



Schlussbericht Verbundvorhaben

rorarob - Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem

Titel des Teilvorhabens: Ergonomische, arbeitsorganisatorische und sicherheitstechnische Gestaltung der Fertigungs- und Anlagenkonzepte

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dortmund
Professur für Arbeits- und Produktionssysteme (APS)
Institut für Produktionssysteme (IPS)

Förderkennzeichen: 01MA09033

Autor/en: Dipl.-Ing. Felix Busch, Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2009 bis 31.03.2013

Projektkonsortium:



Das Projekt wurde im Rahmen des Technologieprogramms „Autonomik – Autonome Simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen 01MA09033) gefördert und wurde vom Projektträger Multimedia im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreut.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
I. Einleitung	1
I.1 Aufgabenstellung	2
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens, Projektstruktur	6
I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II. Stand der Technik zu Projektbeginn	9
II.1 Ähnliche Projekte, Abgrenzungen.....	12
III. Eingehende Darstellung	19
III.1 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse	19
III.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	68
III.3 Öffentlichkeitsarbeit.....	69
IV. Nutzen und Verwertung	77
V. Literatur	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rohrkonstruktionen für Turbomaschinen [MAN]	1
Abbildung 2: Rahmenwerke für mobile Kräne [Böcker]	2
Abbildung 3: Grafische Darstellung des geplanten Demonstrators [IPS]	3
Abbildung 4: Arbeitsbereiche im Forschungsvorhaben [IPS]	6
Abbildung 5: Roboter für Schweißapplikationen	11
Abbildung 6: Komponenten des Assistenzroboters rob@work [Hel06].....	13
Abbildung 7: Prozessschritte beim Schutzgasschweißen mit dem rob@work [Hel06].....	14
Abbildung 8: Arbeitsplatz des Roboterassistenzsystems PowerMate [Sch05].....	15
Abbildung 9: Roboterassistenzsystem im Einsatz bei der Europipe GmbH [Som07].....	16
Abbildung 10: Der RAAS-Roboter beim Einmessen eines Schweißteils [Hüp06].....	17
Abbildung 11: Geheftete Rohrkonstruktionen [MAN]	21
Abbildung 12: Layoutskizze des betrachteten Arbeitssystems MAN Diesel & Turbo SE ...	23
Abbildung 13: Schweißarbeitsplatz bei der MAN Diesel & Turbo SE [MAN].....	23
Abbildung 14: Prozesskette zur Fertigung bei der Böcker Maschinenwerke GmbH	25
Abbildung 15: Analytierte Baugruppe bei der Böcker Maschinenwerke GmbH [Böcker] ..	27
Abbildung 16: Layoutskizze Arbeitssystem bei der Böcker Maschinenwerke GmbH.....	28
Abbildung 17: Schweißarbeitsplatz bei der Böcker Maschinenwerke GmbH [Böcker].....	29
Abbildung 18: Schweißen einer Baugruppe [MAN].....	30
Abbildung 19: Schweißen einer Baugruppe [Böcker].....	30
Abbildung 20: Ausgewählte Referenzbaugruppe; [Böcker] (l) / [MAN] (r)	31
Abbildung 21: AAWS Bewertungsbogen zur ergonomischen Arbeitsplatzanalyse [IAD] ...	33
Abbildung 22: Schweißen Rahmenkonstruktion bei Böcker Maschinenwerke GmbH	36
Abbildung 23: Verschweißen eines 8 Zoll (203,2mm) Rohres [MAN]	39
Abbildung 24: Skelettmodell der implementierten Humansimulation [FAMOS].....	49
Abbildung 25: Entwicklungsstufen des Menschmodells in FAMOS	50
Abbildung 26: Hautkonturmodell und Detailgrad der Humansimulation [FAMOS]	50
Abbildung 27: Bibliothek mit Modellen unterschiedlicher Anthropometrie [FAMOS]	51
Abbildung 28: Matrix der 84 OWAS-Grund-Arbeitshaltungen	53
Abbildung 29: Einbindung des Ergonomie-PlugIn für EmotionFX in FAMOS	55

Abbildung 30: Vorgehensweise der ergonomischen Bewertung in FAMOS	56
Abbildung 31: Skelett mit Gelenkbezeichnungen und Beispiel für eine OWAS-Kodierung	56
Abbildung 32: Beispiel für die Ableitung eines Haltungscode	57
Abbildung 33: OWAS Interface in FAMOS.....	59
Abbildung 34: OWAS Analyseergebnis nach Ablauf der simulierten Bewegungssequenz	59
Abbildung 35: Fertigungslayout des Demonstrators	62
Abbildung 36: Offlinesimulation des Schweißprozesses der Referenzbaugruppe MAN	63
Abbildung 37: Haltungsanalyse in FAMOS am Beispiel „Schweißen Rohrflansch“	64
Abbildung 38: Versuchsanordnung Referenzbauteil der Böcker Maschinenwerke GmbH	65
Abbildung 39: Schweißablauf Rahmenbauteil im Vergleich.....	65
Abbildung 40: Versuchsanordnung für das Referenzbauteil der MAN Diesel & Turbo SE	66
Abbildung 41: Schweißablauf Rohrbaugruppe im Vergleich.....	67
Abbildung 42: FMEA Roboterassistenzsystem rorarob	68
Abbildung 43: rorarob-Demonstration in der Phönixhalle, Mainz	69
Abbildung 44: Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund.....	70
Abbildung 45: Programm der Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund.....	71
Abbildung 46: Programm der Fachtagung am 11. Juli 2011 am IPS, Dortmund.....	72
Abbildung 47: Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betrachtete Körperhaltungen und Lasten bei dem OWAS-Verfahren [Sto85]... 52	52
Tabelle 2: Aktionskategorien nach OWAS 54	54
Tabelle 3: Bewertungsmatrix für Haltungskombinationen nach OWAS [Gud09], [Sto85] .. 57	57
Tabelle 4: Bewertungsmatrix für Körperhaltungen nach OWAS [Gud09], [Sto85] 58	58
Tabelle 5: Zuwendungsf. Personalkosten und mit der Pauschale abgegoltene Kosten..... 69	69

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
APS	Professur für Arbeits- und Produktionssysteme der TU Dortmund
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DIN	Deutsches Institut für Normung
€	Euro
EN	Europäische Norm
erf.	erforderlich
etc.	et cetera
e. V.	eingetragener Verein
Fa.	Firma
f.	folgende
ff.	fortfolgende
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
IRPA	Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
m	Meter
max.	maximal
NIRO	Netzwerk Industrie RuhrOst

Nr.	Nummer
o. ä.	oder ähnlich
s	Sekunde
S.	Seite
Sek.	Sekunde
TU	Technische Universität
u.	und
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
ZZ	Zykluszeit

I. Einleitung

Das Schweißen von Rohr- und Rahmenkonstruktionen ist im mittelständisch geprägten Maschinen- und Anlagenbau von großer Bedeutung. Aufgrund der geringen Stückzahlen bis hin zur Einzelteillfertigung stellt dieser Bereich einen arbeitsintensiven Produktionsprozess dar, welcher überwiegend von manuellen Arbeitsplätzen und einem geringen Mechanisierungs- und Automatisierungsgrad geprägt ist. Die häufig sperrigen und schwergewichtigen Bauteile erschweren die Handhabung und führen gerade bei Fügeprozessen wie dem Schweißen, und den damit verbundenen Positioniervorgängen, zu ungünstigen Formen statischer Halte- und Haltungsarbeit und somit zu einer kaum zu vermeidenden hohen physischen Belastung des Mitarbeiters. Weiter kann die Fertigung der Rohr- und Rahmenverbindungen aufgrund notwendiger Anpassungsarbeiten und individueller Anschlussmaße häufig erst nach Fertigstellung der Kernanlage erfolgen, was in langen Durchlaufzeiten resultiert.

Typische Einsatzbereiche von Rohrkonstruktionen ist der Bau von Turbomaschinen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst erfolgt der Aufbau des Rahmens (grün), dann die Montage der Turbine und erst anschließend werden die Rohr-, Ventil- und Stützkonstruktionen angepasst und angebracht.



Abbildung 1: Rohrkonstruktionen für Turbomaschinen [MAN]

Ein weiterer Einsatzbereich von geschweißten Rahmenkonstruktionen sind die Aufbauten von mobilen Kranfahrzeugen, wie in Abbildung 2 gezeigt.



Abbildung 2: Rahmenwerke für mobile Kräne [Böcker]

I.1 Aufgabenstellung

In vier Projektphasen wurde in enger Kooperation mit dem Systementwickler für Roboterapplikation carat robotic innovation GmbH und den Anwenderunternehmen MAN Diesel & Turbo SE und der Böcker Maschinenwerke GmbH sowie der Professur für Arbeits- und Produktionssysteme und der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung am Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund ein industriell einsetzbares und für die besonderen Randbedingungen von KMU ausgelegtes Multirobotersystem zur Schweißaufgabenassistenz entwickelt. Projektbegleitende Fachtagungen sowie die Einbindung des Netzwerks Industrie RuhrOst (NIRO) stellten die Breitenwirksamkeit und Industrietauglichkeit der entwickelten Lösung sowie einen schnellen Wissenstransfer in die mittelständisch geprägte Industrie sicher.

Im Mittelpunkt standen die Gewährleistung der Arbeitssicherheit, die Einhaltung der strengen gesetzlichen Bestimmungen sowie die unter ergonomischen Gesichtspunkten belastungsreduzierten Arbeitsausführung. Im Projekt wurden neue Technologien und Konzepte in den Bereichen Arbeitsplanung, ergonomische Arbeitsplatzgestaltung, kollaborierende Robotersysteme, Prozesssicherheit und Mensch-Roboter-Interaktion entwickelt und in einen Demonstrator implementiert.



Abbildung 3: Grafische Darstellung des geplanten Demonstrators [IPS]

Mit der flexiblen Nutzung eines Roboters als mechatronischen, (teil-)autonom arbeitenden Assistenten am Beispiel eines Schweißprozesses leistet das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Akzeptanz automatisierter Fertigungssysteme. Unter anderem trägt ein solches System dazu bei:

- die Flexibilität soziotechnischer Systeme zu erhöhen
- die Durchlaufzeiten zu verkürzen
- die ergonomischen Bedingungen zu verbessern
- und letztlich die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

Mithilfe dieses roboterbasierten Assistenzsystems soll es möglich werden, den Rohr- und Rahmenfertigungsprozess weitgehend unabhängig von anderen Arbeitsschritten bei der Montage einer Gesamtanlage vorzunehmen. Damit wird eine gleichzeitige Fertigung mit anderen Maschinen- und Anlagenkomponenten erreicht, was die Gesamtdurchlaufzeit des Fertigungsprozesses reduziert. So können zum Beispiel in Zukunft die Schweißarbeiten an der Verrohrung einer Turbine parallel zur Montage der Kernmaschine durchgeführt werden. Darüber hinaus bewirkt das Assistenzsystem eine signifikante Reduktion der physischen Belastung des Mitarbeiters bei der Durchführung der Schweißprozesse und vermeidet manuelle Handhabungstätigkeiten zur Umorientierung und Positionierung von Bauteilen und Komponenten. Die Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch und Robotersystem unter arbeitsgerechten, sicherheitstechnischen und ökonomischen Aspekten ist dabei ein wesentliches Ziel des Verbundprojektes.

Für die Entwicklung des Assistenzsystems zur Fertigung von Rohr und Rahmenbauteilen bringt die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme (APS) seine breite Methodenkompetenz im Aufgabenfeld des Industrial Engineering [Deu06] ein. Hierzu zählen ins-

besondere Kenntnisse zu Fragestellungen der verschwendungsarmen Produktion [Deu08, Deu07], der Arbeitssystemgestaltung mit besonderem Fokus auf ergonomischen Untersuchungen [Gol08] bzw. der menschlichen Zuverlässigkeit in Mensch-Maschine-Systemen [Wis08] und der Digitalen Fabrik [Pet08].

Die Fertigung von Rohr- und Rahmenbauteilen parallel zur Fertigung weiterer Anlagenkomponenten dient der Beseitigung von Verschwendung in Form von Wartezeiten während des Produktionsprozesses. Das Institut konnte hierzu im Rahmen des Forschungsprojektes „Ganzheitliche Produktionssysteme entlang der Wertschöpfungskette“ einschlägige Erfahrungen sammeln, wie der innovative Ansatz der schlanken Produktion auch bei kleinen und mittelständisch geprägten Unternehmen angewandt werden kann und welche spezifischen Rahmenbedingungen es dabei zu berücksichtigen gilt. Dieses Wissen wurde darüber hinaus auch bei verschiedenen Technologietransferprojekten eingebracht.

Die Beseitigung von Verschwendung spielt des Weiteren auch bei der Arbeitssystemgestaltung eine Rolle. Der Schwerpunkt bei diesem Arbeitsgebiet liegt von Seiten der Professur allerdings vor allem auf der ergonomischen Optimierung und der arbeitswissenschaftlichen Bewertung vorhandener bzw. neu zu planender Arbeitssysteme in der Produktion und Logistik. Hierzu wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich AiF-Forschungsprojekte im Bereich der Logistik abgeschlossen. So wurden z. B. im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes 13904 N, "Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissioniersystemen", welches gemeinsam mit dem Fraunhofer-IML durchgeführt wurde, u. a. Belastungsanalysen durchgeführt. Daraus entstand seitens der beteiligten KMU ein sehr großes Interesse an einem Werkzeug, das es ermöglicht, ohne Inanspruchnahme externer Unterstützung Belastungsanalysen durchführen zu können.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte als interdisziplinäres Verbundprojekt. Unter der Leitung der carat robotic innovation GmbH waren die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme (Prof. Dr.-Ing. Deuse), die Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (Prof. Dr.-Ing. Kuhlenkötter) sowie die Unternehmen MAN Diesel & Turbo SE sowie Böcker Maschinenwerke GmbH an der Bearbeitung beteiligt. Im Unterauftrag mitwirkend war außerdem die Firma Demgen Werkzeugbau GmbH und das Netzwerk Industrie Ruhr Ost (NIRO). Sowohl die Unternehmen Böcker Maschinenwerke GmbH und Demgen Werkzeugbau GmbH als auch die Professuren für Arbeits- und Produktionssysteme

teme und Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung sind ordentliche Mitglieder des Netzwerkes Industrie RuhrOst e. V. (NIRO), ein regionaler Zusammenschluss aus 60 Unternehmen der Maschinenbau-, Metall- und Elektronikindustrie aus der Region des östlichen Ruhrgebiets. Innerhalb des Netzwerkes konnten zuvor schon viele positive Erfahrungen in der gemeinsamen Bearbeitung von Projekten gesammelt werden. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit im rorarob-Projekt waren die notwendige Kompetenz und gerätetechnische Ausrüstung für die erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens verfügbar.

Die Fa. MAN Diesel & Turbo SE verzichtete aufgrund der im Schreiben vom 28.11.2011 genannten Gründe auf einen Teil der im Zuwendungsbescheid zugesicherten Personalmittel. Um die Erarbeitung zusätzlicher Arbeitspakete im Bereich der Humansimulation realisieren zu können, wurde eine Mittelverschiebung der seitens der Fa. MAN Diesel & Turbo SE freigewordenen Fördermittel zugunsten der Professur für Arbeits- und Produktionssysteme beantragt und bewilligt. Basierend auf den zusätzlichen Arbeitspaketen wurde die Projektlaufzeit um sechs Monate verlängert. Der wesentliche Grund hierfür lag in der Weiterbeschäftigung des bereits auf dem Projekt eingesetzten wissenschaftlichen Personals und der Vermeidung einer Einarbeitung zusätzlicher, parallel beschäftigter Projektbearbeiter.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens, Projektstruktur

Das Konsortium des Forschungsvorhabens rorarob, bestehend aus der Professur für Arbeits- und Produktionssysteme (APS) und der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (IRPA) am Institut für Produktionssysteme (IPS) an der Technische Universität Dortmund, einem Robotersystemanbieter und zwei Anwendern des Maschinen- und Anlagenbaus, haben innerhalb von 3 1/2 Jahren ein Multirobotersystem zur Schweißaufgabenassistenz in der Rohr- und Rahmenfertigung entwickelt, um die Mitarbeiter in der Fertigung in die Lage zu versetzen, parallel zu anderen Fertigungsschritten, exakt und ergonomisch optimiert die Konstruktionsvorgaben zu realisieren.

Das dreijährige Forschungsprojekt rorarob gliederte sich in insgesamt vier Projektphasen:

Phase 1: Analyse und Strukturierung der Anforderungen an ein Roboterassistenzsystem

Phase 2: Entwicklung von Konzepten zur hardware- und softwaretechnischen Umsetzung

Phase 3: Aufbau eines Roboterassistenzsystems (Demonstrator) an der TU Dortmund

Phase 4: Validierung und Optimierung der Projektziele am Demonstrator

In Abbildung 4 sind die Arbeitsbereiche innerhalb des Verbundvorhabens rorarob dargestellt:

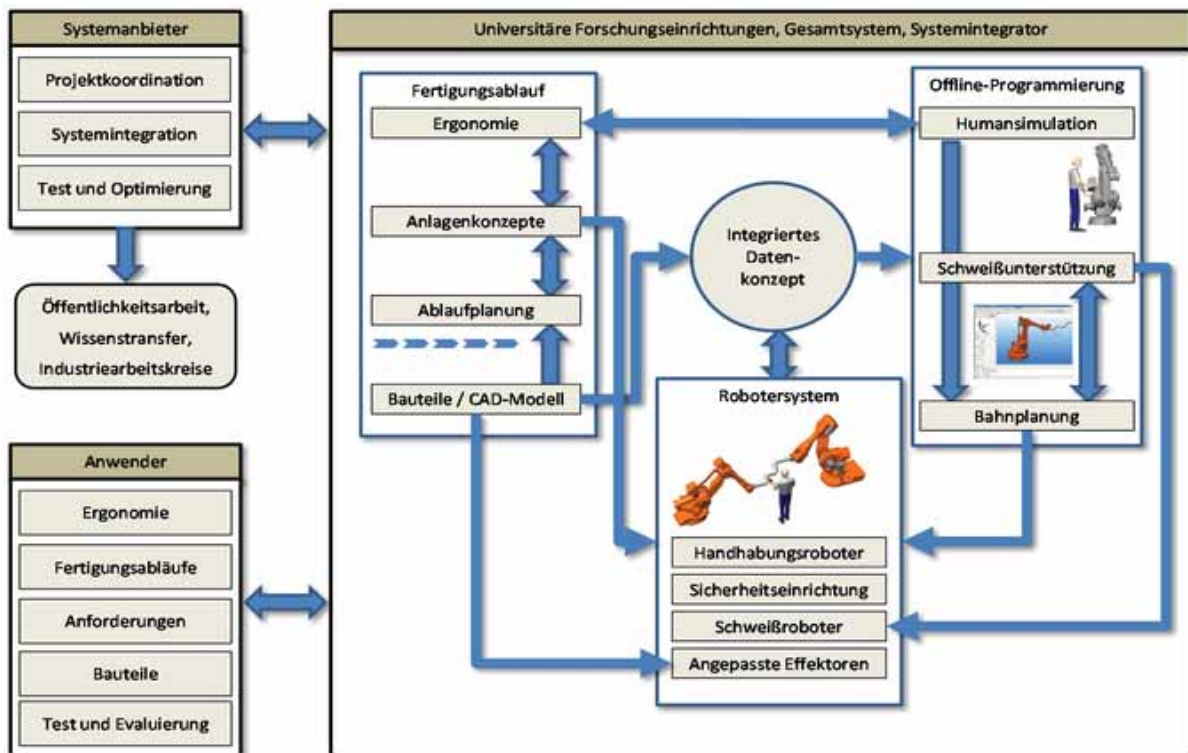


Abbildung 4: Arbeitsbereiche im Forschungsvorhaben [IPS]

In Anbetracht des innovativen Charakters des Forschungsprojektes und der vielfältigen Aktivitäten der einzelnen Projektpartner galt es, einen gut abgestimmten Projektablaufplan zu erstellen, der ein effizientes Vorgehen unterstützt. Daher wurde der Gesamtverlauf des Projektes in Arbeitspakete untergliedert, die sukzessiv aufeinander aufbauen.

Zunächst wurden durch die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme die derzeitigen Fertigungskonzepte bei den Anwendungspartner aufgenommen. Diese Analyse beinhaltete die Arbeitsplanung- und organisation und die ergonomischen Bedingungen in den betrachteten Arbeitssystemen. Die Analysephase schließt mit der Ableitung von Anforderungen an ein robotergestütztes Assistenzsystem ab. Die anschließende Konzeptphase gliederte sich in zwei wesentliche Bereiche: die digitale Planung der Roboterassistenz mit Hilfe eines Offlineprogrammiersystems und die Entwicklung eines Demonstrators an der TU Dortmund. Für die digitale Planung der Mensch-Roboter-Zelle wurde durch die carat robotic innovation GmbH und die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme ein bestehendes Offlineprogrammiersystem um eine Humansimulation erweitert. Die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme implementierte innerhalb dieser Entwicklungsarbeit eine digitale Bewertungsmethodik zur simulationsparallelen Analyse der physischen Belastungen. Während der Konzeptionierung und der Umsetzung des Demonstrators übernahm die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme Aufgaben in den Bereichen Arbeitsorganisation, Arbeitssicherheit und ergonomische Gestaltung des Assistenzsystem. Gemeinsam mit der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung wurden abschließend die Schweißprozesse der Anwendungspartner an Hand von Referenzbauteilen im lauffähigen Demonstrator validiert und die marktnahe Umsetzbarkeit des Vorhabens demonstriert. Bereits projektbegleitend wurden diese Ergebnisse einem breiten Fachpublikum aus Forschung und Industrie auf zwei Fachtagungen und diversen Veröffentlichungen präsentiert (siehe III.3).

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die vorgestellten Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung, carat robotic innovation GmbH, MAN Diesel & Turbo SE sowie Böcker Maschinenwerke GmbH erarbeitet. In enger Kooperation mit dem Netzwerk Industrie Ruhr Ost (NIRO) wurden projektbegleitend zwei Fachtagungen durchgeführt (siehe Kapitel III.3). Darüber hinaus hat das Konsortium an mehreren Workshops der Gruppen „Rechtliche Aspekte und funktionale Sicherheit in der AUTONOMIK“, „Mensch-Technik-Interaktion“ und „Industrielle Servicerobotik und Refe-

renzarchitekturen“ der Begleitforschung teilgenommen, eigene Ergebnisse eingebracht und in der Diskussion mit den anderen Projekten der Ausschreibung wertvolle Anregungen für das eigene Projekt gewonnen.

II. Stand der Technik zu Projektbeginn

Bei der Fertigung von Rohr- und Rahmenkonstruktionen lassen sich die gewünschten Geometrien auf unterschiedliche Weise herstellen. Mit Hilfe des Rohr- und Profilbiegens können komplexe Geometrien unter Verwendung unterschiedlicher Verfahren hergestellt werden [Fra89]. Das Hauptproblem dieses Ansatzes besteht vor allem in der Rückfederung der Werkstücke nach dem Umformen [Kho93]. Hierdurch sind aufwändige Simulationsansätze und / oder Iterationsschleifen zur Feinabstimmung des Fertigungsprozesses notwendig, sodass dieses Verfahren für kleine Losgrößen und insbesondere für die Einzelstückfertigung des Maschinen- und Anlagenbaus auch in Anbetracht der hohen Investitionskosten für die Biegemaschine sehr oft nicht wirtschaftlich ist. Darüber hinaus ist beim Rohrbiegen zu beachten, dass die Wandstärke durch Aufwerfungen und Ausdünnungen verändert werden kann, sodass für den druckbeaufschlagten Einsatz der Rohre zusätzliche Maßnahmen und Prüfungen zur Sicherstellung der Mindestwandstärke und Materialfehlerfreiheit notwendig sind.

Alternativ können die gewünschten Geometrien durch das Verschweißen von Segmenten hergestellt werden. Hierbei besteht bei komplexen Geometrien und insbesondere bei manueller Fertigung das Problem, die Segmente so genau zu fügen, dass die Abweichung zur vorgesehenen Endgeometrie ausreichend klein ist. Um die Fehlerquote der Schweißnähte möglichst gering zu halten, empfiehlt sich für diesen Prozess eine automatisierte Lösung, die im Rahmen des Projektes rorarob entwickelt wurde.

Dabei ergeben sich vor allem Herausforderungen bezüglich der bislang aufgrund von arbeitsschutzrechtlichen Regelungen erforderlichen strikten Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Maschine. Neben der physikalischen Trennung durch Schutzzäune, Wände etc. besteht zusätzlich die Möglichkeit, sicherheitskritische Bereiche durch elektronische Maßnahmen abzuschirmen. Neben den klassischen optischen Schutzsystemen, wie z. B. Lichtschranken und –vorhängen, können inzwischen auch fortgeschrittene Techniken, z. B. Laserscanner oder auch Kamerasysteme, die notwendigen Sicherheitsstandards einhalten [BIA05]. In solchen Systemen sind die sicherheitsrelevanten Teilbereiche innerhalb des Sensor-Erfassungsfelds konfigurierbar, wodurch eine einfache Überwachung von Sicherheitsbereichen mit komplexeren Geometrien ermöglicht wird. Darüber hinaus lassen sich auch nicht-optische Sensoren einsetzen, wie z. B. kapazitive oder auch Ultraschallsensoren. Die strikte Trennung der Arbeitsräume erfordert spezielle Konzepte für die mittelbare Interaktion zwischen Mensch und Maschine. So erlaubt die heutige Sicher-

heitstechnik beispielsweise die Definition von Übergabebereichen, für die sichergestellt werden kann, dass sich dort nur entweder der Mensch oder der Roboter aufhalten bzw. bewegen. Allen diesen Systemen ist gemein, dass ein Verletzen der Sicherheitsbedingungen zum Übergang in einen Zustand des Nothalts führt. Hierdurch wird der zugrundeliegende Arbeitsprozess unterbrochen und eine Wiederaufnahme erfordert im Regelfall den manuellen Eingriff der Freigabe zur Fortführung des Prozesses.

Die aktuelle Entwicklung der Sicherheitssysteme zielt darauf ab, die strikte Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Maschine aufzuweichen oder ganz aufzuheben. Auf diese Weise lassen sich bestehende Arbeitsabläufe verbessern, beispielsweise indem Wartezeiten für das Erreichen eines definierten, trennenden Sicherheitszustandes entfallen.

Die Forschung im Bereich der Robotik ohne trennende Schutzeinrichtungen (OTS) befasst sich mit dem Entwickeln neuartiger Arbeitsabläufe, die auf die Unterstützung des Menschen durch den Roboter bzw. der Kooperation des Roboters mit dem Menschen basieren [Spi01]. Im Gegensatz zum klassischen Robotereinsatz ist die Ausarbeitung eines passenden Schutzkonzeptes aufgrund der hohen Komplexität der Gefährdungssituation unmittelbar mit der Entwicklung des Arbeitsprozesses verknüpft [Hen08]. Neben der Anpassung und Weiterentwicklung bestehender Schutzeinrichtungen, wie z. B. Kameras oder Laserscanner, werden auch neue Konzepte, wie z. B. die Ausstattung des Roboters mit einer kraftmindernden Schutzhülle (Bumper) oder künstlicher Haut zur taktilen Kollisionserkennung, eingesetzt [Hel07]. Im Bereich der Forschung und der Servicerobotik gibt es eine Vielzahl von Entwicklungen für einen kooperierenden Betrieb zwischen Mensch und Roboter. Systeme wie der Kuka Leichtbauroboter oder mobile Plattformen mit Roboterkinematiken sind zwar auf Forschungsebene weit voran geschritten, dennoch ist ein industrieller Einsatz aufgrund der sicherheitsrechtlichen Grundlage derzeit nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus sind die begrenzten Handhabungsgewichte und Prozesskräfte aufgrund der leichtbauenden Ausführung für Assistenzaufgaben im industriellen Umfeld oftmals nicht ausreichend.

