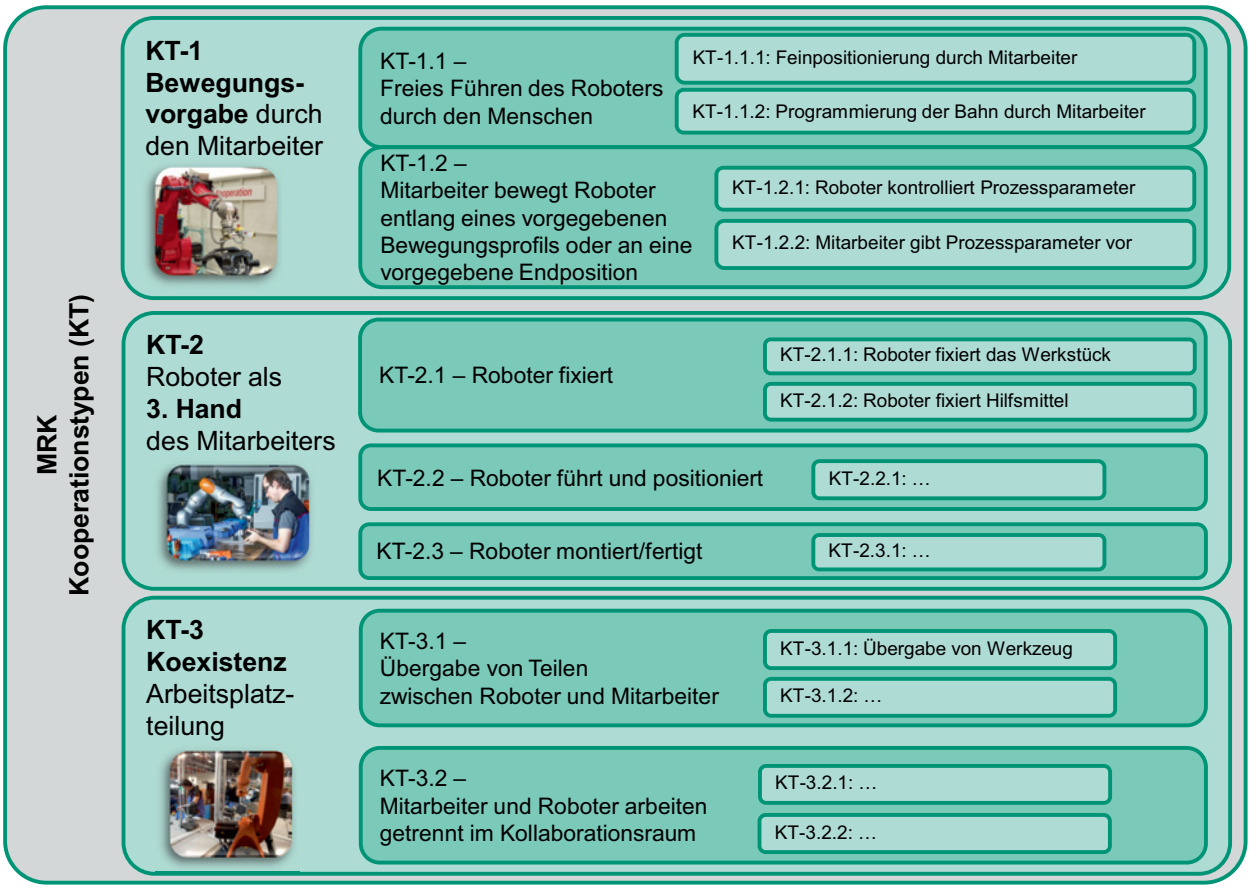

Bild 1.3 MRK-Taxonomie zur Auswahl und Bewertung von MRK-Kooperationstypen in einer Anwendung (Dietz, Oberer-Treitz 2015)

- 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 spezifische 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 Zeitpunktendes 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

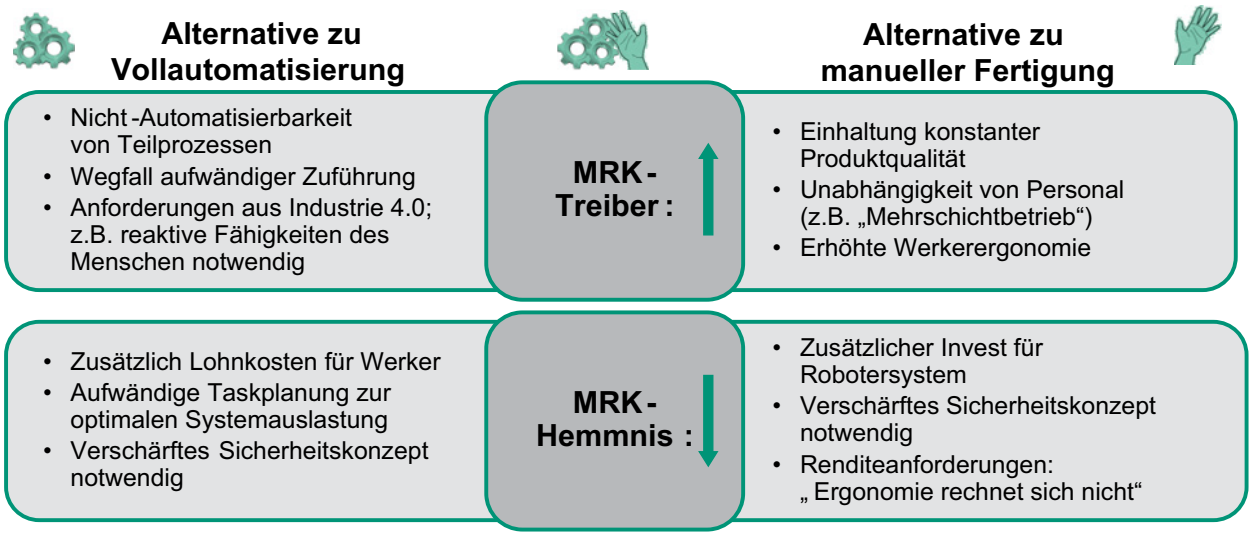

Bild 1.5 MRK-Treiber und -Hemmnisse als Alternative gegenüber einer manuellen Fertigung oder einer Vollautomatisierung

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

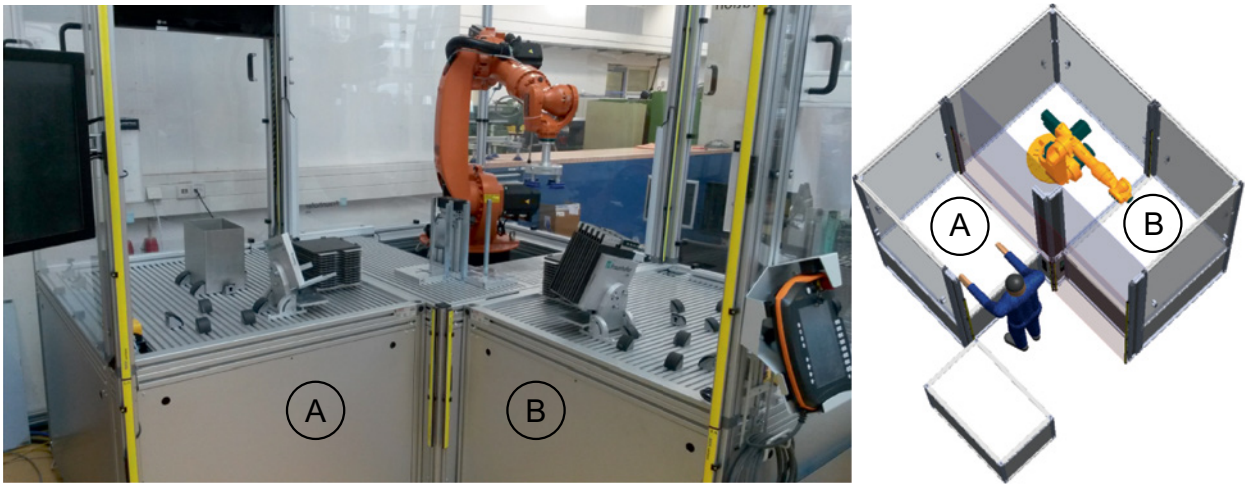

Bild 1.6 MRK-Montagezelle mit zeitlich versetzt genutzten kooperativen Arbeitsräumen (Quelle: Fraunhofer IPA)

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 ARENA2036[1] 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.

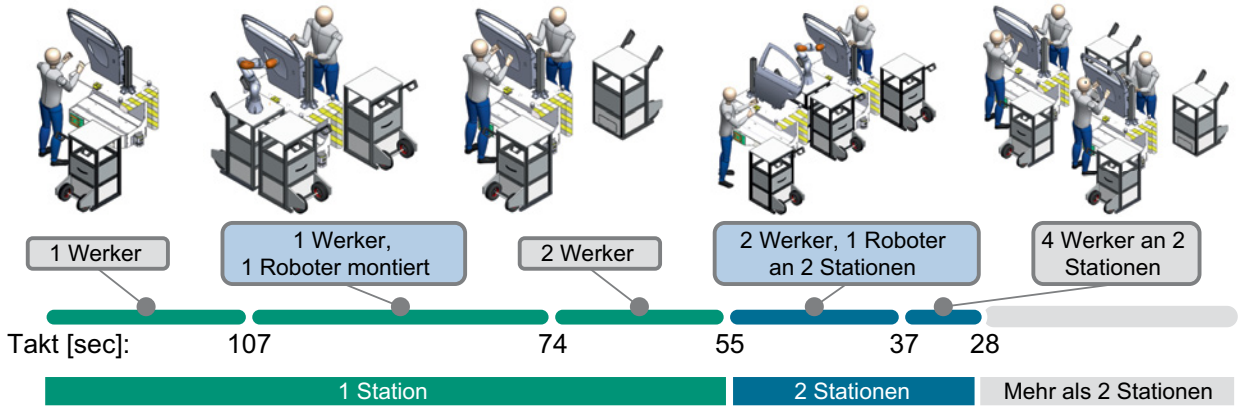

Bild 1.8 Skalierbarkeit, Modularität und Mobilität am Beispiel der Türmontage (Quelle: Fraunhofer IPA)

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 Robotermanipulator 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 Robotermanipulatoren entstehen. Dabei können nunmehr intralogistische 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-

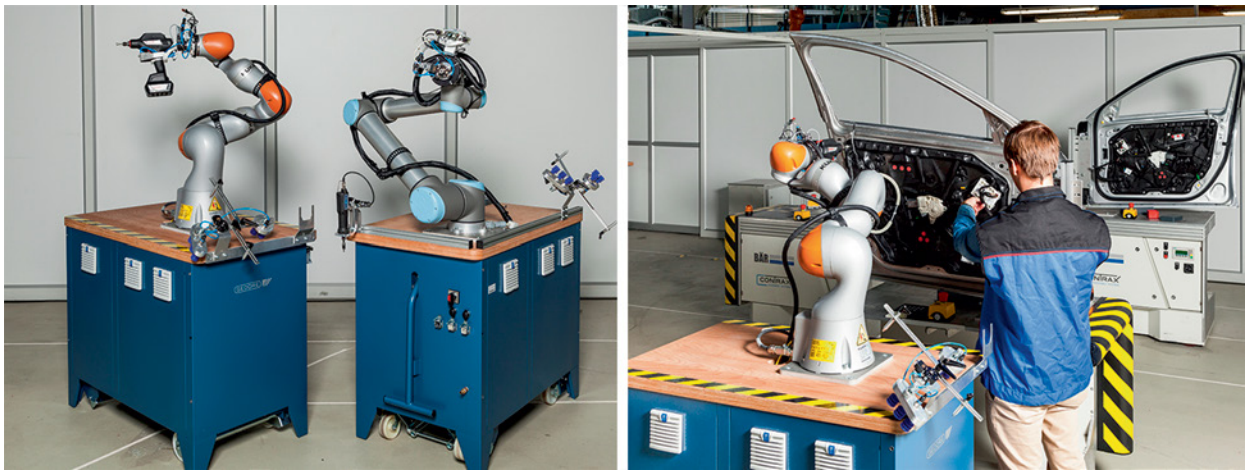

Bild 1.9 Entwicklung einer mobilen Türmontagestation mit einem MRK-Robotersystem (Quelle: ARENA2036/Rainer Bez)

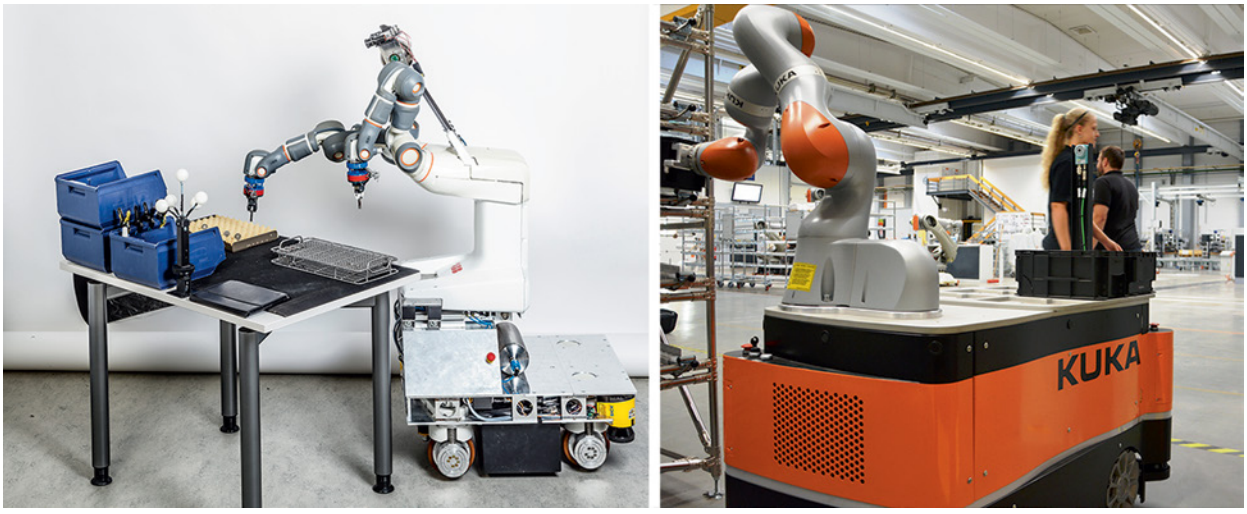

Bild 1.10 Frei navigierende mobile Roboter rob@work 3 und KMR iiwa (Quelle: Fraunhofer IPA, KUKA AG)

pulatorbewegungen aller an die Plattform angrenzenden Bereiche für einen gefährdungsfreien 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 gefährdungsfreie 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 aufgebrachten 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-

