

StrategieWerkstatt
Industrie der ZUKUNFT.



Mensch-Roboter-Kollaboration im industriellen Kontext

**Sächsische Forschungsschwerpunkte
im Überblick**

StrategieWerkstatt: Industrie der ZUKUNFT.
des Sächsischen Staatsministeriums
für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr

Tel. +49 351 486797-40
strategiewerkstatt@smwa.sachsen.de
industrie.sachsen.de/strategiewerkstatt.html

in Zusammenarbeit mit

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
RIF e.V. – Institut für Forschung und
Transfer Produktionsautomatisierung



RIF e.V.
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20
44227 Dortmund
Tel. +49 231 9700 – 0
Fax +49 231 9700 – 460
Web www.rif-ev.de • Mail contact@rif-ev.de

Vorstand: Prof. Dr. H. Holzmüller • Prof. Dr.-Ing. J. Roßmann • Prof. Dr.-Ing. W. Tillmann
Geschäftsführung: Dipl.-Inf. M. Saal • AG Dortmund VR 3998 • USt-Id.: DE 164 222 304

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
1 Einführung in die Mensch-Roboter-Kollaboration	6
1.1 Einleitung.....	6
1.2 Forschungsthemen.....	6
2 Forschung an sächsischen Hochschulen in der Mensch-Roboter-Kollaboration...	8
2.1 Übersicht.....	8
2.2 Technische Universität Chemnitz.....	9
2.3 Technische Universität Dresden.....	17
2.4 Hochschule Mittweida	20
3 Industrielle Forschung in Sachsen in der Mensch-Roboter-Kollaboration	25
3.1 imk automotive GmbH Chemnitz.....	25
3.2 Fraunhofer IWU Chemnitz	27
3.3 Volkswagen Sachsen – Motorenwerk Chemnitz	28
4 Literaturverzeichnis	30

Zusammenfassung

Forschungsthemen im Bereich MRK

- Planung, Simulation und Inbetriebnahmen
- Sicherheitstechnik
- Sensortechnik
- Steuerungs- und Regelungstechnik
- Hardware-Entwicklung

Schwerpunktt Themen in Sachsen

TU Chemnitz

- Intensive Forschung im Bereich der Sensortechnik und Steuerungs- und Regelungstechnik (z.B. Kraft-/ Momentgeregelter Montage)
- Planung von MRK-Montagelinien (Vorgangssequenzierung, Verteilung von Aufgaben auf Mensch und Roboter)
- Nachholbedarf im Bereich der Sicherheitstechnik

TU Dresden

- Hauptforschung im Bereich der Hardware-Entwicklung und Steuerungs- und Regelungstechnik
- Keine Professur speziell für den Bereich Robotik bzw. MRK
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit mehrerer Professuren, die ihre jeweiligen Fachexpertise aus den Bereichen Sicherheit, IT (Hardware/Software), Mechatronik etc. in MRK-Forschungsprojekte einfließen lassen
- Bereiche der Planung, Simulation und Inbetriebnahme sowie Sicherheits- und Sensortechnik werden peripher betrachtet

Hochschule Mittweida

- Fortgeschrittene Forschung in der Steuerungs- und Regelungstechnik (z. B. Handführung von LBR, Kraft-/Momentregelung zur Verbesserung von Montageaufgaben, Kollisionsvermeidung)
- Randforschung wird im Bereich der Sensortechnik (z. B. taktiler Greifen) und Hardware-Entwicklung betrieben

Industrie

- imk: Forschung im Bereich der Planung, Simulation und Inbetriebnahme
- Fraunhofer IWU: Forschung im Bereich der Sicherheitstechnik und der virtuellen Realität für den Anwendungsfall MRK
- VW: Einsatz von ersten MRK-Applikationen (Bosch APAS) im Motorenwerk des Automobilherstellers

Forschungsstand in Sachsen

- In Sachsen wird am intensivsten im Bereich der Steuerungs- und Regelungstechnik geforscht.
- Im Bereich der Planung, Simulation und Inbetriebnahme sowie in der Sicherheitstechnik forschen universitäre Einrichtungen sowie Unternehmen nach Lösungen.
- Weniger intensiv werden die Bereiche Sensortechnik sowie die Hardware-Entwicklung betrachtet, hier besteht im Vergleich zu der Gesamtsituation in Deutschland Nachholbedarf.
- Im Bereich der Planung, Simulation und Inbetriebnahme nimmt das Land Sachsen bei den industriellen Forschungseinrichtungen eine Führungsposition ein.

1 Einführung in die Mensch-Roboter-Kollaboration

1.1 Einleitung

Aufgrund der Herausforderung der produzierenden Unternehmen mit steigender Variantenvielfalt, geringeren Losgrößen und immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen umzugehen, gewinnt die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) immer mehr an Bedeutung. Sowohl die konventionellen, rein manuellen als auch vollautomatisierte Montagesysteme können diese Anforderungen nicht ausreichend erfüllen, sodass zahlreiche Forschungsprojekte im Bereich der MRK nach hybriden Lösungen suchen.

Als wesentliche Eigenschaft einer MRK-Applikationen kann die Lernfähigkeit und Flexibilität des Systems verstanden werden. Eine MRK-Applikation verbindet die Vorteile von Mensch und Roboter, um eine Erhöhung der Produktivität mit gleichzeitiger Verbesserung der Arbeitsqualität zu ermöglichen. Zusätzlich wird der Arbeiter gezielt entlastet, indem der Roboter die körperlich schweren und repetitiven Arbeiten übernimmt. Der Roboter soll in erster Linie als Assistent des Mitarbeiters, der weiterhin die zentrale Rolle in der hybriden Montagearbeitszelle darstellt, eingesetzt werden. Der Mitarbeiter soll feinmotorische Aufgaben übernehmen und seine Eigenschaften der Kreativität, Flexibilität und Urteilsfähigkeit in den Prozess einbringen, sodass eine optimale Nutzung der jeweiligen Fähigkeiten gewährleistet wird. Ziel ist es, von den spezifischen Eigenschaften des Menschen und des Roboters optimal zu profitieren.

1.2 Forschungsthemen

Planung, Simulation und Inbetriebnahme

Als wichtige Planungsschwerpunkte für MRK-Technologien sind die Bewertung von Gefährdungspotenzialen und die Ableitung von Kosten durch notwendige Sicherheitsvorkehrungen zu nennen.

Die Planung eines kollaborativen Arbeitsplatzes in der Fertigung ist bzgl. Arbeitsinhalt und Arbeitszeit eine komplexe Aufgabe. Aufgrund der großen Anzahl an hierbei zu berücksichtigenden Daten geschieht dies heute meistens mit dafür speziell entwickelter Software zur Modellierung, Simulation und Optimierung der Arbeitstakte der Montageprozesse.

Da heutzutage immer mehr Unternehmen den Einsatz von Arbeitsplatzsystemen, an denen Menschen und Roboter miteinander kollaborieren, in Betracht ziehen, besteht ein zunehmender Bedarf an Planungs- und Simulationswerkzeugen, die den Einsatz des Systems im Hinblick auf Automatisierbarkeit, technisch-wirtschaftliche Eignung, Ergonomie und Sicherheit simulieren und bewerten können. Solche Planungs- und Simulationswerkzeugen für MRK-Systeme sind derzeit nur mit spezialisierten Funktionsumfängen auf dem Markt verfügbar (z.B. FAMOS robotic, DELMIA, Siemens Process Simulate etc.), sodass dies nicht nur für KMU eine starke Hemmschwelle für den Einsatz von kostengünstigen Robotern in Montagesystemen darstellt. Allerdings existieren in Deutschland bereits einige Forschungsaktivitäten, wie bspw. das Forschungsprojekt „KoMPI“ (siehe Abschnitt 3.1), die dieses Thema adressieren.

Sicherheits- und Sensortechnik

Zurzeit befindet sich die industrielle Umsetzung der Mensch-Roboter-Kollaboration im Anfangsstadium, doch die jüngsten Ereignisse zeigen eindeutig eine Entwicklung weg von der strengen räumlichen Trennung von Mensch und Roboter und hin zu einer interaktiven

Zusammenarbeit in einer barrierefreien Umgebung. Ein entscheidender Schritt zur Verwirklichung der Mensch-Roboter-Kollaboration war die Änderung der Normen, sodass es jetzt möglich ist eine Mensch-Roboter-Kollaboration zu implementieren, unter Voraussetzung, dass die Sicherheit des Mitarbeiters zu jeder Zeit gewährleistet ist. Als Beispiele für die Änderungen und Anpassungen der Normen sind die DIN EN ISO 10218 oder die technische Spezifikation ISO/TS 15066 „Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter“ zu nennen. Aus diesen Normen und Richtlinien werden die umzusetzenden Sicherheitsmaßnahmen und -konzepte abgeleitet, sodass eine einheitliche Umsetzung von MRK-Sicherheitskonzepten gewährleistet wird [1].

Hardware-Entwicklung

Mehrere Forschungs- und Industrieprojekte zeigen bereits Ansätze zur Integration von Mensch-Roboter-Kollaborationen. Zudem wurden zahlreiche MRK-fähige Systeme entwickelt, wie z. B. ABB YuMi, KUKA LBR iiwa oder Bosch APAS (siehe Abbildung 1), die nach geltenden Sicherheitsbestimmungen (DIN EN ISO 10218, ISO/TS 15066) zur kollaborativen Zusammenarbeit ausgelegt sind. Eine gute Übersicht der aktuell am Markt zur Verfügung stehenden MRK-fähigen Roboter und Endeffektoren wird in [2] aufgezeigt.



