



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Softwarebasierte Evaluierung menschlicher Arbeit in der industriellen Baustellenmontage

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

(E330 Institut für Managementwissenschaften,
Bereich: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

Patrick Rupprecht, MSc MSc MA

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich:
Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Thomas Mayr BSc

01425113

Loherberg 22

4760 Raab

Raab, im März 2021

Thomas Mayr



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Raab, im März 2021

Thomas Mayr

Danksagung

Mein innigster Dank gilt Univ. Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund und Patrick Rupprecht MSc MSc MA, die mir geholfen haben, dieses Projekt auf den Weg zu bringen, und mir dabei die Themen der Arbeitswissenschaften nähergebracht haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ohne deren Unterstützung mein Studium nicht möglich gewesen wäre. Außerdem gilt mein Dank auch den Studienkollegen und Freunden, welche mich immer unterstützt und motiviert haben.

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Digitalisierung und dem Voranschreiten des demographischen Wandels ist es nötig den Aspekten der individuellen Arbeitsplatzgestaltung besondere Beachtung zu schenken. Mit virtuellen Werkzeugen können daher ganze Fabriken dargestellt werden, um so die Arbeitsabläufe zu planen, kontrollieren und zu adaptieren. Darüber hinaus können mit diesen virtuellen Werkzeugen einzelne Arbeitsplätze simuliert und mit diversen Bewertungsmethoden analysiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es zu bestimmen, welches Softwarepaket zur Evaluierung menschlicher Arbeit in der industriellen Baustellenmontage, anhand von ergonomischen und wirtschaftlichen Parametern, bessere Ergebnisse liefert. Dies soll den Einsatz von virtuellen Arbeitsplatzanalysen in Zukunft rechtfertigen.

Als Grundlage dient eine Videoaufnahme des realen Arbeitsplatzes, welche einen Laminierungsprozess einer Flugzeugtriebwerkhalbschale zeigt. Dieser Prozess wurde zum einen in Siemens Tecnomatix – Process Simulate und zum anderen in EMA Work Designer (imk automotive) nachmodelliert. Zuerst bildet ein Referenzmodell mit einem identischen Digitalen Menschmodell die Basis für das weitere Vorgehen. Da bereits in diesem Vergleich zwischen beider Softwarepakete und realem Versuch ein hohes ergonomisches Risiko auftritt, wurde die Datenlage durch die Simulation mit je zwei weiteren Digitalen Menschmodellen erweitert. Während die ökonomischen Parameter wie Laufwege, Prozesszeit und Verschwendung sich als sehr brauchbar herausstellten, kam es bei der Betrachtung aus ergonomischer Sicht zu Schwierigkeiten bezüglich der Erreichbarkeit. Daraufhin wurde ein überarbeitetes Konzept des Arbeitsplatzes entwickelt. Diese Überarbeitung stellt sicher, dass ein Worker jeglicher Körpergröße den Laminierungsprozess ohne ergonomisches Risiko vollziehen kann. Die Bewertung der Ergonomie eines Softwarepaketes liefert eine sehr große Übereinstimmung mit der Bewertung des realen Versuches.

Ohne der Betrachtung mit virtuellen Instrumenten wäre die unzureichende Erreichbarkeit und vor allem die hohen ergonomischen Belastungen dieses use cases nicht beachtet worden. Die Validität der Bewertung der Ergonomie ist zumindest bei einem Softwarepaket gegeben. Dies erlaubt es aus einer diskretisierten, manuellen Bewertungsmethode eine kontinuierliche Bewertung bereitzustellen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten, um über einen gesamten Prozess Kenntnis über die Ergonomie zu erlangen. Weiters kann eine Simulation mit verschiedenen anthropometrischen Variablen durchgeführt werden, was eine Individualisierung des Arbeitsplatzes in Aussicht stellen kann. Fraglich bleibt, wie die Gelenkstellungen und kinematischen Zusammenhänge des Individuums das Ergebnis beeinflussen. Diese Beurteilung obliegt den Toleranzen der eingesetzten Bewertungsmethode.

Abstract

The ways of increasing digitalization and the progress of the demographic change leads to develop working areas, which are adaptive concerning the individual needs and parametric of the worker. With virtual tools it is possible to illustrate whole factories for planning, controlling and adapting the workflow. Moreover, these virtual tools are capable to simulate single workstations and analyze them with evaluation methods. The aim of this work is to determine, which software package is more suitable for evaluating human work in the industrial site assembly, concerning ergonomic and economic characteristics. This should justify the application of virtual workplace analyses in the future.

A video recording of the real workplace serves as a basis, which shows the laminating process of the half-shell from a jet-propulsion engine. This process was simulated on the one hand with Siemens Tecnomatix – Process Simulate and on the other hand with EMA Work Designer (imk automotive). At first a referencing model with the identical digital human model from every software, serves as base for further actions. Even in the first comparison between the two software packages and the real experiment, high ergonomic risks occurred. Therefore, the amount of data was extended with two different digital human models for each software package. Whereas the economic parameters like covered distance, process time and wastage are convenient, the view on the ergonomic aspects show difficulties concerning reachability. Subsequently, a revised concept of the workplace was developed. The revision ensures, that every worker with any height can execute the laminating process without any ergonomic risk. The evaluation concerning ergonomic aspects of the software packages yields high evidence with the ergonomic evaluation of the real experiment.

Without the consideration by virtual tools an insufficient reachability and especially the high ergonomic loads in this use case would be neglected. At least one software package provides validity on evaluation of the ergonomic aspects. Which allows the user to create continuous evaluation from a discretized and manual evaluation. This opens new opportunities to gain knowledge throughout the whole process. Furthermore, the simulation can be executed with different anthropometrical variables. The question of the influence from joints and the kinematic coherence between every individuum on the evaluation remains. This assessment is subject to the tolerances of the evaluation method which is used.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung	4
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Forschungsfrage.....	5
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit	6
2	Theoretische Grundlagen.....	8
2.1	Industrielle Baustellenmontage	8
2.1.1	Assistenzsysteme	9
2.1.2	Individualisierung menschlicher Arbeit in der Baustellenmontage	10
2.2	Grundlagen virtueller Ergonomie.....	11
2.2.1	Arbeitswissenschaft und Ergonomie	11
2.2.2	Anthropometrie	12
2.2.3	Fähigkeits- und Belastungsprofil des Menschen.....	13
2.2.4	Standardmodelle zur Evaluierung der Ergonomie und Ökonomie	17
2.2.5	Digitale Menschmodelle	23
2.3	Softwarebasierte Evaluierung menschlicher Arbeit	31
2.3.1	Kontinuierliche und diskrete Simulation	31
2.3.2	Usability	31
2.3.3	Vergleichsstudie von DMM und realen Ergebnissen.....	32
3	Softwarebasierte Evaluierung der Baustellenmontage	34
3.1	Analyse des Use-Cases, Umgebung und Population.....	34
3.2	Analyse der Beschränkungen der Softwaresysteme	37
3.3	Durchführung der ergonomischen und wirtschaftlichen Analyse	38
3.4	Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse	39
3.5	Entwicklung von Entwürfen und Verbesserungsvorschlägen	41
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Evaluierung.....	43
4.1	Auswertung TX vs. EMA.....	43
4.2	Auswertung des realen Versuches.....	51
4.3	Schlussfolgerungen real vs. TX vs. EMA.....	54
4.4	Auswertung des individualisierten Prozesses.....	56

4.5	Diskussion der Resultate in Bezug Humanisierung vs. Rationalisierung.....	57
5	Zusammenfassung & Ausblick.....	59
	Literaturverzeichnis	61
	Abbildungsverzeichnis.....	64
	Formelverzeichnis	66
	Tabellenverzeichnis.....	67
	Anhang	68
	Grundlagen Software EMA (imk automotive).....	68
	Grundlagen Software Siemens Tecnomatix.....	76

1 Einleitung

Der Planet Erde befindet sich stets im Zustand der Veränderung. Die Veränderung wurde hauptsächlich durch die Evolution der Natur vorangetrieben, doch in den vergangenen Jahrtausenden wurde zunehmend von Menschen in die natürliche Evolution eingegriffen. Die wachsende Bevölkerung und Wirtschaft rufen einen enormen Konsum an Ressourcen hervor. Aus diesem Grund befasst sich die Industrie zunehmend mit Themen wie Klimaerwärmung, Ressourcenknappheit bzw. Ressourcenschonung, soziale Faktoren und Nachhaltigkeitsstrategien, um eine erfolgreiche Zukunft zu sichern.¹

Diese spezielle, wirtschaftliche Dynamik und Globalisierung fordert von der Industrie Anpassungen, welche den Umgang mit steigenden Kostendruck, steigender Variantenvielfalt, immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen, schwankenden Stückzahlen und zunehmender Digitalisierung erleichtern.

Ein klassischer Produktionsbetrieb stellt die Aufgabe des Produktionssystems in den Vordergrund und dem Arbeiter wird eine passive Rolle zugeschrieben. Jedoch geht die Entwicklung von zukünftigen Produktionsbetrieben in die Richtung einer Zentralisierung des Arbeiters. Folglich wird der Stellenwert der Arbeitskraft erhöht, um eine höhere Arbeitsleistung zu erreichen. Nicht nur die Arbeitsleistung wird durch die Aufwertung des Arbeiters erhöht, auch mentale Aspekte wie Zufriedenheit und soziales Umfeld werden dadurch verbessert, wenn eine individuelle Anpassung des Arbeitsplatzes ermöglicht wird.²

Auch wenn der Begriff „Industrie 4.0“ vernetzte und hochautomatisierte Systeme beinhaltet, wird der Mensch aus einer Fabrik nicht wegzudenken sein. Hochautomatisierte Systeme können im Bereich der Flexibilität und Beherrschbarkeit schnell an ihre Grenzen stoßen. Darum ist es wichtig den Mensch in einer Fabrik eine hohe Bedeutung anzurechnen. Neben den sehr hoch ausgebildeten motorischen Fähigkeiten besitzt der Mensch die Fähigkeit selbstständig zu denken und selbstständig Entscheidungen zu treffen.

Die Herausforderung des demographischen Wandels wird die Industrie in Zukunft mehr denn je fordern. Die Belegschaft eines Betriebes wird durch Erhöhungen des Pensionsantrittsalters immer älter. Mit steigendem Alter nimmt die physische Leistungsfähigkeit eines Menschen stetig ab. Deshalb wird es wichtig werden die Mensch-Maschine-Interaktion zu forcieren, um älteren Arbeitnehmern die Chance zu geben den Arbeitsstandard hochzuhalten. Dies kann mit umgebungsintegrierten Computertechnologien oder individuell anpassbaren Assistenzsystemen und

¹ vgl. Kohl [u. a.], 2020, S. 294.

² vgl. May [u. a.], 2015, S. 103.

Arbeitsplätzen erreicht werden. Um diese Aspekte der zukünftigen Arbeitsplätze abzudecken, ist es notwendig virtuelle Abbilder und Modelle der Arbeitsplätze zu erstellen, um bessere Arbeitsbedingungen bereitzustellen.

Die Planung und Entwicklung von Prozessen haben sich über die vergangenen Jahre signifikant verändert. Neben den anfänglichen computerunterstützten Systemen (CAx – computer aided X) und der einhergehenden Etablierung dieser Systeme im Produktlebenszyklus, gewinnt die Virtualisierung von Arbeitsprozessen mehr und mehr an Bedeutung. Neben dem Erfolg der CAx Systeme im Bereich der Planung und Entwicklung, versucht man zunehmend virtuelle Abbilder von Arbeitsplätzen oder sogar Fabriken in den Fokus zu nehmen. Dabei rücken Faktoren wie Ergonomie und Usability in den Vordergrund, um den Menschen in den Mittelpunkt der technischen Systeme zu stellen.

Um die virtuellen Arbeitsplätze und Fabriken erstellen zu können, kommen digitale Menschmodelle (DMM) zum Einsatz. Dies sind virtuelle Abbilder des Menschen, welche die physischen Abmessungen, koordinativen und interaktiven Fähigkeiten des realen Menschen widerspiegeln sollen. Mit diesen digitalen Menschmodellen kann sowohl ein Mehrwert in der Planung hinsichtlich Produktergonomie als auch in der Produktions- und Prozessergonomie generiert werden.³

1.1 Problemstellung

Laut einer Erhebung der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz, zählt muskuläre Veränderung zu den meist verbreitetsten, beruflichen Krankheiten in Europa. Diese muskulären Veränderungen verursachen nicht nur gesundheitliche Probleme der Arbeitskraft, sondern auch enormen wirtschaftlichen Schaden für den Arbeitgeber, bis hin zu Mehrkosten im Bereich des Sozialsystems. Beispielsweise kostete diese muskuläre Degenerierung in Frankreich im Jahr 2006 ca. 710 Millionen Euro und 7 Millionen Arbeitstage. Der Trend dieser Statistik zeigt weiter nach oben.⁴

Da sich dieser Trend fortsetzen wird, wird die virtuelle Analyse von Arbeitsplätzen in Zukunft mehr an Bedeutung gewinnen.

Ein weiterer Grund für den Einsatz von virtuellen Werkzeugen in der Arbeitsplatzgestaltung ist der Aufwand, welcher erforderlich ist, menschliche Arbeit bezogen auf die Ergonomie zu bewerten. Betrachtet man die herkömmliche Vorgangsweise ohne digitale Unterstützung des Montageprozesses, wird deutlich, dass die Ergonomie nur durch Prototypen des Montagearbeitsplatzes erfasst werden kann. Die Montagearbeitsplätze werden sehr wohl mit Computerunterstützung erstellt,

³ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, 3f.

⁴ vgl. European Agency for Safety and Health at Work, 2010, S. 100.

aber dynamischen Simulationen bezogen auf verschiedenen Körperabmessungen wird wenig Beachtung geschenkt. Darüber hinaus wird oftmals der Ergonomie erst Beachtung geschenkt, wenn der Arbeitsplatz schon in Betrieb ist. Daher ist es wichtig und vor allem kostengünstiger Ergonomie Aspekte des Arbeitsplatzes schon in der Produktionsentwicklung Beachtung zu schenken.

1.2 Zielsetzung

Aufgrund der Tatsache, dass virtuelle Ergonomie Lösungen in der Zukunft eine bedeutende Rolle zugewiesen wird, liegt die Zielsetzung diese Arbeit ganz klar auf der Überprüfung wie valide die virtuelle Simulation mit dem realen Arbeitsplatz gegenübergestellt und verglichen werden kann.

Mit der Beantwortung der Forschungsfrage hinsichtlich der Abweichung von zwei Simulationen und dem realen Versuch wird die Performance der softwarebasierten Ergonomie Verfahren bewertet. Dies ist erforderlich, um in Zukunft den Einsatz von virtuellen Ergonomie Simulationen zu rechtfertigen.

1.3 Forschungsfrage

Im Vordergrund dieser Arbeit steht eine Analyse der Beziehung zwischen Humanisierung und Rationalisierung des Arbeitsplatzes. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei einer Humanisierung des Arbeitsplatzes (individuelle Anpassung) und der Wirtschaftlichkeit hinsichtlich produktionstechnischer Parameter (Prozesszeit, Durchlaufzeit, ...) um Ansätze handelt, welche im Gegensatz zueinanderstehen, wird in dieser Arbeit besonderen Wert darauf gelegt die Abhängigkeit zu analysieren. Dabei soll herausgefunden werden, bis zu welchem Grad eine Individualisierung in Bezug auf die Arbeitsplatzergonomie vorgenommen werden kann, ohne die Wirtschaftlichkeit zu beeinträchtigen. Dies wird mit verschiedenen Varianten und Szenarien in der Software EMA (imk automotive) und Siemens Tecnomatix simuliert. Eine Individualisierung des Arbeitsplatzes ist erforderlich, weil jeder Mensch wiederum ein Individuum hinsichtlich Körpergröße, Körperform und Physiologie, darstellt.

Konkret werden zwei Forschungsfragen definiert, welche im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden.

- Wie verhält sich die Prozesszeit bzw. Durchlaufzeit gegenüber einer individuellen Anpassung hinsichtlich ergonomischer Gesichtspunkte (z.B. Körpergröße) des Arbeitsplatzes?
- Da mit Siemens Tecnomatix und EMA (imk automotive) zwei Simulationssoftwarepakete verwendet werden, wird es zu einer Validierung und Bewertung beider Simulationsszenarien kommen. Welches der beide Softwarepakete ist für den Einsatz zur Evaluierung menschlicher Arbeit

bezüglich ergonomischer und wirtschaftlicher Parameter in der industriellen Baustellenmontage besser geeignet?

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Validierung menschlicher Arbeit an einem konkreten Arbeitsplatz. Deshalb wird der Fokus auf Produktions- und Prozessergonomie gerichtet.



Abbildung 1: Forschungsschema

In der Einleitung steht das Aufzeigen der Problemstellung und die Zielsetzung im Vordergrund. In der Zielsetzung werden die zu beantwortenden Forschungsfragen definiert, welche im späteren Verlauf beantwortet werden. Kapitel 2 befasst sich mit den Theoretischen Grundlagen zu den Themen Virtuelle Ergonomie und dessen Verbindung zu arbeitswissenschaftlichen Aspekten. Außerdem werden

zeitwirtschaftliche Standardverfahren, sowie Funktionen Digitaler Menschmodelle beleuchtet und mit Literatur des aktuellen Standes der Technik belegt. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Methodik zum Vergleich von Simulationssoftwarepaketen mit einem realen use case, welcher eine Evaluierung ermöglicht. Darüber hinaus wird eine Abgrenzung der Modellbildung bezüglich der Simulationssysteme vorgenommen. Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse der angewandten Methodik aufgeführt und in Bezug auf die Forschungsfrage beziehungsweise der Problemstellung abgeleitet. Abschließend wird in dieser Arbeit im Kapitel 5 ein kritischer Blick auf die Ergebnisse und der angewendeten Methodik angegeben und ein Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen gewagt. Im Anhang ist eine Kurzbeschreibung zur Bedienung der Softwarepakete EMA und TX gegeben, welche einen Einblick in die Erstelloperationen und Arbeitsweise der Software bieten soll.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit, welche in drei Bereiche unterteilt werden können. Zu Beginn wird die behandelte Form der Montage erklärt, welche sich auf die industrielle Baustellenmontage beschränkt. Mit den grundlegenden Definitionen von den Begriffen Arbeitswissenschaft und Ergonomie wird zu den Evaluierungsverfahren hinsichtlich Ergonomie und Ökonomie übergeleitet. Fortlaufend wird auf die Grundlagen der virtuellen Ergonomie eingegangen, welche die geometrische Vermessung, Fähigkeiten und Belastungen des Menschen beschreibt. Außerdem wird das Digitale Menschmodell mit seinen Funktionen beschrieben. Zum Abschluss dieses Kapitels wird auf die verwendeten Softwarepakete mitsamt grundlegender Simulationstechnik eingegangen.

2.1 Industrielle Baustellenmontage

Das Hauptmerkmal einer Baustellenmontage oder auch Montage nach dem Platzprinzip ist, dass sich das zu montierende Endprodukt während der Montage immer am selben Platz befindet. Die zu montierenden Teile und Baugruppen werden an diesem Ort bereitgestellt. Das arbeitende Personal wird auch am nicht mobilen Montageort bereitgestellt und kann bei Bedarf variiert werden. Die klassische Baustellenmontage kommt zum Einsatz, wenn es sich um geometrisch bedingt zu große Abmessungen des Endproduktes handelt, wie beispielsweise ein Schiff oder Flugzeug, oder wenn es sich um sehr komplexe und individuell zu-montierende Endprodukte handelt. Die Montagebetriebsmittel und Montagewerkzeuge müssen mobil und universell ausgelegt werden und vom jeweiligen Montagearbeiter zur Baustelle befördert werden. Die Baustellenmontage zeichnet sich dadurch aus, dass sie einen guten Flexibilitätsgrad, in Bezug auf Mitarbeiter-Einsatz, Planungs- und Steuerungsaufwand und der Komplexität der Montageaufgaben besitzt. Die Nachteile der Baustellenmontage liegt im Bereich des hohen Platzbedarfes, den langen Durchlaufzeiten, dem aufwändigen Materialfluss und der langen Einarbeitungszeit der Mitarbeiter.⁵

Abbildung 2 zeigt links das Schema einer industriellen Baustellenmontage nach Schilling. Der Montageplatz befindet sich zentral und wird umgeben von allen zu montierenden Teilen. Der Werker transportiert das benötigte Material zum zentralen Montageplatz oder zum Arbeitstisch, um die Assemblierung bzw. Vorassemblierung vorzunehmen.

Weiters wird auf der rechten Seite von Abbildung 2 eine reale Konstellation einer industriellen Baustellenmontage eines Flugzeugteilezulieferers gezeigt.

⁵ vgl. Lotter u. Wiendahl, 2006, S. 104.

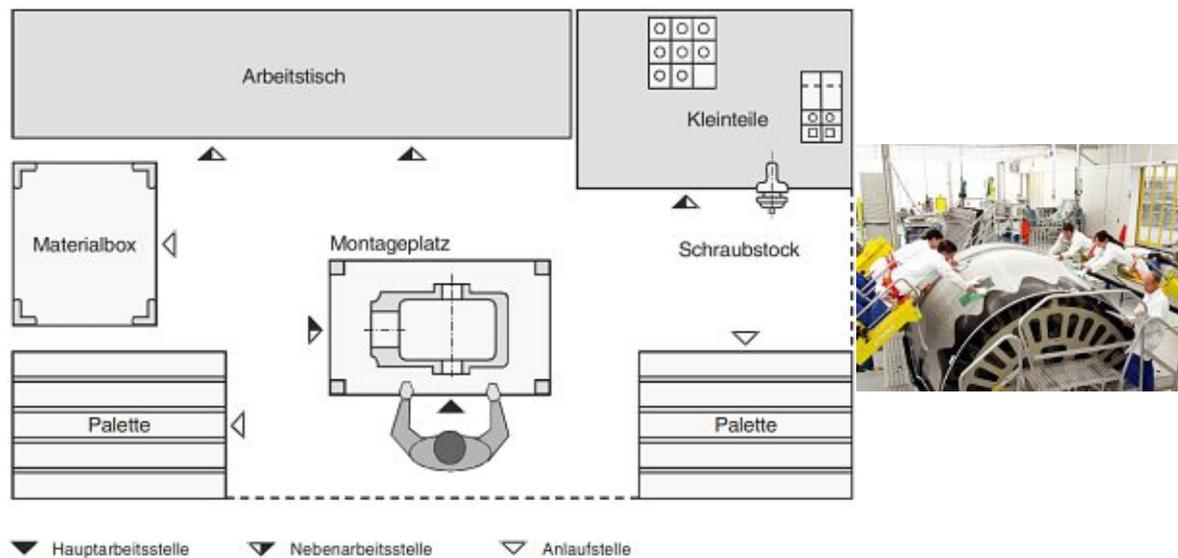


Abbildung 2: Baustellenmontageplatz-Schema nach Schilling und reale Konstellation (© FACC) ⁶

2.1.1 Assistenzsysteme

Die Entwicklung in Richtung kürzerer Innovationszyklen der Produktvarianten und die daraus zunehmende Komplexität in den Prozessabläufen bei Fertigung, Montage und Logistik, führen dazu, dass die physischen und psychischen Belastungen auf den Werker kontinuierlich steigen. Um diesen Belastungen entgegenzuwirken, ist der Einsatz von so genannten Assistenzsystemen unabdingbar. Unterstützung hinsichtlich physischer Arbeit bieten so genannte Cobots, Exosekelle oder Fähigkeitsverstärker. Dabei spielt die Berücksichtigung der Ergonomie eine wesentliche Rolle. Um den Einsatz physisch unterstützende Assistenzsysteme zu rechtfertigen, ist es erforderlich die ergonomischen Belastungen am Arbeitsplatz zu kennen. Diese Lücke im Wissen bei der Auslegung des Arbeitsplatzes soll die Brücke zur Verwendung von virtuellen Ergonomieinstrumenten argumentieren. Jedoch kann die Auslegung hinsichtlich physischer Assistenzsysteme bzw. Ergonomie sehr schnell in die Klasse „one fits all“ fallen. Daher ist die Beachtung der Individualisierungsaspekten des Arbeitsplatzes in den Vordergrund zu stellen.⁷

Durch die Komplexität und Diversität der Produkte werden die Werker auch psychisch mehr gefordert. Durch den Einsatz von digitaler und kognitiver Assistenzsysteme wird eine effiziente, situationsgerechte und papierlose Steuerung der Fertigung, Montage und Logistik möglich. Die Einarbeitungszeit auf den Arbeitsplatz wird mittels kognitiver und digitaler Assistenzsystemen verringert. Darüber hinaus wird der Werker auf auftretende Fehler in der Ausführung des Arbeitsprozesses aufmerksam gemacht und kann somit zu einer Erhöhung der Qualität beitragen.