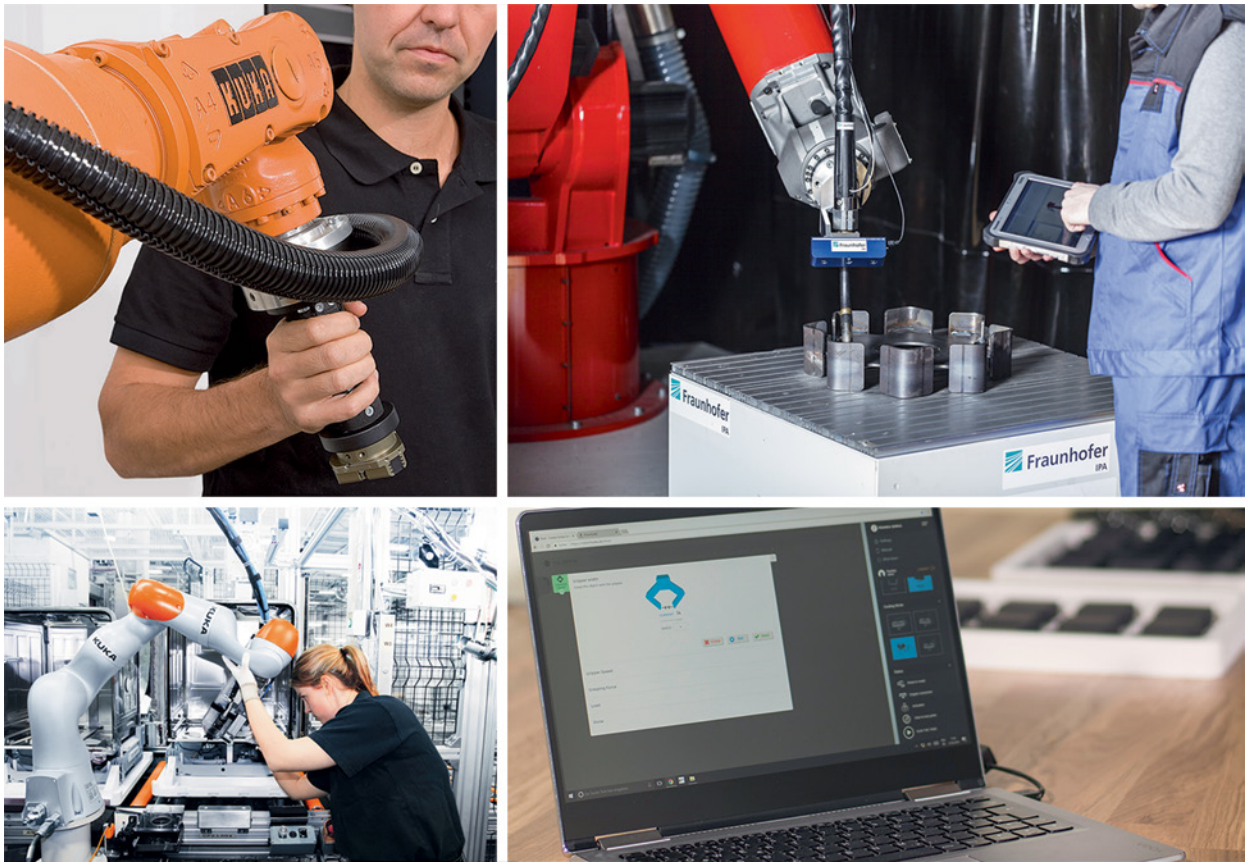

Bild 1.11 Handgeführte Robotersysteme (Quelle: MRK-Systeme, Fraunhofer IPA, KUKA, FRANKA EMIKA GmbH)

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.

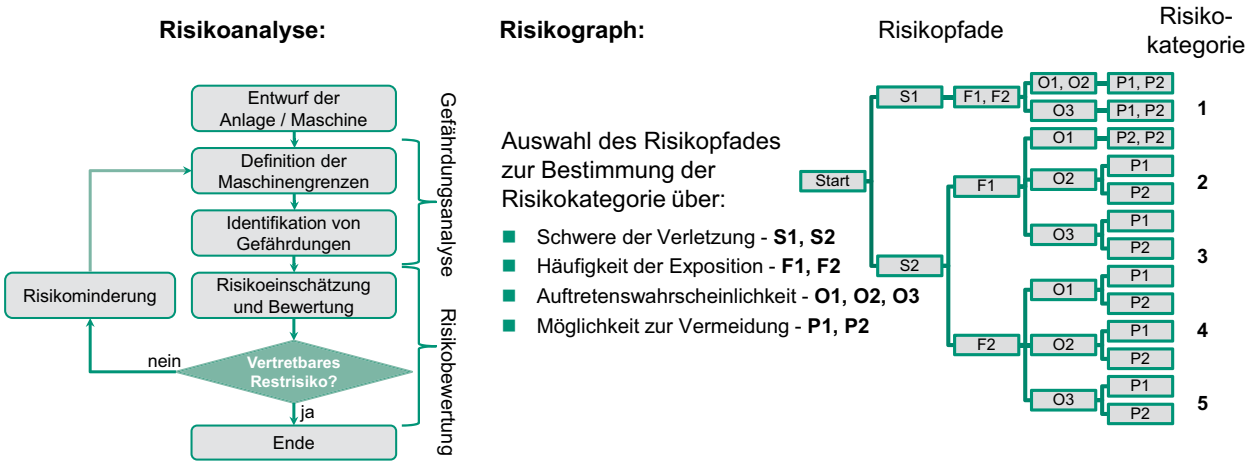

Bild 1.13 Links: Ablauf der Risikobeurteilung für Roboteranlagen nach ISO 12100; rechts: schematische Darstellung eines Risikographen zur Ermittlung einer Risikokategorie

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 Bedienerschutz 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)).

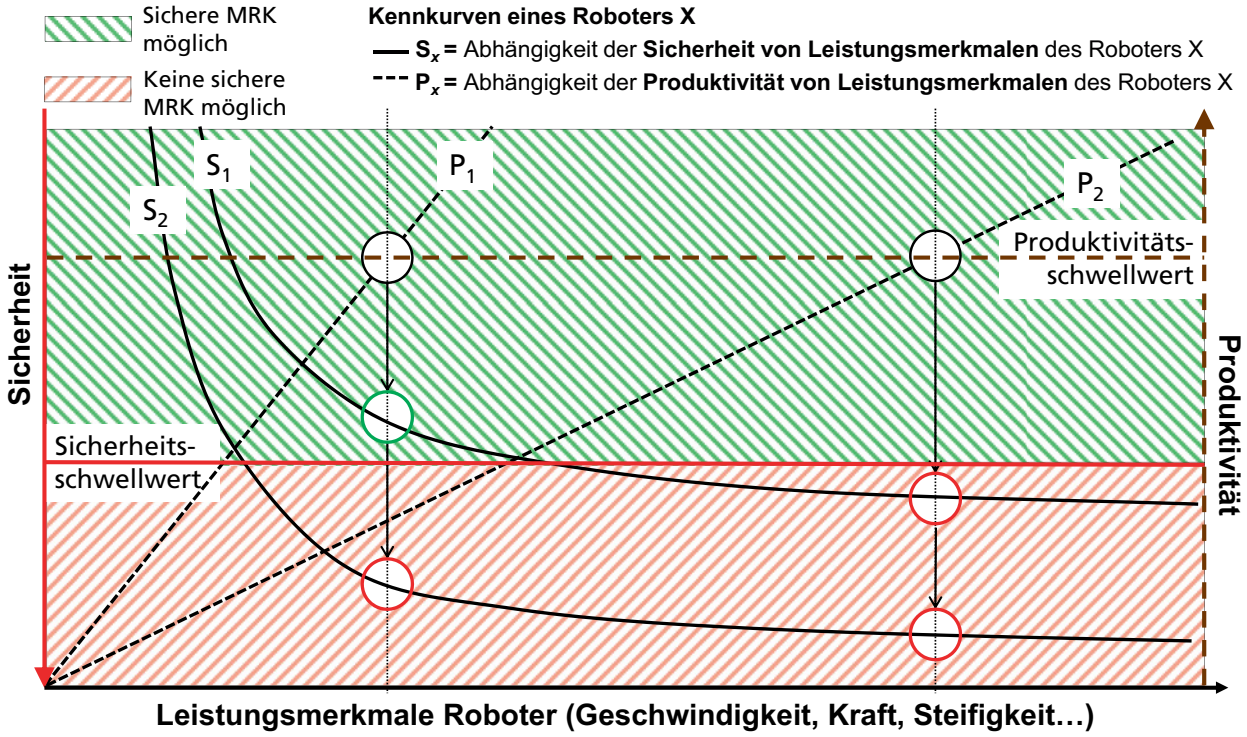

Bild 1.14 Zielkonflikt zwischen Produktivität und Sicherheit eines Robotersystems

Für jede Applikation muss ein ausreichender Bedienerschutz zu jedem Zeitpunkt garantiert werden, wodurch ein Sicherheitsschwellwert für alle Anwendungen zugrunde gelegt wird. Gleichzeitig wird eine Applikation nur dann realisiert, wenn sich der Einsatz des Robotersystems als wirtschaftlich erweist, wobei jede Applikation einen eigenen Produktivitätsschwellwert aufweist. Jedes Robotersystem verfügt dabei über eine Sicherheits-Kennkurve – Sx – bezüglich seiner Leistungsmerkmale, zu denen z. B. Geschwindigkeit, Kraft und Steifigkeit gerechnet werden. Je mehr diese Leistungsmerkmale in einer Anwendung genutzt werden (z. B. hohe Geschwindigkeit), desto größer ist das Gefährdungspotenzial für einen in der Nähe arbeitenden Bediener. Um sicher in einer MRK-Anwendung betrieben zu werden, muss der Roboter daher möglicherweise schwächer (z. B. langsamer) eingestellt werden, damit er unter dem verlangten Sicherheitsschwellwert verbleibt. Gleichzeitig verfügt jedes Robotersystem über eine Produktivitäts-Kennkurve – Px – bezüglich derselben Leistungsmerkmale, aus denen sich seine produktiven Stärken für eine Anwendung ergeben, indem sich daraus mögliche Traglasten und Zykluszeiten ableiten lassen. Diese Kurve fällt, wenn die Leistungsmerkmale gesenkt werden. Ein Produktivitätsschwellwert kann somit leicht unterschritten werden, wenn die Leistungsmerkmale sicherheitsbedingt gesenkt werden.

Die Lösung dieses Zielkonfliktes führt für herkömmliche Industrieroboter immer zu einer enormen Drosselung ihres Produktivitätspotenzials. Daraus ergibt sich, dass MRK-Systeme nur dann wirtschaftlich zum Einsatz kommen können, wenn andere große Mehrwerte wie Robustheit oder Wandlungsfähigkeit (als weitere Leistungsmerkmale für die Produktivitäts-Kennkurve) gegeben sind. Gegenüber einer komplett manuellen Fertigung weisen MRK-Systeme zwar fast immer eine bessere Ergonomie auf. Allerdings können durch diese allein selten die zusätzlichen Investitionen ausgeglichen werden, wenn nicht Qualität oder Effizienz der Fertigung steigen (Dietz, Oberer-Treitz 2015).

Genauso wie sich wirtschaftliche Kennzahlen aus messbaren Größen der eingesetzten Robotersysteme ableiten lassen, müssen auch die Sicherheitskennwerte – im vorliegenden Fall spezifiziert auf den Bedarf in der MRK – quantifizierbar gemacht werden.

1.3.3 Unfallanalyse in der Industrierobotik

Ihren Ursprung hat die Analyse von Kollisionen bezüglich des Schadensausmaßes auf die Unfallteilnehmer in

der Automobilsicherheit (Kramer 2009). Neben der Auswertung und Analyse von Unfallstatistiken liegt ein Hauptaugenmerk der Unfallforschung darauf, Unfälle experimentell und rechnerisch zu untersuchen und dabei alle Faktoren zu berücksichtigen, die für die Verletzungen eines Unfallteilnehmers verantwortlich sind. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens weltweit und der damit verbundenen hohen Anzahl an Verkehrsunfällen können sich die Entwickler in der Automobilsicherheit auf eine große Anzahl an Unfalldaten stützen. Dies erleichtert die Erforschung von Einflussfaktoren und deren Zusammenhang mit einem potenziellen Verletzungsrisiko (Kramer 2009).

Im Gegensatz zum Automobil, das der Kraftfahrzeugführer eigenverantwortlich fährt, stellt die Bedienung eines Robotersystems in der Industrie meist einen Arbeitsvorgang innerhalb eines Arbeitnehmerverhältnisses dar, in dem der Arbeitgeber strenge Vorgaben zur Schutzpflicht des Bedieners umsetzen muss. Weil die ersten in der Industrie eingesetzten Robotersysteme ein offensichtliches Gefährdungspotenzial aufwiesen, wurden Roboter und Bediener konsequent räumlich getrennt. Dies grenzte die Anzahl der Unfälle von vorneherein stark ein.

Statistiken zu Roboterunfällen mit Beschreibung des Unfallhergangs und der Folgen sind deshalb nur sehr vereinzelt zu finden. In der Literatur findet sich z. B. von 1985 eine schwedische Studie von Carlsson (Carlsson 1985), die 36 Unfälle beschreibt, sowie ein Report der nordamerikanischen UAW[2] aus dem Jahr 2004 (UAW 2004). Dabei handelt es sich um die Dokumentation oftmals schwerwiegender und tödlicher Unfälle. Dies resultiert aus dem hohen Gefährdungspotenzial der eingesetzten schweren Maschinen sowie der besonderen Meldepflicht dieser schweren Unfälle, die die Erfassung dieser Daten oftmals erst ermöglicht.