Spezielle Roboter für Schweißapplikationen sind von verschiedenen Roboterherstellern wie z. B. ABB, KUKA, Reis oder Motoman am Markt verfügbar, teilweise sind die Roboter auf die Art des Schweißprozesses (wie z. B. Schutzgas- oder Lichtbogen-Schweißens) angepasst. Beispielhaft sind hier der ABB IRB1600ID (Lichtbogenschweißen) und KUKA KR 5 arc HW (Schutzgasschweißen) zu nennen (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Roboter für Schweißapplikationen (links: ABB IRB 1600ID [ABB], rechts: KR 5 arc HW [KUKA])

Für die Berücksichtigung von Sensordaten, z. B. zur Nahtverfolgung oder auch zur Qualitätskontrolle des Schweißprozesses, werden (abhängig vom Hersteller) spezielle Softwaremodule zur Erweiterung der Robotersteuerung angeboten. Zu berücksichtigen ist beim Einsatz von Schweißrobotern die Verwendung geeigneter Schutzeinrichtungen insbesondere des Blendschutzes.

Für das vorgesehene Multirobotersystem ist eine Roboterkooperation zwingend erforderlich. Inzwischen zählen kooperierende Systeme von zwei oder mehr Robotern, die mit Hilfe von einer gemeinsamen bzw. mehreren eng gekoppelten Steuerung(en) realisiert werden, zum Stand der verfügbaren Technik. Dabei kann sowohl die Handhabung des Werkstücks als auch das Schweißen von Robotern übernommen werden. In den meisten Anwendungen wird das Schweißen vom Roboter übernommen und die Handhabung, wenn sie dynamisch ist, wahlweise durch einzelne externe Achsen oder durch einen oder mehrere weitere Roboter. Das präzise Einhalten der Schweißbahn auch innerhalb eines bewegten Systems stellt hier die Herausforderung dar.

Die Erstellung des Roboterprogramms kann direkt an der Anlage erfolgen oder über geeignete Offline-Programmiersysteme. Die direkte Erstellung an der Anlage hat zur Folge, dass sie in dieser Zeit nicht für den Produktionsprozess zur Verfügung steht. Daher werden üblicherweise die Programme offline erzeugt, sodass mit Hilfe der Simulation der Stillstand der Anlage zum Zweck der Programmierung möglichst kurz gehalten werden kann. Praktisch jeder Roboterhersteller bietet eine Softwarelösung für diesen Anwendungsfall an, die jedoch im Regelfall nur für die Roboter des jeweiligen Herstellers verwendet werden kann. Diese Offline-Programmiersysteme können oft durch Module erweitert werden, die die Programmierung spezieller Aufgaben oder auch Prozesse, wie auch den Schweiß-

prozess erleichtern, z. B. durch Möglichkeit prozessspezifische Parameter in das Roboterprogramm zu integrieren oder digitale Menschmodell zur Abbildung der Mensch-Roboter-Kooperation zu nutzen. Neben diesen roboterspezifischen Softwarelösungen gibt es auch herstellerunabhängige Programmiersysteme, die es zum einen erlauben, Anwendungen zu programmieren und zu simulieren, in denen Roboter verschiedener Hersteller zusammen verwendet werden. Zum anderen ermöglichen solche Systeme auch die bessere Übertragbarkeit und Wiederverwendung bereits geleisteter Programmierung, da sie prinzipiell den (herstellerübergreifenden) Austausch des Roboters auch in einem fortgeschrittenen Stand des Projektes ermöglichen.

II.1 Ähnliche Projekte, Abgrenzungen

Nachfolgend werden ähnliche Projekte zur robotergestützten Schweißaufgabenassistenz mit direkter Mensch-Roboter-Kooperation vorgestellt und gegenüber dem beschriebenen Vorhaben rorarob abgegrenzt:

Projekt: Assistor

Das Verbundprojekt „Assistor“ (assistierende, interaktive und sicher im industriellen Umfeld agierende ortsflexible Roboter) aus dem Jahre 2004 stammt aus dem Forschungsbereich der mobilen Handhabungstechnik und arbeitsübergreifenden Zusammenarbeit von Mensch und Roboter [Hel05]. Beteiligt ist das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung aus Stuttgart und sechs Wirtschaftsunternehmen, darunter die Elan Schaltelemente GmbH, die Gesellschaft für Produktionssysteme GmbH, Reis Robotics, die Schunk GmbH, die SICK AG und die Vision & Control GmbH. Der Schwerpunkt der Forschung im Assistor Projekt liegt in der Entwicklung einer sicheren, intuitiven Mensch-Roboter-Interaktion und –Kooperation sowie dem damit verbundenen physikalischen Aufbau eines Roboterassistenzsystems. Das zu schaffende Szenario beschreibt Helms als „Interaktiver Industrieroboter“. Dabei arbeiten Roboter und Mensch simultan oder assistierend. Der gemeinsame Arbeitsraum hat keine trennende Schutzeinrichtung. Die möglichen Steuerungsfunktionen sind der Handbetrieb, der Automatikbetrieb mit interaktiver Prozessbeobachtung oder der interaktive Automatikbetrieb. Der Grundaufbau dieses Robotersystems ist stationär. Als Erweiterung dieser Funktionen wurde innerhalb des Assistor Projekts ein mobiler Assistenzroboter entwickelt. Der „rob@work“ (siehe Abbildung 6) besteht aus einer selbständig navigierenden Plattform mit einem 7-achsigen Roboterarm für Hol- und Bringdienste sowie Montage-, Fertigungs- oder Handhabungsaufgaben [HEL06].

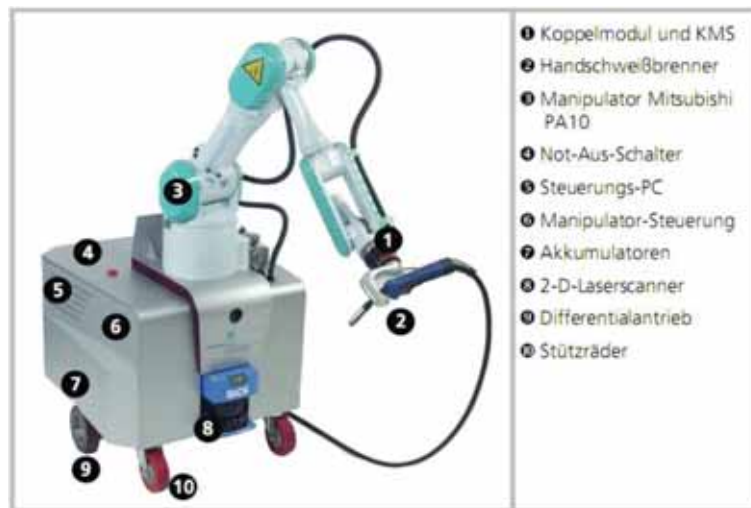


Abbildung 6: Komponenten des Assistenzroboters rob@work [Hel06]

Die Einsatzvariante des rob@work ist die Roboterassistenz zum manuellen Schutzgas-schweißen [Hel06]. Der rob@work besteht aus einer mobilen, nicht holonomen Plattform mit Differentialantrieb, d.h. die Position des Roboters im Raum kann mit Hilfe von generalisierten Koordinaten ermittelt werden. Dabei lässt sich das Bezugssystem (z.B. das kartesische Koordinatensystem) um einen Freiheitsgrad reduzieren. Das Sensorsystem besteht aus einem Gyroskop zur Ermittlung der Orientierung im Raum und einem 2-D-Laserscanner in Bodennähe. Als Manipulator dient der Mitsubishi PA10. Neben dem Handschweißbrenner können herkömmliche Handwerkzeuge mit einem geringen Modifikationsaufwand als Endeffektor an den Roboter angekoppelt werden. Ein typischer Prozessablauf ist in Abbildung 7 dargestellt [Hel06]. Der Transport des Assistenzroboters an den Arbeitsplatz erfolgt durch das Ziehen, bzw. Drücken am Endeffektor des Manipulators. Dieser erfasst die Richtung und Stärke der aufgeprägten Kräfte und erzeugt daraus mit Hilfe der mobilen Plattform eine eigenständige Bewegung. Beim manuellen Schutzgas-schweißen wird der Schweißbrenner an den Manipulator angekoppelt. Darauf folgt die Auswahl der Assistenzfunktion (passend zum angekoppelten Werkzeug). Der Werker führt den Schweißbrenner an die gewünschte Schweißanfangsposition und aktiviert die Funktionen „Einhaltung der gewünschten Schweißgeschwindigkeit“ und „Einhaltung eines gewünschten Schweißwinkels“ des Assistenzroboters. Während der Werker die erste Schweißbahn manuell ausführt, zeichnet der Assistenzroboter alle nötigen Parameter auf, um in der Lage zu sein, den übrigen Schweißprozess autonom ausführen zu können. Anschließend beendet der Assistenzroboter die übrigen Prozessschritte, wobei der Werker jederzeit in der Lage ist, die Schweißbahn zu korrigieren.



Abbildung 7: Prozessschritte beim Schutzgasschweißen mit dem rob@work [Hel06]

Die Vorteile bei der Anwendung des Roboterassistenzsystem rob@work sieht Helms [Hel06] in der Verbesserung der Schweißqualität und Ergonomie gegenüber dem manuellen Schweißen und in der Einsparung von teurer Sensorik zur Werkstückerkennung. Die Bahnführungsunterstützung ist durch die Mobilität des Assistenzroboters über einen flächenmäßig unbegrenzten Arbeitsraum möglich. Nach einmaliger „Anlernphase“ ist der Roboter in der Lage, die folgende Mehrlagenschweißung in kurzer Zeit zu erzeugen. Neben dem rob@work wurde der „PowerMate“ als ein weiterer Assistenzroboter entwickelt [Sch05]. Seine Aufgabe ist es, den Menschen bei der Handhabung und Montage schwerer Teile zu unterstützen (Abbildung 8). Der PowerMate besteht aus einem Standard-6-Achs-Knickarmroboter. Er assistiert dem Menschen u.a. bei der Montage von Hinterachsgetrieben [Hel05]. Wie der rob@work arbeitet der PowerMate gemeinsam mit dem Menschen ohne trennende Schutzeinrichtung. Er übernimmt die für den Menschen belastende und gefährliche Handhabung der Bauteile. Hierbei ergibt sich eine erhöhte Anforderung an die Sicherheit, da der Arbeitsprozess nicht wie beim rob@work aus einer Lernphase und einer autonomen Phase des Assistenzroboters besteht, sondern Mensch und Roboter in direkter Arbeitsteilung gemeinsam zusammenarbeiten. Ein „Safety-Controller“ der Firma Elan überwacht zusätzlich zu der eigentlichen Robotersicherheitssteuerung (Lichtgitter, Laserscanner und kapazitive Sensoren) den gesamten Arbeitsprozess und ist in der Lage, das System zu stoppen und in einen sicheren Zustand zu bringen. Die eingehaltenen Sicherheitsanforderungen an den Aufbau des Gesamtsystems entsprechen der Kategorie 3 aus der DIN EN ISO 13849-1 für die Sicherheit von Maschinen.



Abbildung 8: Arbeitsplatz des Roboterassistenzsystems PowerMate [Sch05]

Projekt: Europipe

Das Europipe-Projekt ist eine Entwicklung eines Roboterassistenzsystems der Firma Reis Robotics aus dem Jahr 2006 [Sch07]. In diesem System assistiert ein Roboter bei der Europipe GmbH dem Werker beim manuellen Anschweißen von Endblechen an Rohre, die anschließend längs verschweißt werden (Abbildung 9). Der Roboter übernimmt die Handhabung der Werkstücke und transportiert das Blech im Automatikbetrieb zu einer definierten Position vor das Rohr. Die Feinpositionierung erfolgt durch den Werker per 6-D-Maus und Zustimmungsschalter [Som07]. Das Schweißen erfolgt manuell durch den Werker. Ein Drehen des Rohres oder des Anschweißblechs während des Schweißvorgangs, wird nicht vom Roboter durchgeführt. Der Assistenzroboter agiert mit einer reduzierten Bewegungsgeschwindigkeit und verwendet „kartesische Nocken“, die einen virtuellen Arbeitsbereich abgrenzen, innerhalb dessen sich der Roboter je nach Definition bewegen darf oder nicht. Weitere Informationen zur Funktionsweise und Verwendung des Roboterassistenzsystems sind seitens der Firma Reis Robotics nicht öffentlich zugänglich gemacht.



Abbildung 9: Roboterassistenzsystem im Einsatz bei der Europipe GmbH [Som07]

Projekt: RAAS

An der Züricher Hochschule für angewandte Wissenschaft ist in der Vergangenheit eine Roboterassistenz zur Unterstützung in Schweißprozessen insbesondere für KMU entwickelt worden. Hierbei wurde in erster Linie das Heranführen der Bauteile zum manuellen Heften der Bauteile durch die Verwendung eines sicher gesteuerten und mit einem Joystick ausgestatteten Roboters unterstützt, wobei geteachte Bewegungsabläufe wiederholt werden können. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Anwendung mit nur einem Handhabungsroboter, das zweite zu verschweißende Bauteil ist zuvor auf einem Werkstisch zu positionieren. Der Roboter unterstützt den Werker lediglich im Bereich der Handhabung, ergonomische Betrachtungen oder die Integration von Sicherheitstechnik für den direkten kollaborierenden Betrieb in einem gemeinsamen Arbeitsraum sind nur ansatzweise betrachtet worden.

Das Projekt „Robot Assisted Assembly System“ [Hüp06] ist eine Entwicklung des Instituts für mechatronische Systeme der Züricher Hochschule Winterthur (Schweiz) aus dem Jahr 2006. Das Projekt umfasst die Realisierung eines Robotersystems zur Unterstützung des Mitarbeiters bei manuellen Schweißprozessen [Hüp06]. Der Roboter assistiert dem Schweißer bei manuellen Heftprozessen, wobei er in der Lage ist, die zu heftenden Bauteile submillimetergenau zu positionieren (Abbildung 10). Die Entwicklung des Roboterassistenzsystems verwirklicht drei wesentliche Aspekte [Hüp06]:

- einfache und problembezogene Programmierung
- sichere Robotersteuerung

- effektive Sensorunterstützung

Die Bedienung des Roboters erfolgt über das so genannte „RAAS-Userinterface“. Dabei benutzt der Mitarbeiter den Roboter in der gleichen Weise, wie er selbst die Bauteile handhaben würde, und teilt dem Roboter die genauen Greif- und Absetzpositionen sowie die Abläufe des Zusammenstellungsprozesses mit. Dabei wird zwischen drei Betriebsmodi unterschieden. Um ein Einzelstück zusammen zu stellen, gibt der Mitarbeiter die Prozessdaten ein, ohne sie speichern zu müssen. Dieser Modus ist für den Fall gedacht, dass kein Bauteil mit gleicher Geometrie wieder bearbeitet wird. Zwei weitere Betriebsmodi werden in der Kleinserienfertigung verwendet. Zunächst muss die Instruktion des ersten Bauteils einer Serie durch den Mitarbeiter erfolgen. Die einzelnen Schritte werden gespeichert. Im dritten Betriebsmodus ist der Roboter in der Lage, die Schritte automatisch im Zyklus zu wiederholen. Die Bedienung des Roboters mit Hilfe des RAAS-Userinterface erfordert gewisse Grundkenntnisse in dem Bereich der Robotik. Entscheidungen, wie etwa die Auswahl einer achsspezifischen oder kartesischen Bewegung des Roboters, müssen getätigt werden. Für den manuellen Betrieb ist der Mitarbeiter in der Lage, über einen 6-Achsen-Joystick den Roboter direkt zu steuern. Um es dem Roboter zu ermöglichen, bereits abgelegte Teile oder Baugruppen zu positionieren, wird eine Kopplungssoftware verwendet. Diese Software wurde speziell für das Roboterassistenzsystem entwickelt und beschreibt die geometrische Lage zwischen den bewegten und den fest stehenden Bauteilen. Vor jeder Ablage eines Bauteils wird dieses für einen späteren Kopplungsvorgang vermessen. Die Messung geschieht über das Lichtschnittverfahren mit Hilfe einer „CCD-Kamera“ (Charge Coupled Device).



Abbildung 10: Der RAAS-Roboter beim Einmessen eines Schweißteils [Hüp06]

Wie das Roboterassistenzsystem PowerMate aus dem Assistor-Projekt fällt das RAAS in die Kategorie 3 der Sicherheitsanforderungen aus der DIN EN ISO 13849-1 für die Sicherheit von Maschinen. Die Sicherheitsanforderungen werden durch die Sicherheitselektronik „Safe-RDW“ (Safe Resolver Digital Wandler) [Hüp06] erfüllt. Der Roboter wird durch zwei voneinander unabhängige Rechneinheiten kontinuierlich bezüglich seiner aktuellen Position, Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit überwacht. Im kartesischen Raum lassen sich Maximal- und Minimalpositionen definieren, in denen der Roboter sich entweder niemals aufhalten, oder die er niemals verlassen darf. Wird eine Position, bzw. ein Grenzwert überschritten, oder weichen die zwei Resultate der beiden Rechnersysteme voneinander ab, wird sofort ein Notaus ausgelöst. Die Sicherheit beim Greifen wird durch die Anwendung unterschiedlicher Greifertypen erreicht. Je nach Beschaffenheit, Gestalt und Gewicht der zu greifenden Bauteile werden Vakuumgreifer oder Magnetgreifer verwendet. Im Rahmen der Testphase des RAAS haben sich nach Hüppi et al. kritische Faktoren herausgestellt, die eine erfolgreiche Realisierung des RAAS außerhalb der Testphase behindern. Der ursprüngliche Betrieb des RAAS mit zwei Sensoren zur Vermessung der Bauteile wurde im Laufe des Projektes aus Kostengründen auf einen Sensor beschränkt. Ange-dacht waren ein fixer Sensor, angebracht am Arbeitstisch und ein mobiler Sensor am Greifarm des Roboters. Von diesen zwei Sensoren ist der fixe Sensor realisiert, was zu einem erschwerten Kopplungsvorgang führt. Zwei Sensoren sind in der Lage, zwei zu koppelnde Teile direkt an der Kopplungsstelle auszumessen. Bei der Verwendung eines Sensors ist der Kopplungsvorgang in mehrere Etappen aufgeteilt. Der Bediener muss sich, wenn er ein Bauteil ablegt, Gedanken machen, woran das nächste Bauteil gekoppelt werden und an welchen Stellen das zu koppelnde Bauteil vorher ausgemessen werden muss. Diese Vorgänge sind so kompliziert, dass die Schweißfachperson nicht in der Lage, ist diese Schritte ohne Hilfe auszuführen. Das Gesamtkonzept des RAAS rentiert sich nach Hüppi et al. dann, wenn der Mitarbeiter das System ohne zusätzliche Hilfe und ohne tiefergehende Fachkenntnisse effizient bedienen kann [Hüp06]. Der finale Entwicklungsstand des RAAS-Projekts hat diese Bedingung nicht vollständig erfüllt. Dadurch ist das Roboterassistenzsystem nicht in den täglichen praktischen Einsatz integriert worden.

III. Eingehende Darstellung

III.1 Wissenschaftlich - technische Ergebnisse

Analyse derzeitiger Fertigungskonzepte bei den Anwendungspartnern

Um einen Überblick über die relevanten Produktionsbereiche und Organisationsstrukturen zu bekommen wurden nach Projektstart zunächst Prozessaufnahmen bei den beteiligten Industriepartnern MAN Diesel & Turbo SE und Böcker Maschinenwerke GmbH vorgenommen. Ziel dieser Prozessaufnahmen war es, die derzeitigen Fertigungskonzepte der Anwendungspartner zu analysieren und aufzubereiten, um daraus Anforderungen für die Entwicklung eines Roboterassistenzsystems ableiten zu können. Untersucht wurden die derzeit geltenden ergonomischen Bedingungen in den Arbeitssystemen vor Ort, der Arbeitsablauf und die Gestaltung der Schweißarbeitsplätze. Insbesondere wurden die derzeit geltenden ergonomischen Bedingungen in den Arbeitssystemen vor Ort untersucht und analysiert. Durch die Aufnahme der IST-Situation in den Unternehmen wurde sondiert, welche Anwendungsbereiche und Handlungsspielräume für die Implementierung eines Roboterassistenzsystems in Frage kommen und welche Anforderungen an den Demonstratoraufbau zu stellen sind.

MAN Diesel & Turbo SE

Die Firma MAN Diesel & Turbo SE fertigt in ihrem Werk in Oberhausen Gas- und Dampfturbinen in Einzel- oder Kleinserien. Das betrachtete Arbeitssystem beinhaltet die Fertigung der Rohrkonstruktionen für den Turbinenbau. Dieser Prozessschritt wird separat von den übrigen Schritten, wie etwa dem Bau der Kernmaschine, betrachtet.

Arbeitsplanung und -organisation

Das Arbeitssystem ist nach dem Verrichtungsprinzip aufgebaut. Die Arbeitsplätze mit gleicher Verrichtung sind räumlich zusammengeführt. Die Werkstücke durchlaufen dabei die einzelnen Bearbeitungsschritte in einer definierten Reihenfolge. Die durchgeführten Arbeitsschritte lassen sich in drei Verrichtungsschritte aufteilen, das Zuschneiden, die Nahtvorbereitung und das Schweißen der Rohre. Die Reihenfolge der Bearbeitung entspricht der Ablauflogik der Arbeitsschritte. Die eingelagerten Rohre werden auf das Sollmaß zugeschnitten, bevor sie in der Nahtvorbereitung für den anschließenden Schweißprozess vorbereitet werden. Ein Halbzeug, welches durch das Zuschneiden den ersten Bearbeitungsschritt durchläuft, muss zeitlich nicht zwingend den nächsten Bearbeitungsschritt durchlaufen. Die Reihenfolge ist definiert, jedoch nicht der zeitliche Ablauf. Das ist darauf

zurückzuführen, dass die Mitarbeiter, die die Stationen des Zuschneidens und der Nahtvorbereitung besetzen, in der Lage sind, beide Prozessschritte durchzuführen. In der Regel werden die zugeschnittenen Rohre zur Nahtvorbereitung zwischengelagert, wobei kein definiertes Verbrauchsfolgeverfahren eingehalten werden muss. Das Schweißen ist von den übrigen Prozessen getrennt und wird von einem entsprechend qualifizierten Mitarbeiter durchgeführt. Nach beendetem Schweißprozess durchlaufen alle Rohrkonstruktionen eine Qualitätskontrolle in Form eines Röntgen-Verfahrens, bevor sie anschließend das Arbeitssystem zur Montage an die Endbaugruppe verlassen.

Arbeitsverteilung und -aufgabe

Das Zuschneiden der Rohre, die Nahtvorbereitung und das Heften der einzelnen Rohrkomponenten werden von den Betriebsschlossern durchgeführt. Die Rohre werden auftragsbezogen an den Sägemaschinen vom Lager angeliefert. Durch die zugehörige technische Zeichnung ordnet der Mitarbeiter dem Rohmaterial die geforderten Längen bzw. Maße zu. Er stellt das geforderte Maß mithilfe des Anschlags oder eines Zollstocks an der Sägemaschine ein, positioniert das Rohr und schneidet es zu. Anschließend werden die einzelnen Segmente an der Drehmaschine mit einer 45° Fase zur Nahtvorbereitung versehen. Für die Nahtvorbereitung werden die Rohre vom Mitarbeiter im Schraubstock eingespannt. Abhängig von der technischen Zeichnung der Baugruppe werden die zwei bearbeiteten Segmente mithilfe einer Wasserwaage, einem Winkelmesser oder einer Spann-/Stützvorrichtung zueinander ausgerichtet und mit Distanzstücken in einem Abstand von 3 mm zueinander positioniert, um sie miteinander verbinden zu können. In einzelnen Fällen müssen die Segmente mit dem Winkelschleifer nachbearbeitet werden, um die Rohre korrekt ausrichten und später heften zu können. Nach der Ausrichtung wird die Rohrverbindung mit dem WIG-Schweißverfahren an mindestens vier Stellen geheftet. Der Mitarbeiter entscheidet nach eigenem Ermessen in Abhängigkeit von der jeweiligen Rohrgeometrie, wie viele Heftstellen zusätzlich benötigt werden (Abbildung 11). Das Schweißen ist vom Zuschneiden und der Nahtvorbereitung getrennt, da die Schweißer allein die Schweißaufgabe übernehmen, um eine hohe Nahtqualität gewährleisten zu können. Eine kleine Rohrgeometrie (geringes Gewicht) wird auf der Werkbank im Schraubstock und eine große Rohrgeometrie (nicht handhabbar) in einen Drehtisch eingespannt. Die schweren Rohrdurchmesser werden zusätzlich mit einer Stützvorrichtung gehalten. Das Rohrsystem wird kontinuierlich mit Inertgas geflutet. Die offenen Schweißstellen werden bis zur aktuellen Fügestelle in Gasflussrichtung abgeklebt. Vor dem Schweißen wird die Fügestelle mit einer Drahtbürste gereinigt, um die Oxidschicht zu entfernen. Mit einem Brenner wird das

Material vorgeheizt, sofern die Rohrenden nicht durch benachbarte Schweißstellen bereits vorgewärmt wurden. Aus den technischen Zeichnungen bekommt der Schweißer Informationen darüber, welches Schweißverfahren und welches Füllmaterial verwendet werden soll. Das WIG-Schweißen (Wolfram-Inertgas) wird immer für die Wurzelnaht und bei vormontierten Rohren für alle Nähte verwendet. Das MAG-Schweißen (Metall-Aktivgas) wird beim Schweißen am Drehtisch für die Füll- und Decklage eingesetzt. Dabei ist eine Absaugung erforderlich. Der Schweißer beginnt mit dem Auftrennen der ersten von mindestens vier Heftstellen mithilfe eines Winkelschleifers. Ist der Abstand der Bauteile geringer als die der Schweißdrahtstärke, wird der Abstand durch das Abschleifen von Material angepasst. Danach wird die Wurzellage zwischen zwei benachbarten Heftstellen gesetzt und die Naht optisch geprüft. Ist die Naht nicht in Ordnung, wird sie aufgetrennt und eine neue gesetzt. Die Vorgänge Auftrennen, Schweißen und Prüfen wiederholen sich über den gesamten Umfang des Rohres. Nach Fertigstellung der Wurzellage wird die Fülllage geschweißt. Diese wird partiell unter Verwendung eines Schraubstocks oder in einem Durchgang mithilfe des Drehtisches vollendet. Die Decklage wird nach derselben Arbeitsweise gefertigt wie die Fülllage. Die oben beschriebenen Schritte werden bis zur Fertigstellung des Rohres wiederholt. Eine Variante beim Schweißen ergibt sich dadurch, dass die Rohrsegmente nicht einzeln eingespannt, sondern mehrere Segmente in einer Rahmkonstruktion befestigt werden. Der Mitarbeiter verfährt hier, wie oben beschrieben, wobei die Erreichbarkeit der Schweißstellen stark eingeschränkt ist. Dadurch ist er gezwungen, Hilfsmittel, wie z. B. eine Trittleiter, zu verwenden. Abschließend wird jede Nahtstelle mit Schlagzahlen markiert und geröntgt. Sollte eine Schweißnaht nicht den Qualitätsansprüchen entsprechen, kann die Naht einem Schweißer zugeordnet werden, damit dieser die fehlerhafte Stelle korrigieren kann.



Abbildung 11: Geheftete Rohrkonstruktionen [MAN]

Arbeitsplatzgestaltung

Der prinzipielle Aufbau des Arbeitssystems ist in Abbildung 12 dargestellt. Der Arbeitsplatz der Schlosser geht über den Bereich der Werkbänke hinaus und schließt eine Drehbank und zwei Sägemaschinen mit ein. An diesen Maschinen erfolgen die ersten Bearbeitungsschritte, das Zuschneiden und das Anfasen, bevor die Rohrsegmente an den Werkbänken weiterbearbeitet werden. An jeder Werkbank sind auf Augenhöhe die technischen bzw. isometrischen Zeichnungen der aktuellen Baugruppe befestigt. Zur Ausrichtung der einzelnen Zuschnitte ist auf der Werkbank ein Schraubstock befestigt. Eine Wasserwaage, ein Maßstab und ein Winkelmesser liegen griffbereit daneben. Für den Fall, dass größere Segmente bearbeitet werden, steht neben der Werkbank eine Spann- und Stützvorrichtung. Um die Rohre entgraten bzw. anfasen zu können, befindet sich auf dem Arbeitstisch ein Winkelschleifer. Mithilfe des am Arbeitsplatz bereit stehenden WIG-Schweißgerätes, den zugehörigen Schweißdrähten und Distanzstücken werden die Rohre geheftet. Für das Schweißen und Trennschleifen hängt neben der Werkbank die persönliche Schutzausrüstung (Schutzbrille, Schweißschild, etc.).