⁶ Lotter u. Wiendahl, 2006, S. 175.

⁷ vgl. Mayrhofer [u. a.], 2019, S. 1ff.

2.1.2 Individualisierung menschlicher Arbeit in der Baustellenmontage

Durch die Herausforderung des demographischen Wandels und dem zunehmenden Fehlen an Fachkräften ist es erforderlich den Arbeitsplatz der Zukunft zu attraktivieren. Montagesysteme mit der Fähigkeit adaptiv und individuell sich den geometrischen Gegebenheiten des Werkers anpassen zu können, nennt man individualisierbare Montagesysteme. Der Montagearbeitsplatz soll eine Anfangseinstellung vorgeben (default-setting), welche vom Werker mit wenig Aufwand verändert werden kann. Abgesehen von manueller Adjustierung am Montagearbeitsplatz, können auch hinterlegte Charakteristiken mit automatischer Adjustierung zur Anpassung beitragen. Dabei werden mittels „scanning“ (fingerprint-, facial- oder iris-scanner) die persönlichen Daten bezüglich Körpergröße, Händigkeit und Gewicht ausgelesen. Auf Grundlage dieser Daten wird der Montagearbeitsplatz ergonomisch eingerichtet. Eine andere Möglichkeit zur Erfassung von Daten für die Anpassung des Arbeitsplatzes, bilden eine so genannte adaptive Erkennung. Dabei erfassen Kamerasysteme mittels Bilderkennung Körperbewegungen, Gesten und anthropometrische Charakteristiken und passen den Arbeitsplatz hinsichtlich dieser Parameter an.⁸

Eine sinnvolle Einteilung in die Individualisierungsmöglichkeiten bietet die „Synopsis der Individualisierungsmöglichkeiten von Montagearbeitsplätzen“. Dabei wird die Individualisierung in sieben Dimensionen festgelegt.⁹

1. Arbeitshöhe
2. Blick- und Greifbereich, Händigkeit
3. Beleuchtung
4. Belüftung und Klima
5. Akustische Situation
6. Nutzung von Informations- und Assistenzsystemen
7. Weitere Aspekte

Anhand diesen sieben Dimensionen der Individualisierungsmöglichkeiten sieht man deutlich, dass die geometrische Anpassung des Montagearbeitsplatzes mit Arbeitshöhe und Blick- und Greifbereich bzw. Händigkeit nur einen Bruchteil des Ganzen darstellt. Einen großen Anteil wird der Arbeitsumgebung zuteil, welcher Lichteinflüsse, Belüftung bzw. Klima und akustische Verhältnisse beurteilt.

⁸ vgl. Rupprecht u. Schlund, S. 4.

⁹ vgl. Schlund [u. a.], 2018, S. 6f.

2.2 Grundlagen virtueller Ergonomie

Die virtuelle Ergonomie wird als Teildisziplin der Themenfelder in der Arbeitswissenschaft gesehen und wird wie folgt definiert:

„Virtuelle Ergonomie bezeichnet die rechnergestützten Methoden und Werkzeuge zur ergonomischen Gestaltung von Produkten, Arbeitssystemen und Prozessen. Unter dem Begriff werden Software-Werkzeuge oder Teile davon zusammengefasst, mit denen arbeitswissenschaftliche Ziele verfolgt und ergonomische Gestaltungen durchgeführt werden können.“¹⁰

Durch die Zunahme der virtuellen Entwicklungs- und Planungsprozessen rücken in den vergangenen Jahren vermehrt Tools virtueller Ergonomie in den Fokus. Dabei können Sicht-, Erreichbarkeits- und Belastungsanalysen vorab geklärt werden und sind dabei grundlegend für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion, Usability von Produkten und der Ergonomie am Arbeitsplatz.

2.2.1 Arbeitswissenschaft und Ergonomie

„Eine Kerndefinition der Arbeitswissenschaft beschäftigt sich mit der – jeweils systematischen – Analyse, Ordnung und Gestaltung der technischen, organisatorischen und sozialen Bedingungen von Arbeitsprozessen mit dem Ziel, dass die arbeitenden Menschen in produktiven und effizienten Arbeitsprozessen

- Schädigungslose, ausführbare, erträgliche und beeinträchtigungsfreie Arbeitsbedingungen vorfinden,
- Standards sozialer Angemessenheit nach Arbeitsinhalt, Arbeitsaufgabe, Arbeitsumgebung sowie Entlohnung und Kooperation erfüllt sehen,
- Handlungsspielräume entfalten, Fähigkeiten erwerben und in Kooperation mit anderen ihre Persönlichkeit erhalten und entwickeln können.“¹¹

Die Ergonomie ist eine Teildisziplin der Arbeitswissenschaft und behandelt speziell die Wechselwirkung zwischen menschlichen und anderen Elementen des Arbeitssystems. Die Absicht der Anwendung von ergonomischen Applikationen ist es das Wohlbefinden des Menschen zu steigern und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren. Grundsätzlich kann die Teildisziplin Ergonomie in zwei Unterkategorien unterteilt werden, die Produktergonomie und die Prozessergonomie. Daraus leiten sich weitere Subdisziplinen wie System-Ergonomie, Informations-Ergonomie, Arbeitsplatz-Ergonomie, kognitive Ergonomie, Software-Ergonomie oder virtuelle Ergonomie ab.¹²

¹⁰ Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 183.

¹¹ Schlick [u. a.], 2010, S. 7.

¹² vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 8f.

2.2.2 Anthropometrie

Anthropometrie kommt vom griechischen Wort „Anthropos“, welches so viel bedeutet wie „Mensch“ und „Metron“ so viel wie „Maß“. Es bezieht sich also auf die Vermessung des menschlichen Individuums.¹³

Die Anthropometrie, also die Lehre von den Masseverhältnissen des menschlichen Körpers, wird für die Konfektion und zur Arbeits-, Arbeitsplatz- und Prozessgestaltung herangezogen.

Die anthropometrischen Körperabmessungen werden anhand von Populationen und Individuen differenziert. Gängige Grundunterscheidungen sind Geschlecht und Perzentil. Ein Perzentil gibt an wieviel Prozent der Menschen in der Grundgesamtheit einer bestimmten Bevölkerungsgruppe bezogen auf ein bestimmtes Körpermaß kleiner sind als der angegebene Wert. Am häufigsten wird die Körperhöhe als Maß herangezogen, jedoch sind auch Armlänge, Schulterbreite, Fingerlänge, etc. auch perzentiliert darstellbar.¹⁴

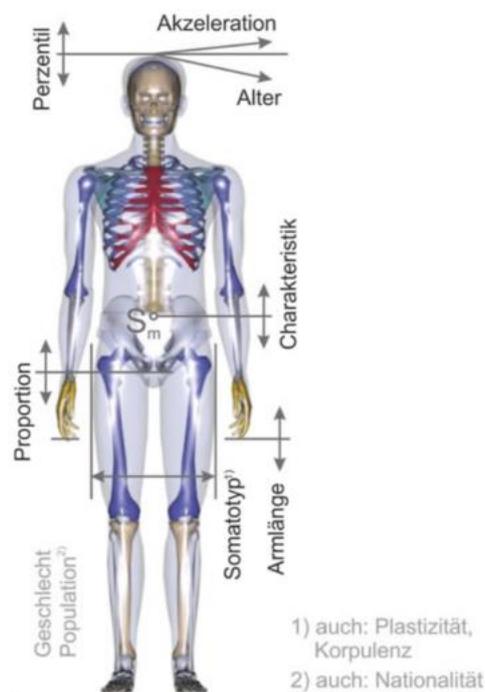


Abbildung 3: gängige Anthropometrische Variablen des menschlichen Körpers¹⁵

Die Körperabmessungen können auch zwischen demographischen Parametern differenziert werden. So spielen sehr wohl Nationalität oder regionale Herkunft, wie Europa Nordamerika oder Asien, eine wichtige Rolle.

¹³ vgl. Charland, 2019, S. 98

¹⁴ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 11.

¹⁵ Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S.12.

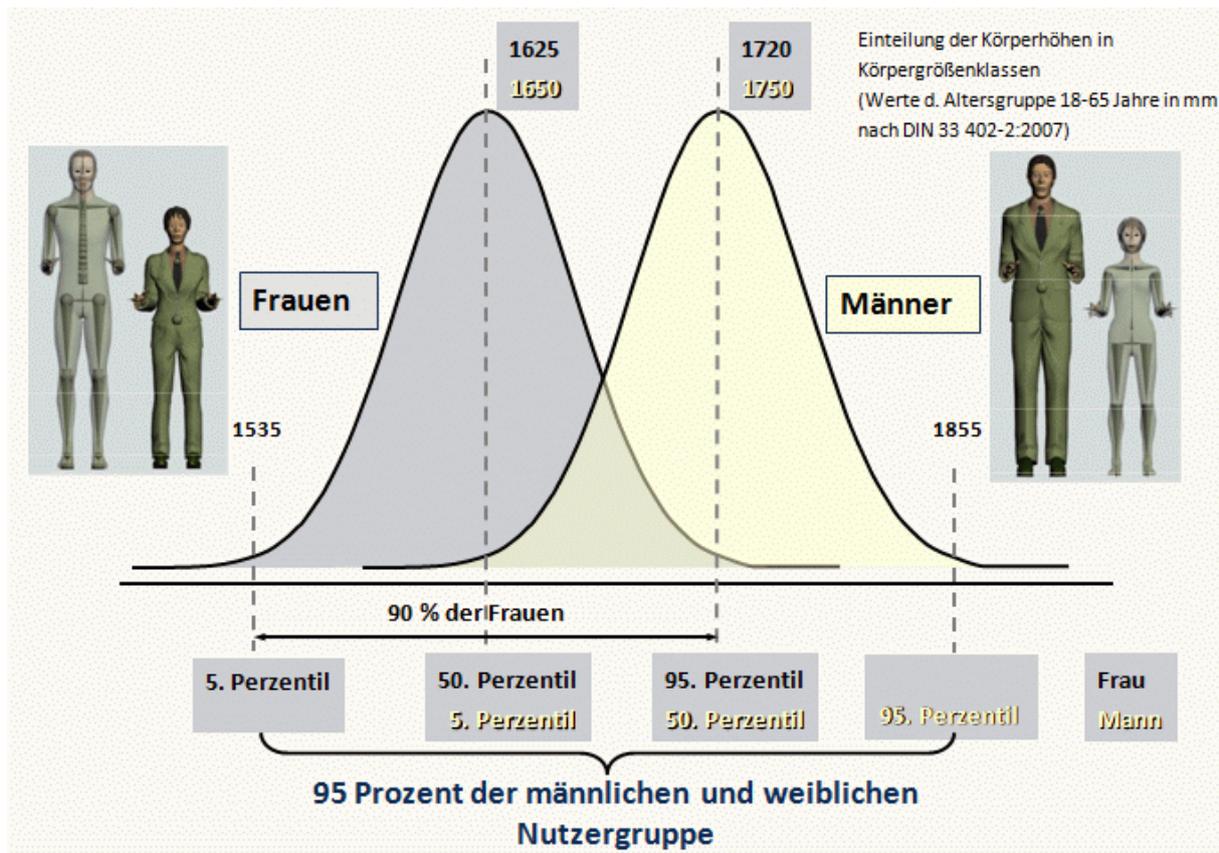


Abbildung 4: Einteilung der Körpergrößenklassen in Anlehnung nach DIN33402-2¹⁶

In Abbildung 4 sieht man eine Darstellung nach KAMUSELLA, welche das Schema der Perzentile sehr gut erklärt. Das 50. Perzentil beschreibt jeweils den Median der Körpergrößenverteilung beider Geschlechter. Aus dieser Stichprobe ist ersichtlich, dass 5% der Frauen die Körpergröße von 1535mm unterschreiten. Bei der Erstellung eines Digitalen Menschmodells weist die Frau also eine Körpergröße von 1535mm auf.

2.2.3 Fähigkeits- und Belastungsprofil des Menschen

Auf der einen Seite bilden die anthropometrischen Beschaffenheiten das geometrische Grundgerüst des Menschen und auf der anderen Seite beschreiben physiologische und psychische Eigenschaften die Leistungsfähigkeit des Menschen. Arbeitswissenschaftlich gesehen bestehen die leistungsbeschreibenden Eigenschaften des Menschen aus Perzeption, Koordination, Kondition und Kognition. Diese leistungsbeschreibenden Eigenschaften können sich während des Arbeitslebens weiterentwickeln und bilden so eine Adaption der Leistung aus. Die Perzeption eines Menschen beschreibt die sinneswahrnehmenden Vorgänge, die Bewertung von aufgenommenen Informationen übernehmen. Unterstützt wird die Perzeption von den fünf Sinnen des Menschen: Sehen, Hören, Fühlen, Riechen und Schmecken. Der zweite Grundpfeiler der Fähigkeit des Menschen beschreibt die

¹⁶ Schlick [u. a.], 2018, S. 64.

Koordination. Die Koordination setzt die durch die Perzeption aufgenommenen Informationen in kinematische Aktionen um. Dabei übernimmt die Koordination die Steuerung und Regelung der Bewegungen. Aus arbeitswissenschaftlicher Sicht ist auch die Fähigkeit der Mobilität und Stabilität eines Menschen in die Koordination einzuordnen. Diese Bewegungsbefähigung weist durch die Population eine sehr hohe Streuung auf und ist somit ein wichtiger Punkt im Rahmen der Arbeitsplatzgestaltung. Um die durch die Perzeption zur Verfügung gestellten Informationen verarbeiten und über die Koordination kinematisch ausführen zu können, braucht es Energie. Dieser Teil der Fähigkeit des Menschen wird durch die Kondition, der physische Leistungsfähigkeit, bestimmt. Aus sportwissenschaftlicher Sicht beinhaltet die Kondition die Teilbereiche der Kraft, Schnelligkeit und Ausdauer, welche physiologisch gesehen auch in der Arbeitswissenschaft und somit auch in der Arbeitswelt maßgebend sind.¹⁷

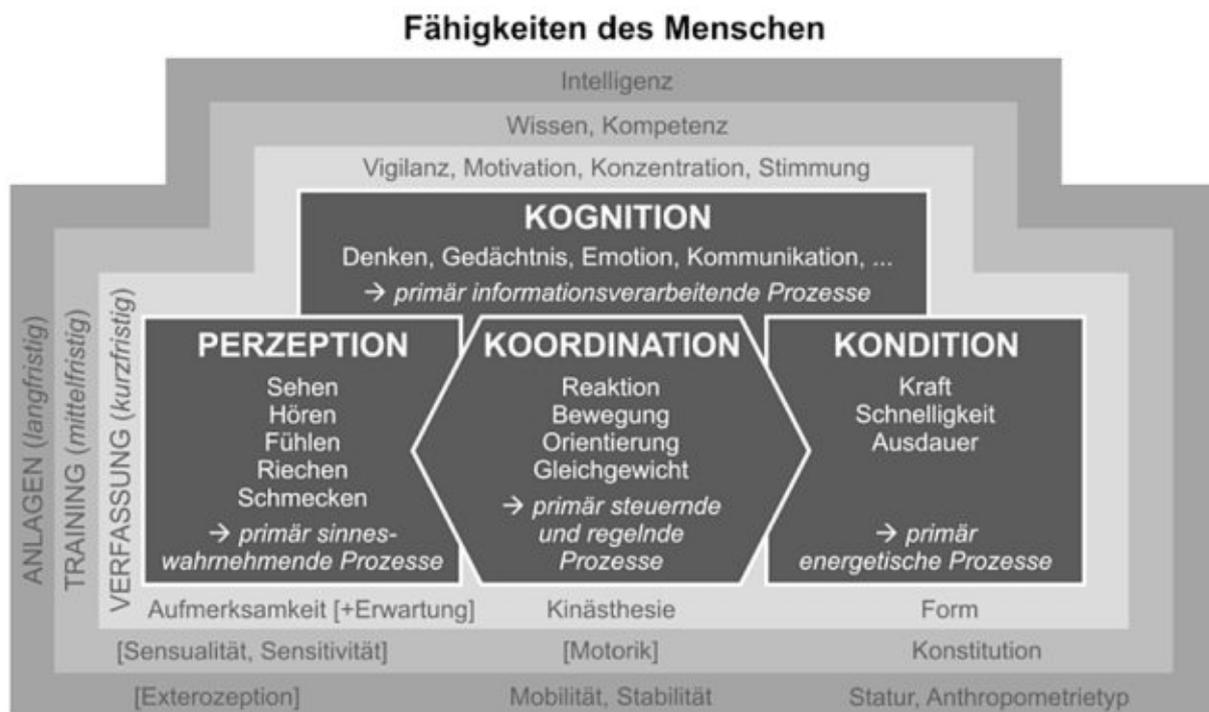


Abbildung 5: Zusammensetzung der Bestandteile der menschlichen Fähigkeiten¹⁸

Durch die Fähigkeit der Kognition werden die Perzeption, Koordination und Kondition angesteuert. Die Kognition übernimmt, sozusagen eine übergeordnete, informationsverarbeitende Aufgabe und schließt das Denken, Gedächtnis und die Kommunikation mit ein.

¹⁷ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 27ff.

¹⁸ Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 28.

Belastungen auf den Menschen

Um die Belastung des Menschen unter den Arbeitsbedingungen beschreibbar zu machen, wurde ein theoretischer Ansatz in Bezug auf die technische Mechanik hergestellt. Die Belastung des Arbeitssystems auf den Menschen beinhaltet zum einen die Arbeitsorganisation, welche sich in Kommunikation, Veränderungsprozessen und Hierarchiebeziehungen widerspiegeln. Zum anderen die Arbeitsumwelt, welche die Faktoren von Licht, Lärm, Vibrationen, Luft und Klima beinhaltet. Die kontinuierliche Arbeitsbelastung des Arbeitssystems wird durch die Arbeitsaufgabe beschrieben. Diese drei Gruppen, Arbeitsorganisation, Arbeitsumwelt und Arbeitsaufgabe spiegeln im mechanischen Ersatzmodell die Größe der äußeren Kraft der Gewichtskraft wider.

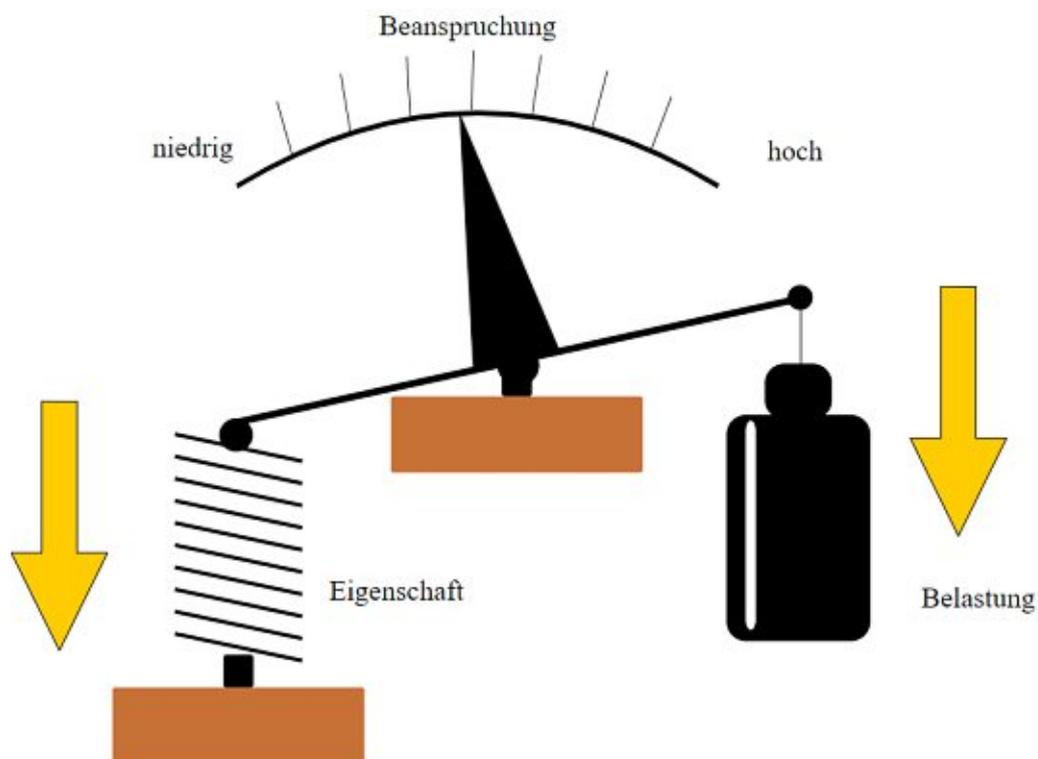


Abbildung 6: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes nach REFA

Durch die Gewichtskraft wird das Ersatzmodell beansprucht, dabei bildet die Federkraft das Gleichgewicht des Systems. Die Federlänge setzt sich zusammen aus einwirkender Kraft und Federkonstante. Dabei kann die Federkonstante als individueller Parameter des Menschen betrachtet werden, welcher von den Fähigkeiten des Menschen abhängt. Durch die Federlänge, welche sich in der Gleichgewichtslage einstellt, wird im Auflager eine gewisse Neigung erreicht. Diese Neigung gibt den Ausschlag und somit die Auswirkung der Belastung auf den Menschen durch die Beanspruchung an.¹⁹

¹⁹ vgl. Schlick [u. a.], 2010, S. 38.

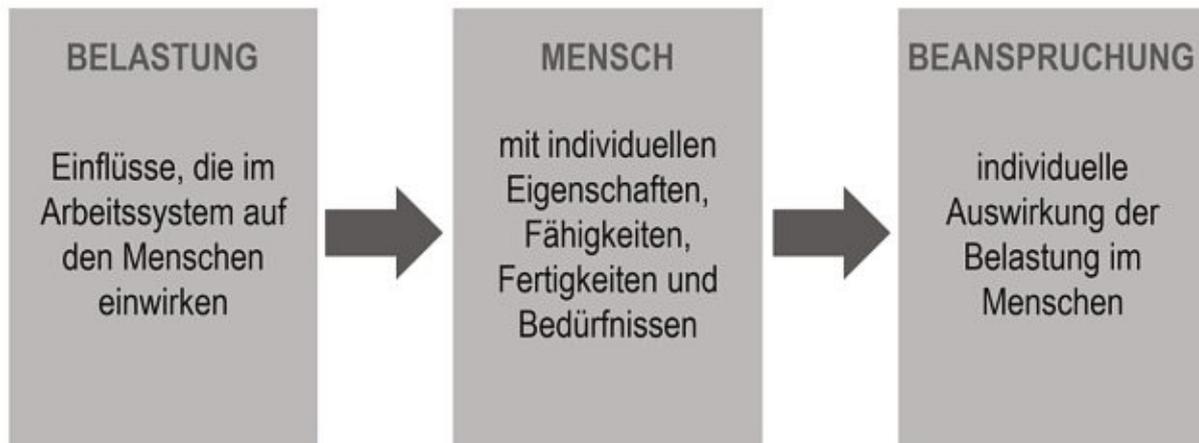


Abbildung 7: Vereinfachte Belastungs-Beanspruchungs-Darstellung nach ROHMERT 1983²⁰

Da die Belastung vom Arbeitsplatz bzw. vom Arbeitgeber vorgegeben wird, kann dieser Parameter sehr gut beeinflusst werden. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Belastungstypen. Auf der einen Seite die situationsbezogene Belastung, welche sich an der Arbeitsumgebung orientiert, und auf der anderen Seite die aufgabenbezogene Belastung.