Die darin beschriebenen Fälle spiegeln nicht direkt das Unfallpotenzial in der MRK wider, da es sich immer um einen ungewollten Kontakt eines Bedieners mit einem an sich autark arbeitenden Robotersystem handelt. Weil MRK-Systeme noch sehr neu sind, können hierzu jedoch noch keine spezifischen Daten erhoben werden. Die Autoren in (Malm et al. 2010) stützen die These, dass gerade bei neueren Daten zu Unfällen mit „klassischen" Robotersystemen, in denen auch Unfälle in kleineren Betrieben erfasst werden müssen, ähnliche Gefährdungssituationen vorliegen, wie sie bei MRK-Systemen zu finden sind. Im Rahmen der Sozialgesetzgebung[3] unterliegen in Deutschland Arbeitsunfälle, die eine Arbeitsunfähigkeit von mindestens drei Tagen zur Folge haben, einer Meldepflicht gegenüber der zugehörigen Berufsgenossenschaft. Geringfügige Verletzungen werden meist nur innerhalb der Firma dokumentiert. Allerdings gibt es bei der Dokumentation von Unfällen oft keine spezifische Unterscheidung in Unfälle mit Robotern und mit anderen Maschinen. Dies erschwert die Unfallanalyse in der Robotik genauso wie die Vermutung, dass bei Unfällen, bei denen das Personal Sicherheitsvorkehrungen bewusst umgangen hat, die Unfallursache oftmals nicht lückenlos beschrieben ist.

Im Folgenden werden Statistiken über meldepflichtige Unfälle mit Industrierobotern innerhalb der DGUV[4] aus den Jahren 2005 bis 2014 vorgestellt und analysiert[5]. Bild 1.15 bis Bild 1.17 werten die Verteilung der dokumentierten Unfälle bezüglich der Tätigkeit des Verletzten, des verletzten Körperteils und der Verletzungsursache aus. Bei den erhobenen Daten innerhalb der Unterteilungen handelt es sich um hochgerechnete Stichproben, so dass aufgrund der wenigen Stichprobenwerte durch die geringen Fallzahlen Hochrechnungsunsicherheiten und Rundungsfehler auftreten können. Weitere, aus den vorangegangenen Jahren vorliegende Unfallzahlen zeigen nahezu die gleiche Verteilung. Da sich die Erfassungsgrundlagen zwischen den beiden Zeiträumen mit Bezug auf europaweit harmonisierte Merkmale nach Eurostat[6] geändert haben, ist eine gemeinsame Auswertung nicht möglich. Allerdings deutet der Vergleich der Auswertungen an, dass auch die Stichprobenwerte eine verlässliche Tendenz bezüglich der hier vorgestellten Differenzierungen aufweisen.

Im Berichtszeitraum über diese zehn Jahre wurden bei der DGUV fünf tödliche Unfälle mit Industrierobotersystemen gemeldet. Welche Verletzungsursache oder verletzten Körperteile dabei betroffen waren, ist in der statistischen Erhebung nicht aufgeführt. Die Differenzierung nach „verletztem Körperteil" rückt die Betrachtung von Unfällen mit den oberen Extremitäten in den Vordergrund, wobei die Hand, mit insgesamt 37 % aller

---

2 UAW – International Union, United Automobile, Aerospace and Agricultural Implement Workers of America

3 s. Artikel 193, Sozialgesetzbuch VII

4 DGUV – Spitzenverband Deutsche gesetzliche Unfallversicherung

5 Die statistischen Daten der Auswertung entstammen dem Referat – Statistik – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)

6 Eurostat – Statistisches Amt der EU mit Sitz in Luxemburg, Verwaltungseinheit zur Erstellung amtlicher europäischer Statistiken

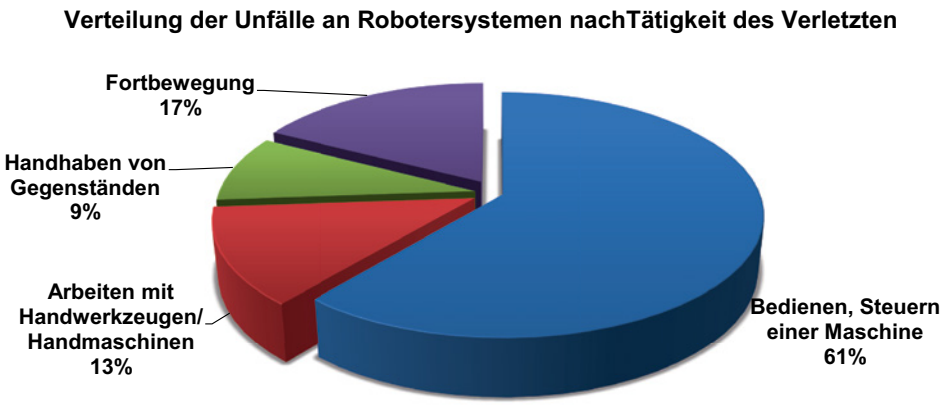

Bild 1.15
Verteilung der meldepflichtigen Unfälle zwischen 2005 und 2014 bezüglich der Tätigkeit des Verletzten; Quelle: Referat – Statistik – DGUV

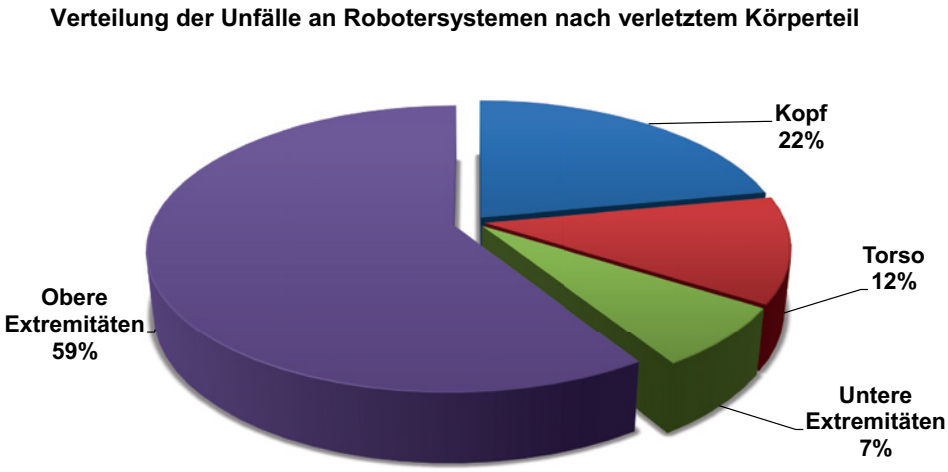

Bild 1.16
Verteilung der meldepflichtigen Unfälle zwischen 2005 und 2014 bezüglich verletztem Körperteil; Quelle: Referat – Statistik – DGUV

Unfälle, den größten Beitrag ausmacht. Bei den betrachteten Tätigkeiten des Verletzten zeigt sich, dass es sich vorwiegend um Bediener der Maschine, und damit nicht um ungeschulte Unbeteiligte handelt. Die Auswertung bezüglich der Verletzungsursache führt ein vielfältiges Spektrum von Kontakten zwischen dem Verletzten und dem Robotersystem auf. Dies zeigt den Bedarf, sich zur Regelung der Sicherheit in MRK-Applikationen vermehrt auf die sichere Gestaltung möglicher Kontakte zu fokussieren.

Aus den oben genannten Studien in der Literatur und den untersuchten Statistiken der DGUV lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Ungewollter Kontakt mit einem Robotersystem kann schwerwiegende bis hin zu tödlichen Folgen haben
- Obere Extremitäten und der Kopf sind am häufigsten in einen Kontakt involviert
- Kontakte mit dem Kopf haben oft schwerwiegende Verletzungen zur Folge
- Unfälle passieren meist während des Betriebes mit dem Robotersystem in Bewegung
- Verletzte werden oft durch die Bewegung des Roboters bei ihrer Tätigkeit überrascht

Die von Carlsson und der UAW beschriebenen Unfallstudien zeigen, dass es sich in den meisten der beschriebenen Unfälle nicht um einen Fehlerzustand der Maschine handelt, die eine ungewollte Bewegung auslöst, sondern um den Normalbetrieb der Anlage. Meistens hielten sich die Verletzten bewusst im aktiven Arbeitsraum des Robotersystems auf und kannten den geplanten Bewegungsablauf des Roboters.

Bei den von der DGUV dokumentierten Unfällen kann der Aspekt eines bewussten oder unbewussten Aufenthaltes im Gefahrenbereich nicht explizit betrachtet werden. Allerdings zeigen Studien der DGUV eine hohe Anzahl an Anlagen mit manipulierten Schutzeinrichtungen auf, die mit einem hohen Unfallpotenzial verbunden sind. Aus den Studien kann abgeleitet werden,

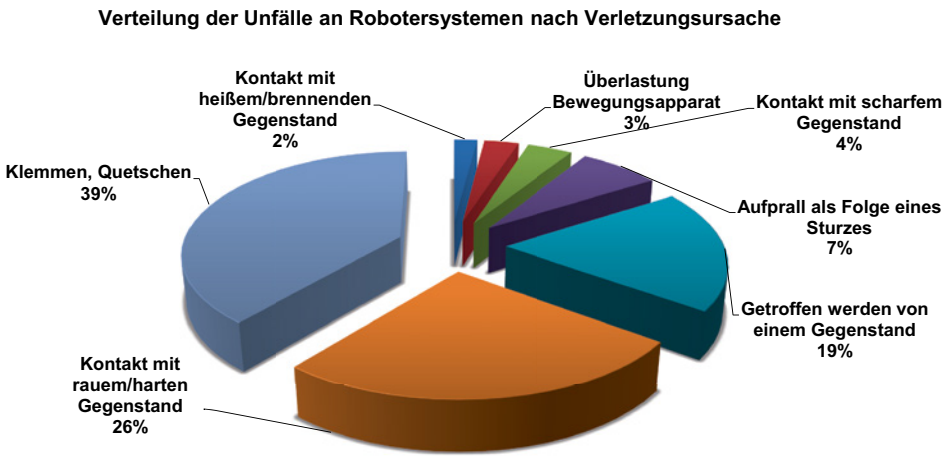

Bild 1.17 Verteilung der meldepflichtigen Unfälle zwischen 2005 und 2014 bezüglich der Verletzungsursachen; Quelle: Referat – Statistik – DGUV

dass bis zu 25 % der Arbeitsunfälle darauf zurückzuführen sind (Apfeld et al. 2006). Daher können auch die hier vorgestellten Unfallanalysen mit autonom arbeitenden Robotersystemen Rückschlüsse auf potenzielle Gefährdungen z. B. bezüglich der Gefährdungsexposition einzelner Körperteile im Roboterbetrieb in einer MRK-Anwendung liefern.

Bei der Umsetzung von MRK-Anwendungen müssen Sicherheitsstrategien und deren Bewertung neu überdacht werden. Physische Kontakte mit dem Roboter, die bisher vermieden werden sollten, sind auf einmal Teil der Anwendung oder sind zumindest in Form eines ungewollten Kontaktes – einer Kollision – mit dem Roboter nicht mehr vollständig auszuschließen. Um für eine Kollision mit dem Roboter eine Risikobewertung durchzuführen, muss die Kollision, bzw. ihr potenzielles Schadensausmaß, bewertet werden. Je nach erwartbarem Schadensausmaß müssen dann die entsprechenden Schutzmaßnahmen ausgewählt und auf ihre Eignung hin überprüft werden.

Daraus ergibt sich für den Betrieb eines Robotersystems in der MRK ein neues Sicherheitsparadigma für die MRK.

Für Sicherheitsbewertungen von Robotersystemen in der direkten physischen MRK muss ein quantifizierbares Kollisionspotenzial zugrunde gelegt werden, um Robotersysteme in der MRK auf gewollte oder ungewollte Kontakte mit einem Bediener auszulegen.

Der Fokus des Bedienerschutzes für MRK-Systeme muss konkret auf den Ausschluss von Gesundheitsgefährdungen durch Kollisionen gelegt werden. Dazu ist es notwendig, die Kollisionsgefährdungen zu analysieren und daraus Rückschlüsse zu ziehen, um diese zu vermeiden. Erst aus dem zu erwartenden Verletzungsrisiko und den dafür verantwortlichen Charakteristiken des Robotersystems oder der Applikation kann abgeleitet werden, ob die Kollision abgeschwächt oder ganz vermieden werden muss.

1.3.4 Sicherheitsvorgaben für MRK-Systeme in der Normung

Um bei hoher Produktivität eines MRK-Systems einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, gibt es heutzutage eine Vielzahl an Technologien und Strategien, die mit technischen oder organisatorischen Schutzmaßnahmen einen abgesicherten Betrieb ermöglichen. Erstmalige Erwähnung in den Sicherheitsstandards der Industrierobotik findet die MRK unter der Definition des „Kollaborierenden Roboterbetriebes“ im Jahr 2006 in der DIN EN ISO 10218.

Dabei wird die MRK wie folgt beschrieben.

Kollaborierender Betrieb eines Industrierobotersystems:

Zustand, in dem hierfür konstruierte Robotersysteme innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten (DIN EN ISO 10218 – 1:2006-06 2006).

Zur Umsetzung einer sicheren MRK-Anwendung werden darin vier unterschiedliche Arten des kollaborierenden Betriebs eingeführt, denen jeweils ein spezifisches Sicherheitsprinzip zugrunde liegt. Die DIN EN ISO 10218 regelt die entsprechenden Vorgaben an die

eingesetzten Systemkomponenten aus Sicht der funktionalen Sicherheit. Diese „Kollaborationstypen“ sind in Bild 1.18 skizziert und werden im Folgenden, in Anlehnung an die in der DIN EN ISO 10218 definierten Sicherheitsanforderungen, als Sicherheitsprinzipien für die MRK beschrieben.

Stopp:
Eine Sicherheitszone im Nahbereich des Robotersystems wird überwacht. Ein Zutritt zur Sicherheitszone durch eine Person, *Mensch = true*, ist erst erlaubt, wenn alle Bewegungen des Roboters gestoppt ($v = 0$) sind. Der Zutritt einer Person muss dabei gegebenenfalls einen sofortigen, geregelten Stopp veranlassen. Nach Verlassen der Sicherheitszone kann der Roboter durch einen automatischen Wiederanlauf im Programm fortfahren.

