



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Dissertation

Modell zur Taktzeitermittlung von Prozessen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der technischen Wissenschaften (Dr. techn.), eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Titanilla KOMENDA-HARING, MSc

Mat.Nr.: 01227880

(Satzingerweg 10/13/4, 1210 Wien)

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Sebastian Schlund

(Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften – E330,
Bereich: Human Centred Cyber Physical Production and Assembly Systems)

Wien, Januar 2022

Begutachtet von

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Horst Ecker

(Technische Universität Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik – E325,
Bereich: Technische Dynamik und Fahrzeugdynamik)

und

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

(Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, 02.01.2022

Stadt und Datum



Unterschrift



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Mensch-Maschine-Zusammenarbeit gilt als eine der wesentlichen Schlüsseltechnologien zur Realisierung agiler Konzepte in dynamischen Produktionsumgebungen. Durch die Kombination der Fähigkeiten von Menschen und Maschinen, zeigen Arbeitssysteme mit Mensch-Maschine-Zusammenarbeit Potenziale bei der Bewältigung von sich ändernden Marktanforderungen, wie z. B. Produktgröße oder Produktform. Die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit solcher Systeme erschweren jedoch die modellbasierte Ermittlung und Optimierung der Taktzeit, da sie von den verfügbaren Ressourcen, deren Eigenschaften sowie deren Interaktionsszenarien abhängig ist. Aus diesem Grund sind konventionelle Planungsmethoden, wie z. B. MTM (Methods-Time-Measurement) oder kinematische Modelle zur Simulation des Bewegungsverhaltens einzelner Ressourcen aufgrund ihrer isolierten Berücksichtigung einzelner Ressourcen und der jeweilig statisch definierten Verarbeitungszeiten von Prozessen nicht ausreichend, um dieses komplexe dynamische Problem zu lösen.

In dieser Forschungsarbeit wird daher ein Modell vorgestellt, das Taktzeiten in Arbeitssystemen mit Mensch-Maschine-Zusammenarbeit unter der Berücksichtigung der wechselseitig temporalen Beeinflussung von Ressourcen innerhalb eines Arbeitssystems ermitteln kann. Das vorgestellte Modell basiert dabei auf einer hybriden Systemmodellierung, die sowohl Interaktionen als auch sich ändernde Systemzustände in Abhängigkeit der räumlichen und zeitlichen Beziehung einzelner Ressourcen zueinander betrachtet. Dabei werden wesentlichen taktzeitrelevante Modell- bzw. Systemparameter identifiziert, sodass bereits in der Planungsphase Transparenz in Bezug auf taktzeitbeeinflussende Systemparameter in Arbeitssystemen mit Mensch-Maschine-Zusammenarbeit geschaffen und somit auch ein taktzeitbasierter Vergleich von Arbeitssystemvarianten ermöglicht wird.

Anhand industrieller Beispiele wird die Anwendung des vorgestellten Modells zur Taktzeitermittlung gezeigt und validiert. Dabei wird der Einfluss verschiedener taktzeitbestimmender Systemparameter, wie z. B. Bedienerprofil, Aufgabenzuweisung oder Kollaborationsmodus, und deren Einfluss auf die Gesamtproduktivität des Arbeitssystems durch Veränderung der zeitlichen und räumlichen Bedingungen innerhalb des Mensch-Maschine-Arbeitssystems präsentiert und diskutiert.

Abstract

Human-machine collaboration is considered as one of the essential key technologies for implementing agile concepts in dynamic production environments. By combining capabilities of humans and machines, work systems with human-machine collaboration show potential in coping with changing market requirements, such as product size or product shape. However, the flexibility and adaptability of such systems make model-based determination and optimization of cycle time difficult as cycle time is highly dependent on available resources, their characteristics, and respective interaction scenarios. For this reason, conventional planning methods, such as MTM (Methods-Time-Measurement) or kinematic models for simulating the motion of individual resources are not sufficient to solve this complex dynamic problem due to their isolated consideration of individual resources and thus statically defined processing times.

Therefore, this research work presents a model that can determine and optimize cycle times in work systems with human-machine collaboration considering their mutual influence. The presented model is based on hybrid system modelling including both, interactions and changing system states, depending on the spatial and temporal influence of individual resources. In this context, essential model parameters relevant to cycle time are identified so that, on the one hand, transparency is created regarding system parameters influencing cycle time in work systems with human-machine collaboration and, on the other hand, enables a cycle-time-based comparison of work system variants.

The application of the presented model for cycle time determination is shown and validated on industrial application examples. The influence of various system parameters that determine cycle time, such as operator profile, task assignment or collaboration mode, and their impact on the overall productivity of the system is presented and discussed by changing the temporal and spatial conditions of the human-machine work system.

*»Wenn du zwei Stunden mit einem Freund spielst,
kommt's dir vor wie eine Minute.
Wenn du allerdings eine Minute auf einem heißen Ofen sitzt,
kommt's dir vor, wie zwei Stunden.«*

(Valerie über die Relativität von Zeit – 8 Jahre jung)

Diese Arbeit ist der Versuch,
Zeit während der Kollaboration zu objektivieren –
im Wissen, dass Zeit relativ ist.

Danksagung

Ich danke von Herzen all jenen, die stets an mich geglaubt haben, dass ich es schaffe – manchmal sogar mehr als ich selbst.

Vor allem danke ich aber Sebastian Schlund und meinen Kolleginnen und Kollegen bei Fraunhofer Austria. Dieses Umfeld an herausragend intelligenten Menschen, die den Teamgedanken im beruflichen Alltag wahrhaftig leben und sich ehrlich über die Weiterentwicklung der anderen Kolleginnen und Kollegen freuen und sie dahingehend unterstützen und motivieren ihre Ziele auch zu erreichen, hat es auch mir ganz klar ermöglicht, selbiges zu tun!

Ich danke auch meiner Familie und meinen Freunden für ihr Verständnis, dass ich auch manchmal einige Nächte, Wochenenden und Urlaubstage mit mir selbst verbracht habe.

Und zuallerletzt danke ich auch mir selbst. Es war doch ein harter Kampf – aber vor allem hat mich diese Arbeit auch Geduld und den Entwicklungsprozess zu schätzen gelehrt. Insbesondere haben Zeit und Kollaboration eine neue Bedeutung für mich erhalten.

Titanilla Komenda-Haring

Wien, Januar 2022

Prolog

Seit 2011 wurde im deutschsprachigen Raum mit dem Begriff »Industrie 4.0« die vierte industrielle Revolution angekündigt – eine Revolution, die vorausgesagt wird. Eine industrielle Revolution, die abermals zu einer stark beschleunigten Entwicklung von Technik, Produktivität und Wissenschaft und damit auch zu einer tiefgreifenden und dauerhaften Umgestaltung der wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse, Arbeitsbedingungen und Lebensumstände führen sollte. Der Begriff stammt aus dem gleichnamigen Zukunftsprojekt des Deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung (2013), im Rahmen dessen technologische Entwicklungen das Ziel einer intelligenten Fabrik verfolgten. Die so genannte »Smart Factory« zeichnete sich dabei durch Wandlungsfähigkeit, Ressourceneffizienz, ergonomische Gestaltung sowie die ganzheitliche Integration von Geschäfts- und Wertschöpfungsprozessen aus. Treibende Faktoren für die Mitgestaltung der vierten industriellen Revolution waren dabei die zunehmende Individualisierung der Produkte – bis hin zur Losgröße 1 – die notwendige Sicherung des Produktionsstandortes Mitteleuropa sowie der demographische Wandel.

Die Zahl der Revolution ließ sich auch plausibel erläutern. Nach der Mechanisierung mit Wasser- und Dampfkraft im Rahmen der ersten industriellen Revolution am Ende des 18. Jahrhunderts – oftmals symbolisiert durch die Dampfmaschine, eigentlich aber vorangetrieben durch das Textilgewerbe – erfolgte durch die Massenfertigung mit Hilfe von Fließbändern und elektrischer Energie (Taylorismus und Fordismus, die sich am Einsatz von Fließbändern in Schlachthöfen orientierten) die zweite industrielle Revolution Anfang des 19. Jahrhunderts. Mit dem Einsatz von Elektronik und IT zur weiteren Automatisierung der Produktion setzte die dritte industrielle Revolution zu Beginn der 1970er-Jahre ein, die schließlich mit der Erfindung des Internets und der darauffolgenden Vernetzung von cyber-physischen Systemen in die vierte industrielle Revolution münden sollte.

Zu den erwähnten industriellen Revolutionen ließ sich auch eine Parallele zu den Kränkungen der Menschheit – Kränkung durch Kopernikus (»Die Erde ist nicht der Mittelpunkt des Weltalls.«), Darwin (»Der Mensch geht aus der Tierreihe hervor.«) und Freud (»Das Ich ist nicht der Herr in seinem eigenen Haus.«) – ziehen (vgl. Meyer-Drawe 2007). Obwohl der Begriff »Kybernetik« bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts von Norbert Wiener geprägt wurde, konnte nach Hessler (2014) die »Künstliche Intelligenz« als vierte Kränkung der Menschheit betrachtet werden. Wenn Menschen als einziger intelligenter und flexibler Bestandteil in der industriellen Produktion jetzt doch durch selbstlernende Systeme obsolet werden (vgl. acatech 2013; Spath et al. 2013), so könnte dies als eine Herabwürdigung des Menschen empfunden werden. Neben der kosmologischen, biologischen und psychologischen Kränkung folgte also nun die der technischen. Ironie an der Sache ist jedoch, dass einzig allein die technische Kränkung vom Menschen selbst initiiert wurde.

Sowohl die industriellen Revolutionen als auch die Kränkungen der Menschheit haben allerdings gezeigt, dass sich der Mensch im Sinne seiner kognitiven Fähigkeiten (weiter-)

entwickelt hat. Getrieben von der Entwicklung von Werkzeugen zur körperlichen Entlastung, schafft sich der Mensch Zeit und Energie zum kreativen Denken und verfolgt dabei nur ein Ziel: Die Erhaltung seiner Art. Was die Bestrebungen im Zeitalter der »Industrie 4.0« anging, so gab es dort doch auch wesentliche Ansätze, den Menschen wieder ins Zentrum der industriellen Produktion zu stellen. Dies mag auf den ersten Blick vielleicht widersprüchlich erscheinen, ist aber eine weiterführende Debatte bezüglich der Stellung des Menschen gegenüber der Maschine wert.

Möchte man den Theorien von Kondratjew (Händler 2013) und Nefiodow (2006) Glauben schenken, so wird der sechste Kondratjew-Zyklus – nach der Mechanisierung, Elektrifizierung, Massenfertigung, Digitalisierung und Vernetzung – der gesunde Mensch sein. Nefiodow ist überzeugt, dass das nächstgrößte Produktivitätspotenzial in der Vermeidung und Heilung von Krankheiten bestehe und dass die Gesundheit der Mitarbeitenden Voraussetzung für gute Leistung und gute Zusammenarbeit sei. Die ganzheitliche Planung kollaborativer Tätigkeiten – unter der Berücksichtigung von Menschen und Maschinen und insbesondere der Berücksichtigung dynamischer Wechselwirkungen der beiden Ressourcen – stellt demnach eine wesentliche Basisinnovation für den ergonomischen und fähigkeitssteigernden Einsatz des Menschen in der Produktion dar. Denn nur durch das eingehende Verständnis der gegenseitigen Beeinflussung, können Potenziale für die sichere und damit erfolgreiche und produktive Implementierung der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit in der Produktion weiter ausgeschöpft werden.

Zudem sei angemerkt, dass es im Rahmen der Initiative »Industrie 4.0« nicht nur grundsätzlich um eine neue industrielle Revolution ging, sondern vielmehr um eine Standardisierung im Bereich der Automatisierung und Produktion. Es wurde nach einer gemeinsamen Sprache gesucht, die als zentrales Verständigungsmittel in einem komplexen Regelsystem fungieren sollte. Sprache als Basis von Kollaboration (vgl. dazu auch Harari und Neubauer 2015), benötigt allerdings ein Modell mit einer entsprechenden Übersetzung in ein ausführbares Werkzeug, das es auch ermöglicht, Planungsszenarien durchzuspielen und zu evaluieren, um zu reflektieren und zu lernen. Das vorgestellte Taktzeitmodell ist ein Versuch, die taktzeitbestimmenden Parameter in komplexen Automatisierungssystemen in eine einheitliche Sprache zu transferieren, um auf diese Weise deren Zusammenhänge zu verstehen.

Inhaltsverzeichnis

I	Einordnung und Begriffsdefinition.....	1
1	Einleitung	2
1.1	Ausgangssituation	6
1.2	Relevanz der Themenstellung.....	8
1.3	Forschungsmethodik	9
1.4	Gliederung der Arbeit.....	10
2	Kollaborationsfähige Arbeitssysteme	12
2.1	Begriffsdefinitionen	12
2.2	Klassifizierung und Einordnung.....	19
2.3	Eigenschaften kollaborationsfähiger Arbeitssysteme	22
2.4	Abgrenzung des Untersuchungsrahmens	23
II	Stand der Technik und Forschung	25
3	Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Arbeitssystemen	26
3.1	Industrielle Methoden der Taktzeitermittlung.....	26
3.2	Stand der Forschung im Bereich der Taktzeitermittlung.....	31
3.3	Taktzeitbestimmende Parameter	36
3.4	Grenzen aktueller Taktzeitermittlungsmethoden	56
4	Problemstellung und Zielsetzung	59
4.1	Charakterisierung des Forschungsdefizits.....	60
4.2	Maßnahmen zur Aufhebung des Forschungsdefizits.....	61
4.3	Ableitung der spezifischen Zielsetzung dieser Arbeit.....	62
4.4	Forschungsleitende Fragestellungen.....	63

III	Modellbeschreibung und Validierung.....	64
5	Beschreibung des Taktzeitmodells.....	65
5.1	Modellanforderungen.....	65
5.2	Möglichkeiten zur Prüfung der Anforderungserfüllung	68
5.3	Modellarchitektur und Modellimplementierung.....	69
5.4	Modellgrenzen und Vereinfachungen	78
6	Anwendung und Validierung	82
6.1	Fallbeispiele	82
6.2	Modellverifikation und Ergebnisdiskussion.....	95
6.3	Modellvalidierung und Ergebnisverwertung.....	98
6.4	Potenzialbetrachtung und weiterer Forschungsbedarf	100
	Symbol- und Variablenverzeichnis.....	103
	Abbildungsverzeichnis	106
	Tabellenverzeichnis.....	108
	Literaturverzeichnis.....	109
	Normenverzeichnis.....	115
	Anhang A: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit.....	120
	Anhang B: Relevante Forschungsgebiete.....	123
	Anhang C: Weiterführende Erläuterungen zum Taktzeitmodell	124
	Anhang D: Beispielcode.....	127



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abschnitt I

Einordnung und Begriffsdefinition

1 Einleitung

Lange war die Verlagerung der Anteile des Menschen als fehleranfälliges Subsystem weg vom Produktionsprozess hin zum Überwachungs- und Fehlerbehandlungsprozess Ziel der Automatisierungstechnik. Diese unter dem Terminus »Automatisierungsdilemma« bekannte Ironie einer vollkommen autarken Produktion wurde bereits in den 1980er-Jahren von Bainbridge (1983) kritisch reflektiert. Die Ironie in dieser Vorgehensweise lag darin, dass durch eine vollkommen autarke Produktion eine Fehlerbehebung und Prozessoptimierung durch Menschen erfolgen müsse, die aufgrund der Ausgrenzung aus dem Produktionsprozess weit weniger Qualifizierung und Erfahrung aufweisen würden.

Initiativen bzw. Forschungstätigkeiten im Bereich der Produktivitätsforschung und Arbeitswissenschaften meinten nun erkannt zu haben, dass die Flexibilität und Wirtschaftlichkeit von Fertigungs- und Produktionssystemen durch angepasste Automatisierungsgrade (vgl. Lotter und Wiendahl 2012) und einer Kombination der Fähigkeiten von Menschen und Maschinen (vgl. Brecher 2011) erhöht wird. Besonders Automatisierungsanlagen mit hoher Produktqualität und stark wechselndem Sortiment würden sich durch einen erhöhten Einsatz von Maschinen in Zusammenarbeit mit hochqualifizierten Arbeitskräften auszeichnen. Durch die Kombination der beiden Ressourcen, Mensch und Maschine, würden sich sowohl die Anlagenfähigkeit (beispielsweise durch einen erhöhten Einsatz des Menschen bei komplexen Prozessanforderungen) als auch der Automatisierungsgrad (beispielsweise durch einen erhöhten Einsatz des Roboters bei hohen Stückzahlenanforderungen) flexibel an wechselnde Markanforderungen anpassen lassen. Dies würde die Wirtschaftlichkeits-Lücke zwischen rein manueller Produktion und roboter- bzw. machinengestützter Produktion schließen und somit die Produktion in Hochlohnländern wettbewerbsfähiger machen (siehe dazu Abbildung 1).

Was jedoch unklar ist, sind die quantifizierbaren Grenzlosgrößen x_1, \dots, x_5 für den wirtschaftlichen Einsatz der in Abbildung 1 gezeigten Produktionsarten. Auch stellt sich die Frage der Korrektheit dieser Abbildung, da davon auszugehen ist, dass die Ermittlung von Taktzeiten im Rahmen der kollaborationsfähigen Produktion von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird und somit auch die wirtschaftliche Grenzlosgröße vom Einsatzfall abhängt.

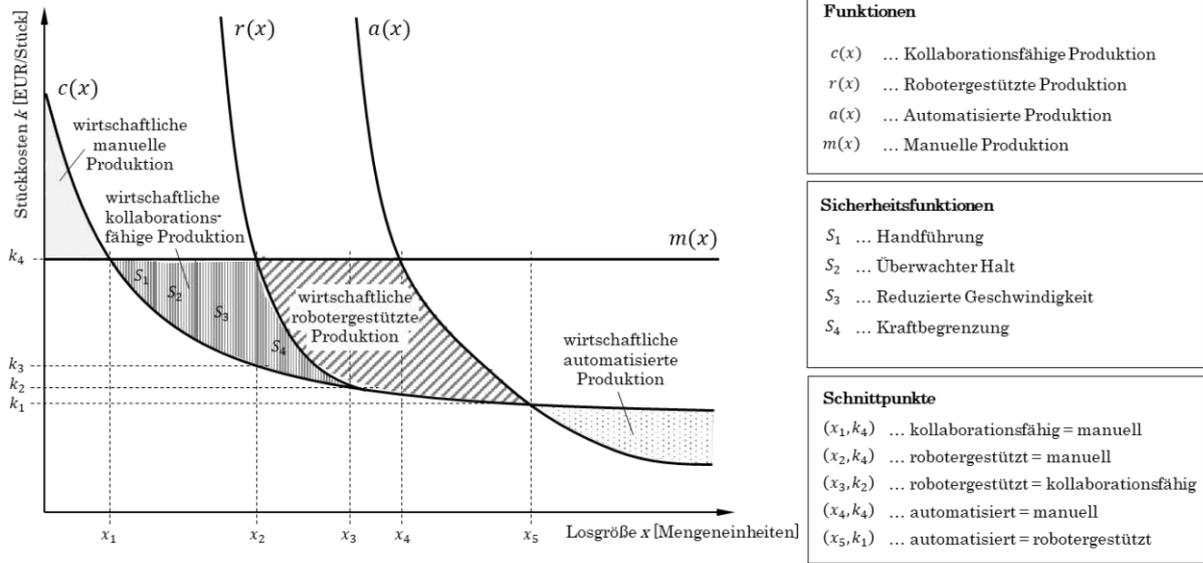


Abbildung 1: Wirtschaftlichkeit der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (adaptiert nach Matthias und Ding 2013)

Die Einführung gestufter bzw. variabler Automatisierungsgrade bildet aber jedenfalls eine wesentliche Voraussetzung, um dem Automatisierungsdilemma entgegenzuwirken (vgl. Lüttke 2014). Durch die Kombination von Menschen und Maschinen innerhalb von Produktionsprozessen werden Fähigkeiten beider Ressourcen genutzt. Hierbei ergänzt der Mensch durch Kontrollfähigkeit, Lernfähigkeit und Flexibilität, die Kraft, Ausdauer und Zuverlässigkeit der Maschine bzw. des Roboters (vgl. Abbildung 2). Somit lassen sich vermehrt Einsatzfelder von robotergestützter Automatisierung identifizieren, wobei Menschen von niederqualifizierten Arbeitstätigkeiten befreit werden können.

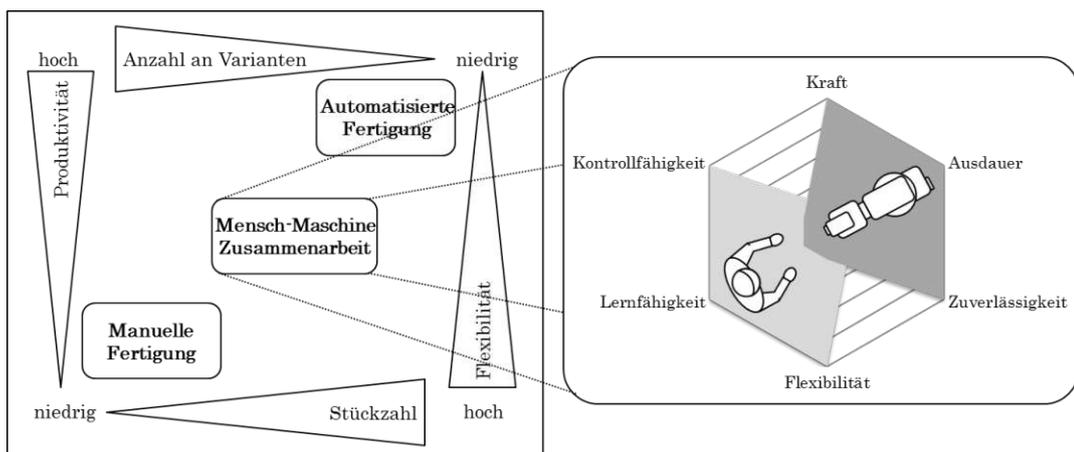


Abbildung 2: Kombination der Fähigkeiten von Menschen und Maschinen (adaptiert nach Lotter und Wiendahl 2012)

Die Kombination von Menschen und Maschinen im Rahmen der Produktion, ermöglicht darüber hinaus auch die Möglichkeit des gegenseitigen Lernens beider Ressourcen voneinander, um Maschinen leistungsfähiger zu machen und gleichzeitig Menschen höher zu qualifizieren (vgl. Ansari 2018). Maschinen können beispielsweise von menschlichen Fähigkeiten des Greifens lernen, während Menschen von optimalen und ressourcenschonenden Bewegungsmustern der Maschinen oder der Reihenfolge beim Zusammenbau oder bei der Demontage von Baugruppen profitieren können.

Im Allgemeinen gehen die Forschungstätigkeiten im Bereich der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit bis ins Jahr 1995 zurück (siehe dazu auch die Zeitleiste in Anhang A). Die Auflösung der räumlichen Trennung von Menschen und Maschinen und der damit einhergehende Einsatz von manuellen Arbeitskräften ohne trennende Schutzeinrichtungen, provozierte eine Vielzahl an Herausforderungen im Bereich der Sicherheit, Ergonomie, Interaktion, Produktivität und Planung (siehe Abbildung 3 bzw. Anhang B). Mit den Herausforderungen ist auch die Anzahl der Forschungstätigkeiten im Bereich der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit exponentiell gestiegen (siehe dazu auch Abbildung 4).

Neben der Entwicklung von kleinen, inhärent sicheren, intuitiven und preiswerten (Leichtbau-)Robotern für die Bedürfnisse von kleinen und mittelständischen Unternehmen, geht es vor allem auch um die Erforschung von Technologien zur sicheren Umsetzung der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit.

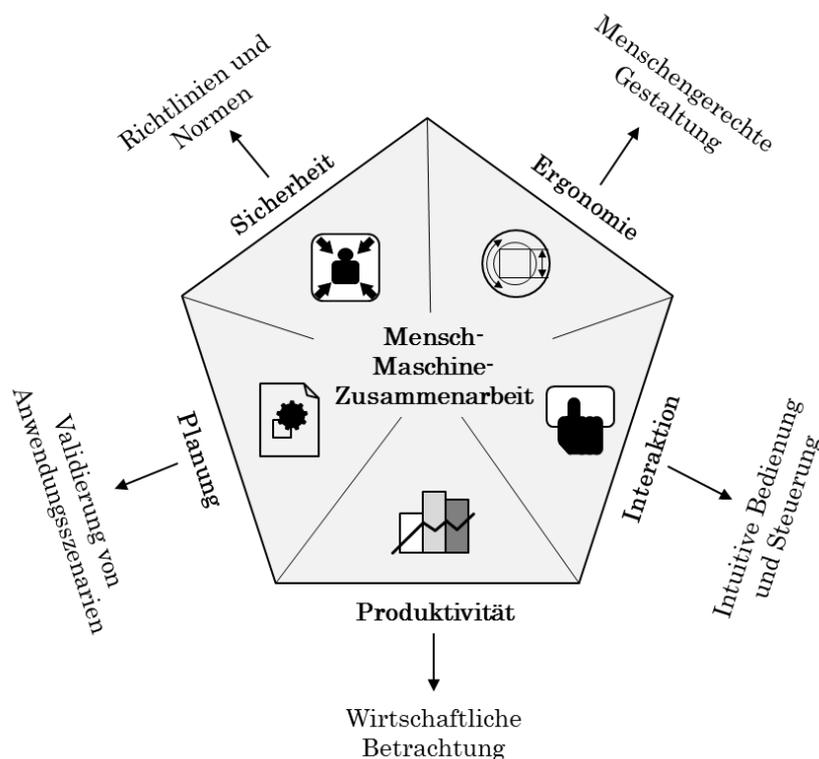


Abbildung 3: Herausforderungen der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit

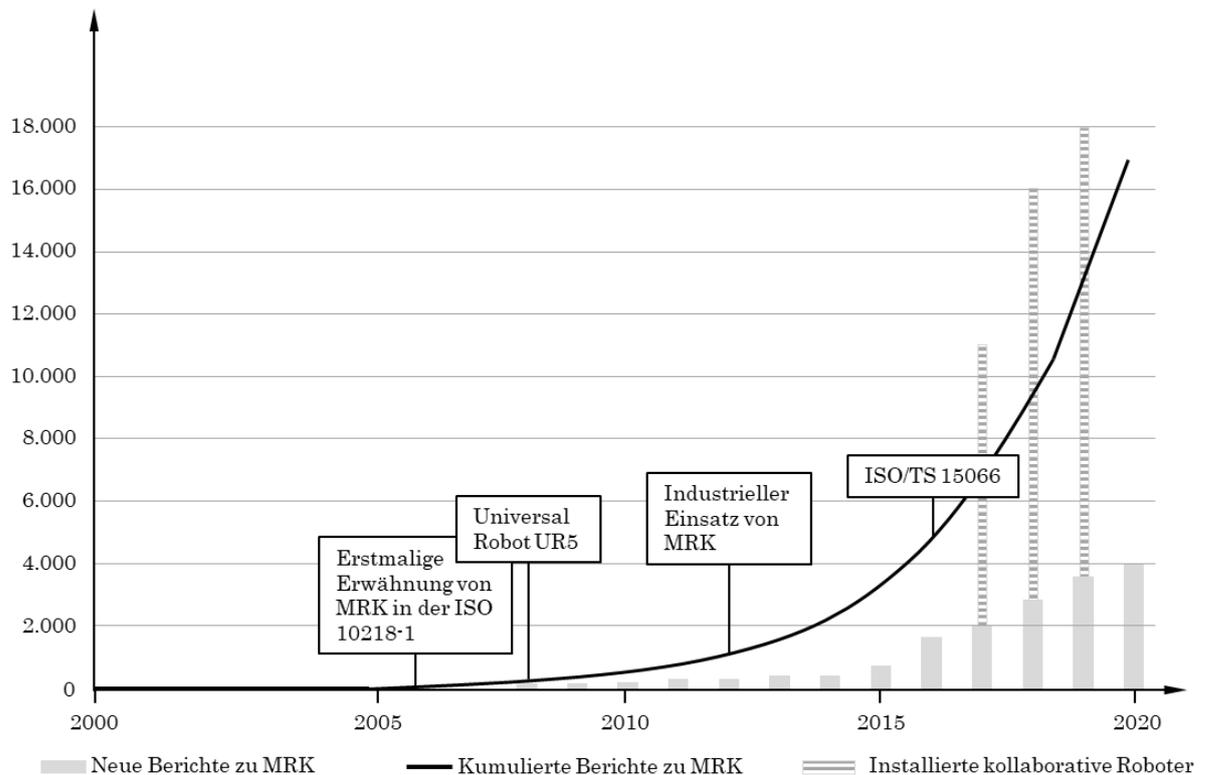


Abbildung 4: Anzahl der Berichte zur Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) seit 2000 (Analyse auf Basis von Google-Suchergebnissen zum Zeitpunkt des 04. Februar 2021)

Durch die enge Zusammenarbeit des Menschen mit der Maschine ist aber nicht nur die Sicherheit entscheidend, sondern auch die ergonomische bzw. menschengerechte Gestaltung kollaborativer Tätigkeiten sowie die Mensch-Maschine-Interaktion im Sinne von intuitiven Bewegungs- und Steuerungskonzepten.

Im Rahmen der Ergonomie gibt es bislang ausschließlich Richtlinien, die Abmessungen eines manuellen Arbeitsplatzes definieren, die dabei in erster Linie Arbeitshöhe, Arbeitsfläche und Arbeitsraum umfassen. Ergonomische Parameter hinsichtlich der räumlichen Positionierung und Orientierung von durch Maschinen bewegten Objekten können allerdings von diesen Richtlinien abgeleitet werden. Neben den von manuellen Arbeitsplätzen herzuleitenden ergonomischen Parametern, sind allerdings neue, mit der Bewegungsbeschaffenheit der Maschine assoziierte Werte, ebenfalls relevant. Diese können beispielsweise psychoergonomisch sein – im Sinne von »die Maschine bewegt sich unangenehm, auch wenn sie mich gar nicht berührt« (vgl. Thiemermann 2005 oder Kim et al. 2015) – oder konkret die Interaktionsposen so beeinflussen, dass ergonomisch optimale Posen für den Menschen ermöglicht werden (vgl. Cherubini et al. 2016).

In Bezug auf *Interaktion* sind Maßnahmen im Sinne von intuitiven Steuerungs- und Manipulationskonzepten – im Gegensatz zu den noch heute eingesetzten, hersteller-spezifischen Bedienpanels und imperativen Programmierkonzepten – von entscheidender

Bedeutung. Sprach- oder Gestensteuerung, wie auch Handführung und deklarative Programmierkonzepte, zählen hier zu vielversprechenden Methoden. Ein Überblick über Interaktionsmöglichkeiten zwischen Menschen und Roboter ist beispielsweise bei Goodrich und Schultz (2007) zu finden.

Im Bereich der *Produktivitätsforschung* geht es vor allem um die Identifikation von wirtschaftlich sinnvollen Einsatzfelder von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und der Quantifizierung des entsprechenden Potenzials. Hierzu wurden beispielsweise Methoden von Djuric et al. (2016) oder Ermer et al. (2019) eingeführt.

Im Bereich der *Planung* spielt vor allem die Validierung von prospektiven Anwendungsszenarien eine entscheidende Rolle, da die Maschinenrichtlinie nach jeder Modifikation eines Mensch-Maschine-Arbeitssystems eine erneute Risikobeurteilung verlangt. Dies ist zeit- und kostenaufwendig und bringt Unsicherheiten beim Anlagenbetreiber mit sich, da zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht sichergestellt werden kann, ob zukünftige Modifikationen am Arbeitssystem laut Maschinenrichtlinie umgesetzt werden können bzw. unter welchen Bedingungen diese umgesetzt werden müssen. Ansätze, diesem Vorgehen entgegenzuwirken, wurden beispielsweise im Projekt DR.KORS (vgl. Brandstötter et al. 2020) erforscht.

1.1 Ausgangssituation

Obwohl Technologien und Richtlinien zur Umsetzung von Mensch-Maschine-Arbeitssystemen bereits vorhanden sind, suchen und erproben Forschungseinrichtungen, Maschinenhersteller sowie produzierende Betriebe weitere Anwendungsfälle, bei denen eine Mensch-Maschine-Zusammenarbeit wirtschaftliche Berechtigung hat (siehe dazu auch die vom BMBF in Auftrag gegebene EFFIROB-Studie des Fraunhofer-IPA 2011 oder das EU-Projekt LIAA der Fraunhofer-Gesellschaft 2013). Dies ist einerseits der Tatsache geschuldet, dass kollaborierende bzw. kollaborationsfähige Roboter zwar kostengünstig am Markt verfügbar sind, die miteinhergehende Absicherung des Arbeitsplatzes jedoch aufgrund der aktuellen Reglementierungen teuer und aufwendig ist. Hinzu kommt die Annahme, dass ein kollaborativer Betrieb die Produktivität einschränkt, da er scheinbar nur sicher umgesetzt werden kann, indem die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters reduziert wird.

Durch die normativen Richtlinien wird nun der Eindruck einer fehlenden Flexibilität eines eigentlich flexiblen Werkzeugs – des Roboters – vermittelt, da die Richtlinien und Normen die Bewegungsfreiheit im Sinne einer Geschwindigkeitsreduktion des Roboters (zur Kraftreduktion im Falle einer eintretenden Kollision mit dem Menschen) einschränken und gleichzeitig eine erneute Zertifizierung nach jeder Modifikation des Arbeitssystems fordern. Erschwerend kommt die quantitative Bewertung der Fähigkeiten und damit das Verständnis über die wechselseitige Beeinflussung beider Systempartner aufgrund des komplexen Charakters eines Mensch-Maschine-Arbeitssystems hinzu (vgl. dazu auch Willnecker 2000).

Da davon auszugehen ist, dass sich Mensch und Maschine im Rahmen eines kollaborationsfähigen Arbeitssystems gegenseitig beeinflussen, ist die ganzheitliche Planung unter Berücksichtigung von sich beeinflussenden menschlichen sowie maschinellen Faktoren eine nicht zu unterschätzende Aufgabe. Die gegenseitige Abstimmung von Gestaltungsgrundsätzen für menschliche sowie maschinelle Tätigkeiten sind daher unabdingbar in einem gemeinsamen Planungswerkzeug zu berücksichtigen. In konventionellen Planungsabläufen von Automatisierungsanlagen werden manuelle und maschinelle Tätigkeiten allerdings noch getrennt voneinander betrachtet und mithilfe verschiedener Werkzeuge geplant. Sind die Sequenzen der einzelnen Tätigkeiten fertiggestellt, folgt die Gestaltung der planmäßigen Mensch-Maschine-Zusammenarbeit. Das Ergebnis dabei ist ein logisch und zeitlich richtiger Planungsablauf der anhand einer spezifizierten Arbeitsteilung ein ideales Zusammenwirken beider Kollaborationspartner als Nominalprozess festlegt. Dieses Vorgehen berücksichtigt allerdings keine wechselseitige Beeinflussung der beiden Systemressourcen und vernachlässigt vorherrschende Dynamiken im realen Systemverhalten.

Im Rahmen eines ganzheitlichen Planungsablaufs, muss also die Entwicklung und Gestaltung aller Tätigkeiten in einem einzigen Planungswerkzeug stattfinden (Abbildung 5). Entsprechend der jeweiligen Ressourceneigenschaften sowie der örtlichen und zeitlichen Nähe zueinander, können Arbeitsaufgaben in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unterschiedlich ablaufen und dabei unterschiedliche Ressourcen wie auch operative Faktoren beeinflussen. Durch die wechselnde oder auch gemeinsame Arbeitsausführung von Mensch und Maschine, rückt vor allem auch die Aufgabenübergabe neben der grundsätzlichen Aufgabenaufteilung in den Vordergrund. Dies führt insbesondere zu der Notwendigkeit, dynamische Wechselbeziehungen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu berücksichtigen und zu validieren. Außerdem ist ein ganzheitliches Planungsvorgehen auch für die Aufdeckung von Planungsfehlern essenziell und bietet zudem die Möglichkeit, auch Fehlpläne absichtlich zu testen, um die Zuverlässigkeit sowie Sicherheit des Systemverhaltens zu validieren. Planungsmethoden können so auch als belastbare Grundlage zur Reduktion des Zertifizierungsaufwands herangezogen werden.

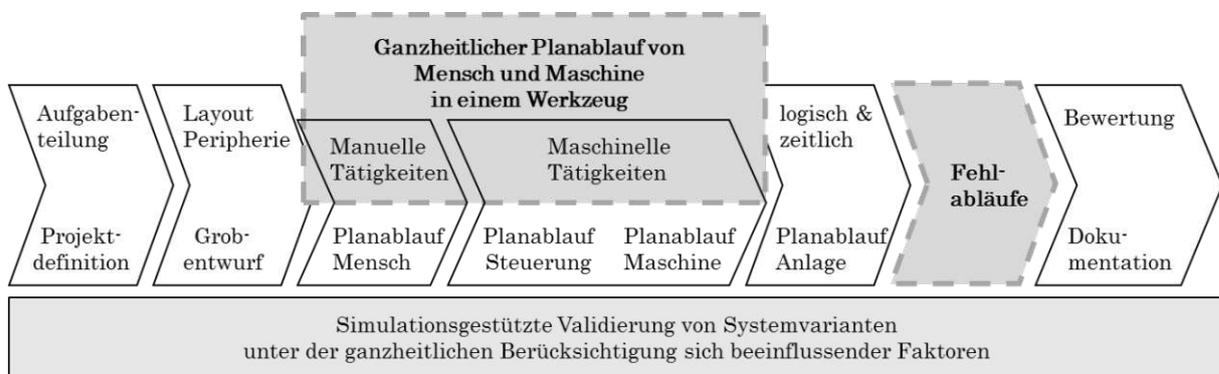


Abbildung 5: Vorgehensweise eines ganzheitlichen Planungsablaufs
(adaptiert nach Komenda et al. 2016)

Aus diesem Grund sind Planungswerkzeuge, die eine ganzheitliche Berücksichtigung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen – im Sinne der kombinierten Betrachtung maschineller und manueller Faktoren – ermöglichen, von wesentlicher Bedeutung für den sicheren wie auch wirtschaftlichen Einsatz der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit. Sequenzielle oder eindimensionale Planungsmodelle erschweren das Systemverständnis und führen meist zu vorschnellen oder falschen Schlussfolgerungen in Planungsphasen – insbesondere, wenn es um die Erzielung operativer Anforderungen geht.

1.2 Relevanz der Themenstellung

Einer der wesentlichsten wirtschaftlichen Erfolgsfaktoren für den Einsatz von Automatisierungssystemen im Allgemeinen und von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen im Speziellen ist die Erreichung der geforderten Taktzeit. Die Taktzeit wird als Entscheidungsgrundlage noch im Rahmen der Planungsphase ermittelt. Dazu eignen sich grundsätzlich Planungsmethoden und -werkzeuge, die auf der Modellierung von Prozessbausteinen oder der dynamischen Bewegungsmodellierung basieren. Obwohl es zwar Methoden zur Taktzeitermittlung von manuellen sowie maschinellen Arbeitsabläufen gibt, fehlt es aktuell noch an Methoden, die die wechselseitige Beeinflussung von Mensch und Maschine in einem einzigen Werkzeug berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die Taktzeitermittlung meist auf den Sicherheitsmodus der Maschine – und damit auf deren Bewegungsgeschwindigkeit – reduziert wird. Es wird also davon ausgegangen, dass die Taktzeitermittlung ein zweidimensionales Problem zur Erzielung der Mindestproduktivitätsanforderungen ist (siehe dazu Abbildung 6).

Die Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen ist jedoch aufgrund des komplexen Systemcharakters nicht bloß auf die Sicherheit und damit die Bewegungsgeschwindigkeit der Maschine zurückzuführen. Die Taktzeit hängt insbesondere auch von der Diversität des Menschen, der Arbeitssystemgestaltung, der Systemdynamik, der Zuverlässigkeit des Steuer- und Regelkreises, der Vorhersagbarkeit des Bewegungsverhaltens beider Ressourcen sowie der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine ab. Zudem ist unklar, warum die Sicherheitsanforderungen steigen, wenn Leistung im Sinne von Geschwindigkeit, Kraft oder Steifigkeit gering sind.

Dies macht die Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu einem mehrdimensionalen Problem. Vor allem bedeutet es, dass ein bestimmter Sicherheitsmodus und damit die Einschränkung der Bewegungsgeschwindigkeit der Maschine nicht zwangsläufig heißt, dass die Mindestproduktivitätsanforderungen nicht erreicht werden. Die vorliegende Forschungsarbeit verfolgt damit das Ziel, Transparenz in die wechselseitige Beeinflussung von menschlichen und maschinellen Faktoren in der Erzielung von Taktzeitmindestanforderungen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu bringen.

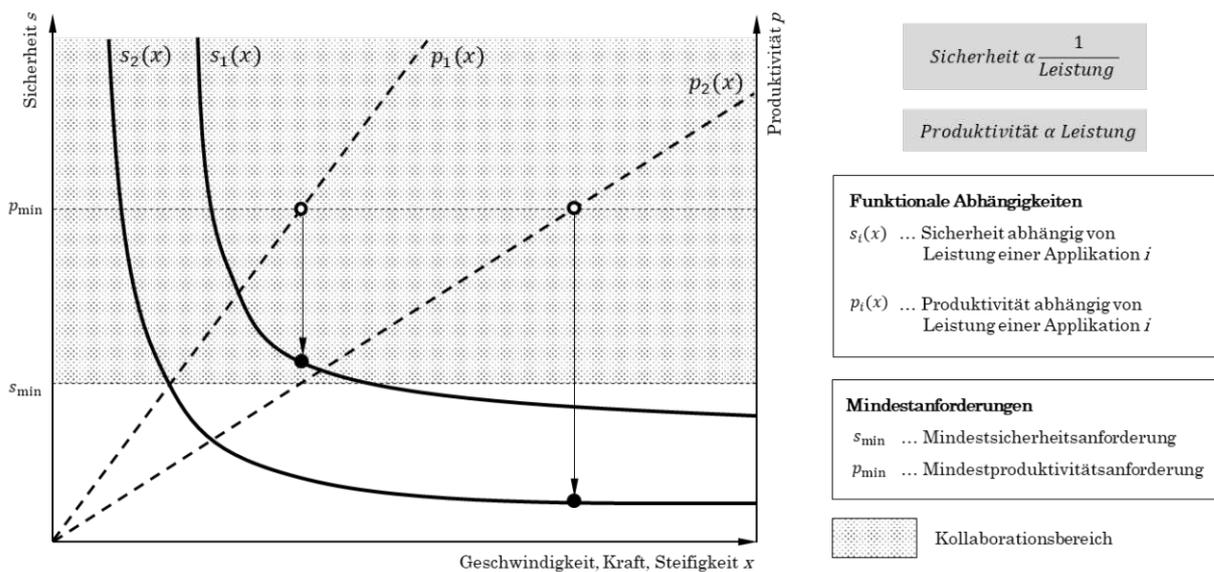


Abbildung 6: Konventionelle Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Sicherheit und Produktivitätsfaktoren (adaptiert nach ABB Corporate Research 2014)

1.3 Forschungsmethodik

Da das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Taktzeitmodells ist, richtet sich die Forschungsmethodik nach der Design Science nach Peffers et al. (2014). Design Science beschreibt ein systematisches Vorgehen zur Verbesserung einer Systemleistung bzw. zum Aufzeigen identifizierter Gesetzmäßigkeiten, welche zu einer Verbesserung der Systemleistung genutzt werden können. In diesem Sinne sollen in der vorliegenden Arbeit die Gesetzmäßigkeiten bestimmter taktzeitbeeinflussender Parameter in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen gezeigt werden, sodass eine optimale – im Sinne von definierten Zielfunktionsbereichen – Auslegung und Implementierung derartiger Systeme erfolgen kann. Das Ergebnis des Vorgehens im Rahmen des Design Science ist neben dem verbesserten Systemverständnis ein so genanntes Artefakt, das in der vorliegenden Arbeit als implementierfähiges, mathematisches Taktzeitmodell verstanden wird.

Gemäß Design Science erfolgt also zunächst die Problemabgrenzung auf Basis der Darstellung der Ausgangssituation, der Begriffsdefinition und der Darstellung des Stands der Technik und Forschung. Darauf aufbauend wird ein Problembewusstsein geschaffen, das das Forschungsdefizit mit der Beantwortung der Forschungsfragen aufzuheben vermag. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein Vorschlag definiert, der sich im vorliegenden Fall als Modell zur Taktzeitermittlung darstellt. Im Rahmen der Entwicklungsphase wird ein Simulationsmodell erarbeitet, das in iterativen Schleifen anhand von Fallbeispielen sowohl gegen die funktionalen Anforderungen verifiziert als

auch gegen das Forschungsdefizit validiert wird. Als Abschluss erfolgt der Anforderungsabgleich bzw. die Hypothesenprüfung mit einem Vorschlag zur Ergebnisverwertung.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel (siehe auch Abbildung 7).

In Kapitel 1 wird ausgehend von Überlegungen zur Bedeutung des Menschen im Produktionsumfeld sowie relevanter Forschungsfelder im Bereich der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit, die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Planungsvorgehens kollaborationsfähiger Arbeitssysteme erläutert.

In Kapitel 2 erfolgt neben einer Begriffsdefinition und Einordnung der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit, die Abgrenzung des Untersuchungsrahmens der vorliegenden Arbeit unter der Berücksichtigung planungsrelevanter Faktoren von kollaborationsfähigen Arbeitssystemen.

In Kapitel 3 wird der Stand der Technik und Forschung auf Methoden und Gestaltungsansätze sowie -lösungen hinsichtlich der Taktzeitermittlung manueller, maschineller und kollaborativer Tätigkeiten untersucht, welche als Grundlage für die Formulierung der Forschungsfragen herangezogen werden. Dafür werden entsprechende Beschreibungskonzepte, Modelle und Termini angeführt, die sich aus einer kritischen Prüfung des Standes der Forschung als defizitär erwiesen haben.



Abbildung 7: Gliederung der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 4 wird demnach der Handlungsbedarf durch ein Gesamtfazit bzw. Defizit des Stands der Technik und Forschung dargestellt. Zuletzt werden die Forschungsfragen formuliert, die im Verlauf des Forschungsprozesses beantwortet werden.

Aus der in Kapitel 3 analysierten Situation und dem abgeleiteten Handlungsbedarf in Kapitel 4, erfolgt in Kapitel 5 die Festlegung von funktionalen Anforderungen an das Taktzeitmodell sowie die Skizzierung der methodischen Ansätze, wobei ausgesuchte Basistheorien, -modelle und -methoden als Grundlage dienen. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung des Taktzeitmodells sowie die Modellierung und Parametrisierung einzelner Modellelemente im Sinne einer Modellimplementierung unter Berücksichtigung von Modellgrenzen und -vereinfachungen.

Im Anschluss an die Modellimplementierung wird das entwickelte Taktzeitmodell an kollaborationsfähigen industriellen Arbeitssystemen in Kapitel 6 angewendet und auf Basis der funktionalen Modellanforderungen verifiziert. Zuletzt erfolgt die Nachbetrachtung zum Taktzeitmodell, die sich auf den Zugewinn bzw. Neuheitsgrad, den offen gebliebenen Problematiken sowie der praktischen Ergebnisverwertung konzentriert.

2 Kollaborationsfähige Arbeitssysteme

Auf Basis aktueller Normen, Richtlinien und Spezifikationen werden im Folgenden die für die vorliegende Arbeit relevanten Begriffe des Arbeitssystems, der Kollaboration sowie der Taktzeit spezifiziert und somit versucht, den Untersuchungsrahmen genau abzugrenzen.

2.1 Begriffsdefinitionen

Der Kollaborationsbegriff wurde im Bereich der Automatisierungstechnik erstmals 2006 vom Deutschen Normungsinstitut in der ISO 10218-1:2006 mit dem Begriff der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) schriftlich definiert. Zwei Jahre später erfolgten in diesem Zusammenhang Gestaltungskonzepte von MRK-Anwendungen und ein Klassifizierungsvorschlag in der ISO 10218-2:2008 sowie eine aktualisierte und detaillierte Beschreibung von MRK-Anwendungen im Jahr 2011. Das aktuelle Dokument zur Gestaltung und Absicherung von kollaborativen Mensch-Roboter-Arbeitssystemen bildet die Technische Spezifikation ISO/TS 15066:2016 als Erweiterung der DIN EN 10218-1/2, die im Februar 2016 verabschiedet wurde. Demnach wird ein Produktionsbetrieb, bei dem ein Mensch und ein hierfür konstruierter Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt zusammenarbeiten, als kollaborierender Betrieb bezeichnet (siehe dazu auch Abbildung 8). Der Arbeitsraum innerhalb des geschützten Bereichs, in dem der Roboter und der Mensch gleichzeitig eine Tätigkeit an einem Objekt durchführen, wird dabei als Kollaborationsraum bezeichnet.