Situationsbezogene Belastungsformen haben einen Effekt auf bestimmte Organsysteme, wie beispielsweise klimatische Bedingungen bzw. Lärm, welche sich auf die Thermoregulation bzw. auf das auditive System des Menschen niederschlagen.

Aufgabenbezogene Belastungsformen treten hinsichtlich energetischer und informationsverarbeitender Prozesse auf. Beispielhaft für energetische Prozesse sind Handhaben von schwere Lasten oder Arbeiten mit hoher Genauigkeit. Informationsverarbeitende Prozesse hingegen beziehen sich beispielsweise auf Schwierigkeiten in der Informationsaufnahme, wie schlecht lesbare Anzeigen. Aufgabenbezogene Belastungsformen können auch qualitativ bewertet werden. Dabei werden die Prozesse in Bewegungselemente unterteilt und sind somit bewertbar. Diese Bewertung wird mit diversen Analysemethoden umgesetzt, zum Beispiel nach MTM.

Weiters kommt es im Verlauf des Arbeitsprozesses zu Ermüdungserscheinungen, welche auch mit Übung und Gewöhnung ausgeglichen werden können. Jedoch ist diese Kompensation eine sehr stark individuelle Komponente und folglich schwer zu quantifizieren.

²⁰ Schlick [u. a.], 2010, S. 39.

2.2.4 Standardmodelle zur Evaluierung der Ergonomie und Ökonomie

In diesem Abschnitt werden die ergonomischen Standardverfahren beleuchtet, welche unter anderem in den verwendeten Softwarepaketen implementiert sind.

EAWS²¹

Das EAWS-Verfahren (Ergonomic Assessment Worksheet) wurde an der Universität Darmstadt entwickelt und basiert auf dem Automotive Assembly Worksheet (AAWS) sowie der Bewertung körperlicher Belastungen. Dieses Verfahren dient zur Erfassung von ergonomisch ungünstigen Belastungspunkten. Dabei werden Belastungspunkte nach Höhe und Dauer bewertet. Dieses Verfahren ist in 4 Sektionen unterteilt, welches statische Haltungen, Aktionskräfte, Lastenhandhabung und repetitive Tätigkeiten abbilden bzw. beschreiben kann.

- **Sektion 1:**
Diese Sektion des EAWS-Verfahrens beschreibt die Rumpf- und Armstellungen, welche vom Mitarbeiter für Lasten unter 3 kg und Aktionskräfte von 30 bis 40 Newton aufgenommen werden. Weiters wird die Körperhaltung, wie beispielsweise Stehen oder Knien bezogen auf ihre Dauer bewertet.
- **Sektion 2:**
In Sektion 2 werden Finger-, Arm- und Ganzkörperkräfte bewertet. Sie beinhaltet beispielsweise eine Betätigung eines Knopfes über 10 Sekunden mit einer Kraft von 50 N.
- **Sektion 3:**
Das Handhaben von Lasten, wie beispielsweise Umsetzen, Tragen, Halten, Ziehen und Schieben, über 3 kg wird in Sektion 3 eingestuft.
- **Sektion 4:**
Repetitive Tätigkeiten der oberen Extremitäten mit sehr kurzzyklischen Wiederholungen werden in Sektion 4 bewertet. Die Bewertung erfolgt stets in Abhängigkeit der Kriterien Krafthöhe, -frequenz oder -dauer sowie Greifbedingungen und Zusatzfaktoren.

Die schlussendliche Bewertung der Belastung der Arbeitstätigkeit wird durch die Summe der Punkte der Sektionen 1 bis 3 für den Gesamtkörper und die Punkte der Sektion 4 für die oberen Extremitäten vorgenommen. Ausschlaggebend für das Endergebnis ist dabei die höchste Anzahl dieser beiden Summen. Bei einem Ergebnis

²¹ vgl. Börner, 2019, S. 18f.

von 0 bis 25 Punkten liegt keine Gefährdung durch Belastungen vor. Im Bereich von 25 bis 50 Punkten besteht die Möglichkeit eines Belastungsrisikos und es sollten Gestaltungsmaßnahmen angewendet werden. Bei einem Score von über 50 Punkten ist ein hohes Belastungsrisiko gegeben und es sind Maßnahmen zur Risikobeherrschung erforderlich.

NIOSH

Bei der Handhabung von Lasten tritt eine Gesundheitsgefährdung durch energetisch-effektorische Arbeitsformen auf. Betroffen sind meist die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule, welches durch dauerhaftes Heben und Tragen schwerer Lasten hervorgerufen wird. Darüber hinaus treten dies Gefährdungen im Bereich der Halswirbelsäule auf, welche durch langjähriges Tragen von Lasten auf der Schulter verursacht wird. Das NIOSH-Verfahren (National Institute for Occupational Safety and Health) ist weit verbreitet und bietet eine Abschätzung der Maximallast. Als Maximalwert der Belastung wird mit vorausgesetzter optimaler Handhabung eine Druckkraft von maximal 3,4kN auf den Lenden-Kreuzbein-Übergang (L5-S1) als akzeptierbar gesehen. Dieses Verfahren basiert auf dem Recommended Weight Limit (RWL). RWL ist ein Parameter, welcher eine Last bestimmt, die ein gesunder Werker über eine Zeit von 8 Stunden ohne zusätzliche Gefahr von Rückenverletzungen bewältigen kann. Die Berechnung der Maximallast wird durch die Multiplikation von 6 Parametern bestimmt. Zum einen wird der Kopplungsfaktor Hand-Last und der horizontale Abstand der Wirbelsäule zur Last berücksichtigt. Zum anderen wird der vertikale Abstand von der Hand zum Boden und der vertikal zu absolvierende Hebeweg berücksichtigt. Anschließend wird ein Asymmetrie-Faktor zur Bewertung der Verdrehung des Körpers zu Last eingerechnet. Abschließend wird die Häufigkeit der Lastenhandhabung als Faktor berücksichtigt.²²

$$RWL [kg] = LC * HM * VM * DM * AM * CM * FM$$

Formel 1: Berechnung Recommended Weight Limit²³

Tabelle 1: Faktoren zur Berechnung des RWL

LC: Load Constant [kg]	FM: Frequency Multiplier factor
HM: Horizontal Multiplier factor	AM: Asymmetric Multiplier factor
VM: Vertical Multiplier factor	CM: Coupling Multiplier factor
DM: Distance Multiplier factor	

²² Schlick [u. a.], 2010, S. 950f.

²³ Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 199.

RULA

RULA steht als Abkürzung für „Rapid Upper Limb Assessment“. Es wurde 1993 von Forschern der Universität Nottingham als ein Werkzeug zur Bewertung von Arbeiten, welche vermehrt per Hand ausgeführt werden, entwickelt. RULA stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, eine Evaluierung der Belastung auf das Muskelskelett in Bezug auf Körperhaltung, Muskelfunktionen und ausgeübte Kräfte, durchzuführen. Gesten und Körperhaltungen, welche mehrmals auftreten, rufen große Kräfte hervor oder werden meist als Extremwerte dieses Verfahrens ausgegeben. Bei RULA wird eine neutrale Position als Referenzposition angegeben, welche mit Strafpunkten belegt wird, wenn die zu analysierende Position sich von der Referenzposition unterscheidet. Dabei werden Beine, Rumpf, Nacken, Oberarme, Unterarme und Handgelenke in Betracht gezogen. Aufgrund der Einfachheit und der schnellen Durchführung, wurde das RULA-Verfahren sehr populär.²⁴

Die Bewertung erfolgt mit einem Punktesystem. Wobei eine höhere Punktezahl das erhöhte Risiko einer muskulären Dysbalance angibt. Bei einer Punktezahl von 6 oder mehr ist dringender Handlungsbedarf notwendig.

Erreichbarkeitsanalyse

Die Erreichbarkeitsanalyse bietet die Möglichkeit vorab die Greifbarkeit von Werkzeugen, Bauteilen und Objekten an einem Arbeitsplatz zu bewerten. Einige Softwarepakete bieten zur visuellen Unterstützung der Erreichbarkeitsanalyse geometrische Formen, welche den Aktionsradius der jeweiligen Extremität abbilden. Es werden beispielsweise kugelförmige Hüllflächen mit dem Mittelpunkt im Schultergelenk angezeigt.

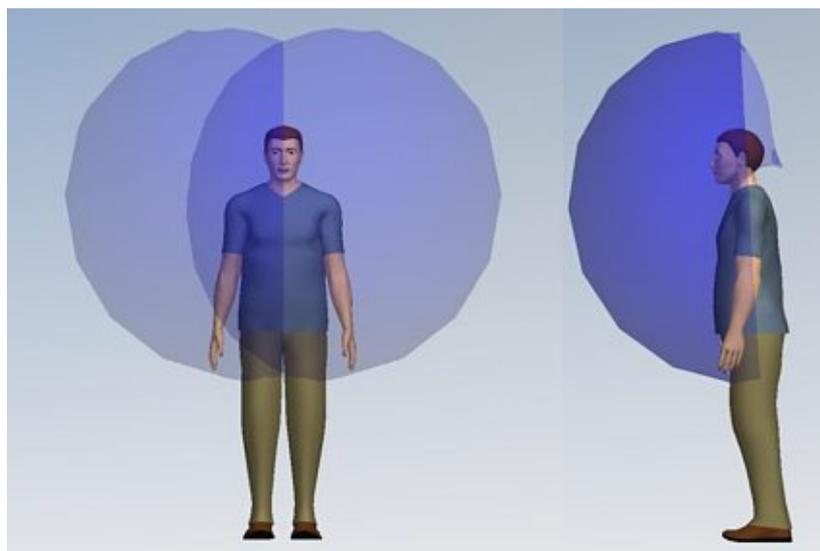


Abbildung 8: Hüllflächenprojektion der Erreichbarkeit in TX

²⁴ vgl. Martin Söderlund, 2020, S. 10.

Sichtfeldanalyse

Ähnlich der Erreichbarkeitsanalyse kann das Sichtfeld des Digitalen Menschmodells analysiert werden. Dabei wird ein Kegel von den Augen fortlaufend eingeblendet. Darüber hinaus bietet TX die Möglichkeit das Sichtfeld selbst in einem separaten Fenster darzustellen.

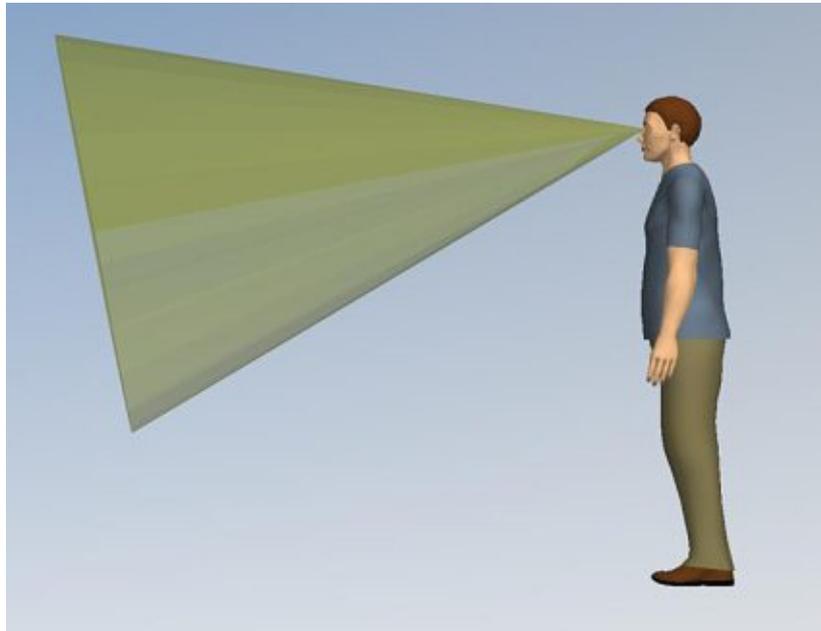


Abbildung 9: Sichtfeldkegel in TX

Ökonomische Bewertungsverfahren

Die folgende Beschreibung der ökonomischen Bewertungsverfahren soll einen groben Überblick über die Aussage der Analysen geben. Diese geben Auskunft über die ökonomische Performance des zu simulierenden Arbeitsplatzes.

MTM

Das MTM-Verfahren (Methods Time Measurement) ist ein System vorbestimmter Zeit und dient zur Bewertung von manuellen Arbeitsabläufen. Dabei werden die Arbeitstätigkeiten in kleine und einfache Grundbewegungen zurückgeführt und ein Normzeitwert wird für die Grundbewegungen zugeordnet. Die Normzeit variiert je nach hindernden oder erschwerenden Einflüssen. Es gibt verschiedene Versionen des MTM Systems, unter anderem das MTM-Grundsystem, auf welches alle MTM-Versionen aufbauen. Weiters gibt es je nach Prozesstyp, wie beispielsweise vereinfachte Formen wie MTM-UAS (Universelles Analysiersystem), welches

typischerweise in der Serienfertigung vorzufinden ist. Das MTM-UAS ist auch in der Software EMA (imk automotive) implementiert.²⁵

Allen MTM-Verfahren liegt der MTM-Elementarzyklus zugrunde:

1. Hinlangen (zum Gegenstand),
2. Greifen (des Gegenstandes),
3. Bringen (des Gegenstandes zum Fügeort),
4. Fügen (In- oder Aneinanderfügen von Gegenständen),
5. Loslassen (des Gegenstandes).

Der Zeitwert für die Bewegungsdauer wird in TMU (Time Measurement Unit) bestimmt. Mittels MTM-Datenkarte wird aufgrund von Entfernung und Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Bewegung der Zeitwert festgelegt.

Mit den Daten der MTM-Analyse stehen nun zwei Möglichkeiten für eine Optimierung im Raum. Auf der einen Seite kann versucht werden, dass die Bewegung unkomplizierter bzw. ergonomischer gestaltet wird. Auf der anderen Seite ist es möglich die Entfernung zwischen zwei Arbeitspunkte zu verkürzen.

Aufgrund der Tatsache, dass die Arbeitsprozesse mittels MTM auf ihre Grundbausteine heruntergebrochen bzw. vereinfacht werden, ist eine gute Integrierbarkeit in die Softwaresysteme möglich.

Die Vorteile des MTM-Verfahrens liegen in der Unabhängigkeit der Arbeitsgeschwindigkeit, der präzisen Prozessbeschreibungssprache, Möglichkeit der Generierung eines Arbeitsplanes und der Ursachenermittlung bei Zeitveränderungen.²⁶

Methoden vorbestimmter Zeit an Montagearbeitsplätzen

Eine wissenschaftliche Arbeit aus Tschechien beschäftigt sich mit den Methoden vorbestimmter Zeit. Dabei führten die Autoren eine Vergleichsstudie zwischen einem direkten Verfahren und zwei Verfahren vorbestimmter Zeit durch. Ausgeführt wurde diese Studie an 21 Montagearbeitsplätzen, welche eine Prozesszeit von 4 bis 29 Sekunden aufweisen. Das Ziel dieser Arbeit war die Verlässlichkeit, die wechselseitige Genauigkeit und die Abweichung der gewählten Verfahren herauszufinden. Man glaubte an eine maximale Genauigkeit der Abweichungen von $\pm 10\%$ zwischen den ausgewählten Verfahren. Das direkte Verfahren von REFA wurde als subjektives Instrument der Bewertung herangezogen. Dabei kann der Analyst mit einer subjektiven Beurteilung die Leistung des Werkers beeinflussen. Weiters wurden Methoden vorbestimmter Zeit angewendet. Mit den Verfahren MTM-1 und BasicMOST wurden

²⁵ vgl. Schneider, 2016, S. 107ff.

²⁶ vgl. Schneider, 2016, S. 109.

dabei Vergleichswerte hergestellt. Von großem Interesse für die Evaluierung menschlicher Arbeit anhand von softwarebasierten Systemen ist der Vergleich von MTM-1 und REFA. Bei einem Vergleich zwischen MTM-1 und REFA wurde eine durchschnittliche Abweichung von -3,66% erreicht. Dies bedeutet, dass MTM-1 ein wenig kürzere Zeit vorgibt als mit REFA gemessen. Man muss die subjektive Bewertung des Performance Levels bei REFA in Betracht ziehen, was leicht zu einer Fehleinschätzung führen kann. Die höchste positive Abweichung zwischen MTM-1 und REFA wurde bei Arbeitsplatz 2 mit 11,31% gemessen. Die höchste negative Abweichung betrug -22,47%. Dies übertrifft deutlich die Grenze der gesetzten maximalen $\pm 10\%$ Abweichung.²⁷

Für diese Evaluierung menschlicher Arbeit anhand von softwarebasierten Systemen ist diese Vergleichsstudie von großer Bedeutung. Es zeigt die Abweichung von einem realen Versuch zu einem Verfahren vorbestimmter Zeit, welches in den Softwarepaketen zum Einsatz kommt. Nicht zuletzt wird die Simulationssequenz in beiden Softwarepaketen mit MTM-Zeitbausteinen aufgebaut.

Diese Arbeit zeigt deutlich, dass die Genauigkeit von REFA und MTM-1 sehr hoch ist. Jedoch ist zu beobachten, dass mehrmals lokale Differenzen auftreten können. Dies kann auf die Komplexität oder auf Qualitätseinbußen bezüglich eines Arbeitsplatzes zurückzuführen sein. Da MTM-1 in vielen Softwarepaketen genutzt wird, um Simulationssequenzen zu erstellen, ist es von großer Bedeutung die Verlässlichkeit der Methode gegenüber einem realen Arbeitsplatz zu prüfen.

Weganalyse (Spaghetti Diagramm)

Ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung eines Arbeitsplatzes ist es, den Material- bzw. Ressourcenfluss zu analysieren. Der Fluss wird mit einer Weganalyse beschrieben, welches ein so genanntes Spaghetti Diagramm als Visualisierungswerkzeug nutzt. Mit diesem Tool werden Wege visualisiert und Verschwendungen können leicht identifiziert werden. Bei der analogen Methode der Weganalyse wird das Arbeitsplatzlayout ausgedruckt und anschließend die Transportwege und die Bewegungen per Hand skizziert. Der optische Eindruck gibt Auskunft über das Optimierungspotential. Wenn die Linien stark verworren sind, ist hohes Optimierungspotential vorhanden.

Durch die Möglichkeit einer Simulationssoftware, welche den Arbeitsplatz und den Arbeiter virtuell abbildet, können Weganalysen auch in digitaler Form durchgeführt werden. Einige Softwaresysteme haben eine Laufweganalyse integriert, welche das Spaghetti Diagramm einfach ausgeben kann. Eine weitere Darstellung des Laufweges

²⁷ vgl. Bures u. Pivodova, 2015, S. 471.

ist eine so genannte „Swept Volume“-Analyse, welche in Tecnomatix und EMA (imk automotive) implementiert sind.

Verschwendungsdiagramm

Ein Verschwendungsdiagramm ist ein visuelles Werkzeug, um verschiedene Arbeitsplätze hinsichtlich wertschöpfender und verschwenderischer Tätigkeiten zu analysieren. Die Gesamtarbeitszeit bestimmt die Höhe der Säule. In der Regel ist die Säule dreifärbig, je nachdem wie der Anteil von wertschöpfenden Arbeiten zu Verschwendungen ist.

- Grün: wertschöpfende Tätigkeiten (Montage, Bearbeiten, Fügen, ...)
- Gelb: unvermeidbare Verschwendung (Handling von Werkzeug und Werkstück, Qualität prüfen, ...)
- Rot: vermeidbare Verschwendung (Reparatur, Wege, Wartezeiten, Doppelarbeit, Umpacken, ...)

2.2.5 Digitale Menschmodelle

Am Beginn des verbrauchsorientierten Wirtschaftszeitalters, konnte noch nicht auf rechnergestützte Systeme zurückgegriffen werden. Zu dieser Zeit, Anfang des 20. Jahrhunderts, wurden daher so genannte Körperumrisschablonen verwendet, welche ein maßstäbliches, zwei- oder dreidimensionales Abbild des Menschen darstellen. Die ersten Körperumrisschablonen wurden 1928 im Zeppelin-Luftschiffbau verwendet, um ergonomische Aspekte in der Konstruktion zu berücksichtigen. In der Automobilbranche kommt seit 1977 die so genannte „Kieler Puppe“ zum Einsatz. Diese Schablone ist in verschiedenen Perzentilen verfügbar, um die statistische Verteilung der Anthropometrie abzudecken. Um verschiedene Körperhaltungen darstellen zu können, ist es möglich die Gelenke der Schablonen zu bewegen und somit verschiedenste Körperhaltungen einzustellen.²⁸

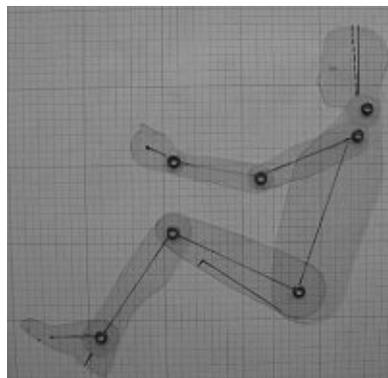


Abbildung 10: Körperumrisschablone „Kieler Puppe“²⁹

²⁸ vgl. Bubb [u. a.], 2015, S. 239.

²⁹ Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 42.

Durch die anfänglichen produktergonomischen Absichten der Automobilindustrie, kam die Körperumrisschablone auch vermehrt in der Arbeitsplatzgestaltung zum Einsatz. Die Schablonen wurden stetig weiterentwickelt, wie zum Beispiel das Problem der unechten Gelenke, welches die Gelenkinematik verbesserte. Das Gelenk der „Kieler Puppe“ bildet ein Ein-Freiheitsgrad-Gelenk ab, welches eine Drehung um die Gelenkachse ermöglicht. Da diese Rotation eine sehr starke Vereinfachung darstellt, wurden die Gelenke mit Kulissen ausgestattet, welche die anatomischen Bewegungsabläufe des Menschen sehr genau widerspiegeln. In der Arbeitsplatzgestaltung kamen die Schablonen für die Ermittlung von Maximalgelenkwinkel, Blickfeld, Sichtlinien und Erreichbarkeitsbereichen zum Einsatz. Auf der Grundlage dieser Schablonen und der zunehmenden Digitalisierung, konnten die Daten der Schablonen in die 2D-CAD-Systemen implementiert werden. Durch die stetige Weiterentwicklung der Rechenleistung und der CAD-Systeme, konnten die „Schablonen“ digital um eine dritte Dimension erweitert werden. Die anthropometrische Datenbasis wurde zunehmend erweitert, welche immense Vorteile im Bereich der Produktentwicklung bereitstellt. Beispielsweise ist es möglich Gestaltungsfragen wie in Flugzeugen oder Fahrzeugen mit einem digitalen Mock-Up zu beantworten. Dieses dreidimensionale Konstrukt nennt man Digitales-Menschmodell.³⁰

Funktionen Digitaler Menschmodelle

Digitale Menschmodelle sollen alle Funktionen realer Menschen, wie anatomische, kinematische, dynamische, biomechanische, psychologische und physiologische Aspekte wiedergeben. Da es schwierig ist alle Aspekte abzudecken, und meist auch nicht notwendig ist, können Vereinfachungen getroffen werden. Generell können Digitale Menschmodelle in zwei verschiedene Hauptgruppen unterteilt werden. Zum einen die kognitiven Digitalen Menschmodelle und zum anderen die physikalischen Digitalen Menschmodelle. Die kognitiven Digitalen Menschmodelle stellen einen Schwerpunkt im Bereich der Mensch-Maschine Interaktion dar, wie beispielsweise Emotionen, Sprachen und Gesten, und finden Anwendung in sozial-psychologischen Bereichen. Die physikalischen Digitalen Menschmodelle legen den Fokus auf physiologische Aspekte und Aspekte der Körperhaltung und Körperbewegung. Dabei werden die Blickwinkel in der Ergonomie auf Körperhaltung und Körperbewegung gelegt.³¹

³⁰ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 42ff.