Handführung:
Die Bewegungsführung des Roboters erfolgt mit reduzierter Geschwindigkeit, $v \leq v_{red}$, durch einen physischen Kontakt mit dem Roboter und einer Freigabe durch Aktivierung eines Zustimmtasters (*Handführung = true*). Dabei steuert der Bediener die Bewegung z. B. durch Anfassen des Roboters am Werkzeug, wobei die aufgebrachten Kräfte des Bedieners aufgenommen und in Steuersignale umgesetzt werden, die eine Bewegung des Roboters ermöglichen.

Abstandsüberwachung:
Das Robotersystem wird von einer dynamischen Sicherheitszone umgeben und der relative Abstand zwischen bewegten Roboterteilen und Personen, d_{rel}, wird überwacht. Dabei ergibt sich die Größe der Sicherheitszone durch den geforderten, berechneten Mindestabstand d_{min}, der sich aus der aktuellen Geschwindigkeit der Roboterbewegung sowie bekannten Stoppzeiten und -wegen ergibt. Eine Unterschreitung des Mindestabstands führt zu einem sofortigen Bewegungsstopp (*Stopp*).

Kontaktregelung:
Ein Kontakt mit dem Roboter ist durch entsprechendes Design oder Steuerungstechnik so weit abgeschwächt, dass er einem Menschen keinen Schaden zufügt und daher nicht zwingend vermieden werden muss. Dazu werden Robotercharakteristiken, wie z. B. seine Kollisionskraft F_{robot} gegen einen Toleranzwert F_{tol} abgeglichen. Bei Überschreiten des Grenzwertes müssen entsprechend Sicherheitsmaßnahmen eines der obigen Sicherheitsprinzipien aktiviert werden.
In Kapitel 7.1 werden spezifische Vorgaben für die Umsetzung des Kollaborationstyps „Kontaktregelung“ genauer aufgezeigt. Dazu wird auch das derzeit übliche Vorgehen zur Validierung durch Kollisionsmessungen aufgezeigt.

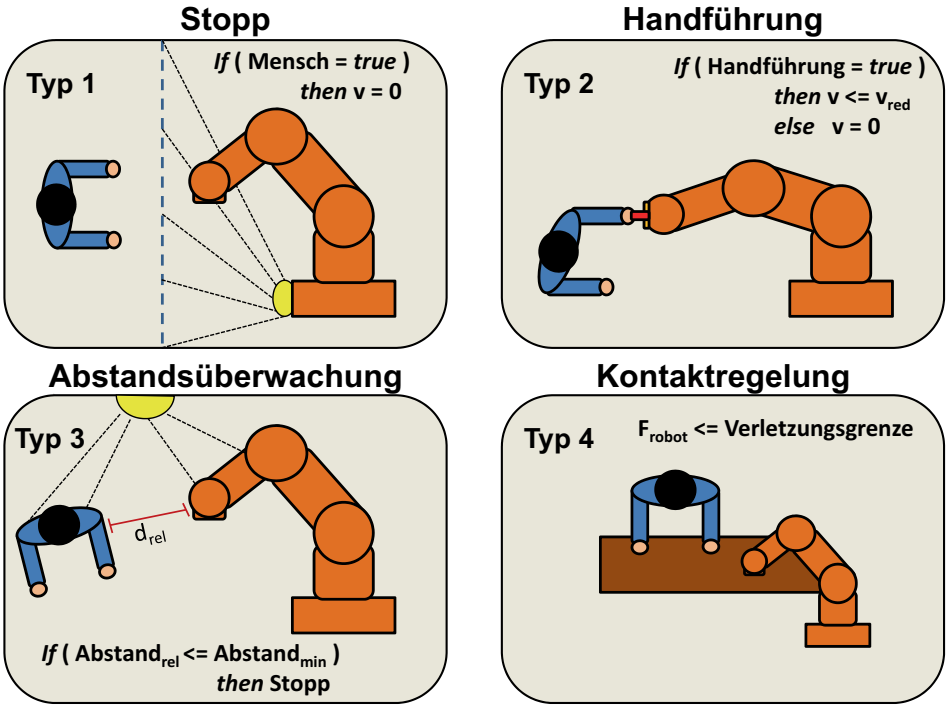

Bild 1.18
Sicherheitsprinzipien der MRK nach DIN EN ISO 10218

Im Gegensatz zu den in Kapitel 1.2.2 definierten Kooperationstypen KT zielt diese Unterscheidung direkt auf die sicherheitstechnische Umsetzung einer möglichen physischen Kooperation zwischen Mensch und Roboter ab. Dabei kann das eingesetzte Sicherheitsprinzip abhängig von den Gefährdungen, die von dem eingesetzten Robotersystem ausgehen, in den unterschiedlichen KTs umgesetzt werden. Viele der MRK-Anwendungen, die unter einem der oben eingeführten Kooperationstypen KT-1 bis KT-3 umgesetzt werden, folgen nicht strikt einem der hier beschriebenen Sicherheitsprinzipien, sondern entsprechen Mischformen. So ist es z. B. möglich, KT-1 (Bewegungsvorgabe) mit einem schweren, harten Robotersystem und dem Sicherheitsprinzip „Handführung“ umzusetzen, wobei das Herantreten an den Roboter durch das Sicherheitsprinzip „Stopp“ umgesetzt ist. Wird dieselbe MRK-Anwendung jedoch durch ein leichteres, nachgiebigeres Robotersystem durchgeführt, dessen Kollisionskräfte ausreichend abgeschwächt sind, kann die sicherheitstechnische Umsetzung rein über das Sicherheitsprinzip „Kontaktregelung“ umgesetzt werden (s. z. B. (Haddadin, Suppa et al. 2010)). Dabei gilt es, besonders bei den Übergängen zwischen den Sicherheitsprinzipien auf die sicherheitsgerichtete Umsetzung zu achten und Komponenten mit entsprechenden Sicherheitskategorien einzusetzen (s. auch (Meyer 2011)).

Bei einer MRK-Anwendung bewegt sich im Allgemeinen nicht nur der eingesetzte Roboter, sondern vielmehr ein komplettes Robotersystem. Dies kann neben dem Roboter auch Greifer, Werkzeuge, Sensoren sowie externe Hilfsachsen beinhalten, vgl. (DIN EN ISO 10218–1:2011 2011). Welche zusätzlichen Aspekte beim sicheren Betrieb eines Robotersystems beachtet werden müssen, ist dazu in (DIN EN ISO10218-2:2011 2011) geregelt.

Bei der Bewertung möglicher Kollisionen in der MRK müssen alle Komponenten des Robotersystems gleichermaßen berücksichtigt werden. Für einen Menschen, der mit einem bewegten Teil des Robotersystems kollidiert, ist allerdings die Unterscheidung unerheblich, ob es sich bei dem Teil im Kontakt um einen Teil des Roboters oder um eine Peripheriekomponente handelt.

1.3.5 Sicherheitsstrategien in der direkten physischen MRK

Im Folgenden soll der Stand der Forschung und Technik für die unterschiedlichen Kooperationstypen näher beleuchtet werden. In der Fachliteratur finden sich viele Ansätze zur Kollisionsvermeidung von Robotern mithilfe von Arbeitsraumüberwachung sowie entsprechenden Reaktionsstrategien mit angepasster Bahnplanung. Ziel der Arbeitsraumüberwachung in der MRK ist es, z. B. mit Hilfe von bildgebenden Sensoren den Arbeitsraum eines Roboters zu überwachen und so das Eintreten einer Person, bzw. deren Bewegung innerhalb des Arbeitsraumes relativ zum Roboter, rechtzeitig zu detektieren. Damit sollen schadenbringende Bewegungen des Roboters vermieden werden. Die Reaktionen auf erkannte mögliche Kollisionen reichen dabei von Abbremsen bis hin zur Planung von Ausweichbewegungen.

Die Autoren in (Gecks und Henrich 2006) beschreiben die Arbeitsraumüberwachung für eine kollisionsfreie Bahnplanung von Roboterbewegungen durch die Fusion mehrerer Kamerabilder. Durch die Erstellung von Differenzbildern ist es möglich, bekannte und unbekannte Objekte im Arbeitsraum zu erkennen und so auf die Dynamik des Menschen im Arbeitsraum bei der MRK zu reagieren. Dies ist auch mit den Echtzeitanforderungen der Online-Bahnplanung in einer Applikation möglich, wie die Autoren in (Werner und Henrich 2014) zeigen.

Eine Schwierigkeit bei der Anbringung von Sensoren außerhalb des Arbeitsraumes des Roboters tritt auf, wenn Objekte durch die Roboterstruktur verdeckt sind. Das System, das Winkler in (Winkler 2011) beschreibt, integriert die Sensoren daher entlang der Roboterstruktur, um Abschattungen zu minimieren, und überwacht so den Arbeitsraum vom Roboter aus. Durch Kopplung der Robotersteuerung an die Datenauswertung der Sensoren kann dieses System detektierte Roboterteile herausrechnen und so zuverlässig auf unbekannte Objekte in der Umgebung reagieren.

Zusätzlich zur Online-Bahnplanung, die das Ziel der Kollisionsvermeidung hat, stellt Puls in (Puls et al. 2012) eine Risikoabschätzung vor, in der er mithilfe einer PMD[7]-Kamera Körperhaltungen des Menschen bezüglich des Robotersystems erkennt, ein zugehöriges Kollisionsrisiko abschätzt und daraus einen sicheren und möglichst produktiven Bewegungspfad für den Roboter plant. Der Vorteil der dabei eingesetzten Sensortechnologie ist, dass die Anforderungen an eine sicherheitsgerichtete Auswertung technisch realisierbar sind.

[7] PMD – Photomischdetektor; optischer Sensor mit Lichtlaufzeitverfahren als Funktionsprinzip (engl. Time-of-Flight (TOF))

Eine ähnliche Herangehensweise präsentieren die Autoren in (Bascetta et al. 2011), wobei sie hier die Anfangstrajektorien der Bewegungspfade von Anlagenbedienern innerhalb einer Roboterzelle auswerten, um daraus Rückschlüsse auf deren angestrebte Zielposition innerhalb der Zelle zu treffen. Dabei nutzen die Autoren einfache Farbkameras. Aktuell erfüllt keines der oben beschriebenen Systeme zur dreidimensionalen dynamischen Arbeitsraumüberwachung die sicherheitstechnischen Anforderungen des Sicherheitsprinzips „Abstandsüberwachung“, wie in (DINENISO 10218–1:2006-06 2006) gefordert. Dazu müssten z. B. alle Steuerungsbauteile der implementierten Reaktionsstrategien und die elektrischen und elektronischen Bauteile der eingesetzten Sensoren den Anforderungen zur funktionalen Sicherheit genügen (Hauke et al. 2008). Hierzu gehören z. B. Ausfallwahrscheinlichkeiten der verbauten Komponenten sowie Diagnose- und Fehlerdetektionsmöglichkeiten. Daher hinkt die Zahl der umgesetzten realen Industrieanwendungen den wissenschaftlich erprobten Möglichkeiten noch weit hinterher.

Eine teildynamische Arbeitsraumüberwachung ist mit der aktuell verfügbaren Sicherheitstechnik nur in einer Form möglich. Dabei werden mehrere statische Sicherheitsfelder durch sicherheitsgerichtete Systeme (d. h. Systeme, die den Anforderungen der funktionalen Sicherheit genügen), wie Sicherheitslaserscanner, Lichtschranken oder sichere Kameratechnik überwacht und dynamisch über eine Sicherheits-SPS geschaltet. Dadurch kann der Roboter unter Einsatz seiner Sicherheitssteuerung reaktiv auf die Annäherung von Personen in unterschiedlichen Geschwindigkeits- oder Arbeitsräumen geschaltet werden, wie z. B. in (Schraft et al. 2005) und in (Thomas et al. 2011) gezeigt.

Bei den vorgestellten Systemen und Verfahren zur Arbeitsraumüberwachung unterscheiden die Autoren nicht, welchen Grad der Gesundheitsgefährdung das bewegte Robotersystem für den Menschen darstellt. Unabhängig vom eingesetzten Robotersystem wird evaluiert, inwieweit eine Kollisionswahrscheinlichkeit gegeben ist, auf die reagiert werden muss. Die Reaktionssysteme werden vor einer Kollision getriggert mit dem Ziel, die Kollision zu vermeiden. Um jedoch eine direkte physische Kooperation des Roboters mit dem Menschen zu ermöglichen, reichen diese Methoden nicht aus. Zur Umsetzung von Sicherheitsprinzipen in der direkten physischen Kooperation bedarf es einer Kollisionssicherheit, d. h., Kollisionsgrenzwerte sind einzuhalten. Dies kann nur durch eine entsprechende Quantifizierung der Kollisionsgefährdung durch Messen oder Modellierung erreicht werden, wie auch in der Technischen Spezifikation ISO/TS 15066 (ISO/TS 15066 2016) beschrieben. Diese erweitert die Robotersicherheitsnorm bezüglich der Konkretisierung der Umsetzungsvorgaben zur MRK.

Die Autoren in (Yamada, Hirasawa et al. 1997) untersuchten den Effekt von Kollisionen eines Roboters mit einem Menschen bezüglich evaluierter Schmerztoleranzgrenzen. Dabei präsentieren sie dämpfende Strukturmaßnahmen und eine Kollisionsdetektion, mit denen es ihnen möglich ist, bei niedrigen Geschwindigkeiten den Kollisionseffekt abzuschwächen. Als eine der ersten in der Robotik beschrieben Zinn, Bicchi und Tonietti die Kollisionsgefährdung eines bewegten Roboterarmes als Quantifizierung bezüglich seines Kollisionspotenzials aus Masse und Steifigkeit in Relation zu einem Verletzungspotenzial des Menschen (Zinn et al. 2004) und (Bicchi, Tonietti 2004). Ziel der dabei eingesetzten Modellierung des Kollisionspotenzials ist es nicht mehr, jegliche Kollisionen zu vermeiden, sondern mögliche Kollisionen unter einen verträglichen Schwellwert abzuschwächen. Dabei stellen sie Robotersysteme mit neuartigen Antriebssystemen vor, die spezifisch für die MRK entwickelt werden und unter dem Schlagwort „Soft Robots“ eine neue Generation von Robotersystemen einleiten.