Abbildung 1: MRK-Roboter ABB YuMi, KUKA LBR iiwa [3], Bosch APAS family [4]

Steuerungs- und Regelungstechnik

Viele der neu entwickelten MRK-fähigen Roboter erfordern neue Steuerungs- und Regelungskonzepte, um einen sicheren MRK-Betrieb zu garantieren. Bspw. verfügt der kollaborative Roboter ABB Yumi über eine redundante Zwei-Arm-Kinematik mit jeweils sieben Achsen pro Arm. Hierfür sind neue Bahnplanungsalgorithmen notwendig, sodass es nicht zu Eigenkollisionen sowie Kollisionen zwischen den Roboterarmen und seiner direkten Umgebung kommt. Des Weiteren gilt es, die Informationen der externen Sensorik zu verarbeiten und in die neuen Regelungsalgorithmen zu integrieren.

2 Forschung an sächsischen Hochschulen in der Mensch-Roboter-Kollaboration

2.1 Übersicht

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der universitären Forschung von MRK im Bundesland Sachsen. Tabelle 1 stellt in diesem Zusammenhang einen kurzen Überblick zu den jeweiligen Schwerpunktthemen (vgl. Abschnitt 1.2) der in dieser Studie untersuchten Hochschulen dar.

Tabelle 1: Übersicht der Forschungsthemen im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration in den Universitäten in Sachsen

Universität	Forschungsthemen				
	Planung, Simulation und Inbetriebnahme	Sicherheitstechnik	Sensortechnik	Steuerungs- und Regelungstechnik	Hardware-Entwicklung
TU Chemnitz	●	●	●	●	●
TU Dresden	●	●	●	●	●
Hochschule Mittweida	●	●	●	●	●

● = 25%; ● = 50%; ● = 75% (Forschungstiefe der einzelnen Themenbereiche)

Die konkreten Aktivitäten an den jeweiligen Lehrstühlen bzw. Professuren, wie bspw. aktuell laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie auch bereits umgesetzte Demonstratoren, werden in den kommenden Abschnitten skizziert und mit einer kurzen Einordnung in die jeweiligen MRK-Forschungsthemen bewertet.

2.2 Technische Universität Chemnitz

Tabelle 2: Allgemeine Informationen zum Institut für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion der TU Chemnitz

Institut für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion	
Leitung	Prof. Dr.-Ing. Ulrike Thomas Tel. +49(0)371 / 531-37543 (Sekretariat) Fax: +49(0)371 / 531-24139 (Sekretariat)
Anschrift	Technische Universität Chemnitz Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Professur für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion D-09107 Chemnitz
Homepage	https://www.tu-chemnitz.de/etit/robosys/index.php
Ausstattung	Laufroboter (Eigenbau) Panda, Franke Emika Wessling-Robotics Fünffingerhand 2x KUKA LBR iiwa 7 R800 2x Kinova Jaco2 Stäubli RX90B 2x KUKA KR6/2

Forschungsbereiche

Das Ziel der Professur für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion der Technischen Universität Chemnitz ist die Entwicklung moderner, autonomer Service- und Montageroboter. In diesem Kontext werden fortlaufend neue Algorithmen, Methoden und Steuerungskonzepte entwickelt. Beispiele hierfür sind nach [5] die folgenden Forschungsthemen:

- Autonomes Greifen von Objekten durch Mehrfingerhände,
- Erkennen von Objekten in komplexen Szenen,
- Manipulieren von Umgebungen und Objekten,
- Planen von Montagereihenfolgen zur flexiblen Fertigung,
- Planen von kollisionsfreien Bewegungen von Robotern in statischen und dynamischen Umgebungen und
- Planen der Interaktion zwischen Mensch und Roboter

Als Basis für die Entwicklung von feinfühligen Robotern zu Interaktion zwischen Mensch und Roboter stehen hierbei insbesondere geeignete Steuerungskonzepte im Fokus der Forschungsaktivitäten. Genannt werden bspw. Kontaktkraftregelungen, Bahnplanungsstrategien und Visual-Servoings¹.

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den Forschungsschwerpunkten des Instituts und geben einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand.

¹ Technik, die Informationen aus einem visuellen Sensor extrahiert, um die Bewegung eines Roboters zu kontrollieren [32]

Programmierungswerkzeuge

Um die Zugänglichkeit der Roboterprogrammierung insb. für Mitarbeiter mit keinen bis marginalen Vorkenntnissen zu erhöhen, wird an der hier vorgestellten Professur seit ca. 2013 die domänenspezifische Sprache (DSL) „LightRocks (Light Weight Robot Coding for Skills)“ entwickelt. [6, 7] Ziel hierbei ist es, dass besonders komplexe Anwendungen, z. B. Montage- und Handhabungsaufgaben, auch von Menschen ohne Programmiererfahrungen erstellt und ausgeführt werden können.

„Die Modelle sind in vier Abstraktionslevel unterteilt. In den untersten beiden Ebenen (Actions und Skills) bereitet ein Experte mit dem notwendigen Know-how die primitiven Roboterkommandos vor, die dann in den oberen beiden Ebenen (Tasks und Processes) vom Nutzer zu kompletten Roboteranwendungen zusammengeführt werden. Dabei können bei Bedarf verschiedene Parameter, wie Geschwindigkeiten oder Steifigkeiten, angepasst werden. Diese Anpassungsmöglichkeiten des Nutzers können problemlos erweitert oder eingeschränkt werden. Wenn das Programm fertig ist, wird der Roboter-Code online generiert. Theoretisch können alle möglichen Robotersprachen generiert werden, sodass LightRocks nicht an einen spezifischen Robotertypen gebunden ist.“ [5]

Basierend auf den Vorarbeiten zur Entwicklung der DSL „LightRocks“, wurde an der Professur eine für Tablet optimierte Applikation entwickelt, um einen intuitiven und erleichterten Zugang für Anwender zu schaffen, deren Bedienung denen von herkömmlichen Apps für Smartphones und Tablets stark ähnelt. [7]

„Damit findet der Nutzer eine vertraute Umgebung wieder und kann sehr schnell zielgerichtet eigene Roboterprogramme erstellen. Zeitaufwendige und oftmals teure Schulungen entfallen. Um Schwachstellen zu identifizieren und die App stetig weiterzuentwickeln, werden regelmäßig auch Tests mit fachfremden Personen durchgeführt.“ [5]

Flexible Montage durch automatisierte Roboterprogrammierung

Eine automatische Montageplanung dient im Allgemeinen dazu, Montageaufgaben in einzelne Teilschritte/Verrichtungen zu zerlegen, um daraus unter Berücksichtigung von geometrischen und physikalischen Randbedingungen den Montageplan zu erstellen. Anhand der im letzten Abschnitt bereits genannten DSL „LightRocks“, wurde an der Professur die automatisierte Montageplanung mit dem Leichtbauroboter iiwa von der Firma Kuka auch im Praxiseinsatz getestet.

„Der iiwa-Leichtbauarm kann Item-Profile in gleicher Konfiguration zusammenschrauben, wie der Mensch die Baugruppe auf den Tisch gelegt hat. Der Roboter erkennt die Aufgabe, analysiert die Reihenfolge und sucht automatisch die geeigneten Skills aus einer Bibliothek. Das so entstandene Roboterprogramm wird dann ausgeführt und der Roboter ist in der Lage verschiedene, ihm vorher unbekannte Baugruppen zu montieren.“ [5]

Web-Service für Montageplanung

Die Forschung im Bereich Web-Service für Montageplanung befasst sich laut den eigenen Angaben mit der Reduktion der Montagevorbereitungen und Optimierung der Arbeitszellenorganisation. Ziel ist die Schaffung einer Arbeitsumgebung, die sich flexibel auf sich ändernde Produktionsszenarien einstellen kann.

„Im Rahmen des SMERobotics Forschungsprojekts wurde der Montageplaner u. a. um eine Web-Schnittstelle erweitert. Der Web Service berechnet gültige Montagesequenzen für beliebige Produkte unter Verwendung von CAD-Modellen. Eine sichere und leicht zu bedienende Browserschnittstelle gestattet auch Nicht-Experten die Verwendung.“ [5]

3D-Szenenanalyse

Ziel der 3D-Szenenanalyse ist es, dem Robotersystem ein Szenenverständnis zu geben. Dafür werden Tiefendaten aus Stereobildern abgeleitet und Algorithmen zur Vermessung von 3D-Objekten, zum Stereosehen sowie zur Lageschätzung von Objekten entwickelt.

„Bereits konnten Objekte eingescannt und in einer neuen Umgebung wiedergefunden werden. Dafür vermisst ein Roboter die Objekte, indem er um das Objekt herumfährt. Durch einen Laser mit einer Kamera kann ein 3D-Mesh erzeugt werden, dieses wird mit einer Textur versehen. Die so erzeugten Objektdaten lassen sich in einer Datenbank speichern und zur Erkennung wieder verwenden. Zur Aufnahme der Szene verwendet das Team der Professur ein Stereosystem (SGM [1]) und mit Hilfe eines neuen RANSAC-basierten Verfahrens werden die Objekte in die Szene projiziert. Dadurch konnte die 6D-Lage der Objekte erfasst werden.“ [2]

Mensch-Roboter-Interaktion

Eine sehr intuitive Bewegungssteuerung des Roboters ist die kraftgeführte Bewegung. Hier führt der Bediener den Roboter durch den Arbeitsraum, indem er mit entsprechender Kraft auf den Roboterarm einwirkt. Diese Art der Mensch-Roboter-Interaktion kann als Weiterentwicklung des Teach-In-Prozesses gesehen werden.

Kraftgeführte Bewegung im Gelenkraum: Bei einer kraftgeführten Bewegung werden die mithilfe eines Kraft-/Momentensensors gemessenen Kontaktkräfte und –momente zu null geregelt. Die übliche Bewegungssteuerung eines Roboters findet normalerweise im kartesischen Raum statt, sodass Kräfte in translatorische und Drehmomente in rotatorische Bewegungen umgewandelt werden. Diese Umwandlung führt häufig zu einer Bewegung des Roboters, die von den Erwartungen des Bedieners abweicht, da das Bewegungsverhalten des Roboters unabhängig von der Kinematik ausgelegt ist. Bei einer kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum wird die Kinematik berücksichtigt, wodurch für den Bediener unerwartete Bewegungen vermieden werden.