Die Schweißzellen sind abgetrennt durch einen rundum Blendschutzvorhang. In den einzelnen Zellen befinden sich eine Werkbank, ein Drehtisch, ein Hocker und die Inertgaszuführung. Die Ausrüstung der Werkbank ist identisch mit der des Schlossers, besitzt aber zusätzlich noch ein WIG, MAG- und MIG-Schweißgerät, einen Schweißhelm und Schlagzahlen. Anstatt der technischen Zeichnungen hängt an der Werkbank die Schweißzeichnung des aktuellen Bauteils. Um schwere oder unhandliche Rohrsegmente zu schweißen wird das Bauteil auf dem Drehtisch eingespannt und mit einer Stützvorrichtung fixiert. Zur Abdichtung der Rohre liegen im Regal neben der Werkbank Gummidichtungen in verschiedenen Durchmessern, über die von einer Seite die Zuführung des Inertgases erfolgt. Die andere Seite ist vollständig verschlossen. Zur Abdichtung der Heftstellen dient ein spezielles Klebeband. Die Absaugung erfolgt über eine von der Decke herabhängend Absaugglocke. Die Bedienung des Drehtisches erfolgt über eine Pedalsteuerung. Diese ermöglicht es dem Schweißer, die Rohre mit den Fußpedalen zu drehen, um durchgehende Nähte zu schweißen. An beiden Arbeitsplätzen ist passend zu den jeweiligen Bauteilen ein Laufzettel vorhanden. Der vorhandene Deckenkran bietet die Möglichkeit, schwere und sperrige Bauteile innerhalb beider Arbeitsbereiche zu transportieren.

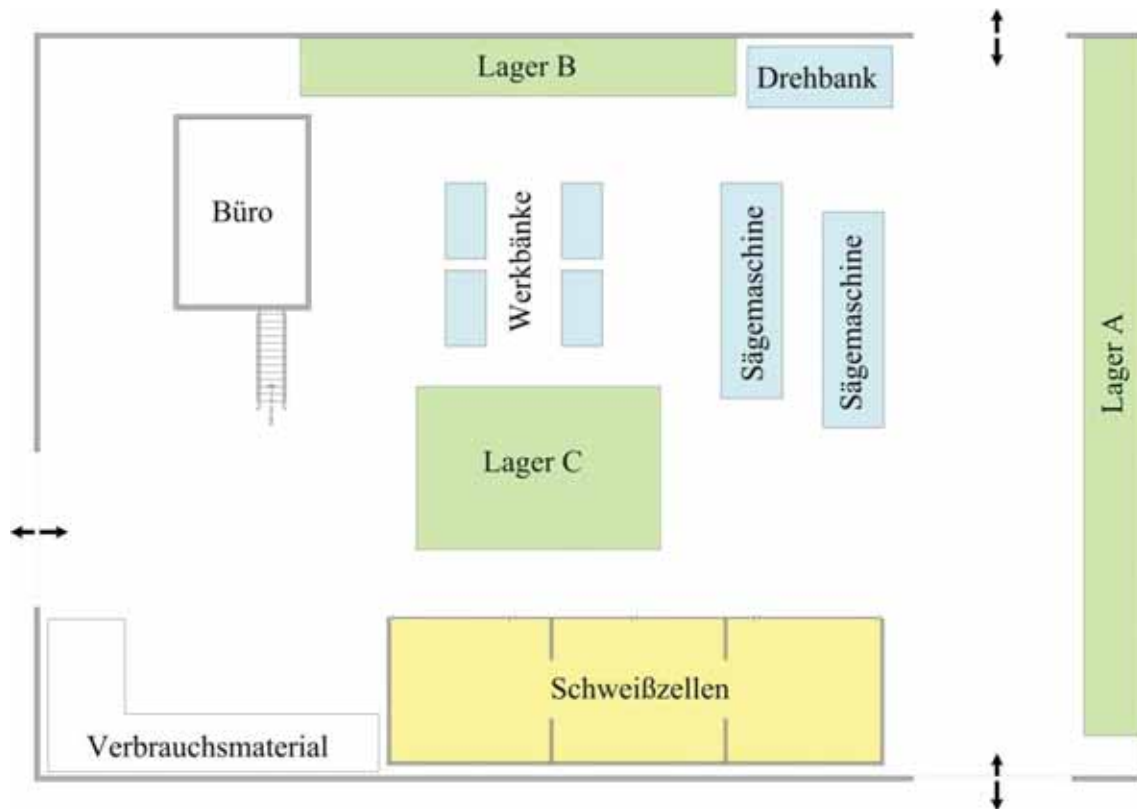


Abbildung 12: Layoutskizze des betrachteten Arbeitssystems bei der MAN Diesel & Turbo SE



Abbildung 13: Schweißarbeitsplatz bei der MAN Diesel & Turbo SE [MAN]

Materialbereitstellung und –bedarf

Durch den Fertigungscharakter der Einzel- und Kleinserie bei der MAN Diesel & Turbo SE wird die Produktionssteuerung auftragsbezogen durch die einzelnen Abteilungen, in Absprache mit dem Vertrieb und den übrigen Fertigungsabteilungen, selbst durchgeführt. Die

Rohrkonstruktionen werden durch die losweise Fertigung zu Baugruppen zusammengeführt, die jeweils einer Bedarfs- und Terminplanung unterliegen. Die Steuerung innerhalb der Baugruppen, bzw. wann welches Bauteil bearbeitet wird, ist nicht regelgebunden. Die benötigten Baugruppen müssen in korrekter Ausprägung, zur richtigen Zeit und am richtigen Ort bereitgestellt werden. Die Halbzeuge (Rohre) werden jeweils auftragspezifisch über Zulieferfirmen bestellt und für den Zuschnitt im Lager A bereitgestellt (Abbildung 12). Je nach Arbeitsverteilung werden die Rohre zugeschnitten und direkt weiterverarbeitet, oder nach dem Zuschnitt für die Nahtvorbereitung in Kisten in den Regalen an der Hallenwand (Lager B) zwischengelagert. Der Transport in und aus dem Zwischenlager erfolgt mithilfe eines Gabelhubwagens. Verbrauchsmaterial wie der Schweißdraht wird in Schränken in Arbeitsplatznähe gelagert. Durch die zeitliche und örtliche Trennung des Schweißens von den übrigen Prozessen befindet sich vor den Arbeitsplätzen ein schweißbaugruppenbezogenes bzw. produktbezogenes Lager auf der Hallenfläche vor den Schweißzellen (Lager C). Die größeren Bauteile werden mit Hilfe eines Lastkrans von der Hallenfläche in die Schweißzellen transportiert. Die fertig geschweißten Rohrkonstruktionen werden an allen Schweißstellen geröntgt und zur Endmontage abtransportiert. Eine Lagerung erfolgt nicht im betrachteten Arbeitssystem.

Böcker Maschinenwerke GmbH

Die Böcker Maschinenwerke GmbH fertigt in ihrem Werk in Werne Auto-/Anhängerkräne, Möbel-/Bauaufzüge und Industrie-/Personen- und Lastenlifte. Speziell die Herstellung der Kräne erfolgt in Einzel- und Kleinserienfertigung. Das in dieser Arbeit betrachtete Arbeitssystem beschäftigt sich mit der Schweißkonstruktion des Seitenteilaufbaus für die Auto- bzw. Anhängerkräne. Die Betrachtung dieses Prozessschrittes erfolgt unabhängig von vorangegangenen oder nachfolgenden Prozessen, wie der Materialanlieferung oder dem Zusammenbau der Kräne. In dem betrachteten Arbeitssystem wird im 2-Schicht-Betrieb gearbeitet und ein Mitarbeiter ist für die Fertigung der Rahmenkonstruktion verantwortlich. Die Bearbeitung der Bauteile erfolgt losweise.

Arbeitsplanung und -organisation

Die Produktion ist wie bei der MAN Diesel & Turbo SE nach dem Verrichtungsprinzip aufgebaut. Mehrere Schweißarbeitsplätze sind räumlich zusammengefasst in der Produktionshalle angeordnet. Die Maschinen zum Sägen und Fräsen der Halbzeuge befinden sich ebenfalls in derselben Produktionshalle. In dem betrachteten Arbeitssystem werden die zu

schweißenden Bauteile vorher spanend bearbeitet. Die Reihenfolge der Prozesse ist in Abbildung 14 dargestellt:



Abbildung 14: Prozesskette zur Fertigung von Rahmenkonstruktionen bei der Böcker Maschinenwerke GmbH

Die vorbereiteten Profile werden in das Arbeitssystem eingegeben. Die Aufgabe der Mitarbeiter an dieser Arbeitsstation ist das Schweißen der Rahmenkonstruktion. Nachdem der Mitarbeiter die Baugruppe zusammengeschweißt hat, verlässt diese das Arbeitssystem zur weiteren Bearbeitung. Diese folgenden Arbeitsschritte werden bei der Beschreibung und Analyse des Arbeitssystems nicht weiter berücksichtigt.

Arbeitsverteilung und –aufgabe

Bei der Arbeitsweise des beschriebenen Prozesses existiert keine standardisierte Ablauffolge. Der Schweißer entscheidet selbst, abhängig von der Erreichbarkeit, welche Verbindungen er in welcher Reihenfolge schweißt. Dabei kann die Ablauffolge bei verschiedenen Schweißern variieren. Im Folgenden wird exemplarisch eine mögliche Variante vorgestellt und in seinen Einzelheiten beschrieben.

Der Schweißer beginnt, indem er sich aus drei bereitgestellten Lagern (Paletten) jeweils ein Vierkanthohlprofil mithilfe eines Lastkrans auf seiner Arbeitsfläche positioniert. Zusammen bilden die Bauteile die dreieckige Grundkonstruktion (Abbildung 15). Auf der Werkbank werden die Profile, je nach Erforderlichkeit, mithilfe eines Trenn-/Winkelschleifers entgratet. Daraufhin befestigt der Mitarbeiter Anschläge an der Werkbank und richtet die drei Bauteile daran und untereinander aus. Mit insgesamt sechs Schraubzwingen fixiert er die Position der einzelnen Profile und beginnt mit einem Hammer, die Teile feinauszurichten. Nachdem die drei Bauteile ausgerichtet und fixiert sind, beginnt der Mitarbeiter mit dem MAG-Schweißverfahren die drei Verbindungsstellen zu

heften (jeweils drei Heftstellen pro Verbindung). Dann löst er die Schraubzwingen und positioniert per Hand das innere Verbindungsprofil. Das Versteifungsblech wird mithilfe des Lastkrans kurzfristig auf der Rahmenkonstruktion positioniert, um die Positionsübereinstimmung des inneren Verbindungsprofils zu gewährleisten. Anschließend wird es wieder auf die Materialbereitstellung abgelegt. Falls erforderlich, wird das innere Verbindungsprofil an der Werkbank mit dem Trennschleifer nachgearbeitet und an die Rahmenkonstruktion angepasst. Ansonsten wird das innere Profil direkt an vier Stelle geheftet und die Anschläge entfernt. An zwei der drei äußeren Rahmenprofile werden an den Profilöffnungen Deckel mit jeweils vier Heftstellen befestigt. Je nach Zustand der vorherigen Bearbeitung müssen die Öffnungen vorher entgratet werden. Nach dem Heften wird die Oberseite der gesamten Konstruktion mit einer Emulsion eingesprüht. Alle zugänglichen Profilverbindungsstellen (obere Seite jeder Eckverbindung, obere Seite des inneren Verbindungsprofils und die obere Kante der Deckel) werden verschweißt. Anschließend wird die Rahmenkonstruktion mit dem Lastkran in eine aufrechte Position gebracht, um die Rückseite erreichen zu können. Die zugänglichen Profilverbindungsstellen (vier Verbindungsstellen an der Innenseite der Profile) werden geschweißt und vorhandene Schweißspritzer mithilfe einer Feile von den Bauteilen entfernt. Daraufhin wird das Bauteil wieder mit dem Lastkran abgelegt und die Emulsion aufgesprüht. Die zugänglichen Profilverbindungen werden von der rechten Seite (obere Seite jeder Eckverbindung, obere Seiten des inneren Verbindungsprofils und die Kanten der Deckel) verschweißt. Sobald die Rahmenkonstruktion komplett miteinander verbunden wurde, wird das Blech mithilfe des Krans nochmals auf die Baugruppe gelegt. Mit einem Zentrierbolzen (Stahlzylinder), einem Zollstock und einem Hammer wird das Blech auf der Rahmenkonstruktion in seine Soll-Position ausgerichtet. Der Zentrierbolzen wird entnommen und das Blech mit dem Schweißgerät an den drei Ecken an die Rahmenkonstruktion geheftet. Mithilfe von bis zu zwei Schraubzwingen wird das Blech an einer Seite fixiert und drei weitere Heftstellen nahe der Schraubzwinge angebracht. Die Schraubzwingen werden je nach Erforderlichkeit ein bis zweimal umgesetzt, und vier weitere Stellen werden geheftet. Dieser Vorgang wird an den beiden anderen Seiten des dreieckigen, gleichschenkligen Blechs wiederholt. Nach Beendigung des Heftens sind die beiden kurzen Seiten des Blechs mit zehn bis zwölf Heftstellen und die lange Seite mit sechzehn Heftstellen zu versehen. Insgesamt wird der Umfang des Blechs an ca. 40 Stellen geheftet. Daraufhin wird die Baugruppe abermals mithilfe des Krans aufrecht auf die Arbeitsfläche gestellt. Die zugänglichen Profilverbindungsstellen und die Profil-Blechverbindungen werden geschweißt. Dabei werden erst vier Stellen an der Innenseite der Profile miteinander verbunden und danach ca. 10 cm lange Schweißverbindungen

mit der Blechrückseite an vier Stellen in den Eckbereichen angebracht. Anschließend wird die Rahmenkonstruktion mit der Innenseite nach oben auf der Arbeitsplatte abgelegt. Auf der Innenseite wird die Emulsion aufgesprüht und in die Ecken werden die letzten ca. 10 cm langen Schweißnähte gesetzt. Nach Fertigstellung der letzten Schweißnähte wird das fertig bearbeitete Bauteil mit Hilfe des Lastkrans aufgerichtet, vom Arbeitsbereich zum Fertiglager transportiert und dort abgelegt. Die fertigen Rahmenkonstruktionen werden losweise von einem Gabelstapler zum nächsten Bearbeitungsprozess transportiert.



Abbildung 15: Analyzierte Baugruppe bei der Böcker Maschinenwerke GmbH [Böcker]

Arbeitsplatzgestaltung

Der prinzipielle Aufbau des Arbeitssystems ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Hauptarbeitsfläche der Schweißer ist ein robuster Schweißstisch (aus Stahl) mit eingelassenen Löchern für die Fixierung der Bauteile mit Schraubzwingen. Die Lager für die Vierkanthohlprofile sind nahe dem Schweißstisch angeordnet, wobei die schwereren und unhandlicheren Bauteile näher am Arbeitsplatz liegen. Die Lager für die Profile der langen Seite des Rahmens, das dreieckige Blech und die Fertigteile befinden sich neben der Arbeitsplatte (Lager Blech, Fertigteil und C). Dadurch ist der Transportweg mithilfe des Lastkrans relativ gering. Die Lager der zwei kurzen Seiten der Rahmenkonstruktion sind etwas weiter entfernt, aber problemlos mit dem Kran zu bedienen. Das Lager des inneren Verbindungsprofils ist vergleichsweise am weitesten entfernt, da die Bauteile durch das geringere Gewicht vom Mitarbeiter ohne Hilfsmittel zum Arbeitsplatz gebracht werden können. Neben der Arbeitsplatte befindet sich das MAG-Schweißgerät mit der persönlichen Schutzausrüstung des Mitarbeiters (z. B. Schutzmaske, Schweißhelm und Schweißschürze). Ebenso ist eine Feile vorhanden, um nach dem Schweißen die Schweißspritzer von den bearbeiteten Bauteilen zu entfernen. Über der Arbeitsplatte befindet sich eine Absaugglocke. Neben

dem Schweißarbeitsplatz steht eine Werkbank, auf der zusätzlich benötigte Hilfsmittel bereit liegen. Zu diesen Hilfsmitteln zählen zwei Winkelschleifer für das eventuell erforderliche entgraten der Bauteile, Schraubzwingen in verschiedenen Größen für die Variantenfertigung, eine Kneifzange, verschiedene Meißel und ein Zentrierbolzen (Stahlzylinder), um die einzelnen Bauelemente zueinander ausrichten zu können. Hinter der Werkbank hängt eine Tafel, an der die technischen Zeichnungen bzw. die Schweißzeichnungen für die aktuelle Baugruppe befestigt werden. Unterhalb der Tafel befinden sich ein Emulsions-sprayer zur Vorbereitung der Schweißnähte und eine Luftdruckpistole zur Beseitigung von Verunreinigungen. An der Wand hinter den zwei Lagern A und B stehen eine Säulenbohrmaschine und eine Doppelschleifmaschine. Diese sind für die gelegentlich auftretende Nachbearbeitung geeignet. In der gegenüberliegenden Ecke des Schweißarbeitsplatzes steht eine zweite Werkbank. An dieser Werkbank liegen ein Winkelschleifer mit Schleifscheiben und ein Stabschrauber bereit um Bauteile eventuell nachbearbeiten zu können. Außerhalb dieses beschriebenen Schweißarbeitsplatzes befindet sich der Lastkran. Er ist hinter der Wand nahe dem Schweißtisch angebracht. Die Reichweite des Krans deckt durch seine Ausmaße (Aktionsradius) alle Bauteile ab, die manuell nicht transportiert werden können. Zusätzlich bietet die Produktionshalle durch einen Deckenkran die Möglichkeit, ganze Paletten bzw. Bauteile innerhalb der Halle von A nach B zu transportieren.

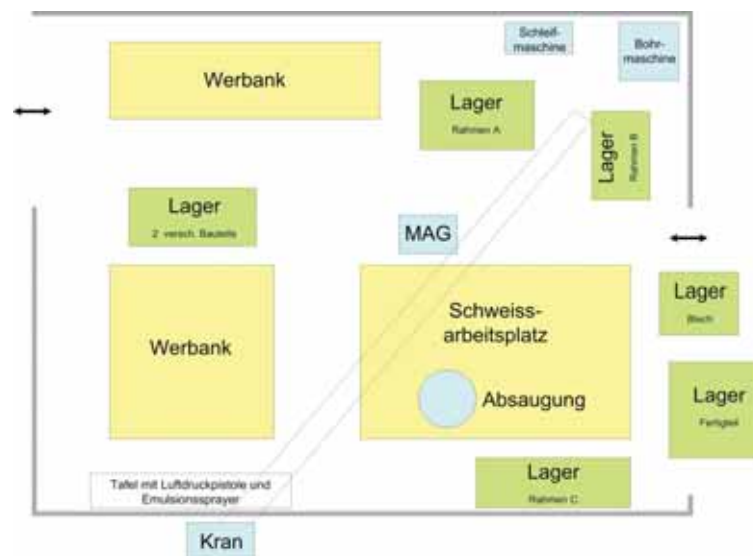


Abbildung 16: Layoutskizze des betrachteten Arbeitssystems bei der Böcker Maschinenwerke GmbH



Abbildung 17: Schweißarbeitsplatz bei der Böcker Maschinenwerke GmbH [Böcker]

Materialbereitstellung und -bedarf

Bei der Firma Böcker Maschinenwerke GmbH wird wie bei der Firma MAN Diesel & Turbo SE, aufgrund des Fertigungscharakters der Einzel- bzw. Kleinserienfertigung, die Produktionssteuerung auftragsbezogen durch die einzelnen Abteilungen selbst durchgeführt. Mit Hilfe des Deckenkrans, von Gabelstaplern oder Gabelhubwagen werden die benötigten Bauteile von den vorgelagerten Arbeitsstationen an den Schweißarbeitsplatz gebracht. Dort werden sie, abhängig vom Gewicht und der Handhabbarkeit, um die Arbeitsplatte bereitgestellt. Die an dieser Arbeitsstation gefertigten Teile werden auf dieselbe Weise zur nächsten Arbeitsstation bzw. zur Montage transportiert. Verbrauchsmaterialien wie die Schleifscheiben für die Winkelschleifer werden auf der Werkbank gelagert.

Analyse der ergonomischen Bedingungen in den betrachteten Arbeitssystemen

Die Prozessaufnahmen bei der MAN Diesel & Turbo SE in Oberhausen untersuchten die Schweiß Tätigkeiten an einer vorgehefteten und vormontierten Referenzbaugruppe (Abbildung 20). Die Arbeiten (Abbildung 18) werden nach dem Verrichtungsprinzip in abgetrennten Schweißzellen von einer Schweißfachkraft durchgeführt.



Abbildung 18: Schweißen einer Baugruppe [MAN]

Die Prozessaufnahmen bei der Böcker Maschinenwerke GmbH untersuchen die Schweiß Tätigkeiten an einem ausgewählten repräsentativen Referenzbauteil (Abbildung 20). Die Arbeiten (Abbildung 19) werden auch hier nach dem Verrichtungsprinzip in abgetrennten Schweißzellen von einer Schweißfachkraft durchgeführt.



Abbildung 19: Schweißen einer Baugruppe [Böcker]

Während des gesamten Schweißprozesses müssen die Mitarbeiter in den betrachteten Prozessen je nach Position der Fugestelle unterschiedliche Positionen einnehmen. Durch das hohe Gewicht der Baugruppen können diese nicht bewegt und positioniert werden, so dass der Mitarbeiter gezwungen ist, seine Position anzupassen. Durch die dem Schweiß-

prozess inhärente Verweildauer in einer Position und die notwendige hohe Konzentration, die zum Erreichen einer hohen Schweißnahtqualität erforderlich ist, belastet der Prozess den Mitarbeiter merklich und erfordert regelmäßige Erholungsphasen. Beobachtet wurde ein breites Spektrum von Körperhaltungen: von gestreckter Überkopfarbeit über eine gebeugte Arbeitshaltung bis hin zu Arbeiten in kniender Position. Je nach Position und Geometrie der Baugruppe muss der Mitarbeiter seine Haltung anpassen, um die Fügestelle zu erreichen.

Die Anwendbarkeit im industriellen Umfeld spielt in der nachfolgenden Konzeptphase zum Aufbau eines Demonstrators für die robotergestützte Schweißassistenz eine wesentliche Rolle. Daher wurden ergänzend zu den typischen Arbeitsabläufen die bestehenden Fertigungslayouts und Umgebungsbedingungen bei den Anwendungspartner erfasst, um das typische Arbeitsumfeld für das angestrebte Roboterassistenzsystem bereits beim Demonstratoraufbau zu berücksichtigen. Die ausgewählten und analysierten Referenzbaugruppen aus dem Produktspektrum der Anwendungspartner werden später ebenfalls zur Erprobung des Demonstrators eingesetzt. Die spätere Entwicklung des Assistenzsystems basiert auf diesen Referenzbauteile, um die Komplexität der Entwicklungsschritte einzugrenzen. Mit dem Aufbau eines lauffähigen Demonstrators für diese gezeigten Referenzbauteile werden die Grundlagen für eine spätere Erweiterung auf andere Teile des Produktspektrums geschaffen.



Abbildung 20: Ausgewählte Referenzbaugruppe; [Böcker] (l) / [MAN] (r)

Methode der ergonomischen Bewertung

Für die ergonomische Bewertung der Arbeitssysteme wurden Bewertungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für den konkreten Anwendungsfall untersucht und ein geeignetes Verfahren für die Anwendung in den bestehenden Arbeitssystemen vor Ort ausgewählt. Grundlegende Anforderung an die Bewertungsverfahren ist, dass sie zur Analyse der er-

gonomischen Bedingungen bei den Anwendungspartnern geeignet sind und mit angemessenem Aufwand und zielgerichtet durchgeführt werden können. Innerhalb der Analysephase wurden das Automotive Assembly Worksheet (AAWS) sowie die ISO 11226 genutzt, um die arbeitssystemtechnischen Gegebenheiten vor Ort zielgerichtet hinsichtlich der Ergonomie zu untersuchen und Defizite aufzuzeigen.

Die Darstellung der Prozessabläufe in der Rohr- und Rahmenfertigung erfolgt für die ergonomische Bewertung auf Basis den durchgeführten Prozessaufnahmen. Die Ergebnisse fließen abschließend in die Entwicklung des roboterassistierten Fertigungskonzeptes ein.

Die Fertigung der Rohr- und Rahmenkonstruktionen ist bei den Anwendungspartner überwiegend durch manuelle Arbeitsplätze mit geringem Mechanisierungsgrad geprägt. Die Folge ist eine zu erwartende hohe Belastung der Mitarbeiter durch hohe Bauteilgewichte und ungünstige Arbeitspositionen. Im Anwendungsfeld der Rohr- und Rahmenfertigung resultieren insbesondere aus dem Schweißprozess und den damit verbundenen Positioniervorgängen heraus Belastungen auf den Mitarbeiter durch unterschiedliche Formen von statischer Halte- und Haltungsarbeit. Um Aussagen über das Ausmaß dieser Belastungen in den Arbeitssystemen bei den Anwendungspartner treffen zu können, wurden mit Hilfe des Automotiv Assembly Worksheet und der ISO 11226 ergonomische Arbeitsplatzanalysen in der Rohrvorfertigung der MAN Diesel & Turbo SE und der Rahmenfertigung bei der Böcker Maschinenwerke GmbH durchgeführt und ausgewertet.

Mit einer ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen werden in der industriellen Produktion für die Mitarbeiter die Voraussetzungen geschaffen, belastungsreduziert, effizient und qualitätssicher zu arbeiten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Vermeidung ungünstiger körperlicher Belastungen infolge von Zwangshaltungen oder aufzubringenden Kräften, die zu Überlastungen und damit zu einer Gesundheitsgefährdung führen können. Gleichzeitig lassen sich durch ergonomisch gestaltete Arbeitsplätze nicht wertschöpfende Arbeitssituationen vermeiden, indem beispielsweise Bewegungsabläufe vereinfacht und eine gute Zugänglichkeit und Einsehbarkeit der Arbeitsstellen sichergestellt werden [Leh03]. Diese Prämissen gelten gleichermaßen für die Um- oder Neugestaltung manueller Arbeitsplätze als auch für den im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebten Aufbau eines Demonstrators zur roboterbasierten Schweißaufgabenassistenz. Dazu bedarf es einer systematischen und strukturierten Analyse und Bewertung der derzeitigen Arbeitssysteme bei den Anwendungspartnern MAN Diesel & Turbo SE und Böcker Maschinenwerke GmbH hinsichtlich relevanter ergonomischer Kriterien. Wie bereits angesprochen existieren verschiedene Bewertungsmethoden, die sich weitestgehend in der

Industrie durchgesetzt haben. Die Methoden reichen von schnellen „Screening“-Verfahren bis hin zur kontinuierlichen Messung. Hinzu kommen Kombinationsverfahren wie das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS) [Sch04] und dessen Vorgänger. Diese fassen die Körperhaltungen und -bewegungen mit geringem Kraftaufwand bzw. Lastgewicht, das Handhaben von Lasten sowie das Ausüben von Aktionskräften zu einer summarischen Bewertung zusammen.

Für die Bewertung der Schweißarbeitsplätze wurde das AAWS (Abbildung 21) als verbreitetes, praxisnahes Verfahren unter Berücksichtigung der Aspekte Durchführbarkeit, Aufwand und Nutzen unter verschiedenen Verfahren ausgewählt und durch eine Bewertung nach ISO 11226 ergänzt. Andere Verfahren, wie das Verfahren OWAS [Mat93] sind durch ihren Zeitaufnahmecharakter zu zeitintensiv oder wie NIOSH [McC94] relativ rechenaufwendig. Die Leitmerkmalmethode (LMM) [LMM] setzt ihren Analyseschwerpunkt sehr stark auf das Bewegen/Befördern von Lasten, was ebenfalls nicht den konkreten Anwendungsfall, das Schweißen von Rohr- und Rahmenkonstruktionen, widerspiegelt. Andere Verfahrensansätze wie RULA [McA93] oder OCRA [IFA05] sind sehr stark auf die Analyse der Extremitäten ausgerichtet und damit für den beschriebenen Anwendungsfall nicht aussagekräftig genug.