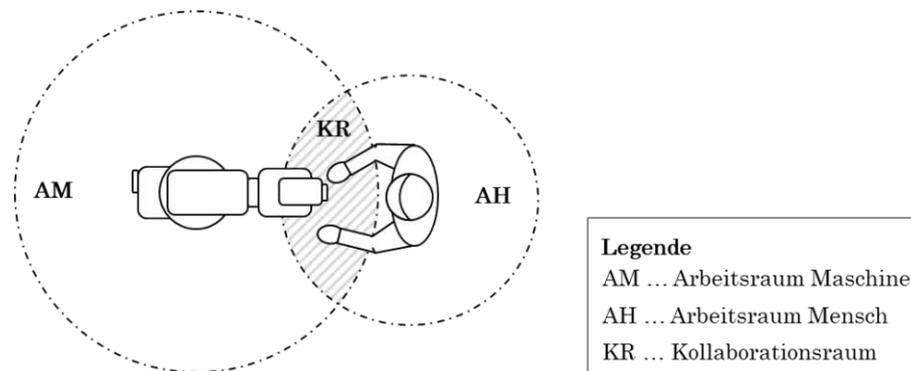


Abbildung 8: Mensch-Roboter-Kollaboration

Die vorliegende Arbeit adressiert allerdings nicht nur die Kollaboration zwischen Menschen und Robotern in entsprechenden Mensch-Roboter-Arbeitssystemen, sondern vor allem die Kollaboration zwischen Menschen und Maschinen im Allgemeinen. Aus diesem Grund werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Begriffe im Folgenden nochmals neu spezifiziert.

Definition 1 – Arbeitssystem. Ein Arbeitssystem ist ein System, das das Zusammenwirken von Menschen und Maschinen umfasst, um bestimmte Tätigkeiten an einem Produkt durchzuführen. Eine bestimmte Abfolge an Tätigkeiten wird dabei als Prozess definiert.

Definition 2 – Ressource. Menschen oder Maschinen, die innerhalb eines Arbeitssystems Tätigkeiten an einem Produkt durchführen, werden allgemein als Ressourcen bezeichnet.

Definition 3 – Kollaboration. Kollaboration meint die direkte Zusammenarbeit zwischen zwei oder mehreren Ressourcen in einem Arbeitssystem zur Ausführung einer bestimmten Tätigkeit an einem Produkt. Dabei ist die Kollaboration durch eine notwendige zeitliche und örtliche Synchronisation zweier oder mehrerer Ressourcen zur Arbeitsausführung definiert.

Definition 4 – Kollaborationsfähigkeit. Arbeitssysteme, die grundsätzlich eine direkte Zusammenarbeit zwischen Ressourcen ermöglichen, diese aber nicht zwangsläufig als einzige Betriebsform vorsehen, werden hier als kollaborationsfähig bezeichnet. In einem kollaborationsfähigen Arbeitssystem gibt es somit Tätigkeiten, die nur durch eine Ressource ausgeführt werden, und Tätigkeiten, die einer zeitgleichen Bearbeitung durch zwei oder mehrerer Ressourcen bedürfen.

Definition 5 – Kollaborativer Arbeitssystemraum. Die Ausführung einer kollaborativen Tätigkeit erfolgt hierbei im so genannten kollaborativen Arbeitssystemraum, der die Summe aller Räume beschreibt, in der Kollaboration stattfinden kann. Der kollaborative Arbeitssystemraum beinhaltet dabei Kollaborationsräume, die je nach Ressourceneigenschaften, ortsfest oder ortsflexibel sind.

Der Taktzeitbegriff wurde durch den REFA-Verband (1985) eingeführt. Taktzeit wird hier als die Zeit definiert, in der eine Mengeneinheit fertiggestellt wird, damit das Fließsystem die Soll-Mengenleistung erbringen kann. Die Taktzeit ist demnach jene Zeit, die im Rahmen eines Produktionsprozesses in einem Arbeitssystem an einem Produkt aufgewendet wird. In der vorliegenden Arbeit besteht das Arbeitssystem aus unterschiedlichen Ressourcen mit unterschiedlichen Eigenschaften, die zu bestimmten Zeitpunkten an bestimmten Orten bestimmte Tätigkeiten an einem Produkt gemeinsam oder allein durchführen.

Definition 6 – Taktzeit. Die Taktzeit ist die Zeit, in der jeweils eine Mengeneinheit fertiggestellt wird.

Für die Herstellung eines bestimmten Produkts erfolgen meist mehrere Tätigkeiten innerhalb einer festgelegten Reihenfolge in einem Arbeitssystem, wobei diese Tätigkeiten gegebenenfalls durch mehrere Ressourcen entsprechend einer bestimmten Tätigkeitszuteilung erfolgen. Dabei wird also allgemein eine Menge an Tätigkeiten τ (z. B. Scannen, Verpacken, Bauteilhandling, Etikettieren, Qualitätsprüfung) definiert, die unterschiedliche Ausführungszeiten t_τ aufweisen. Im Allgemeinen ergibt die Summe der Ausführungszeiten, die durch die an einem Produkt durchzuführenden Tätigkeiten τ definiert werden, die Taktzeit t (siehe auch Abbildung 9):

$$t = \sum_{\tau=1}^m t_\tau \quad (1)$$

wobei m die Anzahl der an dem Produkt durchzuführenden Tätigkeiten definiert. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass bei parallelen Tätigkeiten am Produkt, nur die taktzeitbestimmende Ausführungszeit, d. h. die längere Ausführungszeit, für die Bestimmung der Taktzeit herangezogen wird.

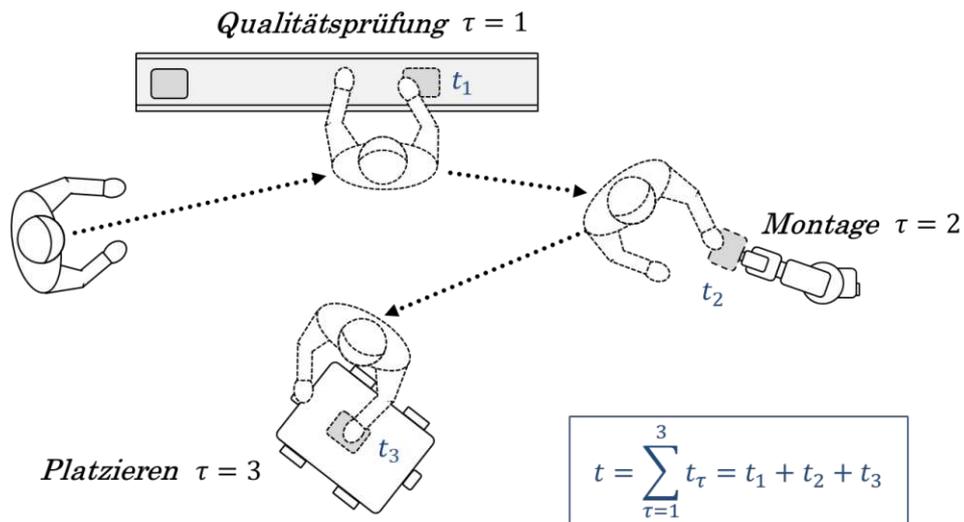


Abbildung 9: Taktzeit als Zusammensetzung aller Ausführungszeiten, die sich durch die am Produkt durchzuführenden Tätigkeiten ergeben

Die Ausführungszeiten t_{τ} der einzelnen Tätigkeiten τ setzen sich dabei aus folgenden Einzelzeiten zusammen (vgl. Abbildung 10):

$$t_{\tau} = t_r + t_o + t_e + t_p + t_w + t_f \quad (2)$$

wobei

- t_r ... Schalt- bzw. Rüstzeit
- t_o ... Bewegungszeit
- t_e ... Einschwingzeit
- t_p ... Bearbeitungszeit
- t_w ... Wartezeit
- t_f ... Ausfallzeit

Da jede der Ressourcen innerhalb eines Mensch-Maschine-Arbeitssystems unterschiedliche Eigenschaften besitzt, sind auch die angeführten Bestandteile der Ausführungszeiten je nach Ressource individuell.

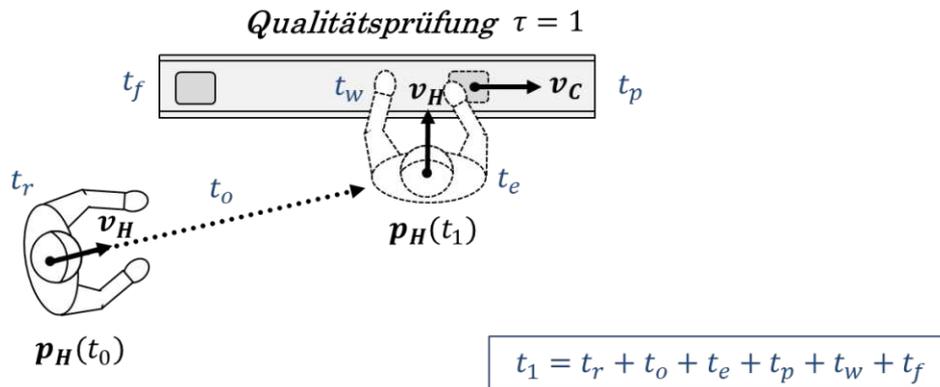


Abbildung 10: Bestandteile einzelner Ausführungszeiten

Folglich wird auch eine Menge an Ressourcen \mathbf{R} definiert, wodurch die Ausprägung einzelner Ausführungszeiten bestimmten Ressourcen zugeordnet werden kann. Daraus ergibt sich eine Menge an Ausführungszeiten $\mathbf{T}(t)$.

$$\mathbf{T}(t) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & \dots & t_{m1} \\ t_{12} & t_{22} & \dots & t_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{1n} & t_{2n} & \dots & t_{mn} \end{bmatrix} = (t_{rr}) \in (\mathbb{R} \cup \{\infty\})^{m \times n} \quad (3)$$

wobei n die Anzahl der Ressourcen innerhalb des Mensch-Maschine-Arbeitssystems definiert. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass sich diese Ausführungszeitmatrix aufgrund von dynamischen Systemeigenschaften, wie z. B. Lerneffekten oder Ermüdungserscheinungen, auch mit der Zeit ändern kann.

Tätigkeiten können in einem kollaborationsfähigen Arbeitssystem entweder von einer Ressource allein oder von zwei oder mehreren Ressourcen gemeinsam ausgeführt werden. Jede mögliche Kombination von Ressourcen ist daher der Menge an Ressourcen

$$\mathbf{R} = (r_i) \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4)$$

zugeordnet.

Arbeiten beispielsweise drei Ressourcen in einem kollaborationsfähigen Arbeitssystem, so gibt es sieben theoretisch mögliche Ressourcenzuweisungen (Auswahlmöglichkeiten), i. e. drei mögliche Tätigkeitsausführungsmöglichkeiten durch die jeweilige Ressource allein, drei mögliche Tätigkeitsausführungsmöglichkeiten durch eine Kollaboration von jeweils zwei Ressourcen und eine Tätigkeitsausführungsmöglichkeit durch alle drei Ressourcen gemeinsam.

Demnach wird die maximal mögliche Anzahl an Ressourcen – im Sinne von Ressourcenzuordnungsmöglichkeiten – in kollaborationsfähigen Arbeitssystemen, wie folgt definiert

$$n = \sum_{l=1}^z \binom{z}{l} = \sum_{l=1}^z \frac{z!}{l!(z-l)!} \quad (5)$$

wobei

- z... Anzahl an unterschiedlichen Ressourcen
- l... die jeweilige Anzahl an Ressourcen aus der Menge der unterschiedlichen Ressourcen, i. e. Auswahl von $l \leq z$ Ressourcen

Abbildung 11 zeigt ein kollaborationsfähiges Arbeitssystem mit drei Tätigkeiten, die jeweils von zwei Ressourcen aus einem Bestand von vier unterschiedlichen Ressourcen kollaborativ ausgeführt werden. Auch wenn es in der Ausführungszeitmatrix nun theoretisch $m \cdot n = 3 \cdot 15 = 45$ Zeiteinträge

mit

$$n = \sum_{l=1}^4 \binom{4}{l} = \frac{4!}{1!(4-1)!} + \frac{4!}{2!(4-2)!} + \frac{4!}{3!(4-3)!} + \frac{4!}{4!(4-4)!} = 4 + 6 + 4 + 1 = 15$$

gibt, werden für die Taktzeitberechnung einer Systemvariante nur die Einträge berücksichtigt, die durch die jeweilige Ressourcenzuordnung der Prozessausführung bestimmt wurden.

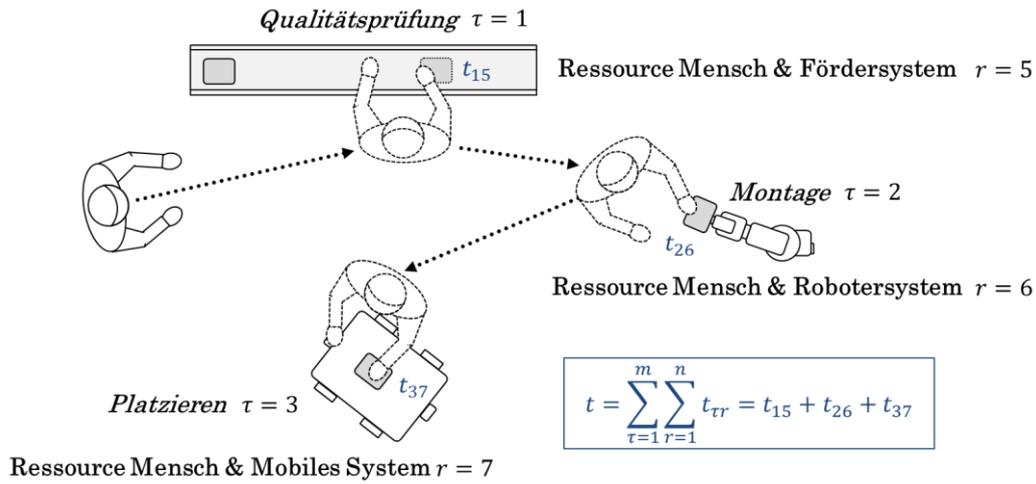


Abbildung 11: Berücksichtigung taktzeitbestimmender Ausführungszeiten

Aus diesem Grund wird auch eine Ressourcenauswahlmatrix \mathbf{X} mit m Einheitsvektoren definiert, die jeder τ -ten Tätigkeit eine Ressource bzw. eine Ressourcenkombination zuordnet:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{m1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{\tau r}) \in \{0,1\} \quad (6)$$

Die Taktzeit eines Prozesses in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen (MMA) ergibt sich somit durch:

$$t_{\text{MMA}} = \sum_{\tau=1}^m \sum_{r=1}^n x_{\tau r} t_{\tau r} \quad (7)$$

wobei

$$x_{\tau r} \in \{0,1\} \quad \forall \tau = 1, \dots, m, \quad \forall r = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^n x_{\tau r} = 1 \quad \forall \tau = 1, \dots, m \quad (9)$$

Gleichung (9) stellt an dieser Stelle sicher, dass einem Prozess immer nur eine Ressource bzw. Ressourcenkombination zugeordnet wird.

2.2 Klassifizierung und Einordnung

Im Allgemeinen lässt sich die Beziehung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine in mehrere Stufen gliedern (vgl. Haag 2014). Diese Stufen reichen von der ganzheitlichen Trennung der Arbeitsräume zwischen Mensch und Maschine bis hin zur vollkommenen Auflösung getrennter Arbeitsräume (vgl. dazu Tabelle 1).

In der *vollautomatisierten* Produktionszelle ist die Maschine durch eine trennende Schutzeinrichtung vom Menschen getrennt. Diese Schutzeinrichtung bleibt während des automatisierten Produktionsbetriebes geschlossen und der Mensch befindet sich ausschließlich außerhalb der Zelle. Außer bei der Inbetriebnahme, Programmierung oder Beseitigung von Störungen, findet hier kein direkter Kontakt zwischen Mensch und Maschine statt. Maschine und Mensch arbeiten jeweils getrennt und autonom.

Neben trennenden Schutzeinrichtungen, besteht auch die Möglichkeit einer Absicherung durch nicht-trennende Schutzeinrichtungen, wie beispielsweise Trittmatten oder Lichtgitter, i. e. *Zutrittsbeschränkungen*. Bei dieser Art der Absicherung, kann der Mensch zwar die Produktionszelle betreten, um beispielsweise das Werkzeug auszutauschen, die Maschine wird allerdings sicher stillgesetzt. Eine direkte Zusammenarbeit findet hier durch den Stillstand der Maschine nicht statt.

Eine weitere Möglichkeit der Absicherung ohne trennende Schutzeinrichtungen besteht in der Überwachung des Gefahrenbereichs mit sicheren Sensoren, sodass *Aufenthalte* des Menschen sicher detektiert werden. Wird ein Mensch im Gefahrenbereich erkannt, so wird die Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine in Abhängigkeit zur Distanz zum Menschen – mitunter bis zum Stillstand – reduziert. Auch in diesem Fall findet keine direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine statt.

Im Rahmen von *Eingriffszonen* arbeitet der Mensch in unmittelbarer Umgebung zur Maschine und kann auch gelegentlich in Kontakt mit ihr kommen.

Im Gegensatz zu einem unbeabsichtigten – aber durchaus tolerierbaren – Kontakt bei der Umsetzung von Eingriffszonen, ist im Rahmen des *Assistenzbetriebs* ein Kontakt zwischen Mensch und Maschine in bestimmten Bearbeitungsschritten sogar vorgesehen. Die Maschine unterstützt den Menschen hierbei wie eine dritte Hand.

Im Rahmen der *Kollaboration* teilen sich nun Mensch und Maschine einen definierten Arbeitsbereich und führen gemeinsam – in direktem Kontakt – eine Aufgabe durch.

Die *Mobile Manipulation* beschreibt schlussendlich die Mobilität von Maschinen innerhalb einer Produktion, wobei Maschinen über eine gewisse Autonomie verfügen und durch künstliche Intelligenz selbstständig ihren Weg und ihre Arbeitsschritte planen.

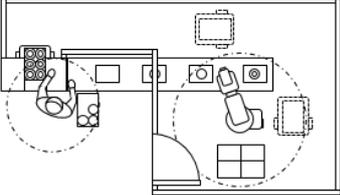
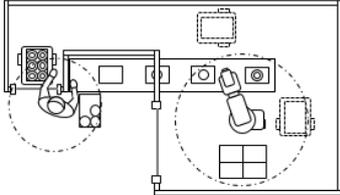
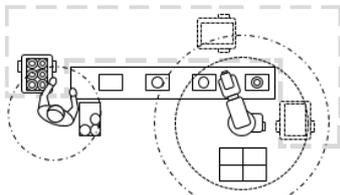
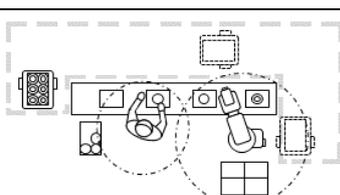
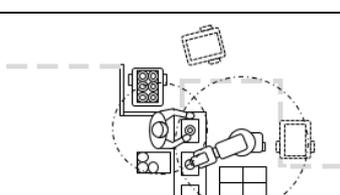
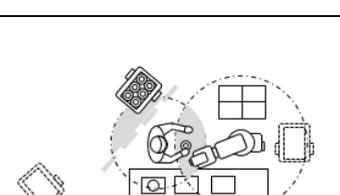
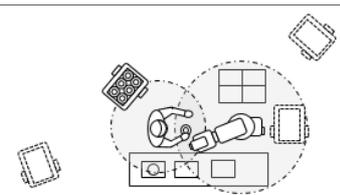
Kollaborationsstufe	Beschreibung	Visualisierung
I Vollautomatisierung: Schutzzaun	Mensch und Maschine sind durch trennende Schutzeinrichtungen voneinander getrennt. Der Mensch kann die Automatisierungszelle nur betreten, wenn die Maschine sicher stillgesetzt ist.	
II Ohne Schutzzaun: Zutrittsbeschränkung	Mensch und Maschine sind durch trennende und nicht-trennende Schutzeinrichtungen voneinander getrennt. Der Mensch kann die Automatisierungszelle jederzeit betreten – die Maschine wird sofort stillgesetzt.	
III Kooperation: Aufenthaltserkennung	Es gibt keine trennenden Schutzeinrichtungen. Gefahrenbereiche werden mit sicheren Sensoren überwacht. Der Mensch kann sich kurz und sporadisch im Maschinenarbeitsraum aufhalten. Die Geschwindigkeit der Maschine wird dabei je nach Abstand zum Menschen reduziert.	
IV Kooperation: Eingriffszonen	Mensch und Maschine arbeiten nebeneinander. Die Maschine ist mit sicherer Sensorik ausgestattet. Der Mensch kann gelegentlich in Kontakt mit der Maschine kommen, ohne dass die Maschine stillgesetzt wird.	
V Kooperation: Assistenz	Mensch und Maschine arbeiten in nächster Nähe. Die Maschine dient dem Menschen als Assistenzsystem. Der Mensch arbeitet in bestimmten Bearbeitungsschritten gemeinsam mit der Maschine.	
VI Kooperation: Kollaboration	Mensch und Maschine arbeiten in bestimmten, vordefinierten Bereichen miteinander, i. e. Kollaborationsbereichen. Mensch und Maschine arbeiten in direktem Kontakt zusammen.	
VII Kooperation: Kollaboration & Mobile Manipulation	Mensch und Maschine können zu beliebigen Zeiten, in beliebigen Bereichen und in beliebigen Konstellationen miteinander arbeiten. Die Maschine verfügt über Autonomie und künstliche Intelligenz.	

Tabelle 1: Stufen der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen

Die herkömmliche Klassifizierung bzw. Einordnung der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit, lässt sich im Grunde auf die **örtliche und zeitliche Beziehung beider Ressourcen**, i. e. Menschen und Maschinen, reduzieren. Dabei ist die örtliche und zeitliche Beziehung der Ressourcen von den jeweiligen ressourcenspezifischen Eigenschaften sowie der Arbeits- bzw. Ressourcenzuordnung zur Ausführung bestimmter Tätigkeiten abhängig. Abbildung 12 zeigt ein kollaborationsfähiges Arbeitssystem mit verschiedenen Ressourcen, wobei die Ausführung einzelner Tätigkeiten τ zu bestimmten Zeitpunkten t_τ an bestimmten Orten \mathbf{p}_τ erfolgt. Der Ort der Arbeitsausführung kann hierbei zudem fest oder flexibel sein – je nach Ressource, mit der die Zusammenarbeit erfolgt. Die Klassifizierung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen kann demnach in Abhängigkeit von ortsfesten oder ortsflexiblen Kollaborationsräumen erfolgen.

Die Eigenschaft einer Tätigkeit wird somit mit

$$E_\tau = \{t_\tau, \mathbf{p}_\tau\} \quad (10)$$

beschrieben.

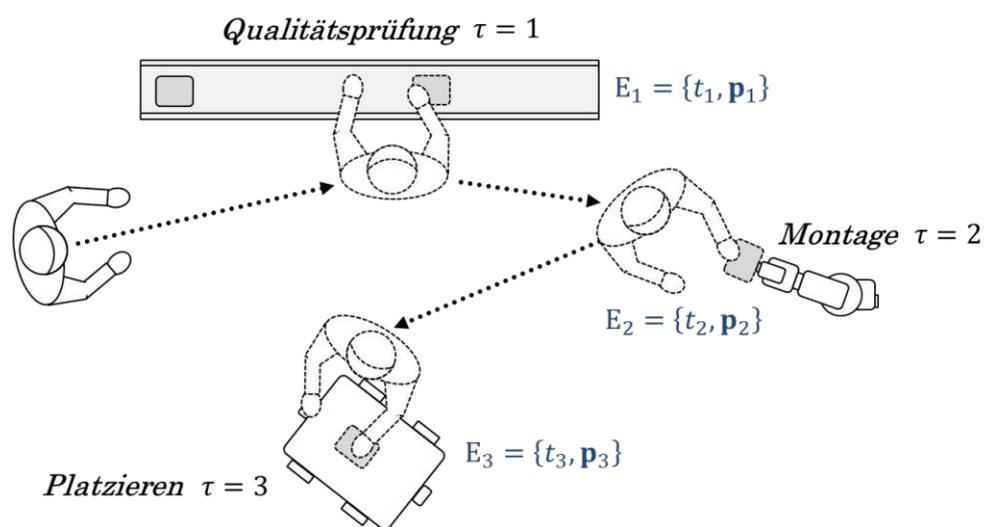


Abbildung 12: Kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem mit zeitlicher und örtlicher Definition der Arbeitsausführung

2.3 Eigenschaften kollaborationsfähiger Arbeitssysteme

Nach Vicentini (2020) kann die örtliche und zeitliche Beziehung zwischen Ressourcen durch zwei quantifizierbare Parameter beschrieben werden: Energie und Frequenz. Energie als Maß für die mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegte Masse der Maschine und Frequenz als Maß für die Gefährdungsexposition und -dauer des Menschen im Kollaborationsraum. Diese Parameter können folglich auch als Basis für die Ableitung planungsrelevanter Eigenschaften von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen herangezogen werden. Energie und Frequenz werden durch kennzeichnende Eigenschaften der Ressourcen, wie Art, Geometrie und Mechanik, sowie verhaltensspezifische Eigenschaften, wie Ruhe-, Bewegungs- und Störverhalten, beeinflusst. In einem Mensch-Maschine-Arbeitssystem bestimmen dann diese Eigenschaften die Aufgabenzuordnung sowie die örtlichen und zeitlichen Bedingungen der Arbeitsausführung und damit die individuellen Prozesszeiten je Arbeitstätigkeit. Die Eigenschaften bilden folglich die Grundlage für die zu berücksichtigenden Modellelemente im Rahmen eines entsprechenden Planungs- bzw. Taktzeitmodells. Folgende Eigenschaften sind demnach in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu berücksichtigen (vgl. auch Abbildung 13):

Maschinenspezifische Eigenschaften:

- Maschinenart (Kinematische Struktur, Reichweite, Arbeitsraum, Masse)
- Endeffektor inkl. Werkstück (Größe, Masse)
- Maschinensystem (Position und Ausrichtung)
- Verfahrswege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (Bewegungsverhalten und Grenzbereiche)
- Befestigungen, Spannvorrichtungen bzw. periphere Einrichtungen (Gestaltung und Platzierung)
- Schutzeinrichtung (Art und Position der Arbeitsraumüberwachung im Sinne einer Positions-, Geschwindigkeits- und Kraftüberwachung)

Menschenspezifische Eigenschaften:

- Anthropometrie (Körpergröße, Reichweite, Greifraum)
- Ergonomie (Arbeitspositionen, bevorzugte Tätigkeiten)
- Physische Grenzen (Tragfähigkeit, physische Bewegungseinschränkungen, Reaktions-, Bewegungs- und Vorgabezeiten)
- Psychophysiologie (Lernfähigkeit, Stressreaktionen)

	Kennzeichnende Eigenschaften			Verhaltensspezifische Eigenschaften		
	Artbestimmende Eigenschaften	Geometrische Eigenschaften	Mechanische Eigenschaften	Ruheverhalten	Bewegungsverhalten	Störungsverhalten
Maschine	<ul style="list-style-type: none"> • Fördersystem • Mobile Plattform • Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Kinematische Struktur • Reichweite • Arbeitsraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaltzeiten • Geschwindigkeiten • Beschleunigungen • Traglasten • Kräfte • Grenzwerte 	Wartezeiten	Bewegungsgleichung	Störfrequenz und -dauer
Mensch	Diversität	<ul style="list-style-type: none"> • Körpergröße • Reichweite • Greifraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionszeiten • Geschwindigkeiten • Beschleunigungen • Traglasten • Kräfte • Grenzwerte 	Wartezeiten	Bewegungsgleichung	Psychophysiologie
Sich daraus ergebende planungsrelevante Eigenschaften in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen						
Mensch-Maschine-System	Fähigkeiten zur Prozessausführung	Kollaborationsraum	Bewegungsgrenzen		Prozesszeiten	Ausfallzeiten

Abbildung 13: Planungsrelevante Eigenschaften kollaborationsfähiger Mensch-Maschine-Arbeitssysteme

2.4 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Forschungsarbeit beschränkt sich auf die Zusammenarbeit zwischen Menschen und drei Arten von Maschinen (siehe dazu auch Abbildung 14):

- Mensch – Fördersystem (z. B. Arbeiten an Produkten, wie Qualitätsprüfung oder Montagetätigkeiten, aber auch Entnehmen/Platzieren von Produkten)
- Mensch – Mobiles System (z. B. Entnehmen/Platzieren von Produkten oder Werkzeugen)
- Mensch – Robotersystem (z. B. gemeinsames Handling, gemeinsame Bearbeitung von Produkten)

Die örtliche Definition und die entsprechende örtliche Einschränkung der Arbeitsausführung ist hierbei von der Maschinenart abhängig. Zudem ist die kollaborative Arbeitsausführung auch zeitlich definiert und beschränkt.

Die Ermittlung der Taktzeit in kollaborationsfähigen Arbeitssystemen basiert demnach auf Methoden der Taktzeitermittlung von manuellen und maschinellen Prozessen unter der jeweiligen Berücksichtigung der kennzeichnenden sowie verhaltensspezifischen Ressourceneigenschaften sowie der wechselseitigen Beeinflussung ressourcenspezifischer Eigenschaften.

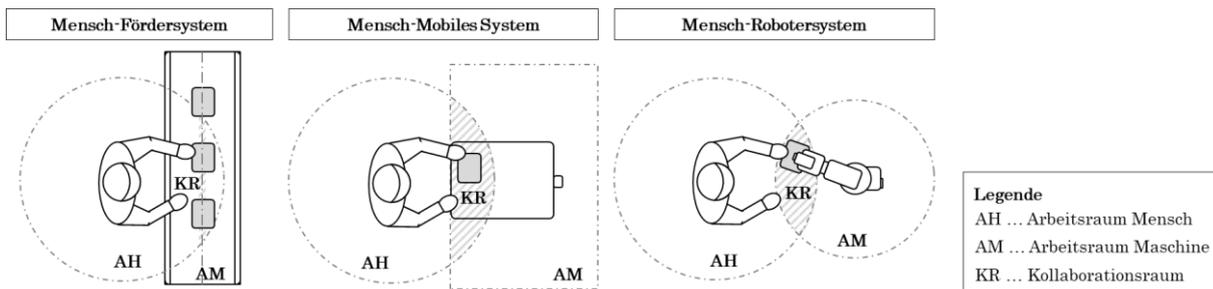


Abbildung 14: Betrachtete kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme

Dabei lehnen sich die Methoden der Taktzeitermittlung sowohl an Methoden der Fähigkeits- und Anforderungsermittlung von Ressourcen und Prozessen als auch an Methoden der Aufgabenallokation bzw. Ressourcenzuordnung, sowie Methoden der prospektiven Gefährdungsbeurteilung an.

In der vorliegenden Forschungsarbeit geht es allerdings nicht um die Modellierung und Abbildung von menschlichem oder maschinellm Verhalten, sondern lediglich um das Aufzeigen der wechselseitigen Beeinflussung von Ressourcen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und der Art und Weise der notwendigen Berücksichtigung dieser wechselseitigen Beeinflussung in einem entsprechenden Modell zur Taktzeitermittlung.

Abschnitt II

Stand der Technik und Forschung

3 Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Arbeitssystemen

Aufgrund der bisherigen räumlichen Trennung von Menschen und Maschinen und der damit verbundenen Aufgabentrennung, wurde die Gestaltung von Automatisierungssystemen und die Gestaltung von manuellen Arbeitsplätzen getrennt voneinander betrachtet. Dies hatte zur Folge, dass auch Methoden der Taktzeitermittlung für manuelle und maschinelle Tätigkeiten getrennt voneinander entwickelt wurden und unterschiedlich sind. Im Folgenden werden deshalb zunächst auf Basis von Planungsmethoden in den genannten Bereichen, konventionelle, industrielle Methoden der Taktzeitermittlung angeführt, um schließlich auf Methoden im Bereich der Forschung zu verweisen, die bereits Aspekte einer ganzheitlichen Berücksichtigung von Menschen und Maschinen in einem einzigen Planungswerkzeug umfassen.

3.1 Industrielle Methoden der Taktzeitermittlung

Bei der Planung maschineller Arbeit werden vorrangig die Ziele der Programmvalidierung und Taktzeitermittlung verfolgt. Im Bereich der robotergestützten Automatisierung wird hier meist für jede einzelne Maschine ein Steuerprogramm in einer separaten Simulationsumgebung offline erstellt, gegebenenfalls visualisiert und anschließend validiert. Die Zusammenhänge mit anderen Maschinen werden hier nur in Form einer Variablenübertragung bzw. -kommunikation simuliert. Eine echte, durchgängige Kommunikation bzw. Abbildung einer wechselseitigen Beeinflussung einzelner Maschinen findet dabei meist nicht statt. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik einzelner Maschinen- und Anlagenteile stehen zudem verschiedene herstellereinspezifische Offline-Planungswerkzeuge für die jeweiligen Maschinen zur Verfügung. Das liegt im unterschiedlichen Fokus der jeweiligen Planungstools begründet.

Beispielsweise kommt es bei der Roboterplanung einerseits auf genaue Taktzeitermittlungen und andererseits auf eine dreidimensionale Visualisierung der Bewegungspfade an, da es um die Überprüfung von möglichen auftretenden Kollisionen geht. So umfasst ein Planungswerkzeug eines Roboterherstellers auch ein Geometriemodell der Roboterkinematik sowie ein mathematisch getreues Modell der Robotersteuerung, um Taktzeiten bzw. Bewegungspfade bis zu einer Genauigkeit von 99,9 % zu ermitteln (Wloka 2013). Auf der anderen Seite kommt es bei der Bewegungsplanung von Mobilien Plattformen auf Sensorinformationen und deren Verarbeitung an. Bei der Planung der Verhaltenslogik einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) auf die logisch richtige Verknüpfung einzelner Funktionsblöcke. Die Taktzeitermittlung bei letztgenannten Maschinen war eher im Hintergrund, sodass deren Einfluss nicht oder nur rudimentär in robotergestützten Arbeitssystemen berücksichtigt wurde.

Mittlerweile gibt es aber herstellerunabhängige Planungswerkzeuge, die bereits eine Integration mehrerer Maschinen in einer einzigen Simulationsumgebung zulassen. Die integrierten Modelle basieren hierbei allerdings meist auf rein kinematischen Modellen und vereinfachten logischen Verknüpfungen, wodurch beispielsweise Taktzeituntersuchungen lediglich noch mit einer Genauigkeit von 95 % (Wloka 2013) oder die Validierung der Verhaltenslogik nur noch begrenzt erfolgen kann.

Im Allgemeinen lässt sich jedoch zusammenfassen, dass Methoden der Taktzeitermittlung maschineller Tätigkeiten einerseits auf Erfahrungswerten und andererseits auf (hauptsächlich) kinematischen Simulationsmodellen sowie Ist-Zeiterfassungen (beispielsweise mittels Stoppuhr) von bereits implementierten Systemen beruhen (siehe Abbildung 15).

Die Taktzeitermittlung manueller Tätigkeiten basiert im Gegensatz dazu auf methodischeren Verfahren, da international zunehmende Regulierung durch Verordnungen und Richtlinien bereits ein wachsendes Bewusstsein für Gestaltungsgrundsätze manueller Tätigkeiten (siehe dazu auch das Normenverzeichnis im Anhang) initiierte.

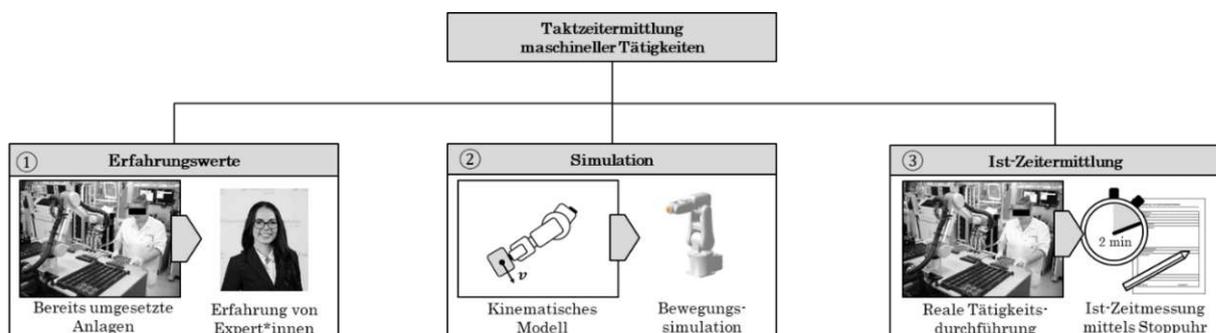


Abbildung 15: Taktzeitermittlung maschineller Arbeit

Obwohl die Planung manueller Arbeit bislang hauptsächlich die Gestaltung des Arbeitsplatzes in Abhängigkeit von Körpermaßen unter der Nutzung von Checklisten, Greifraumschablonen oder normativen Maßangaben fokussierte, fällt heute die manuelle Arbeitsgestaltung allgemein unter den Begriff der Ergonomie – wo auch die Taktzeit eingeordnet ist. Im Rahmen der Taktzeitermittlung manueller Tätigkeiten kommen Methoden zur Planzeitermittlung, Simulation sowie Ist-Zeitermittlung zum industriellen Einsatz (siehe Abbildung 16).

Ein bewährtes Verfahren zur Planung und Bewertung manueller Arbeit im Sinne der Ermittlung von Vorgabezeiten ist beispielsweise Methods-Time Measurement (MTM). Mit der zunehmenden Digitalisierung der Produktentstehungsprozesse wurden auch digitale 3D-Menschenmodelle entwickelt, die bereits zur Planung und Bewertung manueller Arbeit – insbesondere zur präventiven, ergonomischen Absicherung von manuellen Arbeitsplätzen – verwendet werden. Aktuell gibt es mehr als 200 digitale Menschenmodelle, die sowohl für rein anthropometrische Darstellungen bis hin zu Muskelbeanspruchungsanalysen herangezogen werden können. Eine detaillierte Auflistung ist bei Mühlstedt (2012) zu finden, wobei diese Auflistung prinzipiell eine Erweiterung der Verzeichnisse von Duffy (2008) darstellt.

Die derzeit eingesetzten digitalen Menschenmodelle haben weitestgehend gleiche bzw. ähnliche Eigenschaften und Funktionen. Sie bestehen aus einem inneren Skelettmodell und einer umschließenden Hülle, wobei perzentilierte anthropometrische Eigenschaften entsprechend einer zu untersuchenden Nutzerpopulation abgebildet werden können. Diese digitalen Menschenmodelle dienen allerdings vorwiegend statischen Analysen, d. h. der Bewertung und Visualisierung von Körper- und Handhaltungen, des Blickfeldes, des Greifraums zur Erreichbarkeit von Objekten sowie der Laufwege. Bislang ist der Funktionsumfang dieser Softwaretools also auf die Integration von anthropometrischen und statischen Faktoren, wie Abmessungen des Arbeitsplatzes, Körpergröße, Bewegungsradius der Arme oder Körperkräfte beschränkt.

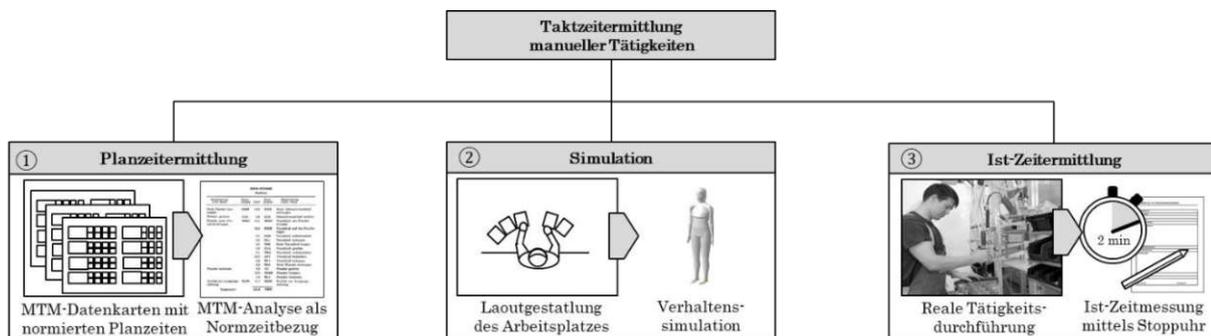


Abbildung 16: Taktzeitermittlung manueller Arbeit

Die dynamische Betrachtung im Sinne einer physiologischen Bewertung und Absicherung von Tätigkeiten an maschinell bewegten Objekten ist meist auf Tätigkeiten beschränkt, bei denen die Relativgeschwindigkeit zwischen Mensch und bewegtem Objekt Null beträgt. Die Verfolgung von bewegten Objekten durch das digitale Menschmodell ist in den seltensten Fällen möglich (vgl. Komenda und Breitenecker 2016a). Zudem ist die Bewegungsmodellierung des Menschmodells noch weitestgehend an das Programmieren von Robotern angelehnt (siehe dazu Abbildung 17). Das bedeutet, dass für eine bestimmte Pose einzelne Freiheitsgrade des Menschmodells zu definieren sind. Das ist mit erhöhtem Aufwand verbunden, da ein digitales Menschmodell im Durchschnitt 86 Freiheitsgrade an 50 Segmenten – im Vergleich zu einem Industrieroboter mit 6 Freiheitsgraden – besitzt. Die Firma imk automotive GmbH mit Sitz in Chemnitz, Deutschland, hat das Potenzial der einfachen Modellierung manueller Arbeit erkannt und ein eigenständiges Softwareprogramm namens ema® (Editor Menschlicher Arbeit) entwickelt.

ema® verwendet im Vergleich zu anderen Mensch-Modellierungswerkzeugen ein Modellierungsverfahren auf Basis von Verrichtungen, das den Modellierungsaufwand manueller Arbeit um ein Vielfaches reduziert (vgl. Fritzsche et al. 2011 oder Komenda und Leidholdt 2016). Grund dafür ist die Tatsache, dass die Modellierung von Arbeitstätigkeiten in ema® nicht auf Basis einer Maschinenmodellierung erfolgt, bei der man jede einzelne Gelenkkonfiguration manuell definiert, sondern dass hier Prozesse in Form von Arbeitsanweisungen definiert werden. ema® ist daraufhin in der Lage, anhand der Arbeitsanweisungen einen Bewegungsablauf selbstständig zu modellieren. Hinzu kommt, dass die Taktzeitermittlung auf MTM beruht.

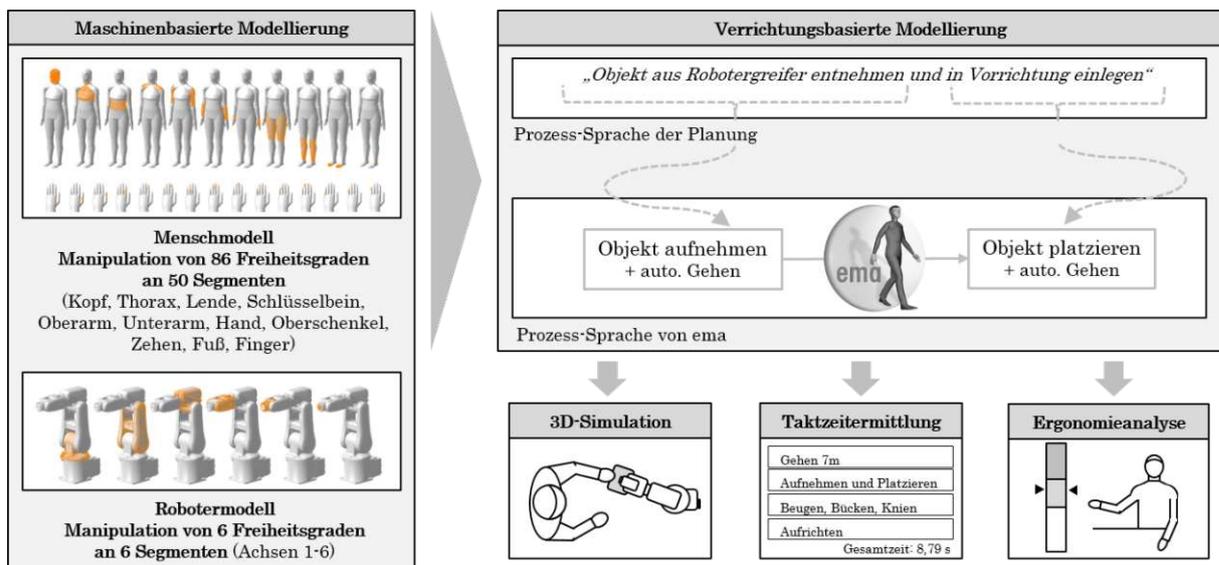


Abbildung 17: Modellierung von Arbeit auf Basis von Prozesszeitbausteinen

Im Vergleich zu herstellerspezifischen Planungswerkzeugen für Maschinen, verfügen herstellerunabhängige Werkzeuge über die Möglichkeit einer Integration verschiedener Ressourcen. So können mittlerweile beispielsweise in *ema*®, *Tecnomatix* (von Siemens PLM) oder *Delmia* (von Dassault Systèmes) sowohl Menschen als auch Maschinen in einem Planungswerkzeug abgebildet werden (vgl. Glogowski et al. 2018). Leider ist hier aufgrund der sequenziellen Modellierung eines Nominalprozesses dennoch nicht die Möglichkeit gegeben, die wechselseitige Beeinflussung der kollaborationsfähigen Ressourcen im Planungsvorgehen automatisiert zu berücksichtigen. Ein ganzheitliches Planungsvorgehen würde Menschen und Maschinen mit ihren spezifischen Eigenschaften und Verhaltensweisen gemeinsam abbilden und die wechselseitige Beeinflussung des Bewegungsverhaltens aufgrund der zeitlichen und örtlichen Nähe der kollaborationsfähigen Ressourcen mitberücksichtigen (Abbildung 18).

Aus diesem Grund werden drei wesentliche Faktoren für die Taktzeitermittlung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen als wesentlich erachtet:

- **Ganzheitlichkeit:** Gemeinsame Betrachtung von Mensch und Maschine
- **Dynamik:** Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung von menschlichen und maschinellen Faktoren
- **Mehrdimensionalität:** Mehrdimensionale Formulierung des Taktzeitproblems

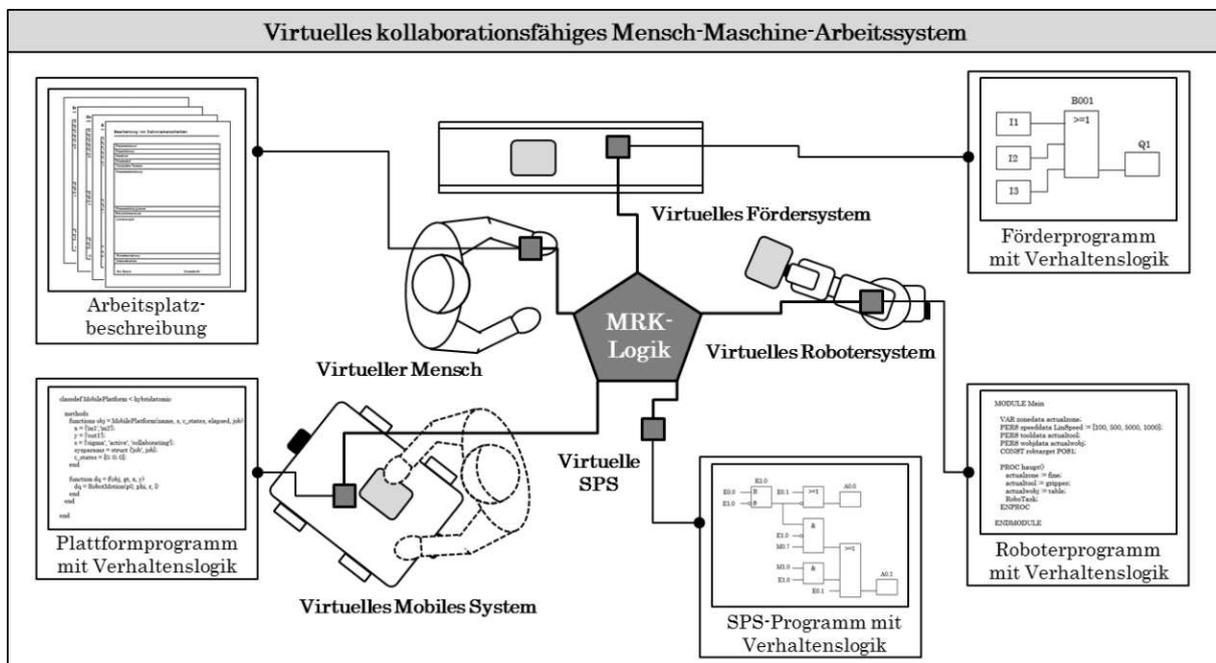


Abbildung 18: Ganzheitliche Taktzeitermittlung durch die gemeinsame Berücksichtigung von Menschen und Maschinen

3.2 Stand der Forschung im Bereich der Taktzeitermittlung

Um eine kritische und objektive Darstellung des aktuellen Forschungsstandes zu Methoden und Modellen der Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu erhalten, wurde eine systematische und methodische Literaturanalyse nach Ramdhani et al. (2014) sowie Okoli und Schabram (2010) durchgeführt. Die dabei angewandte Vorgehensweise wurde leicht adaptiert und lässt sich anhand folgender Analyseschritte beschreiben:

1. Formulierung der Suchkriterien und Definition von Inklusions- bzw. Exklusionskriterien

Für die Literatursuche wurden die Suchkriterien

- Taktzeit,
- Taktzeitermittlung,
- Mensch-Roboter-Arbeitssystem,
- cycle time estimation,
- cycle time prediction model,
- human-robot-system sowie
- multi-agent system

herangezogen. Die Literatursuche erfolgte in den wissenschaftlichen Datenbanken Science Direct/Scopus, Emerald, Springerlink, IEEE Xplore und Google Scholar. Darüber hinaus wurden auch Publikationen in relevanten Journalen wie das Robotics and Computer-Integrated Manufacturing oder der CIRP Annals geprüft.