³¹ vgl. Zhu [u. a.], 2019, S. 559.

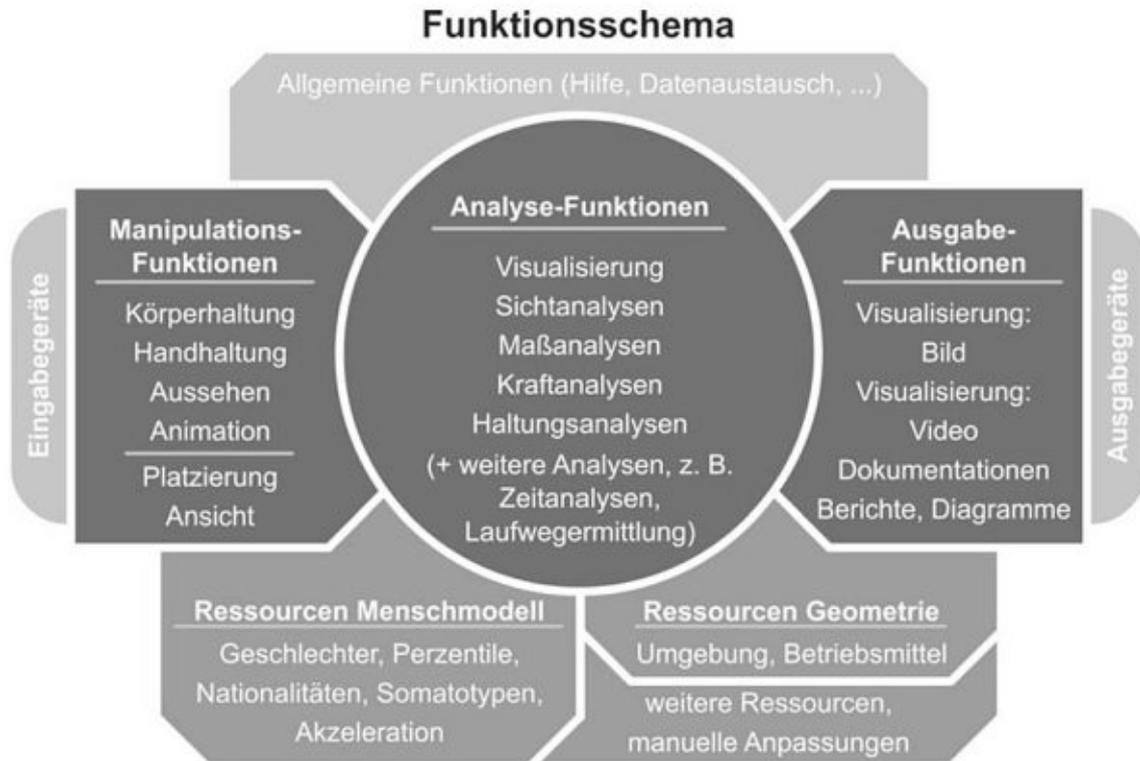


Abbildung 11: Funktionsschema Digitaler Menschmodelle³²

Abbildung 11 beschreibt das Funktionsschema Digitaler Menschmodelle. Die Grundlage des Modells bieten Ressourcen der Umgebung, Hilfs- und Betriebsmittel, welche meist über standardisierte Dateiformate in das Modell geladen werden können, um die tatsächliche Arbeitsumgebung bestmöglich simulieren zu können. Es gibt unzählige Digitale Menschmodelle, welche durch verschiedenen Schablonen und Programmentwickler hervorgegangen sind. Daher differiert der Einsatz von Digitalen Menschmodellen je nach Hersteller und Programm. Jedoch wird ausschließlich ein Digitales Menschmodell geladen und mit diversen anthropometrischen Attributen wie Geschlecht, Perzentile, Nationalität, Somatotypen und Akzeleration belegt. Wenn die Randbedingungen wie Arbeitsumgebung und Digitales Menschmodell geladen sind, kann mit den Manipulations-Funktionen des Programmes eine dynamische Simulation erstellt werden. Dabei stehen unterschiedliche Modi zur Verfügung: Vorwärtskinematik, Rückwärtskinematik und Standardprozesse aus Bibliotheken. Die Vorwärtskinematik arbeitet mit der Tatsache wie aus den Gelenkwinkeln der Arme der geforderte Zielpunkt in Bezug auf das Basiskoordinatensystem erreicht werden kann. Durch die serielle Kopplung der Körperteile können die Gelenkwinkel durch Matrizenmultiplikation errechnet werden. Die Rückwärtskinematik bildet das Gegenstück zur Vorwärtskinematik. Dabei wird das letzte Glied der kinematischen Kette, beim Menschen Hand oder Fuß, in die gewünschte Position gebracht. Die übrigen Glieder der kinematischen Kette richten sich passend aus. Die Gelenkwinkel

³² Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 83.

werden also rückwärts vom Zielpunkt bestimmt, also invers. Als dritte Methode der Manipulation des Digitalen Menschmodells stehen Standardprozesse und Standardposen aus Katalogen zur Verfügung. Diese standardisierten Posen werden häufig genutzt, um eine gute Ausgangsbasis für eine Simulation bereitzustellen, jedoch ist meist eine Korrektur der Körperhaltungen unabdingbar.³³

Ein weiterer Bestandteil der Manipulations-Funktionen ist die Platzierung des Digitalen Menschmodells. Dabei wird das Digitale Menschmodell in die Arbeitsumgebung geladen und mittels Koordinatensysteme positioniert. Der Koordinatenursprung des Digitalen Menschmodells ist meist im Becken festgelegt.

Nachdem die kinematischen Aspekte der Simulation grundlegend festgelegt worden sind, kommt es zum eigentlichen Einsatz der Analysemethoden.

- **Sichtanalyse**
Die Sichtanalyse dient als Werkzeug um das Sichtfeld des Arbeiters analysieren zu können. Dabei können mit dem Sicht- oder Blickfeld der aktuellen Lage des Kopfes beispielsweise verdeckte Objekte identifiziert werden, welche im späteren Arbeitsvorgang als Hindernis auftreten können. Die Digitalen Menschmodelle sind dazu in der Lage die zentralen Sichtlinien und die Sichtkegel des Blickfeldes anzeigen zu lassen.
- **Erreichbarkeitsanalyse**
Ähnlich wie bei der Sichtanalyse werden bei einer Erreichbarkeitsanalyse die kinematischen Bedingungen bzw. Kopplungen und Bewegungsvermögen hinsichtlich Freiheitsgrade und Gelenkwinkel mit geometrischen Formen dargestellt. Das Erreichbarkeitsfeld wird durch eine Art Halbkugel dargestellt und kann eingeblendet werden, um die Erreichbarkeit von Gegenständen zu prüfen. Durch die Tatsache, dass das Erreichbarkeitsfeld die maximale Erreichbarkeit abbildet, kann durch die Erreichbarkeitsanalyse lediglich die Möglichkeit des Erreichens geprüft werden, welche keine ergonomischen Aspekte behandelt.
- **Maßanalyse**
Maßanalysen bilden eine gute Möglichkeit die geometrischen Relationen des modellierten Arbeitsplatzes zu prüfen. Dabei können auf Punkte der Abstandsmessung und Bewegungsfreiheit geachtet werden. Beispielhaft für diese Analyse ist die Anordnung bzw. Positionierung von Bedienelementen oder Prüfung von Bewegungsfreiheit von verschiedenen anthropometrischen Typen.
- **Haltungs- und Kraftanalysen**
Bewertungstools für Körperhaltung- und Belastungsanalysen stehen in einigen Softwarepaketen bereit. Aufgrund der Stellung von Gelenkwinkel wird eine

³³ vgl. Bubb, 2019, S. 12.

Bewertung durchgeführt. Diese wird mit Verfärbung des Digitalen Menschmodells visualisiert.

- Lastenhandhabung

Die Analyse der Lastenhandhabung beinhaltet das Handling der Lasten im Simulationsmodell. Darüber hinaus kann der Energieverbrauch von zyklischen Tätigkeiten mit Analysetools ermittelt werden.

Die Ausgabe-Funktion der verschiedenen Programme ermöglicht es eine genaue Dokumentation des simulierten Arbeitsprozesses auszugeben. Diese kann beispielsweise Screenshots von Kollisionen und Sichtfeldanalysen beinhalten und dienen als Grundlage von Präsentationen oder Diskussionen.

Durch den Einsatz der dreidimensionalen Visualisierung eines Arbeitsvorganges oder von Arbeitsprozessen, ist es möglich eine vorläufige Auswertung vorzunehmen. Diese Auswertung kann zur Grundlage von Diskussionen und zur Früherkennung von Fehlern, Problemen und kinematischen Kollisionen dienen.

Gestaltung von Arbeitsplätzen mittels digitaler Menschmodelle

Nachdem die Funktionen der Digitalen Menschmodelle beschrieben wurden, wird nun erläutert, wie die Gestaltung von Arbeitsplätzen mittels Digitaler Menschmodelle abläuft, und welche Verfahren zur Bewertung genutzt werden können. Nicht nur eine ergonomische Produktgestaltung hat sich in den letzten Jahren etabliert, sondern eine ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes rückt vermehrt in den Fokus. Beginnend werden alle nötigen 3D-Objekte erstellt und importiert beziehungsweise aus lokalen Bibliotheken geladen. Die Digitalen Menschmodelle werden mit den notwendigen Anthropometrie-Daten erstellt.



Abbildung 12: Gegenüberstellung DMM 0.95 männlich und DMM 0.05 weiblich in EMA

Folgend wird die Manipulationsfunktion genutzt, um das Layout des Arbeitsprozesses nachzubilden. Nun können die Körperhaltungen und -stellungen erstellt werden. Dies ermöglicht eine dynamische Visualisierung, welche mit verschiedenen Analyse-Tools bewertet werden kann. Aus dieser Visualisierung können bereits für den Körper ungünstige Haltungen entnommen werden. Diese Vermutungen der ungünstigen Körperhaltungen können mit Analyse-Tools wie zum Beispiel dem RULA-Verfahren und Lasthandhabungsanalysen wie zum Beispiel NIOSH bewertet werden. Dies ergibt Hinweise auf die Gestaltung des Arbeitsplatzes. Die Vorgehensweise zum Abbilden des Prozesses, welche sich als sehr zeitintensiv herausstellt, ist die Key-Frame Animation. Dabei werden die Körperhaltungen bei Lasthandhabungen oder Prozessschritten manuell eingestellt und die Zwischenframes werden mit einem Algorithmus erstellt. Eine zeitsparendere Variante der Visualisierung ist die Nutzung von Prozessbausteinen, welche mit dem Task Simulation Builder in Tecnomatix Process Simulate und in EMA möglich ist. Ein weiteres Tool zum Auffinden von Kollisionen ist eine Animation mittels Swept Volume (kumuliertes Bewegungsvolumen).³⁴

Simulation von menschenzentrierten Arbeitsplatz Design

Aufgrund der Tatsache, dass der Mensch in Zukunft eine zentrale Rolle am Arbeitsplatz einnehmen wird und die Dynamik des Marktes eine flexiblere Form des Arbeitssystems erfordert, ist der Einsatz von virtueller Ergonomie zur Gestaltung dieser Arbeitsplätze unabdingbar.

Um eine Validierung der menschlichen Arbeit durchführen zu können wurde ein iterativer Ansatz herangezogen.

Es stellt sich die Frage, wie man einen Vergleich zwischen virtueller Ergonomie Analyse und physisch-realer Ergonomie Analyse zieht, welcher anschließend als Aussage über die Performance der virtuellen Ergonomie Analyse gilt. Der Vergleich behandelt ein virtuelles Szenario, welches mit einer virtuellen EAWS Analyse bewertet wird. Anschließend wird dieses virtuelle Szenario „eintauchfähig“ (immersive) gemacht und ein physisch-realer Mensch taucht mit einer VR-Brille in das virtuelle Szenario ein. Mittels Motion Capturing-System wird die Bewegung des realen Menschen aufgezeichnet und parallel wird ein analoges EAWS Analyseverfahren angewendet. Abschließend kann eine Aussage über die Qualität der EAWS Analyse mit einem Vergleich der beiden Ergebnisse getroffen werden.

³⁴ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 93f.

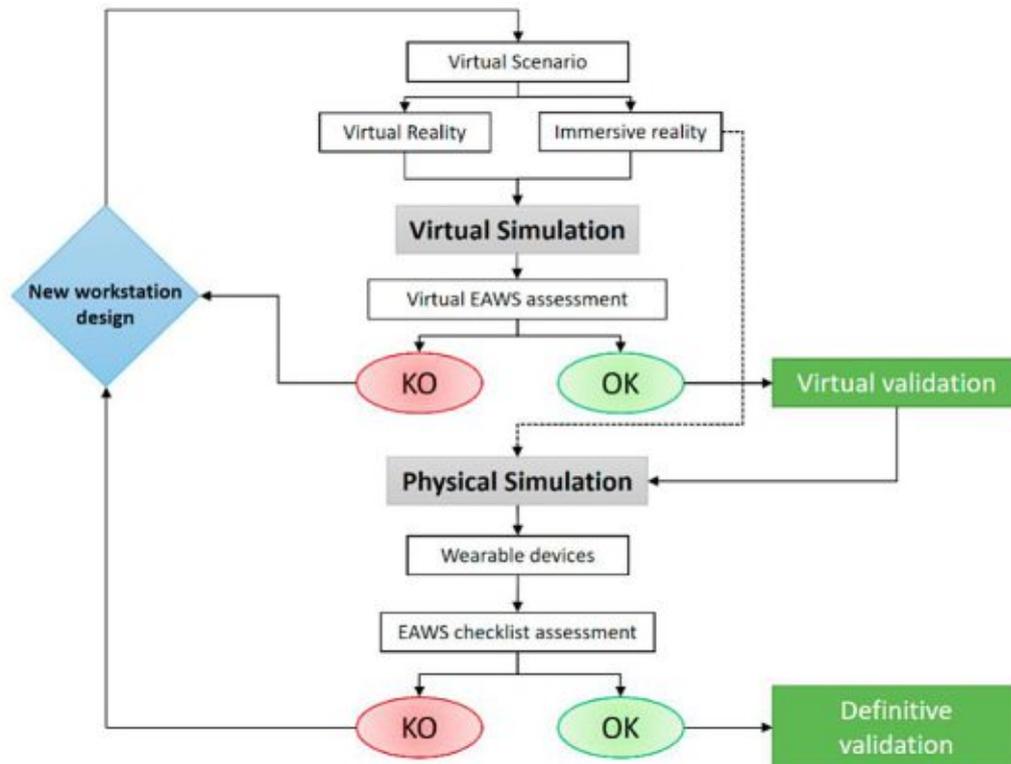


Abbildung 13: Validierungsschema des Arbeitsplatzes³⁵

In dieser Studie werden zwei Validierungsziele verfolgt. Zum einen eine virtuelle Analyse und Validierung mittels Simulationssoftware. Zum anderen eine physische Analyse und definitive Validierung des Arbeitsplatzes.

Bei der virtuellen Analyse wurde die Simulationssoftware Tecnomatix Process Simulate von Siemens und EAWSdigital von MTM verwendet. Tecnomatix Process Simulate ist eine PLM Software, welche es erlaubt Arbeitsplätze oder sogar ganze Fabrikhallen virtuell darzustellen. Mit einem Digitalen Menschmodell werden diese Arbeitsschritte in der virtuellen Umgebung ausgeführt. Nachdem die virtuelle Simulation fertig erstellt wurde und alle Arbeitsabläufe implementiert wurden, kommt die Software EAWSdigital zum Einsatz. Diese führt eine Bewertung der Bewegungen auf Basis des EAWS-Bewertungsschemas durch.

Um einen Vergleich der Körperhaltung der Arbeiter mit dem virtuellen Modell und dem realen, physischen Ablauf zu erzielen, ist es erforderlich so genannte „motion tracking“-Systeme einzusetzen. Diese Systeme sind Sensoren, welche vom Arbeiter während des Arbeitsprozesses an den relevanten Gelenken getragen werden, um die Gelenkwinkel aufzuzeichnen. Bei dieser Studie wurden zwei Arbeitsprozesse, welche die Arbeitsschritte Nehmen, Platzieren, Fügen, Handling von Materialien und Werkzeuge und Kraftaufwendungen beinhaltet, in der Automobilindustrie an zwei verschiedenen Fahrzeugen validiert. Nachdem die virtuelle Simulation durchgeführt

³⁵ vgl. Caputo [u. a.], 2018, S. 5.

wurde und die Körperhaltungsdaten der realen Arbeiter eingeholt wurden, konnte ein Vergleich stattfinden.

Als Resultat wurde ein Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse der EAWS Bewertung erstellt, um die Validität zu bewerten.

Tabelle 2: Testergebnisse Versuch 1

	Numerische Bewertung	Experimentelle Bewertung	Abweichung
Sektion 1	80.5	76.5	-4.9 %
Sektion 2	0	0	0 %
Sektion 3	0	0	0 %
Sektion 4	38	36.5	-3.9 %

Das Ergebnis der numerischen Bewertung als auch in der experimentellen Bewertung einen Score von über 50 für Sektion 1, welches ein hohes Belastungsrisiko von Rumpf- und Armbewegungen darstellen. Für Sektion 2 und Sektion 3 wurden in diesem Arbeitsprozess keine Punkte vergeben. Für kurzzyklische Arbeiten der oberen Extremitäten wurden in Sektion 4 Punkte vergeben, welche Gestaltungsmaßnahmen erfordern.

Dieselbe Methodik wurde bei einem anderen Fahrzeug für einen ähnlichen Arbeitsprozess angewendet.

Tabelle 3: Testergebnisse Versuch 2

	Numerische Bewertung	Experimentelle Bewertung	Abweichung
Sektion 1	26	16	-38.5 %
Sektion 2	44	43	-2.3 %
Sektion 3	0	0	0 %
Sektion 4	25.5	21	-17.6 %

Abgesehen von der Tatsache, dass in Versuch 2 die Arbeitsbedingungen besser sind und dennoch großes ergonomisches Optimierungspotential vorhanden ist, ist vor allem die Abweichung der numerischen Bewertung zur Experimentellen Bewertung interessant. Die numerische Bewertung weist in der Regel signifikant höhere Werte laut EAWS Bewertung auf, das heißt die numerische Bewertung gibt ein konservatives Ergebnis aus. Jedoch sind die Abweichungen im Versuch 2 zum Teil sehr hoch, welche die Validität von virtuellen Ergonomie Bewertungen in Frage stellen. Am Ende wird jedoch von der numerischen Bewertung immer ein konservativeres Ergebnis bereitgestellt, welches den Einsatz dieses Instrumentes befürwortet.³⁶

³⁶ vgl. Caputo [u. a.], 2018.

2.3 Softwarebasierte Evaluierung menschlicher Arbeit

2.3.1 Kontinuierliche und diskrete Simulation

Der Begriff Simulation beschreibt die Nachbildung eines Systems, dessen statische und dynamische Aspekte abgebildet werden. Mit diesem System ist man in der Lage experimentierbar, die individuellen Möglichkeiten zu testen, ohne diese vorher in die Realität umsetzen zu müssen. Vorrangig werden bei Simulationen Prozesse über der Zeit abgebildet.³⁷

Simulationen können grundsätzlich in kontinuierlicher Art und diskreter Art unterschieden werden. Im Fall der diskretisierten Simulation wird weiters in zeitgesteuerter und ereignisgesteuerter Simulationsform unterschieden.³⁸

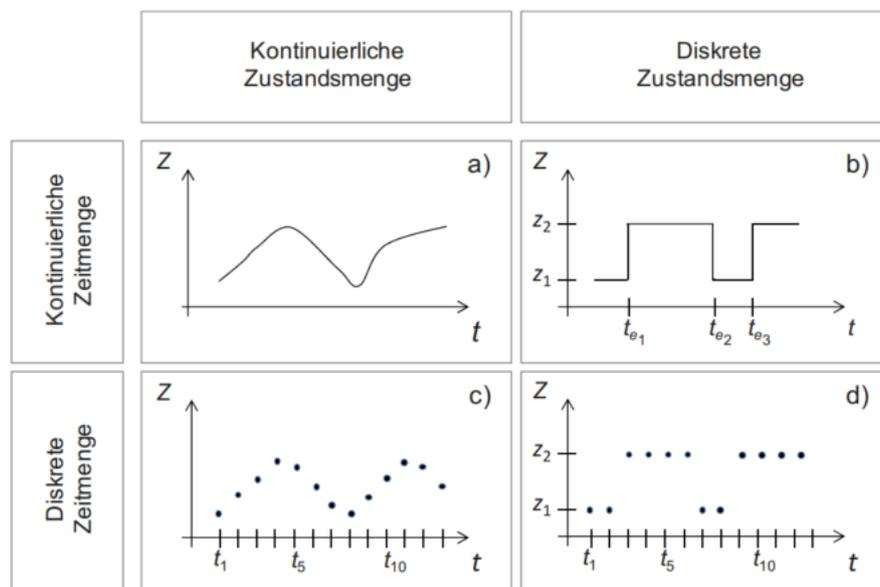


Abbildung 14: Klassifizierung für Modelle und Systeme³⁹

2.3.2 Usability

Der Begriff „Usability“ taucht im Kontext von Arbeitswissenschaft sehr häufig auf. Übersetzt heißt der Begriff „Gebrauchstauglichkeit“. Usability beschreibt die Fähigkeit eines Systems gewisse Aufgaben eines Benutzers sicher, effektiv, effizient, zufriedenstellend und angenehm aus- bzw. durchzuführen.⁴⁰

Um die „Usability“ für den Gebrauch zu standardisieren, hat die ISO (International Organization for Standardization) und IEC (the International Electrotechnical Commission) eine Normung der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt. Die ISO 9241-

³⁷ vgl. Gutenschwager [u. a.], 2017, S. 22.

³⁸ vgl. Gutenschwager [u. a.], 2017, S. 53.

³⁹ Gutenschwager [u. a.], 2017, S. 16.

⁴⁰ vgl. Lee [u. a.], 2019, S. 195.

11-2018 findet Anwendung in allen technischen Produkten, sowohl Systeme als auch Software in Bezug auf Lernfähigkeit, Nutzerfreundlichkeit, Verfügbarkeit und Wartbarkeit. Tabelle 1 beschreibt die Faktoren der Usability nach ISO 9241-11-2018.⁴¹

Tabelle 4: ISO 9241-11-2018 Faktoren der Usability

Usability Faktor	Beschreibung
Lernfähigkeit	Neuen Benutzern einen effektiven, effizienten und zufriedenstellenden Einstieg mit dem neuen System zu ermöglichen.
Nutzerfreundlichkeit	Ermöglicht dem Benutzer seine Ziele effizient, effektiv und zufrieden zu erreichen.
Verfügbarkeit	Weitreichende Fähigkeiten der Benutzer effektiv, effizient und zufriedenstellend abdecken.
Wartbarkeit	Ermöglicht Aufgaben in Bezug auf Wartung effektiv, effizient und zufriedenstellend.

2.3.3 Vergleichsstudie von DMM und realen Ergebnissen

Da die Bedeutung von ergonomischen Aspekten während der Produktionsentwicklungsphase immer größer wird, ist es notwendig mit Hilfe von digitalen Menschmodellen den computergestützten Designvorgang zu unterstützen. Diese schwedische Studie der Chalmers Universität in Göteborg hat überprüft inwieweit die Ergebnisse der virtuellen Modelle von den Ergebnissen der realen Welt abweichen. Dabei wurden 155 ergonomische Fälle in einem Autoproduktionsbetrieb untersucht. Die Ergebnisse wurden mit unbrauchbar, brauchbar und gut klassifiziert.

Um die digitale Menschmodell Simulation durchführen zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

- Abgrenzung Arbeitsprozess
- Abgrenzung Arbeitsumgebung
- Bestimmung der Population
- Grenzen der Software erkennen
- Analyse durchführen
- Bewertung und Beurteilung der Resultate
- Dokumentation der Resultate der Analyse

Die ersten zwei Punkte wurden von Simulations-Ingenieuren durchgeführt, welche den Prozess und die Arbeitsumgebung erstellten (Software eM-Human/Siemens). Der dritte Punkt ist die anthropometrische Bestimmung der Population in den Fabriken. Da diese Fabriken in Schweden und Belgien beheimatet sind und keine anthropometrischen Daten für diese zwei Nationen verfügbar sind, wurde die deutsche

⁴¹ vgl. Badioze Zaman [u. a.], 2019, S. 102.