Bewertet wurden die Schweißarbeitsplätze mit je einem Mitarbeiter anhand der vorgestellten Referenzprozesses in den beschriebenen Arbeitssystemen.

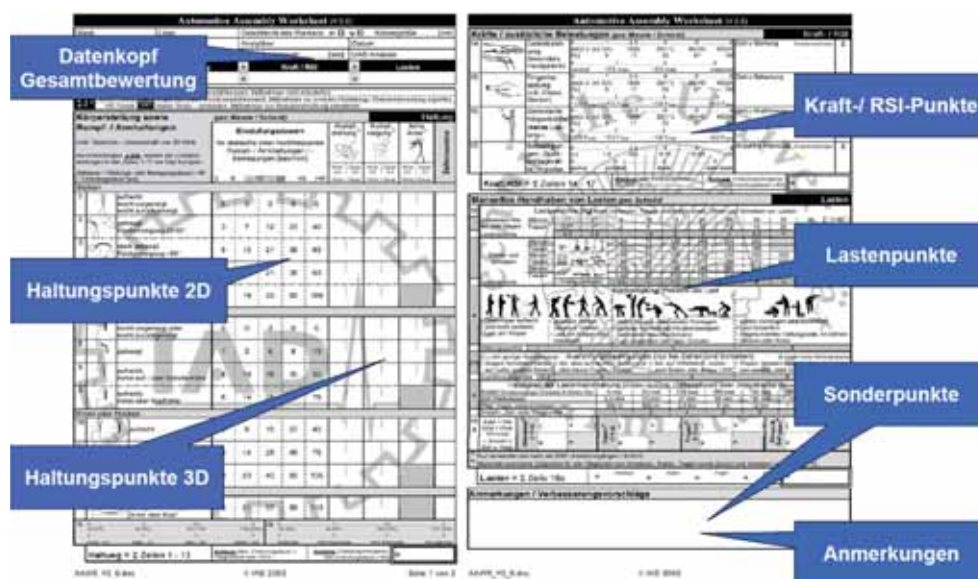


Abbildung 21: AAWS Bewertungsbogen zur ergonomischen Arbeitsplatzanalyse [IAD]

Analyse Böcker Maschinenwerke GmbH

Es werden sieben relevante Arbeitsschritte getrennt voneinander durch die ergonomische Analyse bewertet:

Der **Prozess B.I** beschreibt das Schweißen der zugänglichen Profilstellen von der linken Seite während die Rahmenkonstruktion horizontal auf der Werkbank liegt. Es werden die oberen Seiten jeder Eckverbindung, die oberen Seiten des inneren Verbindungsprofils und die oberen Kanten der Profildeckel geschweißt.

Nach der Bearbeitung der Rahmenkonstruktion von der linken Seite werden im aufgerichteten Zustand alle zugänglichen Profilstellen verschweißt. Dies beinhaltet insgesamt vier Stellen an der Innenseite der Rahmenprofile, bzw. am inneren Verbindungsprofil. Diese Arbeitsschritte sind im **Prozess B.II** zusammengefasst.

Anschließend wird die Rahmenkonstruktion auf der Werkbank abgelegt, so dass die Bearbeitung der zugänglichen Profilstellen von der rechten Seite erfolgen kann (**Prozess B.III**). Die zu schweißenden Stellen entsprechen denen aus dem Prozess B.I.

Die Rahmenkonstruktion verbleibt in Ihrer Position und der Mitarbeiter platziert das Versteifungsblech mit Hilfe eines Lastkrans auf die Rahmenkonstruktion. Ein Stahlzylinder wird zur Zentrierung durch eine Lochung des Bleches und des inneren Verbindungsprofils eingefügt. Anschließend wird die Lage des Blechs zur Rahmenkonstruktion in mehreren Schritten vermessen und ausgerichtet (**Prozess B.IV**).

Wenn das Versteifungsblech in der richtigen Position liegt, wird es an drei Ecken geheftet. Um die Lage des Blechs weiter zu fixieren, wird eine Schraubzwinde an einer Blechseite angebracht und weitere Heftstellen nahe der Schraubzwinde gesetzt. Je nach Länge der Blechseite wird die Schraubzwinde ein- bzw. zweimal umgesetzt. Die kürzeren Blechseiten werden mit 10-12 Heftstellen und die lange Blechseite mit 16 Heftstellen versehen. In Summe ergeben sich für den **Prozess B.V** 41 Heftstellen.

Mit dem angehefteten Blech wird die Rahmenkonstruktion senkrecht aufgerichtet und die letzten 4 Schweißnähte an den zugänglichen Profilverbindungsstellen werden gesetzt. Zusätzlich wird an 4 Stellen eine etwa 10 cm lange Schweißnaht in den Eckbereichen zwischen den Profilkanten und der Blechrückseite gesetzt. Die Arbeitsschritte fasst der **Prozess B.VI** zusammen.

In den letzten Arbeitsschritten (**Prozess B.VII**) werden die restlichen Verbindungsnähte zwischen den Profilkanten und der Blechrückseite in den Eckbereichen gesetzt. Zuvor wird die Rahmenkonstruktion horizontal abgelegt und die Emulsion aufgesprüht.

Viele der Arbeitsschritte aus den Prozessen B.I – B.VII können ohne weitere Bewertung als unkritisch eingestuft werden. Arbeitsschritte wie das Ablegen und Aufrichten der Rahmenkonstruktion geschehen mit Hilfe eines Lastkrans. Die Körperhaltung bei dieser Tätigkeit entspricht einer symmetrischen Oberkörperhaltung ohne Rumpf- oder Kopfneigungen. Die Positionier- und Gehbewegungen sind durch den Mitarbeiter selbst belastungsminimal gesteuert und resultieren nicht aus einer aufgezwungenen Körperhaltung zur Durchführung der Arbeit. Arbeitsschritte wie das Aufsprühen der Emulsion oder das Reinigen der Rahmenkonstruktion mit Luftdruck stellen aufgrund der sehr geringen Ausführungsdauer keinen belastungskritischen Fall dar. Nach der Umrechnung der korrigierten Zeitdauer fallen diese Arbeitsschritte unter eine Ausführungszeit von drei Sekunden, bezogen auf eine Minute. Nach dem AAWS-Verfahren zählen diese Vorgänge nicht zu den statischen Prozessen, bzw. zu den analyserelevanten Prozessen. Eine zusätzliche Analyse mit Hilfe der ISO 11226 ist für diese Arbeitsschritte ebenfalls nicht nötig. Die folgenden Analysen der Prozesse B.I – B.VII beschränken sich auf die analyserelevanten Arbeitsschritte. Dazu zählen das Schweißen, das Heften und das Ausrichten.

Die Analyse des Arbeitsplatzes B zeigt, dass als einzige Tätigkeit das Heften durch das AAWS-Verfahren mit einem niedrigen Risiko bewertet wird und keine gestalterischen Maßnahmen erfordert. Beim Schweißen besteht bei den Prozessen B.I und B.III ein mögliches Risiko. Die Schweißprozesse B.II und B.VI liegen mit einer Punktbewertung von 25 Punkten auf der Grenze zwischen den Bereichen des Abstufungsintervalls „grün“ und „gelb“. Durch die Interpretation der fließenden Übergänge besteht bei dem Prozess B.II und B.VI ein mögliches Risiko. Es sind Maßnahmen zur erneuten Gestaltung empfohlen. Das Ausrichten des Blechs (Prozess B.III) gehört mit einem Punktwert von 31 ebenfalls in diese Kategorie. Als hohes Risiko wird der Schweißprozess B.VII eingestuft, und es sind nach der AAWS-Analyse sofortige Maßnahmen zu treffen. Der kritische Bereich liegt in der Ausübung der manuellen Schweiß- und Hefttätigkeit sowie des Ausrichtens. Die Analyse nach der ISO 11226 zeigt, dass sich die statische Belastung der Rumpfhaltung bei 4 von 7 Prozessen in einem nicht akzeptablen Bereich befindet. Die Prozesse B.II und B.VI erhalten durch die Analyse eine akzeptable Bewertung, welche die Ergebnisse der AAWS Analyse unterstützt und den Prozess B.VI tendenziell in den unkritischen Bereich einstuft. Bei den kritischen Prozessen existiert eine zusätzlich Belastung durch die nicht symmetrische Körperhaltung. Die Prozesse B.I, B.III, B.IV, B.V und B.VII wurden alle aufgrund der nicht symmetrischen Körperhaltung von der ISO 11226 als nicht akzeptabel eingestuft.

Die Bewertungsergebnisse der ISO- und AAWS-Analyse stimmen in ihren Aussagen her überein. Die Körperneigung ist nicht der ausschlaggebende Faktor, der zu der kritischen Be-

wertung des Prozesses führt. Hinzugekommen ist der Aspekt der symmetrischen Oberkörperhaltung. Diesen Aspekt bewerten die beiden Verfahren unterschiedlich. Die AAWS-Analyse vergibt bei Beobachtung einer nicht symmetrischen Körperhaltung Bewertungspunkte in Abhängigkeit von der daraus resultierenden Belastung. Die Analyse nach der ISO 11226 dagegen bewertet einen Prozess immer als nicht empfehlenswert, sobald eine nicht symmetrische Körperhaltung auftritt. Die Höhe der Belastung in Folge dieser unsymmetrischen Körperhaltung geht dabei nicht in die Bewertung ein.

Die Körperhaltung ist bei den Prozessen B.I, B.III und B.IV mit einem Anteil von über 70% die Haltung, die die Bewertung des Prozesses maßgeblich bestimmt. Der Prozess B.VII hingegen wird durch die Belastung in Folge der Rumpfhaltung mit knapp 50% bestimmt. Die ISO 11226 legt einen höheren Wert auf die Gewichtung der Belastung. Durch die fehlende Punktvergabe bei der ISO 11226 bewertet diese das Gefährdungspotential der Körperhaltungen und stuft eine nicht symmetrische Körperhaltung in jedem Fall als nicht empfehlenswert ein. Eine Zusammenfassung der beiden Analyseergebnisse und eine kombinierte Analysebewertung zeigt Abbildung 22:

Prozess	Schweißen	Heften	Ausrichten
B.I	31	-	-
B.II	25	-	-
B.III	31	-	-
B.IV	-	-	30
B.V	-	16	-
B.VI	25		-
B.VII	51	-	-

Schweißen	AAWS	ISO 11226	∑ Bewertung
B.I	31	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich
B.II	25	akzeptabel	keine Maßnahmen
B.III	31	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich
B.IV	30	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich
B.V	16	akzeptabel	keine Maßnahmen
B.VI	25	akzeptabel	keine Maßnahmen
B.VII	51	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich

Abbildung 22: Schweißen einer Rahmenkonstruktion aus Vierkanthohlprofilen bei Böcker Maschinenwerke GmbH – AAWS (oben) / AAWS & ISO11226 (unten)

Der Arbeitsplatz ist in seiner Gesamtheit mit einem möglichen Risiko (AAWS), bzw. als nicht empfehlenswert (ISO 11226) einzustufen. Die Prozesse B.II, B.V und B.VI werden mit Hilfe der akzeptablen Bewertung durch die ISO-Analyse (keine Teilaspekte sind als nicht empfehlenswert eingestuft) als unkritisch bewertet. Die Prozesse B.I, B.III, und B.IV erhalten in Folge der beiden Analysen eine kritische Gesamtbewertung. Der Prozess B.VII ist durchweg als sehr kritisch einzustufen. Hier befindet sich die Haltezeit bei der statischen Belastung außerhalb des Skalenendes von 270 Sekunden. Da alle beobachteten Prozesse gemeinsam in einer Ablauffolge einen Zyklus bilden, ist in Summe der Arbeitsplatz mit einem möglichen Risiko zu bewerten. Durch die Empfehlung der AAWS-Analyse sind gestalterische Maßnahmen zur Verbesserung der Belastungssituation zu treffen.

Analyse MAN Diesel & Turbo SE

In dem beobachteten Arbeitsprozess wird ein Rohr mit einem Durchmesser von 8 Zoll (203,2mm) und einer Länge von ca. 4000 mm bearbeitet. Dazu muss der Mitarbeiter das Werkstück aus dem abteilungsinternen Lager an seinen Arbeitsplatz befördern. Aufgrund der Abmessungen und des Gewichts des Werkstückes benutzt er dazu einen Lastkran. An seinem Arbeitsplatz spannt er das Werkstück von der einen Seite in einen Drehtisch ein. Dabei handelt es sich um eine Spannvorrichtung mit einer waagrecht ausgerichteten Drehachse, auf der das rundsymmetrische Werkstück durch radial greifende Spannelemente befestigt wird. Das andere Ende wird drehbar mit einem Standfuß gelagert. Der Mitarbeiter ist in der Lage mit einem versetzbaren Fußschalter die Drehung des Werkstückes zu steuern. Alle offenen Stellen der Rohrverbindung (entlang der Heftstellen) werden abgedichtet und an der frei gelagerten Stirnseite des Rohres wird Inert-Gas eingeführt. Verwendet werden die Schweißverfahren WIG (Wolfram-Inert-Gas) und MAG (Metall-Inert-Gas).

Die Arbeitsschritte (**Prozess A.I**) für das WIG-Schweißen der Wurzellage wiederholen sich zyklisch. Diese Schritte laufen sechs-mal ab, bevor die Wurzellage über den gesamten Durchmesser geschweißt ist. Die Arbeitsschritte werden in stehender oder sitzender Haltung ausgeführt. Der Mitarbeiter hat zu entscheiden, ob er pro Zyklus eine oder mehrere Heftstellen auftrennt. In dem beobachteten Zeitraum hat der Mitarbeiter einen ersten Kreisbogen zur Stabilisierung geschweißt, 2 Heftstellen aufgetrennt und danach die verbleibenden Heftstellen überschweißt. Diese individuelle Arbeitsweise (**Prozess A.II**) wird separat analysiert. Diese Schritte treten nur einmalig auf und werden in stehender Haltung durchgeführt.

Um die Fülllagen zu schweißen, wird an den belastungskritischen Stellen das WIG-Schweißen und an den übrigen Stellen das MAG-Schweißen verwendet. Das Schweißen der Fülllage mit dem WIG-Verfahren wird in stehender Haltung an einer T-Verzweigung des Rohres durchgeführt. Der Mitarbeiter dreht die Rohrkonstruktion mit dem Drehtisch in eine Position, in der die

T-Verzweigung sich waagrecht zum Boden befindet. Vor dem Schweißen muss die schon vorhandene Wurzellage gesäubert werden. Anschließend wird die Fülllage über einen Kreisbogen von 180° geschweißt, die Rohrkonstruktion um 180° gedreht und die Fülllage fertiggestellt. Die Arbeitsschritte für das Schweißen der Fülllage mithilfe des WIG-Verfahrens sind im **Prozess A.III** zusammengefasst.

Das Schweißen der Fülllage mit Hilfe des MAG-Verfahrens wird in der Regel für Schweißstellen verwendet, die keine belastungskritischen Stellen sind und deren Rotationsachse deckungsgleich mit der Rotationsachse des Drehtisches ist. Dadurch wird es dem Mitarbeiter möglich mit einer kontinuierlichen Drehbewegung der Rohrkonstruktion diese zu schweißen (**Prozess A.IV**).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Mitarbeiter bei Ausführung der Arbeitsaufgabe aufgrund der schweren und häufig fest eingespannten Bauteile in eine belastende Körperhaltung gezwungen wird. So werden bei der Bewertung der Rumpfneigung prozentual bereits zwischen 59 und knapp 70 % der gesamten Bewertungspunkte vergeben. Dabei ist der Neigungsgrad nicht zwingend für die hohen Haltungspunkte verantwortlich, sondern vielmehr die dem Schweißprozess inhärente Haltezeit. So resultiert die physische Belastung bei der Ausübung der Arbeitsschritte im Wesentlichen aus der ungünstigen statischen Körperhaltung. Dabei spielen die Oberkörperstellung sowie die Rumpfhaltung die entscheidende Rolle. In den betrachteten Referenzprozessen liegt der Belastungsanteil durch die Körperstellung zwischen 45 % und 74 %. Die Rumpfhaltung wirkt sich bei der Fertigung der Rahmenkonstruktion mit einem Belastungsanteil zwischen 26 % und 49 % besonders stark auf die ergonomische Bewertung aus. Insbesondere die länger andauernden Rumpfneigungen von teilweise über 60° und die damit verbundene hohe statische Belastung führte bei der Ausübung der manuellen Schweiß Tätigkeiten zu hohen Punktebewertungen (Abbildung 23). Die ergonomische Bewertung nach ISO 11226 bestätigte diese Ergebnisse.

Prozess	Schweißen	Trennschleifen	Schleifen
A.I	33	5	-
A.II	40	5	-
A.III ^a + A.III ^b	39	52	10
A.IV	46	-	12

Schweißen	AAWS	ISO 11226	∑ Bewertung	
A.I	33	akzeptabel	keine Maßnahmen	
A.II	40	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich	
A.III ^a + A.III ^b	39	52	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich
A.IV	46	nicht empfehlenswert	Maßnahmen erforderlich	

Abbildung 23: Verschweißen eines 8 Zoll (203,2mm) Rohres [MAN] – AAWS (oben) / AAWS & ISO11226 (unten)

Die Analyse des Arbeitsplatzes zeigt, dass die einzelnen Tätigkeiten in den gesamten Arbeitsschritten unterschiedliche Risikobewertungen erhalten. Das Trennschleifen der Heftstellen und das Schleifen der Naht sind bei allen Prozessen durch das AAWS-Verfahren mit einem niedrigen Risiko bewertet, welches keine gestalterischen Maßnahmen erfordert. Beim Schweißen besteht bei allen Prozessen ein mögliches Risiko. Die Punktbewertungen liegen mit 33-46 Punkten im Bereich des Abstufungsintervalls „gelb“. Der Prozess A.III teilt sich durch seine Häufigkeit der Ausübung in die Unterprozesse A.IIIa und A.IIIb auf. Der Prozess A.IIIb liegt mit einem Punktwert von 52 im Bereich des Abstufungsintervalls „rot“. Durch die Interpretation der fließenden Übergänge liegt der Prozess A.IV ebenfalls im Abstufungsintervall „rot“. Hier besteht nach dem AAWS-Verfahren ein hohes Risiko und es sind sofortige Maßnahmen zu treffen.

Der kritische Bereich liegt in der Ausübung der manuellen Schweißstätigkeit. Die Analyse nach der ISO 11226 zeigt, dass sich die statische Belastung der Rumpfnähe in einem nicht akzeptablen Bereich befindet. Bei den Prozessen A.II, A.IIIa und A.IV führt die Haltezeit bei der Rumpfnähe zu einer nicht akzeptablen statischen Belastung. Der Prozess A.IIIb fällt durch die starke Rumpfnähe von > 60° mit in diesen Bereich. Einzig der Prozess A.I ist bei der Rumpfnähe und in seiner Gesamtheit als akzeptabel einzustufen. Die Belastung des Nackens sowie der oberen und unteren Extremitäten ist bei allen Prozessen als akzeptabel bewertet. Die Ergebnisse unterstützen die Erkenntnisse aus der Screeningaufnahme. Um die Arbeitsaufgabe durchführen zu können, wird der Mitarbeiter in eine belastende Körperhaltung gezwungen. Die Hauptbelastung ist dabei die Rumpfnähe-

gung. Die unteren Extremitäten haben keine direkte Beteiligung an dem eigentlichen Arbeitsprozess und unterliegen daher keiner Zwangshaltung. Die Rumpfneigung ist aufgrund der Geometrie der Bauteile nicht zu umgehen. Die Belastungen sind teilweise so groß, dass die Bewertung der Körperhaltung beim Prozess A.II außerhalb der Bewertungsparameter liegt. Eine maximale Haltezeit von 350 Sekunden übersteigt das Skalenende von 270 Sekunden. Die statische Belastung bei diesem Arbeitsprozess ist daher als besonders kritisch zu betrachten. Die Punktevergabe bei der AAWS-Analyse zeigt eine ähnliche Verteilung der Belastung.

Der Arbeitsplatz ist in seiner Gesamtheit mit einem möglichen Risiko (AAWS), bzw. als nicht empfehlenswert (ISO 11226) einzustufen. Alle Prozesse außer des Prozesses A.I fallen in diesen Bewertungsbereich. Der Prozess A.I wird mit Hilfe der akzeptablen Bewertung durch die ISO-Analyse (d.h. keine Teilaspekte sind als nicht empfehlenswert eingestuft) als unkritisch bewertet. Dadurch, dass der Prozess A.I niemals separat und losgelöst von den anderen Prozessen stattfindet, sondern entweder den Prozess A.III oder A.IV nach sich zieht, folgt, dass die Gesamtheit der Prozessfolge mit einem möglichen Risiko behaftet ist. Durch die Empfehlung der AAWS-Analyse sind gestalterische Maßnahmen zur Verbesserung der Belastungssituation zu treffen.

Die ergonomischen Analysen bei den Anwendungspartner zeigen deutlich, dass während der Ausübung der manuellen Schweiß Tätigkeit hohe körperliche Belastungen auf das Muskel-Skelett-System des Mitarbeiters wirken. In den meisten Fälle konnte dies auf belastenden Körperhaltungen und Zwangshaltungen zurückgeführt werden, in welche der Mitarbeiter durch die Bauteilbereitstellung und die Bauteilhandhabung gezwungen wird.

Anforderungen an die Arbeitsorganisation und Systemgestaltung in einem roboter-gestützten Assistenzsystem

Abgeleitet aus den vorangegangenen Analysen werden nachfolgend in kurzer Form die wesentlichen Anforderungen an die Arbeitsorganisation, die ergonomische Arbeitssystemgestaltung sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle für den Demonstrator eines roboter-gestützten Schweißassistenzsystems zusammengefasst. Die Arbeitsorganisation in einem System zur Schweißassistenz mit Hilfe von Robotern muss sich zunächst an den Anforderungen des manuellen Schweißprozesses orientieren, um das angestrebte Ziel einer Substitution der bisherigen manuellen Arbeitsmethode zu unterstützen. Zum anderen müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, um einen sicheren kollaborierenden Betrieb von Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum zu gewährleisten. Weiter müssen die systemimmanenten Anforderungen eines Robotereinsatzes im industriellen Umfeld berücksichtigt und anwendungsspezifisch umgesetzt werden. Hieraus leiten sich nachfolgende Anforderungen für unterschiedliche Teilbereiche des Arbeitssystems ab:

Ergonomie

Im Demonstrator sollen die Roboter als Handling- und Positioniereinheit für die zu fügenden Bauteile agieren, um den Mitarbeiter von Handhabungsaufgaben zu befreien und die Teile in ergonomisch geeigneter Weise dem manuellen Schweißprozess zuzuführen. Die vom Roboter ausgeführten Positionierungs- und Orientierungsbewegungen dürfen dabei der Maxime der ergonomischen Arbeit nicht zuwiderlaufen und sollen die Bauteile und insbesondere die Fügestelle im optimalen Arbeitsbereich des Mitarbeiters positionieren. Für eine ergonomische Arbeitsplatzgestaltung sind basierend auf den durchgeführten Ist-Analysen bei den Anwendungspartner folgende Anforderungen zu stellen:

- Einstellungsmöglichkeit der Arbeitshöhe zur Anpassung des Arbeitsplatzes an unterschiedlich große Mitarbeiter (Anthropometrische Gestaltung)
- Position des Mitarbeiters möglichst fest, so dass geringe Bewegungslängen und Laufwege realisiert werden können, Handhabungsoperation und Positioniervorgänge überwiegend durch die Roboter
- Sicherstellung einer symmetrischen Rumpfhaltung
- Rumpfneigung zwischen 0° und 20°, Rumpfneigungen >20° vermeiden
- Vermeidung extremer Gelenkstellungen und Unterarmhaltung
- Oberarmhebung zwischen 0° und 20°, Oberarmhebungen >20° vermeiden
- Reichenweiten möglichst körpernah, <60% der maximalen Reichweite

- Möglichst hohe Frequenz zwischen statischer und dynamischer Belastung
- Bei höherer statischer Belastung (wie Rumpfneigungen $>20^\circ$) statische Halteposition mit Haltedauern ≤ 60 s realisieren
- Überkopfarbeiten sollen entfallen

Prozess

Nachfolgend sind die wesentlichen Prozessanforderungen dargestellt, welche innerhalb des hybriden Arbeitssystems zur Schweißaufgabenassistenz gelten sollen:

- Identifizierung und Zuordnung der Bauteile zu einer Baugruppe durch eindeutige Kennzeichnung (Barcode, DMC, Typ- /Positionsnummer, RFID)
- Eindeutige Visualisierung des Systemzustandes (Warnleuchte o.ä.) welche den Betriebszustand: Betrieb, Instandhaltung, Fehlfunktion/Notaus anzeigt
- Flexibel gestaltbare Arbeitsabläufe/Vorgehensweisen eingebettet in einen standardisierten Gesamtprozessablauf
- Klare Aufteilung des Arbeitsbereiches in Materialanlieferung und –ablieferung, Arbeitsbereich Schweißer, Roboter, Sicherheitsbereiche, Sperrzonen
- Visualisierung derjenigen Bereiche im Arbeitssystem welche zu einer Zustandsänderung des Prozesses führen (z.B. Notaus)
- Ablauf und Handhabungsreihenfolge orientiert am manuellen Schweißprozess und vom Schweißer flexibel konfigurierbar

Materialbereitstellung

Eine definiert Materialbereitstellung ist für einen robusten und zuverlässigen Robotereinsatz unabdingbar. Um auf fehleranfällige und teure Sensorik zur Lageerkennung von Bauteilen verzichten zu können ist es erforderlich, die Bauteile korrekt positioniert und an einem definierten Ort bereitzustellen.

- Anlieferung der Bauteile an einen fest definierten Bereich im Arbeitsraum des Roboters, mit definierter Positionierung und Orientierung der Teile
- Bauteile sollen ohne zusätzliches manuelles Handling vom Roboter aufgenommen werden können, dies setzt voraus, dass diese immer orientiert an einem definierten Ort bereitgestellt werden
- Bauteile sind bei Anlieferung zugeschnitten und müssen eine mögliche Schweißnahtvorbereitung bereits durchlaufen haben
- in Hinblick unterschiedliche Produktvarianten muss die Bereitstellung flexibel und wiederverwendbar sein

Betriebsstoffe

Die für den Schweißprozess und den Roboterbetrieb benötigten Betriebsstoffe müssen automatisierungsgerecht zugeführt werden und dürfen zu keiner Gefährdung des Prozesses oder der Arbeitssicherheit führen.