Mithilfe der Inklusions- bzw. Exklusionskriterien wurde sichergestellt, dass die zuvor definierte Themenstellung berücksichtigt wird und nicht relevante Publikationen ausgeschlossen werden. Diese umfassten:

- Schlüsselwörter: planning, simulation, optimization, hybrid modelling, human-robot-collaboration
- Zeitraum: 2010 bis 2021
- Sprache der Publikation: deutsch oder englisch
- Relevante Literaturtypen: Journal- und Konferenzbeiträge, Bücher und Buchkapitel

2. Definition von Analyse Kriterien

Für die Auswahl und Bewertung der Literatur wurden zudem Analyse Kriterien im Sinne von in den Forschungsarbeiten berücksichtigte Modellelemente definiert:

- **Bewegungsmodell:** Berücksichtigung der ressourcenspezifischen Bewegungspfade

- **Kollaborationsmodell:** Berücksichtigung der synchronisierten Bewegung von Mensch und Maschine
- **Physikalisches/Physiologisches Modell:** Berücksichtigung von physikalischen und physiologischen Grenzbereichen bei der Aufgabendurchführung
- **Kollisionsmodell:** Berücksichtigung von Kollisionen zwischen Mensch und Maschine
- **Verhaltensmodell:** Berücksichtigung der Bewegungsbeeinflussung durch die zeitliche und örtliche Nähe von einzelnen Ressourcen
- **Fehlermodell:** Berücksichtigung von maschinell oder menschlichem Fehlverhalten

sowie Beschreibungs- bzw. Modellierungsarten in der Form:

- **Metamodell:** Konzeptuelle oder formale Beschreibungsformalismen
- **Syntax:** Übersetzung des Metamodells in ausführbaren Maschinencode
- **Visualisierung:** Visualisierung des Modellverhaltens in 3D

3. Auswahl der Literatur

Die Auswahl der Literatur erfolgte in zwei Stufen, i. e. (i) Vorselektion anhand eines inhaltlichen Screenings des Titels und der Kurzfassung sowie (ii) einer systematischen und kritischen Reflexion hinsichtlich (a) der Autoren und des Erscheinungsdatums, (b) der publizierenden Institution und deren Forschungsschwerpunkte, (c) der Forschungsfragen in der jeweiligen Publikation, (d) die angewendete Methode sowie (e) die Anwendbarkeit im industriellen Kontext.

4. Bewertung der Literatur

Die für diesen Analyseschritt übergebliebene Literatur wurde einer Bewertung auf Basis der definierten Analyse Kriterien unterzogen.

5. Synthese und Darstellung der relevanten Forschungsarbeiten

Innerhalb dieses Schrittes wurden die relevanten Publikationen so zusammengefasst, dass der Kontext zur vorliegenden Arbeit ersichtlich wird. Zudem wurde die Bewertung anhand der Analyse Kriterien mit einer qualitativen Bewertungsmethode auf Basis von Kreissegmenten tabellarisch dargestellt.

Im Folgenden werden nun die für die Arbeit relevanten Publikationen, die im Rahmen der systematisch/methodischen Literaturanalyse identifiziert wurden, angeführt.

Wloka (2013) ermittelt Taktzeiten von maschinellen Arbeiten durch Modellierung und Simulation des Robotersystems bzw. -verhaltens. Dazu sind Daten über deren Gestalt, die Anordnung von peripheren Einrichtungen bzw. Arbeitsstationen im Arbeitssystem sowie die Steuerung im Modell beschrieben. Das Taktzeitmodell für maschinelle Arbeiten setzt sich folglich aus einem Kinematik-, einem Geometrie-, einem Steuerungs- sowie einem Simulationsmodell zusammen. Das Geometriemodell enthält dabei alle Informationen bzgl. der äußeren Form des Roboters und peripherer Einrichtungen im Arbeitssystem. Das Kinematikmodell beschreibt die räumliche Lage der einzelnen Gelenke des Roboters während der Abarbeitung einer bestimmten Roboterbahn. Das Technologiemodell dient der charakteristischen Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Roboters, wie z. B. maximale Verfahrbereiche, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Zusätzlich werden neben Kommunikationsschnittstellen Steuerungseigenschaften in einer algorithmischen Modellkomponente beschrieben. Das Simulationsmodell umfasst weitere simulationsspezifische Modellkomponenten, wie z. B. die Visualisierung von Greifvorgängen.

Bokranz und Landau (2012) ermitteln Taktzeiten von manuellen Arbeiten durch Prozesszeitbausteine, so genannte MTM-Bausteinen. MTM wurde in den 1950er in Amerika entwickelt und basiert auf empirisch ermittelten Studien zur manuellen Arbeitsausführung, in denen die ermittelten Prozesszeiten für spezifizierete Tätigkeiten in Form von Tabellen zusammengefasst wurden. Bei der Anwendung von MTM werden sämtliche vom Menschen ausgeführte Bewegungen auf bestimmte Grundbewegungen (wie z. B. greifen, fügen, loslassen und gehen) zurückgeführt, für die die benötigten Zeiten festgelegt sind. Aufbauend auf dem MTM-Verfahren haben sich zudem verdichtete Verfahren abgeleitet, die die Grundbewegungen zusammenfassen (z. B. »aufnehmen und platzieren«, bestehend aus »hinlangen, greifen, bringen, fügen und loslassen«) und somit eine schnellere und häufig auch ausreichend genaue Analyse von manuellen Arbeitsabläufen ermöglichen. Die gängigsten verdichteten Systeme sind MTM-UAS (Universelles Analysier-System) für die Serienfertigung und MTM-MEK (MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung). MTM lässt sich laut Kuhlant (2015) auch dafür anwenden, Teiloperationen, die zu einer insgesamt negativen Beurteilung der manuellen Arbeit geführt haben, in Maschinentätigkeiten zu übertragen – was zu einem interessanten Ansatz zur Aufgabenaufteilung im Rahmen von kollaborativen Tätigkeiten führt.

Schröter et al. (2016) definierte auf Basis der MTM-Prozesszeitbausteine einen Ansatz zur Beschreibung von Roboterbewegungen. Diese so genannten RTM-Bausteine (Robot Time and Motion) beinhalten fünf kategorische Elemente, i. e. Bewegung (hinlangen, bewegen, orientieren), Messen (stoppen der Bewegung aufgrund eines Sensorsignals oder Kraftüberschreitung, Informationen über Berührung oder Kamera), Greifen (Aufnehmen und Platzieren), Verzögerung (prozessspezifische Verzögerungen bzw. Wartezeiten) und Bewegungsart (linear, point-to-point). Mithilfe der RTM-Bausteine ist es nun möglich, Aufgaben in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen bereits in der Planungsphase mithilfe eines Beschreibungsformalismus zu definieren. Aufgrund der Anlehnung an die MTM-Bausteine können auch unterschiedliche

Aufgabenteilungsvarianten miteinander quantifizierbar verglichen werden. Die Genauigkeit der RTM-Zeitbausteine ist jedoch gerade für point-to-point-Bewegungen des Roboters nicht zufriedenstellend, da sie stark vom Steuerungsmodell des jeweiligen Robotersystems abhängig ist.

Zeigler (1976) definierte einen modularen, hierarchischen Formalismus zur Modellierung und Analyse von diskreten Ereignissystemen (Discrete Event System Specification), der von Praehofer (1992) um eine Formulierung von kontinuierlichen Systemen (Differential Equation Specified System) erweitert wurde. So folgte von Zeigler et al. (2000) der Beschreibungsformalismus für hybride Systeme, der so genannten DEV&DESS-Formalismus (Discrete Event and Differential Equation Specified System). Das Modellkonzept beinhaltet dabei die Kombination eines diskreten (DEVS) und eines kontinuierlichen (DESS) Anteils, die sich gegenseitig beeinflussen können. Pawletta et al. (2006) implementierten diesen Beschreibungsformalismus in einer MatlabDEVS-Toolbox in MATLAB®, womit hybride Modelle von einem modifizierten diskreten Ereignissimulator simuliert werden können, der zur Generierung des kontinuierlichen Modellverhaltens gewöhnliche Differentialgleichungen zwischen einzelnen Ereignissen löst. Durch die Verwendung eines diskreten Simulators und der Abbildung von Modellelementen auf Objekten (Instanzen), bleibt die Information der hierarchischen Modellstruktur während der Simulation erhalten und ermöglicht somit die Simulation des dynamischen Systemverhaltens (siehe dazu auch Deatcu und Pawletta 2009 und 2012). Auch ein Mensch-Maschine-Arbeitssystem kann als hybrides Modell mit diskreten und kontinuierlichen Modellanteilen betrachtet werden, die sich gegenseitig beeinflussen.

Gombolay et al. (2013) betrachteten eine wechselseitige Beeinflussung von zeitlichen und räumlichen Beschränkungen in Mensch-Roboter-Arbeitssystemen. Sie zeigen echtzeitfähige Aufgabenzuweisung und -planung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen mithilfe eines eigens entwickelten Algorithmus namens Tercio. Tercio nimmt eine Reihe von Aufgaben, zeitliche Intervallbeschränkungen, eine Anzahl an Agenten und eine Zielfunktion als Eingabeparameter. Der Algorithmus berechnet dann zunächst eine optimale Agentenzuweisung durch die Lösung eines gemischt-ganzzahligen Problems (MIP), das Bedingungen für den Ausgleich an Arbeitsaufwand pro Agenten enthält. Basierend auf der Agentenzuweisung und der Aufgabenstruktur, ordnet Tercio dann die Aufgaben anhand eines analytischen Tests so an, dass alle zeitlichen Beschränkungen erfüllt sind. Sobald der Zeitplan die zeitlichen Vorgaben erfüllt, werden dem Problem Agenten- und Raum-Ressourcen-Sequenzierungsbeschränkungen hinzugefügt. Prozesszeiten werden hier allerdings statisch betrachtet.

Pellegrinelli und Pedrocchi (2018) erweiterten diesen Ansatz um den Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Roboters bei zeitlicher und örtlicher Nähe des Menschen. Sie gehen davon aus, dass der Roboter sein Bewegungsverhalten ändert, sobald der Mensch den Arbeitsraum betritt oder dem Roboter zu nahe kommt. Der Roboter wird hierbei seine Bewegung nicht zwangsläufig stoppen, sondern dem Menschen ausweichen und somit seinen geplanten Bewegungspfad dynamisch an die örtliche Nähe des Menschen anpassen. Aus diesem Grund ist eine Taktzeitabschätzung des maschinellen Verhaltens

in der Planungsphase nicht mehr mit herkömmlichen Methoden möglich, da sie von den spezifischen System- und Ressourcenbedingungen abhängig ist. Pellegrinelli und Pedrocchi verfolgten hierbei nun den Ansatz einer Arbeitsraumsegmentierung unter der Berücksichtigung des Raumvolumens, das vom Menschen und vom Roboter während der Bewegung eingenommen wird. Diese Segmentierung wird dann für die Definition einer Reihe an Markov-Ketten genutzt, die die Mensch-Roboter-Interaktion beschreiben und die Abschätzung der RoboterAusführungszeit ermöglichen.

Bänziger et al. (2018) verfolgen einen ähnlichen Ansatz wie Gombolay et al. (2013). Sie verwenden zur Aufgabenzuweisung und -planung allerdings einen genetischen Algorithmus und beschreiben die Aufgaben auf Grundlage von MTM-Bausteinen, welche um die Anzahl der Wiederholungen innerhalb eines Prozesses erweitert wurden. Des Weiteren beinhaltet das Modell auch Informationen zur Ergonomie der Arbeitsausführung. Auf Basis einer zweidimensionalen Simulation werden die örtlichen Beziehungen einzelner Ressourcen visualisiert und notwendige Zeiten für die daraus folgenden Bewegungspfade kalkuliert. Zur Ermittlung der optimalen Aufgabenzuordnung, wird dann die minimale Taktzeit als Funktion von Prozesszeiten, Wartezeiten sowie Bewegungszeiten aufgrund zurückzulegender Wege, die mit Gewichtungsfaktoren versehen sind, berechnet. Es ist allerdings unklar, inwieweit die simulationsbasierten Ausführungszeiten für die Optimierung herangezogen werden oder ob die simulationsbasierte Ermittlung der Ausführungszeiten lediglich als letzten Schritt nach der optimalen Aufgabenzuordnung auf Basis von MTM-Zeitbausteinen der Aktualisierung der Prozesszeiten dient.

Pérez et al. (2020) zeigen die Anwendung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems, das im Vergleich zu einer rein manuellen Produktion, eine kürzere Taktzeit, ein geringeres Risiko sowie geringere Kosten aufweist. Sie erreichten dies durch eine fähigkeitsbezogene Aufgabenzuordnung sowie eine optimierte Arbeitssystemgestaltung. Außerdem berücksichtigten sie Flexibilitätsanforderungen für zukünftige Anwendungsfälle bzw. Produktgruppen und ermittelten den Anstieg der Mitarbeiterzufriedenheit in der Zusammenarbeit mit dem kollaborationsfähigen Arbeitssystem. Pérez et al. (2020) zeigen zwar kein allgemeines Beschreibungsmodell zur Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen, präsentieren aber dennoch die Bedeutung der Berücksichtigung multipler Faktoren zur Taktzeitreduzierung in derartigen Systemen.

Zhang et al. (2020) zeigen den Zielkonflikt von minimaler Taktzeit und maximaler Ergonomie in Mensch-Maschine-Arbeitssystemen. Sie zeigen, dass die Taktzeitoptimierung auch in Konflikt zu anderen operativen Faktoren stehen können und präsentieren demnach einen Algorithmus, um diesen Zielkonflikt bestmöglich zu lösen. Zur Lösung dieses multidimensionalen Problems wird ein RIPG-Algorithmus (Restarted Iterated Pareto Greedy) vorgeschlagen, mithilfe dessen drei Verbesserungsstrategien verfolgt werden: eine problemspezifische und Heuristik-basierte Initialisierung, um eine gute Lösung zu finden, zwei auf Präzedenz basierende gierige und lokale Suchphasen um den Raum um die aktuelle Lösung abzusuchen, und ein Neustart-Mechanismus um dem Algorithmus zu helfen, aus lokalen Optima zu entkommen.

Tabelle 2 zeigt die qualitative Bewertung der relevanten Publikationen anhand der Erfüllung der zuvor definierten Analyse Kriterien.

Quelle	Planungs- faktoren			Modellelemente						Modellart		
	Ganzheitlichkeit	Dynamik	Mehrdimensionalität	Bewegungsmodell	Kollaborationsmodell	Physikalisches Modell	Kollisionsmodell	Verhaltensmodell	Fehlermodell	Metamodell	Syntax	Visualisierung
Bänziger et al., 2018	●	○	●	●	○	●	○	●	○	●	●	●
Bokranz und Landau, 2012	○	○	○	●	○	●	○	○	○	●	○	○
Gombolay et al., 2013	●	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●	●
Pellegrinelli und Pedrocchi, 2018	●	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●	●
Pérez et al., 2020	●	●	●	●	○	●	●	●	●	○	○	●
Schröter et al., 2016	●	○	○	●	●	○	○	●	○	●	○	○
Wloka, 2013	○	○	○	●	○	●	○	○	○	●	●	●
Zeigler et al., 2000	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	○
Zhang et al., 2020	●	●	●	●	●	○	○	●	○	●	●	○

Tabelle 2: Systematische Bewertung relevanter Publikationen in Bezug auf die Erfüllung taktzeitrelevanter Analyse Kriterien
(Legende: ● trifft zu; ● trifft teilweise zu; ○ trifft nicht zu)

3.3 Taktzeitbestimmende Parameter

Auf Basis der erfolgten Literaturanalyse zum Stand der Forschung von Modellen und Methoden zur Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen sind Ansätze der Berücksichtigung taktzeitbestimmender Einflussfaktoren ersichtlich. Im Folgenden sollen diese Faktoren eingehender diskutiert werden, um eine Basis für relevante Modellelemente im zu entwickelnden Taktzeitmodell zu identifizieren.

In rein robotergestützten Produktionen waren taktzeitbeeinflussende Faktoren die Arbeitssystemgestaltung (durch die Anordnung peripherer Einheiten sowie Arbeitsstationen), die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsparameter der Maschine sowie prozessspezifische Faktoren, wie Wartezeiten, Werkstückeigenschaften, oder

Reaktionszeiten auf Basis von Kommunikationsschnittstellen. Durch die Einbindung des Menschen im Rahmen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems kommen aber weitere Faktoren hinzu, wie

1. der **Sicherheitsmodus** der Maschine,
2. die **Diversität** des Menschen,
3. eine auf den Menschen angepasste **Arbeitssystemgestaltung** unter Berücksichtigung ergonomischer Faktoren,
4. die **Dynamik** des Mensch-Maschine-Systems (insbesondere in der Durchführung kollaborativer Arbeit),
5. die **Zuverlässigkeit** des Steuer- und Regelkreises bzw. die Vorhersagbarkeit des Bewegungsverhaltens der Ressourcen sowie
6. die **Aufgabenteilung** zwischen Mensch und Maschine.

Die angeführten taktzeitbeeinflussenden Faktoren werden nun im Folgenden anhand eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems bestehend aus vier Ressourcen, i. e. Mensch, Fördersystem, Mobiles System und Robotersystem, erläutert (vgl. Abbildung 19).

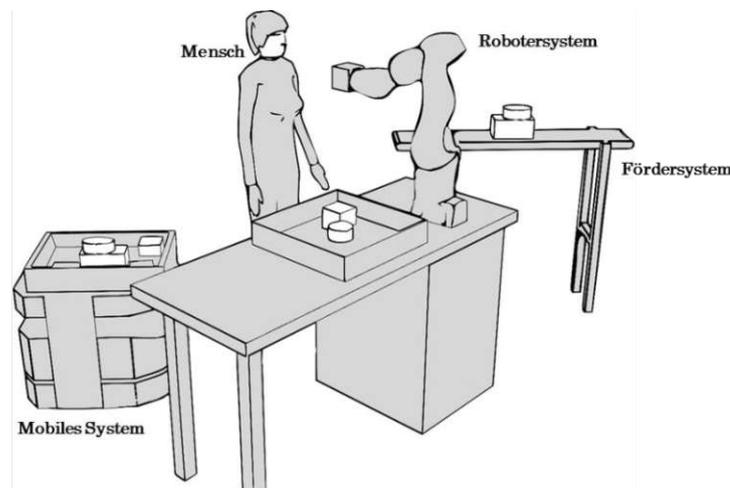


Abbildung 19: Beispielhaftes kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem

3.3.1 Sicherheitsmodus

Der Sicherheitsmodus der Maschine ist für ein Taktzeitmodell insofern relevant, als dass er die unmittelbaren Auswirkungen des Sicherheitssystems auf das Bewegungsverhalten der Maschine impliziert. In Bezug auf die sicherheitstechnische Ausführung von kollaborationsfähigen Maschinen, unterscheidet die ISO/TS 15066:2016 vier Sicherheitsmodi (Abbildung 20):

- a) Sicherheitsbewerteter überwachter Halt,
- b) Handführung,
- c) Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, sowie
- d) Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder durch Steuerung

Im Rahmen des *sicherheitsbewerteten überwachten Halts* muss der Roboter beim Personenzutritt in den Arbeitsraum sicher anhalten. Der Stopp hat hier mit der Kategorie 1 zu erfolgen, das Personendetektionssystem muss einem Performance Level d (PL d) genügen und die Sicherheitsabstände sind nach DIN EN ISO 13855:2010 einzuhalten. Alternativ ist auch eine Geschwindigkeitsreduzierung mit einem anschließenden Stopp der Kategorie 2 und einer sicheren Überwachung erlaubt. Hierbei kann auch ein automatischer Wiederanlauf erfolgen, sobald die Person den Arbeitsraum verlässt. Bei Ausfall einer überwachten Sicherheitsfunktion muss ein Stopp der Kategorie 0 erfolgen. Der Kollaborationsbetrieb im Sinne eines sicherheitsbewerteten überwachten Halts stellt im Grunde keine Neuerung dar, da er sich mit herkömmlichen Industrierobotern (gemäß DIN EN ISO 10218-1:2012) und einer überwachten Sicherheitsfunktion realisieren lässt.

Handführung bedeutet in diesem Zusammenhang die manuelle Führung des Roboters mittels Joystick oder Kraft-Momenten-Sensor (KMS). Die Einrichtung zum Stillsetzen im Notfall ist dabei nahe am Endeffektor anzubringen. Die Zustimmungseinrichtung muss speziellen Sicherheitsanforderungen entsprechen und der obere Grenzwert für die sicherheitsbewertete überwachte Robotergeschwindigkeit ist durch eine Risikobeurteilung festzulegen (PL d).

Die dynamische *Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung* ist heute noch ein aktuell wichtiger Forschungsbereich, da es hierbei um die sichere Personenerkennung im Maschinenarbeitsbereich bzw. Kollaborationsbereich geht. Die sichere Robotergeschwindigkeit muss einem PL d genügen. Der festgelegte Mindestabstand ist wieder gemäß DIN EN ISO 13855:2010 zu ermitteln. Die Geschwindigkeit des Roboters ist dabei bei der Annäherung einer Person zu reduzieren, wobei ein Sicherheitshalt bei Verletzung des Mindestabstands erfolgen muss. Das Personenerkennungssystem muss daher ebenfalls einem PL d genügen.

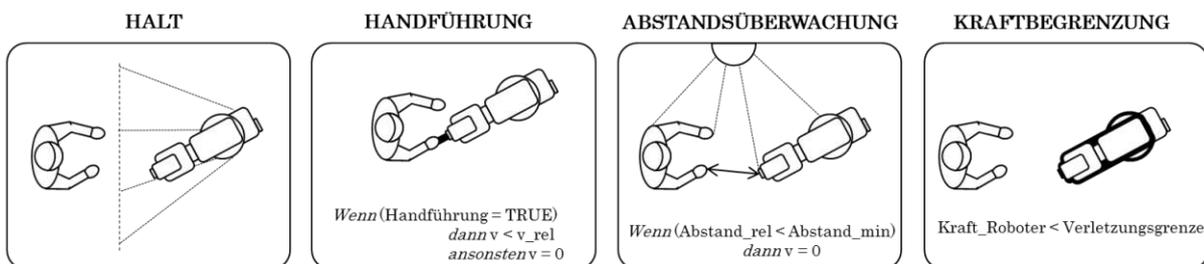


Abbildung 20: Sicherheitsmodi nach ISO/TS 15066:2016
(adaptiert nach Dietz und Oberer-Treitz 2015)

Für einen Kollaborationsbetrieb mit *Leistungs- und Kraftbegrenzung* wurden in den letzten Jahren so genannte kollaborierende Roboter entwickelt, die mit einer sensorischen, mechanischen und/oder elektrischen Begrenzung von Kräften und Drücken ausgestattet sind. Zur Festlegung der Grenzwerte bei Kollisionen mit bestimmten Körpersegmenten, ist der so genannte Kräfteatlas der ISO/TS 15066:2016 anzuwenden. Ein Körpermodell wird hier in 12 Körperregionen und 29 spezifische Körperbereiche mit den jeweiligen Belastungsgrenzwerten (Schmerzschiwellenwerten) eingeteilt. Die Einhaltung dieser Grenzwerte wird aktuell im Rahmen einer Risikobeurteilung mittels Kollisionsmessgerät validiert (vgl. beispielsweise PROBms von Pilz). Obwohl herkömmliche Industrieroboter mit entsprechender Sicherheitsausstattung ebenfalls für kollaborative Betriebe eingesetzt werden können, liegt der Vorteil von kollaborativen Robotern in dem geringeren Gewicht und der damit auch geringeren bewegten Masse. Durch die inhärente Leistungs- und Kraftbegrenzung sind gegebenenfalls keine zusätzlichen Schutzeinrichtungen notwendig.

In den spezifizierten Sicherheitsmodi kommt es zu folgenden Kontaktfällen und demnach zu folgenden Bewegungseigenschaften der entsprechenden Maschine:

- a) Beim sicherheitsbewerteten, überwachten Halt kommt es zu *keinem Kontakt* aufgrund eines *Maschinenstillstands* bei Eintritt in den Maschinenarbeitsbereich (vgl. Systeme ohne trennende Schutzeinrichtungen). Eine Kollision ist damit ausgeschlossen.
- b) Im Rahmen der Handführung kommt es zu einem *kontrollierten Kontakt* aufgrund eines *Maschinenstillstands* bei Eintritt in den Maschinenarbeitsbereich (vgl. Systeme ohne trennende Schutzeinrichtungen) und der Aktivierung der Handführung durch den Menschen. Eine Kollision ist auch hier ausgeschlossen.
- c) Bei der Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung kommt es ebenfalls zu *keinem Kontakt, aber einer erlaubten Annäherung* aufgrund der Einhaltung eines festgelegten Abstands und einer festgelegten Geschwindigkeit zum Menschen. Eine Kollision ist hier ebenfalls ausgeschlossen.
- d) Im Rahmen der Leistungs- und Kraftbegrenzung kommt es zu einem *erlaubten Kontakt*, bei dem *Kollisionskräfte und Drücke* für den Zusammenstoß mit einzelnen Körpersegmenten *begrenzt* sind. Eine Kollision zwischen Mensch und Maschine (beabsichtigt oder nicht) ist unter bestimmten Umständen möglich.

Die zeitliche und örtliche Beeinflussung des Bewegungsverhaltens der Maschine in Abhängigkeit des aktiven Sicherheitsmodus ist in Abbildung 21 dargestellt.

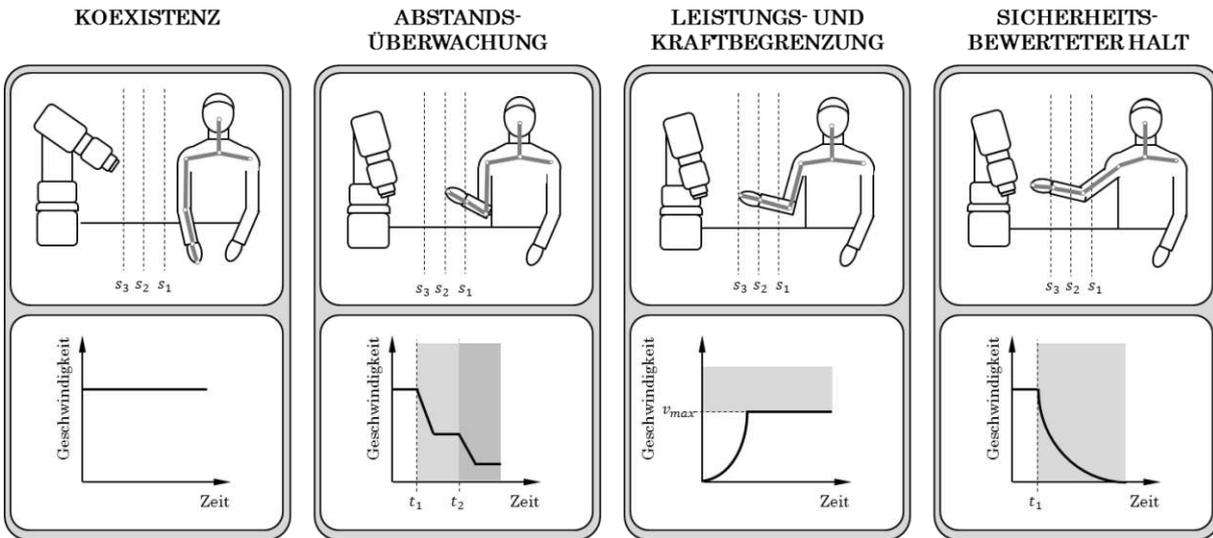


Abbildung 21: Bewegungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Sicherheitsmodus (adaptiert nach ABB Corporate Research 2014 und Pilz)

In diesem Sinne lassen sich kollaborative Tätigkeiten auf Basis der spezifizierten Sicherheitsmodi, wie folgt, definieren (Tabelle 3):

Sicherheitsmodus	Kollaborative Tätigkeit
Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	<ul style="list-style-type: none"> Mensch bewegt sich auf bewegte Maschine zu Maschinenstillstand bei Überschreitung eines Mindestabstands anschließende Tätigkeitsausübung am statischen Objekt
Handführung	<ul style="list-style-type: none"> Mensch bewegt sich auf bewegte Maschine zu Maschinenstillstand bei Überschreitung eines Mindestabstands Maschinenführung durch Menschen (Maschine folgt Mensch)
Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> Mensch bewegt sich auf bewegte Maschine zu bei Überschreitung eines Mindestabstands hält Maschine einen festgelegten Abstand und/oder eine festgelegte Geschwindigkeit zum Menschen synchronisierte Bewegung von Mensch und Maschine ggf. Tätigkeitsausübung am bewegten Objekt
Leistungs- und Kraftbegrenzung	<ul style="list-style-type: none"> Mensch bewegt sich auf bewegte Maschine zu Maschine bewegt sich mit einer spezifizierten maximalen Geschwindigkeit, sodass Druck- und Kraftgrenzwerte gemäß ISO/TS 15066:2016 bei einer möglichen Kollision nicht überschritten werden synchronisierte Bewegung von Mensch und Maschine Tätigkeitsausübung am bewegten Objekt

Tabelle 3: Kollaborative Tätigkeiten in den entsprechenden Sicherheitsmodi

Wird eine Maschine nun mit unterschiedlichen Sicherheitsmodi betrieben, so hat dies Auswirkungen auf die Taktzeit, da die Geschwindigkeit der Maschine in Abhängigkeit des definierten Sicherheitsmodus geregelt wird. Angenommen ein Roboter wird für eine Handhabungstätigkeit mit zwei unterschiedlichen Sicherheitsmodi betrieben. Im ersten Fall wird der Roboter mit einem sicherheitsbewerteten überwachten Halt gesteuert – d. h. die Geschwindigkeit des Roboters wird unabhängig von der Anwesenheit einer Person im Arbeitsraum konstant gehalten. Würde die Person allerdings den Kollaborationsraum betreten (der beispielsweise durch einen Lichtvorhang abgesichert wäre), würde der Roboter gestoppt werden. Im zweiten Fall wird der Roboter mit einer Abstandsüberwachung betrieben – d. h. die Geschwindigkeit des Roboters wird in Abhängigkeit des Abstands zur Person im Arbeitsraum so verringert, dass Druck- und Kraftgrenzwerte gemäß ISO/TS 15066:2016 bei einer möglichen Kollision eingehalten werden können. Die Anwendung der beiden Sicherheitsmodi führt zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Taktzeit. Exemplarisch ist dieser Einfluss bei einem Eintritt einer Person in den Arbeitsraum gezeigt (siehe Weg-Zeit Diagramm in Abbildung 22). Beim Vergleich von zwei Versuchen von demselben Prozess – jedoch mit unterschiedlichen Sicherheitsmodi – wird eine Taktzeitdifferenz offensichtlich. Die Darstellung veranschaulicht die Bewegung des Werkzeugarbeitspunktes in einer Raumrichtung (x-Koordinate). Das simplifizierte Modell wurde auf Geschwindigkeitsebene reduziert (es wurden keine Beschleunigungsrampen berücksichtigt) und unterscheidet drei Geschwindigkeiten 0, v_{red} und v_{max} . Bezüglich der Abstandsüberwachung gibt es in diesem Fall nur zwei modellierte Varianten: kein Einfluss oder Einfluss (dieser ist dann konstant). Wann immer der Abstandseinfluss aktiv ist, wird v_{max} auf v_{red} reduziert. Damit ergeben sich bei der Abstandsüberwachung (in Abhängigkeit des so definierten Sicherheitsmodus) längere Taktzeiten, da die Bewegungsausführung aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit länger dauert.

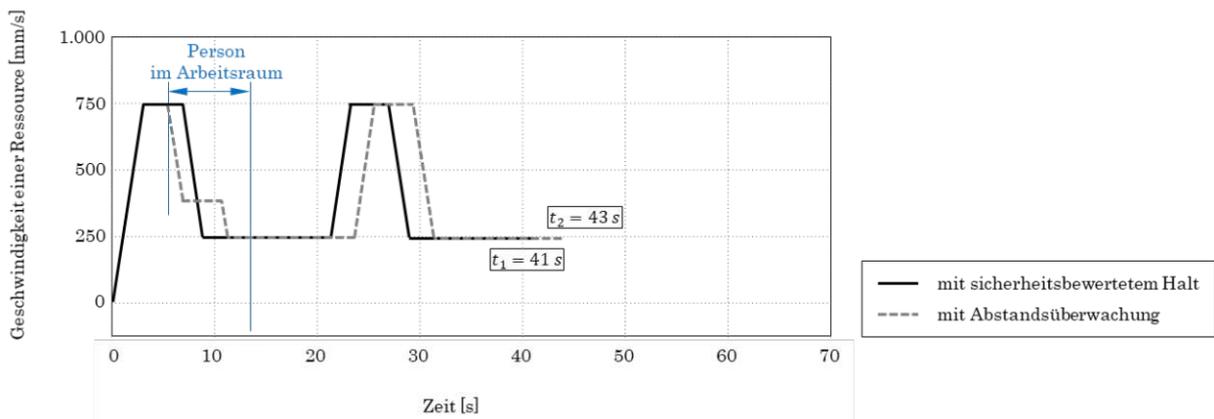


Abbildung 22: Einfluss des Sicherheitsmodus auf die Taktzeit

Die Prozesszeit eines Handhabungsprozesses kann sich in Abhängigkeit des aktiven Sicherheitsmodus der Maschine ändern.

3.3.2 Diversität

Im Allgemeinen betrachten Methoden zur Taktzeitermittlung manueller Arbeiten, wie MTM, Prozesszeiten für einzelne Aufgaben (beispielsweise *Hinlangen* oder *Aufnehmen*) als konstante Parameter. Diese Zeitangaben basieren auf Messungen von durchschnittlich geübten Menschen. Arbeiten in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen bieten aber oft nicht mehr die nötige Einlernzeit, um diese Vorgabezeiten zu erreichen. Außerdem beeinflussen intrinsische und extrinsische Faktoren die Arbeitsgeschwindigkeit der Menschen, mit der sie eine Aufgabe ausführen. Eine Studie von Prash (2010) hat gezeigt, dass verschiedene Individuen unterschiedliche Fähigkeiten in Abhängigkeit ihres Geschlechts, Alters und der jeweiligen Lernkurve haben. Daher ist die individuelle Arbeitsgeschwindigkeit und die damit einhergehende Prozesszeit als dynamische Größe zu betrachten. Zudem können sich Prozesszeiten auch dynamisch als Ergebnis individueller Ressourcenmerkmale, wie Müdigkeit oder individueller Lernkurven, ändern.

Die Änderung von individuellen Arbeitsgeschwindigkeiten von Menschen können mithilfe von experimentellen Untersuchungen ermittelt werden. Die Darstellung der Streuung dieser Zeiten kann anschließend durch Box-Plots visualisiert werden. Abbildung 23 visualisiert das adaptive Verhalten des Menschen am Beispiel der Bauteilentnahme eines Fördersystems. Nach MTM würde die Bauteilentnahme 2,717 Sekunden dauern, was in einer Objektgeschwindigkeit von rund 230 mm/s resultiert. Ändert man außerdem die Objektgeschwindigkeit, resultiert dies in einer veränderten Bewegungsgeschwindigkeit des Menschen. Bei größeren Objektgeschwindigkeiten reagiert und handelt der Mensch schneller, um das Objekt noch rechtzeitig aufnehmen zu können.

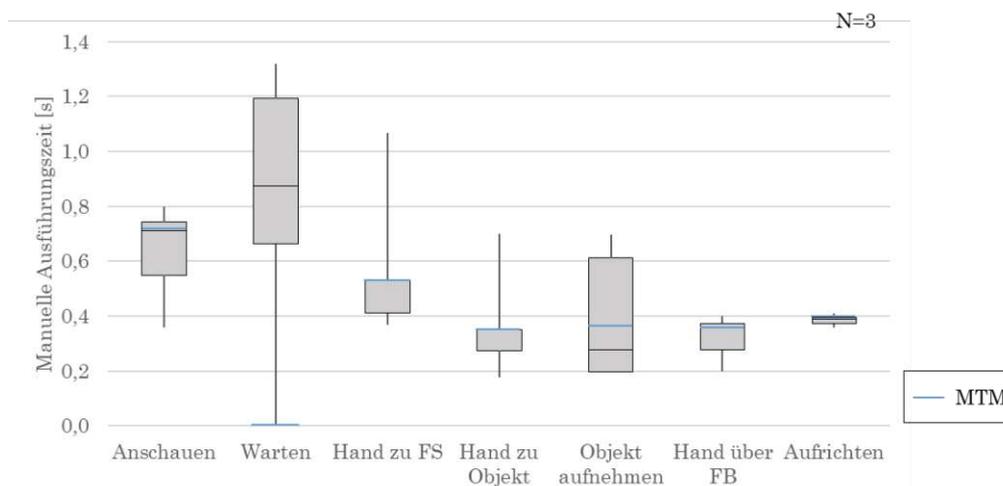


Abbildung 23: Einfluss der Diversität des Menschen auf die Taktzeit
(eigene Studie nach Komenda, 2016)

Die Prozesszeit eines Handhabungsprozesses kann in Abhängigkeit des ausführenden Menschen und seines aktuellen Zustands variieren.

3.3.3 Arbeitssystemgestaltung

Die kennzeichnenden Eigenschaften der Kollaborationspartner bestimmen nicht nur die geometrischen Daten des Arbeits- und Greifraums sowie des Kollaborationsraums, sondern auch die Freiheitsgrade der Bewegung. Des Weiteren werden durch die Maschinenart bzw. Diversität des Menschen physikalische Eigenschaften, wie Reaktionszeiten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Massen und Kräfte bestimmt. Die Grenzwerte dieser Eigenschaften werden einerseits durch Normen und Richtlinien und andererseits durch die Physiologie vorgegeben und gehen als Nichtlinearitäten ins Planungsmodell ein (Komenda und Breiteneker 2016b). Bei der Ableitung kollaborativer Grenzwerte wurde auf vorhandene Angabe aus Normen und Richtlinien der Bereiche Ergonomie und Maschinensicherheit zurückgegriffen. Zur Definition der zu überwachenden Randbedingungen und Grenzwerte, dient u. a. auch das Vorgehen im Rahmen der Risikobeurteilung nach DIN EN ISO 12100:2016, das sich aus einer Gefährdungsanalyse, einer Risikoeinschätzung und einer Risikobewertung zusammensetzt. Eine Zusammenfassung relevanter Werte ist in Tabelle 4 angeführt.

Anhand der Grenzwerte lassen sich auch die Minimalabmessungen eines kollaborativen Arbeitssystemraums ableiten, der in Abbildung 24 dargestellt ist. Die Abstände einzelner Maschinen und peripherer Einrichtungen zueinander definieren zudem die Längen der Bewegungspfade, die für die Ausübung eines bestimmten Prozesses zurückzulegen sind. Damit wird auch der Zeitanteil der Bewegungszeit, der in die Prozesszeit einfließt, beeinflusst – je länger der zurückzulegende Weg, desto länger die Bewegungszeit (siehe Abbildung 25).

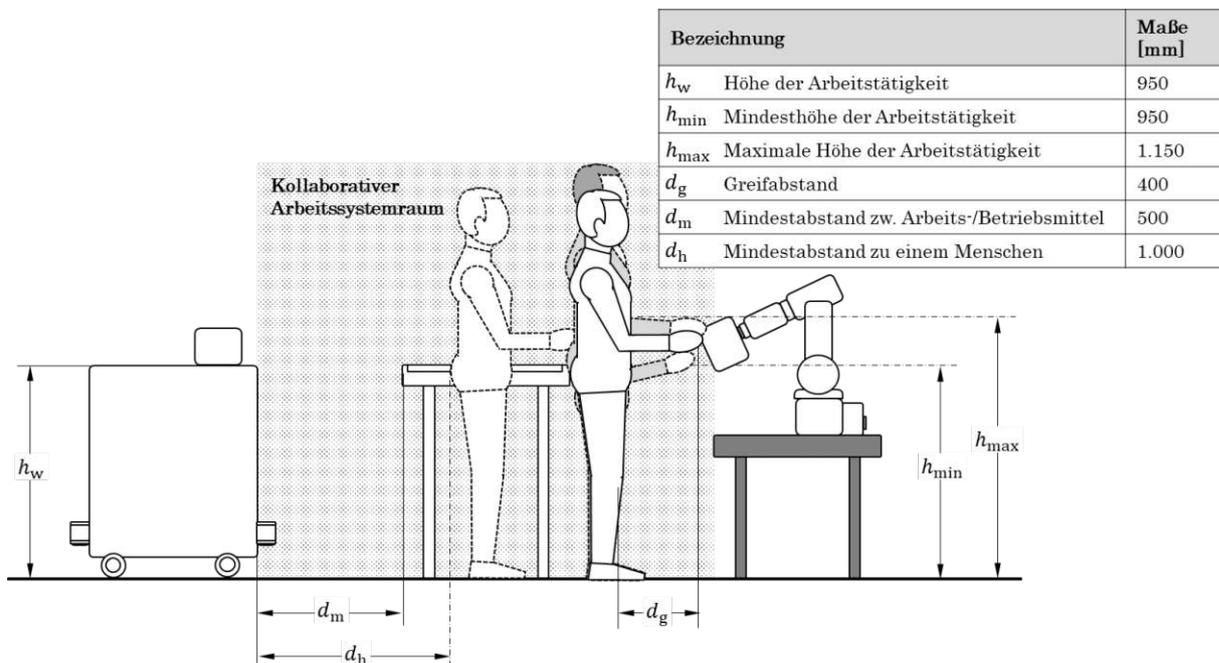


Abbildung 24: Abmessungen eines kollaborativen Arbeitsplatzes

Wert	Beschreibung	Norm
Abstände		
50 mm	Nachlaufweg des Torflügels nach dem ein Haltesignal angelegt wurde	DIN EN 12453
500 mm	Mindestsicherheitsabstand zu Flurförderzeugen auf beiden Seiten (2,1 m zur Höhe)	DIN EN ISO 3691-1
500 mm	Kleinster Abstand zwischen Arbeits- und Betriebsmittel und anderen Betriebsmittel beim Zu-, Ab- oder Umgang	
500 mm	Freier Bewegungsumfang um Hüfthöhe für Arbeiten im Stehen	
950 mm	Bis max. 1.150 mm Arbeitstischhöhe für stehende Tätigkeiten in Form von leichter Maschinen- und Werkzeugarbeit	
1.000 mm	Breite der freien Bewegungsflächen an jeder Stelle (1,5 m ² freie unverstellte Fläche am Arbeitsplatz)	
1.300 mm	Breite des Arbeitsbereichs (funktioneller Greifraum) für Arbeiten im Sitzen Bei einer Annäherungsrichtung senkrecht zum Schutzfeld: $d_s = (v_h t_s) + 8(d_l - 14)$ Bei einer Annäherungsrichtung parallel zum Schutzfeld: $d_s = (v_h t_s) + (1.200 - 0,4h)$ wobei d_s ...Mindestabstand zwischen Menschen und Sicherheitselementen v_h ...Annäherungsgeschwindigkeit des Menschen 2,0 m/s...maximale Greifgeschwindigkeit / Reaktionsgreifen 1,6 m/s...maximale Schreitgeschwindigkeit t_s ...Nachlaufzeit eines Sicherheitselements (Auslöse- und Ansprechzeit) d_l ...Abstand zwischen den Laserstrahlen eines Lichtvorhangs h ...Höhe des Schutzfeldes	DIN EN ISO 13855
Geschwindigkeiten		
65 °/s	Schwinkelgeschwindigkeit zur visuellen Kontrolle bewegter Objekte bei guten Kontrastverhältnissen (maximal 3 Prüfmerkmale)	
0,25 m/s	Reduzierte Geschwindigkeit beim Einrichten mit Zustimmungsschalter (am Werkzeugflansch gemessen)	ISO 10218-1/2
0,3 m/s	Maximale Fahrgeschwindigkeit, wo keine Fluchtmöglichkeit für eingeschlossenen Personen besteht	DIN EN 1525
0,5 m/s	Maximale Fahrgeschwindigkeit an der Hauptschließkante	DIN EN 12453
Kräfte		
750 N	Betätigungskraft auf liegenden Prüfkörpern (Durchmesser: 200 mm, Länge: 600 mm)	DIN EN 1525

Wert	Beschreibung	Norm
250 N	Betätigungskraft auf feststehenden Prüfkörpern (Durchmesser: 70 mm, Länge: 400 mm)	DIN EN 1525
400 N	Endkraft auf feststehenden Prüfkörpern: - Kollisionen bei Maximalgeschwindigkeit und Nennlast - Schaltkörper ist zusammengedrückt - Flurförderzeugen bei Kontakt durch Schaltkörpersignal angehalten	
150 N	Maximale statische Kraft in Kombination mit einer nachgiebigen Hauptschließkante auf einen Prüfkörper mit 80 mm Durchmesser	DIN EN 12453
400 N	Maximale dynamische Kraft bei Gefährdung durch Scheren	DIN EN 12453
35 N	Kraftbegrenzung im Störfall Klemm-, Quetsch- oder Stoßkraft am Kehlkopf	DIN ISO/TS 15066
65 N	Kraftbegrenzung im Störfall Klemm-, Quetsch- oder Stoßkraft im Gesicht	DIN ISO/TS 15066
110 N	Kraftbegrenzung im Störfall Klemm-, Quetsch- oder Stoßkraft am Bauch	DIN ISO/TS 15066
125	Kraftbegrenzung im Störfall Klemm-, Quetsch- oder Stoßkraft im Bereich der oberen und unteren Extremitäten	DIN ISO/TS 15066
Drücke		
10 N/cm ²	Druckbegrenzung im Störfall Druck- oder Flächenpressung im Kehlkopfbereich	DIN ISO/TS 15066
20 N/cm ²	Druckbegrenzung im Störfall Druck- oder Flächenpressung im Gesicht	DIN ISO/TS 15066
35 N/cm ²	Druckbegrenzung im Störfall Druck- oder Flächenpressung im Bauchbereich	DIN ISO/TS 15066
45 N/cm ²	Druckbegrenzung im Störfall Druck- oder Flächenpressung im Bereich der oberen und unteren Extremitäten	DIN ISO/TS 15066

Tabelle 4: Zulässige kollaborative Grenzwerte

Durch eine bestimmte Arbeitssystemgestaltung kann es zudem physische Grenzbereiche geben, die die Ausführbarkeit von bestimmten Tätigkeiten innerhalb eines bestimmten Zeitfensters vorsehen. Beispielsweise kann ein Qualitätssicherungsprozess an Objekten notwendig sein, die mittels Fördersystem einer Maschine zugeführt werden. Für den Qualitätssicherungsprozess ist also nur ein bestimmtes Zeitfenster vorgesehen (solange sich die zu prüfenden Objekte noch am Fördersystem vor der Maschine befinden).

Sind Abstände im Arbeitssystem zu groß, kann es sein, dass der Qualitätssicherungsprozess nicht mehr rechtzeitig durchgeführt werden kann, da die Bewegungszeit zum definierten Kollaborationsort der Qualitätsprüfung zu lange dauert. Mit mechanischen Grenzwerten der Bewegungsgeschwindigkeit einzelner Ressourcen können auf diese Weise auch die maximal zulässigen Abstände innerhalb eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems ermittelt werden.