Heinzmann definiert in (Heinzmann, Zelinsky 2003) einen Gefährdungsindex für einen Roboter basierend auf seinem quantifizierten Kollisionspotenzial, dem er die Kollisionskraft zugrunde legt. Dabei empfiehlt er die Gravitationskompensation als den grundlegenden Bewegungszustand eines MRK-Roboters. Der Roboter verharrt aktiv geregelt jeweils in seiner Stellung, bis von außen an einem beliebigen Roboterteil eine Kraft aufgebracht wird. Dieser weicht der Roboter dann in Gegenrichtung zur aufgebrachten Kraft aus. Diese Gravitationskompensation nutzen auch die Autoren in (Haddadin et al. 2008) und (De Luca et al. 2006) als eine ihrer Strategien zur Kollisionsreaktion. Analog zum Gefährdungsindex in (Heinzmann, Zelinsky 2003) entwickeln die Autoren in (Haddadin et al. 2012) Regelungsalgorithmen für einen redundanten Manipulator basierend auf der modellierten Kollisionskraft an einem beliebigen Kollisionspunkt. Diese Algorithmen nutzen sie zur Geschwindigkeitssteuerung in der MRK.

Die Autoren in (Kulic, Croft 2005) und (Kulic, Croft 2007) definieren auf ähnliche Weise ihren Gefahren-

index basierend auf der bewegten Robotermasse, der Geschwindigkeit und dem detektierten Abstand des Roboters zu einem Menschen. Die Auswertung dieses Gefahrenindex resultiert auch hier in einer Geschwindigkeitsanpassung, die in Echtzeit an die Robotersteuerung übergeben wird. Damit wollen die Autoren sowohl die Wahrscheinlichkeit einer Kollision als auch ihre möglichen Folgen beim Eintritt einer Kollision verringern. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass die bewegte Masse und die Geschwindigkeit des Roboters die Kollisionsgefährdung maßgeblich beeinflussen. Im Fokus der Arbeiten der Autoren in (Lacevic, Rocco 2010) und (Polverini et al. 2014) steht die Beschreibung der Kollisionsgefährdung als eine Gradientenfeld-Formulierung aus Lage und Geschwindigkeit der Roboterachsen. Diese dient dazu, die Gefahr bei Annäherung an den bewegten Roboterarm abzuschätzen. Hierbei geht es darum, unabhängig von der Anwesenheit von Personen zu jedem Zeitpunkt die Kollisionsgefährdung des Roboters abschätzen zu können und so für den Roboter eine eigensichere Steuerung zu realisieren. Ogorodnikova vergleicht in ihrer Arbeit (Ogorodnikova 2009) Gefährdungsindizes basierend auf Kollisionskräften, resultierenden Beschleunigungen und relativen Abständen zu Personen und diskutiert dabei auch den Einfluss von Steifigkeiten der kollidierenden Struktur.

Die oben beschriebenen Herangehensweisen basieren auf der These, dass Kollisionseffekte – hier meist die Kollisionskraft – quantifizierbar gemacht werden müssen, um Roboter sicher in der MRK zu betreiben. Dieser neue Aspekt rückt das Thema der „Kollisionsfolgenabschätzung“ von Robotern in den Fokus der Gestaltung und Bewertung von Robotersystemen, wenn diese in einer MRK-Umgebung eingesetzt werden sollen. Im folgenden Abschnitt werden dazu Grundbegriffe eingeführt und der Stand der Forschung aufgezeigt.

1.3.6 Kollisionsfolgenabschätzung in der Robotik

Die Kollisionsfolgenabschätzung zielt darauf ab, die Effekte einer potenziellen Kollision abzuschätzen, geeignete Grenzwerte zu definieren und daraus optimale Designvorgaben für die Sicherheit im Falle einer Kollision zu entwickeln. In den folgenden Abschnitten wird die generelle Methode vorgestellt und diese auf die Gegebenheiten in der Robotik übertragen. Ferner werden notwendige Formulierungen und Werkzeuge zur Kollisionsfolgenanalyse vorgestellt.

Sicherheitsmaßnahmen in MRK-Applikationen dienen dazu, den Bedienerschutz zu erhöhen. Um das Verletzungsrisiko durch die Kollision mit einem bewegten Roboterteil zu verringern, gibt es mehrere Vorgehensweisen, die sich nach ihrem zeitlichen Einsatz bei der Kollisionsbetrachtung unterteilen lassen. Dazu wird die Kontaktphase zwischen Mensch und Roboter – analog zur Automobilsicherheit (Kramer 2009) – unterteilt in die Phasen vor, während und nach dem Kontakt. Bild 1.19 visualisiert die zeitliche Folge der drei Phasen Prä-Kontakt, In-Kontakt und Post-Kontakt.

Technische Sicherheitsmaßnahmen für die MRK lassen sich dabei aufgrund ihrer Wirkung in den drei Phasen unterscheiden in aktive oder passive Sicherheitsmaßnahmen, wie im Folgenden nach (Burg, Moser 2009) definiert als:

Aktive Sicherheit – kollisionsvermeidende Maßnahmen

Technische und organisatorische Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung in der Prä-Kontaktphase; Ausschluss von Kollisionsfolgen für den Bediener

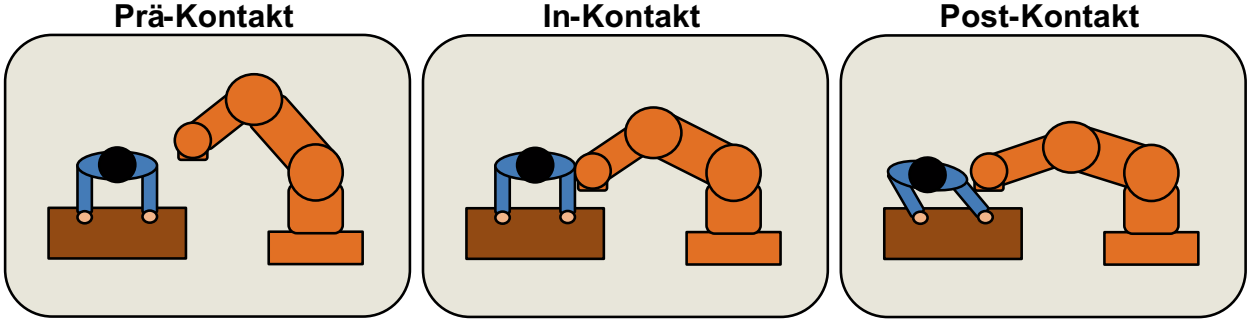

Bild 1.19 Kontaktphasen bei der Mensch-Roboter-Kollision, in Anlehnung an (Kramer 2009)

1

Passive Sicherheit – kollisionsfolgenmindernde Maßnahmen

Technische und organisatorische Maßnahmen zur Kollisionsfolgenminderung in der In- oder Post-Kontaktphase; Reduktion der Kollisionsfolgen auf die Gesundheit des Bedieners im Falle einer Kollision

Als aktive Sicherheitsmaßnahmen aus der Automobilindustrie sind z. B. Fahrerassistenzsysteme wie Brems- oder Spurhalteassistent zu nennen, die eine Kollision unwahrscheinlicher machen. Analog dazu sind in der Robotik als Technologien der aktiven Sicherheit z. B. Sicherheitslichtschranken, -laserscanner oder andere Arbeitsraumüberwachungssysteme zu sehen, die einen Zutritt des Menschen in den Bewegungsbereich des Robotersystems verhindern und so eine Kollision mit dem Roboter ausschließen.

Airbag- und Gurtsysteme sind bekannte technische Sicherheitsmaßnahmen, die der passiven Sicherheit zugeordnet sind und heutzutage in jedem Automobil eingesetzt werden, um für den Menschen bei einem Unfall die Verletzungsfolgen zu begrenzen. Weil Mensch und Roboter bisher räumlich getrennt waren, lag der Fokus in der Robotik jedoch bisher vor allem darauf, aktive Sicherheitsmaßnahmen zu entwickeln. Für MRK-Applikationen reicht diese eingeschränkte Sichtweise nun nicht mehr aus und es müssen vermehrt Maßnahmen entwickelt werden, um die passive Sicherheit eines Robotersystems zu verbessern. Dazu muss ein methodisches Vorgehen zur Analyse der zu begrenzenden Kollisionsfolgen aufgezeigt werden, wie z. B. in (Oberer-Treitz 2017) vorgestellt.

Heiligensetzer beschreibt in seiner Arbeit (Heiligensetzer 2003) die Kombination aktiver und passiver Sicherheitsmaßnahmen in der Robotik. Für die aktive Sicherheit gilt: Der erweiterte Raum um die Roboterstruktur wird mit einer kapazitiven Sensorik überwacht, um die Bewegung vor der Kollision zu beenden. Für den Fall, dass das aktive Sicherheitssystem ausfällt bzw. der Roboter nicht ausreichend schnell reagiert, ist der Roboter zusätzlich mit einer Schaumstoffhülle gepolstert, in der sich taktile Elemente verbergen. Diese schalten im Falle einer Kollision die Bewegung ab und dämpfen durch den Schaumstoff den Anprall, was der passiven Sicherheit dient.

Zur Bewertung aktiver Sicherheitsmaßnahmen gilt es, die Zuverlässigkeit der eingesetzten Sensorik oder Regelungsstrukturen einzuordnen. Effekte aus dem Robotersystem bezüglich Reaktionszeiten und Nachlaufwegen müssen dabei genauso berücksichtigt werden wie die Durchlässigkeit der Überwachungssysteme bei Bewegungen des Bedieners in Richtung des Roboters. Da das Ziel aktiver Sicherheitsmaßnahmen ist, den Kontakt zu vermeiden, müssen Effekte aus dem Kontakt mit dem Bediener nicht betrachtet werden. Anders sieht aus es bei technischen Maßnahmen zur passiven Sicherheit, also zur Kollisionsfolgenminderung. Ob diese wirksam sind, kann erst in der Untersuchung der verbleibenden Effekte in der Kollision eines Bedieners mit dem Robotersystem betrachtet und bewertet werden. Dazu bietet sich die Kollisionsuntersuchung von Robotersystemen durch Crash-Tests oder analog durch entsprechende Rechenmodelle an. Dazu werden im Folgenden weitere notwendige Grundbegriffe zur Kollisionsfolgenbewertung eingeführt.

Zur Bewertung der passiven Sicherheit z. B. eines Robotersystems müssen quantifizierbare Bewertungskriterien aufgestellt werden. Dies ermöglicht, sowohl verschiedene Robotersysteme innerhalb einer gemeinsamen Metrik vergleichend zu betrachten als auch ihre quantitativen Toleranzgrenzen absolut zu bewerten. Es bedarf dazu als Maß für die Gewährleistung des Gesundheitsschutzes einer Bewertung innerhalb einer zugehörigen Zustandsbeschreibung. Zu diesem Zweck müssen adäquate Modelle mit entsprechenden Schutzkriterien, als zulässige Toleranzgrenze aufnehmbarer Belastungswerte, aus Verletzungskriterien des menschlichen Organismus abgeleitet werden (Appel et al. 1984).

Verletzungskriterien sollen ermöglichen, den Zusammenhang zwischen physikalisch messbaren Größen und der Verletzungsschwere einer Körperregion herzustellen. Die biomechanische Forschung untersucht dabei den funktionalen Zusammenhang zwischen einer mechanischen Einwirkung auf den menschlichen Körper und Art und Ausmaß der dabei entstehenden Verletzung. Dazu werden zur Untersuchung schwerer Verletzungen auch Leichen untersucht, um daraus Rückschlüsse auf Verletzungsmechanismen zu bekommen und Ergebnisse für die mechanische und digitale Modellbildung zu erhalten. In Ersatzmodellen für den Menschen sollen entsprechende Mechanismen abgebildet werden, mithilfe derer dann vergleichbare Schutzkriterien gemessen oder berechnet werden können (Kramer 2009).

Die ersten bekannten Arbeiten mit Leichenversuchen, die speziell der experimentellen Analyse von Kopfverlet-

zungen dienten, entstanden an der Wayne State University von Detroit, ab Anfang der 1930er Jahre. Aus diesen Arbeiten entstand in den 1970er Jahren die Beschreibung der „Cerebral Concussion Tolerance Curve“, auch bekannt als die „Wayne State Tolerance Curve – WSTC“, die den mathematischen Zusammenhang zwischen maximaler Kopfbeschleunigung und deren Einwirkdauer zu potenziellen Hirnverletzungen beschreiben soll (Gurdjian et al. 1966).

Am bekanntesten sind die Methoden zur Analyse von Schutzkriterien mit Crash-Tests, bei denen mithilfe anthropomorpher Testpuppen – sogenannter Dummies – standardisierte Kollisionen durchgeführt werden, um den erreichten Sicherheitsgrad zu bewerten. Dazu werden Belastungsgrößen am Dummy oder dessen mathematischen Modellen definiert, bei denen es sich nicht um Versagenskriterien der Struktur des Dummies handelt, sondern um Signalgrößen, die mithilfe entsprechender Aufnahmesensorik gemessen werden können. Aus diesen wiederum werden Schutzkriterien abgeleitet, die die Relation zu Verletzungskriterien des menschlichen Organismus herstellen (Kramer 2009). So leitet sich aus der WSTC das sogenannte Head Injury Criterion (HIC) ab. Um dieses zu berechnen, werden die resultierenden, translatorischen Beschleunigungen des Masseschwerpunktes des Kopfes über das Zeitintervall einer Kollision ausgewertet (Versace 1971; Cichos et al. 2008).

Der HIC wird vor allem in der Automobilsicherheit und der Sportmedizin genutzt, um das Verletzungsrisiko infolge der Einwirkung großer Kollisionsenergien auf den menschlichen Organismus zu bewerten. Analog gibt es für weitere Körperteile Schutzkriterien, die sich aus einer oder mehreren Belastungsgrößen zusammensetzen und mithilfe statistischer Wahrscheinlichkeiten zu einer Bewertung gekoppelt sind (Schmitt et al. 2010). Belastungsgrenzwerte in Form von Toleranzleveln für die unterschiedlichen Schutzkriterien werden dabei bezüglich der Klassifikation einer bestimmten Verletzungsschwereskala definiert. Die Werte sind innerhalb eines bestimmten Interessen- und Geltungsbereiches gültig. So liefert z. B. der EuroNCAP[8] Grenzwerte zur Beurteilung der passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen, die auf dem europäischen Markt in Verkehr gebracht werden. Gleichzeitig definiert er die zur Evaluierung erforderlichen Testszenarien. Bestrebungen seitens der Robotik, ein ähnliches Instrument aufzustellen, zeigen sich in aktuellen Forschungsarbeiten bei der Abschätzung von Kollisionsfolgen sowie in den definierten Anforderungen zu Kraft- und Druckbegrenzungen von Kontakten in der MRK, wie sie in der ISO/TS 15066 spezifiziert sind.