„Die vom KMS gemessenen Kräfte und Momente werden mit Hilfe der transponierten Jacobi-Matrix des Roboters in entsprechende Gelenkmomente bzw. -kräfte überführt. Die Bewegungssteuerung erfolgt dann durch das sogenannte Wunschverhalten im Gelenkraum. Es stellt den Zusammenhang zwischen Gelenkmoment und Gelenkwinkel her. Ein geeigneter Ansatz für das Wunschverhalten ist das Verhalten eines Masse-Dämpfer-Systems. Der Algorithmus zur kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum hat den entscheidenden Vorteil, dass er robust gegenüber Singularitäten ist.“ [5]

Kraftgeführte Bewegung ohne zusätzliche Sensorik: Da die Ausstattung eines Roboters mit einem 6-Komponenten-Kraft-/Momentensensor mit hohen Kosten verbunden ist, beschäftigt sich das Institut mit weiteren Möglichkeiten, eine kostengünstige Variante der kraftgeführten Bewegung umzusetzen. Als erste Variante wurde hierzu eine Abschätzung der Kontaktkräfte über die Motorenströme erarbeitet.

„Um Zugang zu den Motorenströmen zu bekommen, wurde an der Professur Robotersysteme ein Roboter vom Typ Manutec r3 mit einer sogenannten offenen Robotersteuerung ausgerüstet; vom originalen Steuerschrank wurden nur die Leistungsbaugruppen beibehalten. Für geringe Geschwindigkeiten erhält man - nach dem Herausrechnen von Gewichts- und Reibmomenten aus den Antriebsmomenten - die Kontaktmomente. Diese können dann zur kraftgeführten Bewegung verwendet werden. Neben dem Kostenvorteil ist der nicht auf den Endeffektor beschränkte Angriffspunkt des Bedieners ein weiterer Vorteil, sodass Krafteinwirkungen am gesamten Roboterarm

stattfinden können. Dadurch kann der Roboter gezielter gesteuert werden, was besonders bei redundanten Manipulatoren von Bedeutung ist.“ [5]

Kraft-/Momentregelung

Ein wichtiges Ziel im Bereich der Kraft-/Momentregelung ist die Entwicklung von Algorithmen zum sicheren Finden und Halten des Kontaktes zwischen dem Roboter und seiner Umgebung. Um dieses Ziel zu verwirklichen untersucht das Institut unterschiedliche Arbeitseinsätze von Kraft-/Momentregelungen und befasst sich intensiv mit der kraftgeregelten Konturenverfolgung, Oberflächenbearbeitung und der kraft-/momentgeregelten Montage.

Kraftgeregelte Konturenverfolgung: Beim entwickelten Demonstrator des Institutes „kontaktiert der Roboter zunächst die Umgebung. Deren genaue Position ist nicht bekannt. Zu beachten ist die Stabilität des Algorithmus, um jegliche Art von Beschädigungen zu vermeiden. Wurde eine vorher eingestellte Kontaktkraft erreicht, dann verfährt der Roboter horizontal entlang des unbekannten Profils. Durch die vertikal wirkende Kraftregelung bleibt der Kontakt zum Profil sicher erhalten. Zusätzlich kann realisiert werden, dass das Werkzeug stets senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet ist.“ [5]

Kraftgeregelte Oberflächenbearbeitung: „Als Beispiel für Laborversuche wurde das kraftgeregelte Zeichnen gewählt. Dabei hat der Roboter die Aufgabe eine Figur mit Kreide auf eine Tafel zu zeichnen. Die Schwierigkeit besteht zum einen darin, dass die Tafel gegenüber dem Boden geneigt ist, und diese Neigung dem Roboter unbekannt ist. Zum anderen wurde mit der Kreide ein sehr empfindliches Werkzeug gewählt, welches sehr schnell beschädigt werden kann, falls die Kontaktkraft zu hoch ist. Die Anforderungen an den Algorithmus zur Kraftregelung sind Folgende:

- Schnelles und sicheres Herstellen des Kontaktes zwischen Kreide und Tafel an den Stützstellen,
- Zeichnen der Figur ohne die Kreide zu beschädigen, mit möglichst hoher Geschwindigkeit“. [5]

Kraft-/Momentgeregelte Montage: Als typische Montagetätigkeiten gelten z. B. Fügeoperationen, wie das bekannte Peg-In-Hole-Problem. Eine der anspruchsvollsten Aufgaben für die Kraft-/ Momentregelung im Bereich der Montage ist das Schrauben. Dabei müssen je nach Situation die Kontaktkräfte und -momente in mehreren Freiheitsgraden geregelt werden. Als erste Forschungsversuche wurde am Institut das Einfädeln und Festschrauben einer Mutter auf einen Gewindebolzen untersucht und analysiert.

Forschungsprojekt „SMERobotics“

Vision und Ziele

Die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Chemnitz ist auch Partner in der EU-geförderten SMERobotics Initiative. Nachfolgend werden die Vision und Ziele des Projekts „SMERobotics“ vorgestellt.

„Ein produktiver und vielseitiger kognitiver Roboter für die KMU-Werkstatt ist der erforderliche Fortschritt jenseits der derzeit verfügbaren flexiblen Fertigung. Die Vision von SMERobotics ist es, über solche Roboter zu verfügen und sie auf KMU-Ebene einzusetzen. [...] Mehr als zwei Drittel der europäischen Arbeitnehmer in der Fertigung sind in KMU beschäftigt. Ihr primäres Mittel im Wettbewerb ist es, schnell auf veränderte Produktionsanforderungen zu reagieren und die Produktqualität auf einem sehr hohen Niveau zu halten. Während Roboter in der Lage sind, sich wiederholende Aufgaben auf

einen hohen Standard zu bearbeiten, erfüllen sie nicht die Anforderungen von KMU für hohe Flexibilität.“ [9]

Um dieses Ziel zu erreichen ist ein enormes industrielles sowie akademisches Engagement notwendig. „Mithilfe der entwickelten Technologien sind wirtschaftliche Automatisierungslösungen für Montage, Schweißen und Holzbearbeitung entstanden. Zu den Ergebnissen zählen sowohl Technologiebausteine für Systemintegratoren und Ausrüster innovativer Robotersysteme als auch direkt einsetzbare Anwendungen für den Mittelstand. Die Ergebnisse adressieren Produktionsbedingungen wie hohe Variantenvielfalt und Qualitätsanforderungen sowie kleine Losgrößen, die bisher den wirtschaftlichen Einsatz von Robotersystemen im Mittelstand erschwert haben. Möglich wird dieser Robotereinsatz insbesondere durch innovative Software, die die intuitive Programmierung sowie robuste sensorüberwachte Programmausführung ermöglicht.“ [10]

Tabelle 3: Allgemeine Informationen zum Forschungsprojekt „SMERobotics“

Forschungsprojekt „SMERobotics“	
Ansprechpartner	Martin Hägele Head of Department Robot and Assistive Systems Fraunhofer IPA Nobelstr. 12 70569 Stuttgart Phone: +49 711 970-1203 Fax: +49 711 970-1008 E-mail: martin.haegele@ipa.fraunhofer.de
Homepage	http://www.smerobotics.org/project.html

Beispiele für heutige Standardroboter

Aufgrund der fehlenden Standardisierungen und höheren Unsicherheiten, im Vergleich zur Groß- und Massenproduktionsindustrie, führt der Einsatz von Robotern in einer KMU-Umgebung zu einer komplexen Systemintegration. Um diese Systemintegration zu verbessern, sollten kognitive Fähigkeiten in den Integrationsprozess aufgenommen werden, sodass das Wissen des Arbeitnehmers bestmöglich genutzt werden kann, um die Produktivitätsanforderungen zu erfüllen. Zusätzlich ist eine einheitliche Kennzeichnung der Systeme für eine einfache und flexibel gestaltete Bedienung unerlässlich.

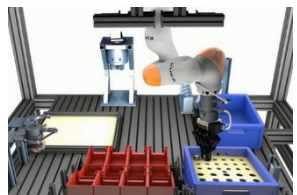
„Aus diesem Grund wird im Rahmen des Projekts ein Arbeitssystem vorgeschlagen, das alle Phasen des Roboterlebenszyklus abdeckt, in dem Menschen und Roboter gemeinsam mit den Arbeitsunsicherheiten der KMU zusammenarbeiten, voneinander lernen und aus der Vergangenheit profitieren können. Die Vision von SMERobotics besteht darin, solche Roboter auf KMU-Ebene einzusetzen, mit dem Vorteil von langfristigen Produktivitätsverbesserungen.“ [11] (eigene Übersetzung)

Demonstratoren im Projekt „SMERobotics“

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen MRK-Demonstratoren nach [12] vorgestellt, die im Rahmen des Projekts „SMERobotics“ entwickelt und in Betrieb genommen wurden. Die MRK-Demonstratoren zeigen die Integration, Inbetriebnahme und Bewertung

von Methoden, Komponenten und Werkzeugen, die in den Arbeitspaketen des Forschungsprojekts bearbeitet wurden. Diese Demonstratoren zielen darauf ab, Referenzimplementierungen von Roboterarbeitszellen in diversen Anwendungsszenarien zu schaffen, die bisher unter KMU-Produktionsbedingungen nicht wirtschaftlich und technisch umsetzbar waren.