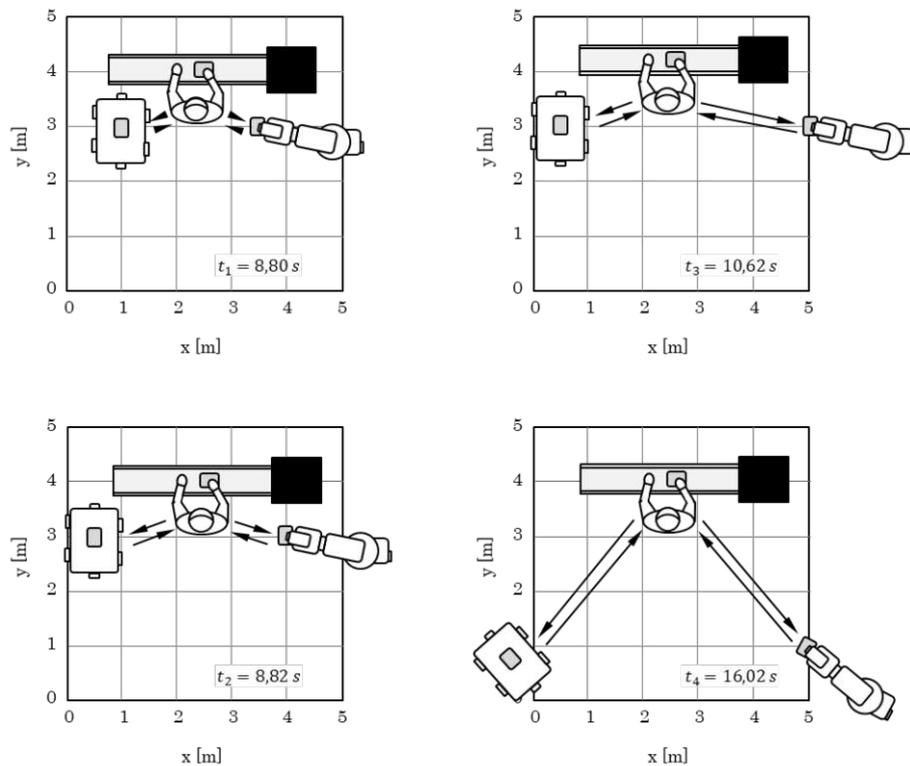


Abbildung 25: Einfluss der Arbeitssystemgestaltung auf die Taktzeit

Die Taktzeit eines kollaborativen Handhabungs- und Montageprozesses kann sich in Abhängigkeit des Arbeitssystemlayouts und der damit verbundenen Änderung der zurückzulegenden Wege ändern.

3.3.4 Systemdynamik

Die Art der Maschine bestimmt durch ihre kinematische Struktur das Bewegungsverhalten dieser. Das Bewegungsverhalten bestimmt zudem mögliche Bewegungspfade und damit mögliche, zulässige Orte der Kollaboration im Rahmen bestimmter Prozesse.

Da die zu modellierenden Ressourcen als Mehrkörpersysteme (MKS) betrachtet werden können, können zur rechnergestützten Aufstellung der Bewegungsgleichungen Mehrkörperformalismen herangezogen werden. Die Ressourcen bilden also Systeme starrer Körper, die durch Gelenke miteinander verbunden sind und somit kinematisch zusammenhängende Mehrkörpersysteme beschreiben. Bei den betrachteten Ressourcen handelt es sich um so genannte offene Mehrkörpersysteme mit Baumstruktur, bei denen die Relativbewegung der einzelnen Körper voneinander unabhängig ist.

Die Formulierung von Zwangsbedingungen und Kräften resultiert in einem Satz von Bewegungsgleichungen, die auf Basis der topologischen Definition als gewöhnliche Differentialgleichungen in den Gelenkkordinaten \mathbf{q} formuliert werden. Als Lösung dieses

Differentialgleichungssystem auf Basis numerischer Verfahren erhält man die Kinematik, i. e. Position, Orientierung, Geschwindigkeit und Beschleunigung, sowie die Kinetik, i. e. Kräfte und Momente, der einzelnen Körper bzw. Systeme (Ressourcen).

Eine Ressource besitzt im Allgemeinen also k_r starre Körper, deren Lage mit dem körperfesten Koordinatensystem K_{rk} relativ zum Inertialsystem R_r durch den Ortsvektor \mathbf{p}_{rk} beschrieben werden können. Die Lage der Ressource selbst mit dem Ursprungspunkt R_r wird durch den Ortsvektor \mathbf{p}_r relativ zum Ursprungspunkt O_o der Arbeitssystemumgebung beschrieben (siehe Abbildung 26).

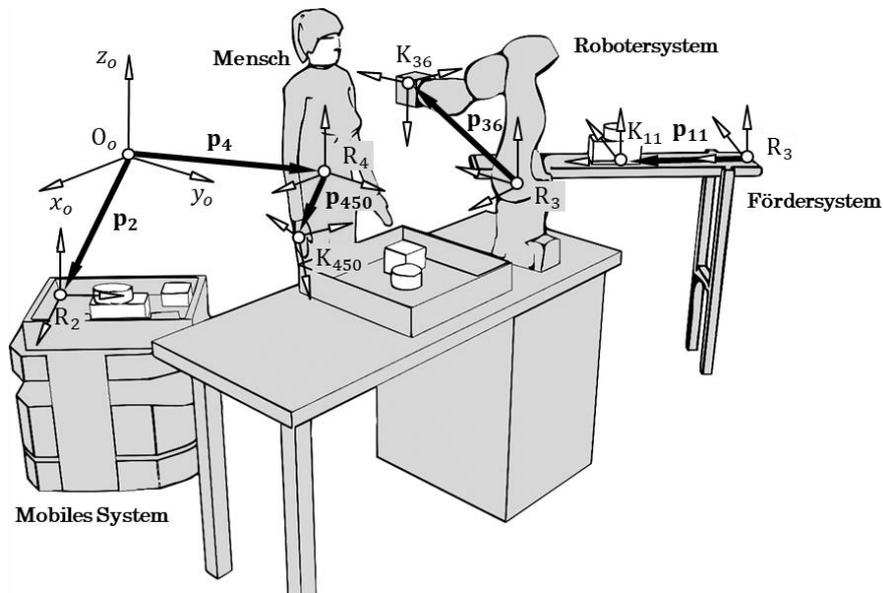


Abbildung 26: Ressourcen als Mehrkörpersysteme innerhalb eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems

Im Sinne des abgegrenzten Untersuchungsrahmens von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen, lässt sich die Bewegung und damit der zu überwachende Lagevektor einer Ressource, wie folgt, klassifizieren (Tabelle 5):

Nr-	Ressource	Dimension der Bewegung	Dimension des Lagevektors (Position und Orientierung)
1	Fördersystem	1-dimensional Bewegung entlang einer Achse bei gleichbleibender Orientierung	Skalar
2	Mobiles System	2-dimensional Bewegung in einer Ebene mit Änderung der Orientierung	Vektor als Zahlentripel (Zahlenpaar für Position und Skalar für Orientierung)

Nr	Ressource	Dimension der Bewegung	Dimension des Lagevektors (Position und Orientierung)
3	Robotersystem	3-dimensional Bewegung im Raum	Vektor als Sechstupel (Zahletripel jeweils für Position und Orientierung)
4	Mensch	3-dimensional Bewegung im Raum	Vektor als Sechstupel (Zahletripel jeweils für Position und Orientierung)

Tabelle 5: Dimension des Lagevektors einzelner Ressourcen

Die translatorischen \mathbf{p}_{rk} und rotatorischen \mathbf{r}_{rk} Lagegrößen eines Körpers K_{rk} werden im räumlichen Lagevektor

$$\hat{\mathbf{r}}_{rk} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{rk} \\ \mathbf{r}_{rk} \end{bmatrix} \quad k = 1, \dots, k_r \quad (11)$$

zusammengefasst.

Die Lagegrößen aller k Körper einer Ressource r werden mit

$$\hat{\mathbf{r}}_r = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{r}}_{r1} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{r}}_{rk} \end{bmatrix} \quad (12)$$

beschrieben.

Holonome Bindungen beschränken die Lagegrößen der einzelnen Körper, wobei der Freiheitsgrad f_r einer Ressource r vereinfacht mit

$$f_r = 6k_r - b_r \quad (13)$$

berechnet werden kann, da bei holonomen Systemen der Freiheitsgrad meist gleich der Anzahl an unabhängigen Lagegrößen des Systems ist. Die sechs unabhängigen Lagegrößen jedes Körpers werden dabei durch die holonomen Bindungen b_r einer Ressource verringert.

Im kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem werden zudem freie und gebundene Ressourcen unterschieden.

- Freie Ressource: Der Ortsvektor \mathbf{p}_r kann aus geometrischer Sicht beliebige Werte annehmen. Beispiele dafür sind das Mobile System oder der Mensch.

- Gebundene Ressource: Die Ressource ist mit der Umgebung durch starre Lager oder Gelenke verbunden, welche den Ortsvektor \mathbf{p}_r nach einmaliger Definition konstant halten. Beispiele dafür sind das Fördersystem oder das Robotersystem.

Die Mehrkörpermodelle der einzelnen Ressourcen sind in sich gebundene Systeme, d. h. die einzelnen Körper sind durch Gelenke verbunden, die die Bewegungen durch Bindungen oder Zwangsbedingungen geometrisch beschränken. Die Freiheitsgrade der einzelnen Ressourcen können mithilfe von Gleichung (13) berechnet werden und sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Anzahl an starren Körpern sowie holonomen Bindungen in einem Menschmodell wurde auf Basis des digitalen Menschmodells in ema® beispielhaft angegeben.

Fördersystem	Mobiles System	Robotersystem	Mensch
$f_1 = 6 \cdot 1 - 5$	$f_2 = 6 \cdot 1 - 3$	$f_3 = 6 \cdot 6 - 30$	$f_4 = 6 \cdot 50 - 214$
$f_1 = 1$	$f_2 = 3$	$f_3 = 6$	$f_4 = 86$

Tabelle 6: Freiheitsgrade der Kollaborationspartner

Die Lage eines holonomen Systems mit dem Freiheitsgrad f_r wird durch f voneinander unabhängigen Koordinaten,

$$\mathbf{q}_r = [q_1 \quad \dots \quad q_f]^T \quad (14)$$

den so genannten Minimalkoordinaten, beschrieben. Die Minimalkoordinaten können dabei Verschiebungen oder Verdrehungen sein und müssen die Lage des Systems eindeutig beschreiben.

Für die Taktzeitermittlung ist nun wesentlich, welchen Weg eine Ressource während der Prozessausführung zurücklegt (in Abhängigkeit ihrer kinematischen Struktur und ihrer Geschwindigkeitsparameter) und wo mögliche Orte der Tätigkeitsausführung auf den Bewegungsbahnen definiert werden können. Wird ein Objekt beispielsweise durch ein Fördersystem transportiert, sind die möglichen Orte zur gemeinsamen Tätigkeitsausführung zweier Ressourcen entlang einer Linie am Fördersystem definiert. Wird ein Objekt jedoch von einem Mobilem System transportiert, so könnten sich Mensch und Mobiles System innerhalb des kollaborativen Arbeitssystemraums an einer beliebigen Position zur Tätigkeitsausführung treffen. Außerdem können damit auch zulässige (grüne) oder nicht zulässige (rote) Ausführungsorte für Tätigkeiten definiert werden, die für eine bestimmte Tätigkeit bevorzugt oder ausgeschlossen werden (vgl. Abbildung 27).

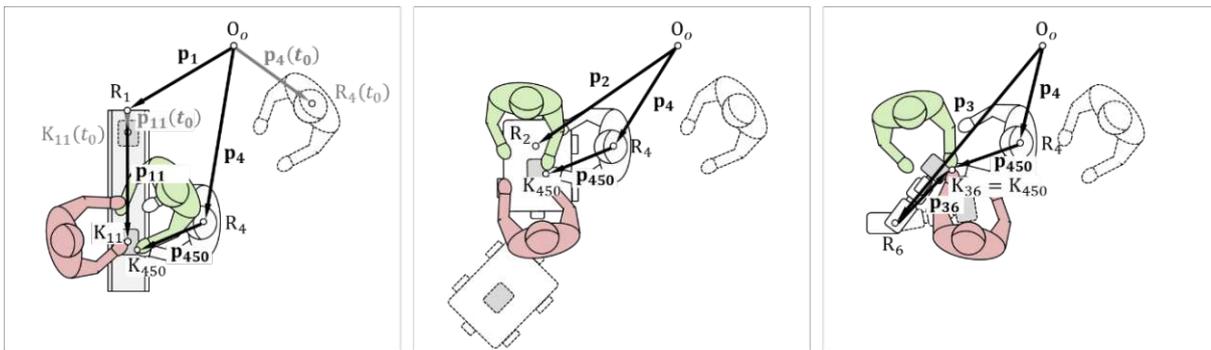


Abbildung 27: Orte der Tätigkeitsausführung in Abhängigkeit der Ressourcenart

Der Lösungsraum zur Ermittlung der kürzesten Taktzeit ist im zweiten Szenario zwar größer als im ersten, bietet aber mehr Möglichkeiten zur Taktzeitminimierung als das erste Szenario (vgl. Abbildung 28).

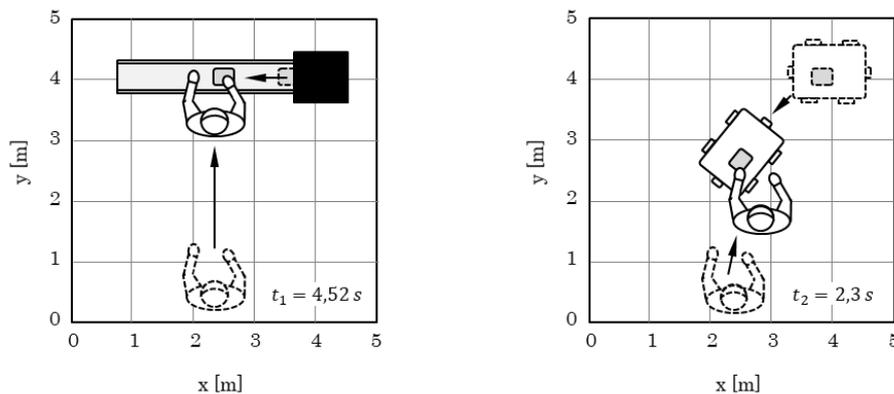


Abbildung 28: Einfluss der Systemdynamik auf die Taktzeit

Die Prozesszeiten im Rahmen von kollaborativen Prozessen können sich aufgrund der unterschiedlichen Bewegungszeiten in Abhängigkeit der kinematischen Systemstruktur einzelner Ressourcen ändern.

Für die Beeinflussung der Bewegungsgeschwindigkeit einer maschinellen Ressource gemäß des definierten Sicherheitsmodus ist außerdem die Überwachung des Lagevektors jeder Ressource im kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem entscheidend. Hierfür lassen sich nach Thiemermann (2005) Konzepte in Abhängigkeit des Grades der räumlichen Trennung ableiten (siehe Abbildung 29). Im Rahmen von statischen Zonen befindet sich jeweils immer nur eine Ressource im kollaborativen Arbeitssystemraum. Zusätzlich wird ein Mindestabstand zwischen einzelnen Ressourcen überwacht. Im Rahmen von dynamischen Korridoren können zudem Zonen um die jeweiligen Ressourcen definiert werden.

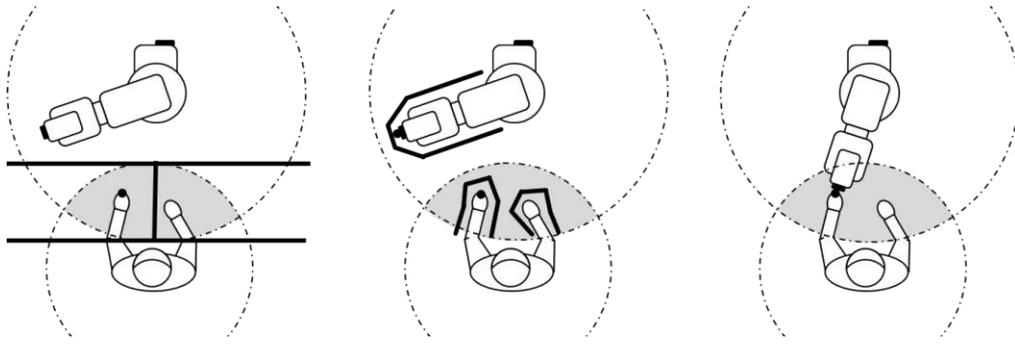


Abbildung 29: Überwachung der Lagekoordinaten
(v.l.n.r.: statische Zonen, dynamische Korridore, relative Bewegung
adaptiert nach Thiemermann 2005)

Durch die Größe der Korridore kann der Mindestabstand zwischen den Ressourcen auch dynamisch definiert werden. Soll es zu einem physischen Kontakt zwischen zwei Ressourcen kommen, so müssen Bewegungsparameter der Ressourcen ortsunabhängig überwacht werden. Die resultierenden Überwachungsgrößen sind demnach:

- Relativer Minimalabstand d zwischen zwei Ressourcen
- Relativer Annäherungswinkel α zwischen zwei Ressourcen

Der momentane Abstand zwischen zwei Ressourcen lässt sich über die Positionsvektoren

$$d = |\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (15)$$

der beiden Ressourcen berechnen.

Der Annäherungswinkel α wird dabei über den momentanen Abstandsvektor und den momentanen Relativgeschwindigkeitsvektor der beiden Ressourcen aufgespannt:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \cdot (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| \cdot |\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1|}\right) \quad (16)$$

$$= \arccos\left(\frac{(x_2 - x_1)(v_{2,x} - v_{1,x}) + (y_2 - y_1)(v_{2,y} - v_{1,y}) + (z_2 - z_1)(v_{2,z} - v_{1,z})}{d \sqrt{(v_{2,x} - v_{1,x})^2 + (v_{2,y} - v_{1,y})^2 + (v_{2,z} - v_{1,z})^2}}\right) \quad (17)$$

Im Zustand des Wartens bewegen sich die Ressourcen nicht, sondern warten an der aktuellen Position auf die nächstfolgende Aufgabe. Die daraus entstehenden Wartezeiten sind demnach von der Aufgabenteilung und des Vorranggraphen abhängig.

3.3.5 Zuverlässigkeit

Durch das Auflösen der räumlichen Trennung von Mensch und Maschine rücken neben ergonomischen Gestaltungsrichtlinien auch die psychophysiologischen Wirkungen in den Mittelpunkt und beeinflussen die Taktzeit der Prozessausführung im Rahmen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems. In Bezug auf die psychophysiologische Wirkung menschlichen Verhaltens stellt Leidholdt und Wohlschläger (2012) ein numerisches Verhaltensmodell des Menschen vor, das eine Verhaltensänderung bei erhöhter Beanspruchung abbildet. Das Modell stellt dabei eine Relation zwischen Belastungen, Beanspruchungen und Menschentypen in Zahlen zusammen. Die Zahlenwerte wurden indirekt oder durch Schwarmintelligenz, die dahinterstehenden Formeln empirisch, ermittelt. Das Modell erscheint zwar plausibel, da die digital berechnete globale Beanspruchung des Menschmodells in der Simulation auf Arbeitsgeschwindigkeit, Arbeitsgenauigkeit, Fehlerwahrscheinlichkeit und Verweigerungswahrscheinlichkeit wirkt, aber noch nicht vollständig validiert. Der Einfluss von Emotionen, Bewusstseinsänderungen, Schlaf oder speziellen anderen psychischen Vorgängen auf die zugrundeliegenden körperlichen Funktionen wurde dabei noch nicht in dem Verhaltensmodell berücksichtigt.

Das Systemverhalten in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und damit ressourcenspezifische Prozesszeiten werden aber auch durch unerwartete Fehlfunktionen des Steuer- und Regelkreises sowie der Steuerprogramme an sich beeinflusst. Gerade in Hinblick auf eine aussagekräftige Taktzeitermittlung ist die Berücksichtigung von nicht-normgerechten Abläufen bzw. Fehlplänen von entscheidender Bedeutung. Nach Leidholdt (2014) lassen sich Fehlpläne in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen entweder auf Basis von FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) oder auf Basis von Fehlerwahrscheinlichkeiten definieren (siehe Tabelle 7). Im Rahmen der Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse können bewusst Fehler und Fehlerkombinationen in den Planungsphase von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen berücksichtigt werden. Der Nachteil liegt allerdings darin, dass die FMEA auf die menschliche Vorstellungskraft in Bezug auf auftretbare Fehler beschränkt ist. Im Gegensatz dazu können Fehler Szenarien auch zufällig, einer vorausgesetzten Wahrscheinlichkeit folgend, initiiert werden. Obwohl bei dieser Methode sehr vielfältige Handlungsszenarien berücksichtigt werden können, ist die sehr lange Simulationsdauer nachteilig.

Eigenschaft	FMEA	Stochastik
Vorgehensweise	systematisch	sporadisch
Berücksichtigung von Szenarien	alle Szenarien erfasst	Szenarien nach Auftretungswahrscheinlichkeit
Kombinatorik	alle Kombinationen	sporadisch
Permutationen	alle generierbar	sporadisch
Lückenlose Abarbeitung	durch Simulation gegeben	erst nach unendlich langer Zeit
Ganzheitlichkeit	Fehlstellen durch Mangel an Vorstellungskraft	Bildung von Szenarien außerhalb der planerischen Vorstellungskraft
Aufwand	unendlich	beschränkbar

Tabelle 7: Absicherung von nicht-normgerechten Verhaltensweisen manueller Ressourcen in der Planungsphase (adaptiert nach Leidholdt 2014)

Die Zuverlässigkeit einzelner Ressourcen innerhalb eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems kann im Rahmen der Planung beispielsweise mit einer Heuristik hinterlegt sein. Diese Heuristik bestimmt dann den Zeitpunkt und die Dauer des Ausfalls (im Sinne der Ausfallzeit) einer Ressource und verlängert somit gegebenenfalls die Wartezeit innerhalb eines Prozesses. Auf diese Weise kann der Einfluss von Ausfällen auf die Taktzeit ermittelt werden (vgl. Abbildung 30).

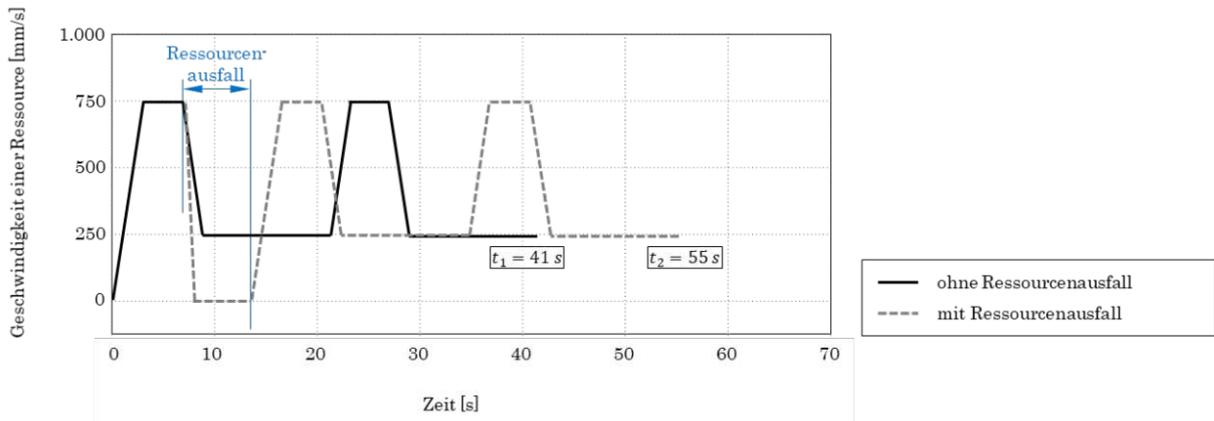


Abbildung 30: Einfluss der Zuverlässigkeit auf die Taktzeit

Die Prozesszeit kann sich im Rahmen der Tätigkeitsausführung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen aufgrund von Ressourcenausfällen und damit einhergehenden längeren Wartezeiten ändern.

3.3.6 Aufgabenteilung

Im Rahmen der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit wurde die traditionelle Zuordnung von verfügbarer Arbeit zu verfügbaren (Personal-)Ressourcen um eine zusätzliche Dimension erweitert: die der Zuordnung spezifischer Arbeit zu spezifischen Ressourcen. Es geht also im Speziellen darum, herauszufinden, welche Aufgaben von Menschen und welche von Maschinen ausgeführt werden sollen – im Unterschied zur Fokussierung auf die Aufgabenkoordination zwischen Mensch und Maschine. Bei der Aufgabenteilung bzw. -zuordnung geht es also insbesondere um die Eignung einer Ressource zur Durchführung einer bestimmten Aufgabe, was durch die Repräsentation von Fähigkeiten erfolgt – die sowohl von Menschen als auch von Maschinen bereitgestellt werden. Erste Forschungsarbeiten zur Aufgabenzuordnung stellten fest, dass es zwar Fähigkeiten gibt, die für Menschen und Maschinen jeweils einzigartig sind, dass es aber auch überlappende Fähigkeiten gibt, die die Möglichkeit bieten, Aufgaben variabel zuzuweisen, z. B. in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Ressourcen (vgl. Bradshaw et al. 2012). Die erste Systematisierung spezifischer Fähigkeiten wurde von Fitts (Winter und Dodou, 2014) erreicht, der eine Liste von Fähigkeiten erstellte, um eine Lösung für die Aufteilung der Verantwortung zwischen Mensch und Maschine zu finden – ohne übermäßig spezifisch zu werden.

Krüger et al. (2009) führten Zuordnungsprinzipien anhand der Arbeitsplatzteilung und Zeiteinteilung für sequenzielle Aufgaben ein, wie sie beispielsweise in Montagesystemen zu finden sind. Takata und Hirano (2011) präsentierten einen Algorithmus für die Aufgabenzuteilung, der die Gesamtkosten in unsicheren Umgebungen minimiert, indem sie verschiedene Zuteilungsmuster und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Veränderungen vergleichen. Die Aufgabenzuweisung bei Fechter et al. (2018) basiert auf der Bewertung der Automatisierungsfähigkeiten und der Zuweisung von nur übrig gebliebenen Aufgaben an Menschen, sodass bei der Zuweisungsentscheidung maschinelle, nicht aber menschliche Fähigkeiten berücksichtigt werden. Ein multikriterieller Ansatz, der sowohl Eignung, Verfügbarkeit als auch Prozesszeit berücksichtigt, wird von Tsarouchi et al. (2016) präsentiert. Auf der anderen Seite wird ein prozessorientierter Aufgabenzuweisungsansatz von Müller et al. (2016) vorgestellt, bei dem Fähigkeiten einzelner Ressourcen durch einen paarweisen Vergleich miteinander in Relation gesetzt werden. Ein anderer multikriterieller Ansatz nach Beumelburg (2005) bewertet Fähigkeiten einzelner Ressourcen anhand ihres Beitrags zu operativen Faktoren, wie Qualität, Zeit und Kosten, und weist einer Ressource demnach eine Fähigkeit zu, wenn diese einen Prozess mit hoher Qualität, innerhalb kurzer Zeit mit geringen Kosten durchführt.

Durch das Konzept der Fähigkeitsindikatoren wird eine Objektivierung der eher unscharfen Fähigkeitsmanifestationen erreicht. Für die Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen bedeutet dies allerdings, dass es hier eine massive Variabilität in der Aufgabenzuordnung zu einzelnen Ressourcen geben kann. Diese Variabilität ist zudem nicht statisch und zwangsläufig schon a priori

festgelegt, sondern kann sich im Laufe des Produktionsprozesses auch ändern, z. B. in Abhängigkeit der Ressourcenverfügbarkeit aufgrund eines Maschinenstillstands oder der Änderung des Bedienpersonals aufgrund des Schichtwechsels (dynamische bzw. adaptive Aufgabenzuordnung). Eine Aufgabenzuordnung zu definierten Ressourcen bestimmt zudem die Ausführungszeiten einzelner Tätigkeiten insofern, dass einerseits definierte Ressourcen spezifische Eigenschaften besitzen, die die Ausführungszeiten beeinflussen, und andererseits die Aneinanderreihung von bestimmten Tätigkeiten, die einer Ressource zugeordnet werden, auch den Bewegungspfad der Ressource beeinflusst (je länger dieser Weg, desto länger auch die Ausführungszeit für die zugewiesene Tätigkeit). Hinzu kommt, dass die Aufgabenteilung die Häufigkeit und Dauer der Exposition des Menschen im kollaborativen Arbeitssystemraum des Mensch-Maschine-Arbeitssystems bestimmt, was unter Berücksichtigung eines bestimmten Sicherheitsmodus der maschinellen Ressourcen ebenfalls das Bewegungsverhalten (im Sinne der Bewegungsgeschwindigkeit) dieser beeinflusst.

Abbildung 31 zeigt unterschiedliche Taktzeiten desselben Prozesses, der innerhalb eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems unter verschiedenen Aufgabenteilungsmustern durchgeführt wird. In Abhängigkeit der Aufgabenteilung der beiden Ressourcen r_1 und r_2 ändert sich die Taktzeit – beispielsweise aufgrund der Reduzierung der Maschinengeschwindigkeit durch die sich ergebende Häufigkeit und Dauer der Personenexposition im kollaborativen Arbeitssystemraum.

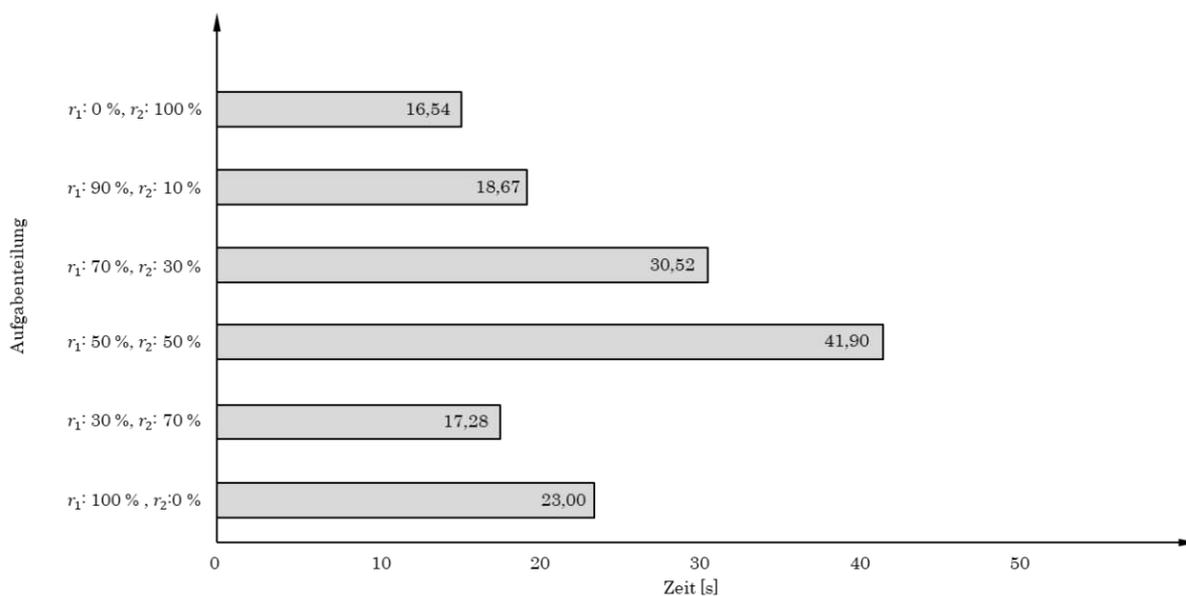


Abbildung 31: Einfluss der Aufgabenteilung auf die Taktzeit

Die Prozesszeit kann sich im Rahmen der Tätigkeitsausführung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen aufgrund der unterschiedlichen Häufigkeit und Dauer der Personenexposition im kollaborativen Arbeitssystemraum und der sich daraus ergebenden Veränderung der Maschinengeschwindigkeit ändern.

3.4 Grenzen aktueller Taktzeitermittlungsmethoden

Die Herausforderungen in der Planung von Prozessen mit kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und der damit einhergehenden Taktzeitermittlung liegen vor allem in der Bestimmung eines ausreichenden Detaillierungsgrades der Bewegungsmodellierung einzelner Ressourcen sowie in der fehlenden Berücksichtigung taktzeitbeeinflussender Systemparameter. Besonders in Bezug auf die Modellierung von psychophysiologischen Effekten und Fehlbläufen stellt sich allerdings die Frage der notwendigen Genauigkeit. Die Modellierung von Prozessen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen stößt damit an folgende Grenzen:

- **Abbildung von Fehlbläufen bzw. Fehlverhalten:** Digitale Ressourcenmodelle führen bislang nur Bewegungen aus, die im Simulationsprogramm explizit gestaltet und implementiert wurden. Das heißt, es werden – ähnlich eines Steuerprogramms für einen Roboter – nur jene Bewegungen abgebildet, die im Rahmen der Simulation modelliert wurden. Ressourcen – insbesondere Menschen – handeln jedoch nicht immer nach Plan. Aus diesem Grund müssen vor allem auch so genannte Fehlbläufe in der Planung mitberücksichtigt werden.
- **Modellierung von Tätigkeiten an bewegten Objekten:** Werkzeuge zur Planung virtueller Ergonomie ermöglichen bislang ausschließlich Analysen an statischen Objekten bzw. an Objekten, bei denen die Relativgeschwindigkeit zweier Ressourcen Null ist. Beispielsweise lassen sich Tätigkeiten an einem Handarbeitsplatz untersuchen, bei dem Kleinteile in Behältern (statisch) zur Verfügung gestellt werden oder Tätigkeiten an einem Fördersystem, auf dem Mensch und Karosserie gleichzeitig mitbewegt werden. Tätigkeiten an bewegten Objekten (mit einer Relativgeschwindigkeit zweier Ressourcen ungleich Null), zum Beispiel bei einer Bauteilentnahme aus einer fahrenden Plattform oder einer Bauteilbearbeitung während der Bauteilbeförderung, sind bislang nicht in Simulationsmodellen zur Taktzeitermittlung integriert. Die Verfolgung des bewegten Objektes durch das digitale Ressourcenmodell ist demnach noch nicht simulierbar.
- **Modellierung menschlichen Verhaltens:** Die Modellierung der Psychophysiologie (insbesondere der Stressreaktion) in Form eines numerischen Verhaltensmodells eines Menschen liegt ebenfalls noch im Bereich der Forschung. Das bedeutet, dass die Auswirkung von psychischen Belastungen auf die Arbeitsgeschwindigkeit oder die Fehlerrate des Menschen noch nicht abgebildet werden.
- **Datenmanagement:** Obwohl es Simulationswerkzeuge gibt, die entweder im Bereich der Maschinenmodellierung (z. B. Delmia, Tecnomatix oder roboterherstellerspezifische Programme) oder im Bereich der Menschmodellierung (z. B. ema®) weit fortgeschritten sind, fehlt jeweils eine entsprechend qualitative Abbildung der anderen Ressourcenarten. Ein kompatibles Datenformat würde hier

Abhilfe bei der Modellierung und Implementierung der jeweilig anderen Ressourcenarten schaffen.

- **Unterschiedliche Zielsetzungen der Planungsvorgehen:** Hinzu kommt die bislang unterschiedliche Motivation in Planungsvorgehen für menschliche und maschinelle Tätigkeiten. Bei Arbeitsplatzbewertungsverfahren im Rahmen der Planung von manuellen Tätigkeiten, werden neben Schädigungslosigkeit, Beeinträchtigungsfreiheit und Persönlichkeitsförderlichkeit vor allem auch Ausführbarkeit und Erträglichkeit beurteilt (Nerdinger et al. 2011). In simulationsgestützten Planungsmethoden von manuellen Tätigkeiten erfolgt speziell die Evaluierung der Ausführbarkeit und gegebenenfalls die der Erträglichkeit (im Sinne einer ergonomischen Bewertung) anhand anthropometrischer Faktoren. In diesem Sinne lassen sich die Ziele von Planungsmethoden manueller Tätigkeiten, wie folgt, zusammenfassen (in Anlehnung an Strasser o. J.):
 - i. Auslegung des Arbeitsplatzes anhand der Anthropometrie des Personals (Abmessungen des menschlichen Körpers und wichtiger Teile, wie z. B. Kopf und Extremitäten, Bewegungsbereiche der Gelenke und Länge der Gliedmaßen, sowie daraus resultierende Greifräume)
 - ii. Ermittlung von Vorgabezeiten, sowie so genannter »Blindleistung« (Mehraufwand)
 - iii. Körperstellungs-, Körperhaltungs- und Sichtfeldanalysen
 - iv. Ermittlung von Körperkräften und Wirbelsäulenbelastungen im Bewegungsraum
 - v. Ermittlung von Laufwegen
 - vi. Ergonomische Bewertung
 - vii. Visualisierung der geplanten Tätigkeiten (Marketing, Schulung)
 - viii. Visuelle Darstellung von Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten

Im Vergleich dazu sind die Ziele der Planungsmethoden maschineller Tätigkeiten, wie folgt:

- i. Optimale Maschinen- bzw. Roboterwahl (v. a. hinsichtlich des Arbeitsraums und der Geschwindigkeit)
- ii. Maschinenpositionierung bzw. Montageart (z. B. stehende, hängende oder Wandmontage)
- iii. Arbeitsbereichs- und Erreichbarkeitsanalysen bzw. Bewertung der Bewegungspfade (v. a. in Hinblick auf Singularitäten, aber auch hinsichtlich Energieverbrauch und Prozesszeit)
- iv. Taktzeitbewertung und -optimierung
- v. Kollisionsanalysen
- vi. Virtuelle Inbetriebnahme (Offline-Programmierung) zur Reduktion der Inbetriebnahmezeiten
- vii. Visualisierung der geplanten Prozessschritte (Marketing, Schulung)

Zur Planung von Tätigkeiten in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen müssen diese Ziele gebündelt und gegebenenfalls ergänzt werden.

Insbesondere die **Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung von taktzeitbestimmenden Parametern** ist erst durch eine ganzheitliche Betrachtung von manuellen und maschinellen Tätigkeiten möglich. Wie bereits gezeigt, gibt es auch taktzeitbeeinflussende Parameter, die nur durch eine ganzheitliche Berücksichtigung und Modellierung erfasst werden können. Die Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen wird damit zu einem multikriteriellen Optimierungsproblem, d. h. eine Minimierung der Taktzeit in derartigen Arbeitssystemen kann nur durch die Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung der genannten taktzeitbestimmenden Parameter erfolgen.

Im Rahmen der Abhängigkeitsanalyse verschiedener Systemparameter in einem kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem, wurden bereits umfangreiche Forschungsarbeiten in der physischen und nicht-physischen Mensch-Roboter-Interaktion durchgeführt, wie z. B. bei Barattini et al. (2019) oder Villani et al. (2018). Einige Ansätze berücksichtigen den Zusammenhang von menschlichem und maschinenspezifischem Verhalten und nutzen die Beeinflussung des Bewegungsverhaltens des Roboters entweder zur Steigerung der Intuition, wie bei Henrich und Kuhn (2006), oder zur Steigerung der Ergonomie, wie bei Kim et al. (2015), oder zur Steigerung der Sicherheit, wie bei Chadalavada et al. (2020). Andere Ansätze konzentrieren sich auf menschenbezogene Aspekte wie die Modellierung menschlichen Fehlverhaltens, wie bei Pasquale et al. (2015), oder auf die Einbeziehung eines probabilistischen Modells zur Vorhersage des Situationsbewusstseins der Bedienperson, wie bei Dini et al. (2017), oder auf die Integration eines personalisierten Kinematikmodells des Menschen, wie bei Bestick et al. (2015). Keiner der Ansätze fokussierte dabei allerdings die wechselseitige Beeinflussung von Systemparametern zur Taktzeitermittlung.

Um jedoch die Komplexität der wechselseitigen Beeinflussung von taktzeitbestimmenden Systemparametern in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen darzustellen, braucht es eine entsprechend durchgängige Modellierungssystematik zur gleichzeitigen Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 angeführten taktzeitbestimmenden Systemparameter.

4 Problemstellung und Zielsetzung

Neben Methoden zur Taktzeitermittlung, die aus Prozesssicht die Planzeiten sowie Reihenfolgen einzelner Prozesse in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen betrachten, kommen auch simulationsbasierte Methoden zum Einsatz, die aus Ressourcensicht auch Ressourceneigenschaften bei der Tätigkeitsausführung berücksichtigen. Die Taktzeitermittlung beruht aber in beiden Fällen auf einer statischen bzw. a priori festgelegten Definition von Systemparametern, die sich während der Tätigkeitsausführung nicht verändert. Somit sind meist auch Planzeiten einzelner Tätigkeiten starr. Es werden also beispielsweise keine dynamischen Geschwindigkeitsanpassungen einzelner Ressourcen aufgrund veränderter zeitlicher und räumlicher Bedingungen betrachtet, die gegebenenfalls einzelne Tätigkeitsausführungen in ihrer Dauer beeinflussen.

Komenda et al. (2021) haben gezeigt, dass nicht nur die Anwendung verschiedener Methoden zur Taktzeitermittlung in Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu unterschiedlichen Planzeitwerten führt, sondern auch unterschiedliche Systemparameter Planzeiten verändern können.

Eine veränderte Parametrisierung von Systemparametern in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen – im Speziellen der angeführten taktzeitbestimmenden Parameter – führt bei gleicher Prozessbeschreibung zu unterschiedlichen Taktzeiten.

4.1 Charakterisierung des Forschungsdefizits

Die Planung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unter Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung spezifischer Ressourceneigenschaften bedingt eine systemangepasste Planungs- und Modellierungsmethode zur ganzheitlichen Taktzeitermittlung, deren Forschungsdefizit sich, wie folgt, charakterisieren lässt:

- i. **Fehlende Berücksichtigung der zeitlichen und örtlichen Abhängigkeit einzelner Ressourcen:** Die Tätigkeitsausführung einzelner Ressourcen wird bei Anwendung der meisten Taktzeitermittlungsmethoden isoliert betrachtet, sodass sich die Tätigkeitsausführung einzelner Ressourcen nicht durch äußere Einflüsse oder die zeitliche und örtliche Nähe anderer Ressourcen ändert. Hinzu kommt, dass Tätigkeiten u. U. an spezifischen Orten durchzuführen sind. Einzelne Ressourcen müssen sich demnach in Abhängigkeit ihrer jeweils aktuellen Lage zum Ort der Tätigkeitsausführung bewegen. Am Weg zum Ort der Tätigkeitsausführung können allerdings andere Ressourcen den Bewegungspfad versperren oder eine sicherheitsbedingte Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit initiieren, wodurch es entweder zu einem Stillstand, einer Wartezeit oder zu einer adaptiven Pfad- bzw. Geschwindigkeitsänderung der Ressource und damit zu einer verlängerten Tätigkeitsausführungen kommen kann.
- ii. **Fehlende Berücksichtigung der physiologischen Durchführbarkeit einzelner Tätigkeiten:** Die Art und Dauer der Tätigkeitsausführung ist von der auszuführenden Ressource und deren spezifischen Eigenschaften abhängig. Ressourcenspezifische Eigenschaften werden in den meisten Taktzeitermittlungsmethoden jedoch nicht als taktzeitbeeinflussende Parameter berücksichtigt. Zudem können manche Tätigkeiten nur innerhalb eines bestimmten Zeitfensters durchgeführt werden. Beispielsweise kann die Bearbeitung von Werkstücken an einem Förderband nur in einem bestimmten Zeitfenster erfolgen, da die Objekte laufend einer Maschine zugeführt werden. Hinzu kommt die Berücksichtigung der jeweilig physiologisch möglichen Bewegungsgeschwindigkeit einzelner Ressourcen, sodass die Erreichbarkeit spezifizierter Zielpositionen zur Tätigkeitsausführung in Abhängigkeit der Distanz einzelner Ressourcen in der Planungsphase zu validieren ist.
- iii. **Fehlende Berücksichtigung des Fehlverhaltens einzelner Ressourcen:** In der Planungsphase wird meist ein Sollverhalten geprüft und validiert. Für die Taktzeitermittlung in Mensch-Maschine-Arbeitssystemen sowie für die Auslegung derartiger Arbeitssysteme kann es jedoch auch essenziell sein, die Sensitivität der Taktzeit in Abhängigkeit spezifischer taktzeitbestimmender Parameter zu ermitteln, um die Resilienz gegenüber planbaren Taktzeitschwankungen zu erhöhen.

- iv. **Fehlende Berücksichtigung mehrere taktzeitbeeinflussender Systemparameter zur Auslegung des Systemverhaltens:** Meist fokussieren Taktzeitermittlungsmethoden nur eine oder maximal zwei der in Kapitel 3.3 angeführten taktzeitbeeinflussenden Parameter bei der Taktzeitermittlung in Mensch-Maschine-Arbeitssystemen.

4.2 Maßnahmen zur Aufhebung des Forschungsdefizits

Zur Aufhebung des Forschungsdefizits braucht es ein Planungs- bzw. Taktzeitmodell für kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme, das vor allem die wechselseitige Beeinflussung taktzeitbestimmender Parameter mitberücksichtigt, um damit die in Abbildung 32 gezeigten taktzeitrelevanten Planungsfragen zu beantworten. Die Planungsfragen richten sich dabei nicht nur an die Taktzeitermittlung eines zu planenden Prozesses, sondern auch an die Ausführbarkeit geplanter Tätigkeitszuordnungen unter Berücksichtigung von Planungsfehlern. Ausführungszeiten einzelner Tätigkeiten werden demnach nicht mehr als statische Größen betrachtet, die a priori festgelegt werden, sondern Größen, die sich innerhalb des Systemgefüges aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten ändern können.

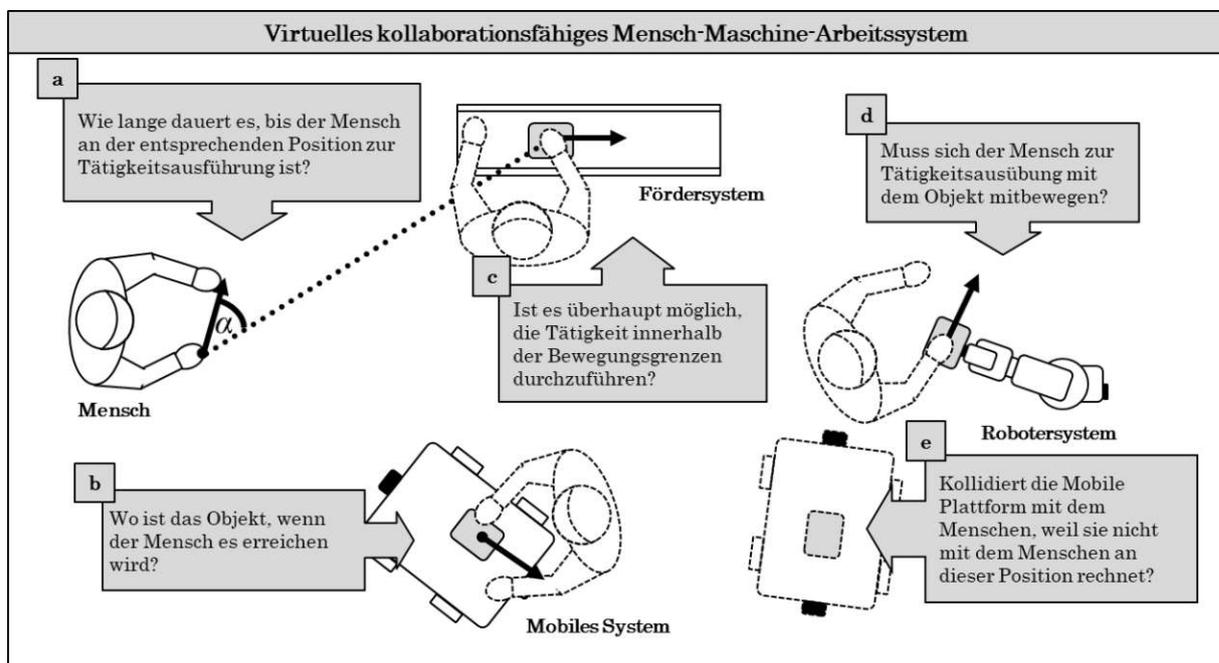


Abbildung 32: Planungsfragen bei der Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen in Bezug auf (a) zeitliche Abhängigkeit, (b) örtliche Abhängigkeit, (c) physiologische Durchführbarkeit, (d) dynamische Ausführbarkeit, (e) sicherheitstechnische Beeinflussung.

Als Planungsmodell bietet sich daher die Anwendung des hybriden DEV&DESS-Modells an, das die zeitliche und örtliche Synchronisation einzelner Ressourcen innerhalb eines Mensch-Maschine-Arbeitssystems berücksichtigt. Die örtlichen und zeitlichen Bedingungen fließen dabei so in das Modell ein, dass das jeweilige Bewegungsverhalten der Ressourcen gemäß ihren spezifischen Eigenschaften geändert wird. Dies kann demnach nicht nur die Ausführungszeit durch einzelne Ressourcen individuell betrachten, sondern vor allem auch die Zykluszeit der Prozessbearbeitung realistisch darstellen. Ein kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem wird somit als hybrides Modell mit diskreten und kontinuierlichen Modellanteilen betrachtet, die sich gegenseitig beeinflussen. Die einzelnen Systemzustände zur Ermittlung der Ausführungszeiten einzelner Tätigkeiten werden dabei als Funktion taktzeitbestimmender Parameter (des jeweiligen Ressourcenverhaltens aber auch in Abhängigkeit des Verhaltens anderer Ressourcen im Arbeitssystem) beschrieben. Das hybride Modell des kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems ermittelt also Taktzeiten für den zu planenden Prozess in Abhängigkeit bestimmter Systemparameter. Ein Optimierungsmodell kann anschließend dazu verwendet werden, die Systemparameter so zu wählen, dass eine minimale Taktzeit für den zu planenden Prozess erreicht wird.