Um Gefährdungen bei einer potenziellen Mensch-Roboter-Kollision zu bewerten, müssen, wie beschrieben, die Belastungen quantitativ erfasst werden. Dabei ist es notwendig, alle Charakteristiken eines spezifischen Robotersystems zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die Gefährdungsbewertung auch den „Worst Case“ – den ungünstigsten anzunehmenden Fall – abdeckt.

Verletzungskriterien für verschiedene Körperteile, besonders für den Kopf, werden mit biomechanischen Methoden vor allem für die Automobilsicherheit ausführlich analysiert sowie zugehörige Verletzungsmechanismen in Modellen nachgebildet. Ausführliche Studien über die Möglichkeiten und Grenzen der aktuell eingesetzten Testsysteme und -modelle finden sich z. B. in (Thomas et al. 2006) und (Simpson, Davidson 2001).

In der Robotik ist die Analyse von Verletzungskriterien für den Kopf analog zum Vorgehen aus der Automobilindustrie erstmals von den Autoren in (Zinn, Roth et al. 2004) vorgenommen worden. Die Autoren verwenden darin ein einfaches zweidimensionales Masse-Feder-Modell, um über die Auswertung der Bewegungsgleichungen die Kopfbeschleunigung und daraus den HIC bei einem freien Anprall zu berechnen. In (Bicchi, Tonietti 2004) wird diese Modellierung detaillierter erläutert und auch kurz die Übertragung der Verletzungswerte auf andere Körperteile angesprochen. Die Autoren beider Artikel fokussieren dabei auf die Entwicklung neuer Antriebe und deren Regelung, mit elastischer Kopplung von Antriebs- und Achsträgheit, womit in einer freien Kollision die Kollisionsenergie an jeder beliebigen Stelle in der Roboterstruktur herausgenommen werden kann und somit Kollisionsfolgen gemindert werden können.

Bei der Zertifizierung des Serviceroboters „Wakamaru“ wird ein Kinder-Dummy hinzugezogen, um die auftretenden HIC-Werte bei einem Verlust der Standfestigkeit des Roboters mit einem kletternden Kind zu analysieren (Kabe et al. 2005). Die Autoren in (Yamada et al. 1997) beschäftigen sich nicht direkt mit Verletzungs-

[8] EuroNCAP – European New Car Assessment Programme; bietet als unabhängiger Verein Autokäufern und Herstellern eine realistische und unabhängige Beurteilung der Sicherheitsmerkmale einiger der meist verkauften Fahrzeuge in Europa

werten, allerdings wird mithilfe einer Klassifizierung von Schmerzgrenzen für verschiedene Körperteile ein ähnliches Vorgehen in Richtung der Bewertung von Robotersystemen für MRK bezüglich ihres Gefährdungspotenzials beschrieben.

Aufgrund der Nichtlinearität der Roboterkinematik sowie der steuerungstechnischen Effekte lässt sich die Kollisionswirkung eines bewegten Robotersystems in unterschiedlichen Achskonfigurationen mit unterschiedlich wirkenden Massenträgheiten und Drehmomenten nicht auf einen Kollisionsfall reduzieren. Vielmehr entspricht jedes Robotersystem einem mehrdimensionalen Kollisionsparameter-Datensatz, dessen Gefährdungen evaluiert werden müssen. Dazu sollen die entsprechenden mechanischen Belastungen auf den menschlichen Körper abgebildet werden, die für die Evaluierung möglicher Verletzungsmechanismen im Falle einer Kollision mit dem Menschen relevant sind.

Der Vorteil der experimentellen Analyse von Robotersystemen liegt darin, dass nicht nur die Effekte aus der Dynamik des Robotersystems, sondern auch weitere Einflüsse, wie das Verhalten von Schleppketten mit Kabeln, Reibungseffekte und zusätzliche Dämpfungshüllen etc. direkt erfasst werden. Bei schon vorhandenen Systemen, deren Grenzen zur sicheren MRK für eine vorliegende Struktur gegeben sind, ist es mit einer experimentellen Messung einfach möglich, das Potenzial der Kollisionssicherheit durch strukturelle Anpassung am Äußeren des Roboters messbar zu verbessern. Neuartige Materialien, zum Teil zusätzlich ausgestattet mit sensorischen Elementen, deren dämpfende, nichtlineare Eigenschaften nicht direkt in der Kollisionsbetrachtung modelliert werden können, lassen sich durch eine experimentelle Bewertung schnell und einfach in eine Leistungssteigerung des Robotersystems bei gleichzeitig sicherem Betrieb umsetzen. Allerdings sind experimentelle Messungen aufwendig, weil vielfältige Kollisionskonfigurationen zu betrachten sind.

Um alle Charakteristiken der beiden Kollisionspartner Roboter und Mensch vollständig abzubilden, müssten die Kollisionstests mit dem Robotersystem und realen Personen durchgeführt werden. Um Kollisionsschäden, die zu Verletzungen führen, zu evaluieren, sind Versuche mit dem Menschen jedoch nicht möglich. In der Literatur finden sich zwar einige wenige Selbstversuche, die aber nicht für die Abbildung des gesamten potenziellen Kollisionsspektrums umsetzbar sind. So setzt sich z. B. in (Haddadin et al. 2008) und (Haddadin et al. 2009) ein Autor selbst Kollisionen mit dem KUKA LBR gegen Kopf, Brust und Arm aus. Diese Versuche dienen hier dem Nachweis funktionierender Kollisionsreaktionen und eignen sich nicht für eine systematische Studie von Verletzungsschweren bei der Kollision mit unterschiedlichen Robotersystemen über die Verletzungseintrittsschwelle hinaus. Des Weiteren beschreiben die Autoren in (Yamada, Hirasawa et al. 1997) punktuelle statische Druckbelastungen von Probanden mit einem Roboter, um eine Schmerzgrenze zu evaluieren. Auch solche Versuche sind lediglich für geringe Belastungen umsetzbar und müssen mit einer sehr sorgfältigen Risiko-Nutzen-Abwägung einhergehen.

Abstraktionsgrade der Kollisionspartner sollen in Betracht gezogen werden, um die systematische Analyse unterschiedlicher Kollisionskonfigurationen zu ermöglichen. Dabei gilt es, relevante Charakteristiken der Kollisionspartner zu erhalten. Bild 1.20 zeigt mögliche Abstraktionsgrade und deren Kombinationen in Form einer Matrix. In den unterschiedlichen Kombinationen sind sowohl experimentelle als auch simulationsgestützte Kollisionsfolgenuntersuchungen denkbar. In der Matrix sind aktuelle Forschungsarbeiten eingezeichnet, die in den folgenden Abschnitten erläutert, diskutiert und eingeordnet werden.

Anstelle von Freiwilligenversuchen mit realen Menschen, die auf leichte Belastungsfälle begrenzt sind und Einschränkungen in der Instrumentalisierung mit geeigneten Messgeräten mit sich bringen, kommen in Forschungsstudien der Biomechanik oftmals PMHS[9] oder Tierkadaver zum Einsatz (Schmitt et al. 2010). Diese bedürfen einer tiefergehenden ethischen Auseinandersetzung bezüglich Notwendigkeit und Nutzen der Experimente und werden daher in den referenzierten Arbeiten ausgeschlossen. Alternativ werden als Ersatz für den menschlichen Körper mechanische Ersatzmodelle, wie die im vorangegangenen Kapitel eingeführten Dummies sowie dazu entwickelte Prüfstande eingesetzt. Diese bilden spezifische Mechanismen des menschlichen Körpers ab, die bei einer Kollision aktiviert werden und durch entsprechende Instrumentalisierung so zur Aufnahme von Belastungen genutzt werden können. Auch mathematische (digitale) Menschmodelle werden zur Analyse von Mensch-Roboter-Kollisionen genutzt (Oberer-Treitz 2017).

[9] PMHS – Postmortal Human Subjects; Verstorbene Testpersonen, deren Leichnam zu medizinischen Studien genutzt wird

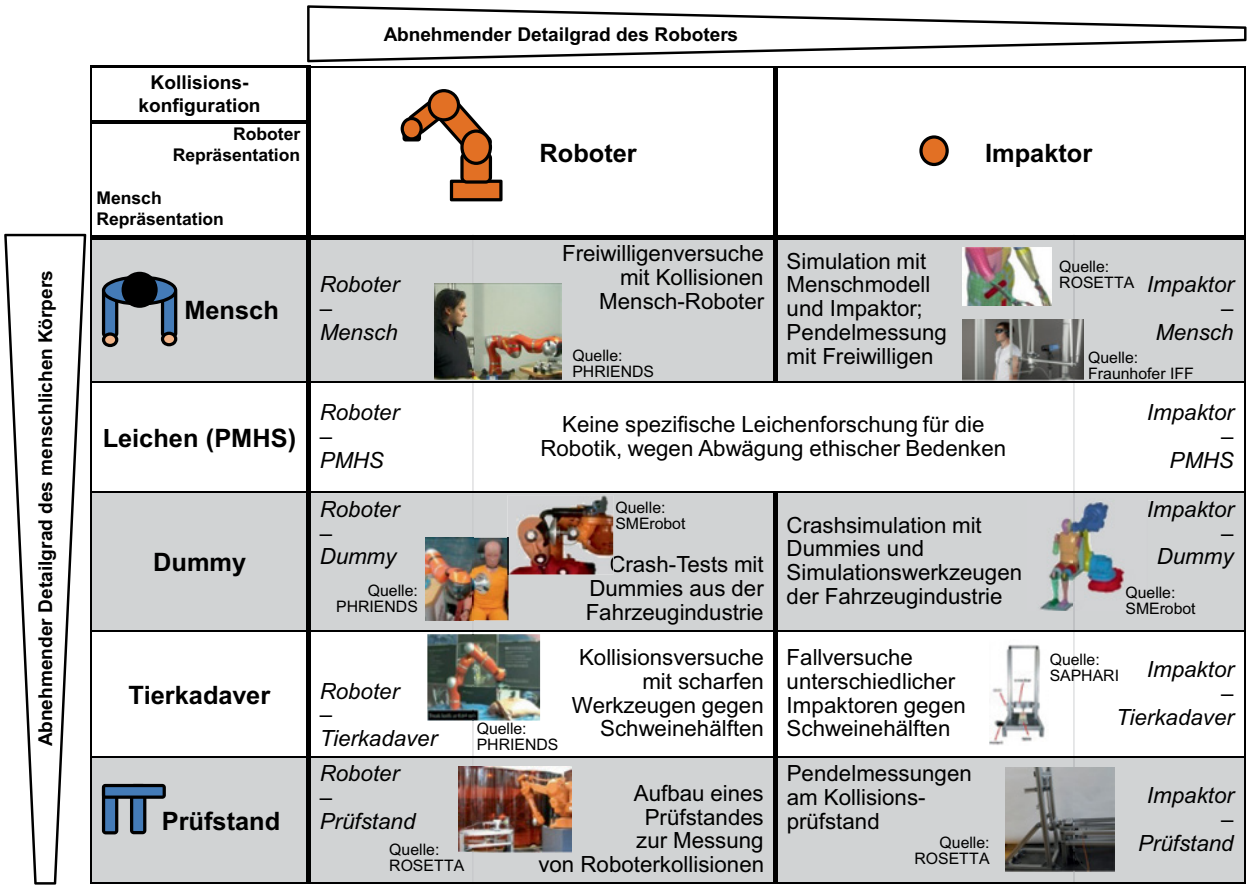

Bild 1.20 Abstraktionsgrade der Kollisionspartner zur Analyse von Mensch-Roboter-Kollisionen und Einordnung aktueller Forschungsaktivitäten

Bei experimentellen Untersuchungen ist ein offensichtlicher Vorteil, dass das komplette Robotersystem eingesetzt wird. Strukturelle sowie steuerungstechnische Effekte werden korrekt berücksichtigt, und das auch ohne Kenntnisse des zugrunde liegenden dynamischen Robotermodells, auf das der Anwender und Nutzer eines kommerziellen Robotersystems üblicherweise nicht zugreifen kann.

Um das Robotersystem für Simulationen in seiner Komplexität zu reduzieren, kann der kollidierende Teil des Robotersystems als ein Massepunktimpaktor modelliert werden, der die dynamischen Eigenschaften des Robotersystems im Kontaktpunkt widerspiegelt. Diese Beschreibung ist nach der Theorie der reflektierten Trägheit von Khatib möglich. Diese beschreibt die Transformation der Dynamik vom Gelenkraum in den kartesischen Raum und ermöglicht, bei bekannten Gelenkmassen, -trägheiten und -drehmomenten entlang der Roboterkinematik an einem beliebigen Punkt die Kraft in Bewegungsrichtung zu bestimmen (Khatib 1995). Um das Kollisionspotenzial eines Roboters auf diese Weise zu analysieren, wird das vollständige dynamische Modell des eingesetzten Roboters benötigt. Die Autoren in (Haddadin et al. 2012) beschreiben detailliert das Vorgehen der Modellierung der Dynamik eines seriellen Roboters als Masseimpaktor und nutzen es, um Daten von Kollisionsschäden in vergleichenden Falltests mit einfachen geometrischen Impaktoren und Schweinehälften aufzunehmen. Sie analysieren die impaktierten Schweinehälften medizinisch und nutzen die Information über die Schädigung des Weichgewebes, um die Schwere einer Verletzung aus einer dynamischen Roboterbelastung zu bewerten. Analog gehen die Autoren in (Behrens und Elkmann 2014) vor, wobei hier Selbstversuche mit Pendelimpaktoren durchgeführt werden, um die Grenze des Entstehens leichter Gewebsverletzungen zu evaluieren.