Tabelle 4: Demonstratoren im Projekt „SMERobotics“ nach [12]

Demonstrator	Arbeitsbereich	
Montage mit Zweiarmanipulatoren	Montage mit einem flexiblen Zweiarmanipulator; Automatische Generierung von Montageplänen aus CAD-Modellen und direkte Projektion auf den Arbeitsbereich des Wokers	
Mensch-Roboter-Kooperation in der Produktion von Holzhäusern	Handhabung und Bearbeitung von Bauteilen für vorgefertigte Holzhausmodule	
Montage mit sensitiven Roboterarmen	Kooperative Einrichtung und Programmierung einer Montageaufgabe durch ein Robotersystem und einen Mitarbeiter	
Schweißroboter-Assistent	Schweißprozesse mit Werkstückerkennung	
Kooperativer Zweiarmanipulator für Baustahl (CLARISSA)	Innovative Zweiarmanipulator-Schweißzelle mit geringem Platzbedarf in der Werkstatt; Handhabung von Stahlteilen mit Magnetgreifer an einem Arm; Verschweißen mit speziellem Schweißbrenner am anderen Roboterarm	
Hydraulische Ventilanordnung mit sensitiven, nachgiebigen Leichtbaurobotern (HyLight)	Vielseitiges Automatisierungssystem für enge Passungen mit einem KUKA iiwa Roboterarm, maßgeschneiderten Greifsystemen und externer Sensorik	

Luftfahrt-komponenten-montage mit flexiblen Zweiarm-Robotern (FLEXAS)	Integration eines bestehenden Zweiarm-Roboters in den bislang vollständig manuellen Montagevorgang für ein Verriegelungsventil als Teil des Fahrwerks eines A-330	
Roboter-basierte Aufnahme und Montage (RoboPAM)	Auswahl von Teilen aus halb-strukturierten Palettenboxen, Rollenförderpuffern und kleineren Kartons; Montage in die Anfangsuntereinheit eines Frequenzumrichters mit kraft- und vision-gesteuerten Bewegungen; Ablage der fertigen Baugruppe in die richtige Stelle eines variantenspezifischen Ausgabepuffers	

Publikationen in den Jahren 2016 bis 2018

Nachstehend befinden sich die aktuellsten und wichtigsten Veröffentlichungen nach [8] zu den o. g. Forschungsaktivitäten der Professur für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion.

2018

F. Müller, J. Janetzky, U. Bernd, J. Jäkel, U. Thomas: *User Force-Dependant Variable Impedance Control in Human-Robot-Interaction*, angenommen bei IEEE International Conference on Automation, Science and Engineering, München, März 2018

C.M. Costa, G. Veiga, A. Sousa, L. Rocha, U. Thomas: *Automatic Planning of Disassembly Sequences 3D Geometric Reasoning with Information Extraction from Natural Language Instruction Manuals*, eingereicht bei Journal Robotics and Autonomous Systems, 2018

Y. Ding, H. Zhang, U. Thomas: *Capacitive Proximity Sensor Skin for Contactless Material Detection*, angenommen bei IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Madrid, Spanien, 2018

A. C. Perzylo, B. Kahl, M. Rickert, N. Somani, Ch. Lehman, A. Kuss, S. Profanier, A. B. Beck, M. Haage, M. A. Roa, O. Sornmo, S. Gestegard Robertz, U. Thomas, G. Veiga, E. A. Topp, I. Kessler, M. Ganzer: *SMErobotics - Smart Robots for Flexible Manufacturing*, eingereicht bei IEEE Robotics and Automation Magazine, Feb. 2018

H. Kisner, U. Thomas: *Efficient Object Pose Estimation in 3D Point Clouds using Sparse Hash-Maps and Point-Pair Features*, 50th International Symposium on Robotics (ISR 2018), München, 2018

T. Ebinger, S. Kaden, S. Thomas, R. Andre, N. Amato, U. Thomas: *A General and Flexible Search Framework for Disassembly Planning*, angenommen bei IEEE International Conference on Robotics and Automation, Brisbane, Australien, 2018

C. Costa, G. Veiga, A. Sousa, L. Rocha, E. Oliveira, H. Cardoso, U. Thomas: *Automatic Generation of Disassembly Sequences and Exploded Views from SolidWorks Symbolic Geometric Relationships*, angenommen bei ICARSC -2018, Portugal, 2018

H. Kisner, U. Thomas: *Segmentation of 3D Point Clouds Using a New Spectral Clustering Algorithm Without a-Priori Knowledge*, in: 13th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Madeira, Portugal 27.-29. Januar, 2018

F. Müller, J. Jäkel, U. Thomas, J. Suchý: *Stability of Nonlinear Time-Delay Systems Describing Human-Robot Interaction*, eingereicht bei IEEE Transaction on Mechatronics, Jan, 2018

Y. Ding, R. Andre, J. Bonse, U. Thomas: *In-hand grasp pose estimation using particle filters in combination with haptic rendering models*, International Journal of Humanoid Robotics, Jan, 2018

2017

U. Thomas, R. Andre, O. Lorenz: *Kooperierender Autonomer Roboter in der Montage*, Herbstkonferenz Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e.V., Chemnitz, 2017

F. Müller, F. Weiske, J. Jäkel, U. Thomas, J. Suchý: *Human-Robot Interaction with Redundant Robots Using Force-Field-Dependent Variable Impedance Control*, in: proceedings of IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, Ottawa, Kanada, S. 166-172, 2017

C. Nissler, Z.-C. Marton, H. Kisner, R. Triebel, U. Thomas: *A method for hand-eye and camera-camera calibration in case of limited fields of view*, in: proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, Kanada, 2017

R. Andre, U. Thomas: *Error Robust Efficient Assembly Sequence Planning with Haptic Rendering Models for Rigid and Non-Rigid Assemblies*, in: proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapur, 29. Mai 29 – 3. Juni 2017

2016

F. Müller, J. Jäkel, U. Thomas, J. Suchý: *Intuitive Handführung von Robotern als Handlingsysteme*, Automatisierungstechnik, Vol. 64 Nr. 10, Oktober 2016

F. Müller, J. Jäkel, U. Thomas, J. Suchý: *User study for hand-guided robots with assisting force fields*, 1st IFAC Conference on Cyber-Physical & Human-Systems, Vol. 49 Nr. 32, Florianopolis, Brasilien, Dezember 2016

C. Nissler, Z. Marton, U. Thomas: *Evaluation and Improvement of Global Pose Estimation with Multiple AprilTags for Industrial Manipulators*, ETFA 2016 - IEEE International Conference on Emerging Technology & Factory Automation Berlin, 6. - 9. September, 2016

R. Andre, M. Jokesch, U. Thomas: *Reliable Robot Assembly Using Haptic Rendering Models in Combination with Particle Filters*, IEEE 12th Conference on Automation, Science and Engineering (CASE), Fort Worth, Texas, USA, August 2016

K. Nottensteiner, T. Bodenmüller, M. Kasseker, M. Roa, D. Seidel, A. Stemmer, U. Thomas: *A Complete Automated Chain For Flexible Assembly using Recognition, Planning and Sensor-Based Execution*, in: Proceedings of 47th International Symposium on Robotics, München, Juni 2016

R. Andre, U. Thomas: *Anytime Assembly Sequence Planning*, in: Proceedings of 47th International Symposium on Robotics, München, Juni 2016

A. Kolker, M. Jokesch, U. Thomas: *An Optical Tactile Sensor for Measuring Force Values and Directions for Several Soft and Rigid Contacts*, in: Proceeding of 47th International Symposium on Robotics, München, Juni 2016

2.3 Technische Universität Dresden

Forschungsbereiche

An der Technischen Universität Dresden sind die Forschungsbereiche „Robotik“ und „Mensch-Technik-Kooperation“ stark vertreten. Anders als bei der TU Chemnitz beschäftigen sich mehrere Institute der Universität gleichzeitig mit verschiedenen Aspekten des Forschungsbereichs und arbeiten interdisziplinär zusammen.

Robotik

An der Forschung zum Thema Robotik sind sowohl die Fakultät Informatik als auch die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden beteiligt. Abbildung 2 zeigt, dass sich diese beiden Fakultäten als Ziel gesetzt haben, bereits vorhandenes Wissen in den Bereichen Sicherheit, Kognition, System-Engineering, IT, Smart Materials und Mechatronik zu bündeln und darauf aufbauend neue Forschungsschwerpunkte im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation zu betreiben. Zusätzlich findet eine intensive Zusammenarbeit mit dem DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.) statt. [13]

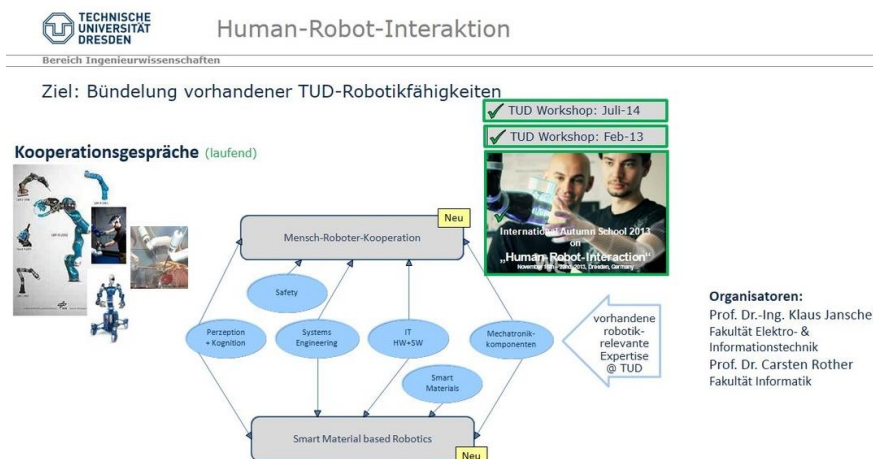


Abbildung 2: Neue Forschungsfelder an den Fakultäten „Informatik“ und „Elektrotechnik und Informationstechnik“ der TU-Dresden [13]