4.3 Ableitung der spezifischen Zielsetzung dieser Arbeit

Die Planung von Prozessen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen stellt eine Weiterentwicklung der simulationsgestützten Planung manueller, aber auch maschineller, Tätigkeiten dar. Hieraus leiten sich vor allem auch Implikationen für die Modellierung und folglich für die Gestaltung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen ab. Die Ableitung der Implikationen bildet die Basis für die Formulierung der spezifischen Zielsetzung und der Forschungsfragen dieser Arbeit. Folgende Implikationen ergeben sich aus der Taktzeitermittlung von Tätigkeiten in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen:

- Erhöhung der Planungssicherheit und damit der Verbreitung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen
- Erhöhung der Transparenz von taktzeitbestimmenden Systemparametern und damit der wirtschaftlichen und humanzentrierten Auslegung kollaborationsfähiger Mensch-Maschine-Arbeitssysteme

Ausgehend von den induzierten Implikationen leitet sich die spezifische Zielsetzung für die Taktzeitermittlung in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen, wie folgt, ab:

Erhöhung der Planungssicherheit in Bezug auf die Taktzeitermittlung in Arbeitssystemen mit Mensch-Maschine-Zusammenarbeit und gleichzeitige Erhöhung der Transparenz von taktzeitbestimmenden Systemparametern.

4.4 Forschungsleitende Fragestellungen

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit liegt in der Erhöhung der Planungssicherheit beim Einsatz kollaborationsfähiger Mensch-Maschine-Arbeitssysteme durch die Anwendung eines Taktzeitmodells. Das Taktzeitmodell soll die Arbeitsvorbereitung bei der Auslegung bzw. Definition der Systemparameter in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unterstützen. Das Modell soll hierbei die wechselseitige Beeinflussung der Ressourcen berücksichtigen und so in der taktzeitoptimalen Parametrisierung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems unterstützen, um minimale Taktzeiten zu erzielen. In diesem Zusammenhang fokussieren die forschungsleitenden Fragestellungen den Nutzen des Taktzeitmodells und werden auf Basis der spezifischen Zielsetzung der Arbeit, wie folgt, definiert:

- F1) Welcher Modellansatz kann zu einer ganzheitlichen Berücksichtigung taktzeitbestimmender Parameter in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen führen?*
- F2) Wie können taktzeitbestimmende Einflussfaktoren modelliert werden, sodass eine hinreichend genaue Taktzeitermittlung erfolgen kann?*
- F3) Wie können die relevantesten taktzeitbestimmenden Einflussfaktoren für das zu planende kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssystem identifiziert werden?*

Abschnitt III

Modellbeschreibung und Validierung

5 Beschreibung des Taktzeitmodells

Ein kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem kann im Grunde als ein System mit mehreren (Ressourcen-)Modellen betrachtet werden, die sich gegenseitig beeinflussen. Dabei besteht ein (Ressourcen-)Modell aus diskreten und kontinuierlichen Modellanteilen, die sowohl die Zustandseigenschaften einer Ressource (wie z. B. Sicherheitsmodus, Diversität oder Zuverlässigkeit) als auch das Bewegungsverhalten (im Sinne von dynamischen Bewegungseigenschaften) abbilden. Entscheidend dabei ist, dass einzelne (Ressourcen-)Modelle zu jedem Zeitpunkt der Prozessausführung die Zustandsinformationen der anderen Ressourcen besitzen, um gegebenenfalls ihr eigenes Bewegungsverhalten (dynamisch bzw. adaptiv) anzupassen. Das Bewegungsverhalten einer Ressource ist demnach als Funktion der jeweiligen Ressourceneigenschaften aber auch der örtlichen und zeitlichen Beziehung zu den anderen Ressourcen definiert. Die Taktzeitermittlung ist folglich auch kein losgelöstes Problem der kinematischen und dynamischen Eigenschaften einer einzelnen Ressource mehr, sondern vielmehr von der örtlichen und zeitlichen Konstellation (die sich hauptsächlich durch die Tätigkeitszuordnung zu einzelnen Ressourcen ergibt) und dem Verhalten der Ressourcen innerhalb des Gesamtsystems abhängig.

Ein Taktzeitmodell für kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme berücksichtigt neben den individuellen Ressourceneigenschaften auch die zeitliche und örtliche Beziehung zu anderen Ressourcen im Arbeitssystem während der Tätigkeitsausführung, sodass das jeweilige Ressourcenverhalten gegebenenfalls dynamisch geändert werden kann.

5.1 Modellanforderungen

Die zentrale Planungsfrage in der Auslegung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen ist demnach:

Wie hoch ist die Zeit, in der eine Mengeneinheit in einem kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem fertiggestellt wird?

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 angeführten taktzeitbestimmenden Parameter und der in Kapitel 4.4 angeführten forschungsleitenden Fragestellungen lassen sich die Einflussfaktoren der Taktzeit innerhalb von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen, wie in Abbildung 33 angeführt, darstellen.

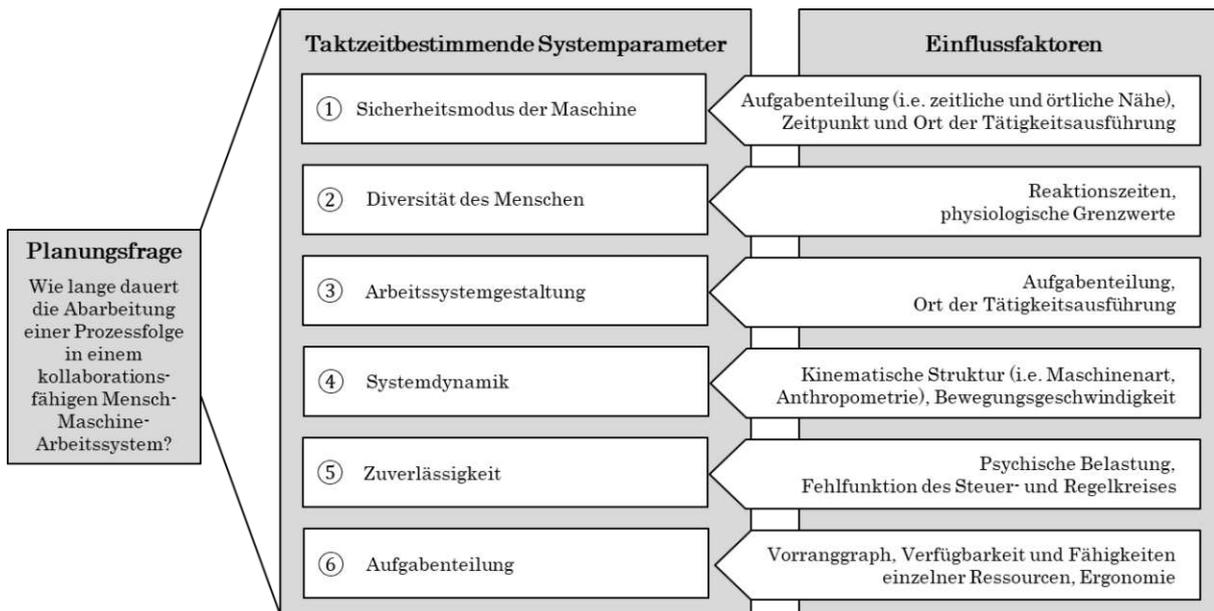


Abbildung 33: Einflussfaktoren taktzeitbestimmender Systemparameter zur Berücksichtigung in einem Taktzeitmodell für kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme

Im Vergleich zu konventionellen Planungsmodellen, die im Rahmen einer (simulationsgestützten) Planung von Automatisierungssystemen angewendet werden sowie der identifizierten Forschungsdefizite aus Kapitel 4.1, sind insbesondere folgende Modellelemente in einem Taktzeitmodell für kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen zu berücksichtigen:

- i. **Modell zur Simulation des kollaborativen Bewegungsverhaltens zur Berücksichtigung der zeitlichen und örtlichen Abhängigkeit einzelner Ressourcen** (auch im Sinne einer Berücksichtigung von zeitlich und örtlich synchronisierten Tätigkeiten sowie einer entsprechenden Annäherung zu definierten Ausführungsorten von Tätigkeiten in Abhängigkeit der aktuellen Ressourcenpositionen)
- ii. **Modell zur Simulation des Kollisionsverhalten zur Berücksichtigung der physiologischen Durchführbarkeit einzelner Tätigkeiten** (im Sinne einer laufenden

- Überwachung von zulässigen Abständen, Geschwindigkeiten und ggf. Kräften der Maschine bzw. zur Überwachung des kollaborativen Arbeitssystemraums im Sinne einer Positionsüberwachung einzelner Ressourcen zur Erkennung von erwarteten und nicht-erwarteten Eintritten in den kollaborativen Arbeitssystemraum)
- iii. **Modell zur Simulation von (Fehl-)funktionen des Steuer- und Regelkreises sowie zur Simulation der Psychophysiologie zur Berücksichtigung des Fehlverhaltens einzelner Ressourcen** (im Sinne einer Berücksichtigung von Maschinenausfällen und des adaptiven Verhaltens von Menschen, beispielsweise in Stresssituationen oder unter der Berücksichtigung von Lernkurven in der Tätigkeitsausführung und einer ggf. notwendigen Aktualisierung der Aufgabenzuordnung sowie der Berücksichtigung von daraus entstehenden Wartezeiten)
- iv. **Ganzheitliches Systemmodell zur Berücksichtigung mehrerer taktzeitbeeinflussender Systemparameter zur Auslegung des Systemverhaltens** (im Sinne einer Parametrisierung taktzeitbestimmender Einflussfaktoren und damit Systemparameter)

Abbildung 34 visualisiert die für das Taktzeitmodell in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen notwendig zu erweiterten Modellelemente.

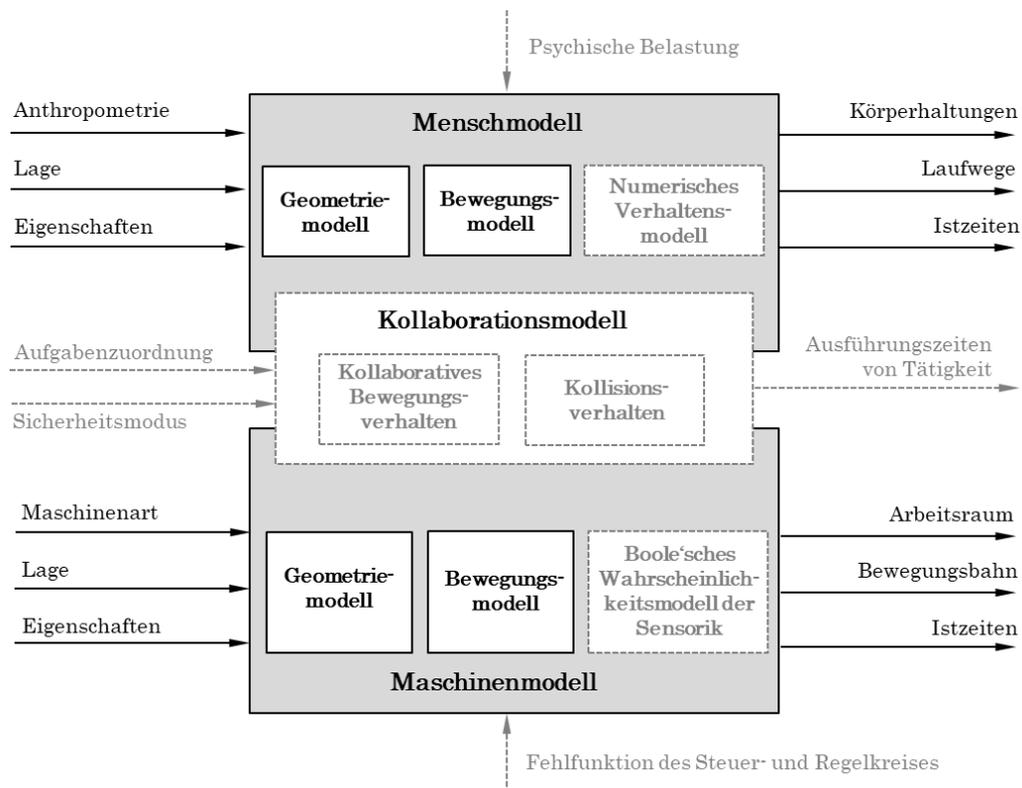


Abbildung 34: Modellelemente des Taktzeitmodells für kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme (strichliert sind die erweiterten Submodelle und Parameter dargestellt)

Aus diesen Modellelementen ergeben sich folgende Anforderungen an das Taktzeitmodell:

- i. **Ganzheitlichkeit:** Gemeinsame Betrachtung der Prozessausführungen von Mensch und Maschine.
- ii. **Dynamik:** Berücksichtigung der zeitlichen und örtlichen Abhängigkeit bei der Tätigkeitsausführung einzelner Ressourcen.
- iii. **Mehrdimensionalität:** Mehrdimensionale Formulierung des Taktzeitproblems und damit Möglichkeit zur gleichzeitigen Berücksichtigung von mehreren taktzeitbestimmenden Systemparametern.
- iv. **Skalierbarkeit:** Erhöhung der Ressourcen- und Tätigkeitsanzahl zur Anwendung des Taktzeitmodells auf verschiedene Komplexitätsstufen.
- v. **Angemessenheit:** Fehler- bzw. Störbehandlung sowie Berücksichtigung von Zwangsbedingungen, die die möglichen Freiheitsgrade der Ressourcen einschränken.
- vi. **Visualisierung und Nachvollziehbarkeit:** Darstellung der Taktzeitergebnisse sowie des Einflusses einzelner Systemparameter auf die Taktzeit.

5.2 Möglichkeiten zur Prüfung der Anforderungserfüllung

Die Prüfung der Anforderungen kann auf Basis folgender Eigenschaften erfolgen:

- i. **Prüfung der Ganzheitlichkeit:** Tätigkeiten können beliebig zu Menschen oder Maschinen zugeordnet werden.
- ii. **Prüfung der Dynamik:** Bei der Modellierung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems mit dessen Ressourcen kann die Taktzeit für einen bestimmten Prozess ermittelt werden. Sobald sich aber taktzeitbestimmende Systemparameter ändern, kommt es auch zu einer veränderten Taktzeit für den betrachteten Prozess.
- iii. **Prüfung der Mehrdimensionalität:** Die in Kapitel 3.3 angeführten taktzeitbeeinflussenden Systemparameter dienen als Eingabeparameter des Taktzeitmodells.
- iv. **Prüfung der Skalierbarkeit:** Es können mehrere Ressourcen mit ihren jeweiligen Eigenschaften modelliert und für die Tätigkeitsausführung berücksichtigt werden, sodass das Taktzeitmodell für verschiedene Konfigurationen von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen herangezogen werden kann.
- v. **Prüfung der Angemessenheit:** Die Beeinflussung des ressourcenspezifischen Bewegungsverhaltens durch kontinuierliche oder diskrete Systemzustände erfolgt stets im Rahmen der definierten physikalischen Grenzparameter. Zudem

entstehen auch Wartezeiten, wenn es zu Vorrangbedingungen der Tätigkeitsreihenfolge oder zu Tätigkeiten kommt, die von zwei oder mehreren Ressourcen gemeinsam ausgeführt werden müssen.

- vi. **Prüfung der Visualisierung sowie Nachvollziehbarkeit:** Die durch das Taktzeitmodell ermittelten Taktzeiten können visuell dargestellt werden und entsprechen in einem definierten Toleranzbereich den Taktzeiten, die in realen Systemen erzielt werden.

5.3 Modellarchitektur und Modellimplementierung

Zur Abbildung des kollaborativen Bewegungsverhaltens sowie des Kollisionsverhaltens von Ressourcen im Rahmen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems, kombiniert ein Taktzeitmodell sowohl kontinuierliche als auch diskrete Ereignisse. Dies kann mithilfe des Modellbeschreibungsfomalismus für hybride Systeme, dem sogenannten DEV&DESS-Formalismus (Discrete Event and Differential Equation Specified System) von Zeigler et al. (2000) beschrieben werden. Das Modellkonzept beinhaltet dabei die Kombination eines diskreten (DEVS) und eines kontinuierlichen (DESS) Anteils (Abbildung 35). Während kontinuierliche Eingänge auf beide Modellanteile wirken, beeinflussen diskrete Eingänge ausschließlich den diskreten Modellanteil. Jeder Modellanteil erzeugt dabei einen eigenen Ausgang, wobei sich die beiden Modellanteile auch gegenseitig beeinflussen können. Wesentlich für das Verständnis des hybriden Beschreibungsfomalismus ist, in welcher Art und Weise der diskrete Anteil von dem kontinuierlichen Anteil beeinflusst wird bzw. inwiefern der DESS-Anteil ein Ereignis und damit eine Zustandsänderung hervorruft. In zeitlichen Intervallen zwischen Ereignissen, verändern sich der Eingang, der Zustand sowie der Ausgang des kontinuierlichen Modellanteils kontinuierlich. Ereignisse entstehen, sobald eine Bedingung im kontinuierlichen Modellanteil erfüllt ist.

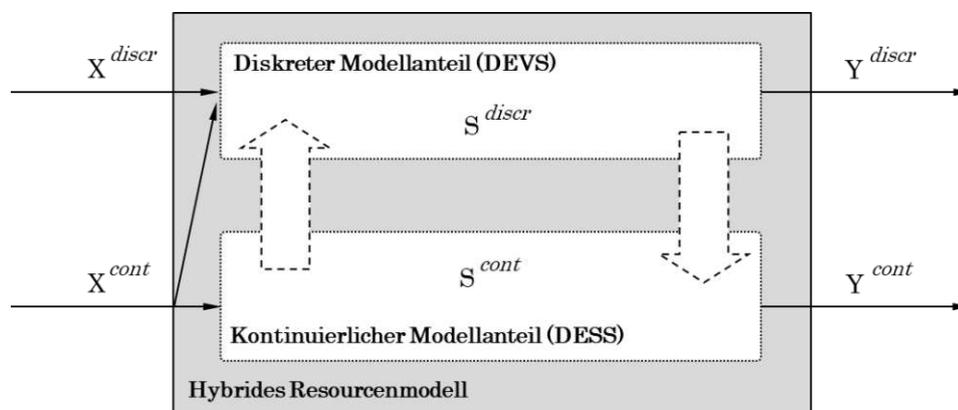


Abbildung 35: Hybrides DEV&DESS-Modell

Typischerweise kann diese Bedingung als eine kontinuierliche Variable betrachtet werden, die einen bestimmten Schwellenwert erreicht und überschreitet, oder wenn zwei kontinuierliche Variablen aufeinandertreffen. In jener Situation wird ein Ereignis ausgelöst und der Modellzustand ändert sich sprunghaft. Ein Ereignis, das durch die Änderung von kontinuierlichen Variablen verursacht wird, wird als Zustandsereignis bezeichnet (im Unterschied zu internen Ereignissen von reinen DEVS, die zeitlich geplant sind und als Zeitereignisse bezeichnet werden).

Ein hybrides Ressourcenmodell wird auf Basis des DEV&DESS-Formalismus mithilfe eines 11-Tupels in der Form

$$\text{DEV\&DESS} = (X^{\text{discr}}, X^{\text{cont}}, Y^{\text{discr}}, Y^{\text{cont}}, S, \delta_{\text{ext}}, C_{\text{int}}, \delta_{\text{int}}, \lambda^{\text{discr}}, f, \lambda^{\text{cont}}) \quad (18)$$

beschrieben, wobei

$X^{\text{discr}}, Y^{\text{discr}}$... Menge an diskreten Ein- und Ausgängen

$X^{\text{cont}}, Y^{\text{cont}}$... Menge an kontinuierlichen Ein- und Ausgängen

$S = S^{\text{discr}} \times S^{\text{cont}}$... Zustandsmenge als kartesisches Produkt der diskreten und kontinuierlichen Zustände

$\delta_{\text{ext}}: Q \times X^{\text{cont}} \times X^{\text{discr}} \rightarrow S$... externe Zustandsänderungsfunktion, wobei Q die Menge aller Zustände beschreibt

$$Q = \{(s^{\text{discr}}, s^{\text{cont}}, e) : s^{\text{discr}} \in S^{\text{discr}}, s^{\text{cont}} \in S^{\text{cont}}, e \in \mathbb{N}_0^+\}$$

$C_{\text{int}}: Q \times X^{\text{cont}} \rightarrow \text{Bool}$... Bedingungsfunktion zur Initiierung von Zustandsereignissen

$\delta_{\text{int}}: Q \times X^{\text{cont}} \rightarrow S$... interne Zustandsänderungsfunktion

$\lambda^{\text{discr}}: Q \times X^{\text{cont}} \rightarrow Y^{\text{discr}}$... Ereignisausgangsfunktion

$f: Q \times X^{\text{cont}} \rightarrow S^{\text{cont}}$... Änderungsfunktion

$\lambda^{\text{cont}}: Q \times X^{\text{cont}} \rightarrow Y^{\text{cont}}$... kontinuierliche Ausgangsfunktion

Die Semantik des DEV&DESS-Modells kann informell, wie folgt, beschrieben werden:

1. **Intervall $\langle t_1, t_2 \rangle$ mit keinem Ereignis:** Es ändern sich ausschließlich der kontinuierliche Modellanteil und die verstrichene Zeit e . Die Änderungsfunktion f definiert gemeinsam mit der kontinuierlichen Ausgangsfunktion λ^{cont} das kontinuierliche Modellverhalten. Die kontinuierlichen Systemzustände am Ende des Intervalls werden aus dem Anfangszustand und dem Integral von f im oben beschriebenen Intervall gebildet. Anschließend wird die verstrichene Zeit e um die gesamte verstrichene Zeit $t_2 - t_1$ erhöht. Die Ausgangsfunktion des kontinuierlichen Modellanteils bleibt während des gesamten Intervalls aufrecht.
2. **Ein Zustandsereignis tritt zum ersten Mal zum Zeitpunkt t im Intervall $\langle t_1, t_2 \rangle$ auf:** Zum Zeitpunkt t wird mithilfe der Bedingungsfunktion C_{int} ein Zustandsereignis erkannt (Bedingung erfüllt). An dieser Stelle wird die interne Zustandsänderungsfunktion δ_{int} aufgerufen, um einen neuen Systemzustand zu definieren. Die kontinuierlichen Systemzustände zum Ereigniszeitpunkt werden nun aus dem Anfangszustand und dem Integral der Funktion f im Intervall bis zum Zeitpunkt t gebildet. Anschließend wird die verstrichene Zeit Null gesetzt und die kontinuierliche Ausgangsfunktion λ^{cont} ausgeführt, um ein Ausgangsereignis zum Zeitpunkt t zu erzeugen.
3. **Ein Zeitereignis tritt zum ersten Mal am diskreten Eingang zum Zeitpunkt t im Intervall $\langle t_1, t_2 \rangle$ auf:** Zum Zeitpunkt t wird die externe Zustandsänderungsfunktion δ_{ext} ausgeführt, um einen neuen Zustand zu definieren. Die kontinuierlichen Zustände werden an dieser Stelle ebenfalls aus dem Ausgangszustand und dem Integral der Funktion f im Intervall bis zum Zeitpunkt t gebildet. Der kontinuierliche Ausgang wird bis zum Zeitpunkt t ebenfalls generiert. Anschließend wird die verstrichene Zeit Null gesetzt.

Das Bewegungsverhalten einer Ressource wird durch ein hybrides Ressourcenmodell also durch die Formulierung einer Bewegungsgleichung beschrieben. Die Ressource weist dabei entweder einen aktiven oder inaktiven Zustand (beispielsweise im Fall einer Pause) auf. Als Ausgang liefert das Modell sowohl die von der Ressource abgeschlossene Tätigkeit als auch die aktuelle Position der Ressource. Die beiden Modellanteile können dabei jeweils durch die aktuelle Position als auch durch den Sicherheitsmodus der Ressource beeinflusst werden, wobei das hybride Ressourcenmodell zwischen den beiden Phasen *aktiv* und *inaktiv* wechselt. Eine ausgeführte Tätigkeit wird an den Ausgang des Ressourcenmodells gesendet, sobald die Zielposition im Rahmen der Tätigkeitsausführung erreicht ist. Dies wird als Zustandsereignis bezeichnet. An dieser Stelle wird auch die Zielposition (in Abhängigkeit der nächstfolgenden Tätigkeit) neu initialisiert. Ein entsprechendes Ressourcenmodell auf Basis des hybriden DEV&DESS-Formalismus ist in Abbildung 36 visualisiert, wobei die oben angeführten Funktionszusammenhänge im unteren Teil der Abbildung dargestellt sind.

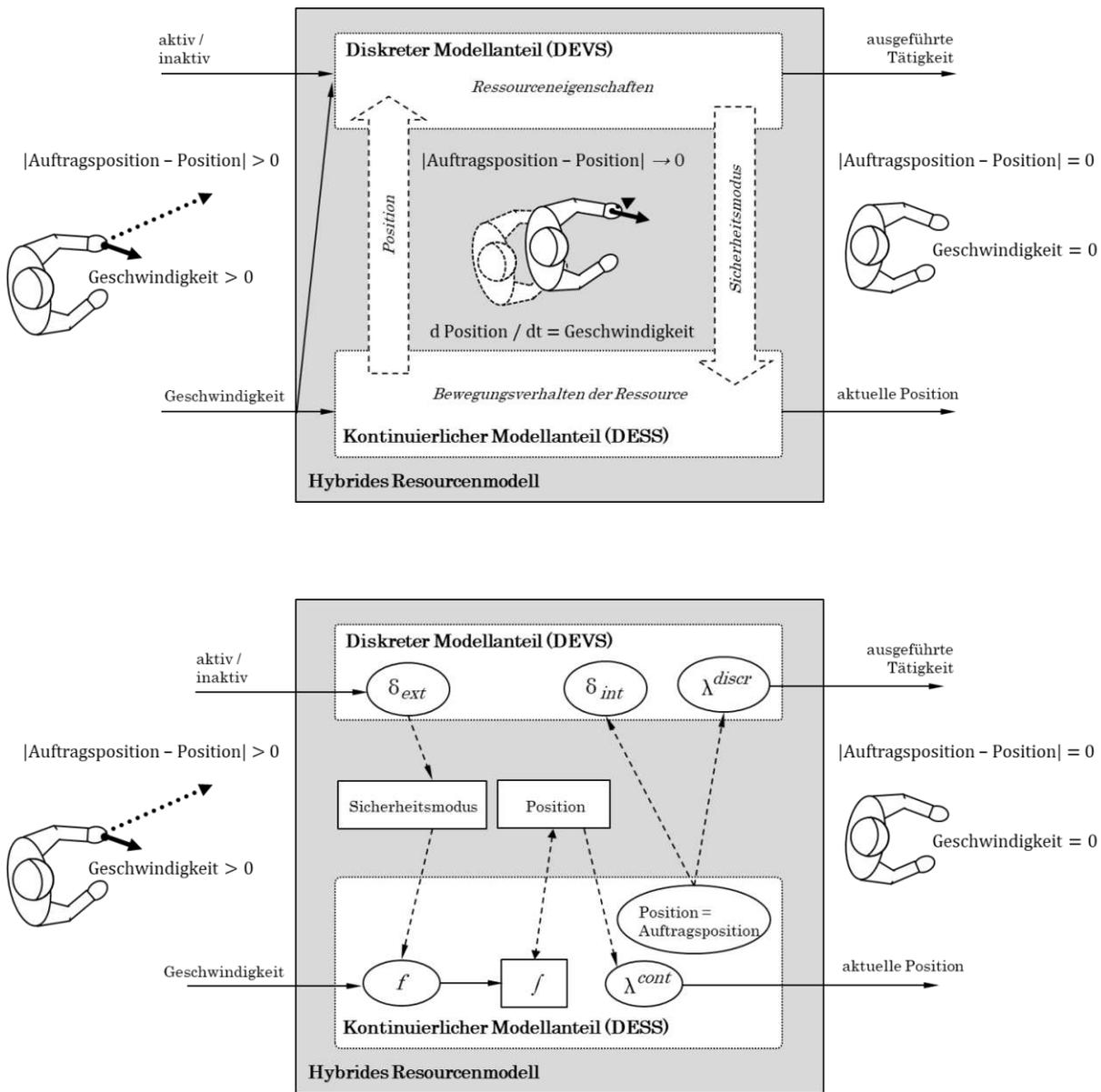


Abbildung 36: Hybrides Systemmodell einer Ressource (oben); Funktionszusammenhänge (unten)

Die Bewegung einer einzelnen Ressource wird dementsprechend als kontinuierlicher Prozess definiert, der durch das Bewegungsverhalten bzw. der ressourcenspezifischen Bewegungsgleichung bestimmt wird. Das Bewegungsverhalten einer Ressource in Abhängigkeit ihrer spezifischen Ressourceneigenschaften, wird mithilfe des DEV&DESS-Formalismus beispielsweise, wie folgt, beschrieben:

Algorithmus: Beispielhaftes DEV&DESS-Modell einer Ressource

$$\text{Ressource} = (X^{\text{discr}}, X^{\text{cont}}, Y^{\text{discr}}, Y^{\text{cont}}, S, \delta_{\text{ext}}, C_{\text{int}}, \delta_{\text{int}}, \lambda^{\text{discr}}, f, \lambda^{\text{cont}})$$

$$X^{\text{discr}} = \{\text{aktiv/inaktiv} \mid \text{aktiv/inaktiv} \in (\text{aktiv}, \text{inaktiv})\}$$

$$X^{\text{cont}} = \{\text{Geschwindigkeit} \mid \text{Geschwindigkeit} \in \mathbb{R}\}$$

$$Y^{\text{discr}} = \{\text{ausgeführte Tätigkeit} \mid \text{ausgeführte Tätigkeit} \in \{\text{Auftrag}\}\}$$

$$S^{\text{discr}} = \{\text{Sicherheitsmodus} \mid \text{Sicherheitsmodus} \in (\text{Kollaboration}, \text{Stillstand})\}$$

$$S^{\text{cont}} = \{\text{Position} \mid \text{Position} \in \text{Pose}\}$$

$$\delta_{\text{ext}}((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit}, \text{aktiv/inaktiv})$$

if aktiv/inaktiv = aktiv then

Sicherheitsmodus := Kollaboration

elseif aktiv/inaktiv = inaktiv then

Sicherheitsmodus := Stillstand

$$C_{\text{int}}((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit})$$

Position == Auftragsposition

$$\delta_{\text{int}}((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit})$$

Position == neue Auftragsposition

$$\lambda^{\text{discr}}((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit})$$

ausgeführte Tätigkeit = sende ausgeführte Tätigkeit an diskreten Ausgang

$$f((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit})$$

case Sicherheitsmodus

Kollaboration: $d \text{ Position} / dt = \text{Geschwindigkeit}$

Stillstand: $d \text{ Position} / dt = 0$

$$\lambda^{\text{cont}}((\text{Position}, \text{Sicherheitsmodus}), e, \text{Geschwindigkeit})$$

aktuelle Position = Position

Aus Abbildung 36 sowie aus dem Modellalgorithmus lässt sich nun erkennen, wie sich einzelne Modellelemente gegenseitig beeinflussen. Eine Phase wird durch die externe Zustandsänderungsfunktion definiert, die durch den diskreten Eingang *aktiv/inaktiv* getriggert wird. Die Ableitung des kontinuierlichen Systemzustands *Position* (Änderungsfunktion f) wird durch den Wert der Variable *Sicherheitsmodus* definiert. Ist der Sicherheitsmodus kollaborativ, so ist die Ableitung der Position gleich des Eingangs *Geschwindigkeit*. Ist sie Null, so ist auch die Bewegungsgeschwindigkeit Null. Die

internen Ereignisse werden durch die Bedingungsfunktion ($Position == Auftragsposition$) getriggert, welche sowohl die Variable $Position$ als auch den Ausgang $ausgeführte Tätigkeit$ ändert. Der kontinuierliche Ausgang $aktuelle Position$ wird allein durch die Zustandsvariable $Position$ definiert.

Abbildung 37 zeigt die Trajektorien einer beispielhaften Sequenz des Systemverhaltens. Initial befindet sich die Ressource im Stillstand (inaktiver Zustand). Nach einer gewissen Zeit erhält sie einen Auftrag und wechselt in einen aktiven Zustand. Sie beginnt sich zu bewegen und damit ändert sich auch ihre aktuelle Position. Sobald die Ressource ihre Auftragsposition erreicht hat, entsteht ein Zustandsereignis, i. e. die ausgeführte Tätigkeit wird an den Ausgang gesendet und eine neue Auftragsposition wird initialisiert, sofern ein neuer Auftrag ansteht. Die Bewegung zur zweiten Auftragsposition wird durch ein externes Ereignis am diskreten Eingang unterbrochen. Dies kann beispielsweise eine Wegbehinderung durch eine andere Ressource sein.

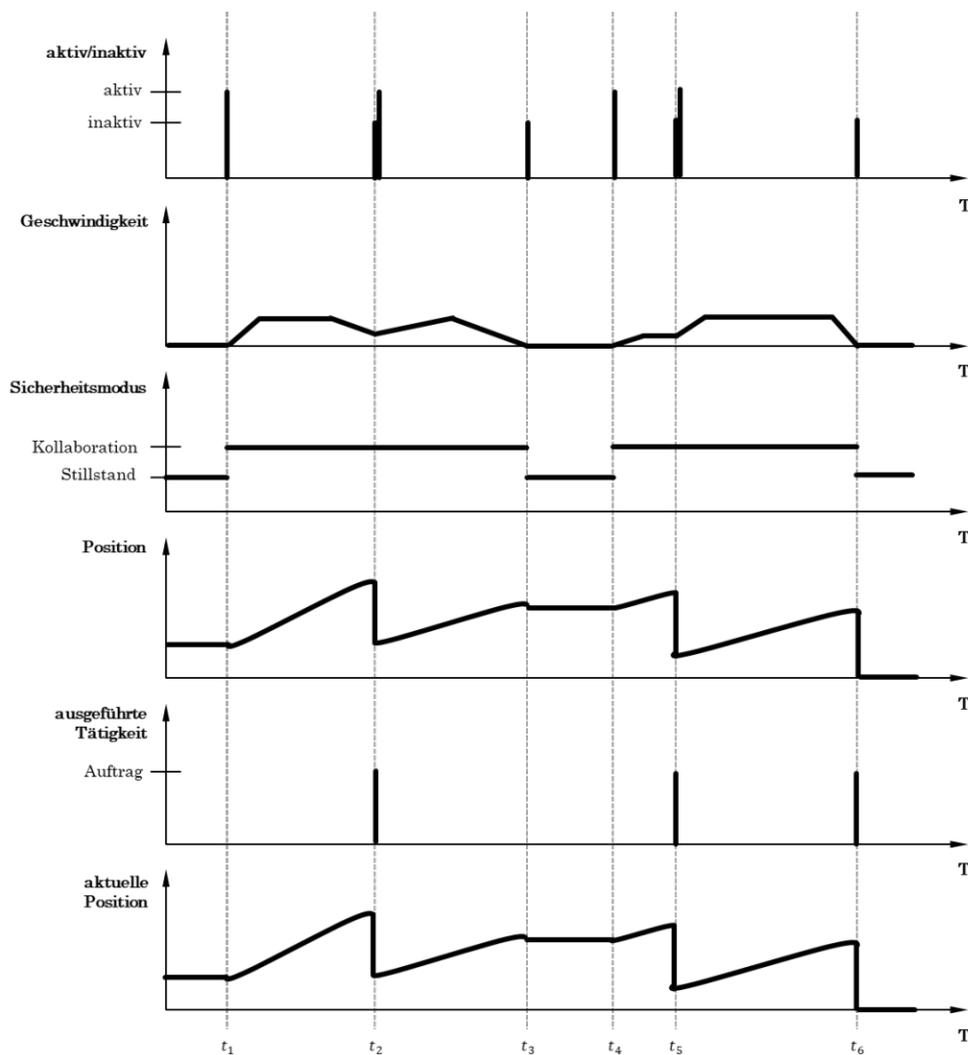
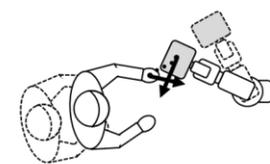
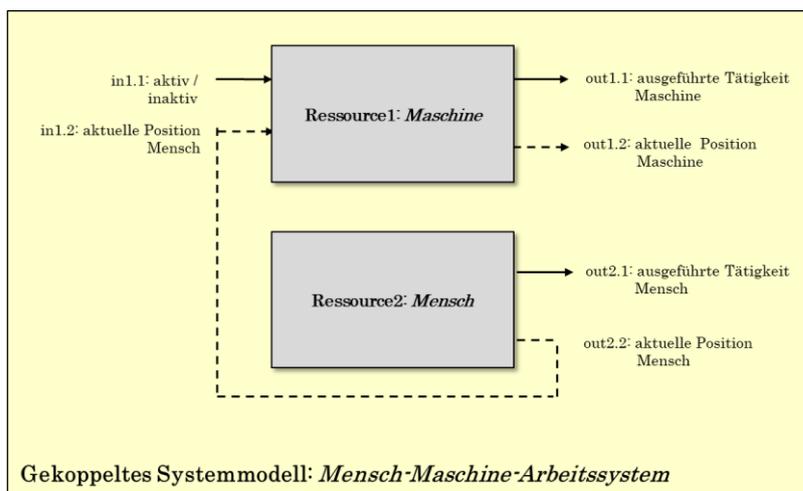


Abbildung 37: Beispielhafte Trajektorien eines Ressourcenmodells

Das Bewegungsverhalten einer Ressource kann sich demzufolge durch bestimmte System- oder Ressourceneigenschaften dynamisch während der Prozessbearbeitung ändern, was durch eine Systemmodellierung mittels hybridem DEV&DESS-Formalismus abbildbar ist. Beispielsweise kann ein aktiver Sicherheitsmodus für den kollaborativen Betrieb eines Roboters die Bewegungssteuerung dahingehend beeinflussen, dass die Geschwindigkeit des Roboters in Abhängigkeit der örtlichen Nähe zu Personen reduziert wird. Andererseits können auch Geschwindigkeiten von zwei Ressourcen zur Ausführung kollaborativer Tätigkeiten synchronisiert werden.

Ein kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem wird demnach als gekoppeltes Systemmodell beschrieben, in dem jeder Ressource ein separates hybrides Ressourcenmodell zugeordnet wird. Die Systemausgänge einzelner Ressourcenmodelle werden hierbei als Eingänge für andere Ressourcenmodelle genutzt, um eine wechselseitige Beeinflussung des Bewegungsverhaltens zwischen den Ressourcen zu modellieren. Eine bestimmte Position eines Menschen (kontinuierlicher Ausgang der Ressource *Mensch*) kann somit den Zustand eines Roboters (diskreter Modellanteil der Ressource *Roboter*) ändern und somit auch seine Geschwindigkeit, was in weiterer Folge das Bewegungsverhalten des Roboters (kontinuierlicher Modellanteil der Ressource *Roboter*) und damit seine Position ändert (kontinuierlicher Ausgang der Ressource *Roboter*). Aus einer derartigen Systemmodellierung lassen sich dementsprechend auch zeitliche und örtliche Prozessanforderungen zur erfolgreichen Prozessausführung berücksichtigen. Abbildung 38 zeigt ein beispielhaftes gekoppeltes Systemmodell eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems bestehend aus zwei Ressourcen, Maschine und Mensch.

Das hybride Systemmodell, das mittels DEV&DESS-Formalismus abgebildet wird, dient somit zur Simulation des Bewegungsverhaltens der einzelnen Ressourcen im kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem.



Wenn ($| \text{aktuelle Position Mensch} - \text{aktuelle Position Maschine} | < \text{Abstand_min}$)
dann Geschwindigkeit Roboter = min.

Abbildung 38: Beispielhaftes gekoppeltes Systemmodell

Das entsprechende Taktzeitmodell besteht demnach aus einzelnen hybriden Ressourcenmodellen, die auf Basis ihrer kontinuierlichen Systemzustände miteinander verknüpft sind. Die Systemarchitektur von hybriden Modellen macht es zudem möglich, die wechselseitige Beeinflussung von Ressourcen innerhalb des Arbeitssystems in Bezug auf das Bewegungsverhalten spezifischer Ressourcen abzubilden. Durch das Bewegungsverhalten ergeben sich Ausführungszeiten einzelner Tätigkeiten und damit eine Taktzeit für einen Prozess im Rahmen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems.

Das hybride Modell des kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems wurde mithilfe der MatlabDEVS-Toolbox in MATLAB® implementiert. Die Toolbox wurde von der Forschungsgruppe Computational Engineering and Automation an der Hochschule Wismar (Pawletta et al. 2006) entwickelt und basiert auf dem DEVS-Beschreibungsformalismus von Zeigler aus dem Jahr 1976. Sie umfasst außerdem die von Praehofer (1992) definierten Erweiterungsmöglichkeiten der DEVS-Theorie zur Simulation des dynamischen Verhaltens von hybriden Modellen. In diesem Sinne verfügt die Toolbox über parallele diskrete Modelle mit Schnittstellen sowie experimentelle hybride Modelle als diskrete Modelle mit zusätzlichem kontinuierlichem Modellverhalten. Hybride Modelle werden im Rahmen der MatlabDEVS-Toolbox also von einem modifizierten diskreten Ereignissimulator simuliert, der zur Generierung des kontinuierlichen Modellverhaltens gewöhnliche Differentialgleichungen zwischen einzelnen Ereignissen löst. Durch die Verwendung eines diskreten Simulators und der Abbildung von Modellelementen auf Objekte (Instanzen), bleibt die Information der hierarchischen Modellstruktur während der Simulation erhalten und ermöglicht somit die Simulation des dynamischen Systemverhaltens (siehe dazu auch Deatcu und Pawletta 2009 und 2012). Die MatlabDEVS-Toolbox nutzt die objektorientierte Programmierung von MATLAB® also sowohl für die Implementierung der DEVS-Simulationsumgebung als auch für die Definition des Simulationsmodells. Das Simulationsmodell kann dabei aus Submodellen (Objekten) unterschiedlichen Typs (Klassen) zusammengesetzt werden. Am Beispiel des kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems setzt sich das hybride Simulationsmodell nun aus einzelnen hybriden Ressourcenmodellen, i. e. Submodellen, unterschiedlichen Typs, i. e. Fördersystem, Mobiles System, Robotersystem oder Mensch, zusammen (siehe Abbildung 39).

Zur Definition des gesamten Taktzeit- bzw. Simulationsmodells mit den jeweiligen Schnittstellen, Submodellen und Verbindungen dient eine Instanz der so genannten Koordinator-Klasse. Ein Koordinator sieht von außen genauso so aus, wie ein Submodell, und ermöglicht somit einen hierarchischen Aufbau von Systemen. Zur Simulation des hybriden Modells wird schließlich der so genannte Haupt-Koordinator verwendet. Eine Ressource (Objekt) ist somit ein Exemplar bzw. eine Instanz eines bestimmten Ressourcentyps (Klasse). In einem Ressourcentyp (Klasse) werden dabei Attribute, i. e. Eigenschaften, und Methoden, i. e. Verhaltensweisen, der Ressourcen (Objekte) definiert. Für jeden Ressourcentyp (Klasse) können sowohl die Eigenschaften als auch die Verhaltensweisen unterschiedlich ausgeführt sein. Ein Überblick der einzelnen Klassen ist in Anhang C gegeben.

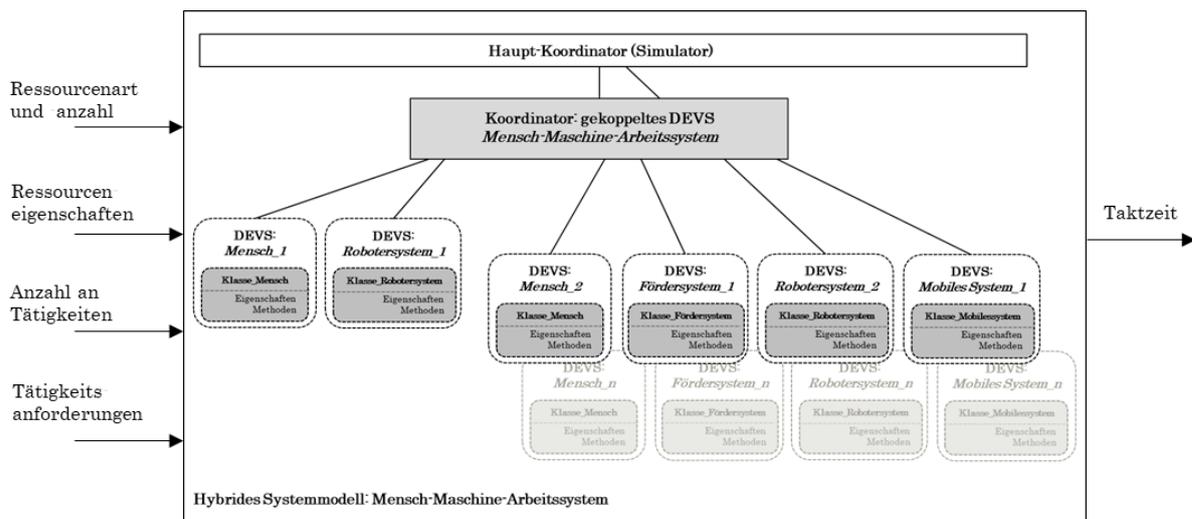


Abbildung 39: Taktzeitmodell als hybrides Systemmodell

Die Erzeugung einer Ressource (Objekts) erfolgt mit einer entsprechenden Identität sowie einer Liste an Initialisierungs- und Systemparametern. Durch die Identitäten können die Ressourcen gleichen Typs voneinander unterschieden werden. Das Verhalten des jeweiligen Ressourcentyps (also eines entsprechenden DEVS-Blocks) wird dabei als Funktionsliste in einem Methoden-Abschnitt innerhalb der Klasse definiert. Hier erfolgt sowohl die Definition der so genannten Modellierungsfunktion, die eine Instanz des Simulators mit entsprechenden Initialisierungsparametern erzeugt, als auch die der charakteristischen Verhaltensfunktionen des DEVS-Blocks. Ein DEVS-Block dient im Rahmen der MatlabDEVS-Toolbox also auch gleichzeitig als zugehöriger Simulator.

Die einzelnen Ressourcen, i. e. Menschen und Maschinen, werden demzufolge als einzelne DEVS-Blöcke so abgebildet, dass die kontinuierlichen Modellanteile, i. e. Positionen, die diskreten Modellanteile der anderen Ressourcen beeinflussen und so das entsprechende kontinuierliche Modellverhalten, i. e. Bewegungsverhalten, gegebenenfalls verändern. Als Eingabeparameter der DEVS-Blöcke dienen die Ressourcen- bzw. Tätigkeitszuordnung, die Ressourceneigenschaften im Sinne der dynamischen Eigenschaften der Tätigkeitsausführung sowie der Vorranggraph im Rahmen der Prozessausführung. Die Instanzen der Ressourcen können dabei je nach Anzahl und Art der Ressourcen innerhalb des kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems (und in Abhängigkeit der Rechenkapazität) erweitert bzw. skaliert werden. Ein Beispielcode für die Modellierung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems auf Basis des DEV&DESS-Formalismus ist in Anhang D angeführt.

Das Ergebnis des Taktzeitmodells ist die Taktzeit des entsprechenden Prozesses, die auf Basis einer Prozesszeitmatrix, die die Ausführungszeiten einzelner Tätigkeiten für eine bestimmte Ressourcen- bzw. Tätigkeitszuordnung abbildet, ermittelt wird.

5.4 Modellgrenzen und Vereinfachungen

Ressourcen wurden im Rahmen der Implementierung als Punktmassen betrachtet, wobei die Bewegungsgleichung der gleichförmig beschleunigten Bewegung herangezogen wurde. Diese Bewegungsgleichung ist gemäß Nguyen et al. (2008) für die angeführte Problemstellung hinreichend genau. Im Allgemeinen lassen sich höhere Genauigkeiten der Bewegungsmodellierung von Ressourcen durch die Berücksichtigung höherer Ableitungen der Position erzielen, wobei an dieser Stelle anzumerken ist, dass hier nie eine Genauigkeit von 100 % erreicht werden kann, da es sich bei Bewegungsgleichungen um Modelle handelt. Ein visueller Vergleich zweier Modellierungsgüten eines Bewegungsverhaltens ist in Abbildung 40 dargestellt. Im trapezoiden s-Kurven-Modell des Bewegungsverhaltens einer Ressource gleicht das Geschwindigkeits-Zeit-Profil einem Trapez, bestehend aus einer Beschleunigungsphase, einer Phase mit konstanter Geschwindigkeit und einer Verzögerungsphase. Hier fließen also nur zwei Ableitungen des Weges in die Bewegungsgleichung mit ein. In einer noch vereinfachteren Form des trapezoiden s-Kurven-Modells entspricht die Verzögerungsphase sogar der Beschleunigungsphase.

In einem Modell höherer Ordnung, beispielsweise dem polynomialen s-Kurven-Modell 3. Ordnung, wird auch die dritte Ableitung des Weges, der Ruck, mitberücksichtigt. Hier gleicht das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm ebenfalls einem Trapez, wobei sich im Geschwindigkeits-Zeit-Profil noch so genannte Anlaufphasen ergeben. Zudem gibt es in realen Systemen auch noch Schalt- bzw. Reaktionszeiten sowie Ausschwingzeiten.