- Inertgasversorgung durch Hausanschluss oder Gasflasche außerhalb des Arbeitsraumes
- Energieversorgung wie Elektrizität und Druckluft bzw. Hydraulik (abhängig vom Greifertyp)
- Berücksichtigung der Energieführung am Roboter, der Bewegungsraum darf nicht durch Schlauchpakete o.ä. eingeschränkt werden

*Konzept zu Layout/Prozessüberwachung/Qualitätssicherung
siehe auch Schlussbericht IRPA*

Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

Der Begriff des Bedienkonzeptes beschreibt Lösungen für Aktionen des Benutzers zum Senden von Informationen, wenn der Benutzer Gerätefunktionen verwendet (DIN 40020). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konzentriert sich die Verwendung des Begriffes auf die Bedienung des Roboterassistenzsystems durch den Menschen. Um zusammen mit der Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung ein angepasstes Konzept für die Bedienung des Demonstrators zu entwickeln, wurden durch die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme zunächst die allgemein geltenden Anforderungen orientiert an gängigen Richtlinien und Normen ermittelt (hier in Kurzform zusammengefasst). Für die Verwendung von Bildschirmgeräten bei der Ausführung von Bürotätigkeiten stellt die Norm DIN EN ISO 9241 in Teil 11 heraus, dass die Gebrauchstauglichkeit von einer Benutzungsschnittstelle durch die drei Oberziele Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit des Anwenders bestimmt wird. In Teil 110 definiert die Norm weiterhin sieben Grundsätze, die allgemein für die Dialoggestaltung bei einer MMS zu beachten sind:

- Aufgabenangemessenheit
- Selbstbeschreibungsfähigkeit
- Erwartungskonformität
- Lernförderlichkeit
- Steuerbarkeit
- Fehlertoleranz

- Individualisierbarkeit

Diese Grundsätze besitzen ebenso für die bildschirmgeführte Bedienung eines Roboterassistenzsystems Gültigkeit. Auch Shneiderman [Shn02] stellt mit den „acht goldenen Regeln des Schnittstellendesigns“ geeignete Kriterien auf, bei denen insbesondere die Bedürfnisse des Bedieners im Vordergrund stehen:

- Konsistenz
- Berücksichtigung unterschiedlicher Erfahrung
- Rückmeldung auf Aktionen des Bedieners
- Abgeschlossene Operationen
- Fehlervermeidung
- Leichte Umkehr von Aktionen
- Bedienerbestimmte Kontrolle
- Reduktion der Belastung für das Kurzzeitgedächtnis

Weiterhin stellt der VDI innerhalb der Richtlinie 3699 zur Prozessführung mit Bildschirmen zehn Grundsätze für die Gestaltung einer MMS vor:

- Keine Bevormundung des Menschen durch die Technik
- Der Mensch ist der Maßstab
- Benutzer einbeziehen
- Das Notwendige zum richtigen Zeitpunkt bereitstellen
- Alle Ereignisse darstellen, die ein Eingreifen erfordern
- Nur wahre Informationen anzeigen
- Informationen situationsangepasst anzeigen
- Eindeutigkeit sicherstellen
- Für Einheitlichkeit sorgen
- „Blindflüge“ ausschließen

Basierend auf diesen allgemein gültigen Grundsätzen leiten sich die Anforderungen an ein spezifisches Bedienkonzept für den im Forschungsvorhaben angestrebten Demonstratoraufbau ab. Im Wesentlichen werden dabei die technischen Möglichkeiten zu Bedienung des Systems anhand nachfolgender Kriterien gespiegelt und bewertet:

- Fehlervermeidung
- benötigtes Vorwissen
- Lernförderlichkeit
- Steuerbarkeit

- Aufgabenangemessenheit
- Kosten

Das erste Kriterium bewertet den Beitrag zur Fehlervermeidung des Bedienkonzeptes. Hierbei wird insbesondere berücksichtigt, dass sich das Bedienkonzept durch eine konsistente und vor allem klare Dialoggestaltung auszeichnen muss, um Fehler bei der Bedienung nach Möglichkeit von vornherein zu vermeiden. Dazu zählt z. B. die Einschränkung von Freiheitsgraden während der Bedienung, sodass für die Benutzung nicht relevante Bedienpfade deaktiviert werden. Außerdem sollte ein Bediensystem den Benutzer dabei aktiv unterstützen, Eingabefehler zu erkennen und durch Korrekturvorschläge oder durch eine andere Form der Rückmeldung die Auswirkungen des Fehlers zu vermeiden. Auch die in der VDI-Richtlinie 3699-2 vorgestellte Eindeutigkeit der dargestellten Informationen sollte zur Fehlervermeidung umgesetzt werden.

Ein weiteres Kriterium ist das von den Facharbeitern benötigte Vorwissen, um das Roboterassistenzsystem zum Schweißen von Rohr- und Rahmenkonstruktionen zu bedienen. Die Facharbeiter beherrschen ihr Handwerk, jedoch sind sie in der Bedienung von Robotern nicht versiert und müssen möglichst aufwandsarm geschult werden können. Angestrebt werden soll daher eine möglichst intuitive Handhabung des Bedienkonzeptes, um den Schulungsaufwand zu reduzieren. Die Bedienung soll demnach verständlich und lernförderlich aufgebaut sein und ggf. notwendige Hilfestellung bereitstellen, sodass die Facharbeiter bei der Bedienung des Systems durch das System selbst unterstützt werden.

Die Steuerbarkeit des Systems muss zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein. Der Benutzer muss über die Steuerung zu jederzeit die vollständige Kontrolle über das System haben, dies ist sowohl für die Sicherheit als auch für die Akzeptanz des Systems unerlässlich. Weiter muss das Bedienkonzept schnell und aufwandsarm an veränderte Aufgabenstellungen angepasst werden können. Gerade die Schweißaufgabenassistenz im Maschinen- und Anlagenbau, charakterisiert durch Einzel- und Kleinserienaufträge und eine dementsprechend hohe Produktvarianz, erfordert eine flexible Anpassung des Systems. Nicht zuletzt entscheidet die Breite des Flexibilitätskorridors in Korrelation mit dem Anschaffungspreis über die Wirtschaftlichkeit eines robotergestützten Assistenzsystems für kleine und mittlere Unternehmen.

*Bedienkonzept des Demonstratoraufbaus
siehe auch Schlussbericht IRPA*

Virtuelle Abbildung des Anlagenkonzeptes mit Fokus auf der Humansimulation

Die Bedeutung von rechnergestützten Planungsmethoden und –werkzeugen, welche allgemein unter dem Begriff der "Digitale Fabrik" zusammengefasst werden [VDI4499], hat in den letzten Jahren stark zugenommen [Pet10]. Insbesondere digitale Menschmodelle (Digital Human Model - DHM), als Teil der digitalen Fabrik, werden zunehmend genutzt, um auch hybride Arbeitssysteme darstellen zu können. Für die Planung und Programmierung von automatisierten Systemen, z.B. Roboterzellen, ist Software zur Offline-Programmierung und Simulation der Anlagen weit verbreitet. Diese Softwarelösungen zum frühzeitigen Design der geplanten automatisierten Fertigungsoperationen, dem Layout und der Bahnplanung werden teilweise von den Roboterherstellern selbst, aber auch systemunabhängig angeboten.

Um nun hybride Systeme mit einer direkten Kooperation zwischen Mensch und Roboter in einer solchen Simulationsumgebung abbilden zu können, muss diese um ein digitales Menschmodell erweitert werden. Erst dies ermöglicht es dem Anwender eine Simulation des gesamten Systems, einschließlich der menschlichen Kinematik, durchzuführen, um Kollisionsgefahren und weitere ergonomischen Aspekte, wie belastende Körperhaltungen des Mitarbeiters, zu analysieren und zu bewerten.

Um bereits in der Arbeitsablaufplanung eine unter ergonomischen Aspekten optimierte Montage der Rohr- und Rahmenkonstruktionen zu gewährleisten, wird ein digitales Menschmodell in die vorhandene Offlineprogrammierungsumgebung FAMOS (siehe auch Schlussbericht carat robotic innovation GmbH) implementiert. Das Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine (Roboter) wird so vollständig virtuell abgebildet, so dass die Roboterbewegungen auf die voraussichtlichen Bewegungen des Menschen während des Schweißprozesses angepasst werden können. Ein durch die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme integriertes ergonomisches Bewertungsverfahren ermöglicht es dabei, den virtuell geplanten Schweißprozess hinsichtlich auftretender körperlicher Belastungen des Muskel-Skelett-Systems zu bewerten. Für die Implementierung des digitalen Menschmodell in die bestehende Softwareumgebung FAMOS wird das Character Animation System EMotionFX genutzt und in die bestehende Systemstruktur von FAMOS integriert.

Im Zuge der durchgeführten Analyse existierender Menschmodelle wurden zu Beginn der Entwicklungen zunächst die Eigenschaften und Spezifikationen gängiger existierender Menschmodelle analysiert. Anhand dieser Daten wurde im weiteren Verlauf zusammen mit

der carat robotic innovation GmbH eruiert, ob und in welchem Umfang existierende Menschmodelle für die geplante Integration einer Humansimulation in die Bahnplanungssoftware geeignet sind, um durch eine Erweiterung der Offlineprogrammierungsumgebung FAMOS bereits „offline“ eine Optimierung des Arbeitsablaufes und der ergonomischen Bedingungen vornehmen zu können. Die Kernziele dabei sind: die frühzeitige Analyse & Optimierung des Arbeitsablaufes im Roboterassistenzsystem, die Minimierung der Belastungen des Mitarbeiters (frühzeitige ergonomische Analyse) und die Identifikation und Vermeidung von Kollisionsgefahren. Hieraus leiten sich nachfolgend beschriebene Anforderungen an die Humansimulation ab.

Humansimulation in der Offlineprogrammierungsumgebung FAMOS

Mit Hilfe einer in die Offlineprogrammierung integrierten Humansimulationen sollen die Belastungen des Werkers und mögliche Kollisionsgefahren mit einem Roboter frühzeitig durch Simulation detailliert analysiert werden können. Das virtuell abgebildete Roboterassistenzsystem soll in FAMOS abgebildet und um einen virtuellen Schweißer erweitert werden. Damit soll ermöglicht werden die Bewegungen von Mensch und Roboter während des Schweißprozesses abzubilden und aufeinander abzustimmen, wobei insbesondere die kinematischen Begrenzungen beider Aktionspartner berücksichtigt werden müssen. Über Kollisionsabfragen sollen optimale Bewegungsmuster für die werkstückführenden Handhabungsroboter und für das schweißwerkzeugführende Menschmodell abgeleitet werden, welche dann in einem Postprozess auf den Demonstrator übertragen werden können. Gleichzeitig sollen die Bewegungen des virtuellen Schweißers bereits frühzeitig hinsichtlich der zu erwartenden physischen Belastung mit Hilfe einer bewährten Bewertungsmethodik analysiert werden.

Die Hauptaufgaben, die das Menschmodell in der Offline-Programmierung der hybriden Mensch-Roboter-Zelle übernehmen soll, sind die Vermeidung von Kollisionen und die Bewertung der ergonomischen Bedingungen während der Bewegungssequenz bzw. der Bahnplanung. Dabei soll die Bahnplanung der Roboter möglichst intuitiv unterstützt werden. Um zu verhindern, dass der Mitarbeiter durch direkten Kontakt mit dem Roboter einem Verletzungsrisiko ausgesetzt wird, müssen in der Offlinebahnplanung bereits die (voraussichtlichen) Bewegungen des Mitarbeiters während des Schweißens berücksichtigt werden. Mit einem Menschmodell in der Offline-Programmierungsumgebung wird es möglich, den Bewegungspfad der Roboter mit den Bewegungen des Mitarbeiters abzustimmen, um so eine sichere und bewegungsökonomische Mensch-Roboter-Kollaboration sicherzustellen.

Für die Integration einer solchen Humansimulation in das FAMOS-Offlineprogrammiersystem sind abgeleitet folgende Anforderungen zu stellen:

- Auswahlmöglichkeit zwischen mehreren Modellen hinsichtlich Körpergröße, Korpuslenz und Proportion / Abbildung der gebräuchlichsten Perzentile 5, 50 und 95 für beide Geschlechter
- Vorbereitung einer Möglichkeit, das Modell in späteren Entwicklungsstufen durch Variation der Gelenkpositionen individuell anpassen und konfigurieren zu können
- Schnittstelle für ergonomische Analysen in der virtuellen Umgebung, orientiert an den verbreiteten Screening-Verfahren wie OWAS oder EAWS
- Starrkörpergeometrien („Knochen“skelett) unter der Haut, welches als Kollisionsobjekt dienen und nicht sichtbar ist
- Kinematik mit einer Mindestanzahl an Gelenken, welche für realistische Körperbewegungen notwendig sind (z. B. ISO/IEC FCD 19774 — H-Anim), komplexe Details wie Fingergelenke, Zehen o.ä. entfallen vorerst
- ein repräsentatives Erscheinungsbild, idealerweise mit deformierbarer Haut, soll angestrebt werden - im ersten Schritt genügt ein Hautlinienmodell mit darunterliegender Knochenstrukturen
- das Humanmodell soll innerhalb FAMOS aus einer Bibliothek ausgewählt und im Projekt eingefügt, platziert und ausgerichtet werden können
- Integration von MotionCapture-Daten für Standardbewegungen
- innerhalb FAMOS soll das Modell bestimmte, frei programmierbare Laufwege zurücklegen können
- am Modell soll ein Effektor ausgewählt und einer Bewegungsbahn zugeordnet werden können, z.B. mit TCP an der Schweißpistole und Basis im Schultergelenk
- der Effektor (z.B. der Arm mit Schweißpistole in der Hand) soll einer beliebigen Schweißbahn folgen können, liegt ein Punkt außerhalb der Armreichweite, sollen automatisch zusätzlich weitere Körperteile mitbewegt werden
- Interpolation des Endeffektors entlang einer Bahn (z.B. Schweißbahn), dabei muss für die Kinematik eine Rücktransformation (Inverse) verfügbar sein, die auf Basis der Schweißbahn die Gelenkpositionen für Hand, Arm, Schulter und Wirbelsäule rückrechnet
- Speichern unterschiedlicher Posen unter beliebigem Namen, wie „Schweißhaltung“, „Aufnahme Schweißwerkzeug“, „Bedienung der Steuerung“, etc.

- Verknüpfung des Modells mit anderen Geometrien im Famos-Projekt, beispielsweise das Halten einer Schweißpistole
- Abbildung der PS-Ausrüstung: Schuhe, Handschuhe, Schutzkleidung, Schutzmaske, Brille, Helm

Vorgehensweise und Aufbau des Menschmodells

Die im beschriebenen Projekt verwendete Offlineprogrammiersoftware ist FAMOS, entwickelt von carat robotic innovation GmbH [car13]. Bisher ist diese Software in der Lage Roboteranwendungen in einer virtuellen Arbeitsumgebung abzubilden und zu simulieren. Der innerhalb des Projektes verfolgte Ansatz ist es, ein Character Animation System (CAS) aus der Unterhaltungsindustrie zu verwenden, um ein bewegtes Menschmodell in die bestehende Lösung zu integrieren. In diesem Fall wird EmotionFX von MGD [mys13] verwendet, ein CAS welches allgemein hin für Videospiele-Anwendungen entwickelt wurde. EmotionFX ist geeignet, um in Echtzeit animierte Modelle des Menschen, aber auch anderer Avatarformen, in eigene Anwendungen zu integrieren. Über die Bewegungssimulation kinematischer Ketten (wie z.B. das menschliche Skelett) hinaus bietet die Software auch Gesichtsanimationen, interaktive Bewegungsdarstellung wie eine LookAt-Funktion und eine Physik-Engine zur Abbildung von Fallbewegungen.

Das mit Hilfe von EmotionFX in FAMOS robotic integrierte Menschmodell ist ein Mehrschichtmodell. Es besteht zunächst aus einem Starrkörpermodell des menschlichen Skelettes, welches über aufgezeichnete Motioncaptures oder inverse Rücktransformation animiert werden kann. Die Gelenkpositionen können dabei jederzeit abgefragt und für die weitere Verwendungen in einem ergonomischen Bewertungsverfahren nutzbar gemacht werden. Die Starrkörperstruktur zwischen den Gelenken (die „Knochen“) dienen als Kollisionsobjekte, um Kontakte mit anderen Objekten (z.B. einem Roboter) erkennen zu können.

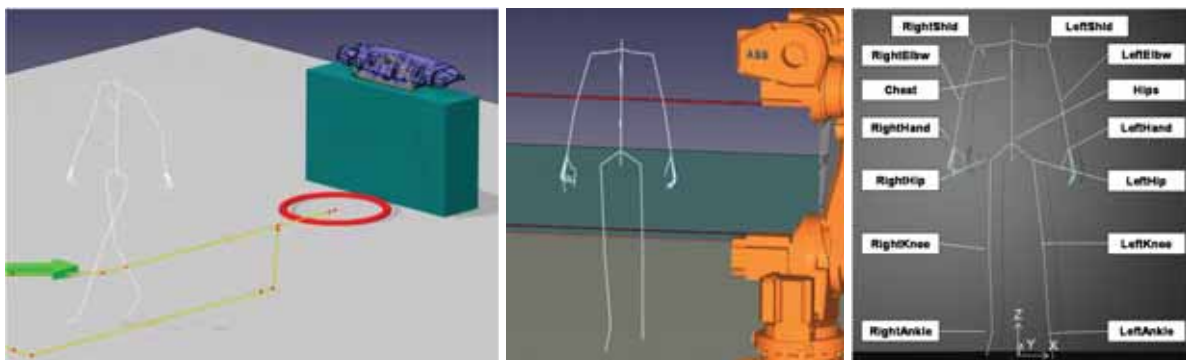


Abbildung 24: Skelettmodell der implementierten Humansimulation [FAMOS]

Über das Skelettmodell wird eine äußere Hülle gelegt, ein aus Polygonen zusammengesetztes Netz (Mesh), welches über die Animation des Starrkörpermodells mitverformt wird, sodass sich ein realistisches Erscheinungsbild während der Bewegungsdarstellung ergibt.



Abbildung 25: Entwicklungsstufen des Menschmodells in FAMOS ausgehend von einer Skelettkinematik, über ein Gitternetzmodell bis zur vollständig modellierten Hauttextur mit Kleidung, Schutzausrüstung & Werkzeug [FAMOS]

Texturen auf der äußeren Hülle ermöglichen darüber hinaus die Darstellung äußerer Merkmale, wie Kleidung, Haut, Haaren oder Gesichtszügen.

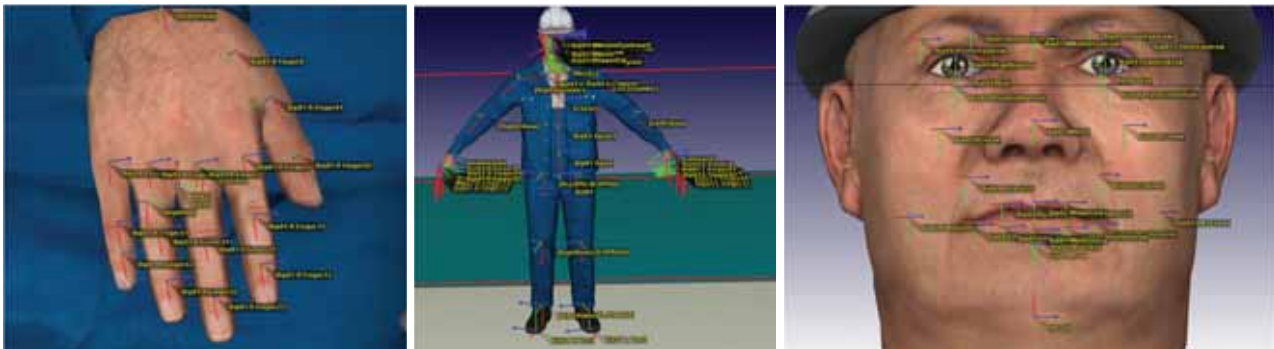


Abbildung 26: Hautkonturmodell und Detailgrad der Humansimulation [FAMOS]

Die Hauptaufgaben, die das Menschmodell in der Offline-Programmierung der hybriden Mensch-Roboter-Zelle übernehmen soll, sind die Vermeidung von Kollisionen und die Bewertung der ergonomischen Bedingungen während der Bewegungssequenz bzw. der Bahnplanung.

*Aufbau und Implementierung des Menschmodells
siehe auch Schlussbericht carat*

Anthropometrische Anpassung des Menschmodells

Die anthropometrische Anpassung des Menschmodells erfolgt über Skalierung bestimmter Teilbereiche der Menschkinematik. Über eine Veränderung definierter Parameter, wie z.B.

Schrittlänge, Rückenlänge (Halswirbel bis Lendenwirbel/Hüfte) und Armlänge (Schulter- bis Handgelenk), können Menschmodelle mit unterschiedlichen Abmaßen erstellt und über die Bibliothek in Famos verfügbar gemacht werden. Grundlage bilden die Datensätze bestehender Normen ISO 33402, Teil 2 (deutsche Wohnbevölkerung) bzw. DIN EN 547-3 (europäische Bevölkerung).

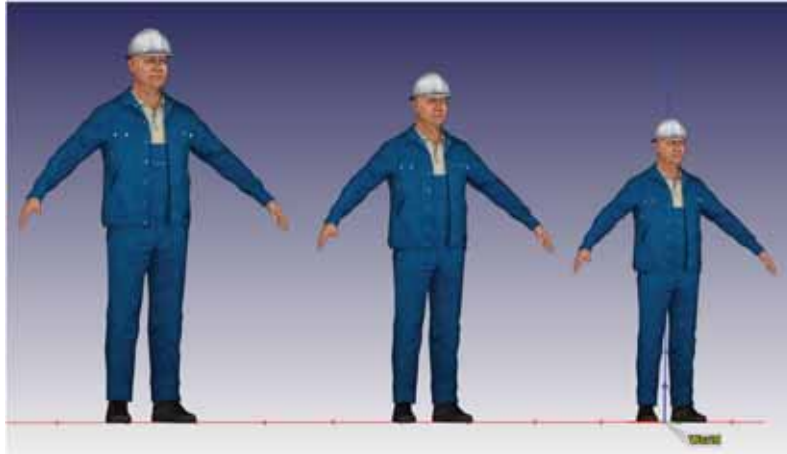


Abbildung 27: Bibliothek mit Modellen unterschiedlicher Anthropometrie [FAMOS]

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst eine eingeschränkte Auswahl unterschiedlicher Perzentile in einer Bibliothek realisiert. In der projektübergreifenden Weiterentwicklung wird angestrebt, anthropometrisch individualisierbare Modelle anzubieten.

*Aufbau und Implementierung des Menschmodells
siehe auch Schlussbericht carat*

Implementierung einer ergonomischen Bewertungsmethode

Nach Abschluss der vollständigen Implementierung der Menschkinematik einschließlich der anthropometrischen Anpassung des Modells durch die carat robotic innovation GmbH erfolgte durch die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme die Implementierung einer Bewertungsmethode um die zu erwartende Arbeitsbelastungen auf Basis der Bewegungsabläufe in der Mensch-Roboter-Simulation ermitteln und darstellen zu können. Die ausgewählte Bewertungsmethode basiert auf der Auswertung von Körperhaltungen, da Bewegungsdaten, Gelenkkoordinaten sowie Zeitinformationen direkt aus einer Humansimulation abgeleitet werden können. Die verwendete OWAS-Methodik analysiert insgesamt 252 mögliche Kombinationen aus Haltung und Belastung, unterteilt in vier Rückenhaltungen, drei Armhaltungen und sieben Beininstellungen mit jeweils drei Lastdimensionen.

Grundlagen zur ergonomischen Bewertung mit OWAS

Die OWAS-Methode („OVAKO Working Posture Analysing System“) zur Analyse von Körperhaltungen wurde Mitte der 70er Jahre im finnischen Stahlwerk OVAKO entwickelt [Bon95]. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, bei denen die Ermittlung der Grenzlast das Ziel ist, liegt der Schwerpunkt der OWAS-Methode in einer Gefährdungsanalyse aufgrund von Körperhaltungen. Zu diesem Zweck wurde ein Klassifizierungssystem für Körperhaltungen geschaffen, mit dem es möglich ist, die Häufigkeiten bestimmter Haltungen zu dokumentieren und davon ausgehend Aussagen über eine mögliche Gesundheitsgefährdung von Haltungen zu machen. Es handelt sich bei diesem Verfahren nicht um ein Messverfahren, sondern um ein sogenanntes „Papier- und Bleistift-Verfahren“, das auf Beobachtungen basiert. [Leh03]

Mit der OWAS-Methode können Haltungen des gesamten menschlichen Körpers analysiert und klassifiziert werden. Durch die Anwendung der OWAS-Methode bei der Analyse von Tätigkeiten können folgende Aufgabenstellungen unterstützt werden [Mat93]:

- Standardisierung der ergonomischen Beurteilung haltungsbedingter Belastungen
- Planung und Gestaltung von Arbeitsstätten, Arbeitsmethoden, Werkzeugen und Maschinen
- Arbeitsplanung für die Eingliederung von Personen mit geminderter Leistungsfähigkeit
- Kombination mit anderen wissenschaftlichen Methoden für Felduntersuchungen

Zur systematischen Beschreibung der Körperhaltungen werden drei Bereiche des Körpers gesondert betrachtet (Tabelle 1):

Tabelle 1: Betrachtete Körperhaltungen und Lasten bei dem OWAS-Verfahren [Sto85]

Bereich	Unterscheidung
Rücken	4 verschiedene Haltungsformen
Obere Gliedmaßen (Hände, Unter- und Oberarme)	3 verschiedene Haltungsformen
Untere Gliedmaßen (Füße, Unter- und Oberschenkel)	7 Grundhaltungen, 3 Zusatzhalt.
Kopf	5 Haltungsformen
Lasten	<10kg, 10-20kg, >20kg

Zur weiteren Beschreibung der Belastung kann eine vorhandene äußere Last in die Bewertung eingebracht werden. Diese kann durch 3 Klassen beschrieben werden.

Die Haltungen werden mit Hilfe eines vierstelligen Zifferncodes klassifiziert, wobei die erste Ziffer für die unterschiedlichen Haltungen des Rückens, die zweite Ziffer für die Haltungen der oberen Gliedmaßen, die dritte Ziffer für die Haltung der unteren Gliedmaßen und

die vierte Ziffer entweder für die Höhe der äußeren Last oder die Kopfhaltung steht. Die 84 Grundhaltungen (Abbildung 28) werden durch Haltungen des Rückens, der oberen sowie der unteren Gliedmaßen gebildet. Werden die einwirkenden äußeren Lasten mit in die Analyse der Grundarbeitshaltungen einbezogen, erhöht sich die Zahl der möglichen Kombinationen auf 252.

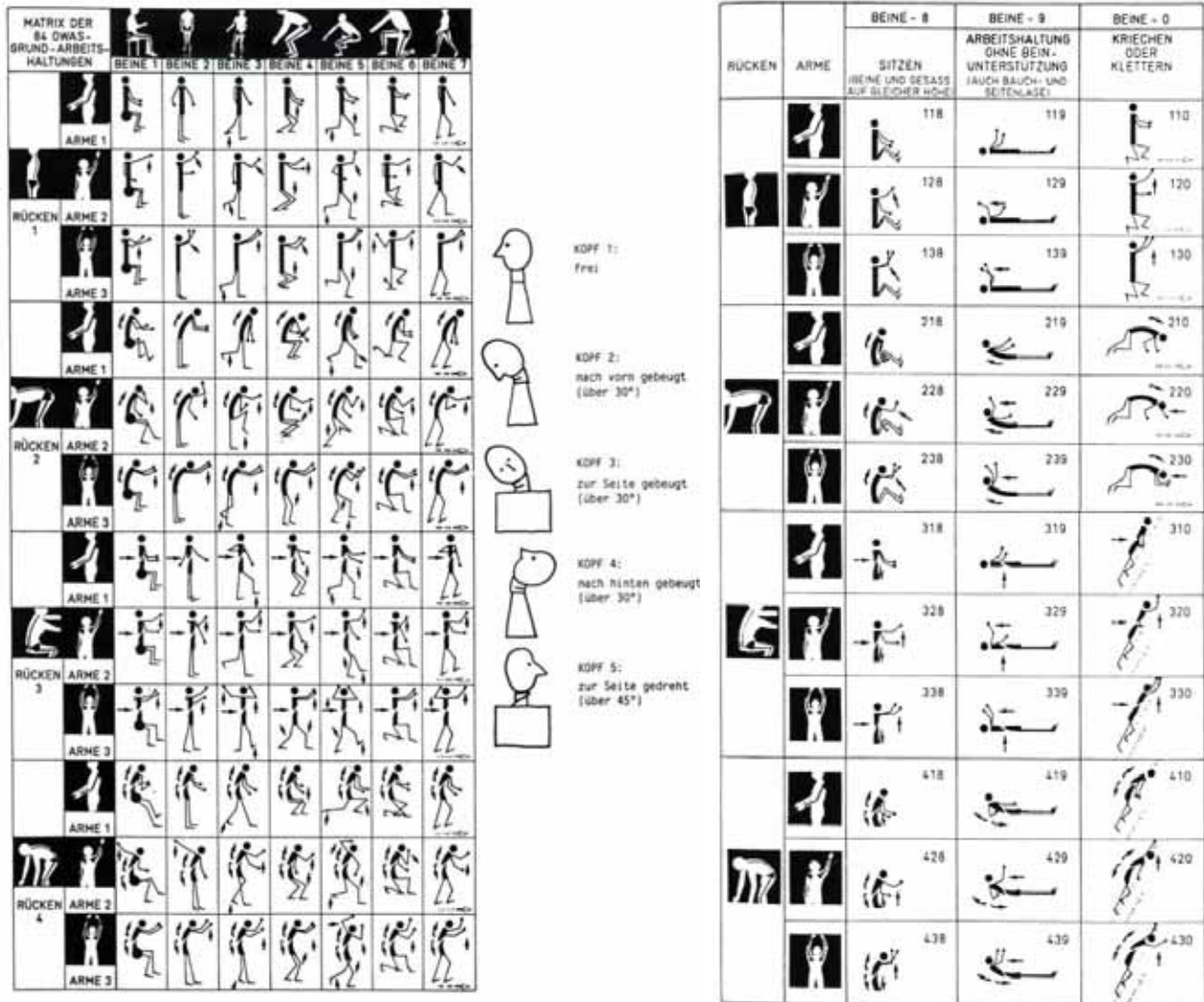


Abbildung 28: Matrix der 84 OWAS-Grund-Arbeitshaltungen (links) und OWAS-Zusatzhaltungen (rechts) [Sto85]

Die Vorgehensweise bei der OWAS-Methode ist der einer Multimomentaufnahme ähnlich ist. Es werden Momentaufnahmen zu vorher festgelegten Untersuchungszeitpunkten festgehalten. Zur Auswertung der OWAS-Analyse erfolgt im ersten Schritt eine Ermittlung der Häufigkeit der einzelnen Arbeitshaltungen. Anschließend werden den ermittelten Haltungskombinationen und den Haltungsausprägungen für Rücken, Arme und Beine über Bewertungsmatrizen je nach Kombination und Zeitanteil an der analysierten Bewegungs-

sequenz sogenannten Maßnahmenklasse (Aktionskategorien) zugeordnet. Diese Maßnahmenklassen gliedern sich wie folgt [Gud09]:

Tabelle 2: Aktionskategorien nach OWAS

1	Die einzelnen Körperhaltungen und die Haltungskombinationen der verschiedenen Körperteile sind normal und natürlich. Die Belastung des Muskel-Skelett-Systems ist normal und im akzeptablen Rahmen. Die Körperhaltungen müssen nicht geändert werden.
2	Die Belastung durch die einzelnen Körperhaltungen oder durch die Haltungskombinationen können einen gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System haben. Maßnahmen zur Abhilfe sollten in naher Zukunft ergriffen werden.
3	Die Belastung durch die einzelnen Körperhaltungen oder durch die Haltungskombinationen haben einen gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System. Maßnahmen zur Abhilfe sollten so schnell wie möglich ergriffen werden.
4	Die Belastung durch die einzelnen Körperhaltungen oder durch die Haltungskombinationen haben einen sehr gesundheitsgefährdenden Effekt auf das Muskel-Skelett-System. Maßnahmen zur Abhilfe sollten sofort ergriffen werden.