Tabelle 5: Allgemeine Informationen zum Forschungsbereich „Robotik“ der TU Dresden

Forschungsbereich „Robotik“	
Ansprechpartner	Prof. Ph.D. Carsten Rother (Fakultät Informatik, Institut für Künstliche Intelligenz, Professur Bildverarbeitung) Tel.: +49 351 463-38379 Fax: +49 351 463-32369 Email: carsten.rother@tu-dresden.de
Anschrift	Andreas-Pfitzmann-Bau, Raum INF-2022 Nöthnitzer Straße 46 01187 Dresden
Verantwortliche Professoren	Prof. Ph.D. Carsten Rother (Fakultät Informatik, Institut für Künstliche Intelligenz, Professur für Bildverarbeitung Computer Vision Lab Dresden) Prof. Dr. techn. Klaus Janschek (Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Automatisierungstechnik)
Homepage	https://tu-dresden.de/ing/forschung/robotik

Publikationen:

A. Krull, E. Brachmann, F. Michel, M. Y. Yang, S. Gumhold, C. Rother: *Learning Analysis-by-Synthesis for 6D Pose Estimation in RGB-D Images*, ICCV 2015

F. Michel, A. Krull, E. Brachmann, M. Y. Yang, S. Gumhold, C. Rother: *Pose Estimation of Kinematic Chain Instances via Object Coordinate Regression*, BMVC 2015

Alexander Krull, Frank Michel, Eric Brachmann, Stefan Gumhold, Stephan Ihrke, Carsten Rother: *6-DOF Model Based Tracking via Object Coordinate Regression*, ACCV 2014

Mensch-Technik-Kooperation

Am Center for Human Technology Design bündelt die TU Dresden ihr Wissen und ihre Forschungstätigkeiten im Bereich der Mensch-Technik-Kooperation. Hier behandelte Forschungsthemen beschäftigen sich anwendungsorientiert und interdisziplinär mit aktuellen Fragestellungen zum Thema Industrie 4.0, Big Data oder simulationsgestützte Entwurfsprozesse. Besonderer Fokus wird auf die Erforschung der Mensch-Maschine-Schnittstelle gelegt, um den visuellen, akustischen und haptischen Informationsfluss bestmöglich zu gestalten. Als Anwendungsbereiche wird ein breites Spektrum an Verfahren berücksichtigt, von Arbeitsmaschinen über stationäre Anlagen bis hin zu medizinischen Laborgeräten. [14]

Tabelle 6: Allgemeine Informationen zum Forschungsbereich „Mensch-Technik-Kooperation“ der TU Dresden

Forschungsbereich „Mensch-Technik-Kooperation“	
Ansprechpartner	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Jens Krzywinski Leiter der Juniorprofessur Tel.: +49 351 463-35750 Fax: +49 351 463-37050 Email: jens.krzywinski@tu-dresden.de
Anschrift	Zeuner-Bau, Raum 215 George-Bähr-Str. 3c 01069 Dresden Deutschland
Verantwortliche Professoren	Prof. Dr.-Ing. Raimund Dachzelt (Fakultät Informatik, Institut für Software- und Multimediatechnik, Professur für Multimediatechnologie) Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Groh (Fakultät Informatik, Institut für Software- und Multimediatechnik, Professur für Mediengestaltung) Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder (Fakultät Maschinenwesen, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Arbeitswissenschaft) Prof. Dr.-Ing. habil. Leon Urbas (Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Automatisierungstechnik, Professur für Prozessleittechnik)
Homepage	https://tu-dresden.de/ing/forschung/chtd

Forschungsprojekt „Smarte Werkbank“

Um der steigenden Komplexität und sinkender Entwicklungszeiten produktionstechnischer Verfahren entgegen zu wirken, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen mehreren Fachbereichen erforderlich. Das Forschungsprojekt „Smarte Werkbank“ beschäftigt sich mit der Entwicklung eines grafischen Assistenzsystems als unterstützendes Medium für die interdisziplinäre Entwicklung von produktionstechnischen Systemen.

„Ziel ist, am Entwicklungsbeispiel einer Verpackungsmaschine ein neuartiges verallgemeinerbares interdisziplinäres Vorgehensmodell zu entwickeln und validieren, das die bisher separat ablaufenden Entwicklungsschritte der beteiligten Fachdisziplinen aufeinander abstimmt. Das angestrebte Assistenzsystem soll erstmalig sowohl die interdisziplinäre Kommunikation als auch den Umgang mit den vielfältigen Informationen und deren fachspezifische Visualisierung fördern.“ [17]

„Die Smarte Werkbank ist ein Vorgehensmodell für ein Assistenzsystem, das durch innovative und fachspezifische Anweisungen, Visualisierungen sowie Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeiten die synchronisierte, zeitsparende Entwicklung von produktionstechnischen Systemen im Verbund ermöglicht.“ [18]

Tabelle 7: Allgemeine Informationen zum Forschungsprojekt „Smarte Werkbank“

Forschungsprojekt „Smarte Werkbank“	
Verantwortlicher Professor	Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Groh (Fakultät Informatik, Institut für Software- und Multimediatechnik, Professur für Mediengestaltung)

Publikationen:

Dölz, J.; Holowenko, O.; Carsch, S.; Günther, T.; Oehm, L.; Ihlenfeldt, S.; Schmauder, M.; Schult, A.; Siems, F. U.; Wiemer, H.: *Challenges of Interdisciplinary Cooperation - Adapting service blueprinting to product engineering*, in: International journal of strategic management: IJSM 17 Nr. 1, S. 95–105, 2017

2.4 Hochschule Mittweida

Professur für Industrieelektronik/Regelungstechnik

Tabelle 8: Allgemeine Informationen zur Professur für Industrieelektronik/Regelungstechnik an der HS Mittweida

Professur für Industrieelektronik/Regelungstechnik	
Ansprechpartner	Prof. Dr.-Ing. Klaus Müller Walter-Bruch-Bau, Raum 3-111 Tel.: +49 (0) 03727-581346 Fax: +49 (0) 03727-581351 Email: kmue@htwm.de
Anschrift	Hochschule Mittweida University of Applied Sciences Technikumplatz 17 09648 Mittweida
Homepage	https://www.inw.hs-mittweida.de/professuren-fachgruppen/prof-mueller-k.html

Die Professur für Industrieelektronik/Regelungstechnik beschäftigt sich nach [19] mit folgenden Themen, die im direkten Bezug zur Mensch-Roboter-Kollaboration stehen:

- Robotersysteme, Auslegung und Programmierung
- Flexible Fertigung
- Optische Teilerkennung
- Simulation von roboterisierten Fertigungszellen mit ROBCAD
- Virtual Reality als Programmierunterstützung
- Bewegungsoptimierung, Freiformflächen
- Industrielle Bussysteme

Professur für Fertigungsautomatisierung

Tabelle 9: Allgemeine Informationen zur Professur für Fertigungsautomatisierung an der HS Mittweida

Professur für Fertigungsautomatisierung	
Ansprechpartner	Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Winkler Tel.: +49(0)3727/58-1566 Fax: +49(0)3727/58-21566 Email: alexander.winkler@hs-mittweida.de
Anschrift	Haus 5 - Gerhard-Neumann Bau, Raum 5-132B
Homepage	https://www.inw.hs-mittweida.de/professuren-fachgruppen/prof-winkler.html

Mensch-Roboter-Interaktion

Im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion beschäftigt sich die Professur für Fertigungsautomatisierung mit der barrierefreien Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Hierfür werden Varianten der Roboterprogrammierung mithilfe der Handführung untersucht und weiterentwickelt.

„Im hier vorgestellten Szenario wird das Handführen mit dem Ansatz der Kollisionsvermeidung durch virtuelle Kräfte kombiniert. Diese wirken auf den Roboter bewegen ihn von gesperrten Zonen im Arbeitsraum weg. Indem der Bediener die Bereiche spürt, die für den Manipulator verboten sind, wird er intuitiv bei der Steuerung des Roboters unterstützt. Neben der Anwendung bei der Roboterprogrammierung, ergeben sich auch vielfältige Einsatzszenarien auf dem Gebiet der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter.“
[20]

Kraft-/ Momentregelung

Die Professur für Fertigungsautomatisierung beschäftigt sich gleichzeitig auch mit der Kraft-/Momentregelung zur Verbesserung von Montageaufgaben und der Interaktion zwischen Mensch-Roboter. Der Forschungsschwerpunkt beschäftigt sich in diesem Bereichen mit ähnlichen Fragen wie die TU Chemnitz, doch wird durch die Betrachtung der Kollisionsvermeidung erweitert.

„Einsatzgebiete der Kraft-/ Momentregelung sind Montageaufgaben wie Anordnen, Fügen, Verschrauben und Kleben von Bauteilen, Aufgaben der Materialbearbeitung wie Schleifen, Polieren, Entgraten, Bohren und Umformen und die Umgebungsinteraktion in Form der Kooperation zwischen Mensch und Roboter oder auch die Zusammenarbeit von mehreren Robotern.

Der Einsatz entsprechender Algorithmen erfordert Überlegungen hinsichtlich der Auswahl einer geeigneten Reglerstruktur und der Parametrierung des Reglers. Bei der Verwendung industrieller Robotersteuerungen spielen außerdem Einschränkungen, wie die Verhinderung des Zugriffs auf die Motorenströme, eine wichtige Rolle.“ [20]

Kollisionsvermeidung

Aktuell bewegen sich Roboter im industriellen Einsatz auf fest programmierten Bahnen und werden durch einen Schutzzaun isoliert. Zusätzlich installiert man Lichtvorhänge, um im Falle eines Zutritts einer Person in den Schutzraum, die Roboterbewegung sofort unterbrechen zu können. Um diese Mechanismen zu optimieren und die Vision einer offenen Roboterzelle umzusetzen, ist es notwendig, dass der Roboter sich auf eine verändernde Arbeitsumgebung anpasst und auf Störfaktoren zuverlässig reagieren kann.