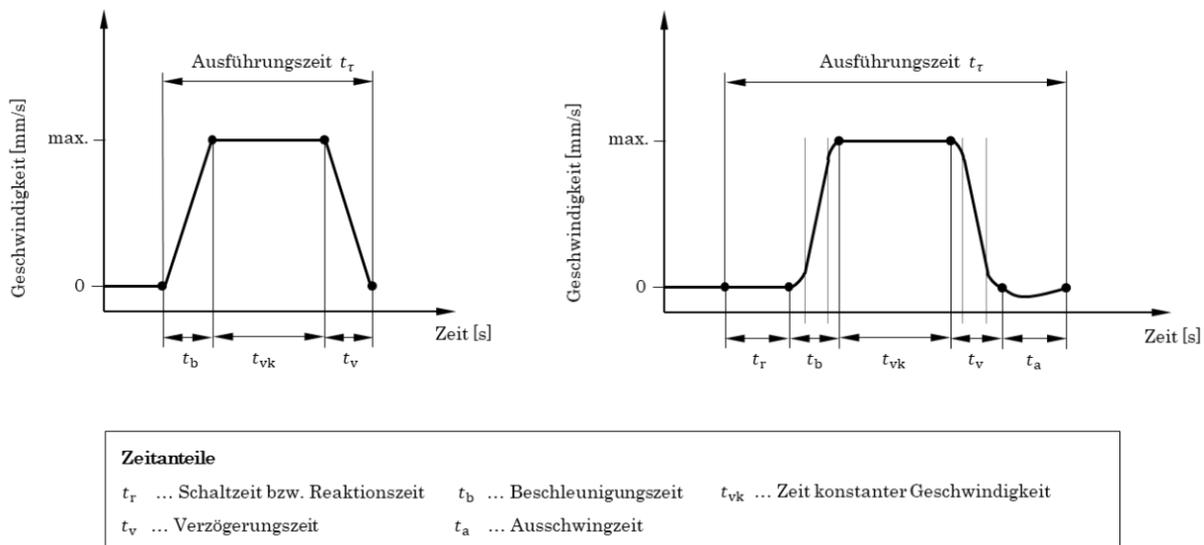


Abbildung 40: Bewegungsmodelle unterschiedlicher Genauigkeit (links: trapezoides s-Kurven-Modell; rechts: polynomiales s-Kurven-Modell 3. Ordnung)

Das Bewegungsverhalten einer Ressource wurde also gemäß einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung, auf Basis eines trapezförmigen Geschwindigkeitsprofils mit einer Beschleunigungs- und gleich großen Abbremsphase sowie einer Phase mit konstanter Geschwindigkeit modelliert. Demzufolge ergibt sich für die Ausführungszeit $t_{\tau r}$ einer Tätigkeit τ durch eine Ressource r

$$t_{\tau r} = \frac{v_r^2 + a_r s_{\tau r}}{a_r v_r} \quad (19)$$

wobei sich der zurückgelegte Weg zur Tätigkeitsausführung der Ressource aus den zurückgelegten Wegstrecken der Beschleunigungsphase, der Phase mit konstanter Geschwindigkeit sowie der Abbremsphase

$$s_{\tau r} = s_b + s_{vk} + s_b = 2s_b + s_{vk} \quad (20)$$

zusammensetzt.

Die zurückgelegte Wegstrecke in der Phase mit konstanter Geschwindigkeit ergibt sich dabei durch

$$s_{vk} = v_r t_{vk} \quad (21)$$

Für die zurückgelegte Wegstrecke in der Beschleunigungs- und Abbremsphase muss zunächst die Geschwindigkeit ermittelt werden. Diese ergibt sich durch die Ableitung der Wegstrecke

$$v_r = \dot{s}_b = \frac{ds_b}{dt} \quad (22)$$

wobei die Beschleunigung beim Anfahren und Abbremsen durch

$$a_r = \dot{v}_r = \ddot{s}_b \quad (23)$$

gegeben ist.

Durch Umformulieren erhält man

$$ds_b = v_r dt = a_r t_b dt \quad (24)$$

und durch Integrieren

$$s_b = a_r \frac{t_b^2}{2} \quad (25)$$

Somit ergibt sich für den zurückgelegten Weg zur Tätigkeitsausführung

$$s_{\tau r} = a_r t_b^2 + v_r t_{vk} \quad (26)$$

mit

$$t_b = \frac{v_r}{a_r} \quad (27)$$

für den zurückgelegten Weg

$$s_{\tau r} = \frac{v_r^2}{a_r} + v_r t_{vk} \quad (28)$$

und mit Umformulieren schließlich

$$t_{vk} = \frac{s_{\tau r}}{v_r} - \frac{v_r}{a_r} \quad (29)$$

Gemäß

$$t_{\tau r} = t_b + t_{vk} + t_b = 2t_b + t_{vk} \quad (30)$$

ergibt dies die Ausführungszeit einer Tätigkeit τ durch eine Ressource r .

Setzt man nun die auf diese Art und Weise ermittelte Ausführungszeit ins Verhältnis zur Ausführungszeit ohne Beschleunigungsphase $\tilde{t}_{\tau r}$, lässt sich die Modellgüte im Vergleich zu einer vereinfachteren Bewegungsmodellierung ermitteln. Dasselbe gilt für den Vergleich mit einem s-Kurven-Modell höherer Ordnung!

$$\frac{t_{\tau r}}{\tilde{t}_{\tau r}} = \frac{\frac{v_r^2 + a_r s_{\tau r}}{a_r v_r}}{\frac{s_{\tau r}}{v_r}} = \frac{\frac{v_r^3}{a_r} + v_r s_{\tau r}}{v_r s_{\tau r}} \quad (31)$$

An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass das vorgestellte Taktzeitmodell einerseits modular aufgebaut und andererseits variabel parametrisierbar ist, sodass beliebig viele Ressourcen (in Abhängigkeit der verfügbaren Rechenkapazität) mit einer beliebigen Genauigkeit des Bewegungsverhaltens modelliert werden können. Die dabei gegebenenfalls entstehenden Vereinfachungen in der Bewegungsmodellierung sind ausschließlich für die reale Taktzeitermittlung im zu untersuchenden

kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem relevant. Der Detaillierungsgrad des Taktzeitmodells ist demnach frei wählbar – je nachdem, welche Modellqualität erzielt werden soll bzw. muss und welche Modelle (im Speziellen zur Abbildung eines bestimmten Ressourcenverhaltens) verfügbar sind. Obwohl die absolute Modellqualität von der Modellierungsgüte abhängig ist, kann an dieser Stelle aber dennoch ein relativer Vergleich von vorhandenen Systemvarianten durchgeführt werden, was zumindest einen Einblick in das komplexe Systemverhalten kollaborationsfähiger Mensch-Maschine-Arbeitssysteme ermöglicht. Ein relativer Vergleich einzelner Systemvarianten kann – ungeachtet der Modellvereinfachungen – zumindest zu einer Transparenz hinsichtlich der wechselseitigen Beeinflussung von Ressourcen bei der kollaborativen Arbeitsausführung dienen.

Durch die Modularität und der damit verbundenen Flexibilität in der Detailierungs- bzw. Genauigkeitsgüte der Bewegungsmodellierung, kann zudem der Zielkonflikt zwischen Genauigkeit und Anwendbarkeit ausgeglichen werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Detaillierungsgrade in der Abbildung des Bewegungsverhaltens einzelner Ressourcen lässt zudem eine Analyse der Genauigkeitsanforderungen an die Modellierung zu.

Bewegungsverhalten in Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unterliegen neben der wechselseitigen Beeinflussung durch das Bewegungsverhalten anderer Ressourcen im Arbeitssystem auch zahlreichen Zufallseinflüssen oder psychophysiologischen Einflüssen. Diese Schwankungen in der Arbeitsausführung wurden in dem vorgestellten Modell mit Zufallsvariablen im Sinne von Leistungsfaktoren definiert und sorgen für die Modellierung von Leistungsschwankungen oder Störungen im Sinne von Prozessunterbrechungen. Die Integration von statistischen Werten zur Abbildung von Zufallseinflüssen ist durch den modularen Aufbau und die variable Parametrisierbarkeit einzelner Ressourcen aber ebenfalls möglich.

6 Anwendung und Validierung

Im Folgenden wird die Anwendung des hybriden Taktzeitmodells anhand von zwei industriellen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen erläutert. Im ersten Fallbeispiel handelt es sich um ein kollaborationsfähiges Arbeitssystem mit ortsfestem und a priori definiertem kollaborativen Arbeitssystemraum, wobei im zweiten Beispiel der kollaborative Arbeitssystemraum flexibel und frei wählbar ist.

6.1 Fallbeispiele

Arbeitssystem mit Mensch und Roboter

Im ersten industriellen Szenario handelt es sich um einen Verpackprozess von Platinen. Die Arbeitsabfolge ist, wie angeführt, gegeben: Platinen werden der Verpackstation in Chargen von 12 Stück bereitgestellt. Jede Platine wird einzeln gescannt, um die richtige Durchführung der Vorprozesse zu prüfen, und entsprechend des Prüfergebnisses anschließend in ein Gut- oder Schlecht-Tray verpackt. Trays umfassen dabei 54 Platinen. Sobald ein Tray voll befüllt ist, wird es in einem Behälter abgelegt. In einen Behälter werden vier volle Trays und ein leeres Tray als Staubschutz platziert. Zuletzt wird ein Deckel auf den Behälter platziert und ein Klebeetikett am Behälter angebracht.

Der Verpackprozess besteht demnach aus sechs verschiedenen Tätigkeiten, (1) Scannen, (2) Verpacken, (3) Tray-Manipulation, (4) Deckel-Manipulation, (5) Behälter-Manipulation und (6) Etikettieren. Ursprünglich wurden alle Tätigkeiten manuell durchgeführt. Die entsprechenden Zeitwerte für die einzelnen manuellen Tätigkeiten sind gemäß MTM-UAS in Tabelle 8 angeführt.

Im Allgemeinen können die Tätigkeiten im Rahmen des Verpackprozesses auf zwei verschiedene Ressourcenarten, i. e. Mensch und Roboter, aufgeteilt werden.

Nr.	Tätigkeit	MTM-UAS Baustein	Zeitwert [s]		Zeitwert [min.]
1	Scannen	PA3	0,90 * 216 =	194,40	10,23
		PT	1,94*216 =	419,04	
2	Verpacken	PC2	1,44*216 =	311,04	5,18
3	Tray-Manipulation	AC2	1,98*5 =	9,90	0,17
4	Deckel-Manipulation	AC2	1,98*1 =	1,98	0,03
5	Behälter-Manipulation	AC2	1,98 *1 =	1,98	0,03
6	Etikettieren	AC2	1,98*1 =	1,98	0,03
Taktzeit [min.] / Behälter					15,67

Tabelle 8: Planzeit des Verpackprozesses mit rein manueller Tätigkeitsausführung

Entsprechend der Ressourcenfähigkeiten lassen sich daraus sechs mögliche Prinzipien der Aufgabenteilung ableiten (siehe dazu auch Tabelle 9 sowie Abbildung 41):

- A) Mensch führt alle Tätigkeiten allein aus,
- B) Mensch führt alle Tätigkeiten aus und Roboter unterstützt mit Scannen und Verpacken,
- C) Mensch führt Tray-, Deckel- und Behälter-Manipulation sowie Etikettieren aus, während der Roboter das Scannen und Verpacken übernimmt.
- D) Mensch führt Deckel- und Behälter-Manipulation sowie Etikettieren aus, während der Roboter die Tray-Manipulation sowie das Scannen und Verpacken übernimmt,
- E) Mensch übernimmt nur das Etikettieren, während der Roboter alle anderen Tätigkeiten ausführt, und
- F) Roboter führt alle Tätigkeiten allein aus.

Nr.	Tätigkeit	Aufgabenteilung											
		A		B		C		D		E		F	
		M	R	M	R	M	R	M	R	M	R	M	R
1	Scannen	x		x	x		x		x		x		x
2	Verpacken	x		x	x		x		x		x		x
3	Tray-Manipulation	x		x		x		x		x		x	
4	Deckel-Manipulation	x		x		x		x		x		x	
5	Behälter-Manipulation	x		x		x		x		x		x	
6	Etikettieren	x		x		x		x		x		x	

M...Mensch; R...Robotersystem

Tabelle 9: Darstellung unterschiedlicher Prinzipien der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter zur Ausführung des Verpackprozesses

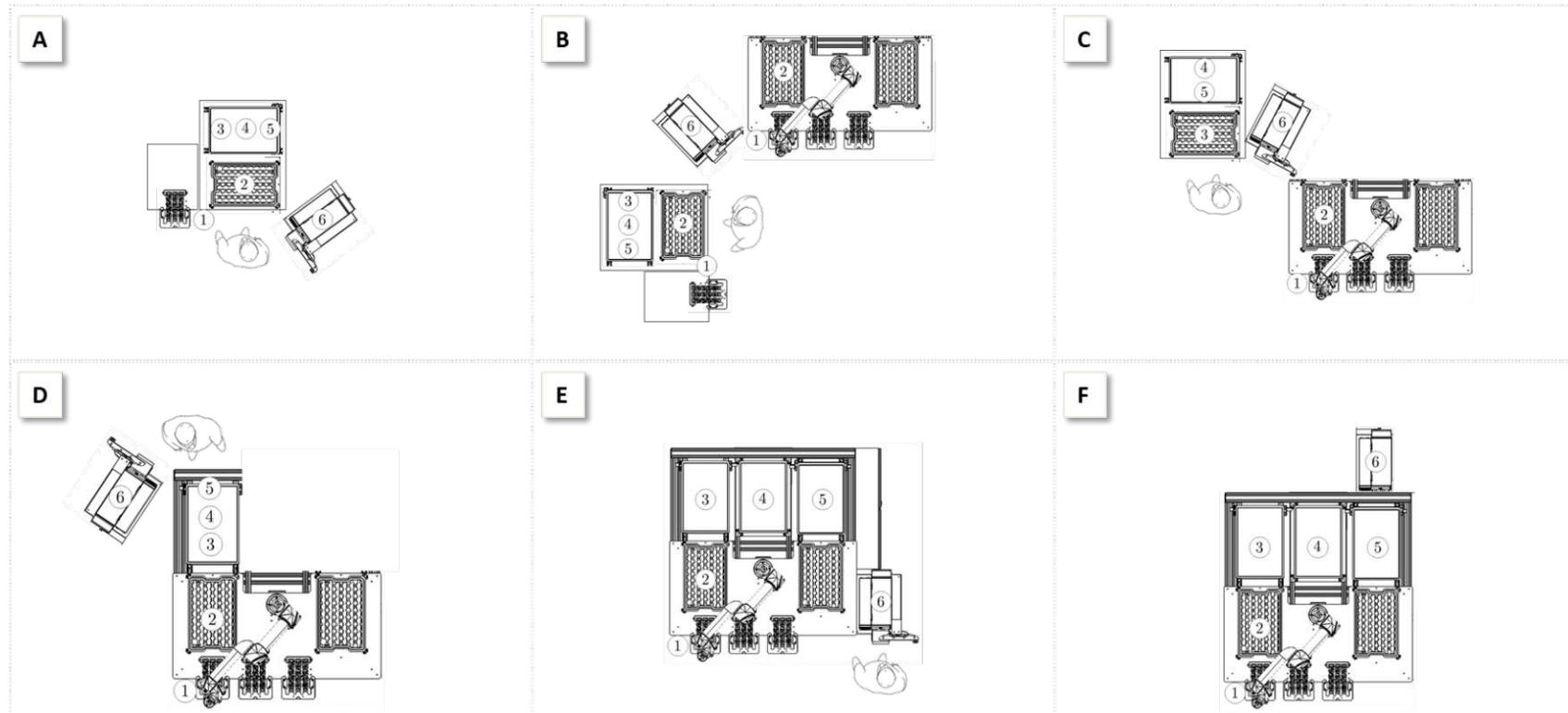


Abbildung 41: Layoutvarianten des Verpackungssystems
in Abhängigkeit der definierten Aufgabenteilung

Hinzu kommt, dass unterschiedliche Bedienpersonen im Einsatz an dieser Verpackstation unterschiedliche Bearbeitungszeiten für einzelne Tätigkeiten aufweisen. Die Streuung der entsprechenden Bearbeitungszeiten ist in Abbildung 42 gezeigt. Die Boxplots stellen dabei die minimale, durchschnittliche und maximale Bearbeitungszeit sowie die Bearbeitungszeit des dritten und ersten Quartils dar.

Außerdem kann der Roboter in drei verschiedenen Sicherheitsmodi betrieben werden, wodurch die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters in Abhängigkeit der örtlichen Nähe zur Bedienperson dynamisch geändert wird. In diesem Beispiel wurden drei Sicherheitsmodi definiert:

- i. Sicherheitsbewerteter überwachter Halt: Die Geschwindigkeit des Roboters wird auf Null gesetzt, sobald ein Mindestabstand der Bedienperson unterschritten wird.
- ii. Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung: Die Geschwindigkeit des Roboters wird als Funktion der örtlichen Nähe der Bedienperson festgelegt.
- iii. Leistungs- und Kraftbegrenzung: Die Geschwindigkeit des Roboters wurde auf Basis einer vorhergegangenen Risikobeurteilung auf einen bestimmten Maximalwert festgelegt, um Kraftgrenzwerte im Fall einer auftretenden Kollision nicht zu überschreiten.

Der dargestellte industrielle Anwendungsfall verfügt demnach über drei taktzeitbestimmende Systemparameter, so genannte Modifikationsdimensionen, mit sechs Ausprägungen in der Dimension Aufgabenteilung, fünf Ausprägungen in der Dimension Diversität der Bedienperson und drei Ausprägungen in der Dimension Sicherheitsmodus. Abbildung 43 zeigt die theoretisch möglichen Systemvarianten mit einer Auswahl von sechs Varianten mit unterschiedlichen Ausprägungen je Modifikationsdimension.

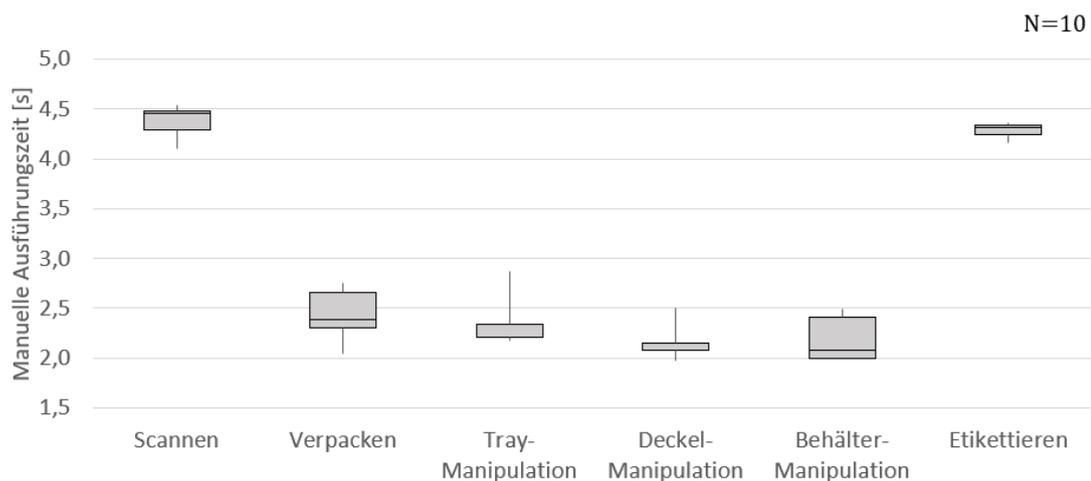


Abbildung 42: Streuung der Bearbeitungszeiten für einzelne Arbeitstätigkeiten in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften der Bedienperson

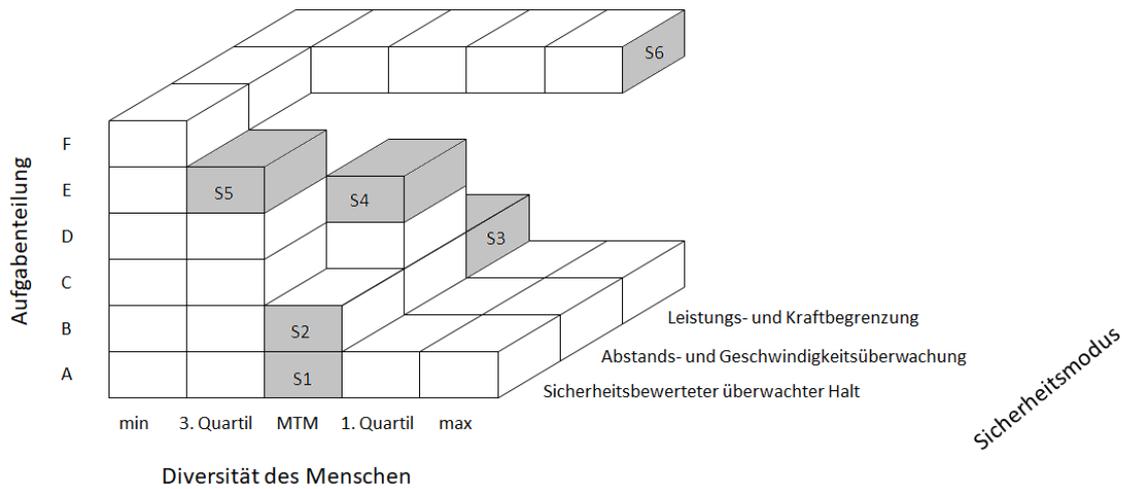


Abbildung 43: Exemplarische Auswahl theoretisch möglicher Systemvarianten des Verpackprozesses (in grau) innerhalb des Modifikationsraums

Die Systemvarianten werden demzufolge aus der Kombination einzelner Ausprägungsformen innerhalb der definierten Modifikationsdimensionen beschrieben. Der sich daraus ergebende Modifikationsraum beschreibt die Gesamtanzahl an möglichen Systemvarianten s für eine bestimmte Anzahl an Modifikationsdimensionen und ihren jeweiligen Ausprägungen. Ein kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem mit d Modifikationsdimensionen und c_i Ausprägungen für die i . Dimension, resultiert in maximal

$$s = \prod_{i=1}^d c_i \quad (32)$$

möglichen Systemvarianten.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Ausprägungen einzelner Modifikationsdimensionen theoretisch Änderungen mit der Zeit unterliegen. Im Sinne von Anpassungsfähigkeit bedeutet das, dass vordefinierte Systemgrenzen im Rahmen des Systemverhaltens überschritten werden können. Das bedeutet, dass ein System lernen kann, sich mit der Zeit an verändernde Bedingungen anzupassen und somit die Ausprägung einzelner Modifikationsdimensionen ebenfalls ändern kann.

Die Kombination einzelner Ausprägungen je Modifikationsdimension resultiert im vorliegenden Fallbeispiel demnach in

$$s = \prod_{i=1}^3 c_i = c_1 c_2 c_3 = 6 \cdot 5 \cdot 3 = 90$$

theoretisch möglichen Systemvarianten.

Von den 90 theoretisch möglichen Systemvarianten, gibt es allerdings nur 68 zulässige oder für die Taktzeitermittlung sinnvolle (echte) Systemvarianten. Ausgehend von der Modifikationsdimension Aufgabenteilung, müssen an dieser Stelle für die Aufgabenteilung A lediglich 5 Systemvarianten berücksichtigt werden. Da diese Modifikationsdimension eine rein manuelle Tätigkeitsausführung beschreibt, sind die Ausprägungen des Roboters an dieser Stelle irrelevant. Es sind also $5 \cdot 3 - 5 = 10$ Systemvarianten überflüssig. Ähnliches gilt für die Aufgabenteilung F. Hier handelt es sich um eine rein automatisierte Tätigkeitsausführung. Die Diversität des Menschen spielt dabei keine Rolle. An dieser Stelle sind also $5 \cdot 3 - 3 = 12$ Systemvarianten überflüssig. Aus der Differenz der theoretisch möglichen und der irrelevanten Systemvarianten ergeben sich somit $90 - 10 - 12 = 68$ zulässige Systemvarianten.

Während nun die Taktzeitermittlung einer Systemvariante mit Aufgabenteilung A sowie einer durchschnittlich geübten Bedienperson (siehe Systemvariante S1 in Abbildung 43) mittels MTM-UAS erfolgen kann, kann die Taktzeit bei einer Systemvariante mit Aufgabenteilung F (siehe beispielsweise Systemvariante S6 in Abbildung 43) mithilfe eines herkömmlichen Robotersimulationswerkzeugs bestimmt werden. Für alle anderen Systemvarianten ist anhand der wechselseitigen Beeinflussung einzelner Systemvariablen die Taktzeitermittlung mit herkömmlichen Planungsmethoden nur schwer möglich. Aus diesem Grund wurden die Taktzeiten aller Systemvarianten mithilfe des vorgestellten hybriden Taktzeitmodells ermittelt. Tabelle 10 zeigt exemplarisch die Taktzeitergebnisse für die sechs ausgewählten Systemvarianten aus Abbildung 43. Die Taktzeit ist dabei in Minuten für die Verpackung eines gesamten Behälters mit 216 Platinen ausgewiesen.

	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5		Variante 6	
Aufgabenteilung	A		B		B		D		E		F	
r Ressource / τ Tätigkeit	MTM	-	MTM	Halt	MTM	Kraft	MTM	Abstand	3.Quartil	Halt	-	Kraft
1 Scannen	10,23		2,00	4,62	2,00	2,66		4,70		3,36		3,36
2 Verpacken	5,18		1,00	10,87	1,00	5,96		12,10		8,78		8,78
3 Tray- Manipulation	0,17			6,71		2,92		4,33		3,00		3,00
4 Deckel- Manipulation	0,03			1,67		1,67	0,03			0,17		0,17
5 Behälter- Manipulation	0,03			0,33		0,33	0,03			0,33		0,33
6 Etikettieren	0,03			0,05		0,05	0,03		0,16			0,05
Taktzeit [min.] / Behälter	15,67		24,25		13,59		21,22		15,80		15,69	

Tabelle 10: Taktzeitergebnisse für ausgewählte Systemvarianten des Verpackprozesses

Die Auswirkungen auf das Layout der Verpackstation in Abhängigkeit der Aufgabenteilung zwischen den einzelnen Ressourcen wurde bereits in Abbildung 41 gezeigt. Durch neue Aufgabenteilungen müssen einzelne Stationselemente aufgrund von Zugänglichkeiten meist neu angeordnet werden. Auch ergeben sich durch Sicherheitsaspekte im Rahmen von kollaborationsfähigen Arbeitssystemen bestimmte Gestaltungsrichtlinien, die das Layout gegebenenfalls beeinflussen können. Durch die Änderung des Layouts ergeben sich vor allem auch andere Wege, die bei der Tätigkeitsausführung zurückgelegt werden müssen, was wiederum die Ausführungszeit für eine bestimmte Tätigkeit beeinflusst.

Die Unterschiede in den Taktzeiten resultieren demnach neben den unterschiedlichen Ressourceneigenschaften, i. e. Menschen mit unterschiedlichen Diversitäten und Roboter mit unterschiedlichen Sicherheitsmodi, auch durch die unterschiedlichen Aufgabenteilungen. Durch die Aufgabenteilungen ergeben sich allerdings nicht nur andere Wege, die bei der Prozessausführung zurückgelegt werden müssen, sondern auch andere zeitliche und örtliche Beziehungen der einzelnen Ressourcen während der Prozessausführung, die je nach eingestelltem Sicherheitsmodus, das Bewegungsverhalten einer Ressource ebenfalls beeinflussen können.

Abbildung 44 zeigt die Taktzeitergebnisse aller 68 Systemvarianten der kollaborationsfähigen Verpackstation – mit unterschiedlichen Aufgabenteilungen, unterschiedlichen Bedienpersonen und unterschiedlichen Sicherheitsmodi des Roboters. Die Taktzeiten gehen von einer minimalen Taktzeit von 8,58 min. bis zu einer maximalen Taktzeit von 33,12 min., was eine durchschnittliche Taktzeit von 20,85 min. \pm 12,27 min. ergibt und einer Streuung von knapp \pm 60 % entspricht. Im Durchschnitt ergab sich über alle 68 Systemvarianten eine Taktzeit von 19,18 min. mit einer Standardabweichung von 5,41 min. (28 %).

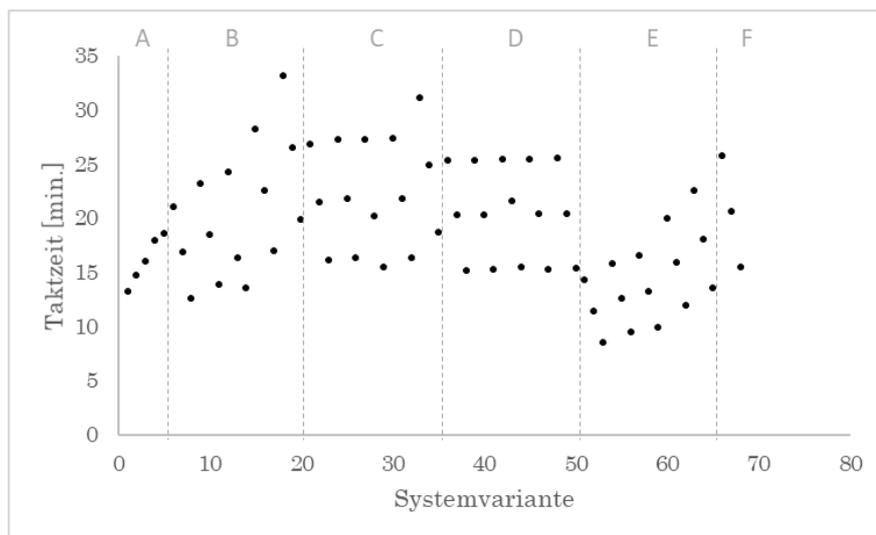


Abbildung 44: Taktzeitergebnisse aller Systemvarianten der kollaborationsfähigen Verpackstation



Abbildung 45: Industriell implementiertes Arbeitssystem zur Platinenverpackung

Die Modellvalidierung erfolgte exemplarisch auf Basis eines Vergleichs der Simulationsergebnisse mit drei realen Systemvarianten, i. e. der rein manuellen Variante, der rein automatisierten Variante sowie der Variante mit der Aufgabenteilung E und dem Sicherheitsmodus der Leistungs- und Kraftbegrenzung für den Roboter. Letztere wurde schließlich auch in der Produktion eines Unternehmens der Elektronikindustrie umgesetzt (siehe dazu Abbildung 45). Die Simulationsergebnisse der Taktzeitermittlung stimmten mit den realen Taktzeitwerten mit einer Genauigkeit bis zu $\pm 5,33\%$ überein (Tabelle 11).

	Variante 1		Variante 5		Variante 6	
	Modell	Realität	Modell	Realität	Modell	Realität
Taktzeit [min] / Behälter	15,67	16,20	15,80	15,00	15,69	15,28
Differenz	3,27 %		5,33 %		2,68 %	

Tabelle 11: Taktzeitvergleich zwischen Modell und Realität

Um die Komplexität der wechselseitigen Beeinflussung von taktzeitbestimmenden Systemparametern darzustellen, wird ein so genannter multidimensionaler Modifikationsraum mit Parallelkoordinaten auf Basis von Wegman (1990) eingeführt (siehe Abbildung 46). Neben der Lesbarkeit dieser mehrdimensionalen Darstellungsform, liegt ein weiterer Vorteil der Darstellung mit Parallelkoordinaten darin, dass relevante taktzeitbestimmende Faktoren einfach reduziert oder erweitert werden können (durch Löschen oder Hinzufügen von parallelen Koordinaten und ihren entsprechenden Ausprägungen).

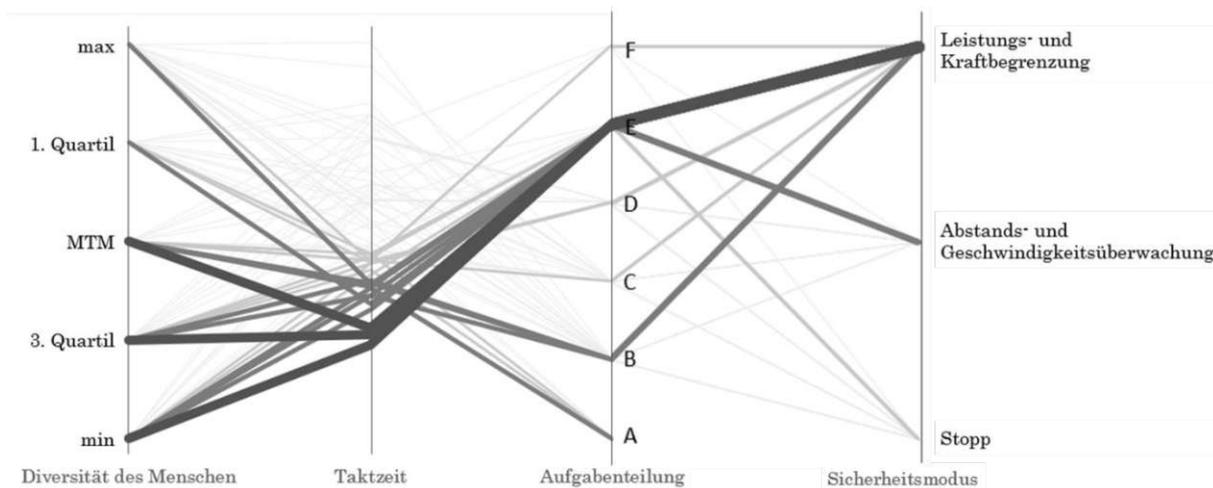


Abbildung 46: Darstellung taktzeitbestimmender Parameter in einem mehrdimensionalen Modifikationsraum

Im multidimensionalen Modifikationsraum mit Parallelkoordinaten werden also die taktzeitbestimmenden Parameter als parallele Koordinaten mit ihren jeweiligen Ausprägungen angeführt. Hierbei stellt jede parallele Koordinate eine Dimension im Lösungsraum dar und damit einen taktzeitbestimmenden Parameter im kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem. Wählt man nun von jeder Dimension im Raum eine bestimmte Ausprägung, erhält man eine bestimmte Systemvariante des Arbeitssystems. Die Dicke der Linien zwischen den einzelnen Dimensionen und deren Ausprägungen zeigt dabei die Taktzeit der jeweiligen Systemvariante an – je dicker die Linie, desto kürzer die Taktzeit. Auf diese Weise lassen sich auch Systemkonfigurationen bzw. -varianten identifizieren, die zu ähnlichen Taktzeitergebnissen führen. Neben der Streuung der Taktzeit können außerdem kritische Dimensionen für die Taktzeit eines entsprechenden Systems mit gegebenen Modifikationsdimensionen ermittelt werden. Das Fallbeispiel zeigt deutlich, dass die antizipierten modifizierbaren Systemparameter die Taktzeit maßgeblich beeinflussen. In Kombination mit anderen Parametern lassen sich Einflüsse bestimmter Parameter jedoch minimieren. Beispielsweise scheint der Einfluss der Diversität mit einer Aufgabenteilung E sowie dem Sicherheitsmodus der Leistungs- und Kraftbegrenzung reduzierbar zu sein. Auf diese Weise zeigt sich die wechselseitige Beeinflussung einzelner Ausprägungen der Modifikationsdimensionen in der Instanziierung der jeweiligen Systemvariante.

Arbeitssystem mit mehreren Ressourcen

Ähnlich des vorhergehenden Fallbeispiels, wurde im zweiten Fallbeispiel ebenfalls der Platinenverpackprozess herangezogen und um einzelne Prüf- bzw. qualitätssichernde sowie logistische Tätigkeiten erweitert. Außerdem wurde auch die zulässige zu verplanende Anzahl an Ressourcen erhöht. In Abbildung 47 sind beispielhaft drei Systemvarianten gezeigt. Zulässige Ressourcen waren diesmal alle vier der im Rahmen von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen auftretenden Ressourcenarten, Fördersystem, Mobiles System, Robotersystem und Mensch. Systemvarianten reichen demzufolge von rein manuellen, aber starr verketteten Arbeitssystemen (siehe beispielsweise Variante G in Abbildung 47), über teilautomatisierte Arbeitssysteme (Variante H) bis hin zu flexiblen Arbeitssystemen, in denen Orte zur Tätigkeitsausführung flexibel durch die Ressourcen gewählt werden können (Variante I). Dies lässt die Variantenanzahl und damit die möglich zu erzielenden Taktzeiten exponentiell steigen.

Der Verpackprozess umfasst im zweiten Fallbeispiel insgesamt 10 verschiedenen Tätigkeiten, (1) Nutzen-Bereitstellung, (2) Tray-Bereitstellung, (3) Behälter-Bereitstellung, (4) Scannen, (5) Verpacken, (6) Tray-Manipulation, (7) Deckel-Manipulation, (8) Behälter-Manipulation, (9) Behälter-Prüfung und (10) Etikettieren. Tabelle 12 zeigt beispielhaft fünf verschiedene Prinzipien der Aufgabenteilung, bei denen die Aufgaben den entsprechenden Ressourcenarten Mensch (M), Robotersystem (R), Mobiles System (P) und Fördersystem (F) zugeordnet wurden.

		Aufgabenteilung																			
		G				H				I				J				K			
Nr.	Tätigkeit	M	R	P	F	M	R	P	F	M	R	P	F	M	R	P	F	M	R	P	F
1	Nutzen-Bereitstellung	x					x					x		x							x
2	Tray-Bereitstellung	x				x						x		x							x
3	Behälter-Bereitstellung	x					x					x		x							x
4	Scannen	x				x	x			x	x				x						x
5	Verpacken	x				x	x			x	x				x						x
6	Tray-Manipulation	x				x	x			x	x				x						x
7	Deckel-Manipulation	x				x	x			x	x				x						x
8	Behälter-Manipulation				x			x	x			x					x				x
9	Behälter-Prüfung	x				x				x					x						x
10	Etikettieren			x	x							x					x				x

M...Mensch; R...Robotersystem; P...Mobiles System; F...Fördersystem

Tabelle 12: Weitere unterschiedliche Prinzipien der Aufgabenteilung zwischen mehreren Ressourcen zur Ausführung des Verpackprozesses

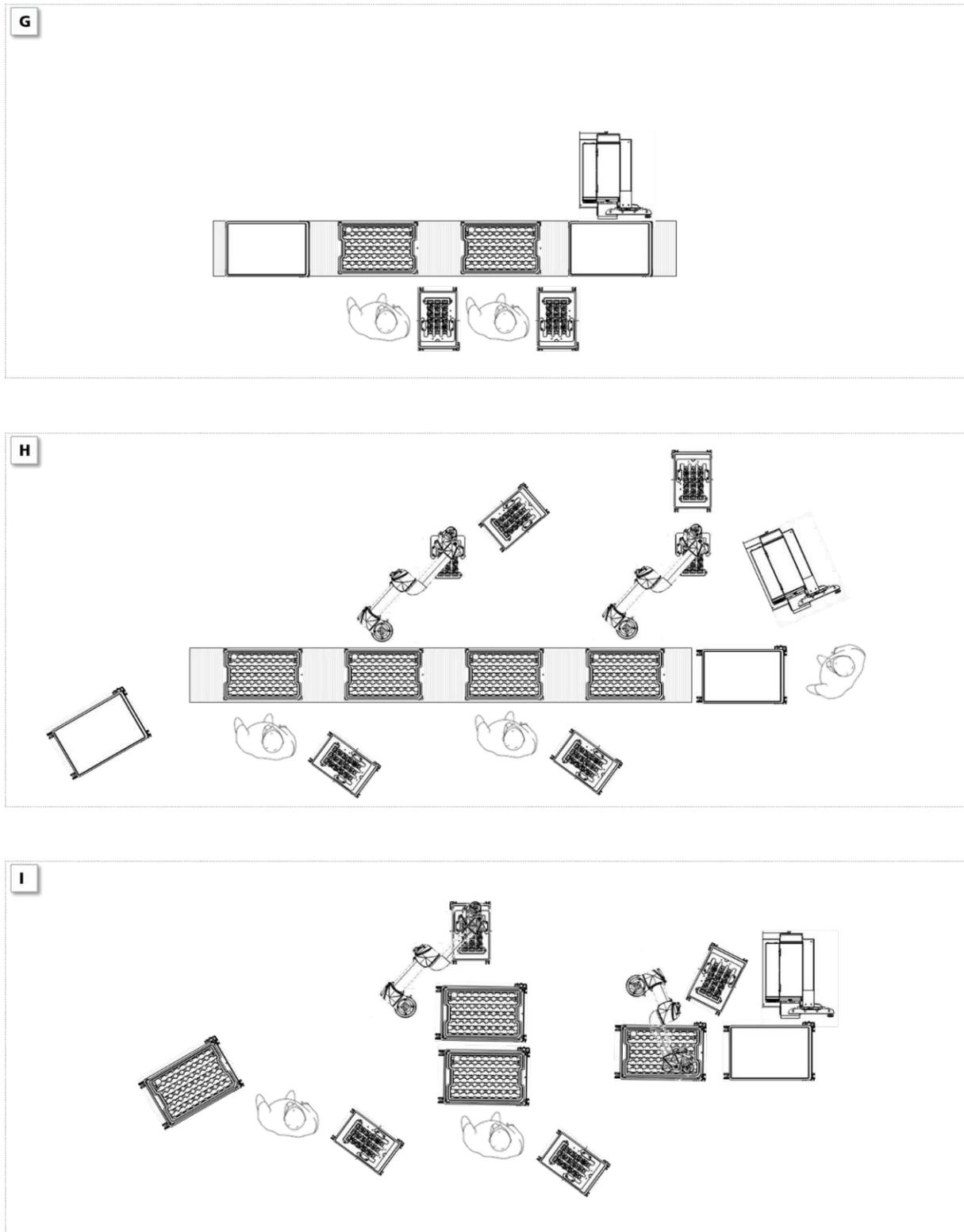


Abbildung 47: Systemvarianten zur Platinenverpackung mit mehreren Ressourcen in Abhängigkeit unterschiedlich geforderter Automatisierungs- und Flexibilitätsgrade

Neben fünf verschiedene Personengruppen mit unterschiedlichen Leistungsfaktoren und einem Robotersystem sowie einem Mobil System mit drei verschiedenen Sicherheitsmodi, wurde außerdem ein Fördersystem mit einer definierten Vorschubgeschwindigkeit als planbare Ressourcen vorgesehen. Zudem wurden für die jeweiligen Ressourcen zwei unterschiedliche Ausfallraten betrachtet, wobei die Anzahl an repräsentierten Ressourcenarten innerhalb eines zu planenden Arbeitssystems ebenfalls begrenzt war. Hinzu kommt, dass zwei Gestaltungsvarianten des Arbeitssystems definiert wurden. Tabelle 13 gibt eine Übersicht der einzelnen taktzeitbestimmenden Parameter (i. e. Modifikationsdimensionen) mit ihren jeweiligen Ausprägungsformen für das zweite Fallbeispiel.

		Ausprägungen				
		Sicherheitsbewerteter überwachter Halt		Abstands- und Geschwindigkeitsüberwachung		Leistungs- und Kraftbegrenzung
Taktzeitbestimmende Parameter	Sicherheitsmodus					
	Diversität	min.	3. Quartil	MTM	1. Quartil	max.
	Arbeitssystemgestaltung	Abstand zw. Ressourcen: mind. 500 mm			Abstand zw. Ressourcen: mind. 1.000 mm	
	Systemdynamik	max. Ressourcenanzahl pro Typ: 2		max. Ressourcenanzahl pro Typ: 3		max. Ressourcenanzahl pro Typ: 5
	Zuverlässigkeit	90 %			80 %	
	Aufgabenteilung	G	H	I	J	K

Tabelle 13: Taktzeitbestimmende Parameter und deren Ausprägungen für das zweite Fallbeispiel in der Darstellung eines morphologischen Kastens

Aus den jeweiligen Ausprägungen der gelisteten taktzeitbestimmenden Parameter bzw. Modifikationsdimensionen ergeben sich somit $3 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 5 = 900$ theoretische und 588 zulässige Systemvarianten, da gemäß erstem Fallbeispiel Ausprägungen maschinenspezifischer Parameter in einer rein manuellen Aufgabenteilung irrelevant sind und vice versa.

Auch hier wurden die Taktzeiten der 588 unterschiedlichen Systemvarianten mithilfe des hybriden Taktzeitmodells ermittelt. Die Taktzeitergebnisse sind in Abbildung 48 dargestellt und ergeben eine minimale Taktzeit von 18,05 min. sowie eine maximale Taktzeit von 39,85 min., was einer durchschnittlichen Taktzeit von 28,95 min. \pm 10,90 min. und einer Streuung von knapp \pm 38 % entspricht. Im Durchschnitt ergab sich über alle 588 Systemvarianten eine Taktzeit von 27,86 min. mit einer Standardabweichung von 5,38 min. (19 %).

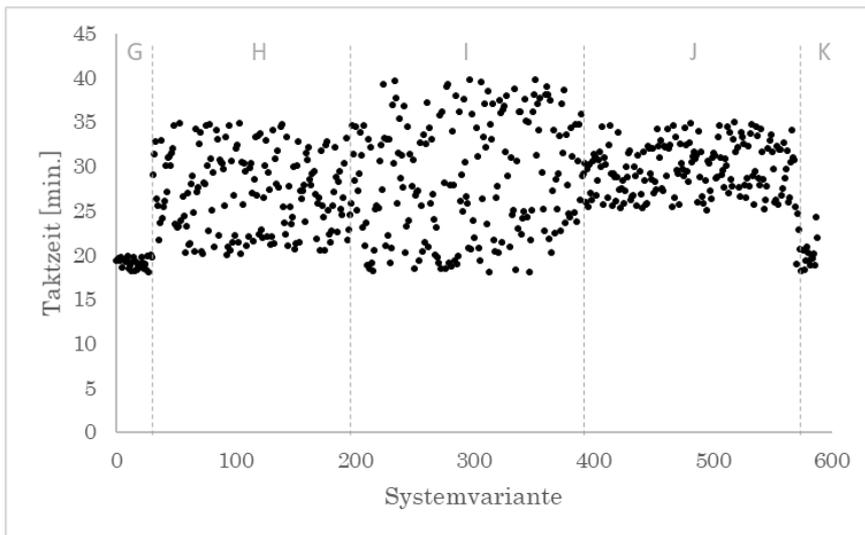


Abbildung 48: Taktzeitergebnisse der Systemvarianten aus dem zweiten Fallbeispiel für das kollaborationsfähige Arbeitssystem zur Platinenverpackung

Im mehrdimensionalen Modifikationsraum dargestellt, zeigen die Taktzeitergebnisse trotz starker Varianz, dass sich durch bestimmte Kombinationen instanzierter Systemparameter dennoch auch geringe Taktzeiten erzielen lassen – und dies unabhängig der Ausprägung eines bestimmten Parameters. Im Gegensatz zum ersten Fallbeispiel kann beispielsweise der Sicherheitsmodus sicherheitsbewerteter überwachter Halt durch eine bestimmte Kombination anderer Systemparameter dennoch auch zu geringen Taktzeiten führen. Der vermeintlich negative Einfluss dieses Sicherheitsmodus kann demnach durch eine entsprechende Parametrisierung bzw. Auslegung des Arbeitssystems ausgehebelt werden. Auffällig ist jedoch, dass Streuungen innerhalb bestimmter Aufgabenteilungsmuster größer scheinen, wenn mehr unterschiedliche Ressourcenarten im System betrachtet werden. Während bei der Aufgabenteilung G und K jeweils nur 2 Ressourcenarten Teil des Systems sind, sind es bei den Aufgabenteilungen H, I und J drei oder vier.

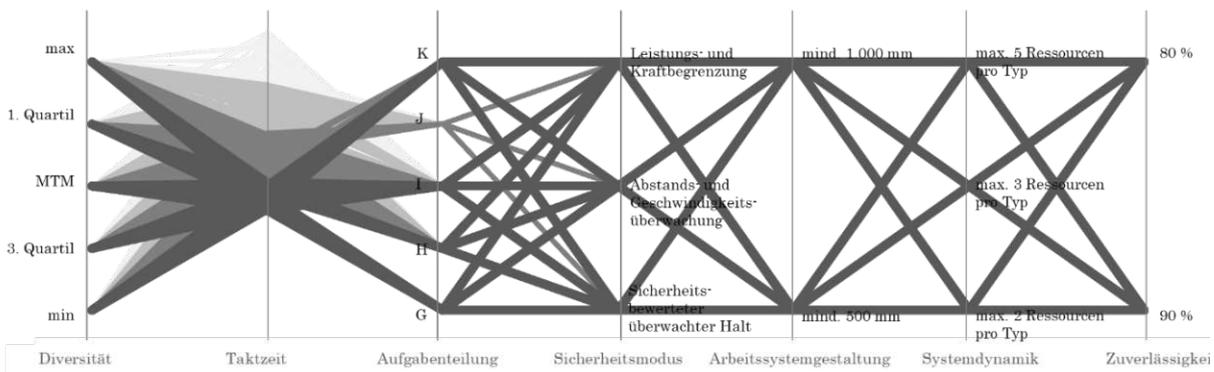


Abbildung 49: Darstellung taktzeitbestimmender Parameter im zweiten Fallbeispiel

6.2 Modellverifikation und Ergebnisdiskussion

Die Verifikation des Taktzeitmodells dient zur Absicherung der technischen Funktionalität in Hinblick auf die in Kapitel 5 definierten Anforderungen sowie auf Basis der Anwendbarkeit auf definierte Fallbeispiele. Das Modell zur Taktzeitermittlung wurde an zwei Fallbeispielen mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen bzw. Charakteristika angewendet (siehe Tabelle 14).