Die Zuordnung der einzelnen Haltungen zu den jeweiligen Maßnahmenklassen basiert auf Einschätzungen von Experten [Mat93]. Des Weiteren erlaubt die Auswertung der Beobachtungen eine Analyse von einzelnen Körperteilen (z. B. dem Rücken). Hierzu kann mit Hilfe eines Änderungsempfehlungsvordrucks die Gesamtverteilung der einzelnen zu analysierenden Körperteile ermittelt und nach dem gleichen oben beschriebenen Farbschema beurteilt werden.

Vorgehensweise und Implementierung in FAMOS

Die Ergonomieanalyse in FAMOS wurde analog zur EmotionFX-Integration als PlugIn realisiert (Abbildung 29). Das PlugIn erhält aus der Simulation heraus Informationen über Zeit und Gelenkpositionen des digitalen Menschmodells. Nach Auswertung der Eingangsdaten erfolgt die Ausgabe des Bewertungsergebnisses visuell auf der Benutzeroberfläche.

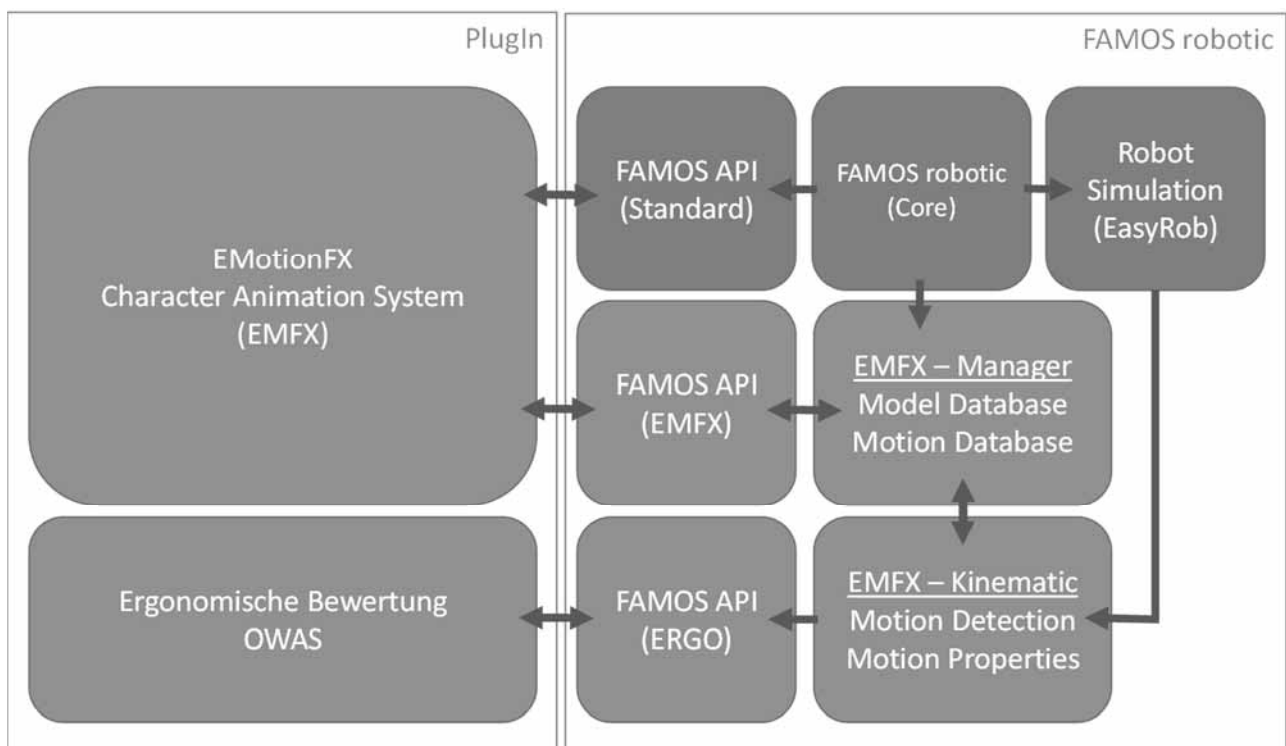


Abbildung 29: Einbindung des Ergonomie-PlugIn für EmotionFX in FAMOS

Während der Simulation des Bewegungsvorgangs kann aus den Gelenkpositionen des Modells die Körperhaltung zu jedem Zeitpunkt identifiziert und in einen OWAS-Haltungscode überführt werden. Die Gelenkkoordinaten und Bewegungsdaten werden dabei direkt aus der Simulation abgeleitet. Mit diesen Informationen wird die aktuelle Körperhaltung bestimmt und über die Haltungsart und -zeit eine Bewertung nach der OWAS-Methodik ermittelt. Systematisch werden dabei die Zeitdauern der einzelnen Körperhaltung in der gesamten analysierten Bewegungssequenz und die resultierende Belastung auf den Bewegungsapparat für Rücken, Arme und Beine bestimmt. Im Anschluss können daraus abgeleitete Korrekturmaßnahmen, z. B. bezogen auf die aktuelle Bahnplanung, durchgeführt werden.

Die implementierte ergonomische Bewertungsmethode nach OWAS basiert damit auf einer mehrstufigen, nachfolgend dargestellten Vorgehensweise:

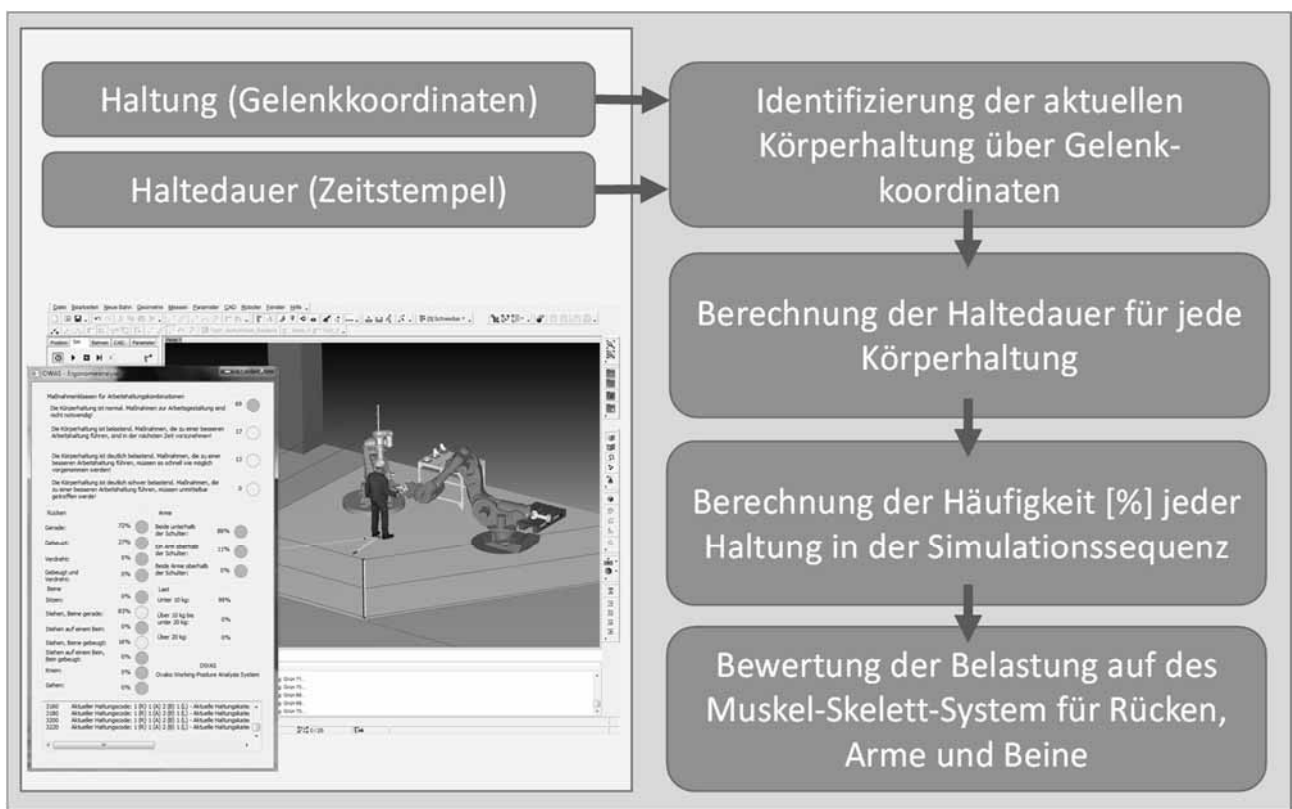


Abbildung 30: Vorgehensweise der ergonomischen Bewertung in FAMOS

Dabei werden systematisch die zeitlichen Anteile der während einer Tätigkeit auftretenden Körperhaltungen als Kombination aus Einzelhaltungen für Rücken, Arme und Beine zur Ableitung der entstehenden Belastungen für das Muskel-Skelett-System bestimmt. Ziel ist es, aus den Gelenkkoordinaten der jeweiligen Bewegungssequenz in der Simulation auf die aktuelle Körperhaltung zu schließen und diese automatisiert in eine OWAS-Kodierung zu überführen. Nachfolgende Abbildung stellt dieses Vorgehen schematisch dar:

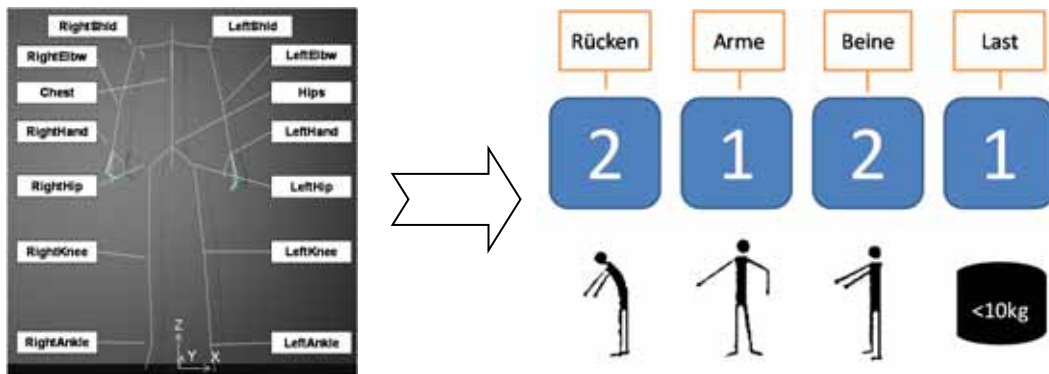


Abbildung 31: Skelett mit Gelenkbezeichnungen und Beispiel für eine OWAS-Kodierung

Code	Körperhaltung	Information aus der Humansimulation
1	Beide Arme unterhalb Schulter	Knoten „LeftHand“ und „RightHand“ unterhalb der Schulterknoten „LeftShoulder“ bzw. „RightShoulder“
2	Ein Arm auf Schulterhöhe oder darüber	Knoten „LeftHand“ oder „RightHand“ unterhalb der Schulterknoten „LeftShoulder“ bzw. „RightShoulder“
3	Beide Arm auf Schulterhöhe oder darüber	Knoten „LeftHand“ und „RightHand“ überhalb der Schulterknoten „LeftShoulder“ bzw. „RightShoulder“



```
// Identifizierung Armhaltung
if ((LeftHandToChest[3][0] > 200) && (RightHandToChest[3][0] > 200)) //Beide Arme überhalb Schulter
{
    ArmhaltungZeitanteil[3][1]++;
    Aktuellehaltung[2] = 3;
}
else
if ((LeftHandToChest[3][0] > 200) || (RightHandToChest[3][0] > 200)) //Ein Arm überhalb Schulter
{
    ArmhaltungZeitanteil[2][1]++;
    Aktuellehaltung[2] = 2;
}
else //Beide Arme unterhalb Schulter
{
    ArmhaltungZeitanteil[1][1]++;
    Aktuellehaltung[2] = 1;
}
};
```

Abbildung 32: Beispiel für die Ableitung eines Haltungscodes aus den Gelenkpositionen der Arme

Nach Erfassung der einzelnen Körperhaltungen und der Haltungskombinationen mittels einer eindeutigen Kodierung, dem Haltungscod, folgt die Ermittlung des zeitlichen Anteils der jeweiligen Körperhaltung an der gesamten Bewegungssequenz. Über die zeitlichen Anteile können schließlich über standardisierte Tabellen Aktionskategorien für die jeweilige Haltungskombinationen (Tabelle 3) und die einzelnen Körperhaltungen (Tabelle 4) identifiziert werden.

Tabelle 3: Bewertungsmatrix für Haltungskombinationen nach OWAS [Gud09], [Sto85]

Rücken	Arme	1			2			3			4			5			6			7			Beine	Gewicht/Kraft
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	3	1	1	1	1	1	1	2	
2	1	2	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3		
	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4		
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4		
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1		
	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1		
	3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1		
4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4		
	2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4		
	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4		

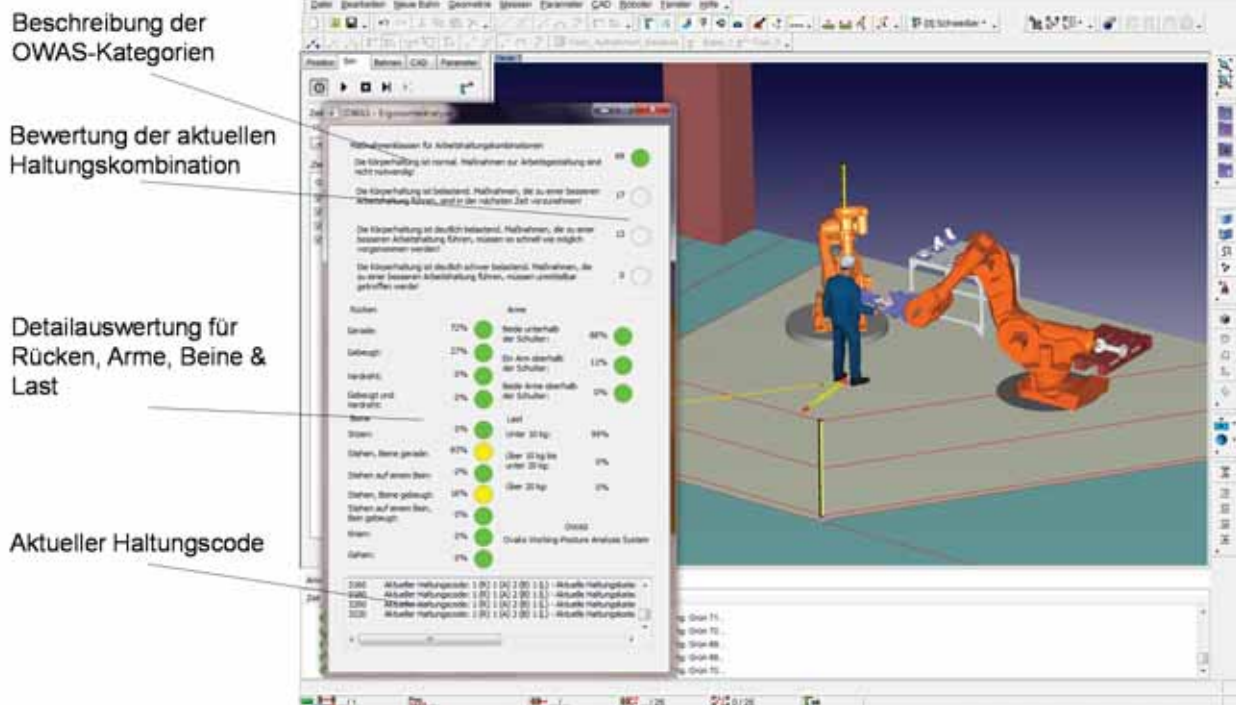


Abbildung 33: OWAS Interface in FAMOS

Zusätzlich zur Bewertung der Körperhaltung werden in textueller Form der aktuelle Haltungscode, die Detailbewertung für Rücken, Arme, Beine und Last sowie der zeitliche Anteil der unterschiedlichen Bewertungskategorien an der gesamten Bewegungssequenz angezeigt. Nach Ablauf der kompletten Bewegungssimulation wird das Analyseergebnis für den gesamten Arbeitsablauf dargestellt. Aus diesem Protokoll kann der Benutzer detailliert die Einzelbewertung für die unterschiedlichen Körperbereiche Rücken, Arme, Beine und Last ablesen und entsprechende Handlungsempfehlungen für den abgebildeten Arbeitsablauf ableiten.

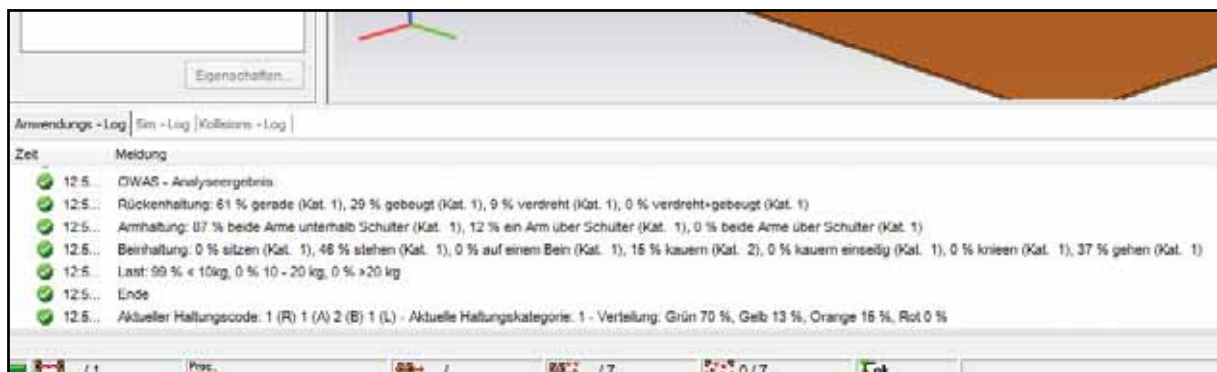


Abbildung 34: OWAS Analyseergebnis nach Ablauf der simulierten Bewegungssequenz

Durch die dargestellte Integration der OWAS-Methode in die Simulationsumgebung FAMOS wird es möglich, das Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine (Roboter) ergonomisch optimal zu gestalten. Der Programmierer kann so bereits während der offline durchgeführten Bahnplanung sowohl den Prozess hinsichtlich möglicher Gefahren durch Kollisions-, Quetsch- oder Schwerstellen untersuchen als auch die Roboterbahnen ergonomisch an den Menschen angepasst gestalten.

Begleitung der Demonstratorumsetzung unter ergonomischen und arbeitssicherheitstechnischen Aspekten

Die Entwicklung des Demonstrators richtet sich nach Kriterien der mittelständischen Wirtschaft, dies bedeutet eine starke Orientierung an der rein manuellen Durchführung der Schweißstätigkeit. Hier gilt die Prämisse, dass möglichst viele der bisher notwendigen manuellen Handhabungsaufgaben durch die Roboter ausgeführt werden, während der Mitarbeiter weiterhin im Mittelpunkt der Arbeitsaufgabe steht, sich nun aber voll auf die Schweißstätigkeit und die Schweißnahtqualität konzentrieren kann. Bereits in der Offlineprogrammierung werden die CAD-Datensätze für die zu schweißende Konstruktion herangezogen, um die Arbeitsablaufplanung und die Roboterassistenz möglichst optimal zu planen und zu simulieren.

Um eine angepasste und möglichst direkte Roboterassistenz zu ermöglichen, wurde ein durchgängiges Sicherheitskonzept vor allem für den Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion ohne trennende Schutzeinrichtungen entwickelt. Aufgrund des zu erwartenden hohen Aufwandes und der Sensibilität des OTS-Komplexes ist eine separate Behandlung sicherheitsrelevanter Themen unabdingbar. Die Aufgaben der Professur für Arbeits- und Produktionssystem lagen hier vordergründig im Bereich der Arbeitssicherheit.

Dieser Punkt ist von zwei Ebenen aus zu betrachten. Zum einen die frühzeitige Analyse der Arbeitssicherheit in der Offlineprogrammierungsumgebung FAMOS. Hier steht die Bahnplanung in Kombination mit der Kollisionsberechnung und einem digitalen Menschmodell im Vordergrund, um frühzeitig die Betriebssicherheit zu Gewährleisten. Zum anderen die Realzeitüberwachung des gesamten Prozesses durch optische Sensoren. Neue Sicherheitssteuerungen für die Roboter sowie technische Weiterentwicklungen im Bereich der Sensorik ermöglichen es einen sicheren Betrieb ohne trennende Schutzeinrichtungen einzurichten. Oberstes Ziel für eine sichere Mensch-Roboter-Interaktion mit kollaborierenden Arbeitsräumen ist der Schutz des Mitarbeiters. Durch das Sicherheitssystem muss stets sichergestellt sein, dass eine Gefährdung des prozessintegrierten Mitarbeiters ausgeschlossen ist und der Zutritt weiterer Personen sicher erkannt wird. Eine weitere Anforderung ist eine flexible Anpassbarkeit der Sicherheitskonfiguration an die verschiedenen Phasen im roboterassistierten Schweißbetrieb. Werden von den Handhabungsrobotern neue Bauteile von der Bereitstellung geholt, soll dies ökonomisch bedingt mit hoher Geschwindigkeit erfolgen, der Mitarbeiter muss sich dafür in einem sicheren Abstand außerhalb des Gefahrenbereichs befinden. Im eigentlichen Schweißprozess hingegen ist die Kollaboration von Mensch und Roboter gewünscht, die Roboter dürfen sich dann nur mit

reduzierter und kontrollierter Geschwindigkeit bewegen. Für die Entwicklung eines praxisnahen Assistenzsystems wird für die Arbeitsraumüberwachung ein redundantes, optisches und von der Berufsgenossenschaft abgenommenes Kamerasystem der Fa. Pilz eingesetzt. Das System „SafetyEye“ betrachtet den Arbeitsbereich aus einer Perspektive und ermöglicht den Wechsel zwischen verschiedenen Konfigurationen bei verschiedenen Prozesszuständen. Versuche zeigten jedoch, dass auch dieses kamerabasierte System Grenzen bei optischen Immissionen aufweist und zu Pseudofehlern führt. In Folge dessen wird das System im Rahmen des Projektes getestet und gegebenenfalls das Gesamtsystem angepasst. Zu analysierende Immissionen sind unter anderem äußere Lichteinflüsse bedingt durch den Fügeprozess, die durch das Schweißen entstehende Rauch- und Funkenbildung sowie Vibrationen der Sensoreinheit.

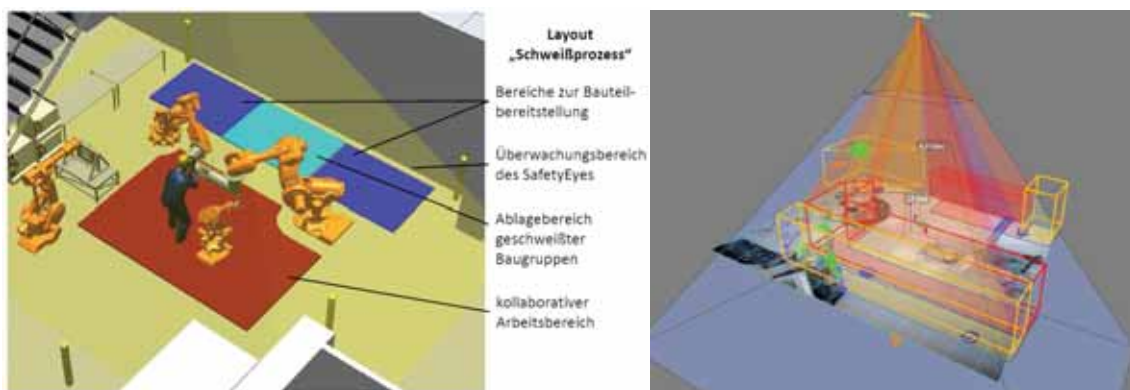


Abbildung 35: Fertigungslayout des Demonstrators (l) und aufgespannter Überwachungsbereich des Pils SafetyEye mit Sicherheitszonen (r)

*Sicherheitskonzept des Demonstratoraufbau
siehe auch Schlussbericht IRPA*

Für beide Referenzbaugruppen wurde der Schweißprozess bereits in Offlinemodellen des Roboterassistenzsystems simuliert (Abbildung 36) und geeigneten Arbeitspositionen und belastungsreduzierte Körperhaltungen virtuell erprobt (Abbildung 37). Diese Simulationsmodelle werden auch für den Aufbau, die Erprobung und die Optimierung des implementierten Menschmodells und der Humansimulation eingesetzt. Die durchgeführten Simulationen für beide Referenzprozesse bildeten die Grundlage für die Einrichtung der Anlage.