Population als realistisch herangezogen. Die weiteren Schritte werden in einem Team von Simulations-Ingenieuren und Spezialisten im Bereich der Ergonomie durchgeführt.

Ursprünglich wären bei dieser Studie acht ergonomische Aspekte zur Beurteilung vorgesehen gewesen. Jedoch ist es durch die Software nur möglich vier dieser Aspekte beurteilen zu können. Dazu zählen Arbeitshöhe, zurückgelegte Distanz, Abstand und Sichtfeld. Zur Bewertung wurde ein Dreifarbenmodell (rot – unbrauchbar, gelb - brauchbar, grün – gut) herangezogen.

Der Vergleich zwischen realem Model (Bewertung durch Ergonomie Experten) und virtuellem Modell wurde wie folgt vorgenommen:

- Gelenkstellungen von Simulation verglichen mit Kommentaren der Experten von realer Arbeitshaltung
- Entfernungen von Simulation verglichen mit Erreichbarkeitskommentaren der Experten von der realen Arbeitssituation
- Greifposition von Simulation verglichen mit Hebebedingungen von realer Arbeitssituation. Dieser Punkt gibt ebenfalls Auskunft über die Arbeitshöhe.
- Blickfeld- bzw. Sichtfeld von Simulation verglichen mit Interview des Arbeiters, welcher die Arbeit im Realen ausführt

Als Ergebnis dieser Studie soll die Frage geklärt werden, ob der Einsatz von digitalen Menschmodellen zielführend ist oder nicht. Bei 155 ergonomischen Arbeitsuntersuchungen wurde bei 75 Fällen (48%) eine vollständige Übereinstimmung vorgefunden. Jedoch wurde nur in 8 Fällen eine zweistufige Fehleinschätzung vorgefunden. Das heißt die Einschätzung ist in den meisten Fällen konservativer durch die Simulation ausgefallen. Eine fatale Fehleinschätzung (reelle Bewertung rot – Simulation grün) ist nur drei Mal vorgekommen, dabei wurde ein Fehler des Modells als Grund angegeben.

Als Antwort auf die Frage ob digitale Menschmodelle in der Arbeitsplatzgestaltung eingesetzt werden sollen, kann eine positive Antwort gegeben werden. Jedoch ist die Weiterentwicklung der Simulationssoftwares von Nöten, speziell im Bereich von Materialhandling und Kräfte, welche die Ausführung der Hand repräsentieren.⁴²

⁴² vgl. Lämkuil [u. a.], 2009, S. 429ff.

3 Softwarebasierte Evaluierung der Baustellenmontage

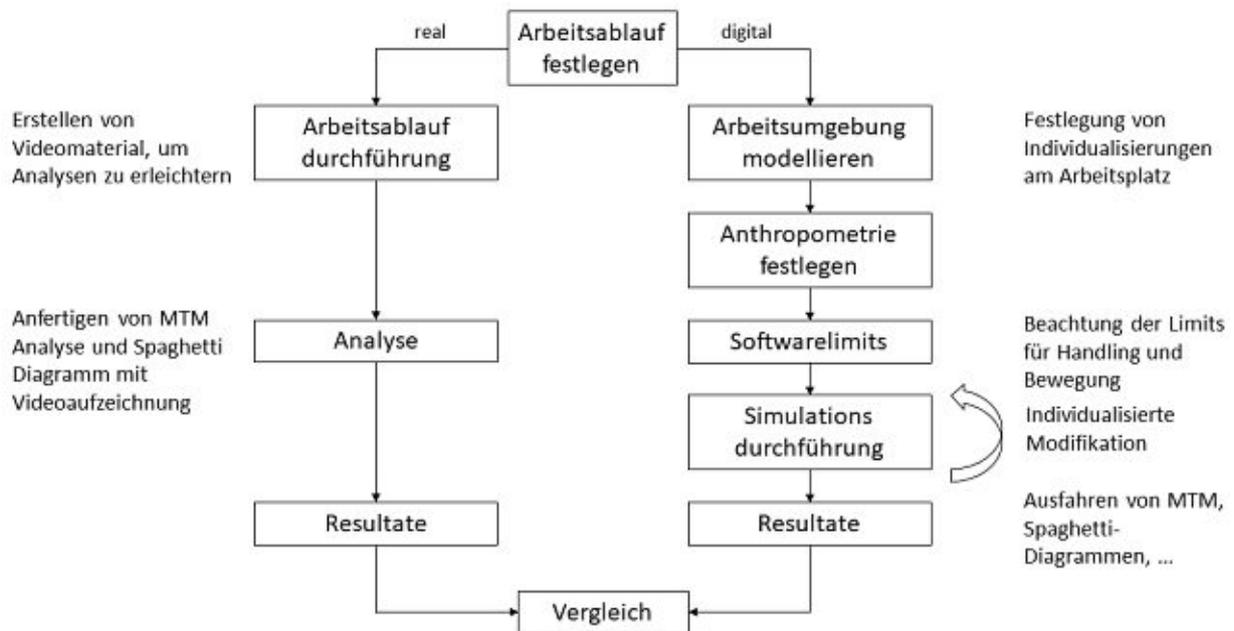


Abbildung 15: Ablaufdiagramm softwarebasierter Evaluierung menschlicher Arbeit

In diesem Abschnitt wird der grundsätzliche Ablauf der praktischen Durchführung behandelt. Es soll eine klare Vorstellung über den Arbeitsplatz und Arbeitsprozess vorhanden sein. Darüber hinaus werden erste Beschränkungen identifiziert, welche den Vergleich grundlegend erschweren. Abschließend wird das Vorgehen für die Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse abgearbeitet.

3.1 Analyse des Use-Cases, Umgebung und Population

Zu Beginn dieser Arbeit ist es erforderlich ein Gesamtbild über die Aufgabenstellung zu erstellen. Als Ausgangslage beschreibt ein Demonstrationsarbeitsplatz eines Laminierungsprozesses für ein Turbinen-Luftstrahltriebwerk die Problemstellung. An diesem Arbeitsplatz werden Schicht für Schicht Kohlenstofffaser-Prepregs (Prepregs: Kohlenstofffaser mit Harz vorimprägnierte Garnscharen oder Gewebe) auf zugewiesene Flächen angebracht. Diese Flächen werden im Vorfeld der Beklebung von einem Bildwerfer oder Videoprojektor angezeigt. Durch sukzessives Auflegen der Kohlenstofffaser-Prepregs wird die Außenhaut eines Turbinen-Luftstrahltriebwerks hergestellt.

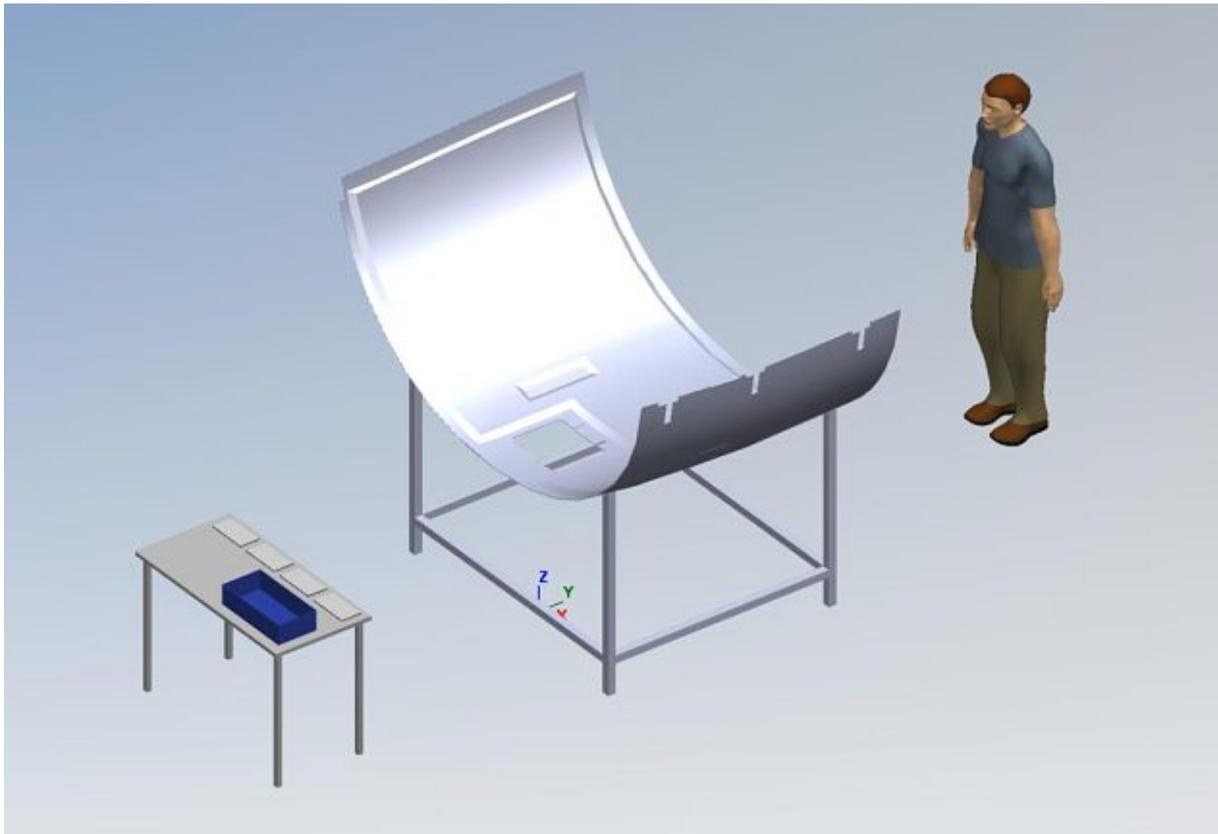


Abbildung 16: Gesamtansicht des Arbeitsplatzes (Software: Siemens Tecnomatix - Process Simulate)

Der gesamte Arbeitsplatz verfügt über ein fan cowl-Werkzeug an welchem die Kohlenstofffaser-Matten aufgeklebt werden. Für die Durchführung dieses Arbeitsprozesses beschränkt sich das Aufkleben auf vier verschiedene Positionen der Kohlenstofffaser-Matten. Dadurch stehen nur vier Matten samt Schutzfolie der Klebebeschichtung zur Verfügung. Weiters befindet sich auf dem Tisch eine Ablagebox, welche für die Schutzfolie der Kohlenstofffaser-Matten vorgesehen ist. Zuletzt wird ein Digitales Menschmodell für die Durchführung des Arbeitsprozesses erforderlich sein.

Die Umgebung des Versuches, wie beispielsweise Tisch, Ablagebox und Kohlenstofffasermatten, wurden mittels CAD-Datenimport erstellt. Dabei ist ein Augenmerk auf den Datenimport zu legen, da nach dem Import die geometrischen Daten skaliert wurden. Eine vermehrte Kontrolle ist hier sehr wichtig, denn die beiden Softwaresysteme sollen mit einem identisch modellierten Arbeitsumfeld arbeiten, da diese die Randbedingungen vorgeben. Um einen identischen Aufbau erreichen zu können, wird die Anordnung der Umgebung mit Koordinatensystemen beschrieben. Diese Beschreibung durch Koordinaten stellt zusätzlich sicher, dass die Wege die das Digitale Menschmodell bestreitet in jedem Modell übereinstimmend sind.

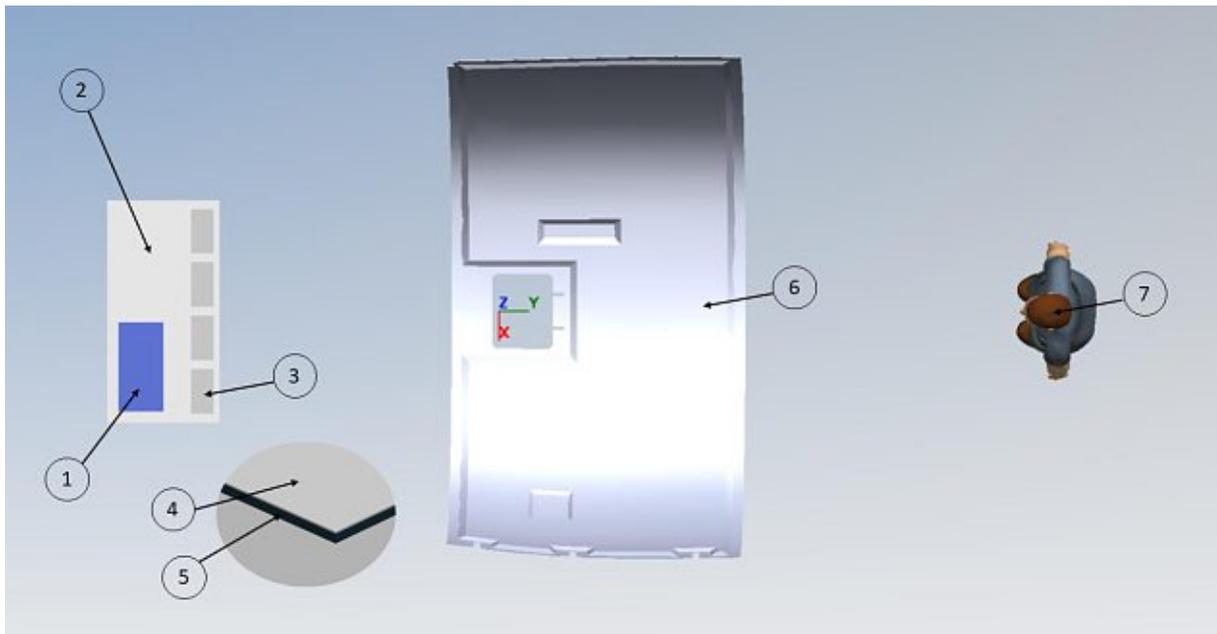


Abbildung 17: zweidimensionale orthogonale Ansicht (Software: Siemens Tecnomatix - Process Simulate)

Das gesamte Arbeitsplatzlayout wird in Abbildung 17 dargestellt. Zur Erklärung der eingesetzten Werkzeuge und Hilfsmittel werden diese wie folgt aufgelistet:

1. Ablagebox für Schutzfolie von Kohlenstofffaser-Matten
2. Tisch für bessere Arbeitsplatzergonomie
3. Kohlenstofffaser-Matte samt Schutzfolie
4. Detailaufnahme von Kohlenstofffaser-Matte: Schutzfolie
5. Detailaufnahme von Kohlenstofffaser-Matte: Kohlenstofffaser-Matte
6. fan cowl-Werkzeug
7. Digitales Menschmodell

Um einen Vergleich zwischen zwei Softwaresystemen zu erhalten, müssen diese geometrisch ident aufgebaut werden. Darüber hinaus wird versucht eine Validierung zwischen den Softwaresystemen und den realen Arbeitsprozess angestrebt.

Nicht nur der Versuchsaufbau, sei es virtuell oder real-physisch, sondern auch das Digitale Menschmodell muss ident sein. Die Simulationssysteme bieten die Möglichkeit Digitale Menschmodelle aus etlichen Datenbanken auszuwählen. Dabei ist es wichtig, dass meist jedes verschiedene Softwaresystem auch ein anderes Digitales Menschmodell verwendet. Um eine Gleichheit vorzugeben, wird die Geometrie der Digitalen Menschmodelle durch die anthropometrischen Datenbanken vorgegeben. Um eine gerechtfertigte Auswahl der anthropometrischen Daten vorzunehmen ist es wichtig die geographische Lokalisierung des Arbeitsplatzes zu kennen.

Eine weitere wichtige Bekannte in dieser Analyse ist der Arbeitsablauf des Laminierungsprozesses. Im Großen und Ganzen besteht die Verrichtung des

Prozesses aus vier sich wiederholenden Arbeitsschritten, welche das Bringen, Greifen, Gehen und Platzieren der Kohlenstofffaser-Matten abbilden.

Tabelle 5: Arbeitsschritte des Laminierungsprozesses

#	Beschreibung	#	Beschreibung
1	Gehe zu Anweisung	21	Festdrücken (wischen)
2	Anweisung lesen	22	Bestätigen
3	Prozess starten	23	Gehe zu Projektion
4	Gehe zu Anweisung	24	Arbeitsanweisung lesen
5	Anweisung lesen	25	Gehe zu Tisch
6	Gehe zu Tisch	26	Folie abziehen
7	Folie abziehen	27	Folie in Ablagebox
	Folie entsorgen		Matte aufnehmen
8	Matte aufnehmen	28	Matte platzieren
	Matte platzieren		Gehe zu Projektion
9	Gehe zu Montageposition	29	Gehe zu Projektion
10	Festdrücken + Qualität kontrollieren	30	Blickverschiebung zur Projektion
11	Blickverschiebung Projektion	31	Bestätigen
12	Bestätigen	32	Gehe zu Projektion
13	Gehe zu Projektion	33	Arbeitsanweisung lesen
14	Arbeitsanweisung auf Projektion lesen	34	Gehe zu Tisch
15	Gehe zu Tisch	35	Folie abziehen
16	Folie abziehen		Folie in Ablagebox
	17	Folie in Ablagebox	36
Gehe zu Ablagebox		Matte platzieren	
18	Gehe zu Matte	37	Gehe zu Projektion
19	Matte aufnehmen	38	Bestätigen
	Matte platzieren	39	Gehe zu Startpunkt
20	Gehe zu Projektion		

3.2 Analyse der Beschränkungen der Softwaresysteme

In diesem Abschnitt werden die Grenzen der Softwaresysteme aufgezeigt. Die Softwaresysteme arbeiten mit kinematischen Verfahren zur Abbildung von realen Bewegungen und Haltungen von physisch realen Menschen. Beispielsweise wird jede Bewegung mit Gelenkwinkel beschrieben. Durch verschiedenste Muskelverkürzungen und muskuläre Dysbalancen führt jeder reale Mensch die Bewegungen anders aus und erreicht dadurch eine individuelle Stellung der Gelenke zueinander. Die Simulationsprogramme stellen für jede Bewegung die Gelenkwinkel dar, wie diese einmal in der Implementierung des Digitalen Menschmodelles festgelegt wurden.

Natürliche Bewegung erfolgt beispielsweise nicht ab dem Schultergelenk, sondern meist bewegt sich der ganze Oberkörper oder Rumpf mit. Bei den meisten

Softwaresystemen wird jedoch die Bewegung strikt getrennt, was nicht dem natürlichen Bewegungsmuster entspricht.

Eine vollständige Simulation des Arbeitssystems ist hingegen oftmals sehr zeitaufwändig. Daher wird das Arbeitssystem grob abgeschätzt und geprüft ob Probleme auftreten. Bei kritischen Stellen wird dann ein Detailsystem erstellt und eine Detailanalyse erstellt.

Aufgrund der Tatsache, dass beide Softwaresysteme für die Modellierung der Arbeitsprozesse ein Verfahren Vorbestimmter Zeit verwenden, liegt es im Ermessen des Anwenders, welche Detaillierungsgrad für die einzelnen Prozessschritte angewendet werden. Beispielsweise ist es beim Abziehen einer Folie nicht erforderlich die einzelnen Fingerbewegungen originalgetreu zu modellieren. Man muss sich dennoch bewusst sein, welche physikalischen Belastungen und ergonomischen Einschränkungen dieser Prozess enthält.

3.3 Durchführung der ergonomischen und wirtschaftlichen Analyse

Um eine ergonomische und wirtschaftliche Analyse durchführen zu können, ist es notwendig die geometrischen Gegebenheiten des Versuches originalgetreu zu modellieren. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass Bewegungen des Digitalen Menschmodells synchron und mit gleicher Geschwindigkeit ablaufen. Dies beinhaltet die Geschwindigkeit bei der Fortbewegung mit den Beinen („Gehen“) oder bei den Greif- und Hinlangbewegungen der Digitalen Menschmodellen.

Eine weitere Problematik stellt die Gestaltung der Bewegungen dar. In der Virtuellen Ergonomie werden verschiedene Standardverfahren zur Bewertung der Ergonomie und der Wirtschaftlichkeit verwendet. Für die wirtschaftliche Analyse wird ein System vorbestimmter Zeiten genützt. Diese Systeme vorbestimmter Zeit, wie beispielsweise MTM (Methods-Time-Measurement) werden auch genützt, um Arbeitsbewegungen abzubilden. Während die Software DELMIA Process Engineer sämtliche MTM-Auflösungen (MTM-1, MTM-2, MTM-UAS, MTM-MEK) unterstützt, liegen im Fall EMA (imk automotive) und Siemens Tecnomatix nur MTM-UAS bzw. MTM-1 vor.⁴³

Diese Unterschiede in der Auflösung stellen bereits in der Entstehung der virtuellen Arbeitsprozesse erhebliche Differenzen dar. Der Unterschied liegt im Einsatzgebiet von MTM-UAS und MTM-1. Das universelle Analysiersystem (UAS) findet Anwendung in der Serienfertigung mit begrenzt langzyklischen Wiederholungen (Prozesstyp 2).

⁴³ vgl. Bullinger-Hoffmann u. Mühlstedt, 2016, S. 199.

Die genauere Auflösung durch MTM-1 kommt bei Mengenfertigung zum Einsatz, wo permanent kurzzyklische Wiederholungen stattfinden (Prozesstyp 1).⁴⁴

Aus ergonomischer Sicht bieten beide Softwaresysteme die Möglichkeit eine Bewertung der Ergonomie mittels EAWS durchzuführen. Das EAWS (Ergonomic Assembly Worksheet) ist ein kombiniertes Verfahren von verschiedenen Belastungsarten, welche Körperhaltung, Aktionskräfte, Lastenhandhabung und repetitive Tätigkeiten berücksichtigen. Eine große Herausforderung für die Simulation stellt die genaue Quantifizierung der Belastungen dar. Da man in diesem Versuch keine großen Belastungen erwartet, glaubt man, dass diese ergonomische Analyse keinen großen Einfluss auf den Werker hat. Jedoch können sehr wohl bei geringen Aktionskräften kombiniert mit exzentrischer Körperhaltung große Belastungen auf den Bewegungsapparat wirken.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in Bezug auf die Ergonomie eines Arbeitsplatzes ist die Erreichbarkeit von Gegenständen bzw. das Erreichen von Platzierstellen. Diese Ergonomie Analyse wird Erreichbarkeitsanalyse genannt, bei der eine Art Halbkugel eingeblendet wird. Diese Halbkugel kennzeichnet die maximal erreichbare Gelenkwinkelstellung zum aktuellen Zeitpunkt.

3.4 Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse

Um eine softwarebasierte Evaluierung menschlicher Arbeit an einer industriellen Baustellenmontage durchführen zu können, bedarf es einer Methodik, welche einen Vergleich des realen, physischen Arbeitsplatzes und der vorhandenen Softwarepaketen zieht. Die Bewertungsmerkmale werden hinsichtlich ergonomischer Aspekte und hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte gegliedert.

Da ein direkter Vergleich von zwei Softwarepaketen vorliegt, ist es von Bedeutung, dass der Versuchsaufbau in beiden Softwarepaketen identisch ist. Da in diesem use-case ein sehr hoher Anteil an Laufbewegung vorliegt, ist es wichtig ein großes Augenmerk auf das geometrische Verhalten der Digitalen Menschmodelle zu legen.

Ein annähernd identischer Aufbau des Szenarios wurde dadurch erreicht, dass ein identisches Koordinatensystem eingeführt wurde. Weiters konnten die identischen dreidimensionalen Objekte (zusätzlich gleiches Dateiformat) verwendet werden. Das Problem mit den Laufwegen wurde auch mittels Koordinaten gelöst. Durch die Festlegung des Laufpfades über Koordinaten, konnte dieser Aspekt ident behandelt werden. Weiters konnte das Platzieren der Kohlenstoffasermatten koordinatengestützt ident durchgeführt werden. Der virtuelle Aufbau der beiden Softwarepakete unterscheidet sich lediglich durch ein anderes Digitale Menschmodell.