Charakteristika		Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2
Anzahl an Tätigkeiten		6	10
Anzahl an maximal zuordenbaren Ressourcen	Menschen	1	5
	Fördersysteme	-	5
	Mobilen Systeme	-	5
	Robotersysteme	1	5
Anzahl an Ausprägungen taktzeitbestimmender Parameter	Sicherheitsmodus	3	3
	Diversität	5	5
	Arbeitssystemgestaltung	-	2
	Systemdynamik	-	3
	Zuverlässigkeit	-	2
	Aufgabenteilung	6	5
Anzahl an theoretisch möglichen Systemvarianten		90	900
Anzahl an zulässigen Systemvarianten		68	588

Tabelle 14: Charakteristika der präsentierten Fallbeispiele

Im Folgenden werden die in Kapitel 5 definierten Anforderungen nochmals aufgezeigt und diskutiert:

Anforderung 1 – Ganzheitlichkeit. Das Taktzeitmodell betrachtet unterschiedliche Ressourcen in einem kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem.

Durch den modularen Aufbau des Taktzeitmodells unter Anwendung des hybriden DEV&DESS-Modellansatzes und der damit verbundenen Instanziierung einzelner Ressourcen als individuelle DEV&DESS-Modellblöcke, kann eine gemeinsame Betrachtung der Prozessausführung von Menschen und Maschinen erfolgen. Anforderung 1 ist somit erfüllt.

Anforderung 2 – Dynamik. Das Taktzeitmodell betrachtet die wechselseitige Beeinflussung der zu planenden Ressourcen während der Tätigkeitsausführung.

Durch den hybriden DEV&DESS-Modellansatz und der damit verbundenen Möglichkeit, diskrete Modellanteile durch kontinuierliche Modellanteile anderer Modellinstanzen zu beeinflussen, kann eine Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung von menschlichen und maschinellen Faktoren während der kollaborativen Arbeitsausführung erfolgen. Anforderung 2 ist somit erfüllt.

Anforderung 3 – Mehrdimensionalität. Das Taktzeitmodell betrachtet mehrere taktzeitbeeinflussende Parameter gleichzeitig.

Durch die Definition eines DEV&DESS-Modellblocks und der damit verbundenen Definition mehrerer inhärenter oder durch externe Faktoren beeinflusste Systemzustände, kann eine gleichzeitige Berücksichtigung von mehreren taktzeitbestimmenden Systemparametern erfolgen. Hinzu kommt, dass durch ein zusätzliches Optimierungsmodell eine mehrdimensionale Formulierung des Taktzeitproblems erfolgen kann. Anforderung 3 ist somit erfüllt.

Anforderung 4 – Skalierbarkeit. Das Taktzeitmodell ist entsprechend der Anzahl an zu betrachtenden Ressourcen sowie der Ausprägungsformen taktzeitbestimmender Parameter skalierbar.

Durch die objektorientierte Beschreibung des hybriden Systemmodells, können einzelne Ressourcen beliebig gemäß ihren entsprechenden Eigenschaften instanziiert werden. Allgemein sei angemerkt, dass sich eine unterschiedliche Anzahl an theoretisch möglichen Systemvarianten und damit eine unterschiedliche Komplexität in der Auslegung der entsprechenden kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssysteme auf Basis der unterschiedlichen Anzahl maximal möglicher und zuordenbarer Ressourcen sowie der unterschiedlichen Anzahl an Ausprägungen taktzeitbestimmender Parameter ergibt. Anforderung 4 ist somit erfüllt.

Anforderung 5 – Angemessenheit. Die Angemessenheit des Taktzeitmodells zeigte sich im Vergleich zu den ermittelten Taktzeitergebnissen von realen Systemaufbauten.

Es kann festgehalten werden, dass das Taktzeitmodell in beiden Fallstudien zur Ermittlung der Taktzeiten in unterschiedlichen Systemvarianten herangezogen werden konnte und somit einen Beitrag zur Planung bzw. Ausgestaltung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen leistet, da es zur Transparenz hinsichtlich der wechselseitigen Beeinflussung einzelner Ressourcen bei der Tätigkeitsausführung auf Basis definierter taktzeitbestimmender Systemparameter beiträgt. Anforderung 5 ist somit erfüllt.

Anforderung 6 – Visualisierung und Nachvollziehbarkeit. Das Taktzeitmodell ermöglicht die Visualisierung der Taktzeitergebnisse.

Durch die Visualisierung auf Basis eines multidimensionalen Modifikationsraums mit Parallelkoordinaten, können Ergebnisse zur Taktzeitermittlung dargestellt sowie taktzeitbestimmende Parameter identifiziert werden. Damit lassen sich auch Gestaltungsrichtlinien für die Auslegung eines geplanten kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems ableiten. Anforderung 6 ist somit erfüllt.

Das in dieser Arbeit entwickelte und vorgestellte Taktzeitmodell für kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme erweitert bestehende Taktzeitermittlungsmethoden um folgende Aspekte:

- **Abbildung von Fehlbläufen bzw. Fehlverhalten sowie die Modellierung menschlichen Verhaltens:** Durch die Instanziierung bzw. Parametrisierung einzelner Ressourcenmodelle, kann auch ein entsprechendes Fehlverhalten sowie psychophysiologische Eigenschaften modelliert werden (beispielsweise im Sinne von Ausfallzeiten oder veränderter Leistungsgrade entsprechend einer zeitabhängigen Funktion).
- **Modellierung von Tätigkeiten an bewegten Objekten:** Die Modellierung von Ressourcen als einzelne hybride Modelle, die den jeweiligen Zustand der anderen Ressourcen als Eingang berücksichtigen, ermöglicht auch die Modellierung einer synchronen Bewegung an bewegten Objekten.
- **Integriertes Datenmanagement:** Das Taktzeitmodell ist grundsätzlich so definiert, dass es als mathematisches Modell in bestehende (kommerzielle) Simulationswerkzeuge eingebettet werden kann, um eine ganzheitliche Modellierung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unter der Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung einzelner Ressourcen zu ermöglichen.
- **Kombination unterschiedlicher Zielsetzungen einzelner Planungsvorgehen:** Durch den hybriden Modellcharakter können nun sowohl maschinen- als auch menschenzentrierte Planungsziele aus der Arbeitsplatzgestaltung ganzheitlich berücksichtigt werden.
- **Dynamische Anpassung des ressourcenspezifischen Bewegungsverhaltens:** Durch die Modellierung von Ressourcen als einzelne hybride Modelle, die den jeweiligen Zustand der anderen Ressourcen als Eingang berücksichtigen, kann auch das Ressourcenverhalten dynamisch bzw. adaptiv variiert werden.

6.3 Modellvalidierung und Ergebnisverwertung

Neben der Modellverifikation dient die Modellvalidierung der Prüfung, ob Nutzungsziele des dargestellten Taktzeitmodells im Sinne einer Taktzeitermittlung sowie Transparenzerhöhung taktzeitbestimmender Parameter in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen erreicht werden. Im Sinne dieses Anforderungsabgleichs wird also geprüft, ob potenzielle Anwenderinnen und Anwender im Kontext der Planung und Auslegung von kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen, die durch die unterschiedlichen Arbeitssystemvarianten erzielten Taktzeiten miteinander vergleichen können. Die Modellanwendung auf zwei unterschiedliche Fallstudien hat gezeigt, dass Taktzeiten für unterschiedliche Ausprägungsformen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems zur Durchführung eines definierten Prozesses ermittelt werden können. Durch das Taktzeitmodell mit der Visualisierung der Taktzeitergebnisse auf Basis eines multidimensionalen Modifikationsraums mit Parallelkoordinaten ist allerdings nicht nur ein Taktzeitvergleich möglich, sondern auch die Bestimmung taktzeitbeeinflussender Parameter für das jeweilig zu planende Arbeitssystem.

Im direkten Vergleich der beiden Fallstudien, lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

- **Die Genauigkeit der ermittelten Taktzeit ist abhängig von der Güte der implementierten Modellelemente.**
Die Eigenschaften der instanziierten Ressourcen werden durch Bewegungsgleichungen bzw. mathematische Modelle beschrieben, die gemäß neuen Erkenntnissen beliebig austauschbar oder erweiterbar sind. Obwohl die absolute Genauigkeit der ermittelten Taktzeit dementsprechend mit der Modellierungsgenauigkeit dieser Eigenschaften einhergeht, ist dennoch ein relativer Vergleich der unterschiedlichen Systemvarianten möglich, der ebenso zumindest zum Systemverständnis der wechselseitigen Beeinflussung taktzeitbestimmender Parameter beiträgt.
- **Das Taktzeitmodell trägt zum Systemverständnis in der Auslegung von Mensch-Maschinen-Arbeitssystemen bei.**
Durch die gemeinsame Betrachtung von Menschen und Maschinen in einem einzigen Simulationsmodell sowie durch die Definition von anwendungsseitig zu berücksichtigenden Systemparametern – und damit taktzeitbestimmenden Parametern –, wird der Vergleich verschiedener Systemvarianten ermöglicht, die die wechselseitige Beeinflussung einzelner Ressourcen aufgrund der zeitlichen und örtlichen Nähe bei der Tätigkeitsausführung zeigen.
- **Die korrekte Interpretation der Taktzeitergebnisse zur Auslegung des geplanten Mensch-Maschine-Arbeitssystems sollte auch unter Berücksichtigung weiterer wirtschaftlicher Faktoren erfolgen.**

Durch den direkten Vergleich unterschiedlicher Systemvarianten erfolgt eine direkte Beurteilung der erzielten Taktzeit. Taktzeit ist allerdings nur eine ökonomische Zielvariable, die beispielsweise neben Anschaffungs- und Betriebskosten, Auslastung, Anpassungsfähigkeit, Platzbedarf etc. zur Beurteilung einer Investition anwendungsseitig herangezogen werden kann. Weitere Zielvariablen können allerdings in der Formulierung der Zielfunktion im Rahmen eines zusätzlich implementierten Optimierers berücksichtigt werden.

Neben der Absicherung der technischen Funktionalität des vorgestellten Taktzeitmodells, erfordert die Ergebnisdiskussion auch eine wirtschaftliche Betrachtung der erzielten Ergebnisse, um die industrielle Anwendbarkeit zu rechtfertigen. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der erzielten Ergebnisse im Sinne einer Ergebnisverwertung, dienen ökonomische Faktoren der Arbeitssystemimplementierung. Systemvarianten werden demnach nicht nur auf Basis der erzielten Taktzeit miteinander verglichen, sondern auch in Hinblick ökonomischer Zielvariablen. Die Gewichtung von Taktzeit und monetären Faktoren kann dabei entweder individuell je Unternehmen bzw. Kunde mittels Gewichtungsfaktoren definiert oder unabhängig einer Gewichtung mittels Pareto-Analyse auf Basis von Pareto-Optima ermittelt werden. Für die durchgängige Beurteilung einzelner Investitionsoptionen fließen also anhand definierter Randbedingungen und Annahmen entsprechende Kostenrechnungen in ein gegebenenfalls folgendes Optimierungsmodell mit ein. Darauf basierend erfolgt die Gegenüberstellung der jeweilig erzielten Taktzeit mit der entsprechenden wirtschaftlichen Kennzahl einer einzelnen Systemvariante als Indikatoren für einen effektiven Kapitaleinsatz.

Im ersten Fallbeispiel hätte eine Vollautomatisierung zu einer geringeren Taktzeit im Vergleich zu den semi-automatischen Systemvarianten geführt. Die Investitionskosten für eine Vollautomatisierung standen allerdings in keinem wirtschaftlichen Verhältnis dazu. Angenommen eine Person kostet dem Unternehmen EUR 43.990 pro Jahr für den Verpackprozess, ein Robotersystem ohne vollautomatisches Etikettiersystem EUR 80.000 und ein vollautomatisches Verpacksystem EUR 160.000. Bei einer Soll-Jahreserbringungsmenge von 2,7 Mio. Stück im Rahmen eines Dreischichtbetriebs, einer Produktrestlaufzeit von 4 Jahren sowie bei jährlichen Maschinenbetriebskosten von 4 %, würden sich bei einer kollaborationsfähigen Arbeitssystemgestaltung Prozesskosten von EUR 0,06 pro Stück, bei einer manuellen Arbeitsausführung EUR 0,05 pro Stück und bei einem vollautomatischen Betrieb EUR 0,02 pro Stück ergeben. Die kollaborationsfähige und somit hybride Mensch-Maschine-Arbeitssystemgestaltung schneidet hier vergleichsweise schlecht ab, da die Personalkosten im vollen Ausmaß dem Arbeitssystem zugerechnet wurden. Werden in einem kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystem die Aufgaben jedoch geteilt, können die Personalkosten auch nur gemäß des anteiligen Prozessaufwands berücksichtigt werden (da die Person auch an anderen Arbeitssystemen eine wertschöpfende Tätigkeit erbringen kann). Durch die anteilige Berücksichtigung der Personalkosten gemäß dem jeweiligen Anteil am Prozess, ergeben sich somit unterschiedliche Kostenfunktionen für verschiedene Ausprägungsformen eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems (siehe dazu auch Abbildung 50).

Während die volle Zurechnung der Personalkosten (c_1) oder eine 40%-ige Zurechnung der Personalkosten (c_3) an einer kollaborativen Systemvariante weniger wirtschaftlich erscheinen als die vollautomatische Systemvariante (a), ermöglicht eine Aufgabenteilung, in der der Mensch nur 10 % der Arbeitsleistung übernimmt eine wirtschaftliche Alternative (c_2). Obwohl Teilautomatisierung oftmals ein Hindernis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Arbeitssystemvarianten zu sein scheint, sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine Transparenz in Bezug auf anteilige Arbeitsleistungen von Ressourcen – insbesondere der anteiligen manuellen Ausführungszeit an der Gesamtprozesszeit – die Basis für eine effektivere Ressourceneinsatzplanung sein kann oder auch ein Outsourcing von manuellen Teilprozessen wirtschaftlich argumentier machen kann.

Neben monetären Faktoren spielen also auch Faktoren wie Auslastungsgrad (der Maschine als auch des Menschen) eine Rolle. Hinzu kommen Faktoren wie Platzbedarf der Anlage oder die Komplexität der Implementierung bzw. die Anpassungsfähigkeit der Anlage auf neue Produktvarianten. In Abhängigkeit der Bedeutung dieser Faktoren für einzelne Unternehmen sind Zielfunktionen anders zu formulieren bzw. Zielfaktoren anders zu bewerten bzw. zu gewichten, wodurch sich ein Variantenvergleich auf Basis von Nutzwertanalysen oder multikriterieller Optimierungsverfahren realisieren lässt.

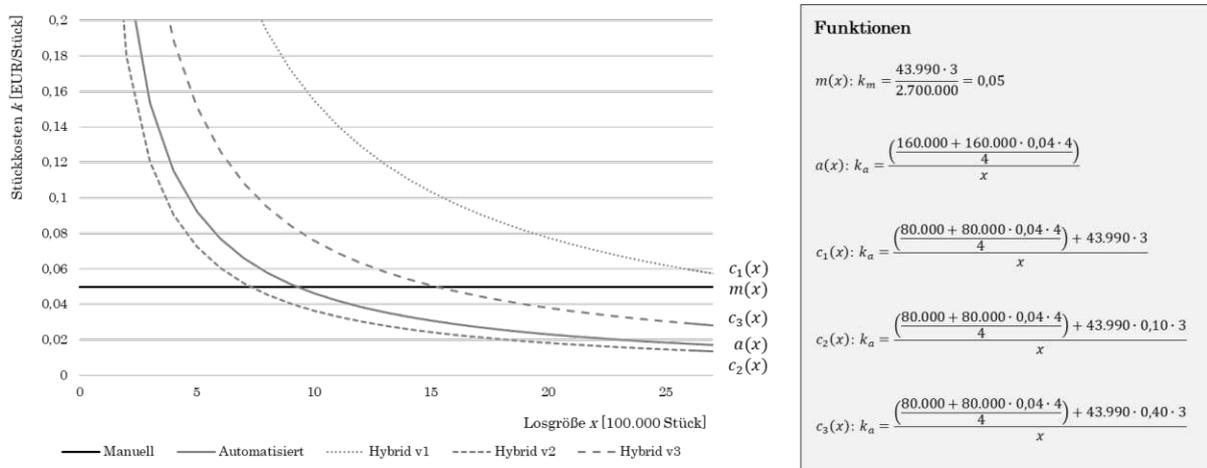


Abbildung 50: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Systemvarianten des Verpacksystems

6.4 Potenzialbetrachtung und weiterer Forschungsbedarf

Gemäß der steigenden Komplexität durch die wechselseitige Beeinflussung von Ressourcen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und der daraus implizit erschwerten Taktzeitermittlung, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Modell zur

Taktzeitermittlung von Prozessen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen entwickelt und vorgestellt. Das Modell richtet sich an Systemintegratoren oder produzierende Unternehmen, die kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme als Enabler für flexible Produktionskonzepte betrachten.

Das entwickelte Taktzeitmodell adressiert die identifizierten Herausforderungen in der Ermittlung von Taktzeiten in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen unter der Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung einzelner Ressourcen bei der Arbeitsausführung. Neben einem allgemeinen Vorgehen wird durch das modulare Modellkonzept eine Erweiterbarkeit sowie Integration in bestehende Planungswerkzeuge gewährleistet. Trotz des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Modells zur Taktzeitermittlung von Prozessen in kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystemen und der damit verbundenen Beantwortung der in Kapitel 4 formulierten Forschungsfragen hinsichtlich einer anwendbaren und ganzheitlichen Methode zur Taktzeitermittlung, der identifizierten taktzeitbeeinflussenden Systemparameter sowie einer möglichen optimierten Systemparametrisierung hinsichtlich vordefinierter Zielvariablen, bleibt weiterer Forschungsbedarf. Zukünftige Forschungsaktivitäten könnten Folgendes adressieren:

1. Relevanzermittlung taktzeitbestimmender Systemparameter

Die in dieser Arbeit definierten taktzeitbeeinflussenden Parameter wurde nicht hinsichtlich ihrer Relevanz bzw. der Größe ihres Einflusses auf die Taktzeit oder anderer Zielvariablen evaluiert. Es besteht auch die Frage, ob die Relevanz von der Zielvariable abhängt. Zudem kann es auch weitere taktzeitbeeinflussende Parameter geben, die in zukünftigen Forschungsaktivitäten ermittelt werden.

2. Entwicklung von Prozesszeitbausteinen für flexible Produktionssysteme

Im Rahmen von flexiblen Produktionssystemen sind hohe Stückzahlen zur Erzielung einer geübten manuellen Tätigkeit im Sinne einer konstanten Ausführungszeit bestimmter Tätigkeiten nicht mehr zwangsläufig gegeben. Hinzu kommt, dass ggf. auch Maschinen keine konstanten Ausführungszeiten in diesen Produktionssystemen erbringen, da sich aufgrund von veränderten Prozessbedingungen ggf. Bewegungspfade ändern. Bisherige Planzeitmodelle, wie beispielsweise MTM, sind daher nicht mehr anwendbar. Die Frage ist jedoch, ob es neben einem simulationsbasierten Ansatz (so wie in dieser Arbeit vorgestellt) nicht auch doch eine Methode auf Basis von vordefinierten Prozesszeitbausteinen für flexible Produktionssysteme geben kann.

3. Implementierung des vorgestellten Taktzeitmodells in eine bestehende Simulationsumgebung und Anbindung an eine Optimierungsfunktion

Die durch das Taktzeitmodell ermittelte Prozesszeitmatrix könnte als Input für ein Optimierungsmodell verwendet werden, das die Ressourcen- bzw. Tätigkeitszuordnung auf Basis der Ressourceneigenschaften und der entsprechenden Zwangsbedingungen so

wählt, dass eine minimale Taktzeit oder die Erreichung einer multikriteriellen Zielfunktion erreicht wird. Der Optimierer kann dann entscheiden, inwiefern taktzeitbestimmende Parameter geändert werden sollen, um eine geringere Taktzeit bzw. Zielfunktion zu erreichen. Die taktzeitbestimmenden Parameter können dabei nur im Rahmen ihrer Grenzbereiche variiert werden. Eine Modellarchitektur zur Integration des Taktzeitmodells in ein Optimierungsmodell ist in Abbildung 51 beispielhaft gezeigt. Ausgehend davon kann folglich eine optimale Instanziierung von taktzeitbeeinflussenden Systemparametern bestimmt werden, die innerhalb eines Arbeitssystems unter Berücksichtigung von spezifischen Systemgrenzen zu einer minimalen (optimalen) Taktzeit führt. Außerdem ermöglicht der modulare und sequenzielle Aufbau von Simulations- und Optimierungsmodell eine Analyse im Sinne von Pareto-Optima, was vor allem die Auswirkungen bestimmter taktzeitbeeinflussender Parameter auf bestimmte Zielfunktionsbereiche analysieren lässt.

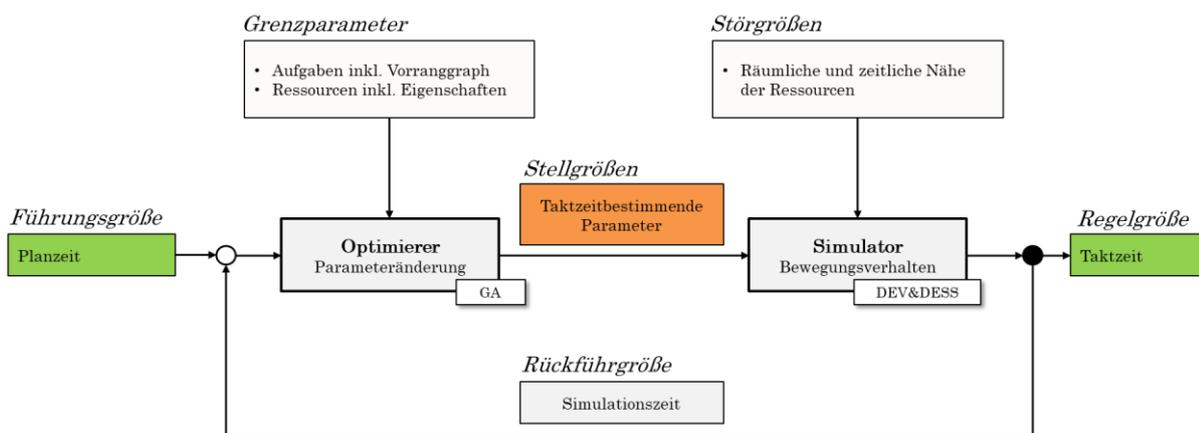


Abbildung 51: Modellarchitektur eines Optimierungsmodells in Verbindung mit dem entwickelten Taktzeitmodell zur Ermittlung von optimalen Systemparametern für die Erreichung definierter Zielfunktionsbereiche im Rahmen der Auslegung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems

Symbol- und Variablenverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
a_r	Beschleunigung einer Ressource r
b_r	Anzahl an holonomen Bindungen einer Ressource r
d_g	Greifabstand
d_h	Mindestabstand zwischen Menschen und anderen Ressourcen bei der Annäherung
d_l	Abstand zwischen den Laserstrahlen eines Lichtvorhangs
d_m	Mindestabstand zwischen maschinellen Ressourcen bei der Annäherung
d_s	Mindestabstand zwischen Menschen und Sicherheitselementen
E_τ	Eigenschaften einer Tätigkeit τ
f_r	Anzahl an Freiheitsgraden einer Ressource r
h	Höhe des Schutzfeldes
h_w	Höhe der Arbeitstätigkeit
h_{\min}	Minimale Höhe der Arbeitstätigkeit
h_{\max}	Maximale Höhe der Arbeitstätigkeit
k	Starrer Körper einer Ressource r
k_r	Anzahl an starren Körpern einer Ressource r
l	Anzahl an Ressourcen aus der Menge der unterschiedlichen Ressourcen
m	Anzahl an Tätigkeiten zur Durchführung eines Prozesses
n	Anzahl an maximal verfügbaren Ressourcen zur Durchführung eines Prozesses
p_r	Ortsvektor einer Ressource r
p_{rk}	Ortsvektor des k -ten starren Körpers einer Ressource r
p_τ	Ortsvektor des Ausführungsorts einer Tätigkeit τ
q_r	Minimalkoordinaten einer Ressource r
r	Ressource

Zeichen	Bedeutung
$\hat{\mathbf{r}}_r$	Lagegrößen aller k_r starren Körper einer Ressource r
\mathbf{r}_{rk}	Rotatorische Lagegrößen des k -ten starren Körpers einer Ressource r
$\hat{\mathbf{r}}_{rk}$	Lagevektor des k -ten starren Körpers einer Ressource r
\mathbf{R}	Menge an Ressourcen
s_r	Zurückgelegter Weg einer Ressource r
$\boldsymbol{\tau}$	Menge an Tätigkeiten zur Durchführung eines Prozesses
τ	Tätigkeit innerhalb eines Prozesses
t	Taktzeit eines Prozesses
t_b	Beschleunigungszeit
t_e	Einschwingzeit
t_f	Ausfallzeit
t_o	Bewegungszeit
t_p	Bearbeitungszeit
t_r	Schalt- und Rüstzeit
t_s	Nachlaufzeit eines Sicherheitselements
t_τ	Ausführungszeit einer Tätigkeit τ
$t_{\tau r}$	Ausführungszeit einer Tätigkeit τ durch eine Ressource r
t_{vk}	Bewegungszeit mit konstanter Geschwindigkeit
t_w	Wartezeit
t_{MMA}	Taktzeit eines Prozesses innerhalb eines Mensch-Maschine-Arbeitssystems
$\mathbf{T}(t)$	Menge an Ausführungszeiten von Tätigkeiten, die von bestimmten Ressourcen erzielt werden
v_h	Annäherungsgeschwindigkeit des Menschen
v_r	Geschwindigkeit einer Ressource r
\mathbf{v}_r	Geschwindigkeitsvektor einer Ressource r
\mathbf{X}	Ressourcenauswahlmatrix
$x_{\tau r}$	Zuordnungsvariable einer Ressource r zur Tätigkeit τ

Zeichen	Bedeutung
z	Anzahl an unterschiedlichen Ressourcen zur Durchführung eines Prozesses

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirtschaftlichkeit der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit.....	3
Abbildung 2: Kombination der Fähigkeiten von Menschen und Maschinen	3
Abbildung 3: Herausforderungen der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit	4
Abbildung 4: Anzahl der Berichte zur Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) seit 2000...	5
Abbildung 5: Vorgehensweise eines ganzheitlichen Planungsablaufs	7
Abbildung 6: Konventionelle Betrachtung des Zusammenhangs	9
Abbildung 7: Gliederung der vorliegenden Arbeit.....	10
Abbildung 8: Mensch-Roboter-Kollaboration.....	13
Abbildung 9: Taktzeit als Zusammensetzung aller Ausführungszeiten,	15
Abbildung 10: Bestandteile einzelner Ausführungszeiten.....	16
Abbildung 11: Berücksichtigung taktzeitbestimmender Ausführungszeiten	18
Abbildung 12: Kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem	21
Abbildung 13: Planungsrelevante Eigenschaften.....	23
Abbildung 14: Betrachtete kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssysteme	24
Abbildung 15: Taktzeitermittlung maschineller Arbeit.....	27
Abbildung 16: Taktzeitermittlung manueller Arbeit	28
Abbildung 17: Modellierung von Arbeit auf Basis von Prozesszeitbausteinen.....	29
Abbildung 18: Ganzheitliche Taktzeitermittlung.....	30
Abbildung 19: Beispielhaftes kollaborationsfähiges Mensch-Maschine-Arbeitssystem ..	37
Abbildung 20: Sicherheitsmodi nach ISO/TS 15066:2016.....	38
Abbildung 21: Bewegungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Sicherheitsmodus	40
Abbildung 22: Einfluss des Sicherheitsmodus auf die Taktzeit	41
Abbildung 23: Einfluss der Diversität des Menschen auf die Taktzeit	42
Abbildung 24: Abmessungen eines kollaborativen Arbeitsplatzes	43
Abbildung 25: Einfluss der Arbeitssystemgestaltung auf die Taktzeit.....	46
Abbildung 26: Ressourcen als Mehrkörpersysteme.....	47
Abbildung 27: Orte der Tätigkeitsausführung in Abhängigkeit der Ressourcenart	50
Abbildung 28: Einfluss der Systemdynamik auf die Taktzeit	50
Abbildung 29: Überwachung der Lagekoordinaten.....	51
Abbildung 30: Einfluss der Zuverlässigkeit auf die Taktzeit	53
Abbildung 31: Einfluss der Aufgabenteilung auf die Taktzeit	55
Abbildung 32: Planungsfragen bei der Taktzeitermittlung	61
Abbildung 33: Einflussfaktoren taktzeitbestimmender Systemparameter	66
Abbildung 34: Modellelemente des Taktzeitmodells	67
Abbildung 35: Hybrides DEV&DESS-Modell	69
Abbildung 36: Hybrides Systemmodell einer Ressource (oben);.....	72
Abbildung 37: Beispielhafte Trajektorien eines Ressourcenmodells.....	74
Abbildung 38: Beispielhaftes gekoppeltes Systemmodell	75

Abbildung 39: Taktzeitmodell als hybrides Systemmodell 77

Abbildung 40: Bewegungsmodelle unterschiedlicher Genauigkeit 78

Abbildung 41: Layoutvarianten des Verpackungssystems 84

Abbildung 42: Streuung der Bearbeitungszeiten für einzelne Arbeitstätigkeiten 85

Abbildung 43: Exemplarische Auswahl theoretisch möglicher Systemvarianten 86

Abbildung 44: Taktzeitergebnisse aller Systemvarianten 88

Abbildung 45: Industriell implementiertes Arbeitssystem zur Platinenverpackung 89

Abbildung 46: Darstellung taktzeitbestimmender Parameter 90

Abbildung 47: Systemvarianten zur Platinenverpackung mit mehreren Ressourcen 92

Abbildung 48: Taktzeitergebnisse der Systemvarianten aus dem zweiten Fallbeispiel.. 94

Abbildung 49: Darstellung taktzeitbestimmender Parameter im zweiten Fallbeispiel... 94

Abbildung 50: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Systemvarianten 100

Abbildung 51: Modellarchitektur eines Optimierungsmodells 102

Abbildung 52: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (1995-2011) 120

Abbildung 53: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (2012-2016) 121

Abbildung 54: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (2017-2021) 122

Abbildung 55: Relevante Forschungsgebiete in der Mensch-Maschine-Kollaboration.. 123

Abbildung 56: Grafische Darstellung der Klasse eines hybriden DEVS-Blocks 126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stufen der Zusammenarbeit zwischen Menschen und Maschinen	20
Tabelle 2: Systematische Bewertung relevanter Publikationen.....	36
Tabelle 3: Kollaborative Tätigkeiten in den entsprechenden Sicherheitsmodi	40
Tabelle 4: Zulässige kollaborative Grenzwerte.....	45
Tabelle 5: Dimension des Lagevektors einzelner Ressourcen.....	48
Tabelle 6: Freiheitsgrade der Kollaborationspartner.....	49
Tabelle 7: Absicherung von nicht-normgerechten Verhaltensweisen	53
Tabelle 8: Planzeit des Verpackprozesses mit rein manueller Tätigkeitsausführung	83
Tabelle 9: Darstellung unterschiedlicher Prinzipien der Aufgabenteilung	83
Tabelle 10: Taktzeitergebnisse für ausgewählte Systemvarianten.....	87
Tabelle 11: Taktzeitvergleich zwischen Modell und Realität	89
Tabelle 12: Weitere unterschiedliche Prinzipien der Aufgabenteilung.....	91
Tabelle 13: Taktzeitbestimmende Parameter und deren Ausprägungen	93
Tabelle 14: Charakteristika der präsentierten Fallbeispiele.....	95

Literaturverzeichnis

ABB Corporate Research 2014, *Industrial Safety Requirements for Collaborative Robots and Applications*, ABB. Verfügbar unter: <https://eu-robotics.net/cms/upload/euRobotics_Forum/ERF2014_presentations/day_2/Industrial_HRC_-_ERF2014.pdf>. [17. Mai 2015].

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. 2013, *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Verfügbar unter: <http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/druck_einzelseiten_290912_Bericht.pdf>. [02. Februar 2017].

Ansari, F., Erol, S. und Sihni, W. 2018, 'Rethinking Human-Machine Learning in Industry 4.0: How does the Paradigm Shift Treat the Role of Human Learning?', *Procedia Manufacturing*, Ausgabe 23, S. 117-122.

Bainbridge, L. 1983, 'Ironies of automation', *Automatica*, Band 19, Ausgabe 6, S. 775-779.

Bänziger, T., Kunz, A. und Wegener, K. 2018, 'Optimizing Human-Robot Task Allocation Using a Simulation Tool Based on Standardized Work Descriptions', *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer.

Barattini, P., Vicentini, F., Singh Virk, G. und Haidegger, T. 2019. *Human-Robot Interaction: Safety, Standardization, and Benchmarking*, Taylor & Francis Group.

Bestick, A. M., Burden, S. A., Willits, G., Naikal, N., Sastry, S. S. und Bajcsy, R. 2015, 'Personalized kinematics for human-robot collaborative manipulation', in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).

Beumelburg, K. 2005, Fähigkeitensorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation, Universität Stuttgart.

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung 2013, *Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Verfügbar unter: <<https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>>. [02. November 2015].

Bokranz, R. und Landau, K. 2012, *Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM*, Schäffer-Poeschel-Verlag, Stuttgart.

Bradshaw, J., Dignum, V., Jonker, C. und Sierhuis, M. 2012, 'Human-agent-robot teamwork', *IEEE Intelligent Systems*, Band 27, Ausgabe 2, S. 8-13.

Brandstötter, M., Komenda, T., Ranz, F., Wedenig, P., Gattringer, H., Kaiser, L., Breitenhuber, G., Schlotzhauer, A., Müller, A. und Hofbaur, M. 2020, 'Versatile Collaborative Robot Applications through Safety-Related Modification Limits', in Advances in Service and Industrial Robotics: Proceedings of the 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), Springer, S. 438-446.

Brecher, C. 2011, *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*, Springer-Verlag, Berlin.

- Chadalavada, R. T., Andreasson, H., Schindler, M., Palm, R. und Lilienthal, A. J.** 2020, 'Bi-directional navigation intent communication using spatial augmented reality and eye-tracking glasses for improved safety in human-robot interaction', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Ausgabe 61.
- Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A., Lasnier, A. und Fraise, P.** 2016, 'Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Band 40, Ausgabe August 2016, S. 1-13.
- Deatcu, C. und Pawletta, T.** 2009, 'Towards Dynamic Structure Hybrid DEVS for Scientific and Technical Computing Environments', *SNE Simulation Notes Europe*, Band 19, Ausgabe 3-4, S. 75-78.
- Deatcu, C. und Pawletta, T.** 2012, 'A Qualitative Comparison of Two Hybrid DEVS Approaches', *SNE Simulation Notes Europe*, Band 22, Ausgabe 1, S. 15-24.
- Dietz, T. und Oberer-Treitz, S.** 2015, 'Mensch-Roboter-Kooperation wirtschaftlich einsetzen', *MM Maschinenmarkt* 16. Juli. Verfügbar unter: <<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/mensch-roboter-kooperation-wirtschaftlich-einsetzen-a-497914/>>. [24. März 2017].
- Dini, A., Murko, C., Yahyanejad, S., Augsdörfer, U., Hofbaur, M. und Paletta, L.** 2017, 'Measurement and prediction of situation awareness in human-robot interaction based on a framework of probabilistic attention', in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Djuric, A.M., Urbanic, R.J. und Rickli, J.L.** 2016, 'A framework for collaborative robot (cobot) integration in advanced manufacturing systems', *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, Band 9, Ausgabe 2, S. 457-464.
- Duffy, V. G.** 2008, *Handbook of Digital Human Modeling. Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Lemmerz, K., Glogowski, P., Kuhlenkötter, B. und Deuse, J.** 2019, 'A Quick-Check to Evaluate Assembly Systems' HRI Potential', in Tagungsband des 4. Kongress Montage Handhabung Industrieroboter, S. 128-137.
- Fechter, M., Seeber, C. und Chen, S.** 2018, 'Integrated process planning and resource allocation for collaborative robot workplace design', *Procedia CIRP*, Band 72, S. 39-44.
- Fraunhofer-Gesellschaft** 2013, *Projekt LIAA – Lean Intelligent Assembly Automation*. Verfügbar unter: <<http://www.project-leanautomation.eu>>. [01. Februar 2017].
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA** 2011, *Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung*, Fraunhofer-Gesellschaft. Verfügbar unter: <http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Studientexte/Studie_EFFIROB.pdf>. [01. Februar 2017].
- Fritzsche, L., Jendrusch, R., Leidholdt, W., Bauer, S., Jäckel, T. und Pirger, A.** 2011, 'Introducing ema (Editor for Manual Work Activities) - A New Tool for Enhancing Accuracy and Efficiency of Human Simulations in Digital Production Planning', in Digital Human Modeling: Proceedings of the Third International Conference ICDHM, V. Duffy (Hrsg.), Springer, Orlando, S. 272-281.
- Glogowski, P., Lemmerz, K., Hypki, A. und Kuhlenkötter, B.** 2018, 'Menschzentrierte Simulation mit adaptiver kollisionsfreier Roboterbahnplanung in der Mensch-Roboter-Kollaboration', in 3.

Transdisziplinäre Konferenz Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen.

Gombolay, M., Wilcox, R. and Shah, J. 2013, 'Fast Scheduling of Multi-Robot Teams with Temporospatial Constraints', *Robotics: Science and Systems Foundation*.

Goodrich, M.A. und Schultz, A.C. 2007, 'Human-Robot Interaction: A Survey', *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, Band 1, Ausgabe 3, S. 203-275.

Haag, M. 2014, 'Kollaboratives Arbeiten mit Robotern – Vision und realistische Perspektive', in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, A. Botthof und E. A. Hartmann (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, S. 59-64.

Händeler, E. 2013, *Die langen Wellen der Konjunktur: Nikolai Kondratieffs Aufsätze von 1926 und 1928*, Marlon Verlag, Moers.

Harari, Y. N. und Neubauer, J. 2015, *Eine kurze Geschichte der Menschheit*, Pantheon Verlag.

Henrich D. und Kuhn, S. 2006, 'Modeling intuitive behavior for safe human/robot coexistence cooperation', in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).

Hessler, M. 2014, 'Die Halle 54 bei Volkswagen und die Grenzen der Automatisierung. Überlegungen zum Mensch-Maschine-Verhältnis in der industriellen Produktion der 1980er-Jahre', *Zeithistorische Forschungen/Studies in Contemporary History*, Band 2014, Ausgabe 11, S. 56-76. Verfügbar unter: <<http://www.zeithistorische-forschungen.de/1-2014/id%3D4996#footnote-6715-21>>. [31. Januar 2017].

Kim, J., You, S., Kamat, V., Sanghyun Lee, S. und Robert, L.P. 2015, 'Evaluation of Human Robot Collaboration in Masonry Work Using Immersive Virtual Environments', in *Proceedings of the 15th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, S. Han, M. Lu und Y. Mohamed (Hrsg.), CONVR, Banff, S. 132-141.

Komenda, T. 2016, 'Systematic Analysis of Collaborative Human-Machine-Scenarios: Task Execution on Moved Objects', in *Proceedings of the 14th Industrial Simulation Conference (ISC'14)*, N. Vasiliu (Hrsg.), EUROSIS-ETI, Bucharest, S. 47-49.

Komenda, T., Brandstötter, M. und Schlund, S. 2021, 'A comparison of and critical review on cycle time estimation methods for human-robot work systems', in *Procedia CIRP* [in print].

Komenda, T. und Breitenecker, F. 2016a, 'Modellierung von Arbeit an bewegten Objekten in kollaborativen Betriebsformen', in *Proceedings of the 23rd Symposium Simulationstechnik (ASIM 2016)*, T. Wiedemann (Hrsg.), ARGESIM, Dresden, S. 17-23.

Komenda, T. und Breitenecker, F. 2016b, 'Nonlinearity in Collaborative Applications incorporating Humans and Machines: Identification and Modelling', in *Proceedings of the Vienna Young Scientists Symposium (VSS)*, B. Ullmann (Hrsg.), Book-of-Abstracts.com, Wien, S. 94-95.

Komenda, T. und Leidholdt, W. 2016, 'ema – a Software Tool for Planning Human-Machine-Collaboration', *SNE Simulation Notes Europe*, Band 26, Ausgabe 1, Wien, S. 27-32.

Komenda, T., Malisa, V. und Leidholdt, W. 2016, 'Modellierung von Arbeit an bewegten Objekten. Digitale Menschmodelle für Mensch-Maschine-Kollaboration', *atp edition. Automatisierungstechnische Praxis*, Band 2016, Ausgabe 12, München, S. 34-43.

- Krüger, J., Lien, Terje K., und Verl, A.** 2009, 'Cooperation of human and machines in assembly lines', *CIRP Annals*, Band 58, Ausgabe 2, S. 628-646.
- Kuhlang, P.** 2015, *Modellierung menschlicher Arbeit im Industrial Engineering. Grundlagen, Praxiserfahrungen und Perspektiven*, Ergonomia-Verlag, Stuttgart.
- Leidholdt, W.** 2014, 'Die Simulation von Mensch-Roboter-Kollaboration – unabdingbar für die Prozessgestaltung', in *Produktion und Arbeitswelt 4.0. Aktuelle Konzepte für die Praxis: TBI2014 – 15. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs*, E. Müller (Hrsg.), Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Chemnitz, S. 109-115.
- Leidholdt, W. und Wohlschläger, C.** 2012, 'Das numerische Verhaltensmodell des Menschen – Simulation von Werkern unter erhöhter Beanspruchung', in *Tagungsband der 9. Fachtagung Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme*, Fraunhofer-IFF (Hrsg.), Magdeburg, S. 229-233.
- Lotter, B. und Wiendahl, H.P.** 2012, *Montage in der industriellen Produktion*, Springer-Verlag, Berlin.
- Lüdtke, A.** 2014, 'Wege aus der Ironie in Richtung ernsthafter Automatisierung', in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, A. Botthof und E.A. Hartmann (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, S. 125-146.
- Matthias, B. und Ding, H.** 2013, 'Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage', in *Internationales Forum Mechatronik (ifm)*, Business Upper Austria – OÖ Wirtschaftsagentur GmbH, Linz.
- Meyer-Drawe, K.** 2007, *Menschen im Spiegel ihrer Maschinen*, Wilhelm Fink Verlag.
- Mühlstedt, L.** 2012, *Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchungen auf Basis digitaler Menschenmodelle*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- Müller, R., Vette, M. und Mailahn, O.** 2016, 'Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction', *Procedia CIRP*, Ausgabe 44, S. 210-215.
- Nefiodow, L. A.** 2006, *Der sechste Kondratieff: Wege zur Produktivität und Vollbeschäftigung im Zeitalter der Information*, Rhein-Sieg-Verlag, St. Augustin.
- Nerdinger, F. W., Blickle, G. und Schaper, N.** 2011, *Arbeits- und Organisationspsychologie*, Springer-Verlag, Berlin.
- Nguyen, K. D., Ng, T. C., und Chen, I. M.** 2008, 'On algorithms for planning s-curve motion profiles', *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(1), 11.
- Okoli, C. und Schabram, K.** 2010, 'A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research', in *SSRN Electronic Journal*.
- Pawletta, T., Deatcu, C., Hagendorf, O., Pawletta, S. und Colquhoun, G.** 2006, 'DEVS-Based Modeling and Simulation in Scientific and Technical Computing Environments', in *Proceedings of DEVS Integrative M&S Symposium (DEVS'06) – Part of the 2006 Spring Simulation Multiconference (SpringSim'06)*, D. Hamilton (Hrsg.), Society for Modeling and Simulation International (SCS), Huntsville, S. 151-158.
- Pasquale, V., Miranda, S., Iannone, R. und Riemma, S.** 2015, 'A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA)', *Reliability Engineering & System Safety*, Ausgabe 139, S. 17-32.

- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. und Chatterjee, S.** 2014, 'A Design Science Research Methodology for Information Systems Research', in *Journal of Management Information Systems*, 24 (3), S. 45-77.
- Pellegrinelli, S. und Pedrocchi, N.** 2018, 'Estimation of Robot Execution Time for Close Proximity Human-Robot Collaboration', *Integrated Computer-Aided Engineering*, Ausgabe 25, Band 2018, S. 81-96.
- Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., Garcia, D.F. und Wang, L.** 2020, 'Symbiotic Human-Robot Collaborative Approach for Increased Productivity and Enhanced Safety in the Aerospace Manufacturing Industry', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer.
- Praehofer, H.** 1992, *System Theoretic Foundations for Combined Discrete-Continuous System Simulation*. Dissertation, VWGÖ Wien.
- Prasch, G. M.** 2010, Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Dissertation. Technische Universität München.
- Ramdhani, A., Ramdhani, M. A. und Amin, A. S.** 2014, 'Writing a Literature Review Research Paper: A step-by-step approach', in *International Journal of Basics and Applied Sciences*, S. 47-56.
- REFA Verband für Arbeitsgestaltung und Betriebsorganisation e.V.** 1985, *Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 3 Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung*, Hanser Verlag, München.
- Schröter, D., Kuhlmann, P., Finsterbusch, T., Kührke, B. und Verl, A.** 2016, 'Introducing Process Building Blocks for Designing Human Robot Interaction Work Systems and Calculating Accurate Cycle Times', *Procedia CIRP*, Ausgabe 44, S. 216-221.
- Spath, D. et al.** 2013, *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*, Fraunhofer-Verlag, Stuttgart.
- Strasser, H.** o.J., *Ergonomie – Arbeitsplatz. Anthropometrische und biomechanische Grundlagen*, Institut für Fertigungstechnik der Universität Siegen. Verfügbar unter: <<http://www.mota-sdesign.com/wp-content/uploads/2013/12/komp01.pdf>>. [25. Mai 2015].
- Takata, S., Hirano, T.** 2011, 'Human and robot allocation method for hybrid assembly systems', *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Band 60, Ausgabe 1, S. 9-12.
- Thiemermann, S.** 2005, *Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter*. Heimsheim, Jost Jetter Verlag.
- Thomas, C., Stankiewicz, L., Grötsch, A., Wischniewski, S., Deuse, J. und Kühlenkötter, B.** 2016, 'Intuitive Work Assistance by Reciprocal Human-Robot Interaction in the Subject Area of Direct Human-Robot Collaboration', *Procedia CIRP*, Ausgabe 44, S. 275-280.
- Tsarouchi, P., Matthaiakis, A.S., Makris, S. und Chryssolouris, G.** 2016, 'On a human-robot collaboration in an assembly cell', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Band 30, Ausgabe 6, S. 580-589.
- Vicentini, F.** 2020, 'Terminology in safety of collaborative robotics', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Ausgabe 63.
- Villani, V., Pini, F., Leali, F. und Secchi, C.** 2018, 'Survey on Human-Robot Collaboration in Industrial Settings: Safety, Intuitive interfaces and Applications', *Mechatronics*, Ausgabe 55, S. 248-266.

Wegman, E. J. 1990, 'Hyperdimensional Data Analysis Using Parallel Coordinates', *Journal of the American Statistical Association*, Band 85, Ausgabe 411, S. 664-675.

Willnecker, U. 2000, *Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließbandmontagen*. Dissertation, Technische Universität München.

Winter, J.C.F. und Dodou, D. 2014, 'Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation', *Cognition, Technology & Work*, Band 16, S. 1-11.

Wloka, D.W. 2013, *Robotersimulation*. Springer.

Zeigler, B.P. 1976, *Theory of Modeling and Simulation*, Wiley Interscience, Hobokon.

Zeigler, B.P., Praehofer, H. und Kim, T.G. 2000, *Theory of Modeling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*, Academic Press, London.

Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R. und Zhang L. 2020, 'Ergonomic Risk and Cycle Time Minimization for the U-Shaped Worker Assignment Assembly Line Balancing Problem: A Multi-Objective Approach', *Computers and Operations Research*.

Normenverzeichnis

Ausgewählte Normen zur Sicherheit von Maschinen

DIN EN 1525:1997: Sicherheit von Flurförderzeugen – Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme.

DIN EN 1526:2009: Sicherheit von Flurförderzeugen – Zusätzliche Anforderungen für automatische Funktionen von Flurförderzeugen.

DIN EN 12453:2001: Nutzungssicherheit kraftbetätigter Tore – Anforderungen.

DIN EN 61496-1:2015: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen.

DIN EN 61496-2:2015: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, welche nach dem aktiven optoelektronischen Prinzip arbeiten.