„In solch dynamischen Umgebungen sind intelligente Algorithmen zur Kollisionsvermeidung unerlässlich, um die Roboterbewegung bei Kollisionsgefahr zu stoppen oder besser noch die Bahn des Roboters soweit wie notwendig zu modifizieren.“ [20]

Taktils Greifen

Roboter werden im Bereich der Materialbearbeitung sowie in Handhabungsprozessen verstärkt eingesetzt. Für die Handhabungsprozesse werden pneumatisch bzw. elektrisch betriebene Greifer eingesetzt, bei denen die Greifer direkt eingestellt werden können. Um ein feinfühliges Greifen zu ermöglichen, werden taktile Sensoren eingesetzt, die die Kraftverteilung an den Fingern des Greifers messen und über eine Regelung die Stellkräfte anpassen. Ein zusätzlicher Vorteil der taktilen Sensorik ist die Möglichkeit Bauteile anhand ihrer Oberflächeneigenschaften identifizieren zu können.

„Der [...] Roboter ist mit einem servoelektrischen Zwei-Finger-Parallelgreifer ausgestattet. Die Finger enthalten jeweils eine taktile Sensormatrix, die die Verteilung der Greifkraft in einem Raster von 14x6 Messpunkten erfasst. Mit Hilfe der taktilen Information sollen Bauteile identifiziert und anschließend sortiert werden.“ [20]

Forschungsprojekt „VirEnA“, Teilprojekt: Dynamische Kollisionsvermeidung in Roboterarbeitszellen

Das im Juni 2017 ausgelaufene Forschungsprojekt „VirEnA“ beschäftigte sich mit der Weiterentwicklung der Kollisionsvermeidung von Robotern in einer dynamischen Arbeitsumgebung. Durch zusätzliche externe Sensoren sollten zusätzliche Hindernisse in der Arbeitsumgebung detektiert und lokalisiert werden. Die Hindernisse wurden virtuell durch künstliche Punktladungen markiert, die eine virtuelle Kraft erzeugen, die den Manipulator vom Hindernis weg bewegt.

Tabelle 10: Allgemeine Informationen zum Forschungsprojekt „VirEnA“

Forschungsprojekt „VirEnA“	
Ansprechpartner	Christian Thormann, M.Sc. Tel: +49 (0)3727 58-1553 Fax: +49 (0)3727 58-21553 Email: thormann@hs-mittweida.de Haus 5, Raum 5-128B
Homepage	https://www.inw.hs-mittweida.de/webs/winkler3/forschung/kollisionsvermeidung.html

Publikationen in den Jahren 2015 bis 2017

Nachstehend befinden sich die aktuellsten und wichtigsten Veröffentlichungen zu den o. g. Forschungsaktivitäten der Professur für Fertigungsautomatisierung.

2017

K. Bothe, A. Winkler, L. Goldhahn: *Development of a Robot-Human-Interface using an RGBD Camera*, Proc. of 59th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, 2017

C. Thormann, A. Winkler: *Localization and Efficient Grasping of Objects by a Manipulator using RFID Technique*, Proc. of 22th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Seiten 670-675, 2017

C. Thormann, A. Winkler: *Object Identification by Tactile Sensors with Improved Sensor Resolution*, Proc. of 22th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Seiten 197-201, 2017

Thormann, Christian; Winkler, Alexander: *Collision Avoidance of Robots by Artificial Force Field around Geometric Primitives using two Range Image Sensors*, *Advances in Service and Industrial Robotics*, Proc. of 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, 102-112, Springer, 2017

K. Bothe, A. Winkler, L. Goldhahn: *Fertigungskonzeption 4.0 – Adaptive Automation für die Fertigung mit Mensch und Anlage*, Scientific Reports (Tagungsband zur 18. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz), Seiten 222-227, Hochschule Mittweida (FH), 2017

2016

C. Thormann, A. Winkler: *Einsatz und Kombination von modernen Sensoren an Industrierobotern*, in: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Sonderheft 22 (Tagungsband "Smarte Fabrik & Smarte Arbeit – Industrie 4.0 gewinnt Kontur" VPP2016 – Vernetzt planen und produzieren), Seiten 263-272, Technische Universität Chemnitz, 2016,

A. Winkler, J. Suchý: *Explicit and Implicit Force Control of an Industrial Manipulator – An Experimental Summary*, in: Proc. of 21th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Seiten 19-24, 2016

C. Thormann: *Dynamische Kollisionsvermeidung in Roboterzellen durch virtuelle Kraftfelder mittels Tiefenbildüberwachung*, in: Tagungsband zur 17. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz an der Hochschule Schmalkalden, Seiten 205-209, 2016

A. Winkler: *Sensorgeführte Bewegungen stationärer Roboter*. Universitätsverlag Chemnitz, 2016

2015

A. Winkler, J. Suchý: *Algorithmen zur expliziten Kraftregelung für einen lagegeregelten Roboter*, *Scientific Reports*, in: Tagungsband zur IWKM, Nr. 2, Prozessentwicklung 4.0, Seiten 53-56, Hochschule Mittweida (FH), 2015

M. Jokesch, J. Suchý, A. Winkler, A. Fross, U. Thomas: *Generic Algorithm for Peg-In-Hole Assembly Tasks for Pin-Alignments with Impedance Controlled Robots*, in: Proc. of Second

Iberian Conference on Robotics, Special Session on Future Industrial Robotic Systems, 2015.

A. Winkler und J. Suchý: *Implicit Force Control of a Position Controlled Robot – A Comparison with Explicit Algorithms*, in: Proc. of 17th International Conference on Control, Automation and Robotics, 2015

M. Bdiwi, A. Winkler, M. Jokesch, J. Suchý: *Improved Peg-in-Hole (5-Pin Plug) Task: Intended for Charging Electric Vehicles by Robot System Automatically*, in: Proc. of 12th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, 2015

3 Industrielle Forschung in Sachsen in der Mensch-Roboter-Kollaboration

3.1 imk automotive GmbH Chemnitz

Die imk automotive GmbH bietet Ingenieur- und Beratungsdienstleistungen sowie industriespezifische IT-Lösungen an und bedient hiermit Kunden, die überwiegend in der Fertigungsindustrie zu finden sind. Die eigens entwickelte Software ema (Editor menschlicher Arbeit) ermöglicht hierfür die Planung, dynamische Visualisierung und Analyse eines manuellen Fertigungsprozesses in der Digitalen Fabrik anhand eines 3D-Menschmodells.

Die Firma imk automotive GmbH ist im Rahmen verschiedener nationaler und EU-weiter Forschungsprojekte tätig, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Forschungsprojekt „AnDy“

Entwicklung von Technologien für die bessere Interaktion zwischen Mensch und Maschine mit Antizipation des Bewegungsverhaltens beider Akteure: Ein zentrales Ziel der MRK ist die Implementierung einer möglichst effizienten und ergonomischen Arbeitsumgebung im Fertigungsprozess. Umgesetzt werden soll dies durch die Nutzung der jeweiligen Stärken von Mensch und Maschine. Innerhalb des Forschungsprojektes „AnDy“ (Advancing Anticipatory Behaviors in Dyadic Human-Robot Collaboration) sollen in dem Kontext Technologien entwickelt und erprobt werden, die die Interaktion zwischen Mensch und Maschine verbessern. Ziel ist die Wahrnehmung und Antizipation des Bewegungsverhaltens der beiden Akteure, sodass der jeweils andere direkt auf das Verhalten reagieren kann.

„Im ersten Schritt wird ein Anzug zur Aufzeichnung der menschlichen Bewegungen und Aktionskräfte entwickelt. Die Analyse und Bewertung dieser Informationen wird später zur Steuerung von drei kollaborativen Technologien in drei Anwendungsfällen verwendet:

- (1) **Cobots**, also kollaborative Roboter zur Bearbeitung schwerer Produktionsaufgaben;*
- (2) **Exoskelette** zur Unterstützung der menschlichen Physis;*
- (3) **Humanoide Roboter**, die zur Unterstützung von älteren oder fähigkeits-eingeschränkten Menschen in der Fertigung oder im Haushalt eingesetzt werden.“ [21]*

Als Projektpartner hat die imk automotive GmbH den Auftrag, auf Basis von aufgezeichneten Bewegungsabläufen, entsprechende Bewegungs- und Kollaborationsmodelle zu entwerfen. Die imk automotive GmbH besitzt zudem umfangreiche Expertise im Bereich der ergonomischen Gestaltung von Fertigungsprozessen und kann so das Projekt mit Praxiserfahrung fachlich sowie organisatorisch unterstützen. [21]

Forschungsprojekt „eMAN III“

Ziel des Forschungsprojekts „eMAN III“ ist es, ein ganzheitlichen Systems zur Planung der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine in einer industriellen Fertigung und Expertensysteme zur automatischen Analyse zu entwickeln. [22] Nachfolgend sind die einzelnen Teilprojekte der verschiedenen Projektpartner des Forschungsprojekts aufgelistet:

- **imk automotive GmbH:** Entwicklung der intelligenten Ablaufsteuerung für gemeinsame Mensch- und Maschinenprozesse
- **dmc-ortim GmbH:** Entwicklung eines Expertensystems zur Ablaufanalyse und Ablaufplanung für die industrielle Fertigung