⁴⁴ vgl. Baszenski, 2015, S. 243.

Die Auswertungsmethodik behandelt im Allgemeinen eine Gegenüberstellung von jeweils 3 virtuellen Simulationsdurchläufen pro Softwarepaket und einem realen Versuch, welcher in Form eines Videos zur Verfügung steht. Die virtuellen Simulationsläufe werden zuerst mit einem 0.5 Perzentil männlich Digitalen Menschmodell durchgeführt und ausgewertet, um eine Referenzsimulation beider Softwarepakete zu erstellen. Anschließend werden mit einem differenzierten Ansatz der Digitalen Menschmodelle (0.05 weiblich vs. 0.95 männlich) von jeweils zwei Simulationsdurchläufen pro Softwarepaket die Ergebnisse in Bezug auf Ergonomie und Ökonomie herausgearbeitet. Dabei vergrößert sich die Datenlage von zwei auf sechs Vergleichssimulationen.

Vorab kann abgeschätzt werden, dass durch die geringen Lastfälle wenig Belastung auf physiologischer Ebene auftreten wird. Ein wesentlich wichtigeren Aspekt wird die Auswertung der Erreichbarkeit liefern, da die Positionierung der Kohlenstoffasermatten speziell im fan cowl-Inneren sehr viel Reichweite erfordert. Dabei wird die Gegenüberstellung vom realen Versuch und Softwareversuchen in einer Tabelle visualisiert. Um die Forschungsfrage zum Thema Rationalisierung gegen Humanisierung beantworten zu können, wird das fan cowl-Werkzeug mit einem höhenverstellbaren Gestell ausgestattet. Mit dieser Modifikation werden erneut Simulationsdurchläufe erstellt.

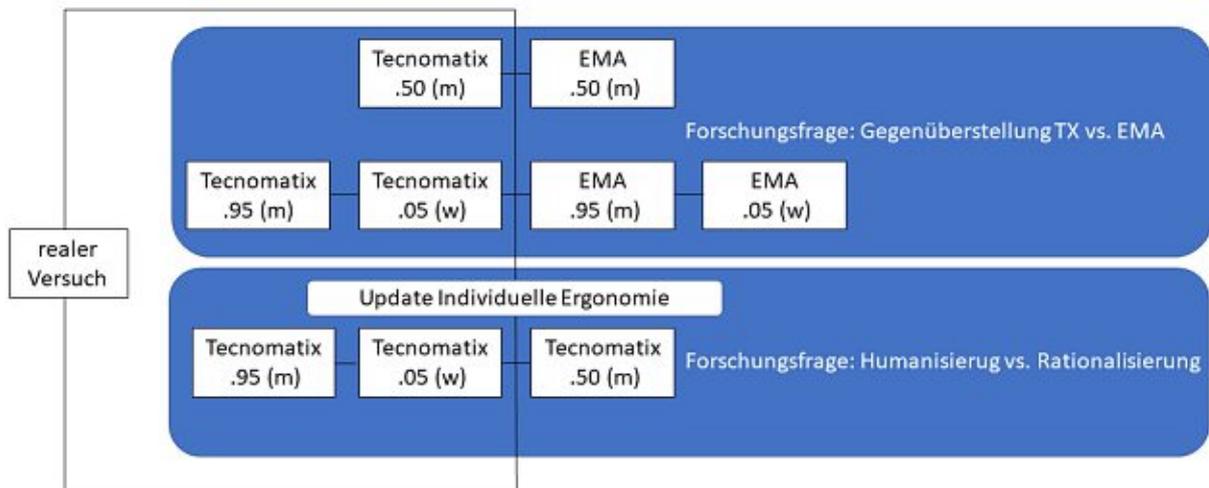


Abbildung 18: Schema der Auswertungsmethodik

3.5 Entwicklung von Entwürfen und Verbesserungsvorschlägen

Bei Betrachtung dieses Arbeitsplatzes geht hervor, dass sehr viel Laufbewegungen inkludiert sind. Da diese als Verschwendung gelten, ist besonders bei einer Weiterentwicklung des Arbeitsplatzes darauf Wert zu legen, dass kürzere Laufwege vorhanden sind. Das Zubringen des Materials kann beispielsweise mit einem Cobot System realisiert werden. Bei weiterer Betrachtung der Auswertung kann man erkennen, dass die relative Wertschöpfung während des Arbeitsprozesses sehr gering ist. Dadurch sieht man auch, dass sehr großes Optimierungspotential vorhanden ist. Um dieses Potential nutzen zu können, muss auch ein Blick auf die Ergonomie geworfen werden. In weiterer Folge der Arbeit kommt es zu einem Problem der Erreichbarkeit am Arbeitsplatz, welche in einer Weiterentwicklung berücksichtigt werden soll.

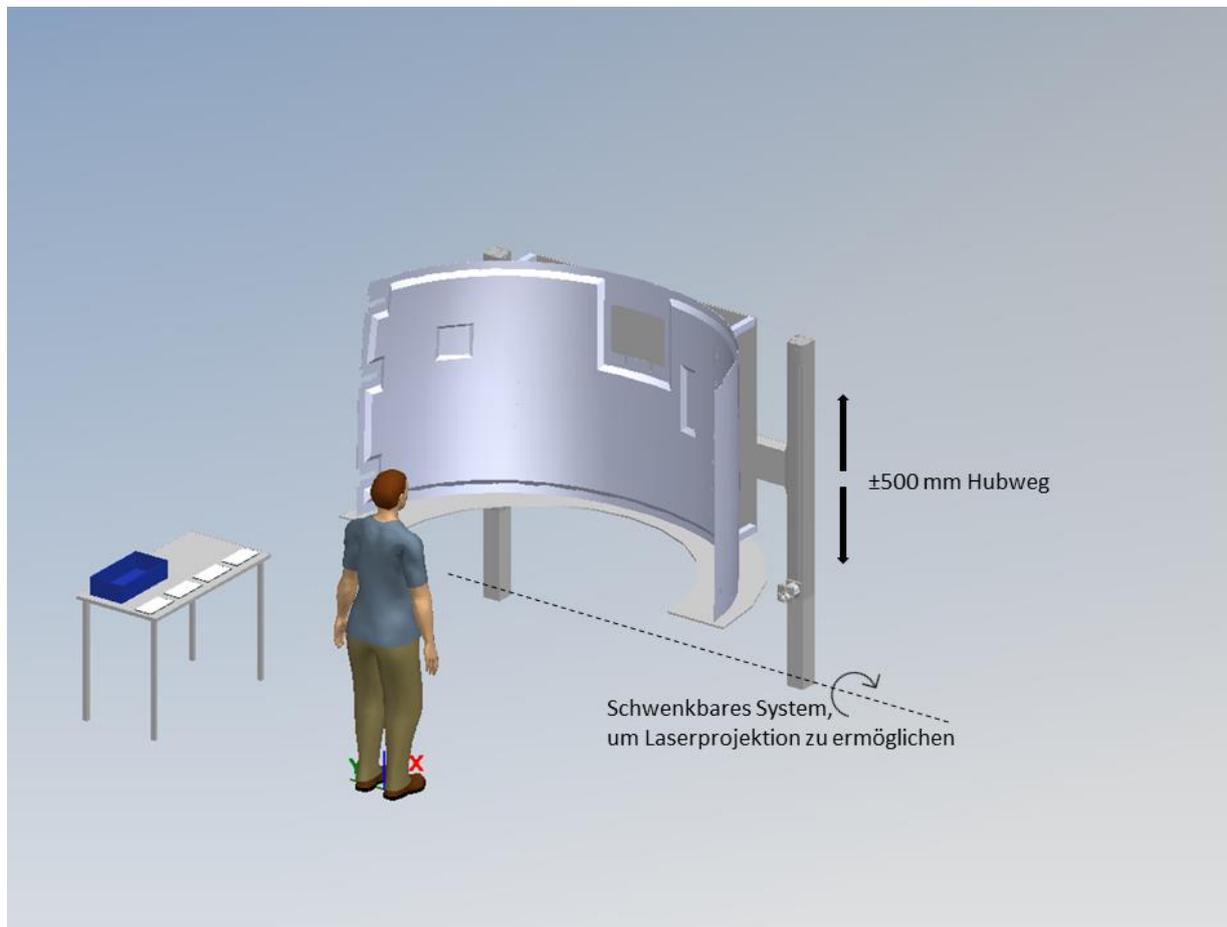


Abbildung 19: Mögliche Verbesserung der Ergonomie durch schwenkbares Hubsystem

In Abbildung 20 kann man einen möglichen Verbesserungsvorschlag sehen. Eine Höhenverstellung mittels Lineareinheiten mit jeweils 1000 mm Hub erlaubt eine individuelle Anpassung des Arbeitsplatzes an die Körpergröße. Somit ist die Erreichbarkeit auf jeden Fall gegeben. Um die Projektion mit Laser gewährleisten zu

können, muss die Projektion von radialer Stelle entfernt werden, da sich sonst der Körper zwischen Laser und Projektionsstelle befinden würde. An dieser Stelle wäre eine zusätzliche Neigung der Hebevorrichtung denkbar, welche den Winkel zwischen Mensch und Projektion vergrößert. Weiters kann an ein mobiles Lasersystem an der Halbrundung in Betracht gezogen werden. Diese positioniert sich direkt vor dem Körper des Werkers und macht eine Projektion möglich.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Konzeptes

Vorteile	Nachteile
Uneingeschränkte Durchführbarkeit hinsichtlich Ergonomie	Keine radiale Projektion
Geringere Laufwege	Schwenkung der Triebwerkschale
Geringere Prozesszeit	

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Evaluierung

Nun kommen die in Kapitel 3 erarbeiteten Grundlagen zu tragen und finden Anwendung. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den spezifischen Simulationsdurchläufen und schließt dabei auf Ergebnisse bzw. herausgefundene Erkenntnisse.

4.1 Auswertung TX vs. EMA

Auswertung Referenzmodell TX vs. EMA

Ein wichtiger Gesichtspunkt der Arbeit ist eine Gegenüberstellung der Softwarepakete von Siemens bzw. EMA zu erarbeiten. Zuerst wird eine Referenzsimulation mit einem 50% männlich Perzentil durchgeführt. Dabei wird auf grundsätzliche Differenzen der Softwarepakete geachtet.

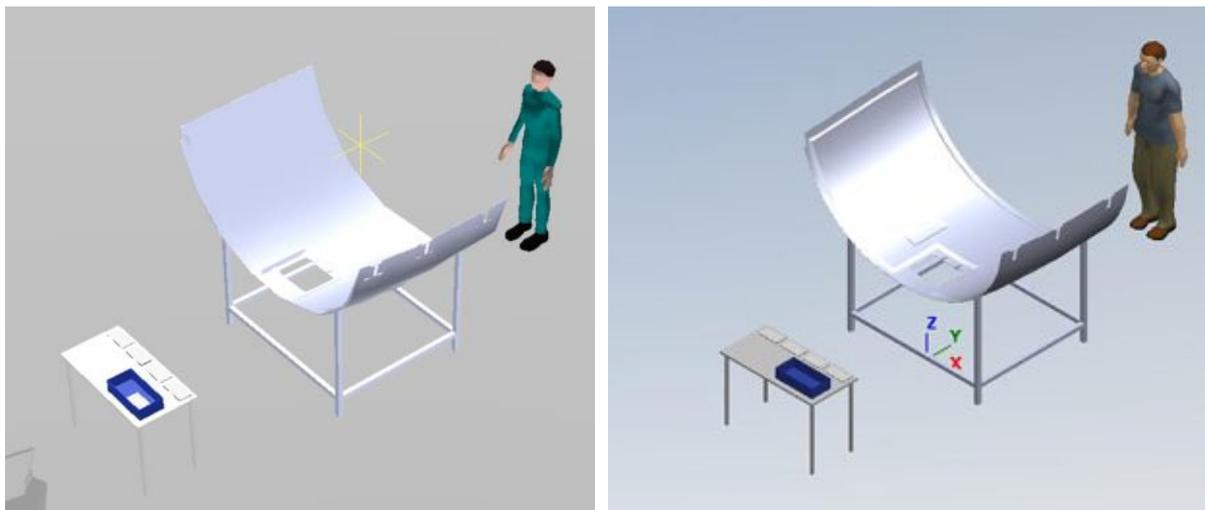


Abbildung 20: Initialposition mit 50% männlich Perzentile (links EMA, rechts TX)

Erreichbarkeit

Diese Erstellung beider Grundsimulationen zeigt bereits einige Problematiken im Bereich der Erreichbarkeit auf. Bei Siemens TX tritt bereits bei Matte 1 und Matte 4 eine Schwierigkeit bei der Erreichbarkeit auf. Erstens wurde bei der Erstellung dieses Simulationsschrittes eine Fehlermeldung ausgegeben, welche darauf hinweist, dass diese Position zu weit vom Digitalen Menschmodell entfernt ist. Zweitens ist die Erreichbarkeit mit der Einblendung des maximalen Bewegungsraumes („Grasp Envelope“) sehr genau nachzuvollziehen, welche in Abbildung 21 sehr gut ersichtlich ist. Eine Beurteilung der Erreichbarkeit der Matte 4 wird im Softwarepaket EMA nicht gegeben. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Kinematik der Digitalen Menschmodelle unterscheidet. Während bei TX eine Hüftbeugung nahe 90° vorliegt,

kommt das Digitale Menschmodell von EMA nicht annähernd auf diese Beugung, obwohl es sich offensichtlich geometrisch um dasselbe handelt. Jedoch lässt dieser Unterschied den Schluss zu, dass sich die kinematischen Aufteilungen des zurückgelegten Weges voneinander unterscheiden. Folglich können dadurch unterschiedliche Kollisionen entstehen, aber der erreichbare Weg muss ident sein, da es sich um dasselbe Digitale Menschmodell handelt. Weder eine Fehlermeldung noch eine Erreichbarkeitshüllfläche steht bei EMA zur Verfügung.

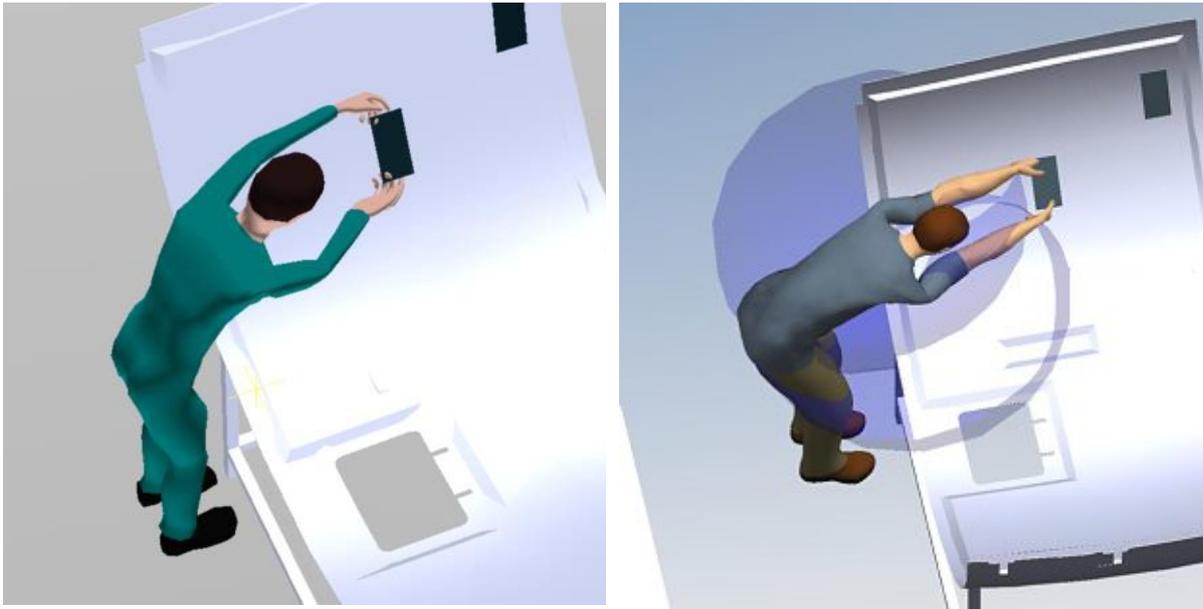


Abbildung 21: Montagevorgang Matte 4 (links EMA, rechts TX)

Sichtbarkeit

Die Sichtbarkeit kann in Bezug auf diese Problemstellung nur im Softwarepaket Siemens Tecnomatix beurteilt werden. Sie verfügt über Sichtkegel, welche eingeblendet werden. Da dieser Arbeitsplatz jedoch sehr gute Einsehbarkeit vorweist und keine verwinkelten Stellen bearbeitet werden müssen, bestätigt die Sichtfeldanalyse in Tecnomatix die Vermutung, dass alles sehr gut einsehbar ist. Jedoch muss EMA aufgrund eines fehlenden und wichtigen Tools, in diesem Bereich Abstriche hinnehmen.

Weganalyse

Die Weganalyse wird durch die angegebenen Pfadpunkte des Laufweges bestimmt. Die Pfadpunkte wurden mit Koordinaten in beiden Systemen festgelegt, was zu einem identen Laufweg führen sollte. Visualisiert werden die Bewegungen mittels Spaghetti Diagramm.

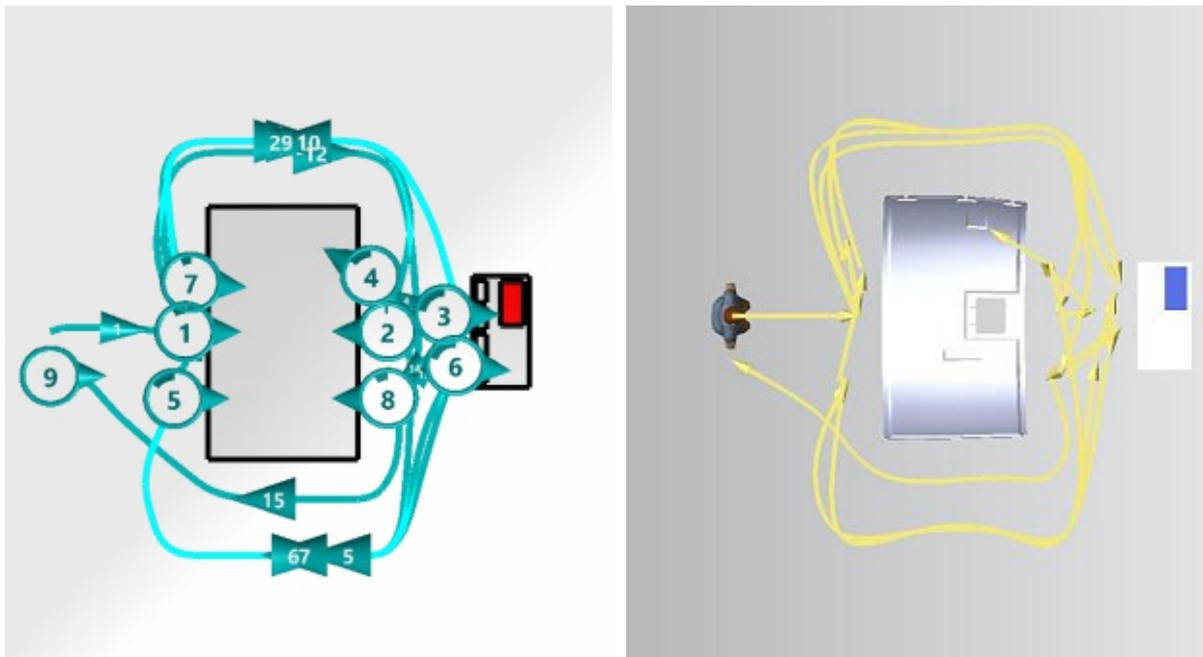


Abbildung 22: Spaghetti Diagramm (links EMA, rechts TX)

Die Weganalyse dieser Simulationssequenz wird laut Abbildung 22 vom Softwarepaket ausgegeben. Dabei wird auch eine .CSV bzw. .HTML Datei erstellt, welche außerhalb der Programmumgebung aufgerufen werden kann. Diese quantifiziert auch den zurückgelegten Weg. Im Fall von Tecnomatix wurden exakt 50m zurückgelegt. Gegenüberstellend liegt bei EMA eine zurückgelegte Wegstrecke von 45,81m vor. Das ist eine Abweichung von ca. 9 Prozent von TX auf EMA. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Platzierbewegungen oftmals kleine Gehbewegungen in Richtung des zu platzierenden Werkzeugs ausgeführt werden müssen. Speziell bei EMA wird der Laufweg nur mit den Gehbewegungen berechnet. Bei TX hingegen wird bei Greif- und Positionierbewegungen sehr wohl miteinberechnet. Aufgrund dieser Konstellation resultiert diese Abweichung.

Verschwendung

Die Verschwendung wird mittels Verschwendungsdiagramm dargestellt. EMA gibt in der Ergebnisübersicht ein Dashboard aus, welches unter anderem ein Tortendiagramm von Wertschöpfenden Tätigkeiten (z.B.: Matte platzieren, Folie abziehen, Nachjustieren der Folie) zu verschwenderischen Tätigkeiten (z.B.: Gehen, Handling,...) anzeigt.

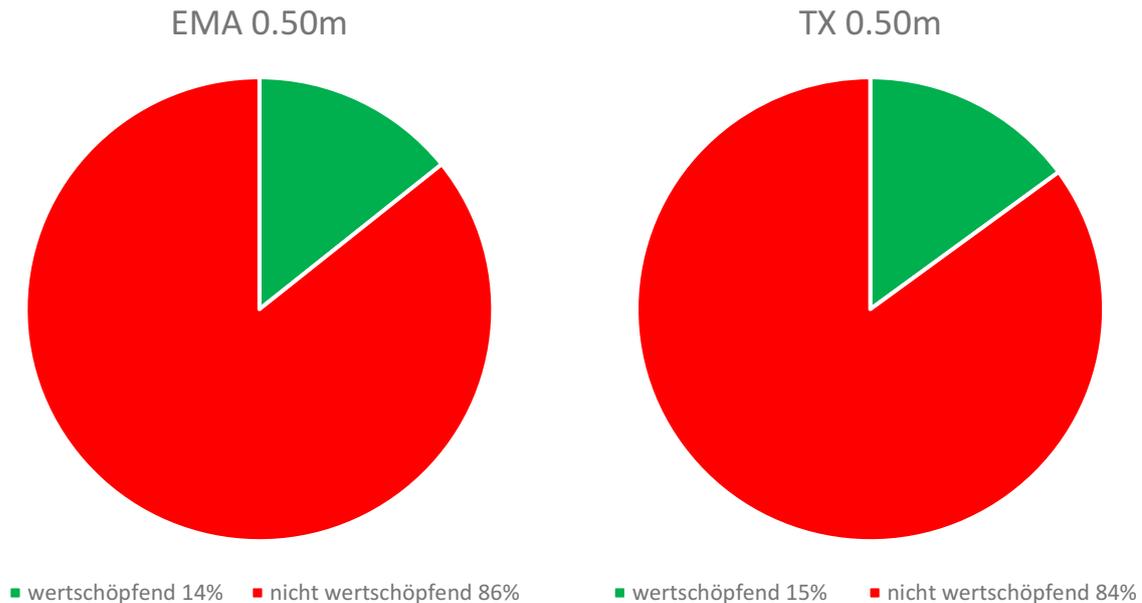


Abbildung 23: Verschwendungsdiagramm EMA 0.50m vs. TX 0.50m

Dabei werden die Zeitanteile, welche als wertschöpfend betrachtet werden, addiert und in Sekunden der Gesamtarbeitszeit gegenübergestellt. Hinsichtlich der Wertschöpfung kommen beide Softwarepakete auf ein relativ gesehen sehr ähnliches Ergebnis. EMA gibt an 14% Wertschöpfung zu sehen und Tecnomatix gibt 15% Wertschöpfung aus. Hier sieht man deutliches Optimierungspotential.