DIN CLC/TS 61496-3:2009: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 3: Besondere Anforderungen an optoelektronische diffuse Reflektion nutzende Schutzeinrichtungen.

DIN IEC/TS 61496-4-2:2015: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 4-2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden – Zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von Testmusterverfahren.

DIN IEC/TS 61496-4-3:2012: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 4-3: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden – Zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von Stereoverfahren (VBPDST).

DIN EN 61508-1:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

DIN EN 61508-2:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische/elektronische/programmierbare elektronische Systeme.

DIN EN 61508-3:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 3: Anforderungen an Software.

DIN EN 61508-4:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 4: Begriffe und Abkürzungen.

DIN EN 61508-5:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 5: Beispiele zur Ermittlung der Stufe der Sicherheitsintegrität (safety integrity level).

DIN EN 61508-6:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 6: Anwendungsrichtlinie für IEC 61508-2 und IEC 61508-3.

DIN EN 61508-7:2011: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 7: Überblick über Verfahren und Maßnahmen.

DIN EN 62046:2013: Sicherheit von Maschinen – Anwendungen von Schutzausrüstungen zur Anwesenheitserkennung von Personen.

DIN EN 62061:2016: Sicherheit von Maschinen – Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme.

DIN EN ISO 3691-1:2006: Flurförderzeugen – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme.

DIN EN ISO 10218-1:2012: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter.

DIN EN ISO 10218-2:2012: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration.

DIN EN ISO 12100:2016: Sicherheit von Maschinen –Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung.

DIN EN ISO 13482:2014: Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter.

DIN EN ISO 13849-1:2016: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze.

DIN EN ISO 13849-2:2013: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung.

DIN EN ISO 13855:2010: Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen.

DIN ISO 14121-2:2013: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele.

DIN ISO/TS 15066:2017: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter.

2006/42/EG: Maschinenrichtlinie (MRL) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2016 über Maschinen zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG.

Ausgewählte Normen zur Interaktionsergonomie

DIN EN 894-1:2009: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen.

DIN EN 894-2:2009: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 2: Anzeigen.

DIN EN 894-3:2010: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 3: Stellteile.

DIN EN 894-4:2010: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen – Teil 4: Lage und Anordnung von Anzeigen und Stellteilen.

DIN EN 61310-1:2008: Sicherheit von Maschinen – Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen – Teil 1: Anforderungen an sichtbare, hörbare und tastbare Signale.

DIN EN 61310-2:2008: Sicherheit von Maschinen – Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen – Teil 2: Kennzeichnung.

DIN EN 61310-3:2008: Sicherheit von Maschinen – Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen – Teil 3: Anforderungen an die Anordnung und den Betrieb von Bedienteilen (Stellteilen).

DIN EN ISO 9241-1:2002: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 1: Allgemeine Einführung.

DIN EN ISO 9241-5:1999: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 5: Anforderungen an Arbeitsplatzgestaltung und Körperhaltung.

DIN EN ISO 9241-6:2001: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 6: Leitsätze für die Arbeitsumgebung.

DIN EN ISO 13850:2016: Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze.

VDI/VDE 3850 Blatt 1:2014: Gebrauchstauglichkeit von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen – Konzepte, Prinzipien und grundsätzliche Empfehlungen.

VDI/VDE 3850 Blatt 2:2015: Gebrauchstauglichkeit von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen – Interaktionsgeräte.

VDI/VDE 3850 Blatt 3:2015: Gebrauchstauglichkeit von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen – Merkmale, Gestaltung und Einsatzmöglichkeiten von Benutzungsschnittstellen mit Touchscreens.

Ausgewählte Normen zur Anthropometrie

DIN 33408-1:2008: Körperumrisschablonen – Teil 1: Für Sitzplätze.

DIN 33411-1:1982: Körperkräfte des Menschen; Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen.

DIN 33411-3:1986: Körperkräfte des Menschen; Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen.

DIN 33411-4:1987: Körperkräfte des Menschen; Maximal statische Aktionskräfte (Isodynen).

DIN 33411-5:1999: Körperkräfte des Menschen – Teil 5: Maximal statische Aktionskräfte, Werte.

DIN EN 349:2009: Sicherheit von Maschinen – Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen.

DIN EN 547-1:2009: Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Grundlagen zur Bestimmung von Abmessungen für Ganzkörper-Zugänge an Maschinenarbeitsplätzen.

DIN EN 547-2:2009: Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Grundlagen für die Bemessung von Zugangsöffnungen.

DIN EN 547-3:2009: Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 3: Körpermaßdaten.

DIN EN 614-1:2009: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze.

DIN EN 614-2:2008: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 2: Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung von Maschinen und den Arbeitsaufgaben.

DIN EN 1005-1:2009: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 1: Begriffe.

DIN EN 1005-2:2009: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen.

DIN EN 1005-3:2009: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung.

DIN EN 1005-4:2009: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 4: Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen.

DIN EN 1005-5:2007: Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 5: Risikobeurteilung für kurzzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen.

DIN EN ISO 7250-1:2016: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte.

DIN CEN ISO/TR 7250-2:2013: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 2: Anthropometrische Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen.

DIN EN ISO 13857:2008: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen.

DIN EN ISO 14738:2009: Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen.

OENORM DIN 33402-1:2015: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Begriffe, Messverfahren.

OENORM DIN 33402-2:2006: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte.

DIN SPEC 33402-5:2010: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Untersuchung der Verfahren zur Hochrechnung und Abschätzung von Körpermaßdaten.

DIN SPEC 33402-6:2015: Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 6: Leitfaden für die richtige Auswahl und Anwendung anthropometrischer Daten.

Ausgewählte Normen zur Arbeitsgestaltung

DIN EN ISO 10075-1:2015: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Konzepte und Begriffe.

DIN EN ISO 10075-2:2000: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze.

DIN EN ISO 10075-3:2004: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 3: Grundsätze und Anforderungen an Verfahren zur Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung.

ISO 11228-1:2003: Ergonomie – Manuelles Handhaben von Lasten – Teil 1: Heben und Tragen.

ISO 11228-2:2007: Ergonomie – Manuelle Handhabung – Teil 2: Ziehen und Schieben.

ISO 11228-3:2007: Ergonomie – Manuelle Handhabung – Teil 3: Handhabung geringer Lasten bei hohen Bewegungsfrequenzen.

Ausgewählte Normen zu Digitalen Menschmodellen

DIN EN ISO 15536-1:2008: Ergonomie – Computer-Manikins und Körperumrisschablonen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

DIN EN ISO 15536-2:2007: Ergonomie – Computer-Manikins und Körperumrisschablonen – Teil 2: Prüfung der Funktionen und Validierung der Maße von Computer-Manikin-Systemen.

VDI 4499 Blatt 4:2015: Digitale Fabrik – Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik.

Anhang A: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit

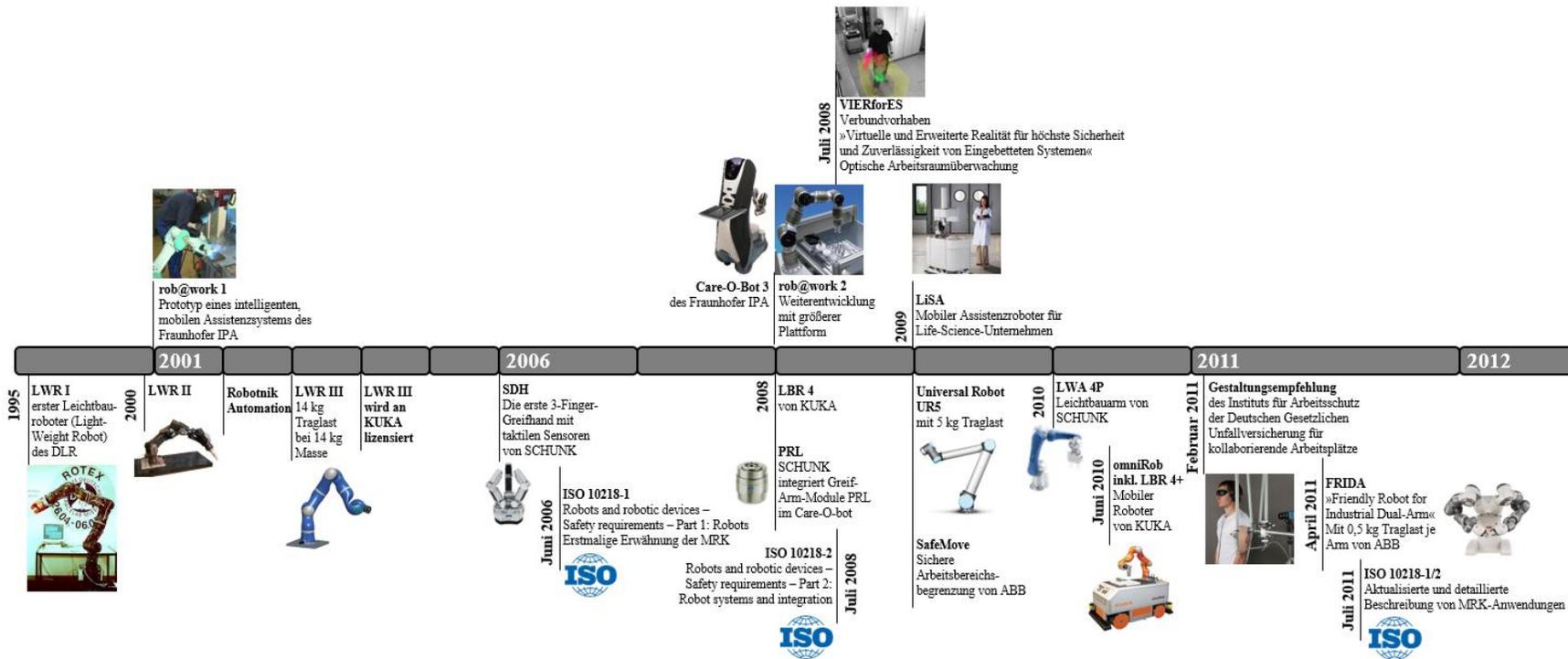


Abbildung 52: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (1995-2011)

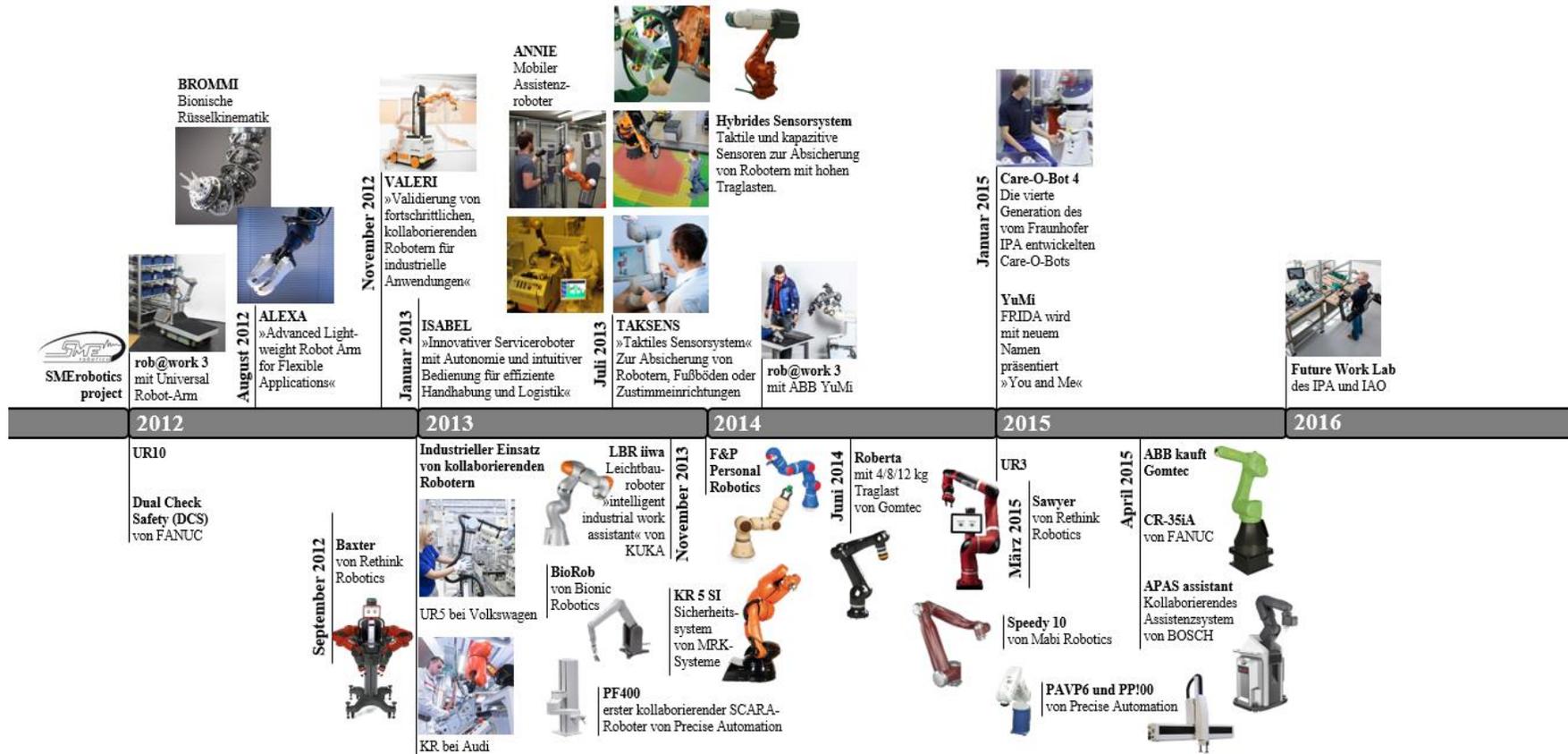


Abbildung 53: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (2012-2016)

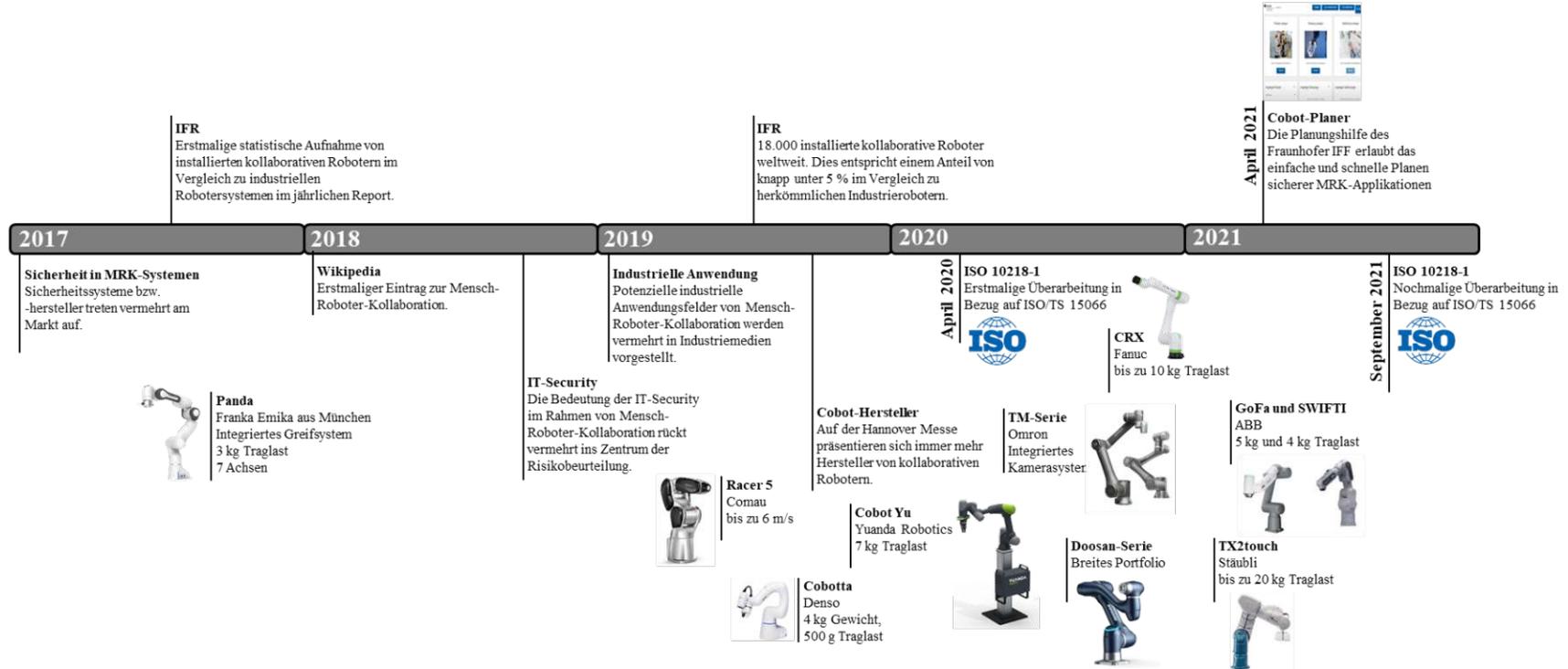


Abbildung 54: Zeitleiste der Mensch-Maschine-Zusammenarbeit (2017-2021)

Anhang B: Relevante Forschungsgebiete

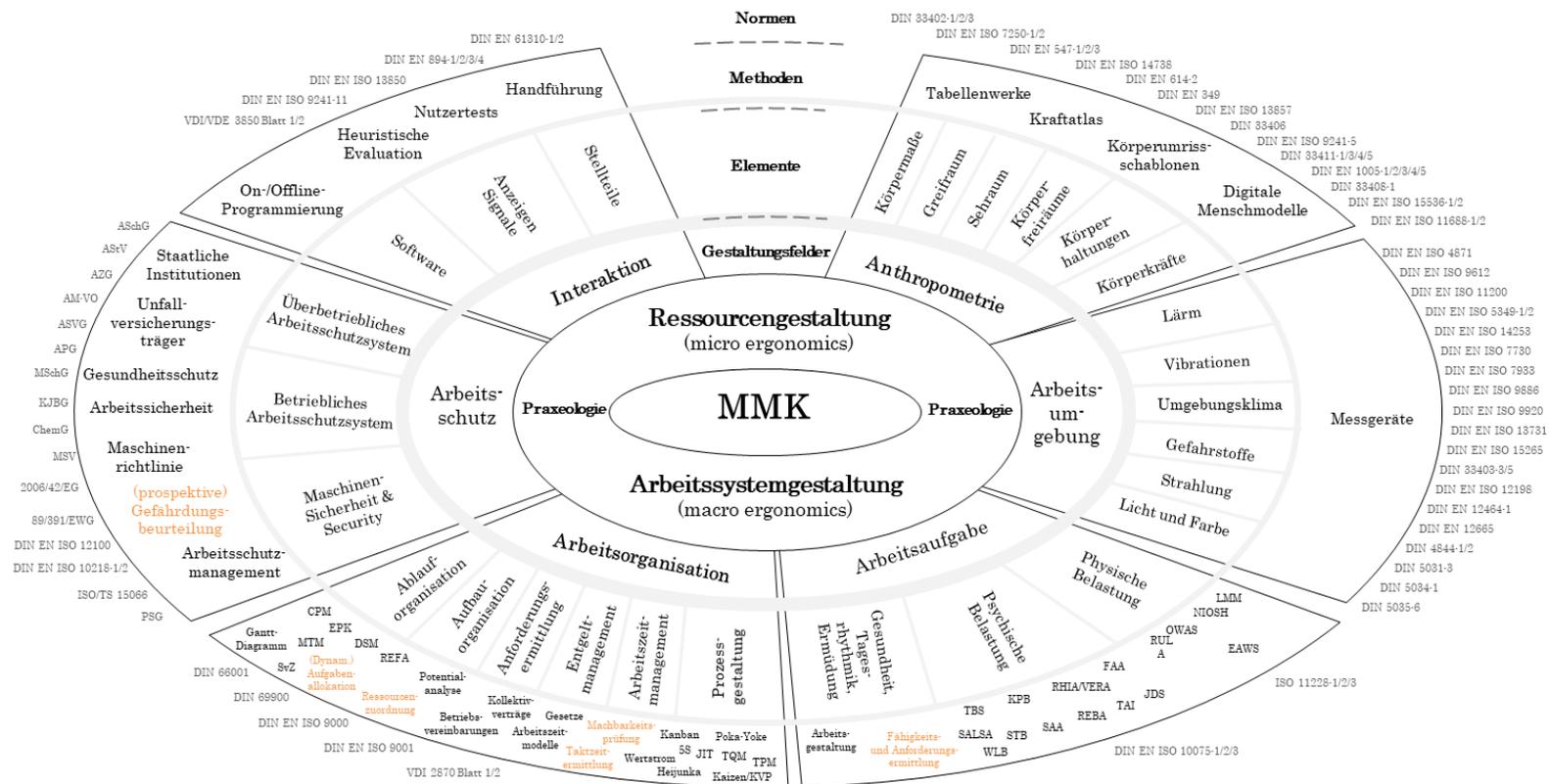


Abbildung 55: Relevante Forschungsgebiete in der Mensch-Maschine-Kollaboration
(hell: Betrachtungsumfang des Taktzeitmodells in der vorliegenden Forschungsarbeit)

Anhang C: Weiterführende Erläuterungen zum Taktzeitmodell

Wie in Kapitel 5.3 erwähnt, erfolgt die Erzeugung einer Ressource (Objekts) mit einer entsprechenden Identität sowie einer Liste an Initialisierungs- und Systemparametern. Durch die Identitäten können die Ressourcen gleichen Typs voneinander unterschieden werden. Die einzelnen Ressourcentypen (Klassen) besitzen dabei folgende Eigenschaften:

name	...	Identität
x	...	Eingangsparameter
y	...	Ausgangsparameter
s	...	Systemzustände
elapsed	...	verstrichene Zeit seit der letzten Zustandsänderung
sysparams	...	Systemparameter
c_states	...	kontinuierliche Zustandsvariablen

Die spezifischen Verhaltensfunktionen eines DEVS-Blocks sind an den DEV&DESS-Beschreibungsformalismus angelehnt:

obj	...	Konstruktor-Methode
ta	...	Zeitfortschrittsfunktion
deltaconffun	...	Konfluenzfunktion
deltaextfun	...	externe Übergangsfunktion
deltaintfun	...	interne Übergangsfunktion
lamdafun	...	diskrete Ausgangsfunktion
dq	...	Änderungsfunktion
ret	...	Zustandsfunktion
deltastatefun	...	Zustandsänderungsfunktion
cy	...	kontinuierliche Ausgangsfunktion

Konstruktor-Methode. Die Konstruktor-Methode dient der Erzeugung eines entsprechenden Objekts. Neben der Initialisierung, erfolgt hier auch eine Validierung der Eingabeparameter sowie die Erzeugung einer Instanz des Simulators.

```
obj = am_type(name, inistates, c_inistates, elapsed)
```

Zeitfortschrittsfunktion. Die Zeitfortschrittsfunktion $ta = tafun(obj)$ berechnet die Lebenszeit der aktuellen Systemzustände s .

$$ta = obj.s.sigma;$$

wobei $sigma$ eine nicht-negative Gleitkommazahl darstellt und die Zeit bis zur nächsten internen Zustandsänderung angibt, sofern kein externes Ereignis auftritt.

Konfluenzfunktion. Die Konfluenzfunktion $deltaconffun(obj,gt)$ berechnet die neuen Systemzustände s' in Abhängigkeit der aktuellen Systemzustände s , der Eingangsparameter x und der verstrichenen Zeit $elapsed$, wenn es gleichzeitig ein internes und ein externes Ereignis gibt.

Externe Übergangsfunktion. Hier wird das Verhalten des Blocks bei einem externen Ereignis definiert. Die externe Übergangsfunktion $deltaextfun(obj,gt)$ berechnet also die neuen Systemzustände s' in Abhängigkeit der aktuellen Systemzustände s , der Eingangsparameter x und der verstrichenen Zeit $elapsed$.

Interne Übergangsfunktion. Hier wird das Verhalten des Blocks bei einem internen Ereignis definiert. Die interne Übergangsfunktion $deltaintfun(obj)$ berechnet die neuen Systemzustände s' in Abhängigkeit der aktuellen Systemzustände s .

Diskrete Ausgangsfunktion. Die Ausgangsfunktion $lamdafun(obj)$ berechnet die diskreten Ausgangsparameter y in Abhängigkeit der aktuellen Systemzustände s .

Änderungsfunktion. Die Änderungsfunktion $dq = f(obj,gt,x,y)$ berechnet das kontinuierliche Modellverhalten durch Ableitungen.

Zustandsfunktion. Die Zustandsfunktion $ret = cse(obj,gt,y)$ überprüft, ob es Ereignisse im kontinuierlichen Modellverhalten gibt.

Zustandsänderungsfunktion. Hier wird die Reaktion des Blocks auf ein Zustandsereignis mit $deltastatefun(obj,gt,y,event_number)$ definiert.

Kontinuierliche Ausgangsfunktion. Die Ausgangsfunktion $cy = lamda_c(obj,gt,y)$ berechnet die kontinuierlichen Ausgangsparameter y in Abhängigkeit der aktuellen Systemzustände s .

Das Funktionsprinzip eines hybriden DEVS-Blocks (Klasse) in der MatlabDEVS-Toolbox ist nochmals in Abbildung 56 visualisiert. Das hybride bzw. kollaborationsfähige Mensch-Maschine-Arbeitssystem wurde also aus einzelnen DEVS-Blöcken unterschiedlichen Typs zusammengestellt, wobei die entsprechenden Blöcke durch ihre kontinuierlichen Systemzustände miteinander verbunden wurden.

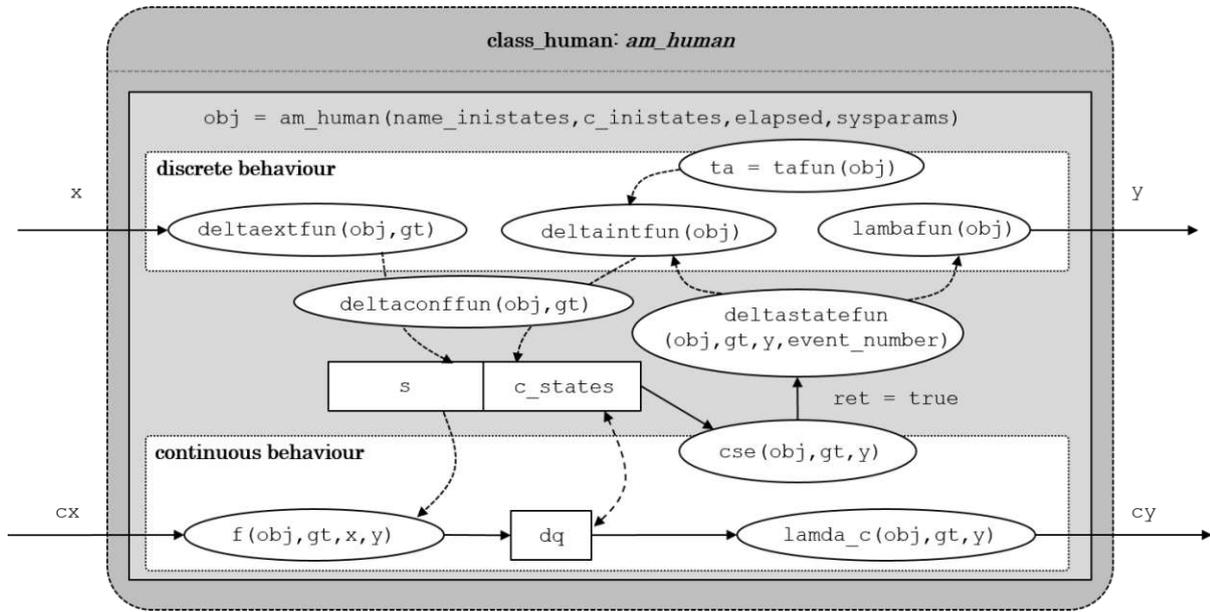


Abbildung 56: Grafische Darstellung der Klasse eines hybriden DEVS-Blocks

Anhang D: Beispielcode

Ein Beispielcode für die Modellierung eines kollaborationsfähigen Mensch-Maschine-Arbeitssystems ist im Folgenden angeführt. Er setzt sich einerseits aus der Definition einer Ressource (Kollaborationspartner) zusammen und andererseits aus dem Koordinator zur Definition des Gesamtsystems.

```
%% HYBRID ATOMIC PDEVS am_partner

classdef am_partner < hybridatomic

    properties (Access = public)
    end
    methods
        function obj = am_partner(name,inistates,c_inistates,elapsed,job_list)
            if nargin == 5
                x = {'in1','in2'};
                y = {'out1'};
                s = {'sigma','id','arrived','start','collaborating',...
                    'single','operating_alone','finished',...
                    'job_number','job_description','velocity', ...
                    'theta','time_flag','path','prev_pos','waiting_time'};
                sysparams = struct('job_list',job_list);
                c_states = [0; 0; 0];
                mealy = 0;
            else
                error('mistake at constructor method for class am_partner');
            end
            % incarnate the associated hybrid simulator
            obj = obj@hybridatomic(name,x,y,s,c_states,mealy,elapsed, ...
                sysparams);

            % set hybrid parameters
            obj.output_length = 1;
            % initialize the continuous states
            obj.c_states = c_inistates;
            % initialize the discrete states
            obj.s.sigma = inistates.sigma;
            obj.s.id = inistates.id;
            obj.s.arrived = inistates.arrived;
            obj.s.start = inistates.start;
            obj.s.collaborating = inistates.collaborating;
            obj.s.single = inistates.single;
            obj.s.operating_alone = inistates.operating_alone;
            obj.s.finished = inistates.finished;
            obj.s.job_number = inistates.job_number;
        end
    end
end
```

```

obj.s.job_description = inistates.job_description;
obj.s.velocity = inistates.velocity;
obj.s.theta = inistates.theta;
obj.s.time_flag = inistates.time_flag;
obj.s.path = inistates.path;
obj.s.prev_pos = inistates.prev_pos;
obj.s.waiting_time = inistates.waiting_time;

disp('hybrid partner constructed');
end

function ta = tafun(obj)
    ta = obj.s.sigma;
end

function deltaconffun(obj,gt)    % execute first external function
    deltaintfun(obj)
    deltaextfun(obj,gt);
end

function deltaextfun(obj,gt)
    if ~isempty(obj.x.in1)
        if(obj.x.in1{1} == 1) && (obj.s.finished == 0) ...
            && (obj.s.operating_alone == 1)
            obj.s.sigma = obj.s.time_flag - gt;
            disp([num2str(gt),' ',obj.name,' ',...
                num2str(obj.s.sigma)]);
        end
    end
    if ~isempty(obj.x.in2)
        if(obj.s.finished == 0) && (obj.s.operating_alone == 1)...
            && (obj.x.in2{1,2} == obj.s.job_description(5))...
            && (obj.x.in2{1,3} == obj.s.id)
            obj.s.sigma = obj.s.time_flag - gt;
            disp([num2str(gt),' ',obj.name,' ',...
                num2str(obj.s.sigma)]);
        end
    end
    if ~isempty(obj.x.in1)
        if(obj.x.in1{1} == 1) && (obj.s.finished == 0) ...
            && (obj.s.start == 0) && (obj.s.collaborating == 1)
            obj.s.sigma = obj.s.time_flag - gt;
            disp([num2str(gt),' ',obj.name,' ', ...
                num2str(obj.s.sigma)]);
        end
    end
    if ~isempty(obj.x.in2)
        if(obj.x.in2{1,1} == 2) && (obj.s.finished == 0)...

```

```

        && (obj.s.start == 0) && (obj.s.collaborating == 1)...
        && (obj.x.in2{1,2} == obj.s.job_description(5))...
        && (obj.x.in2{1,3} == obj.s.id)
obj.s.sigma = obj.s.time_flag - gt;
disp([num2str(gt), ' ', obj.name, ' ', ...
      num2str(obj.s.sigma)]);
    end
end
if ~isempty(obj.x.in1)
    if(obj.x.in1{1} == 1) && (obj.s.finished == 1)
        % if do-move-signal from controller and not collaborating,
        % get active and move to new position
        obj.s.prev_pos(1) = obj.c_states(2);
        obj.s.prev_pos(2) = obj.c_states(3);

        obj.s.job_number = obj.s.job_number + 1;

        obj.s.job_description = ...
            obj.sysparams.job_list(obj.s.job_number,:);

        obj.c_states(1) = sqrt((obj.s.job_description(1) ...
                               -obj.c_states(2))^2 + ...
                               (obj.s.job_description(2) - ...
                               obj.c_states(3))^2);

        obj.s.velocity = obj.s.job_description(3);
        obj.s.theta = 360*atan((obj.s.job_description(2) ...
                               -obj.c_states(3))/(obj.s.job_description(1) ...
                               -obj.c_states(2)))/(2*pi);

    end
end
if ~isempty(obj.x.in2)
    if(obj.x.in2{1,1} == 1) && (obj.s.arrived == 1)...
        && (obj.x.in2{1,2} == obj.s.job_description(5))...
        && (obj.x.in2{1,3} == obj.s.id)
        % if partner arrived and I arrived
        obj.s.arrived = 0;
        obj.s.start = 1;
        obj.s.theta = obj.s.job_description(8);
        obj.s.velocity = obj.s.job_description(7);
        % trigger an internal event to set processing time
        obj.s.sigma = 0;
        % remember processing end time
        obj.s.time_flag = gt + obj.s.job_description(6);
        disp([num2str(gt), ' ', obj.name, ' partner arrived']);
    end
end
if ~isempty(obj.x.in2)
    if(obj.x.in2{1,1} == 2) && (obj.s.arrived == 1)...
        && (obj.x.in2{1,2} == obj.s.job_description(5)) ...

```

```

        && (obj.x.in2{1,3} == obj.s.id)
% if partner started to collaborate and I arrived
    obj.s.arrived = 0;
    obj.s.start = 1;
    obj.s.theta = obj.s.job_description(8);
    obj.s.velocity = obj.s.job_description(7);
    % trigger an internal event to set processing time
    obj.s.sigma = 0;
    % remember processing end time
    obj.s.time_flag = gt + obj.s.job_description(6);
    disp([num2str(gt), ' ', obj.name, ...
        ' partner started collaborating']);
    end
end
end

function deltaintfun(obj)
    if (obj.s.start == 1)
        obj.s.start = 0;
        obj.s.collaborating = 1;
        % set processing time
        obj.s.sigma = obj.s.job_description(6);
        disp([num2str(obj.tnext), ' ', obj.name, ' collaborating']);
    elseif (obj.s.collaborating == 1)
        obj.s.collaborating = 0;
        obj.s.finished = 1;
        obj.s.sigma = inf;
        obj.s.velocity = 0;           % set velocity to zero
        disp([num2str(obj.tnext), ' ', obj.name, ' finished coll']);
        obj.s.path = obj.s.path + sqrt((obj.s.prev_pos(1) ...
            -obj.c_states(2))^2 + ...
            (obj.s.prev_pos(2)-obj.c_states(3))^2);
        disp([obj.name, ' path: ', num2str(obj.s.path)]);
        obj.s.waiting_time(3) = obj.s.waiting_time(3) ...
            +obj.s.waiting_time(2) - obj.s.waiting_time(1);
    elseif (obj.s.single == 1)
        obj.s.single = 0;
        obj.s.operating_alone = 1;
        % set processing time
        obj.s.sigma = obj.s.job_description(6);
        disp([num2str(obj.tnext), ' ', obj.name, ...
            ' operating alone for ', num2str(obj.s.sigma)]);
    elseif (obj.s.operating_alone == 1)
        obj.s.operating_alone = 0;
        obj.s.finished = 1;
        obj.s.sigma = inf;
        obj.s.velocity = 0;           % set velocity to zero
        disp([num2str(obj.tnext), ' ', obj.name, ' finished alone']);
        obj.s.path = obj.s.path + sqrt((obj.s.prev_pos(1) ...
            -obj.c_states(2))^2 + ...

```

```

        (obj.s.prev_pos(2)-obj.c_states(3))^2);
disp([obj.name,' path: ',num2str(obj.s.path)]);
else
obj.s.sigma = inf;
obj.s.velocity = 0;           % set velocity to zero
disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name, ...
    ' waiting for ', num2str(obj.s.job_description(5))]);
obj.s.path = obj.s.path + sqrt((obj.s.prev_pos(1) ...
    -obj.c_states(2))^2 + ...
    (obj.s.prev_pos(2)-obj.c_states(3))^2);
obj.s.prev_pos(1) = obj.c_states(2);
obj.s.prev_pos(2) = obj.c_states(3);
disp([obj.name,' path: ',num2str(obj.s.path)]);
end
end

function lambdafun(obj)
    if (obj.s.arrived == 1)
        % send waiting signal to partner
        obj.y.out1 = {1,obj.s.id,obj.s.job_description(5)};
        disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name,' send arrived']);
        if (obj.s.job_description(4) == 1)
            obj.s.waiting_time(1) = obj.tnext;
        end
    elseif (obj.s.start == 1)
        obj.y.out1 = {2,obj.s.id,obj.s.job_description(5)};
        disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name, ...
            ' send start collaborating']);
        if (obj.s.job_description(4) == 1)
            obj.s.waiting_time(2) = obj.tnext;
        end
    elseif (obj.s.collaborating == 1)
        obj.y.out1 = {0,obj.s.id,obj.s.job_description(5)};
        disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name, ...
            ' send finished collaborating']);
    elseif (obj.s.single == 1)
        obj.y.out1 = {3,obj.s.id,obj.s.job_description(5)};
        disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name, ...
            ' send arrived single']);
    elseif (obj.s.operating_alone == 1)
        obj.y.out1 = {0,obj.s.id,obj.s.job_description(5)};
        disp([num2str(obj.tnext),' ',obj.name, ...
            ' send finished operating alone']);
    end
end

function dq = f(obj,gt,x,y)
    % derivation this is the current x-position
    dq(2) = obj.s.velocity*cos(2*pi*obj.s.theta/360);

```

```

    % derivation this is the current y-position
    dq(3) = obj.s.velocity*sin(2*pi*obj.s.theta/360);
    dq(1) = -sqrt((dq(2))^2+(dq(3))^2);

    % put back the state values
    obj.c_states(1) = y(1);
    obj.c_states(2) = y(2);
    obj.c_states(3) = y(3);
end

function ret = cse(obj,gt,y)
    ret = [y(1),1,0];    % event, if target position reached
end

function deltastatefun(obj,gt,y,event_number)
% state event occurred in THIS atomic
    if event_number == 1
        obj.c_states(2) = y(2);           % remain at position
        obj.c_states(3) = y(3);           % remain at position
        obj.s.velocity = 0;                % set velocity to zero
        % trigger an internal event to tell partner it is waiting
        obj.s.sigma = 0;
        if (obj.s.job_description(4) == 1)
            obj.s.arrived = 1;
        else
            obj.s.single = 1;
            obj.s.time_flag = gt + obj.s.job_description(6);
        end
    end
    if event_number == 2
    end
end

function cy = lambda_c(obj,gt,y)
    cy = y(1);           % output of distance
end

end

end

```

```

%% Interface between input mask and PDEVS Model
% Uses inputs to define the number of collaborating partners as well as
% discrete and continuous state variables

%% Define Variables

global num_partner;
num_partner = 4;

%% Define some Values for ODE-Plot
% Continuous variables can be plotted during simulation, if desired.
% If you want this, define here:

global ODEPLOT;
ODEPLOT = 0;

x_dim      = 10;
y_dim      = 10;
simulation_time = 60;
job_gen    = 5.5;
job_gen_times = [1*job_gen 1*job_gen 1*job_gen 5*job_gen];

myPartner = [];

myPartner(1).name      = 'Human1';
myPartner(2).name      = 'MobilePlatform';
myPartner(3).name      = 'Conveyor';
myPartner(4).name      = 'Robot1';
myPartner(num_partner+1).name = 'Jobs';

myPartner(1).c_inistates = [0; 0; 0];
myPartner(2).c_inistates = [0; 4; 0];
myPartner(3).c_inistates = [0; 0; 5];
myPartner(4).c_inistates = [0; 7; 3];

% job_description = [xposition yposition velocity ...
                    single/collaboration_flag ...
                    processing_partner processing_time ...
                    processing_velocity processing_angle]

myPartner(1).job_list = [];
myPartner(2).job_list = [];
myPartner(3).job_list = [];
myPartner(4).job_list = [];

v      = 0;
c      = 0;
Pp     = 0;
tp     = 0;
vp     = 0;
thetap = 0;
theta  = 0;

```

```

velocity = 0;
elapsed = 0;
outputs = {1,num_partner};

%% Create the Model

% Partner
for n=1:num_partner

    % [xposition yposition velocity single/collaboration_flag ...
        processing_partner processing_time processing_velocity ...
        processing_angle]
    job_description = [myPartner(n).job_list(1,2) ...
        myPartner(n).job_list(1,3) v c Pp tp vp thetap];

    waiting_time = [0 0 0];

    inistates = struct('sigma',inf,'id',n,'arrived',0,'start',0, ...
        'collaborating',0,'single',0,'operating_alone',0,...
        'finished',1,'job_number',0,'job_description', ...
        job_description, 'velocity',velocity,'theta', ...
        theta,'time_flag',0,'path',0,'prev_pos', ...
        [],'waiting_time',waiting_time);
    assignin('base',['partner' num2str(n)],...
        am_partner(myPartner(n).name, ...
            inistates,myPartner(n).c_inistates,elapsed, ...
            myPartner(n).job_list));
    model_components(n) = {eval(sprintf('partner%d',n))};

    jobs_y(n,1) = {'out' num2str(n)};

end

% Job Generator
random_seed = 4; % system parameter
inistates = struct('sigma',0,'rand_state',[],'outputs',{outputs},...
    'number_generated',num_partner,'job_gen',5.5);
assignin('base',['partner' num2str(num_partner+1)],...
    am_job_generator(myPartner(num_partner+1).name,inistates,elapsed, ...
    random_seed,jobs_y,job_gen_times));

% Hybrid coupled model root_model
model_components(num_partner+1) = {eval(sprintf('partner%d',n+1))};
y_root = {};
x_root = {};
root_model = hybridcoupled('root_model',x_root,y_root);
addcomponents(root_model,model_components);

```

```

for i=1:num_partner
    Zid_model(i,1) = {myPartner(num_partner+1).name};
    Zid_model(i,2) = {'out' num2str(i)};
    Zid_model(i,3) = {myPartner(i).name};
    Zid_model(i,4) = {'in1'};
end

z = 1;
for j=1:(num_partner-1)
    for k=(j+1):num_partner
        Zid_model(i+z,1) = {myPartner(j).name};
        Zid_model(i+z,2) = {'out1'};
        Zid_model(i+z,3) = {myPartner(k).name};
        Zid_model(i+z,4) = {'in2'};

        Zid_model(i+z+1,1) = {myPartner(k).name};
        Zid_model(i+z+1,2) = {'out1'};
        Zid_model(i+z+1,3) = {myPartner(j).name};
        Zid_model(i+z+1,4) = {'in2'};

        z = z+2;
    end
end

set_Zid(root_model, Zid_model);

CZid_model = {'MobilePlatform',1,'Human1',1};
% first continuous variable (xposition) of partner 2 as first
% input for partner1
% end continuous couplings
set_CZid(root_model, CZid_model);

% %% After Incarnation
% % Clear all variables that are no longer used, display and check the
% % outermost coupled.
% % If you like to, set the observe flag to 1, so that all discrete state
% % variables in s are tracked automatically.
%

z = 1;

for v=1:3:(num_partner*3)
    variable_vec(1,z) = (v+1);
    variable_vec(1,z+1) = (v+2);
    z = z + 2;
end

% If ODEPLOT is set, following structure needs to be definend:
plot_params = struct('OutputSel_vec',variable_vec,...
% decide, which continuous variables are to be plotted

```

```

%% Finally
[root_model,tout,yout,teout,yeout,ieout] = ...
    r_c_hybrid(root_model,0,simulation_time,plot_params);

%% Save Simulation Results
% Save data in excel file

T(1,1) = {'Time'};
s = 0;
for t=1:num_partner
    T(1,2+s) = {'partner' num2str(t) '_Distance'};
    T(1,3+s) = {'partner' num2str(t) '_x'};
    T(1,4+s) = {'partner' num2str(t) '_y'};
    s = s + 3;
end
xlswrite(simulation_file,T,2,'A1');
xlswrite(simulation_file,tout,2,'A2');
xlswrite(simulation_file,yout,2,'B2');

%% Plot Simulation Results
% Plot for continuous variables
graph = figure('Name','Human-Machine-System');
hold on;

line_style = {'k-','k--','k:','k-.','k-','k-.'};
ls = 1;
for p=1:3:(num_partner*3)
    plot(yout(:,p+1),yout(:,p+2),line_style{1,ls},'LineWidth',1);
    ls = ls+1;
end

for s=1:num_partner
    plot_legends (1,s) = {myPartner(s).name};
end

legend(plot_legends,'Location','northwest');
xlabel('x [m]');
ylabel('y [m]');
grid on;
box on;
set(gca,'xlim',[0 x_dim],'ylim',[0 y_dim]);
title('Human-Machine-Interaction');

saveas(graph,graph_file);

```

Titanilla Komenda-Haring, MSc

Qualifikation

Master of Science in Engineering

13 Jahre Berufserfahrung
in der Leitung und Umsetzung von
Automatisierungslösungen sowie
im tertiären Bildungsbereich



10/2017 – dato

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

- Entwicklung und Umsetzung innovativer Lösungen in der diskreten Produktion für Industrieunternehmen sowie im Rahmen industrienaher Forschung mit besonderem Fokus auf Mensch-Roboter-Kollaboration
- Planung und Bearbeitung von Projekten im Bereich der Arbeitsplatz- und Arbeitssystemgestaltung bzw. Montageplanung
- Planung und Umsetzung von Konzepten der Industrie 4.0, bspw. in den Bereichen Cyber-physikalische Produktions- und Montagesysteme, Mensch-Maschine-Kollaboration, kognitive und physische Assistenzsysteme, etc.

Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien

06/2014 – 08/2017

Entwicklungsingenieurin

- Leitung von Forschungsprojekten mit den Schwerpunkten ‚Gender- und diversitätsgerechte Gestaltung von manuellen Arbeitsplatzsystemen‘ sowie Mensch-Maschine-Kollaboration
- Simulationsgestützte Planung von Automatisierungsanlagen (Layouterstellung, Offline-Programmierung, Erreichbarkeitsuntersuchung, Taktzeitermittlung und -optimierung) in den Simulationswerkzeugen RobotStudio, Roboguide, Stäubli Robotics Suite und DELMIA V5 Robotics
- On- und Offline-Programmierung von Industrierobotern der Typen ABB, EPSON, FANUC und STÄUBLI
- Analyse und Planung manueller Arbeitstätigkeiten basierend auf MTM, EAWS und dem Simulationswerkzeug ema (Editor menschlicher Arbeit)

Centauro GmbH, Wien

05/2013 – 05/2014

Entwicklungsingenieurin

- Leitung eines Forschungsprojektes zur Entwicklung einer Standard-Roboter-Zelle
- Simulationsgestützte Analyse von Automatisierungsanlagen in Hinblick auf Taktzeiten und Erreichbarkeiten in den Simulationswerkzeugen RobotStudio, Roboguide und Stäubli Robotics Suite
- On- und Offline-Programmierung von Industrierobotern der Typen ABB, FANUC und STÄUBLI
- Erstellung der Technischen Dokumentation für Automatisierungsanlagen (Betriebs- und Wartungsanleitungen)
- Projektierung und Angebotsausarbeitung
- Marketing (Erstellung von Marketingunterlagen, wie Präsentationen und Broschüren, graphische Unterstützung, Erstellung von Renderings, Schreiben von Marketing-Texten)

ProAutomation GmbH, Wien

02/2009 – 08/2014

Lektorin und Wissenschaftliche Mitarbeiterin

- Mitaufbau eines Kompetenzteams für Mobile Robotik
- Bearbeitung von Forschungsprojekten in den Bereichen Mechatronik und Robotik
- Betreuung von praktischen Studierendenprojekten, wie z. B. die Umsetzung von Industrieroboter-Applikationen
- Koordination und Entwicklung von Lehrveranstaltungen und Curricula
- Lehre in den Bereichen Konstruktionstechnik, Industrierobotik, Modellbildung und Simulation in der Produktion, Medizintechnik und Gesundheitsmechatronik
- Entwicklung von Übungen in der Konstruktionsumgebung SolidWorks, Übungen mit Industrierobotern der Typen ABB, FANUC, EPSON und STÄUBLI sowie Übungen in den Simulationswerkzeugen RobotStudio, Roboguide, RC+ und DELMIA V5/V6 Robotics

Fachhochschule Technikum Wien, Institut für Mechatronics, Wien

Fachhochschule des bfi Wien, Wien

Technologisches Gewerbemuseum (TGM), Wien

Management Center Innsbruck (MCI), Innsbruck

09/2006 – 10/2011

Bachelor- und Masterstudium Mechatronik/Robotik

Fachhochschule Technikum Wien, Wien

09/1998 – 06/2006

Reifeprüfung mit dem Ausbildungsschwerpunkt Naturwissenschaft

Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 21