- **Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement, TU Chemnitz:** Entwicklung von arbeitswissenschaftlichen und Modellierungs- und Bewertungsverfahren für kraftbasierte und wechselnde Belastungen in industriellen Produktionen sowie eines Expertensystems zur automatischen Belastungsanalyse nach EAWS
- **Professur Graphische Datenverarbeitung und Visualisierung (GDV), TU Chemnitz:** Entwicklung eines Syntheseverfahrens für kollisionsfreie Bewegungen zur automatisierten Objektinteraktion sowie kooperative Verrichtungsdurchführung
- **Institut für Mechatronik (IfM), TU Chemnitz:** Entwicklung eines synchronisierten Gesamtmessverfahrens für Motion Capturing (MoCap), 3D-Kraftmessung und einer parametrisierbaren biomechanischen Modellierung

Forschungsprojekt „KoMPI“

Ziel des Forschungsprojekts „KoMPI“ (*Verrichtungsbasierte, digitale Planung kollaborativer Montagesysteme und Integration in variable Produktionsszenarien*) ist die Entwicklung einer Methode zur integrierten Planung und Realisierung von kollaborativen Arbeitsplatzsystemen in der Montage bei variablen Produktszenarien. [23] Dabei wird in der dreijährigen Laufzeit besonders das Thema der Mensch-Roboter-Kollaboration in der Montage adressiert. Mit insgesamt neun Projektpartnern wird hierbei ein Simulationswerkzeug für die zukünftige Planung von kollaborativen Montagearbeitsplatzsystemen entwickelt und implementiert. Durch eine enge Verzahnung von Arbeitswissenschaft und Automatisierungstechnik soll ein neuartiger Ansatz zur integrierten Planung und Realisierung von MRK-Systemen entwickelt werden, der insbesondere KMU befähigt, MRK-Systeme sicher, effektiv und erfolgreich zum Einsatz zu bringen.

Zwei zentrale Aspekte für solche Umsetzungen müssen an dieser Stelle gelöst werden: die Umsetzung von MRK-Systemen soll durch das zu entwickelnde MRK-Simulationswerkzeug vereinfacht und parallel ein integriertes Beteiligungs- und Qualifizierungskonzept erarbeitet werden, das sowohl den Planungsingenieur als auch den operativen Mitarbeiter an der Montagelinie im Umgang mit MRK-Systemen unterstützt. Das System trägt somit dazu bei, bestehende technische und soziale Hemmnisse abzubauen.

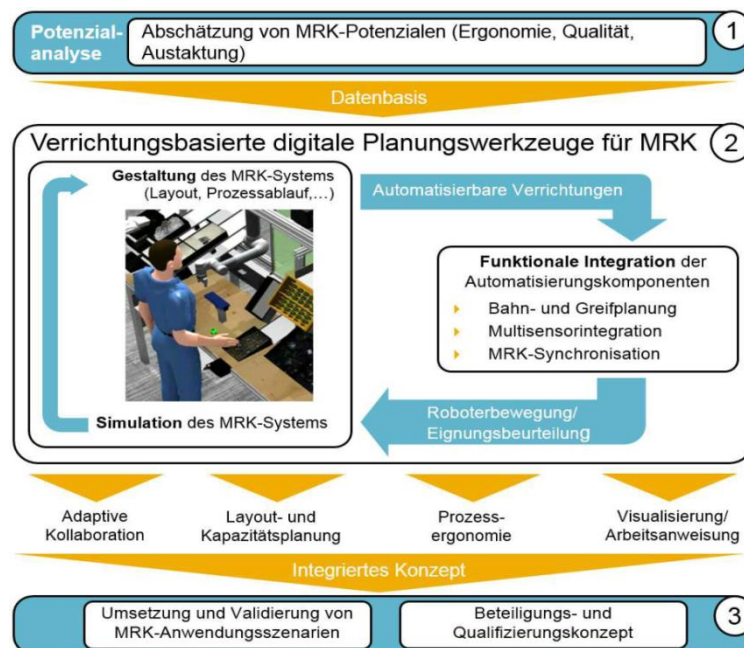


Abbildung 3: Übersicht des Forschungsprojektes „KoMPI“ [23]

Forschungsprojekt „ema2AnyBody“

Das Projekt ema2AnyBody erforscht die Auswirkungen mechanischer Belastungen auf die Beanspruchung der einzelnen Muskelpartien, um zukünftig Arbeitsabläufe und Tätigkeiten in der Produktion zu optimieren. Die Aufgabe der imk automotive GmbH im Projekt ist die Entwicklung von ergonomischen Bewegungs- und Kollaborationsmodellen auf Basis von geplanten und berechneten Bewegungen. [24]

Forschungsprojekt „BewVar“

Ziel des Projekts BewVar ist es, die große Varianz der menschlichen Bewegung bei manuellen und MRK-Arbeitsplätzen stärker zu berücksichtigen und so eine Unterstützung bei der Auslegung des Sicherheitskonzepts für MRK-Systeme im Planungstool ema geben zu können. Dadurch soll eine Offline-Bahnplanung zur Kollisionsvermeidung auf Grundlage der Bewegungsvarianz und eine Plausibilisierung des Prozessablaufes hinsichtlich der Anordnung der Sicherheitstechnik und der möglichen Verletzung von Schutz- bzw. Gefahrenbereichen überall dort ermöglicht werden, wo Mensch und Roboter kollaborativ tätig sind. [25]

3.2 Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Chemnitz

Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz ist das Leitinstitut für ressourceneffiziente Produktion innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Insbesondere im Bereich der produktionstechnischen Forschung und Entwicklung werden Lösungen entwickelt, Techniken verbessert und Innovationen in Wissenschaft und industrieller Auftragsforschung vorangetrieben. Schwerpunkte liegen in den Bereichen „Bauteile und Verfahren“, „Technologien und Prozesse“ sowie „Komplexe Maschinensysteme“. Die Entwicklung von Effizienztechnologien und intelligenten Anlagen zur Produktion von Antriebsstrang- und Karosseriekomponenten sowie die Optimierung der damit verbundenen umformenden und spanenden Fertigungsprozesse stehen dabei im Fokus. Für den Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration werden am Fraunhofer IWU vorrangig neue Sicherheitskonzepte entwickelt.

Sicherheitstechnik für die Mensch-Roboter-Kollaboration

Zurzeit werden Schwerlast-Roboter aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeiten und Traglasten noch immer in abgetrennten Arbeitsbereichen betrieben, um die Mitarbeiter vor möglichen Gefahren zu schützen. Innovative Konzepte und intelligente Robotersteuerungen setzen an dieser Stelle an um auch einen MRK-Betrieb unter Einsatz von Schwerlast-Robotern in Zukunft zu ermöglichen. Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Ausarbeitung entsprechend notwendiger Sicherheitskonzepte (vgl. [27]) sowie virtueller Testumgebung zur Absicherung solcher Arbeitsumgebungen vor der realen Inbetriebnahme.

Sicherheitskonzept mit vier Stufen

Das von den Fraunhofer-Experten entwickelte Sicherheitskonzept beinhaltet vier Stufen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Je intensiver Mensch und Roboter zusammenarbeiten, desto höher sind die Vorgaben der Sicherheitstechnik. Arbeitet der Mensch direkt mit dem Roboter zusammen, muss dieser auf der höchsten Sicherheitsstufe betrieben werden (reduzierte Geschwindigkeiten). Wenn der Mensch und Roboter parallel an unterschiedlichen, örtlich getrennten Aufgaben arbeiten, ist eine niedrigere

Sicherheitsvorgabe möglich, sodass der Roboter mit höheren Geschwindigkeiten betrieben werden kann.

„Ergänzt werden die Stufen durch eine Einteilung des gemeinsamen Arbeitsbereichs in räumliche Zonen. Sie geben an, wie nahe Mensch und Roboter sich kommen. In der niedrigsten Stufe gibt es nur zwei Zonen, eine grüne und eine rote. Hält der Mitarbeiter sich entfernt vom Roboter, wird hierfür eine grüne Zone angezeigt, der Roboter kann in vollem Tempo loslegen. Nähert sich der Mensch, dann wird die rote Zone aktiviert, der Roboter stoppt sofort. Wenn Mensch und Roboter sich treffen, etwa um Bauteile oder Werkzeuge zu tauschen, kommt zur grünen und roten noch eine gelbe Zone hinzu. Diese markiert den Kooperationsbereich. Jetzt bewegt sich der Schwerlast-Roboter vorsichtig und mit niedriger Geschwindigkeit. Kameras, Sensoren und intelligente Algorithmen verfolgen Laufwege des Menschen. Damit der Roboter richtig reagieren kann, muss er jederzeit die Position und die Laufwege des Mitarbeiters kennen. Diese kann er mithilfe mehrerer Kameras sehen. Zwei Kameras sind oberhalb des Arbeitsbereichs angebracht. Sie haben den gesamten Arbeitsraum im Blick und zeigen den aktuellen Standort des Menschen. Eine weitere Kamera sitzt auf dem Kopf des Roboters und erfasst den Nahbereich. So kann er Gesicht oder Hand des Mitarbeiters oder ein Bauteil in dessen Hand erkennen. Die Kameras werden mit einer Reihe von Sensoren ergänzt. Sie registrieren Parameter wie Position, Beschleunigung und Kraft des Roboters sowie die Position und Bewegung des Menschen, um Kollisionen zu vermeiden.“ [28]

Zur Auswertung der Daten hat das Fraunhofer Institut intelligente Algorithmen implementiert, sodass es möglich ist, das Verhalten des Roboters an die jeweilige Situation direkt anzupassen [29]. Diese direkte Anpassung ist ein wichtiger Faktor, um die Sicherheitsaspekte zu garantieren.

Teamarbeit mit dem Schwerlast-Roboter in der Virtuellen Realität (VR)

Um ein Gefühl für die Technik und den MRK-Betrieb zu bekommen, ist es heute bereits möglich das System in der virtuellen Umgebung mithilfe einer VR-Brille zu testen. Hier hat der Mensch die Möglichkeit das Teamwork mit der Maschine in voller Systemgeschwindigkeit zu testen. Eine solche Testumgebung wird am Fraunhofer IWU betrieben [30]. In naher Zukunft soll diese soweit optimiert werden, dass auch das Verhalten des Mitarbeiters berücksichtigt wird, indem dessen Bewegungen analysiert werden.