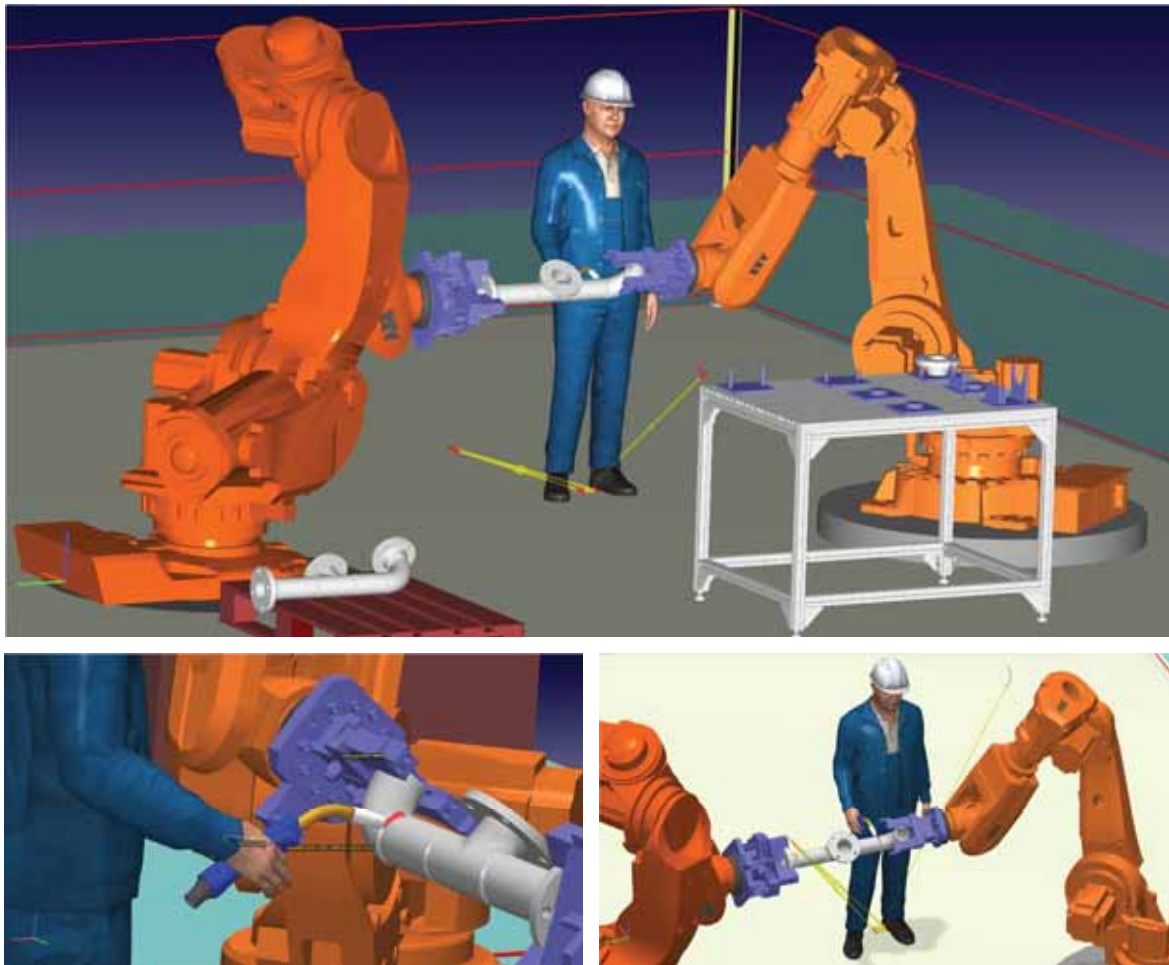


Abbildung 36: Offlinesimulation des Schweißprozesses der Referenzbaugruppe MAN

Hierbei hat sich gezeigt, dass der Einsatz des Menschmodells bereits bei der Offlinesimulation eine ergonomisch sinnvolle und für die Mitarbeiter belastungsreduzierte Bahnplanung der Roboter ermöglicht. Auch Kollisionsgefahren und mögliche Schwer- und Quetschstellen konnten durch das integrierte Menschmodell früh erkannt und mögliche Gefahren gezielt reduziert werden.

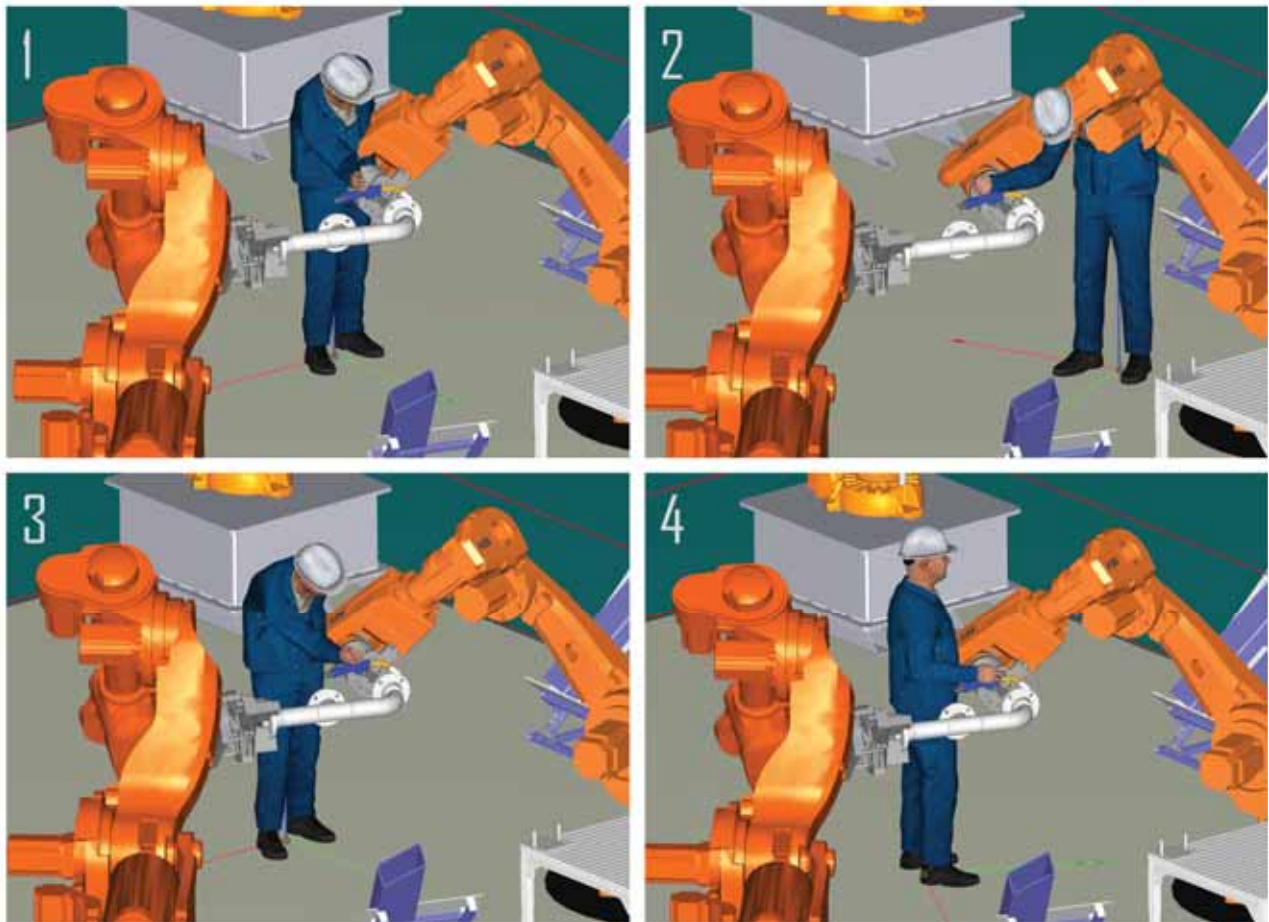


Abbildung 37: Haltungsanalyse in FAMOS am Beispiel „Schweißen Rohrflansch“

Im Anschluss an die Simulationsstudien wurde die Bahnplanung auf den realen Demonstrator im Technikum des Instituts für Produktionssysteme an der TU Dortmund übertragen. Nachfolgende Abbildungen geben einen Eindruck in die Validierungsphase und ziehen einen bildlichen Vergleich zu den rein manuellen Prozessschritten wie sie derzeit bei den Anwenderunternehmen MAN und Böcker ablaufen. Die Prozessvalidierung am Demonstrator wurde für die Analysen videotechnisch aufgezeichnet, so dass abschnittsweise Abgleiche mit der Offlinesimulation möglich wurden. Die entwickelten Anlagenkonzepte und -komponenten wurden an der Technischen Universität Dortmund im Jahr 2011 zunächst ausgerichtet am Schwerpunkt des Rahmenbaus realisiert und im Jahr 2012 für die Referenzprozesse des Rohrbaus umgesetzt. In der Test- und Validierungsphase wurde in einem ersten Schritt die ausgewählte Referenzbaugruppe des Anwendungspartners Böcker Maschinenwerke GmbH verwendet. Dabei konnte gezeigt werden, dass die gewählte Baugruppe am Demonstrator erfolgreich geschweißt werden kann. Im nächsten Schritt erfolgte eine Auswertung der benötigten Prozesszeit, der ergonomischen Bedingungen und der Produktqualität, um einen Vergleich zu dem zuvor rein manuell ausgeführten

Schweißprozess aufstellen zu können. Es konnte eine deutliche Verkürzung der Prozesszeit durch den nahezu vollständigen Wegfall manueller Handhabungsaufgaben sowie eine in Summe deutlich reduzierte Körperbelastung durch ergonomisch günstigere Körperhaltungen nachgewiesen werden.

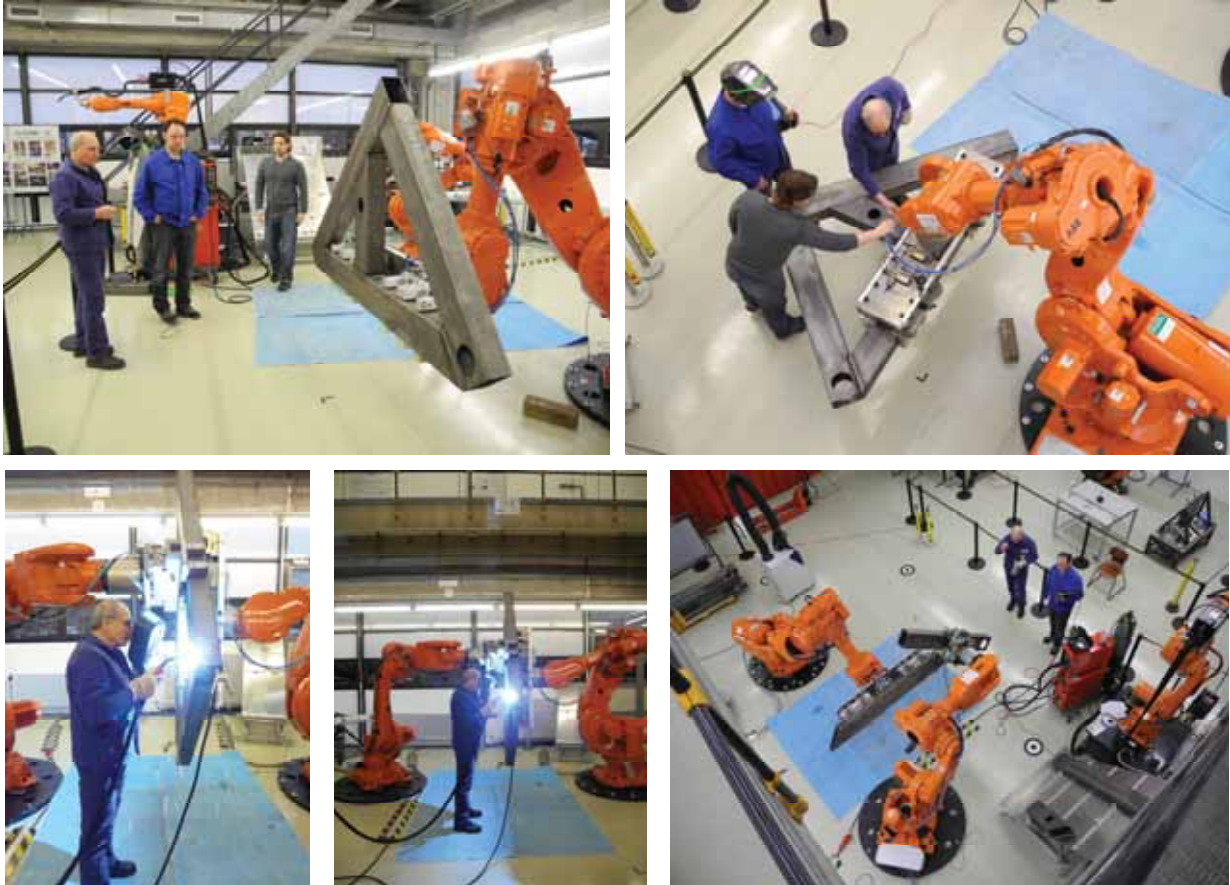


Abbildung 38: Versuchsanordnung für das Referenzbauteil der Böcker Maschinenwerke GmbH



Abbildung 39: Schweißablauf Rahmenbauteil im Vergleich: Manuell ↔ Roboterassistiert

Nach der ersten Testphase mit der Referenzbaugruppe der Firma Böcker wurde das System im Jahr 2012 mit der Referenzbaugruppe der Firma MAN validiert, um das System hinsichtlich seiner Eignung für Rohrkonstruktionen zu überprüfen. Auch diese Baugruppe konnte im Demonstrator erfolgreich gefertigt werden.



Abbildung 40: Versuchsanordnung für das Referenzbauteil der MAN Diesel & Turbo SE



Abbildung 41: Schweißablauf Rohrbaugruppe im Vergleich: Manuell ↔ Roboterassistiert

Das entwickelte Sicherheitskonzept wurde auf den Demonstrator übertragen und erprobt. Dazu gehörten insbesondere die Installation und Inbetriebnahme der Sicherheitseinrichtungen, d. h. Parametrierung der Kamerasensorik und die Anpassungen für die Robotersteuerung bzw. das Roboterprogramm. Insbesondere die starke Orientierung des Fertigungsablaufes an der rein manuellen Durchführung der Schweiß Tätigkeit muss hierbei berücksichtigt werden. Hier gilt die Prämisse, dass möglichst viele der bisher notwendigen manuellen Handhabungsaufgaben durch die Roboter ausgeführt werden, während der Mitarbeiter weiterhin im Mittelpunkt der Arbeitsaufgabe steht, sich jedoch nun voll auf die Schweiß Tätigkeit und die Schweißnahtqualität konzentrieren kann. Der dafür notwendige Aufbau eines durchgängigen Sicherheitssystems ohne trennende Schutzeinrichtungen erfordert eine Adaptierung gängiger Sicherheits- und Maschinenrichtlinien auf Roboterassistenzsysteme. Zugleich muss eine Bewertung der rechtlichen Aspekte bezogen auf diese neue Art von Arbeitsstätte erfolgen. Hierbei konnte das Konsortium auch auf die Unterstützung der Begleitforschung zurückgreifen und die rechtlichen Aspekte auf dem Workshop „Rechtliche Aspekte und funktionale Sicherheit in der Autonomik“ am 03. Februar 2012 an der Juristischen Fakultät der Julius-Maximilians-Universität, Würzburg (Prof. Eric Hilgendorf) diskutieren und bewerten. Gerade aufgrund des zu erwartenden hohen Aufwandes und der Sensibilität des Themas Arbeitssicherheit in Mensch-Roboter-Systemen ohne trennende Schutzeinrichtungen ist eine separate Behandlung rechtlicher und sicherheitsrelevanter Themen unabdingbar.

Die Entwicklung und Umsetzung des Demonstrators wurde durch die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme mit einer begleitenden Analyse möglicher Fehler und Risiken unterstützt. Mögliche Schwachstellen bezogen auf Einfluss, Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit wurden im Konsortium bewertet und Maßnahmen zu deren

Vermeidung entwickelt. Die Professur für Arbeits- und Produktionssysteme überprüft hierbei in erster Linie die Sicherheit der im System arbeitenden Mitarbeiter.

Sowohl die geltende Maschinenrichtlinie als auch die DIN-Normen und die BG-Richtlinien machen Vorgaben und zeigen Regeln auf, die für die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im kollaborativen Betrieb gelten müssen. Auf dieser Basis wurden Gefährdungen kategorisiert, beschrieben und bezogen auf den Anwendungsfall des rorarob an Anwendungsbeispielen erläutert. Die Gefährdungen können unterteilt werden in: Mechanische Gefährdungen, Elektrische Gefährdungen, Thermische Gefährdungen, Gefährdungen durch Vibration, Gefährdung durch Strahlung, Gefährdungen durch Materialien und Substanzen, Ergonomische Gefährdungen, Gefährdungen im Zusammenhang mit der Einsatzumgebung der Maschine, Kombination von Gefährdungen und Gefährdungen im Zusammenhang mit dem kollaborierenden Betrieb. An Hand dieser aus den Normen und Richtlinien abgeleiteten Gefährdungskategorien konnten anschließend Sicherheitsanweisungen für die Arbeit im Assistenzsystem rorarob abgeleitet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J											
1	 Fehlermöglichkeiten und Einflussanalyse Roboterassistenzsystem rorarob										FMEA-Nr.:										
2																					Seite:
3																					Abt.:
4																					Datum:
5	Fragestellung der Analyse:		Arbeitssicherheit des Roboterassistenzsystems		Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:												
6					Änderungsstand:		Fema:		Datum:												
7	System-Nr./Systemelement:				Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:												
8	Funktion/Aufgabe:				Änderungsstand:		Fema:		Datum:												
9	Mögliche Fehlerfolgen	Mögliche Fehler / Fehlfunktion	Mögliche Ursachen	Vermeldungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	VIT												
10	Nr. 1										Anfangsstand:										
11	Gefährdung des Mitarbeiters durch Kollision mit dem Roboter	10	Fehler in der Robotersteuerung	Programmierfehler	Installation und Konfiguration einer redundanten Sicherheitssteuerung (bsp. SafeMove ABB)	5	Signalisierung über Handbedengerät / Warmlampe (bei installierter Sicherheitssteuerung)	3	150												
12			technischer Defekt	Verwendung redundanter Systeme mit geeigneter Performanceklasse	2		1	20													
13			Sicherheitssystem reagiert nicht auf Eintritt des Mitarbeiters	Betriebsmodi (Sicherheitszonen) nicht korrekt konfiguriert	Überprüfung und Dokumentation der Sicherheitskonfiguration vor Inbetriebnahme (4 Augen Prinzip)	5	Einführung Routinechecks / Systemcheck vor Arbeitsbeginn	8	400												
14	Nr. 2																				
	Anlage läuft nicht an	1	Mitarbeiter befindet sich in Sicherheitszone	Sicherheitsbereiche sind nicht visualisiert	Visualisierung der Gefährdungsbereiche /	8	Optische Arbeitsraumüberwachung zur	1	8												

Abbildung 42: FMEA Roboterassistenzsystem rorarob

III.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zusammengefasst.

Tabelle 5: Zuwendungsfähige Personalkosten und mit der Pauschale abgeglichene Kosten

Position / Ausgabenart	Kosten / Ausgaben im Jahr 2009 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2010 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2011 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2012 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2013 [€]	Gesamtkosten/ Ausgaben [€]
0812	12.156,99	73.081,88	51.661,49	58.680,91	14.195,19	209.776,46
0822	1.191,22	12.925,17	8.573,42	6.113,31	833,56	29.636,68
0846	-	2.624,70	3.937,85	2.638,09	291,40	9.536,06
0843	5.665,31					5.665,31
Gesamt						254.614,51

III.3 Öffentlichkeitsarbeit

Während der Projektlaufzeit erfolgte durch die Professur für Arbeitsproduktionssysteme und die Professur für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung ein kontinuierlicher Transfer der Projektergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft. Die zahlreichen Aktivitäten werden auch über die Projektlaufzeit hinaus fortgeführt und sind nachfolgend aufgeführt:

Demonstratorpräsentationen / Fachtagungen

Das Institut für Produktionssysteme hat den Demonstrator des Forschungsprojektes ror-rob bei den „ABB Robotics Value Provider Conference and Customer Days 2013“ am 18. und 19.06.2013 in der Mainzer Phönixhalle präsentiert.



Abbildung 43: ror-rob-Demonstration in der Phönixhalle, Mainz

Die ABB Robotics Value Provider Conference and Customer Days ist ein zweieinhalbtägliches Event für Partner und Endkunden von ABB Robotics, das dieses Jahr zum 15. Mal und zum ersten Mal in Deutschland erfolgte. In den Messetagen hatten insgesamt 520 Gäste aus 25 Ländern die Möglichkeit, Innovationen der Robotertechnik an 38 Demonstratoren aus verschiedenen Ländern Europas zu erleben. Während der Messetage konnten sich die Gäste live am rorarob-Demonstrator live die Mensch-Roboter-Kollaboration, die kooperierende Zusammenarbeit beider Roboter sowie die ergonomischen Vorteile des hybriden Prozesses anschauen.

Verschiedene Vorträgen und Workshops ermöglichten den Erfahrungsaustausch über aktuelle Themen in der Robotik.



Abbildung 44: Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund

Am 05. März 2013 fand am Institut für Produktionssysteme der TU Dortmund die Fachtagung „Einbindung des Menschen in automatisierte Produktionsprozesse – wirtschaftlich, flexibel, gesund“ im Rahmen des Forschungsprojektes rorarob statt. Über 70 interessierte Fachbesucher aus Industrie und Wissenschaft informierten sich über die technischen Entwicklungen und Fortschritte des Institutes auf dem Gebiet der roboterbasierten Assistenzsysteme mit direkter Mensch-Roboter-Kollaboration. Im Anschluss konnten die Besucher der Fachtagung den Einsatz eines industriellen Serviceroboters für Schweißaufgaben live erleben, bei der ein Mitarbeiter des Projektpartners MAN eine Rohrbaugruppe assistiert durch zwei Industrieroboter zusammenfügte. Das Robotersystem übernimmt hierbei die Handhabung und Ausrichtung der Rohrkomponenten in einer ergonomischen Position und bewegt die Bauteile so, dass der Mitarbeiter immer in Vorzugslage schweißen kann. Im Technikum des Institutes konnten die Besucher zudem weitere Demonstratoren besichtigen, zum Beispiel Systeme zur Prozess- und Bauteilvermessung, den automatisierten Griff in die Kiste oder ein System zur flexiblen Bauteilbereitstellung. Der Nachmittag wurde mit Vorträgen zum Zusammenspiel von Mensch und Technologie im Kontext des Industrial

Engineerings und aktuellen Trends in der Automatisierungstechnik gestaltet und war durch spannenden Diskussionen zu Fragenstellungen der Mensch-Technik-Interaktion geprägt.

	
<h2>Programm</h2>	<h2>Referenten</h2>
<p>09:30 Uhr Kaffee/Brötchen</p> <p>10:00 Uhr Begrüßung</p> <p>10:15 Uhr „rorarob – Robotergestützte Assistenzsysteme für die Produktion“, Prof. Dr.-Ing. Gerd Grube & Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter</p> <p>11:00 Uhr Transfer zum Technikum</p> <p>11:15 Uhr Präsentation des Demonstrators</p> <p>12:00 Uhr Mittagspause (inkl. Zeit für Gespräche)</p> <p>13:30 Uhr „Hybride Montage mit Robotereinsatz für satzweisen Montageablauf“, Prof. Bruno Lotter</p> <p>14:15 Uhr „Zusammenspiel von Mensch und Technologie im Anwendungsfeld des Industrial Engineering“, Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse</p> <p>14:45 Uhr Kaffeepause (Zeit für Gespräche)</p> <p>15:00 Uhr „Innovative Montagetechnik und neue Wege zur virtuellen Anlagenplanung“, Ralf Becker</p> <p>15:30 Uhr Fazit & Abschlussmoderation (Ende 16:00 Uhr)</p> <p>→ Moderation: Pascal Lampe</p>	<p>→ Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse ist Inhaber der Professur für Arbeits- und Produktionssysteme am Institut für Produktionssysteme an der TU Dortmund. Arbeitsschwerpunkte sind Themen rund um das Industrial Engineering, wie Arbeitssystemgestaltung und Digitale Fabrik. Umfangreiche praktische Erfahrungen sammelte er über mehrere Jahre innerhalb der Bosch Gruppe.</p> <p>→ Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter ist Inhaber der Professur für industrielle robotik und Produktionsautomatisierung am Institut für Produktionssysteme an der TU Dortmund. Arbeitsschwerpunkte sind die Themen Industrielle Robotersysteme, Simulation von robotergestützten Bearbeitungsprozessen und benutzerfreundlichen Programmier- und Simulationssysteme für die Robotik. Vor seiner Tätigkeit an der TU Dortmund verantwortete er den Bereich Product Management & Technology bei der ABB Robotics.</p> <p>→ Prof. Dr.-Ing. Gerd Grube ist geschäftsführender Gesellschafter des im Jahre 1992 gegründeten Robotersystemhauses carat robotic innovation gmbh. Die carat konnte seit dem ca. 420 Roboterlösungen und über 280 Offline-Programmiersysteme im Produktionsschwerpunkt „Bearbeitung“ in unterschiedlichen Branchen erfolgreich in Betrieb nehmen.</p> <p>→ Prof. Bruno Lotter war lange Jahre Geschäftsführer eines international tätigen Unternehmens der Feinwerktechnik und ein bekannter Hochschullehrer. Er ist darüber hinaus Autor, Vortragender und Berater zum Thema Montage. Seine langjährige Erfahrung ist in zahlreichen Büchern, Aufsätzen sowie Forschungs- und Praxisprojekten dokumentiert.</p> <p>→ Ralf Becker war Gründer und Entwickler des Themenfeldes „Produktentwicklung für Additive Manufacturing“ und 7 Jahre Projektleiter in diesem Forschungsgebiet am Fraunhofer IPA. Der Diplom-Ingenieur (Feinmechanik & Mechatronik) und Produktdesigner ist Leiter der Vorentwicklung der Firma schunk gmbh & co. kg, Lauffen/Neckar (Spann- und Greiftechnik) mit einem Fokus auf Additive Manufacturing für die Industrie.</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Prof. Dr.-Ing. J. Deuse</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Prof. Dr.-Ing. B. Kuhlenkötter</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Prof. Dr.-Ing. G. Grube</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Prof. Bruno Lotter</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Ralf Becker</p> </div> </div> </div>

Abbildung 45: Programm der Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund

Am 12. Juli 2011 wurden auf der Fachtagung „Mensch-Roboter-Kooperation“ die bisherigen Ergebnisse aus dem Projekt einer breiten Öffentlichkeit präsentiert. Die Fachtagung „Mensch-Roboter-Kooperation“ an der TU Dortmund bot den zahlreichen Teilnehmern aus Industrie und Forschung ein interessantes Forum, neue Ansätze und technische Lösungen auf dem Gebiet der hybriden Arbeitssysteme zu diskutieren. Neben spannenden Fachvor-

trägen ausgewählter Referenten aus Forschung und Industrie wurde die Tagung ergänzt durch die Demonstration des robotergestützten Assistenzsystems für manuelle Schweißaufgaben, welches im Rahmen des Forschungsvorhabens rorarob - Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem entwickelt wird. Dabei wurden die technische Lösungen, die Machbarkeit und eine sichere Kooperation von Mensch und Industrieroboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum demonstriert.