Dass der Roboter als einfacher Impaktor abstrahiert wird, z. B. als Kugel mit einer spezifischen Masse und Geschwindigkeit, ist vor allem dann von Vorteil, wenn ein generisches Set an Parameterkombinationen aufgestellt werden soll, um damit verschiedene Roboter-

systeme abzubilden. Dieses Vorgehen bildet die Grundlage von Parameterstudien, aus denen eine Gefährdungstafel für potenzielle, generische Kollisionsszenarien aufgestellt werden kann, wie in (Oberer-Treitz 2017) vorgestellt.

In (Oberer 2006) wird erstmals die komplette simulationsgestützte Kollisionsbewertung mit einem Ganzkörpermodell, hier einem Seitenaufprall-Dummy, in Form von freien Roboter-Dummy-Kollisionen vorgestellt, um die passive Robotersicherheit zu klassifizieren. Mithilfe der Finite-Elemente-Simulation wird dabei das Kollisionsverhalten eines seriellen Industrieroboters untersucht. Dieses Vorgehen wird in (Oberer et al. 2006) und (Oberer, Schraft 2007) detailliert erläutert und die Simulationsergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

Die Autoren in (Haddadin et al. 2007) und (Haddadin et al. 2009) diskutieren eine Serie von Crash-Tests mit einem Dummy-Modell und Schutzkriterien aus dem Fahrzeugbereich sowie Kollisionsstudien durch Selbstversuche und nehmen eine Verletzungsklassifizierung vor, um steuerungstechnische Kollisionsreaktionen mit dem LBR bei stumpfen Kontakten zu bewerten. Die Autoren in (Haddadin et al. 2012) erweitern diese Betrachtungen darauf, die strukturelle Schädigung von impaktierten Schweinehälften zu bewerten, um die untersuchten Verletzungen auf scharfkantige oder spitze Kontakte zu erweitern.

1.3.7 Bewertungsstrategie zur Steuerung des Verletzungspotenzials in MRK-Anwendungen

Indem Roboter bezüglich ihrer Charakteristiken zum Kollisionspotenzial – wie z. B. in (Haddadin et al.2012) und (Oberer-Treitz 2017) beschrieben – modelliert werden, können aus experimentellen oder simulationsgestützten Kollisionsuntersuchungen Kollisionsdatenbanken aufgebaut werden, um das Kollisionspotenzial eines generischen Roboters zu modellieren. Dieses Kollisionspotenzial in Relation zur Auswirkung auf die Gesundheit des Menschen bildet ein Sicherheitswissen, das spezifisch für den Einsatz in der Robotik entwickelt wird und für alle eingesetzten Robotersysteme so direkt nutzbar gemacht werden kann.

Das Ziel ist dabei, dieses Wissen so in der Robotersteuerung zu hinterlegen, dass zu einem beliebigen Prozessschritt in einer MRK-Anwendung eine situative Risikoanalyse für das erkannte Kollisionspotenzial durchführbar ist, um sicherzustellen, dass die Bedienersicherheit im nächsten Prozessschritt weiter gewährleistet ist. Eine Wissensdatenbank bildet den Kern einer Struktur zur Wissensintegration, wie sie in (Naumann, Bengel 2010) beschrieben wird. Sie beinhaltet alles notwendige, bekannte Prozesswissen für eine spezifische Roboterapplikation und kann, abhängig von den Funktionalitäten der eingesetzten Systeme und Komponenten, zur Wissensmodellierung eingesetzt werden. Dazu muss eine Wissensmodellierung, z. B. wie in (Stenmark, Malec 2013) beschrieben, Prozesse des Auslesens, Interpretierens und der Auswahl entsprechender Systemreaktionen auf ein situatives Kollisionspotenzial der Kollisionsdatenbanken beinhalten. Hierfür ist ein methodisches Vorgehen umzusetzen, das die Sicherheit in MRK-Anwendungen basierend auf dem Kollisionspotenzial des eingesetzten Robotersystems bewertet.

Die Gefährdungsanalyse einer MRK-Anwendung muss analog dem klassischen Vorgehen zur Risikoanalyse, wie oben beschrieben, durchgeführt werden. Das Ziel der Bewertung mithilfe der potenziellen Kollisionsfolgen ist, ein quantifizierbares Gefährdungspotenzial in Form eines Verletzungsrisikos in der MRK zu bestimmen.

Dazu definiert sich das „Verletzungsrisiko“ aus dem Kollisionspotenzial analog dem Risiko nach (DIN EN ISO 12100:2011-03 2011) wie folgt:

Verletzungsrisiko

Kombination aus Verletzungsschwere infolge des Kollisionspotenzials und der Eintrittswahrscheinlichkeit der zugrundeliegenden Kollision.

Die hierfür zu evaluierenden Gefährdungen entsprechen den Kollisionskonfigurationen, die sich durch Beschreibung aller Charakteristiken für eine bestimmte Kombination von Systemkomponenten in einer MRK-Anwendung in deren verschiedenen Prozessschritten ergeben können. Abhängig von der Gefährdungsexposition einer Person und vom aktuell bestimmten Kollisionspotenzial müssen daraufhin die Einstellungen zur Prozessausführung angepasst werden. Mögliche Präventionsstrategien, wie z. B. Geschwindigkeitsreduktion, Bahnänderung oder eine Prozessunterbrechung, müssen zu jedem Zeitpunkt in der Applikation berücksichtigt werden, um die Bedienersicherheit immer zu gewährleisten.

Dieses Vorgehen, das auch in (Oberer-Treitz et al. 2010) und (Oberer-Treitz 2017) beschrieben wird, gibt vor, die verschiedenen potenziellen Kollisionskonfiguratio-

nen, die sich aus einem Zellenlayout und der Anwendung ergeben können, aufzustellen und auszuwerten. Daraus können dann abhängig von den für die Applikation identifizierten Kollisionskonfigurationen die zugehörigen Verletzungsschweregrade für die bekannten Eingabeparameter ausgewertet werden. Diese ergeben sich aus Kennwerten der Anwendung und der darin aktiven Systeme, wie z. B. die geplanten und möglichen Robotergeschwindigkeiten, Kollisionsstellen, Materialien und Kollisionsgeometrien. Somit wird das Kollisionspotenzial einer spezifischen MRK-Anwendung in einem Prozessschritt durch eine potenzielle Verletzungsschwere quantifizierbar.

Abhängig von den Zugänglichkeiten der Roboterzelle, der Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit einer Person sowie des Detektionsvermögens potenzieller Kollisionen durch Systeme zur Arbeitsraumüberwachung ergeben sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten, mit denen die berechneten Werte weiter gewichtet werden können. Mithilfe dieser Information können dann Entscheidungen in der Ablaufsteuerung des Roboters getroffen werden, um das Robotersystem unter Einhaltung der Sicherheit effizient zu betreiben. Diese Methode kann allerdings in der MRK-Anwendung nur unterhalb eines vorab bestimmten Sicherheitsgrenzwertes genutzt werden, weil die Unverletzlichkeit des Werkers das vorrangige Schutzkriterium ist. Bei möglichen Ausfallwahrscheinlichkeiten von Systemen und Funktionen muss immer der ungünstigste Fall angenommen werden und die einstellbaren Parameter, wie z. B. Abstände zu Personen und Geschwindigkeiten, müssen mit dem maximalen Wert in die Kalkulation des Verletzungsrisikos eingehen. Gleichzeitig können für notwendige und gewollte Kontakte Vorgaben bezüglich der Grenzwerte innerhalb niedriger Schwerekategorien vorgegeben werden, während diese für ungewollte und damit unwahrscheinlichere Kontakte innerhalb der MRK-Anwendung höher angesetzt werden können.

Wenn Sicherheitsvorgaben für Steuerungssysteme in MRK-Anwendungen umgesetzt werden, muss unterschieden werden zwischen den benötigten Sicherheitskategorien bei gewünschten und ungewollten Kontakten. Diese erfolgen für Roboteranwendungen üblicherweise mit dem „erforderlichen Performance Level – PLr“ über die Klassifizierung der Zuverlässigkeit von Steuerungen nach (DIN EN ISO 13849:-1:2016-06 2016). Für die Einhaltung von Verletzungsgrenzen oberhalb einer Schwerekategorie leichter Verletzungen ist die Vorgabe der zweithöchsten Kategorie – PLr *d* – nach gängiger Praxis zwingend notwendig, um die geeignete Risikominderung zu erzielen. Für Systeme und Funktionen hingegen, deren Versagen mögliche Verletzungen unterhalb einer Schwerekategorie leichtester Verletzungen verursachen würde, könnte z. B. auch ein niedrigeres PLr – PLr *c* oder PLr *b* – möglich sein.

Bei den in einer Wissensdatenbank hinterlegten Parametern für ein spezifisches Robotersystem kann zwischen statischen und dynamischen Parametern unterschieden werden. Statische, also über die Prozesslaufzeit unveränderliche Parameter, wie Geometrien und Maximalgeschwindigkeiten des eingesetzten Robotersystems, können rein offline für eine Worst-Case-Abschätzung des Gefährdungspotenzials eines Robotersystems genutzt werden. Dynamische Parameter können während der Laufzeit durch Abfrage der Robotersteuerung ausgewertet werden. Damit ist im Falle einer potenziellen Kollision die aktuelle Kollisionskonfiguration nutzbar, um eine Abschätzung des verbleibenden Gefährdungspotenzials, beispielsweise bei sicher reduzierter Geschwindigkeit, auszuwerten. Wird eine anstehende Kollision bei gegebener Bahnplanung detektiert, kann das potenzielle Verletzungsrisiko bezüglich der aktuell eingestellten Konfiguration, wie in Bild 1.21 aufgezeigt, ausgewertet und eine Entscheidung bezüglich der erforderlichen Reaktion auf die aktuelle Konfiguration abgestimmt werden.

Um das Verletzungsrisiko zu bestimmen, müssen die Einflussfaktoren aus der MRK-Anwendung und die Charakteristiken der dabei eingesetzten Systeme und Funktionen systematisch beschrieben werden. Dabei wird unterschieden zwischen Automatisierungssystemen, die aufgrund ihrer Bewegung ein quantifizierbares Kollisionspotenzial innehaben, Arbeitsraumüberwachungssystemen, die Umgebungsinformationen über Zustände im Arbeitsraum liefern, und zusätzlich modellierten Informationen aus dem Arbeitsablauf der Anwendung. Die Beiträge zur Identifikation der Verletzungsschwere und der Eintrittswahrscheinlichkeit des zu bewertenden Verletzungsszenarios ergeben sich, wie auch in (Oberer-Treitz et al. 2011) und (Matthias et al. 2010) eingeführt, zu:

- Verletzungsschwere:
  - Kollisionspotenzial aus der Dynamik der bewegten Systeme
  - Verletzungspotenzial durch nichtmodellierbare Kollisionen, z. B. mit spitzen, scharfen, heißen oder toxischen Strukturen und Materialien

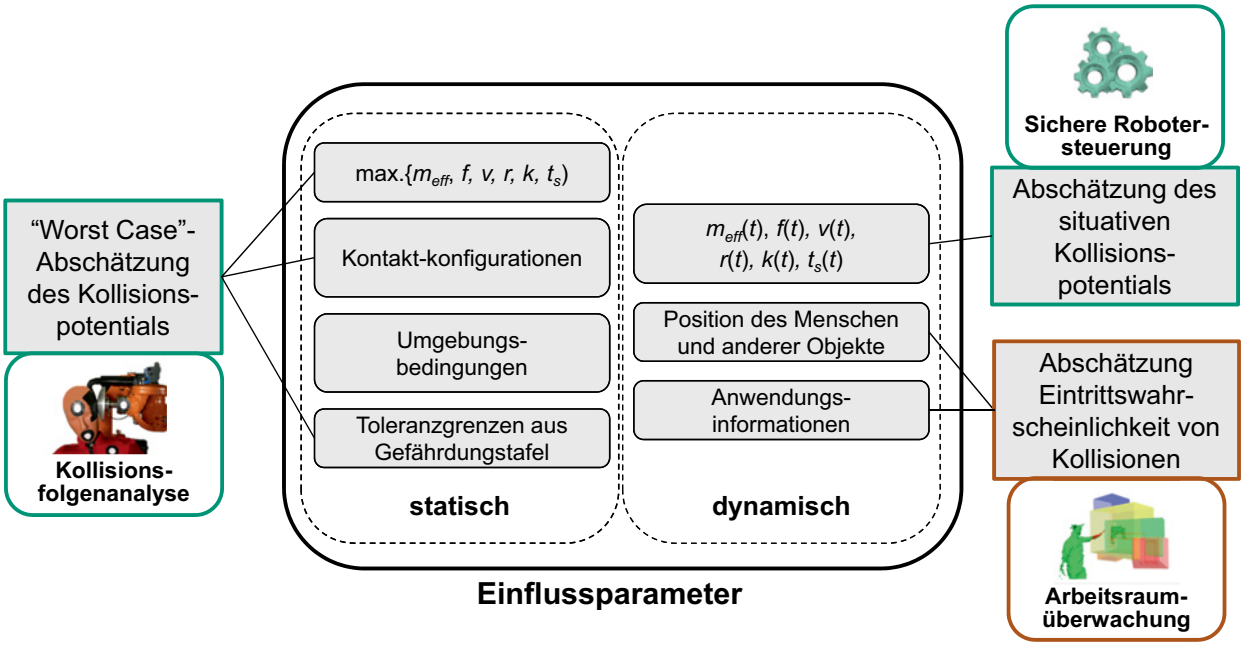

Bild 1.21 Einflussparameter zur Bewertung des situativen Verletzungsrisikos in einer MRK-Anwendung

- Zugänglichkeit des Arbeitsraumes für Personen zur Identifikation der gefährdeten Körperteile
- Einfluss umgebender Strukturen zur Identifikation der Kontaktkonfigurationen

- Eintrittswahrscheinlichkeit:
  - Systeme zur Arbeitsraumüberwachung:
    - Anwesenheit/Position des Menschen innerhalb des Arbeitsraumes
    - Einfluss zusätzlicher Objekte im Arbeitsraum zur Identifikation der Kontaktkonfigurationen
  - Applikationsspezifische Informationen:
    - Ausbildungs- und Trainingslevel der Personen
    - Geplante Aktivitäten und Aufgaben der Personen
    - Bekannte Sicherheitskategorien und Fehlerzustände der eingesetzten Systeme und Funktionen

Dynamische Parameter können während der Prozesslaufzeit (online) genutzt werden, um ein situatives Verletzungsrisiko zu berechnen. Welche Parameter als dynamische Parameter in die Analyse mit eingehen können, ergibt sich aus der Zugänglichkeit der Robotersteuerung und der vorhandenen Überwachungssensorik. MRK-Systeme mit einem gewissen Grad an Situations- und Umgebungserfassung können Information über den aktuellen Status der eingesetzten Systeme und Funktionen sowie Daten und Signale externer Überwachungssysteme nutzen. Sie ermöglichen damit, das Verletzungsrisiko während der Prozesslaufzeit differenziert zu bewerten, und können deutlich effizienter eingesetzt werden, als wenn die maximal mögliche Gefährdung des Gesamtsystems statisch eingestellt werden muss.