Zeitanalyse

Die Zeitanalyse wird in beiden Softwarepaketen mittels MTM (Methods-Time Measurement) betrachtet. Die Simulationssequenzen werden ebenfalls durch MTM aufgebaut, jedoch verwenden beide Systeme unterschiedliche Auflösungen hinsichtlich MTM. TX verwendet MTM-1 und EMA verwendet MTM-UAS. Wie oben erwähnt bedienen beide Auflösungen unterschiedliche Aufgabenstellungen, daher sind im Vorfeld unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten. Laut MTM Analyse beider Softwarepakete beträgt die vorbestimmte Arbeitszeit dieses Prozesses bei EMA 78,5 Sekunden und bei TX 119,8 Sekunden. Der große Unterschied ist einerseits auf die Bewegungsgeschwindigkeit zurückzuführen, andererseits aber auch auf die unterschiedliche Auflösung des Systems.

EAWS

Mit dem EAWS (Ergonomic Assessment Work-Sheet) kann eine ergonomische Bewertung des Arbeitsplatzes vorgenommen. Diese Möglichkeit bietet jedoch nur EMA. Bei TX ist eine zusätzliche Lizenz nötig, bietet jedoch andere Möglichkeiten zur Bewertung der Ergonomie. Im Vorfeld kann festgestellt werden, dass die Belastungen durch schwere Lasten eher ausbleiben. Bei der EAWS-Auswertung über EMA geht hervor, dass dieser Arbeitsplatz kein Risiko aufgrund Belastungen auf den

menschlichen Körper vorliegen. Dies mag auf den ersten Blick absurd erscheinen, findet man doch einige Rumpfbeugungen und kopfüber Operationen in dieser Simulation. Erstens sind die zu hebenden Lasten weit unter 3 Kilogramm und zweitens werden die ungünstigen Körperhaltungen durch die dynamische Ausführung (statische Auslegung erst ab 4 Sekunden Verweildauer gültig) kompensiert. Darüber hinaus limitiert der hohe Anteil an Laufbewegungen die Gesamtpunkteanzahl der Bewertung. Die Gesamtbewertung in diesem Fall beträgt 2 Punkte, welche in einer sehr geringen Belastung im Körper resultiert.

NIOSH

Das NIOSH-Verfahren behandelt ausschließlich beidhändige Hebevorgänge. Derzeit ist nur TX mit dieser Bewertungsmethode ausgestattet und bietet daher Möglichkeiten speziell die Hebevorgänge aus ergonomischer Sicht zu analysieren. Wiederum zeigt diese Bewertungsmethode, dass die Hebevorgänge zu jedem Zeitpunkt mit geringer Masse von statten gehen und folglich eine geringe Belastung auftritt. Jedoch wird im Ergebnisbericht von TX darauf hingewiesen, dass in drei Hebefällen die horizontale Abmessung der Hand-Zielposition, die maximale Reichweite überschritten wird.

RULA

RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ist eine Screening-Methode zur Bewertung der oberen Extremitäten, welche im Tecnomatix Paket von Siemens enthalten ist. Das Ergebnis dieser Analyse gibt eine Zahl zwischen 1 (akzeptabel) und 7 (Maßnahme zwingend erforderlich) aus. Da es sich bei diesem Verfahren um ein statisches Verfahren handelt, kann für jede Körperhaltung in der Simulationssequenz kontinuierlich eine RULA-Bewertung durchgeführt werden. Schlussendlich fällt die Bewertung mittels RULA in drei von vier Fällen negativ aus. Die Mattenlegeprozesse ein, zwei und vier sollten mit großer Dringlichkeit (jeweils links und rechts Bewertung 7) verbessert werden. Lediglich Legeprozess 3 gibt links eine Bewertung von 4 aus und rechts eine Bewertung von 6 auf der siebenstelligen Skala.

Auswertung der konträren Betrachtung der Digitalen Menschmodelle

Aufgrund der Tatsache, dass laut TX mit dem 0.5 Perzentil erhebliche ergonomische Probleme auftreten, wird diese Simulation mit konträren Perzentilen betrachtet. Konkret wird ein 0.05 Perzentil weiblich und ein 0.95 Perzentil männlich auf jedem Simulationspaket gegenübergestellt. Dadurch erweitert sich erstens die Datenlage, um den Vergleich der zwei Softwarepakete zu konkretisieren zu können und zweitens wird versucht einen Aufschluss über das Verhalten der Körpergröße zur Ergonomie zu erhalten.

Erreichbarkeit

Für Beurteilung der Erreichbarkeit kann wiederholt nur die TX Software von Siemens herangezogen werden. Auffallend ist, dass durch das Digitale Menschmodell mit einer 0.05 Perzentile weiblich exakt dieselbe Erreichbarkeit aufweist als die 0.50 Perzentile männlich. Jedoch zeigt das Digitale Menschmodell mit der Perzentile 0.95 männlich keine Schwierigkeiten der Erreichbarkeit auf. Dies lässt den Schluss zu, dass die Erreichbarkeit mit der Körpergröße abhängt. Dadurch kann eine individuelle Anpassung des Arbeitsplatzes an die Körpergröße zu erheblichen Vorteilen in der Erreichbarkeit führen. Größe und Gewichtsmaße nach DIN-33402-2 sind in Tabelle 7 zu finden.

Tabelle 7: Parameter Digitaler Menschmodelle nach DIN-33402-2

Perzentile	Körpergröße [mm]	Körpermasse [kg]
0.05 weiblich	1535	52
0.50 männlich	1750	79
0.95 männlich	1855	100

Sichtbarkeit

Die Sichtbarkeit kann auch in den Simulationssequenzen mit anderen anthropometrischen Abmessungen nur im Softwarepaket Tecnomatix durchgeführt werden. Es wird sowohl bei der 0.05 weiblich Perzentile als auch bei der 0.95 Perzentile männlich keine Sichtfeldeinschränkung vorhanden sein. Dies bestätigt auch Siemens Tecnomatix.

Weganalyse

Bei der Weganalyse findet man ein ähnliches Bild als bei der Gegenüberstellung TX 0.50 männlich mit EMA 0.50 männlich. Das Endergebnis aller weiteren Simulationen bewegen sich auf demselben Niveau.

Konkrete Gegenüberstellung TX/EMA [Meter/Meter] :

0.50 Perzentile männlich: $50/45,81 = 1,09$

0.95 Perzentile männlich: $49,2/45,6 = 1,08$

0.05 Perzentile weiblich: $51,5/46,25 = 1,11$

Das entspricht einer Schwankung von $\pm 1,6\%$.

Verschwendung

Die Verschwendung wird mittels Aufteilung der Prozesszeit in wertschöpfenden Tätigkeiten und verschwenderischen Tätigkeiten visualisiert. Aufgrund der Tatsache, dass ungefähr die halbe Prozesszeit auf Gehbewegungen entfallen ist es klar ersichtlich, dass viele verschwenderische Tätigkeiten vorhanden sein müssen. Alle sechs Simulationssequenzen weisen eine Verschwendung von deutlich über 80% auf. Wobei sich die wertschöpfenden Tätigkeiten im Bereich von 11,87% als Minimum und 16,18% als Maximum bewegen. Das bedeutet eine Schwankung von $\pm 2,16\%$.

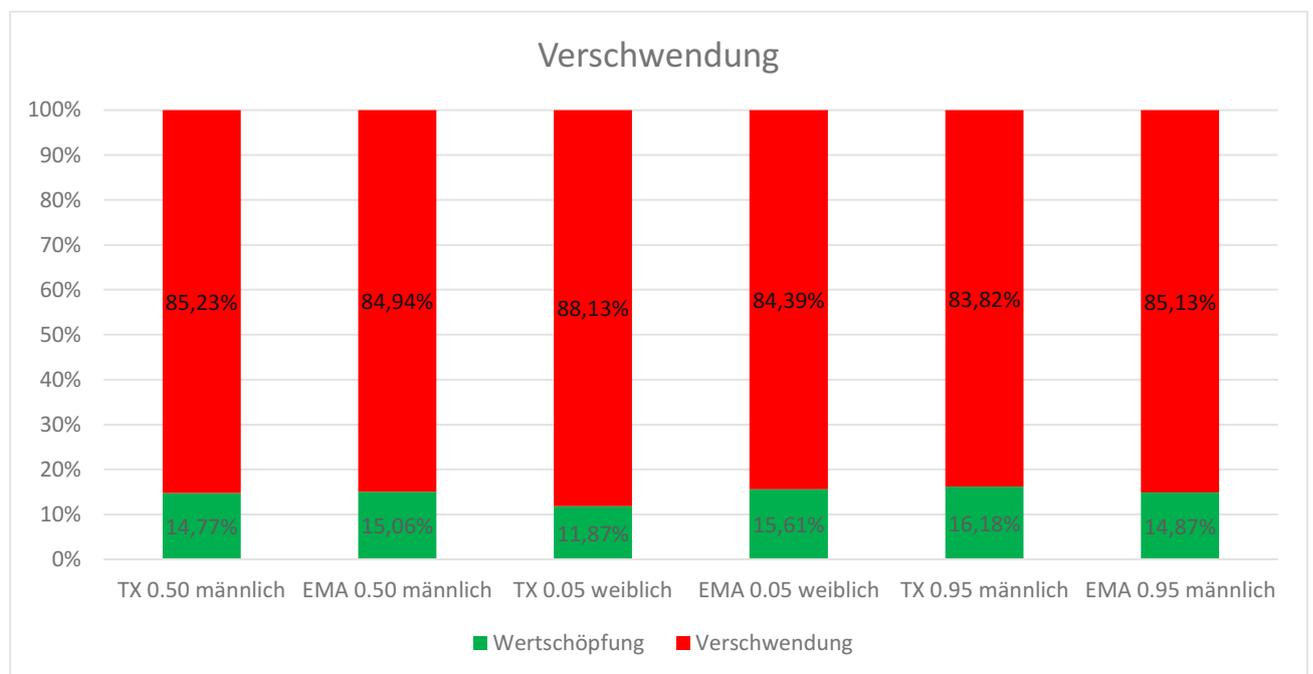


Abbildung 24: Verschwendungsdiagramm aller Simulationssequenzen

Zeitanalyse

Sehr ähnlich zum Vergleich vom 0.50 Perzentil männlich bei EMA und TX verhalten sich die weiteren Simulationssequenzen. Auffallend ist jedoch, dass bei EMA das Zeitlevel der Simulation annähernd konstant gehalten wird und beim 0.95 Perzentil männlich eine maximale Simulationszeit auftritt. Bei TX hingegen tritt ein großer Unterschied beim 0.05 Perzentil weiblich zu den anderen beiden Digitalen Menschmodellen auf. Mit nahezu 10 Sekunden wickelt das Perzentil 0.05 weiblich den Arbeitsprozess schneller ab.

EAWS

Die Betrachtung der Ergonomie mittels EAWS beschreibt ein konstantes Bild der EMA Simulationen. Die Ausgabe aller drei Simulationssequenzen beträgt 2 Punkte. Dies erfordert keine korrektiven Maßnahmen im Bereich der Ergonomie an diesem Arbeitsplatz.

NIOSH

Bei der Beleuchtung der Hebevorgänge mit NIOSH-Verfahren wird gezeigt, dass die Belastungen erwartungsgemäß gering sind. Es werden keine kritischen Hebevorgänge ausgegeben, jedoch wird beim 0.95 Perzentil männlich der vom Verfahren vorgegebene Erreichbarkeitsraum drei Mal überschritten. Beim 0.05 Perzentil weiblich wird hingegen der Erreichbarkeitsraum nur einmal überschritten. Dies ist aufgrund der geringeren Armlänge des Digitalen Menschmodells zurückzuführen.

RULA

Das RULA Verfahren hebt hervor, dass bei der Platzierbewegung der Matten ein Maximum der ergonomischen Belastung auftritt. Die Legeprozesse eins und vier beim 0.95 Perzentil männlich reizen die Skala im negativen Sinne vollends aus. Der zweite Legeprozess ist mit beidseitiger Bewertung von 6 auch zu verbessern. Lediglich der Legeprozess 3 ist nicht dermaßen kritisch ausgefallen (beidseitige Bewertung 4). Beim 0.05 Perzentil weiblich kann der Legeprozess eins und vier aufgrund der Erreichbarkeit nicht ausgeführt werden. Legeprozess drei und vier finden sich im kritischen Bereich von 7 wieder.

Tabelle 8: RULA Auswertung der Legevorgänge

Legevorgang		TX 0.50 (m)	TX 0.05 (w)	TX 0.95 (m)
1	R	7	-	7
	L	7	-	7
2	R	7	7	6
	L	7	7	6
3	R	6	6	4
	L	4	7	4
4	R	7	-	7
	L	7	-	7

4.2 Auswertung des realen Versuches

Um eine Validierung der Ergebnisse der Simulationssoftwarepakete durchführen zu können, muss der reale Versuch auch mit den Bewertungsverfahren analysiert werden. Diesen Analysen geht eine Videoaufnahme des Arbeitsprozesses und eine Durchführung in der Pilotfabrik 4.0 der TU Wien voraus.

Erreichbarkeit

Die Erreichbarkeit im realen Versuch ist gegeben, da der Werker die Kohlenstoffasermatten korrekt platzieren hat können. Die Arbeit wurde von einem 1850 mm großen Menschen durchgeführt. Deshalb treten keine Einschränkungen in der Erreichbarkeit auf.

Sichtbarkeit

Da beim realen Versuch keine Unregelmäßigkeiten beim Platzieren der Kohlenstoffasermatten aufgetreten sind, wird davon ausgegangen, dass alle Arbeitsvorgänge mit guter Sichtbarkeit ausgeführt werden können.

Weganalyse

Die Analyse über die zurückgelegte Distanz während dieser Tätigkeit wurde mit Maßband und Wegpunktmarkierungen in der Pilotfabrik durchgeführt. Dabei wurden die Wegpunkte am Boden mit Klebeband definiert und anschließend mittels Maßband und der ordnungsgemäßen Reihenfolge abgemessen. 45,6 Meter wurden ermittelt.

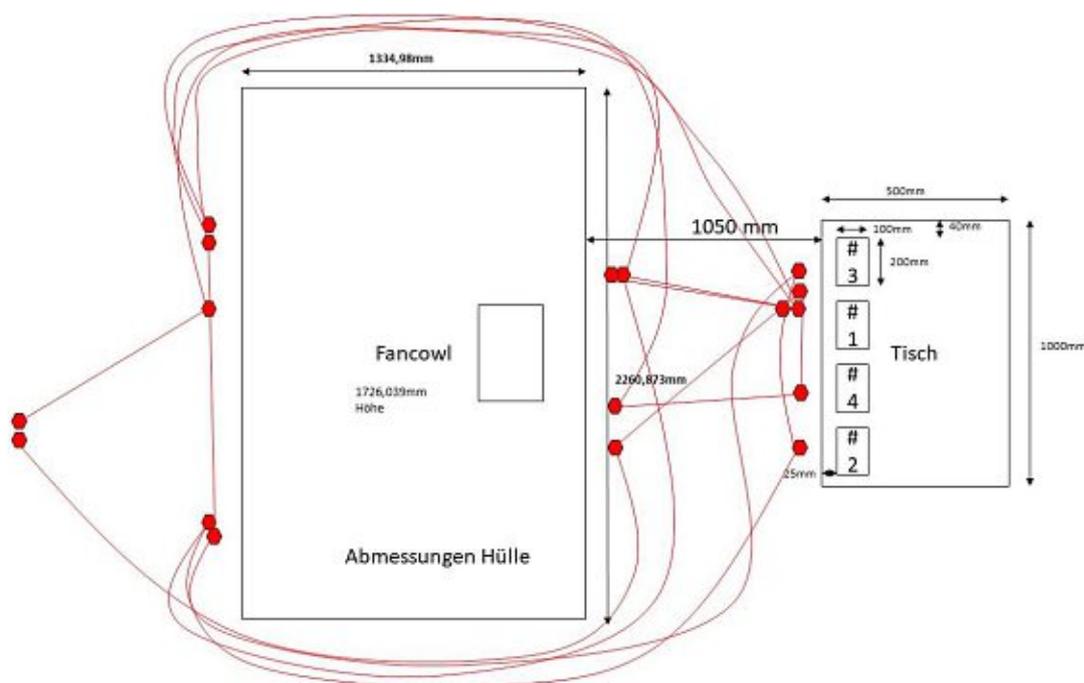


Abbildung 25: Spaghetti Diagramm – Weganalyse

Verschwendung

Die Berechnung der Verschwendung geht aus der MTM-1 Analyse des Arbeitsprozesses hervor. Dabei wurden wiederum als wertschöpfende Tätigkeiten das Abziehen der Folie und der Platziervorgang der Kohlenstoffasermatte betrachtet. Die Wertschöpfung bewegt sich im Bereich der Simulationsergebnisse.

Zeitanalyse

Die Zeitanalyse wird mittels MTM-1 und MTM-UAS durchgeführt, um Referenzwerte für TX und für EMA zu erhalten. Beim realen Versuch ist eine Zeit von 122 Sekunden zu beobachten. Laut MTM-1 Analyse darf der Werker 98,11 Sekunden dafür benötigen. Laut MTM-UAS sind es lediglich 93,78 Sekunden. Dies kann auf das unterschiedliche Methodenniveau zurückgeführt werden.

EAWS

Die Ergonomie Bewertung durch EAWS führt auf ein Ergebnis, dass keine Korrekturvorgaben notwendig sind. Dabei spielt die Definition von „statischer“ zu „dynamischer“ Bewegung eine tragende Rolle. Viele Bewegungen schließen beispielsweise eine Rumpfbeugung ein, diese werden jedoch als statisch angenommen und mit der Gesamtbewertung überschrieben.

NIOSH

Die Betrachtung der Hebevorgänge basieren auf dem NIOSH Verfahren. Aufgrund der Tatsache, dass die Masse der zu hebenden Teile sehr gering ist (200g), wird der Lifting Index sich weit unter den Faktor 1 bewegen. Beim Hebevorgang und kontinuierlicher Arbeit ist kein Risiko einer Gefährdung der Skelettmuskulatur zu erwarten.

RULA

Die Bewertung nach RULA-Verfahren zur Beurteilung der Oberkörperergonomie wird mittels Papier und Stift mit Betrachtung der Legevorgänge vor Ort durchgeführt. Ein großer Vorteil besteht darin, dass man sehr gut erkennen kann, aus welchen Bereich sich der finale Punktestand zusammensetzt. Diese Information ist nützlich, ob beispielsweise die Beine und Torso-Bewegungen in Zukunft anders erfolgen sollen.



Abbildung 26: Legevorgang 1 Frontalansicht



Abbildung 27: Legevorgang 1 Seitenansicht

Das RULA Verfahren bewertet jede Seite des Oberkörpers einzeln. Dabei wird jeweils eine Seite des Oberkörpers mit Torso, Beine und Nacken verglichen. Die Bewertung des Oberkörpers erfolgt auf Grundlage des Oberarm-, Unterarm- und Handgelenkwinkels, sowie der Handgelenksverdrehung. Weiters werden „Strafpunkte“ vergeben, wenn beispielsweise eine Drehung oder mediale bzw. laterale Neigung des Nackens vorliegt. Um eine bessere Bewertung des Legevorganges durchführen zu können, kann eine Visualisierung mittels 2 annähernd rechtwinkligen Perspektiven

auf den Arbeitsvorgang vorgenommen werden. Anschließen können die Gelenke im Bild mit einem Punkt gekennzeichnet werden. Die Gelenkpunkte werden mit Linien verbunden, um einen Überblick über die Gelenkstellungen zu erhalten. Aus diesen beiden Perspektiven mit den aktuellen Gelenkstellungen kann nun eine RULA Bewertung durchgeführt werden. Dabei ist auf auftretende Verzerrungswinkel zu achten.

Tabelle 9: RULA – Auswertung des realen Versuches

Legevorgang	1	2	3	4
Rechts	6	3	4	6
Links	6	3	4	6

4.3 Schlussfolgerungen real vs. TX vs. EMA

Nun werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsdurchläufe beschrieben, um folglich auf Schlussfolgerungen in Bezug auf die Forschungsfrage zu kommen.

In Tabelle 10 wird eine Übersicht der Ergebnisse zur Gegenüberstellung von TX und EMA angegeben. Jene Felder, die eine Vollzähligkeitsgrad angeben (z.B. RULA: 1/4) bedeuten, dass Platzierung bei einem Vorgang korrekt und ohne Bedenken nach dem jeweiligen Verfahren durchgeführt werden kann. Ein Minus Symbol bedeutet, dass das entsprechende Verfahren im Softwarepaket nicht verfügbar ist.

Tabelle 10: zusammenfassende Auswertungstabelle

		REAL	TX .50 (m)	EMA .50 (m)	TX .05 (w)	EMA .05 (w)	TX .95 (m)	EMA .95 (m)
ergonomisch	EAWS	2	-	2	-	2	-	2
	NIOSH	✓	✓	-	✓	-	✓	-
	Erreichbarkeit	4/4	2/4	-	2/4	-	4/4	-
	Sichtfeld	✓	✓	-	✓	-	✓	-
	RULA	1/4	0/4	-	0/4	-	1/4	-
wirtschaftlich	MTM [s]	98,11	119,8	78,5*	110,5	78,5*	120,9	79,58*
	Weganalyse [m]	45,6	50	45,81	51,5	46,25	49,2	45,57
	Wertschöpfung [%]	15,1	14,77	15,61	11,87	15,61	16,18	14,87

*Bewegungsgeschwindigkeit unterscheidet sich von TX zu EMA um den Faktor 1,3;

Mit dieser Menge an Daten, soll geklärt werden, welches Softwarepaket besser für eine industrielle Baustellenmontage geeignet sein soll. Zu Beginn ist die Architektur der Softwarepakete zu betrachten. Sowohl TX als auch EMA verwendet ein Bausteinsystem zur Modellierung der Simulationssequenzen. Dabei unterscheiden sich beide signifikant voneinander. TX verwendet MTM-1 zum Aufbau der Bewegungen, welches in Arbeitsabläufen von Prozesstyp 1 (Mengenfertigung)

Verwendung findet. EMA hingegen verwendet MTM-UAS, welches im Prozesstyp 2 (Serienfertigung) Anwendung findet. Da sich diese Arbeit mit industrieller Baustellenmontage (Prozesstyp 3) befasst, ist das Softwarepaket EMA sicherlich treffender als TX. Nach der Gegenüberstellung der Zeitanalysen von realem Versuch, TX und EMA, zeigt es sich, dass TX mit 119,8 Sekunden sehr nahe an den 122 Sekunden des realen Versuches bewegt. EMA hingegen gibt mit 78,5 Sekunden eine um mehr als 40 Sekunden schnellere Prozesszeit an. Die MTM-1 und MTM-UAS Analysen des realen Versuches geben einen Wert von 98,11 Sekunden bzw. 93,78 Sekunden an. Diese Werte hinsichtlich der Zeitwirtschaft geben ein breites Spektrum an Ergebnissen an. Hinsichtlich der relativen Wertschöpfung geben alle Durchführungen ein annähernd gleiches Ergebnis aus. Ein weiterer Faktor ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Digitalen Menschmodellen in den beiden Softwarepaketen. Das Digitale Menschmodell in EMA bewegt sich mit ca. 1 m/s und das Digitale Menschmodell in TX bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,7 m/s. Dies resultiert aus einer Modellierung durch Zeitbausteine, welche nicht manuell an die gleiche Geschwindigkeit angepasst werden können. Die Weganalyse zeigt, dass der zurückgelegte Weg während der Simulation ca. 50 Meter beträgt. EMA gibt ungefähr 4 Meter weniger zurückgelegten Weg an.