	
Programm	Referenten
<p>10:00 Uhr Kaffee/Brötchen</p> <p>10:30 Uhr Begrüßung</p> <p>10:45 Uhr „Evolution hybrider Arbeitssysteme – Potentiale einer direkten Mensch-Roboter-Kooperation“, Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse</p> <p>11:15 Uhr „Das neue Normenfundament für sichere Industrieroboter und Mensch-Roboter-Kooperation“, Dr. Björn Matthias</p> <p>12:00 Uhr „Mensch-Roboter-Kollaboration – auf dem Weg in die industrielle Praxis“, Michael Lebrecht</p> <p>12:45 Uhr Mittagspause</p> <p>13:45 Uhr Transfer zum Technikum</p> <p>14:00 Uhr „Präsentation des Demonstrators rorarob – ein Mehrrobotersystem als Assistenz im Schweißprozess“, Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter</p> <p>15:00 Uhr Transfer zum Campus-Treff (Inklusive Kaffee/Diskussion)</p> <p>15:30 Uhr „Offline-Programmierung: Kooperierende Roboter in hybriden Arbeitssystemen“, Prof. Dr.-Ing. Gerd Grube</p> <p>16:00 Uhr Fazit & Abschlussmoderation (Ende 16:30 Uhr)</p> <p>→ Moderation: Pascal Lampe</p>	<p> → Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse ist Inhaber des Lehrstuhls für Arbeits- und Produktionssysteme (APS) an der TU Dortmund. Arbeitsschwerpunkte sind Themen rund um das Industrial Engineering, wie Arbeitssystemgestaltung und Digitale Fabrik. Umfangreiche praktische Erfahrungen sammelte er über mehrere Jahre innerhalb der Bosch Gruppe.</p> <p> → Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter leitet den Lehrstuhl für industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (IRPA) an der TU Dortmund. Schwerpunktthemen des Lehrstuhls sind industrielle Robotersysteme, Simulation von robotergestützten Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen und die Entwicklung benutzerfreundlicher Programmier- und Simulationssystemen für die Robotik. Vor seiner Tätigkeit an der TU Dortmund verantwortete Prof. Kuhlenkötter den Bereich Product Management & Technology bei der ABB Robotics.</p> <p> → Prof. Dr.-Ing. Gerd Grube ist geschäftsführender Gesellschafter des im Jahre 1992 gegründeten Robotersystemhauses carat robotic innovation gmbh. Die carat konnte seit dem ca. 400 Roboteranlagen und über 250 Offline-Programmiersysteme im Produktionsschwerpunkt „Bearbeitung“ in unterschiedlichen Branchen erfolgreich in Betrieb nehmen.</p> <p> → Michael Lebrecht ist Leiter der robotik und technologiesteuerungen (produktions- und werkstofftechnik) der daimler ag. Schwerpunkte seiner Arbeit sind Verfahrensentwicklung, Automatisierungstechnologie und Simulation der Produktions- und Werkstofftechnik.</p> <p> → Dr. Björn Matthias ist Senior Principal Scientist „Robotic Automation“ des ABB AG Forschungszentrums deutschland. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen derzeit in den Bereichen Sicherheit von Industrierobotern, Grundlagen und Applikationen von Mensch-Roboter-Kooperation und eigensichere Roboter.</p>

Abbildung 46: Programm der Fachtagung am 11. Juli 2011 am IPS, Dortmund

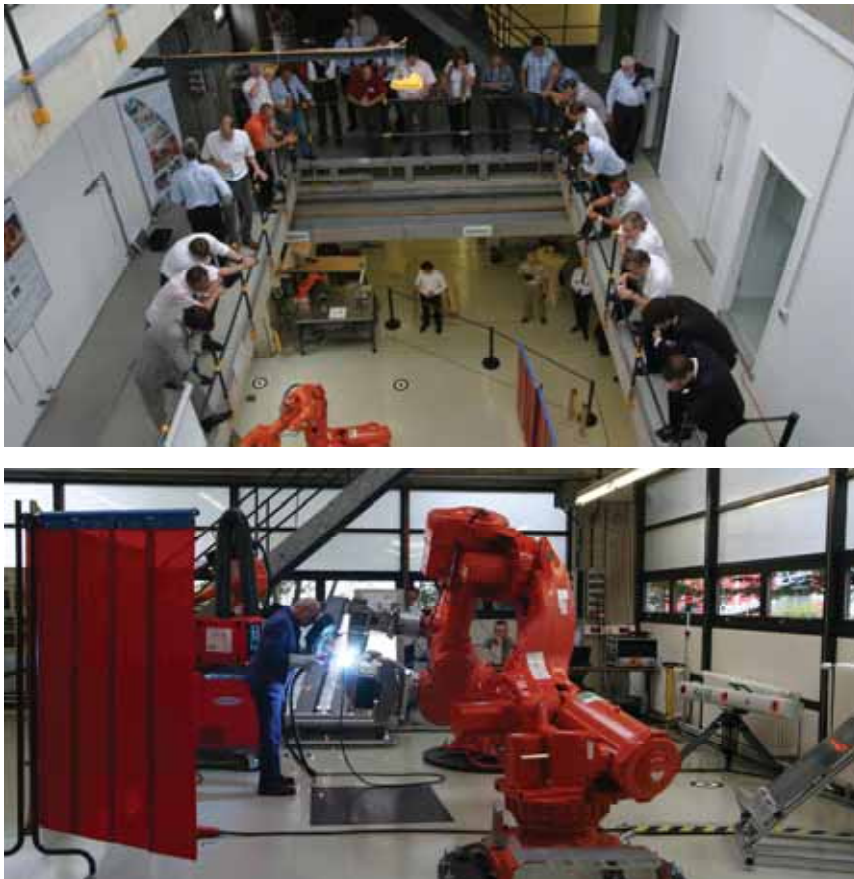


Abbildung 47: Fachtagung am 5. März 2013 am IPS, Dortmund

Konferenzbeiträge

Das Projekt rorarob wurde während der Projektlaufzeit auf zahlreichen nationale und internationale Konferenzen vorgestellt und diskutiert. Die veröffentlichten Publikationen zu den Projektergebnissen sind nachfolgend aufgeführt:

- Busch, F.; Wischniewski, S.; Deuse, J.: Application of a character animation SDK to design ergonomic human-robot-collaboration. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Digital Human Modeling (DHM2013), Ann Arbor, Michigan (USA), 11.-13.06.2013, PaperID_99
→ Verleihung des “Best Poster Awards”
- Busch, F.; Thomas, C.; Deuse, J.; Kuhlenkötter, B.: Development of a Hybrid Robot Assistance System for Welding of Assemblies. Posterpräsentation, Robotik 2012, 21.-22. Mai 2012, München
- Busch, F.; Thomas, C.; Deuse, J.; Kuhlenkötter, B.: A Hybrid Human-Robot Assistance System for Welding Operations – Methods to Ensure Process Quality and Forecast Ergonomic Conditions In: Hu, S. Jack (Hrsg.): Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization - Proceedings of 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS) 2012, 20.-22.05.2012, Ann Arbor, University of Michigan, Michigan, USA, ISBN 978-0-615-64022-8, S. 151-154

- Thomas, C.; Busch, F.; Kuhlenkoetter, B., Deuse, J.: Process and Human Safety in Human-Robot-Interaction – A Hybrid Assistance System for Welding Applications In: Jeschke, S.; Liu, H.; Schilberg, D. (Hrsg.): Intelligent Robotics and Applications - Proceedings of 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA2011), 06.-09.12.2011, Aachen, Germany, Verlag Springer Berlin/Heidelberg/New York, ISBN 978-3-642-25485-7, S. 112-121
- Thomas, C.; Busch, F.; Kuhlenkötter, B.; Deuse, J.: Ensuring Human Safety with Offline Simulation and Real-time Workspace Surveillance to Develop a Hybrid Robot Assistance System for Welding of Assemblies In: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability - Proceedings of 4th CIRP Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011), 2.-5. Oktober 2011, Montreal, Canada, Verlag Springer Berlin/Heidelberg/New York 2011, ISBN: 978-3-642-23859-8, S. 465-470
- Thomas, C.; Busch, F.; Kuhlenkötter, B.; Deuse, J.: Gewährleistung der Humansicherheit durch optische Arbeitsraumüberwachung in der Mensch-Roboter-Kollaboration In: VDI-Berichte 2143 – Automation 2011 (28.-29.06.2011) in Baden-Baden, VDI-Verlag, Düsseldorf 2011, S. 259-262
- Busch, F.; Deuse, J.: Ergonomische Bewertung von manuellen Schweiß Tätigkeiten mittels Automotive Assembly Work Sheet (AAWS) In: Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess - 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., 23.-25.3.2011, GfA-Press, Dortmund, S. 585-588.
- Thomas, C.; Kuhlenkötter, B.: Sichere und kollaborierende Mensch-Roboter-Interaktion – Entwicklung eines robotergestützten Assistenzsystems für das Handling im Schweißprozess, Internationales Forum Mechatronik (IFM) 2010, 03.-04.11.2010, Winterthur (Schweiz), ISBN 978-3-033-02655-1
- Thomas, C.; Brüninghaus, J.: Einsatz kooperierender Mehrrobotersysteme in neuen Anwendungsfeldern, Beitrag zum KooperationsForum Automatisierung und Robotertechnik, veranstaltet von MST Aerospace GmbH. 06.10.2010, Köln
- Thomas, C.; Busch, F.; Kuhlenkötter, B.; Deuse, J.: Safe and Ergonomic Collaboration of Humans and Robots for Welding of Assemblies, Proceedings of 3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS) 2010 “Responsive, customer demand driven, adaptive assembly”, 01.-03.06.2010, Trondheim (Norwegen), S. 121 - 125.

Vorträge

Während der Projektlaufzeit und darüber hinaus werden die Ergebnisse kontinuierlich in Vorträgen auf Tagungen einem breiten Fachpublikum vorgestellt:

- Busch, F.; Wischniewski, S.: Humansimulation zur Gestaltung individualisierter Produktionsarbeit der Zukunft. 1. Symposium: Digitale Menschmodellierung zur Optimierung von Prozessen in Entwicklung, Produktion und Service, Netzwerk Automobilzulieferer Sachsen (AMZ) / RKW Sachsen GmbH, Leipzig
geplant
- Busch, F.: Digitale Belastungsanalyse in der Offlinesimulation von Systemen mit direkter Mensch-Roboter-Kooperation, 9. Fachtagung „Digitale Fabrik@Produktion – Zwei Welten wachsen zusammen“ am 05.-06.11.2013, Automobil Produktion / SV-Veranstaltungen, Berlin
geplant
- Thomas, C.: Direkte Mensch-Roboter-Kollaboration in einem Mehrrobotersystem zur Schweißassistenz. Fachseminar Sichere Mensch-Maschine-Kooperation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), 18.04.2012, Erlangen
- Thomas, C.: Social Implications in Manufacturing Industry (IR@MI). Veranstalter: Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Presse

Frühzeitig wurde durch intensive projektbegleitende Pressearbeit das Projekt sowohl in Fachkreise als auch in der breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht:

- Busch, F.; Thomas, C.: rorarob - Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem. In: Productivity Management, 4/2012, GITO Verlag, Berlin, 2012
- „Stärken von Mensch und Roboter vereinen“, verlag moderne industrie GmbH – Produktion Nr. 23, August 2012
- Thomas, C.; Kühlenkötter, B.; Busch, F.; Deuse, J.: Mensch-Roboter-Kooperation - Humansicherheit im robotergestützten Assistenzsystem. In: atp edition 7-8 2011, 53. Jahrgang, Oldenbourg Industrieverlag, ISSN: 2190-4111, S. 54-61.
- „Assistenzroboter erleichtern dem Schweißer die Arbeit“ verlag moderne industrie GmbH – Produktion Nr. 8, Februar 2011
- „Roboter als Assistenzsystem“ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH – ATZonline, Februar 2011
- „Mensch und Roboter im Team“ schlütersche Verlagsgesellschaft mbh & Co. KG – BLECH 1/2011
- „Kollaborierende Roboter-Assistenten“ Konradin Mediengruppe - Automationspraxis Nr. 6, Juni 2010, Seite 7
- „Autonomik - Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Mai 2010, Seite 27

-
- rorarob Projektflyer, Januar 2010
 - "Mensch und Roboter arbeiten zusammen", unizet 01/10 Nr.414, S. 7, Dortmund
 - "Mensch und Roboter arbeiten zusammen" Industrie- und Handelskammer zu Dortmund - Ruhrwirtschaft 12/09, Dezember 2009, Seite 26
 - „Roboter für den Mittelstand“ Technologiezentrum Dortmund News, Dezember 2009, Seite 3
 - „Projektauftritt: „rorarob“ entwickelt Einsatz von Robotern in industrieller Produktion“ Pressemitteilung carat robotic innovation GmbH, Dortmund, November 2009

IV. Nutzen und Verwertung

Die zu Beginn durchgeführten Prozessaufnahmen und Analysen vor Ort bei den beteiligten Industriepartnern MAN Diesel & Turbo SE und Böcker Maschinenwerke GmbH haben deutlich gezeigt, dass die im Forschungsvorhaben behandelte Problemstellung weit verbreitet und somit die angestrebte Lösung in Form eines Roboterassistenzsystems zur Fertigung von Rohr- bzw. Rahmengenometrien und die ergonomische und informatorische Verbesserung der Arbeitssysteme zum manuellen Schweißen, insbesondere schwerer Bauteile, von hoher Relevanz ist (siehe Kapitel III.1 im Schlussbericht). Weiter wurde deutlich, dass der große manuelle Anteil und die niedrigen Wiederholhäufigkeiten in der Fertigung die Ausrichtung der Forschungsarbeiten an die Einsatz- und Randbedingungen von KMU bestätigen. Das Ziel, ein universal programmier- und flexibel einsetzbares Assistenzsystem zu entwickeln, das einen kollaborierenden Betrieb von Mensch und Roboter vorsieht und welches es ermöglicht, die bisher noch rein manuellen Prozesse in mehreren Stufen unter Einsatz der Robotertechnik zu automatisieren, bietet somit gerade für KMU die Perspektive, in Zukunft wirtschaftlicher zu arbeiten und dabei gleichzeitig die Qualität der Prozesse und Produkte zu erhöhen. Dieser neuartige, ganzheitliche und flexible Ansatz bietet durch seine Skalierbarkeit im industriellen Umfeld große Vermarktungschancen. Der entstandene, auf eine industrielle Anwendung ausgerichtete, Demonstrator an der TU Dortmund und der Verbundprojektspartner carat robotic innovation GmbH als Systemanbieter von roboterbasierten Automatisierungslösungen ermöglichen nach Projektende eine schnelle Übertragung der im Projekt erzielten Ergebnisse auf industrielle Lösungen innerhalb weniger Jahre.

Durch die Verwendung ausgereifter Einzelkomponenten im Demonstratoraufbau und die industriennahe Entwicklung des Demonstrators durch Einbindung direkter Mitarbeiter der beteiligten Anwenderunternehmen konnten die technischen Erfolgsaussichten und die Chancen für eine zeitnahe Weiterentwicklung hin zu einer marktfähigen Lösung verdeutlicht werden. Die auf den Fachtagungen im Jahr 2011 und 2013 demonstrierte vollständige Funktionsfähigkeit des Demonstrators und die Anwendung in einem realen Schweißprozess unterstreicht den weit fortgeschrittenen Reifegrad der entwickelten Lösung. Durch die Beteiligung des Systemanbieters carat robotic innovation GmbH wurde sichergestellt, dass sich die Entwicklungsarbeiten sowohl im Bereich der Offlinesimulation hybrider Roboterzellen als auch des Demonstratoraufbaus sehr stark an einer industriennahen Anwendung orientieren, wodurch gewährleistet ist, dass die erzielten Ergebnisse zeitnah in marktfähige Lösungen überführt werden können.

Die Implementierung einer Humansimulation auf Basis eines digitalen Menschmodells aus dem Bereich der Unterhaltungs- und Spieleindustrie stellt einen innovativen Ansatz dar. Im Rahmen des Projektes rorarob wird das implementierte Menschmodell zur Kollisionsanalyse bzw. Bahnplanung und frühzeitige ergonomischen Bewertung der direkten Mensch-Roboter Kooperation während des Schweißprozesses eingesetzt. Während der Entwicklung und Implementierung des Menschmodells hat sich gezeigt, dass die entwickelte Humansimulation innerhalb der Offlineprogrammiersystems FAMOS geeignet ist, um einen im Vergleich zu bestehenden Softwarelösungen neuartigen Ansatz zur Modellierung und Simulation menschlicher Arbeit in einem virtuellen Arbeitsraum zu verfolgen. Im Mittelpunkt steht dabei die Zusammensetzung einer manuellen Bewegungssequenz als Kombination aus vorgefertigten, und in einer Datenbank abgelegten Verrichtungen (Motion Captures) und der Berechnung individueller Hand-Arm-Bewegungen. Dieser Ansatz verspricht einen im Vergleich zu bestehend Lösungen deutlich reduzierten und vereinfachten Modellierungsaufwand bei der Simulation menschlicher Arbeit. Bisher verzichten viele Unternehmen aufgrund der aufwendigen Programmierung und der meist mit hohen Investitionen verbundenen Softwarelösungen auf die Nutzung digitaler Menschsimulationen. Die angestrebte Lösung, umgesetzt in der werkstattnahen Simualtionsumgebung FAMOS, trägt somit auf lange Sicht zu einer stärkeren Nutzung von Humansimulationen zur Planung und Analyse manueller Arbeitsprozesse, insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen, bei.

Die Ergebnisse und Lösungskonzepte für einen Betrieb von Robotern ohne trennende Schutzeinrichtungen in Zusammenhang mit einer direkten Mensch-Roboter-Kooperation, welche aus dem industrienahen Versuchsaufbau an der TU Dortmund hervorgehen, sind für die grundlegende Weiterentwicklung der Mensch-Roboter-Assistenz von wesentlicher Bedeutung. Auch der Bereich der digitalen Planung, insbesondere die virtuelle Abbildung der Mensch-Roboter-Kollaboration in einem Offlineprogrammiersystem, bietet auch über das Projekt hinaus vielfältige Ansätze zur Weiterentwicklung. Beispielhaft ist hier die Übertragung auf andere robotergestützte Arbeitssysteme mit anderen Fertigungsverfahren zu nennen (Kleben, Bestücken, Montieren, Schrauben, etc.), ebenso ist auch die Simulation einer rein manuellen Tätigkeit mit Hilfe einer Humansimulation denkbar.

Durch die Erweiterung des Anwendungsfeldes werden die Ergebnisse unter anderem in Folgeprojekten an den Professuren für Arbeits- und Produktionssysteme und Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung über das Projektende hinaus zu Erkenntnissen führen, die von gesamtwirtschaftlicher Relevanz sind. Insbesondere liefert das Verbund-

projekt auch zu Fragen der Einbeziehung ergonomischer und hier speziell physiologischer und sicherheitstechnischer Belange in die Planung und Realisierung von Automatisierungsanlagen neue Ansätze. Da der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Untersuchung von Sicherheitsaspekten in der Mensch-Maschine-Interaktion alternativlos ist, werden durch die Integration der Humansimulation in die Offline-Programmierung neue Anwendungsfelder erschlossen. Die durch die robotergestützte Assistenz erreichte Flexibilität im soziotechnischen Arbeitssystem führte sowohl zu einer deutlichen Verkürzung der Durchlaufzeiten in der Fertigung durch den Wegfall von Handhabungsoperationen also auch zu einer deutlich reduzierten Belastung auf das Muskelskelettsystem. Hierdurch wurden eine enge Kopplung mit den Kundenanforderungen und die Anpassungsfähigkeit an veränderte Marktbedingungen möglich, wodurch Wettbewerbsvorteile entstehen. In der Konsequenz trägt das Verbundprojekt rorarob zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Anbietern und Nutzern automatisierter Fertigungssysteme sowohl im Rohr- und Rahmenbau als auch branchenübergreifend bei. Dies stärkt langfristig den Fertigungsstandort Deutschland. Volkswirtschaftlich betrachtet bietet der entwickelte Ansatz einer ergonomischen Roboterassistenz das Potential die Folgen des demografischen Wandels in Form der Leistungswandlung einzelner in der industriellen Fertigung und Montage zu kompensieren.

Die Professuren für Arbeits- und Produktionssysteme und Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung, seit 2012 zusammengeschlossen im Institut für Produktionssysteme (IPS), werden in diesem hoch innovativen, wachsenden Forschungsfeld auf den Ergebnissen aus rorarob aufbauen und die Entwicklungen weiter vorantreiben. In den dazu geplanten Forschungsvorhaben, unter anderem im Technologieprogramm „Autonomik für Industrie 4.0“, liegt der Fokus daher auf mehreren unterschiedlichen Anwendungsszenarien von Montage über Instandhaltung bis hin zur Landwirtschaft. Dabei sollen marktfähige Lösungen für industrielle Servicerobotik und Roboterassistenz direkt bei den Anwenderunternehmen vor Ort umgesetzt werden. Aus Sicht des Instituts ist dies die logische Weiterentwicklung aus rorarob heraus, um eine schnelle Verbreitung der erzielten Ergebnisse und eine hohe Akzeptanz roboterbasierter Assistenzsysteme zu gewährleisten.

Durch die gezielte Ansprache von Multiplikatoren können Projektergebnisse breit gestreut und unterschiedliche Branchen und Unternehmensgrößen angesprochen werden. Hier ist die Beteiligung des VDMA Robotik und Automation, das KMU-orientierte Netzwerk Industrie RuhrOst (NIRO) e.V. oder der Industriebeirat des MHI e.V. zu nennen.

Zum anderen findet durch die Übertragung der Projektfortschritte und -ergebnisse in Lehre und Forschung ein Wissenstransfer innerhalb der universitären Ausbildung statt. Hierbei wird vor allem auf die Einbindung der Ergebnisse in Vorlesungen und die thematische Weiterentwicklung von Teilaspekten im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten fokussiert. Somit wird der Praxisbezug der Lehre gesteigert und Ingenieure werden nach dem neuesten Stand der Erkenntnisse qualifiziert, um die erforderlichen Kompetenzen für die technologischen Entwicklungen der Zukunft erwerben zu können.

Mit den Fortschritten und Ergebnissen sollen darüber hinaus weitere wissenschaftliche und industrielle Projekte eingeworben werden. Das IPS stellt somit zusammenfassend den langfristigen wissenschaftlichen Erfolg in Form einer effizienten Umsetzung und Anwendung der Forschungsergebnisse sicher.

V. Literatur

- ABB <http://new.abb.com/de> (25.09.2013)
- BIA05 Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA : Kamerasysteme als Schutzeinrichtungen. In: Aus der Arbeit der BIA, Nr.: 0205, ISSN 1619-2826, 2005.
- Bic08 Bickendorf, J.; Roboter-Schweißen von Stahlbauprofilen mit Losgröße 1 „Schweißbaugruppenschnittstelle Stahlbau“ und Offline-Programmiersystem ermöglichen wirtschaftliche Automatisierung. VDI-Berichte Nr. 2012, Robotik 2008, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Bic93 Bickendorf, J.; Deuse, J.: MOSES1.1: Herr der Roboter (Offline-Programmierung und Simulation). In: Autocad Magazin 2/93.
- Bic94 Bickendorf, J.; Deuse, J.; Koch, I.: Wirtschaftliche Rohrbearbeitung mit Industrierobotern durch Offline-Programmierung. In: Der Praktiker 10/94, S. 545-548.
- Böcker www.boecker-group.com (25.09.2013)
- Bon95 Bongwald, O.; Luttmann, A.; Laurig, W.; Leitfaden für die Beurteilung von Hebe- und Tragetätigkeiten; Sankt Augustin: HVBG – Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften; 1995
- Car13 www.carat-robotic.de (24.09.2013)
- Deu06 Deuse, J.; Wischniewski, S.; Fischer, H.: Renaissance des Industrial Engineering - Methoden für die Umsetzung Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 1 / 2, S. 57-60.
- Deu07 Deuse, J.; Stausberg, J.; Wischniewski, S.: Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007) 5, S. 291-294.
- Deu08 Deuse, J.; Rother, M.: Standardisierung als Leitprinzip des Industrial Engineering – Vortrag im Rahmen der Fachtagung „Industrial Engineering zwischen Taylor und Toyota“, Dortmund, 10.06.2008.
- FAMOS www.famos-robotic.de (25.09.2013)
- Fra89 Franz, W. D.: Maschinelles Rohrbiegen, Düsseldorf: VDI 1989.

- God06 Godehardt, D.; Kuhlenkötter, B; und weitere: Verfahren zur effizienten Optimierung robotergestützter Schleif- und Polierprozesse, Gemeinsamer F&E-Abschlussbericht zum Verbundprojekt ePo, Hemer, 2006, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/563754869.pdf>.
- Gol08 Goldscheid, C.: Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen. In: Deuse, J. (Hrsg.): Schriftenreihe Industrial Engineering, Band 1. Aachen: Shaker, 2008.
- Gud09 Gudehus, T.; Entwicklung eines Verfahrens zur ergonomischen Bewertung von Montagetätigkeiten durch Motion-Capturing; Kassel University Press; Kassel; 2009
- Hel05 Helms, E.; Meyer, C.; Assistor - Mensch und Roboter rücken zusammen; in: wt Werkstattstechnik online; Band 95; Heft 9; S. 677–683; 2005
- Hel06 Helms, E.; Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen; Dissertation; Universität Stuttgart; Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (Hrsg.); 2006
- Hel07 Helms, E. ; Roboterbasierte Bahnführungsunterstützung von industriellen Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen. Dissertation Universität Stuttgart, 2007.
- Hen08 Henrich, D.; Fischer, M.; Gecks, T.; Kuhn, St. : Sichere Mensch / Roboter-Koexistenz und Kooperation. Robotik 2008, München.
- Hüp06 Hüppi, R.; Nielsen, E.; Grüninger, R.; Brom, C.; Effizienter Robotereinsatz schon bei kleineren und mittleren Serien; in: Tagungsband Internationales Forum Mechatronik; S. 323–342; Sonderausg. 2006
- IAD www.iad.tu-darmstadt.de (25.09.2013)
- IFA05 Institut für Arbeitsschutz: Occupational Risk Assessment of repetitive movements and Exertions of the Upper Limb (OCRA). In: BGIA-Report Sankt Augustin, 4, 2005, S. 47–50.
- IPS www.IPS.do (25.09.2013)
- Kho93 Khodayari, G.: Untersuchungen zum elastisch-plastischen Biegen von Rohrprofilen. Dissertation Universität Siegen, 1993.
- KUKA www.kuka.com (25.09.2013)

- Leh03 Lehr, R.; Frölich, W.; Methodenwerkzeug EAB zur Beurteilung körperlicher Arbeit; in: Zeitschrift für Arbeitswissenschaften; Band 57; Heft 2 (Sonderausg.); S. 73–91; 2003
- LMM <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefaehrdungsbeurteilung.html> (25.09.2013)
- MAN www.mandieselturbo.de (25.09.2013)
- Mat93 Mattila, M.; Analysis of working postures in hammering tasks on building construction sites using the computerized OWAS method; in: Applied ergonomics; Band 24; Heft 6; S. 405; 1993
- McA93 McAtamney, L., Corlett, E. N.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. In: Applied ergonomics, 24/2, 1993, S. 91–99.
- McC94 McCrobie, D.: NIOSH Lifting Calculator. Atlanta GA (USA) NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health, 1981, NIOSH: Work practices guide for manual lifting, Technical report / NIOSH; U.S. Government Printing Office; Washington DC (USA) - Waters, T. R., 1993, Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks, Ergonomics, 36/7, 1994, S. 749.
- Mys13 www.mysticgd.com (24.09.2013)
- Pet08 Petzelt, D.; Deuse, J.: Using Predetermined Standard Times in Digital Manufacturing for Deriving of Operation Times. In: Proceedings of 13th Annual International Conference on Industrial Engineering - Theory, Applications & Practice, 07.-10.09.2008, Las Vegas, USA, S. 40-44.
- Pet10 Petzelt, D.; Schallow, J.; Deuse, J.: Ziele und Nutzen der Digitalen Fabrik - Untersuchung der Ziele und des Nutzens aus Sicht von Wissenschaft und Industrie. In: wt Werkstattstechnik online, 100/2010/3, S. 131-135.
- RAAS Hüppi, R.; Nielsen, E.; Grüniger, R.; Brom, C.; Effizienter Robotereinsatz schon bei kleineren und mittleren Serien; in: Tagungsband Internationales Forum Mechatronik; S. 323–342; Sonderausg. 2006
- RF Internetseite des vom BMBF geförderten Verbundprojekts Roboforming: www.roboforming.de.

- Sch04 Schaub, K.: Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS). In: Landau, K. (Hg.): Montageprozesse Gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. Ergonomia Verlag, Stuttgart, 2004, S. 91-111.
- Sch05 Schraft, R. D.; Meyer, C.; Parlitz, C.; Helms, E.; PowerMate - A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks; in: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona (Spanien); S. 4074–4079; 2005
- Sch07 Schmidt, F.; Sichere Zusammenarbeit von Mensch und Roboter; in: S&I Kompendium; S. 84–86; 2007
- SFB708 Internetseite des Sonderforschungsbereichs 708: www.sfb708.tu-dortmund.de.
- Shn02 Shneiderman, B.: User Interface Design. 3. Aufl. Bonn: mitp, 2002
- Som07 Som, F.; Robotersteuerung für sichere Mensch-Roboter-Kooperation; http://www.bg-metall.de/fileadmin/downloads/FA_MFS/Symposien/Praesentation_Reis.pdf; Workshop; Reis Robotics (Hrsg.); Lengfurt; 2007; Datum des Zugriffs: 29.01.2010
- Spi01 Spingler, J.; Thiemermann, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 11-12, S. 616-620.
- VDI3633 Maschinennahe Simulation. VDI-Richtlinie 3633 Bl. 8 – April 2007, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI4499 VDI 4499-1: Digitale Fabrik – Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Düsseldorf, 2008
- Wis08 Wischniewski, S.; Deuse, J. : Zuverlässigkeit manueller Rüstprozesse - Arbeitsgestalterische Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit manueller Rüstprozesse. In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 1/2, S. 80-84.