Zusätzlich arbeitet das Fraunhofer IWU an einer Robotersteuerung mit Gestenerkennung. Hierdurch wird es möglich, dem Roboter durch kleine Bewegungen Befehle zu geben, bspw. beim Anreichen eines Bauteils. [28]

3.3 Volkswagen Sachsen – Motorenwerk Chemnitz

Das Motorenwerk des Automobilherstellers Volkswagen in Chemnitz ist Vorreiter in der deutschen Automobilgeschichte und setzt ein von der Berufsgenossenschaft (BG) zertifiziertes Robotersystem mit Greifertechnik erstmals ein. Dabei sind in den Automobilwerken Industrieroboter längst allgegenwärtig, bspw. sind in Chemnitz ca. 150 Roboter im Einsatz. Allerdings ist hiervon nur einer im kollaborativen Betrieb tätig, also Hand in Hand mit einem Mitarbeiter ohne Schutzraum. [31]

Im Jahr 2015 testete das Motorenwerk Chemnitz den MRK-fähigen Roboter APAS von Bosch (siehe Abbildung 4) in einem Pilotprojekt. Hierbei erfolgt ein weiterer Schritt in Richtung einer unterstützenden Automatisierung im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration. Mensch und Roboter arbeiten zusammen und teilen sich einen gemeinsamen

Arbeitsbereich – und zwar ohne sichernden Schutzzaun. Da im Pilotprojekt vielsprechende Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde der Bosch APAS folglich in die alltägliche Produktion integriert. In der Montagelinie „Integriertes Ventiltriebsmodul 2“ (IVM 2) werden Zylinderkopfmodule für verschiedene Drei- und Vierzylinder-Benzinmotoren an einem kollaborativen Montagearbeitsplatz gefertigt. Hierbei werden Zylinderkopfhäuben mit Anbauteilen von einem Mitarbeiter bestückt. Anschließend entnimmt der Leichtbauroboter APAS ein Nockenwellen-Stellventil aus einer Kiste und fügt es in eine Bohrung in der Zylinderkopfhäube. Danach integriert der Roboter einen Sensor in das Motorenmodul. Sofern alle Bauteile korrekterweise montiert worden sind, wird die Motorhaube über ein Förderband zurück zum Mitarbeiter transportiert, welcher die eingesetzten Werkstücke miteinander verschraubt. [31]



Abbildung 4: Einsatz eines kollaborierenden Leichtbauroboters im Volkswagen-Motorenwerk in Chemnitz [31]

Durch den Einsatz des Leichtbauroboters entfallen alle Pick-and-Place-Aufgaben für die Mitarbeiter. Bspw. übernimmt der Roboter die Entnahme und das Einsetzen der Bauteile, wodurch die Arbeitsfolgen für die Mitarbeiter an dieser Montagearbeitsstation reduziert werden. Zudem wird der Mitarbeiter nun ebenfalls physisch entlastet. Aufgrund einer ungünstigen Bauteilbereitstellung waren zuvor unangenehme Körperdrehungen im Rücken die Folge für den Mitarbeiter. Diese ergonomisch ungünstigen Arbeitsschritte werden nun durch den Leichtbauroboter übernommen. Des Weiteren besteht im Motorenwerk Chemnitz nicht die Gefahr, dass der Roboter den Menschen irgendwann komplett ersetzen könnte. Der Leichtbauroboter wird nämlich nur dann eingesetzt, sofern dieser ergonomisch kritische Tätigkeiten entschärfen und den Mitarbeiter bei kraftraubenden sowie repetitiven Aufgaben unterstützen kann. [31]

4 Literaturverzeichnis

- [1] „VDMA-Positionspapier: Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration,“ 2016.
- [2] C. Thomas, B. Matthias und B. Kuhlenkötter, „Human-Robot-Collaboration - New Applications in Industrial Robotics,“ in *International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)*, Stellenbosch, 2016.
- [3] KUKA Roboter GmbH, „KUKA Robotics,“ [Online]. Available: <http://www.kuka-robotics.com/>.
- [4] Robert Bosch GmbH, „Bosch APAS,“ [Online]. Available: http://www.bosch-apas.com/de/apas/start/bosch_apas.html.
- [5] Technische Universität Chemnitz, „Insitut Robotik und Mensch-Technik Kooperation Forschung,“ [Online]. Available: <https://www.tu-chemnitz.de/etit/robosys/forschung.php>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [6] U. Thomas, G. Hirzinger, B. Rumpe, C. Schulze und A. Wortmann, „A New Skill Based Robot Proramming Language Using UML/P Statecharts,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [7] A. Butting, B. Rumpe, C. Schulze, U. Thomas und A. Wortmann, „Modeling Reusable, Platform-Independent Robot Assembly Processes,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Workshop on Domain Specific Languages for Robotics (DSLrob 2015)*, Hamburg, Germany, 2015.
- [8] Technische Universität Chemnitz, „Institut Robotik und Mensch-Technik Iteration Publikationen,“ [Online]. Available: <https://www.tu-chemnitz.de/etit/robosys/publikationen.php>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [9] SME Robotics, „The Project,“ [Online]. Available: <http://www.smerobotics.org/project.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [10] M. Dipl.-Ing. Hägele, „SMErobotics: Kognitive Robotersysteme für den Mittelstand,“ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. [Online]. [Zugriff am 13 Mai 2017].
- [11] SME Robotics, „Innovations,“ [Online]. Available: <http://www.smerobotics.org/innovations.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [12] SME Robotics, „Demonstrations,“ [Online]. Available: <http://www.smerobotics.org/demonstrations.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [13] TU Dresden, „Bereich Ingenieurwesen Forschung Robotik,“ [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/ing/forschung/robotik>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [14] TU Dresden, „Bereich Ingenieurwesen Forschung Mensch-Technik Kooperation,“ [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/ing/forschung/chtd>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [15] T. U. Dresden, „VICCI Project,“ Institut für Software- und Multimediatechnik, [Online].

- Available: <https://vicci.inf.tu-dresden.de/projekt/>. [Zugriff am 13 Mai 2017].
- [16] Interatice Media Lab Dresden, „Forschungsprojekte,“ [Online]. Available: <https://mt.inf.tu-dresden.de/research/research-projects/vicci-visual-and-interactive-cyber-physical-systems-control-and-integration/>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [17] S. Kapplusch, „Smarte Werkbank - neues Innoteam an der Fakultät,“ Technische Universität Dresden, [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/ing/informatik/die-fakultaet/news/smartere-werkbank-neues-innoteam-an-der-fakultaet>. [Zugriff am 13 Mai 2017].
- [18] TU Dresden, „Forschung Technische Visualistik,“ [Online]. Available: <https://mg.inf.tu-dresden.de/forschung/projekte/smartere-werkbank>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [19] Hochschule Mittweida, „Fakultät Ingenieurwissenschaften Professur Industrieelektronik/Regelungstechnik,“ [Online]. Available: <https://www.inw.hs-mittweida.de/professuren-fachgruppen/prof-mueller-k.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [20] Hochschule Mittweida, „Fakultät Ingenieurwissenschaften Professur Fertigungsautomatisierung Forschung,“ [Online]. Available: <https://www.inw.hs-mittweida.de/webs/winkler3/forschung.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [21] Imk automotive GmbH, „Forschungsprojekt AnDy,“ [Online]. Available: <http://www.imk-automotive.de/andy.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [22] Imk automotive GmbH, „Forschungsprojekt eMan III,“ [Online]. Available: <http://www.imk-automotive.de/eman-iii.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [23] Imk automotive GmbH, „Forschungsprojekt KoMPI,“ [Online]. Available: <http://www.imk-automotive.de/kompi.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [24] I. a. GmbH, „Forschungsprojekt "ema2AnyBody",“ [Online]. Available: <https://www.imk-automotive.de/ema2anybody.html>. [Zugriff am 13 Juli 2018].
- [25] I. a. GmbH, „Forschungsprojekt BewVar,“ [Online]. Available: <https://www.imk-automotive.de/BewVar.html>. [Zugriff am 13 Juli 2018].
- [26] i. a. GmbH, „Forschungsprojekt "Konstruktions- und Berechnungsmethoden triaxialer hyperboloidischer Getriebe – HypoGear",“ [Online]. Available: <https://www.imk-automotive.de/hypogear.html>. [Zugriff am 13 Juli 2018].
- [27] M. Bdiwi, „Integrated sensors system for human safety during cooperating with industrial robots for handing-over and assembling tasks,“ in *Procedia CIRP* 23 65 - 70 *Conference on Assembly Systems and Technologies and Systems*, 2014.
- [28] S. Kunze, „maschinenmarkt vogel,“ [Online]. Available: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/robotik/articles/594769/>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [29] M. Jokesch, B. Mohamad und S. Jozef, „Integration of vision/force robot control for transporting different shaped/colored objects from moving circular conveyor,“ in *IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2014.

- [30] R. Neugebauer, D. Weidlich und H. Zickner, „Virtual reality solutions for the design of machine tools in practice,“ in *Proceedings of the 5th CIRP International Seminar ICME*. Vol. 88., 2006.
- [31] Volkswagen, „Volkswagen Magazin,“ [Online]. Available: <http://magazin.volkswagen.de/Roboter-im-Motorenwerk-Chemnitz.html>. [Zugriff am 19 April 2017].
- [32] S. Hutchinson, G. D. Hager und P. I. Corke, „A Tutorial on Visual Servo Control,“ *IEEE Transactions on robotics and automation* , pp. 651-670, Oktober 1996.