Bild 1.22 beschreibt den Ablauf der Integration eines generierten Sicherheitswissens aus der Kollisionsfolgenbewertung – „offline" – und das Zusammenspiel mit der Ablaufsteuerung einer Roboteranwendung mit zusätzlichen Arbeitsraumüberwachungssystemen – „online". Die Auswertung eines solchen Sicherheitswissens mit einem zugrunde liegenden Verletzungsmodell ist immer dann sinnvoll, wenn die Applikation eine physische Kooperation zwischen Mensch und Roboter vorsieht, auch wenn diese Kooperation statisch, ohne eine situative Auswertung des Gefährdungspotenzials, umgesetzt ist. Genauso gibt diese Methode auch Hilfestellung für den Einsatz nicht-trennender Schutzeinrichtungen bei der Umsetzung klassischer Roboteranwendungen.

Alle potenziellen Verletzungsschweren für die in einer Anwendung vorliegenden Robotersysteme können vorab, also offline, experimentell oder simulationsgestützt in „Kollisionsfolgenanalysen" einmalig analysiert und ausgewertet werden. Durch die Ablage in einer Wissensdatenbank ergibt sich daraus mit zugehörigen Belastungskennwerten aus der Verletzungsmodellierung das zentrale „Verletzungsmodell" zur Quantifizierung des Kollisionspotenzials. Darin spezifizierte Parameter

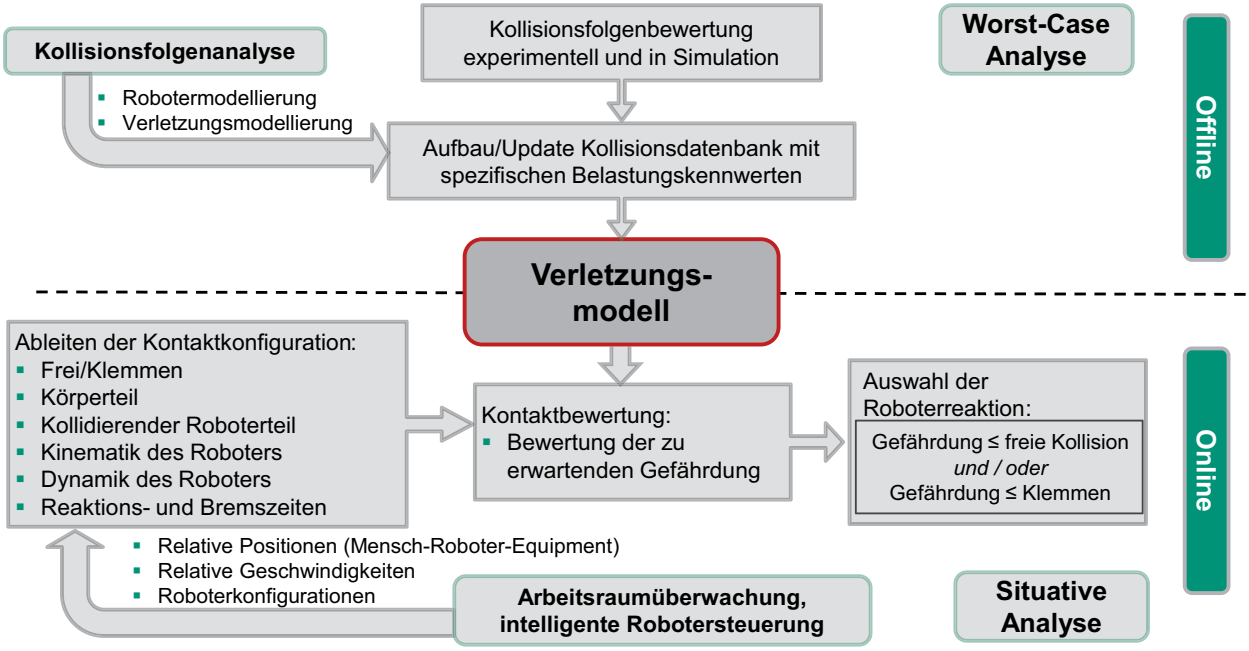

Bild 1.22 Offline/Online-Analyse des potenziellen Gefährdungsrisikos eines Robotersystems

ergeben sich aus einer Roboter- und Verletzungsmodellierung und decken mindestens alle statisch zur Verfügung stehenden Parameter der Einflussfaktoren ab, die das Kollisionspotenzial als „Worst-Case- Analyse“ bestimmen. Darauf aufbauend kann eine „situative Analyse“ des Gefährdungspotenzials vorgenommen werden, indem dynamisch Parameter in einzelnen Prozessschritten ausgewertet werden können, wenn dies eine Zugänglichkeit der eingesetzten Steuerungssysteme ermöglicht.

Mit Hilfe eines Online-Risikoanalyse-Tools wie es im Rahmen des Projektes LIAA (LIAA 2015) entwickelt wurde, können schon in der Planungsphase einer Anwendung die spezifischen Gefährdungen einer Umsetzung als MRK-System bewertet werden (Bild 1.23). Mit einem model-basierten Ansatz wird eine automatisier-

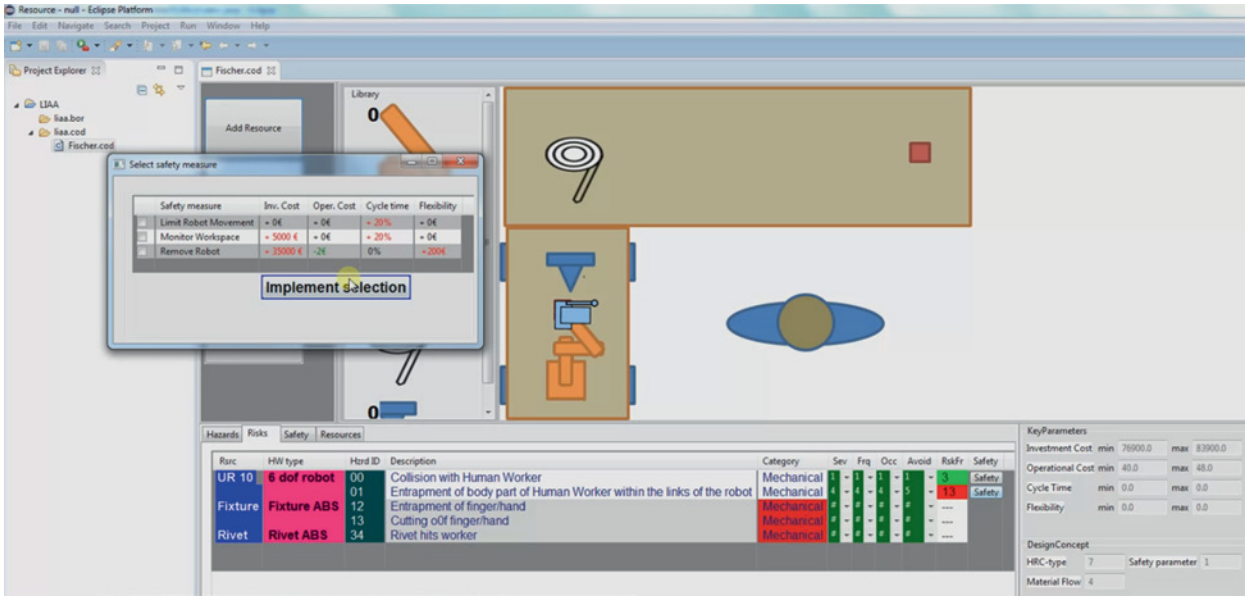

Bild 1.23 Online-Risikoanalyse mit automatisierter Gefährdungsidentifikation basierend auf semantischen Beschreibungen

te Gefährdungsidentifikation eines MRK-Arbeitsplatzes vorgenommen und dem Automatisierungsplaner eine entsprechende Entscheidungsunterstützung angeboten. Dadurch kann der Einsatz unterschiedlicher Sicherheitsprinzipien und Komponenten zur Umsetzung eines spezifischen Prozesses bezüglich des Einflusses auf wirtschaftliche Faktoren der Anwendung abgeschätzt werden (Awad et al. 2017).
Mit den vielseitigen neuen Robotertechnologien, einer großen Anzahl verfügbarer Sensoren und Peripheriekomponenten können MRK-Anwendungen für eine Vielzahl von Prozessen sicher und effizient umgesetzt werden. Allerdings können die Möglichkeiten der MRK nur ausgeschöpft werden, wenn die Sicherheit von Anfang an mit berücksichtigt wird.

1.4 Literaturverzeichnis

ABB AG. (2017). SafeMove 2. Abgerufen am 3. 3. 2018 von http://new.abb.com/products/robotics/controllers/irc5/irc5-options/safemove-2

Apfeld, R., Huelke, M., Lüken, K., Schaefer, M., Paridon, H., Windemuth, D., et al. (2006). Manipulation von Schutzeinrichtungen an Maschinen. (HVBG, Hrsg.) St. Augustin: HVBG.

Appel, H., Wanderer, U., Meißner, S., Schmidt, G., Barz, J., Kallieris, D., et al. (1984). Mechanik und Biomechanik des Unfalls. In H.-J. Wagner, Verkehrsmedizin (S. 438–468). Berlin, Heidelberg: Springer.

Awad, R., Fechter, M., & van Heerden, J. (2017). Integrated Risk Assessment and Safety Consideration during Design of HRC Workplaces. In 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (S. 10). Piscataway, NJ, USA: IEEE Press.

Bascetta, L., Ferretti, G., Rocco, P., Ardo, H., Bruyninckx, H., Demeester, E., et al. (2011). Towards safe human-robot interaction in robotic cells: an approach based on visual tracking and intention estimation. In IEEE, Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (S. 2971–2978).

Bauernhansl, T. (2014). Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In T. Bauernhansl, M.t. Hompel, & B. Vogel-Heuser, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik (S. 5–34). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Bauernhansl, T. (2016). Mensch-Roboter-Kooperation im Forschungscampus ARENA2036. In Einfluss von Industrie 4.0 auf unsere Fabriken und die Fabrikplanung (S. 18). Braunschweig.

Bdiwi, M. (2017). Auf dem Weg zur Mensch-Roboter-Kooperation für die smarte Fabrik. In Tagungsband 5. Kongress Ressourceneffiziente Produktion (S. 97–106). Leipzig.

Behrens, R., & Elkmann, N. (2014). Study on meaningful and verified thresholds for minimizing the consequences of human-robot collisions. In IEEE Robotics and Automation Society, Workshop & Tutorials Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (S. 3378–3383). Piscataway, NJ.

Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M., & Damböck, D. (2012). Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. it – Information Technology, 54(4), S. 57–164.

Bicchi, A., & Tonietti, G. (2004). Fast and „Soft-Arm“ Tactics. IEEE Robotics & Automation Magazine, 11(2), S. 22–33.

Bolhouse, V., & Daugherty, B. (1999). Automotive and Transportation Applications. In S.Y. Nof, Handbook of Industrial Robotics (2 Ausg., Bd. 56, S. 1069–1080). New York: John Wiley Sons, Inc.

Brogardh, T. (2009). Robot Control Overview: An Industrial Perspective. Modelling Identification and Control, 30(3), S. 167–180.

Bubeck, A., Maidel, B., Garcia Lopez, F., Halt, L., & Koch, A. (2014). Development of dual arm mobile manipulation systems for small part assembly tasks. In ROSCon 2014 – ROS Developer Conference. Chicago, Illinois, USA: Mountain View, CA, USA.

Burg, H., & Moser, A. (Hrsg.). (2009). Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.

Carlsson, J. (1985). Robot Accidents in Sweden. In M.C. Bonney, & Y.F. Yong, Robot Safety (S. 49–64). Kempston: Bedford: IFS Publ.

Christaller, T., Decker, M., Gilsbach, M.J., Hirzinger, G., Lauterbach, K.W., Schweighofer, E., et al. (2001). Robotik (Bd. 14). Berlin u.a.: Springer.

Cichos, C., Vogel, D., Otto, M., Schaar, O., Zölsch, S., Clausnitzer, S., et al. (2008). Crash-Analyse, Beschreibung der Kriterien. Bergisch Gladbach: Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit (MDVFS).

Comau. (2017). AURA. Abgerufen am 3. 3. 2018 von http://www.comau.com/EN/media/news/2016/06/aura

Comau. (2017). RobotSAFE. Abgerufen am 3. 3. 2018 von http://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/controllers/c5g

Dekker, S.W., & Woods, D.D. (2002). MABA-MABA or Abracadabra? Cognition, Technology and Work, 4, S. 240–244.

Denso Corporation. Safety Motion. Abgerufen am 3. 3. 2018 von https://www.densorobotics-europe.com/en/news-item/safety-motion-increasing-productivity-and-safety-cooperative-environments

Dialoge online – Das Magazin im Netz – Smart Factory. (2015).

Dietz, T., & Oberer-Treitz, S. (2015). Mensch-Roboter-Kooperation wirtschaftlich einsetzen. Maschinenmarkt, 2015.

Dore, A.M., & Lo, E.K. (1991). Economic evaluation of robot-based assembly systems. International Journal of Production Research, 29(2), S. 267–276.

Engelberger, J.F. (1981). Industrieroboter in der praktischen Anwendung. München, Wien: Hanser.

Fanuc. (2017). CR-35iA. Abgerufen am 3.3.2018 von http://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/kollaborierende-roboter

Fanuc. (2017). Dual Check Safety. Abgerufen am 3. 3. 2018 von https://www.densorobotics-europe.com/en/news-item/safety-motion-increasing-productivity-and-safety-cooperative-environments