Nach der Betrachtung der wirtschaftlichen Seite, wird in diesem Absatz der ergonomischen Gegenüberstellung betrachtet. Dabei ist anzumerken, dass EMA lediglich ein Tool zur Analyse der Ergonomie enthält, nämlich EAWS. Der Entwickler von EMA stellt in Aussicht zusätzliche Ergonomie Tools in Zukunft implementieren zu wollen. Hingegen ist TX mit einer großen Bandbreite zur Ergonomie Bewertung ausgestattet. EAWS hingegen kann lediglich mit einer zusätzlichen Lizenz aktiviert werden. Nachdem EMA kein Risiko für ergonomische Schäden am Menschen ausgibt, ist von keiner ergonomischen Korrektur des Arbeitsplatzes auszugehen. Bei Betrachtung der Ergonomie mittels RULA in TX sieht man sehr wohl, dass Korrekturen am Arbeitsplatz vorgenommen werden müssen. Lediglich bei einem der vier Mattenlegevorgänge ist keine rasche Korrektur zur Minimierung der Schäden am Menschen erforderlich. Dies bestätigt auch die RULA Analyse am realen Versuch. Die RULA Analyse in TX liefert denselben Trend der Bewertung gegenüber dem realen Versuch, ist jedoch ein klein wenig kritischer. Die NIOSH Analyse stellt fest, dass kein Risiko aufgrund von Hebevorgängen besteht.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Erreichbarkeit der Fügestelle der Kohlenstoffasermatte. EMA bietet kein Tool zur Bewertung der Erreichbarkeit von Arbeitsobjekten. Dies kann nur durch aufmerksames Verfolgen der Simulation erfasst werden. Jedoch gestaltet sich dieser Punkt aufgrund der Abschätzung der Längen in einem 3D-Softwareprogramm als äußerst schwierig. TX bietet hingegen die Möglichkeit eine Halbkugeloberfläche einzublenden, welche den Aktionsraum des Digitalen Menschmodells widerspiegelt. Darüber hinaus wird mit der NIOSH-Analyse die

Erreichbarkeit behandelt. Falls eine Bewegung außerhalb des Aktionsraumes des Digitalen Menschmodells stattfindet, wird dies als Warnung im NIOSH Bericht angegeben. Außerdem wird bei der Erstellung der Bewegung eine Fehlermeldung „out of reach“ ausgegeben. Die in TX angewendete Sichtfeldanalyse bestätigt das zu erwartende Ergebnis, welches keine Einschränkungen in der Sichtbehinderung auftreten.

Abschließend kann aus den oben genannten Gründen behauptet werden, dass TX besser für die industrielle Baustellenmontage geeignet ist. Vor allem das Fehlen weiterer Ergonomie-Tools in EMA führen dazu, dass sich TX durchgesetzt hat. EMA bietet keine Möglichkeit, um die Erreichbarkeit zu prüfen, welche essenziell für die Durchführung dieses Arbeitsprozesses ist. Weiters führt die Erfassung des ergonomischen Risikos durch TX zu einem korrektiven Eingriff in den Arbeitsplatz, welcher mit der Betrachtung durch EMA nicht stattgefunden hätte.

4.4 Auswertung des individualisierten Prozesses

Aufgrund der ergonomischen Mängel im Laminierungsprozess, wurde ein Modell entwickelt, welches auf eine verbesserte Ergonomie im Arbeitsprozess abzielt. Mit einer höhenverstellbaren Vorrichtung und einem gekippten Laminierungsprozess wurde der Arbeitsvorgang erneut simuliert. Dabei werden drei Simulationsdurchläufe in TX ausgeführt. Da in EMA kein RULA Analysetool vorhanden ist, kann keine Information bezüglich der Ergonomie erhalten werden. Die Simulationsdurchläufe werden mit 0.05 Perzentil weiblich, 0.50 Perzentil männlich und 0.95 Perzentil männlich mit den jeweils angepassten Höhen durchgeführt. Die Höhenverstellung erfolgt auf Analogie des Massenmittelpunktes.

Diese Betrachtung legt großen Fokus auf die Auswertung der Ergonomie und der wirtschaftlichen Parameter, wie Laufwege und Prozesszeit.

Weganalyse

Da in der herkömmlichen Ausführung des Arbeitsplatzes sehr viele Laufwege entstehen, konnte beim neuen Konzept der Laufweg verringert werden. Die ursprüngliche Version war wirtschaftlich gesehen durch das oftmalige Herumlaufen um das fan cowl-Werkzeug sehr dürftig ausgestattet. Das Spaghetti Diagramm, welches von TX beim Simulationsdurchlauf mit einem 0.50 Perzentil männlich Digitalen Menschmodell ausgegeben wird, zeigt eine Wegersparnis um 27,2 Metern. Der Laufweg im neuen Konzept beträgt nun 22,8 Meter.

Zeitanalyse

Bei der Betrachtung der Zeitanalyse zeigt sich ein ähnliches Bild. Mit einer Prozesszeit nach MTM-1 beträgt die Dauer 83,8 Sekunden. Das bedeutet eine Zeitersparnis von 36 Sekunden.

RULA

Durch das höhenverstellbare fan cowl-Werkzeug, ist nun eine individuelle Anpassung auf die Körpergröße des Werkers möglich. Durch das Kippen des Legeprozesses, wird aktiv gegen die oftmals auftretenden Rumpfbeugungen entgegengearbeitet. Die RULA Analyse von TX bestätigt mit den Ergebnissen den ergonomischen Benefit der überarbeiteten Konstruktion.

Tabelle 11: RULA Auswertung des verbesserten Prozesses

Legevorgang		TX 0.50 (m)	TX 0.05 (w)	TX 0.95 (m)
1	R	4	4	3
	L	4	4	4
2	R	3	3	3
	L	3	3	3
3	R	3	3	3
	L	3	3	3
4	R	4	3	3
	L	4	3	4

Tabelle 11 stellt eine Zusammenfassung der Legevorgänge am Optimierten fan cowl-Werkzeug dar. Dabei ist auffallend, dass das Risiko teilweise um vier Stufen reduziert wurde. Darüber hinaus ist die Erreichbarkeit aller Legepositionen gegeben, welche bei der Grundanalyse nicht erfüllt war.

4.5 Diskussion der Resultate in Bezug Humanisierung vs. Rationalisierung

Um auf die Forschungsfrage Stellung zu nehmen, welche die Abhängigkeit der Durchlaufzeit bzw. Prozesszeit mit der individuellen Anpassbarkeit des Arbeitsplatzes gegenüberstellt, ist zunächst vorwegzunehmen, dass die Simulation mit 0.05 Perzentil weiblich Digitalen Menschmodellen zeigt, dass die Erreichbarkeit von Legestellen nicht gegeben ist. Darüber hinaus zeigen die Simulationen, dass ein sehr hohes Risiko nach RULA für den menschlichen Körper besteht. Folglich ist ein überarbeitetes Konzept des Arbeitsplatzes nötig, um eine nicht schädliche, durchführbare und wirtschaftlich verbesserte Arbeitsumgebung zu schaffen.

Die Simulationsdurchläufe des neuartigen Konzeptes zeigen deutlich welche Vorteile ein individuell anpassbarer Arbeitsplatz bietet. Letztendlich bietet die vertikale

Höhenverstellung die Möglichkeit, dass die vollständige Erreichbarkeit der Legeplätze erfüllt werden kann. Darüber hinaus verbessert sich die Prozesszeit des Arbeitsplatzes erheblich. Nach MTM-1 Analyse beträgt der Benefit 36 Sekunden gegenüber dem konventionellen Durchlauf. Dies ist hauptsächlich auf die verkürzte Wegstrecke zurückzuführen. Diese wird um 27,2 Metern verkürzt, was eine Halbierung der Wegstrecke bedeutet.

In diesem use case wäre ohne ergonomische Anpassung die Durchführung des Arbeitsprozesses nicht möglich. Die individuelle Anpassung ist daher eine notwendige Bedingung. Im konkreten Fall kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass die Wirtschaftlichkeit nur von der Erfüllung der zu verrichteten Arbeit abhängig ist. Da die Erreichbarkeit kleinerer Menschen nicht ausreicht, um die Legevorgänge auszuführen. Auch mittels einer höhenverstellbaren Konstellation in der Horizontallage des fan cowl-Werkzeuges, reicht die Erreichbarkeit kleinerer Menschen nicht aus, um die Arbeit korrekt zu verrichten.

Deshalb ist eine Überarbeitung, wie im vorgeschlagenen Konzept ersichtlich, notwendig. Die Wirtschaftlichkeit ist in der neuen Ausführung des Arbeitsplatzes nicht abhängig von der individuellen Anpassbarkeit der Ergonomie, da alle drei Simulationsdurchläufe sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kann noch hinzugefügt werden, dass die Ergonomie deutlich verbessert wurde und folglich Krankenstände durch muskuläre Dysbalancen reduziert werden. Auf der anderen Seite muss ein Investment für die überarbeitete Version des Arbeitsplatzes getätigt werden.

5 Zusammenfassung & Ausblick

Im aktuellen Zeitalter der modernen Computersysteme herrscht eine rapide Weiterentwicklung in allen industriellen Prozessen. Der schnelle Wandel und die kundenspezifischen Wünsche legen nahe agile Produktionssysteme zu verwenden, welche zum Teil automatisiert jedoch mit einer unverzichtbaren Komponente, dem Mensch, ausgestattet sind. Durch die Flexibilität des Werkers wird der Mensch sehr wohl Bestandteil der produzierenden Industrie sein. Mit der Möglichkeit von Assistenzsystemen und der Interaktion mit Robotern stehen der wandelbaren Fabrik alle Möglichkeiten offen. Jedoch muss die Ressource Mensch sehr behutsam und mit Weitblick eingesetzt werden. Die physische Entwicklung der Bevölkerung begünstigt muskuläre Dysbalancen, welche zu sehr hohen Krankheitsrisiken und somit wirtschaftlichen Nachteilen, führen können. Nicht nur aus produktionsplanungstechnischer Sicht, sondern auch aus ergonomischer Sicht, ist der Einsatz von Simulationstechniken in virtueller Arbeitsumgebung unabdingbar. Auf der einen Seite erlaubt die Simulation eine sehr gute Abschätzung der Machbarkeit und Anpassung des Produktionsprozesses, auf der anderen Seite ist eine Evaluierung der ergonomischen Aspekte möglich. Diese Arbeit zeigt, dass die Qualität der Evaluierung menschlicher Arbeit durchaus als gut zu bewerten ist. Konkret hat nur eine der Beiden Softwarepakete das hohe ergonomische Risiko erkannt, jedoch sind die wirtschaftlichen Parameter durchaus brauchbar, um eine Abschätzung zu tätigen. Diese Tatsache erlaubt es Variationen von verschiedenen Arbeitsplatzszenarien zu simulieren und adäquate Ergebnisse zu erzielen. Bei einer Modellierung der Arbeitsumgebung können somit geometrische Probleme, wie Kollisionen sofort eruiert werden. Dies erspart wertvolle Zeit in der realen Umsetzung. Der wirtschaftliche Parameter Laufweg ist in Relation mit der Prozesszeit ein sehr guter Indikator über die Wirtschaftlichkeit eines Prozesses. Bei dieser Relation wird ein geometrischer Zusammenhang in Form von Laufweg und ein zeitbasierter Zusammenhang in Form von Prozesszeit gegenübergestellt. Kritisch dabei zu betrachten ist die Prozesszeit, welche durch die Simulation in Form von Zeitbausteinen bestimmt wird. Durch verschiedene Notationen der Zeitbausteine kann eine große Streuung der Ergebnisse resultieren. Deshalb ist eine genaue Kenntnis über die verwendeten Methoden vorbestimmter Zeit essenziell. Die ergonomische Betrachtung mit virtueller Umgebung bietet hingegen ausschließlich Vorteile. Die Simulation mittels Digitalen Menschmodellen erleichtert und beschleunigt die Bewertung der Ergonomie. Darüber hinaus können statische Verfahren in quasi-dynamische Verfahren umgewandelt werden und man erhält eine kontinuierliche Bewertung eines Arbeitsprozesses. Durch die Vielfalt an Verfahren zur Bewertung der Ergonomie ist es unabdingbar, sehr gute Kenntnis über die Verfahren zu besitzen, da je nach Verfahren andere Aspekte der Ergonomie untersucht werden. Darüber hinaus sollte Kenntnis über die physikalischen Kräfte und kinematischen Zusammenhänge vorhanden sein, da es bei der manuellen

Einstellung von Körperhaltungen leicht zu undefinierten Zuständen kommen kann. Auf der einen Seite beschleunigen virtuelle Arbeitssimulationen die Evaluierung wirtschaftlicher und ergonomischer Aspekte, auf der anderen Seite ist die Modellbildung sehr aufwendig. Bei der Modellbildung des Arbeitsplatzes soll auf das Wesentliche geachtet werden, um sich nicht mit irrelevanten Kleinigkeiten auseinanderzusetzen und so wertvolle Zeit zu vergeuden. Der Faktor Zeit wird in naher Zukunft ein beträchtlicher Faktor sein, denn der hohe Grad an Kundenspezifität nimmt zu. Daraus resultieren personalisierte Güter, welche eine agile Produktionsumgebung erfordern, in welcher der Faktor Zeit über die Konkurrenzfähigkeit des Unternehmens bestimmen. Die Modellbildung kann durch „motioncapturing“ und „3D-scanning“ unterstützt werden. Letztendlich bietet eine virtuelle Nachbildung der Fabriken die Möglichkeit Echtzeitinformationen bereitzustellen. Mit diesen Daten kann sehr schnell auf unvorhergesehene Ereignisse reagiert werden. Diese Vernetzung wird aktuell in der Industrie stark forciert, um konkurrenzfähig zu bleiben und vor allem den dynamischen Markt zu trotzen. Nicht nur entlang der ganzen Fabrik können diese neuen Technologien zu einem Mehrwert beitragen, auch der einzelne Arbeitsplatz kann profitieren. Durch die Nutzung von Assistenzsystemen oder Cobots kann der Arbeitsplatz in Richtung Wirtschaftlichkeit, Qualität und Usability optimiert werden. Konkretisiert auf diesen Arbeitsplatz könnte die Projektion mit Lasersystemen durch eine VR-Brille ersetzt werden und die Materialanlieferung durch einen Cobot ausgeführt werden.

Literaturverzeichnis

Badioze Zaman, Halimah [u.a.]: *Advances in Visual Informatics / Badioze Zaman, Halimah ...* – Cham : Springer International Publishing, 2019. – 759 S. – (Bd. 11870). – ISBN 978-3-030-34031-5.

Baszenski, Norbert: *Industrial Engineering : Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung.* – 2. Auflage. – München : Hanser, 2015. – 282 S. – (REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung). – ISBN 9783446447868. = <http://dx.doi.org/10.3139/9783446447875>.

Bauer, Sebastian [u.a.]: *Task-based digital human simulation with Editor for Manual work Activities - Basic functionalities, applications, and future works / Bauer, Sebastian ...* – In: *DHM and Posturography*: Elsevier, 2019. – S. 57–62. – ISBN 9780128167137.

Börner, Kerstin: *Die Altersabhängigkeit der Beanspruchung von Montagemitarbeitern.* – Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. – 297 S. – ISBN 978-3-658-26377-5.

Bubb, Heiner [u.a.]: *Automobilergonomie / Bubb, Heiner ...* – Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – 718 S. – ISBN 978-3-8348-1890-4.

Bubb, Heiner: *Why do we need digital human models?* – In: *DHM and Posturography*: Elsevier, 2019. – S. 7–32. – ISBN 9780128167137.

Bullinger-Hoffmann, Angelika C. [u.a.]: *Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle / Bullinger-Hoffmann, Angelika C. ; Mühlstedt, Jens.* – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016. – 417 S. – ISBN 978-3-662-50458-1.

Bures, Marek [u.a.]: *Comparison of Time Standardization Methods on the Basis of Real Experiment / Bures, Marek ; Pivodova, Pavlina.* – In: *Procedia Engineering.* – 100 (2015), S. 466–474.

Caputo, F. [u.a.]: *On the use of Virtual Reality for a human-centered workplace design / Caputo, F. ...* – In: *Procedia Structural Integrity.* – 8 (2018), S. 297–308.

Charland, Julie: *Virtual Ergonomics by Dassault Systèmes.* – In: *DHM and Posturography*: Elsevier, 2019. – S. 97–103. – ISBN 9780128167137.

OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - Facts and figures / European Agency for Safety and Health at Work. – Luxembourg : Office for Official Publ. of the Europ. Communities, 2010. – 179 S. – (European risk observatory report). – ISBN 9789291912612.

Fritzsche, Lars [u.a.]: Task-based digital human simulation with Editor for Manual work Activities – industrial applications in product design and production planning / Fritzsche, Lars ... – In: DHM and Posturography: Elsevier, 2019. – S. 569–575. – ISBN 9780128167137.

Gutenschwager, Kai [u.a.]: Simulation in Produktion und Logistik / Gutenschwager, Kai ... – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. – 290 S. – ISBN 978-3-662-55744-0.

Kohl, Holger [u.a.]: Increasing challenges for sustainability for manufacturing industry based on global, national and technological initiatives / Kohl, Holger ; Schliephack, Wolf ; Muschard, Bernd. – In: Procedia Manufacturing. – 43 (2020), S. 293–298.

Lämkuhl, Dan [u.a.]: A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles / Lämkuhl, Dan ; Hanson, Lars ; Örtengren, Roland. – In: International Journal of Industrial Ergonomics. – 39 (2009) 2, S. 428–441.

Lee, Ju Yeon [u.a.]: Development and Usability of a Life-Logging Behavior Monitoring Application for Obese Patients / Lee, Ju Yeon ... – In: Journal of obesity & metabolic syndrome. – 28 (2019) 3, S. 194–202.

Lotter, Bruno [u.a.]: Montage in der industriellen Produktion : Ein Handbuch für die Praxis / Lotter, Bruno ; Wiendahl, Hans-Peter. – Berlin, New York : Springer, 2006. – xvii, 531 S. – ISBN 9783540214137.

Martin Söderlund, Leonard Bohojevic: Simulations of ergonomic assembly : Ergonomic evaluation using the digital human modelling tool IMMA. – (2020).

May, Gökan [u.a.]: A New Human-centric Factory Model / May, Gökan ... – In: Procedia CIRP. – 26 (2015), S. 103–108.

Mayrhofer, Walter [u.a.]: One-fits-all vs. tailor-made: user-centered workstations for field assembly with an application in aircraft parts manufacturing / Mayrhofer, Walter ; Rupprecht, Patrick ; Schlund, Sebastian. – (2019).

Rupprecht, Patrick [u.a.]: Taxonomy for Individualized and Adaptive Human-Centered Workplace Design in Industrial Site Assembly / Rupprecht, Patrick ; Schlund, Sebastian. – (2020).

Schlick, Christopher [u.a.]: Arbeitswissenschaft / Schlick, Christopher ; Bruder, Ralph ; Luczak, Holger. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018. – 746 S. – ISBN 978-3-662-56036-5.

Schlick, Christopher M. [u.a.]: Arbeitswissenschaft / Schlick, Christopher M. ; Bruder, Ralph ; Luczak, Holger. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 60 S. – ISBN 978-3-540-78332-9.

Schlund, Sebastian [u.a.]: Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen / Schlund, Sebastian ; Mayrhofer, Walter ; Rupprecht, Patrick. – In: Z. Arb. Wiss. – 72 (2018) 4, S. 276–286.

Schneider, Markus: Lean Factory Design : Gestaltungsprinzipien für die perfekte Produktion und Logistik. – München : Hanser, 2016. – 278 S. – ISBN 9783446449954. = <http://dx.doi.org/10.3139/9783446450066>.

Process simulate 14.01 - Hilfe / Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2017. = https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/tecnomatix/14.0.1/PS_TC#uid:index_xid1015772:id1239897930158:xid1161580:xid703576.

Zhu, Wenmin [u.a.]: Applications and research trends of digital human models in the manufacturing industry / Zhu, Wenmin ; Fan, Xiumin ; Zhang, Yanxin. – In: Virtual Reality & Intelligent Hardware. – 1 (2019) 6, S. 558–579.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsschema	6
Abbildung 2: Baustellenmontageplatz-Schema nach Schilling und reale Konstellation (© FACC)	9
Abbildung 3: gängige Anthropometrische Variablen des menschlichen Körpers	12
Abbildung 4: Einteilung der Körpergrößenklassen in Anlehnung nach DIN33402-2..	13
Abbildung 5: Zusammensetzung der Bestandteile der menschlichen Fähigkeiten	14
Abbildung 6: Mechanisches Ersatzmodell des Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes nach REFA	15
Abbildung 7: Vereinfachte Belastungs-Beanspruchungs-Darstellung nach ROHMERT 1983	16
Abbildung 8: Hüllflächenprojektion der Erreichbarkeit in TX	19
Abbildung 9: Sichtfeldkegel in TX	20
Abbildung 10: Körperumrisschablone „Kieler Puppe“	23
Abbildung 11: Funktionsschema Digitaler Menschmodelle	25
Abbildung 12: Gegenüberstellung DMM 0.95 männlich und DMM 0.05 weiblich in EMA	27
Abbildung 13: Validierungsschema des Arbeitsplatzes	29
Abbildung 14: Klassifizierung für Modelle und Systeme	31
Abbildung 37: Ablaufdiagramm softwarebasierter Evaluierung menschlicher Arbeit .	34
Abbildung 38: Gesamtansicht des Arbeitsplatzes (Software: Siemens Tecnomatix - Process Simulate)	35
Abbildung 39: zweidimensionale orthogonale Ansicht (Software: Siemens Tecnomatix - Process Simulate)	36
Abbildung 40: Schema der Auswertungsmethodik	40
Abbildung 41: Mögliche Verbesserung der Ergonomie durch schwenkbares Hubsystem.....	41
Abbildung 42: Initialposition mit 50% männlich Perzentile (links EMA, rechts TX)	43
Abbildung 43: Montagevorgang Matte 4 (links EMA, rechts TX)	44
Abbildung 44: Spaghetti Diagramm (links EMA, rechts TX).....	45
Abbildung 45: Verschwendungsdiagramm EMA 0.50m vs. TX 0.50m.....	46
Abbildung 46: Verschwendungsdiagramm aller Simulationssequenzen.....	49
Abbildung 47: Spaghetti Diagramm – Weganalyse	51
Abbildung 48: Legevorgang 1 Frontalansicht	53
Abbildung 49: Legevorgang 1 Seitenansicht	53
Abbildung 28: EMA Anwendungsbereiche im Produktionsentwicklungsprozess	68
Abbildung 29: CAD Datenimport.....	70
Abbildung 30: Grundparameter und Darstellung im Raum	71
Abbildung 31: Laufbewegungsdefinition mittels Ziel-Objekt oder Laufpfad	73
Abbildung 32: Beispiel eines Spaghetti-Diagramms	74

Abbildung 33: Beispiel einer Zeitanalyse inklusive MTM-UAS Analyse	75
Abbildung 34: Wirbelsäulen-Werte im EAWS-Modul	76
Abbildung 35: CAD Datenimport.....	77
Abbildung 36: CAD Datenimport Pop-up Fenster	78
Abbildung 37: CAD Datenimport File Import Settings.....	78
Abbildung 38: Erstellen eines Digitalen Menschmodells	79
Abbildung 39: Eingelegtes Digitales Menschmodell im Koordinatenursprung	80
Abbildung 40: Placement Manipulator	80
Abbildung 41: Placement Manipulator mit Koordinatensystem relativ zum Ursprung	81
Abbildung 42: Task Simulation Builder	81
Abbildung 43: erstellen einer neuen Simulationssequenz im TSB.....	82
Abbildung 44: „Get“ Baustein im TSB.....	83
Abbildung 45: Endposition und Wegpfad erstellen	84
Abbildung 46: Erstellen einer Weganalyse	85
Abbildung 47: Analysesetup für ergonomische Analyse	87
Abbildung 48: Erreichbarkeitsanalyse mittels halbkugelförmigen Hüllflächen	88
Abbildung 49: Sichtfeldanalyse.....	88

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung Recommended Weight Limit	18
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Faktoren zur Berechnung des RWL.....	18
Tabelle 2: Testergebnisse Versuch 1	30
Tabelle 3: Testergebnisse Versuch 2	30
Tabelle 4: ISO 9241-11-2018 Faktoren der Usability.....	32
Tabelle 5: Arbeitsschritte des Laminierungsprozesses.....	37
Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Konzeptes.....	42
Tabelle 7: Parameter Digitaler Menschmodelle nach DIN-33402-2.....	48
Tabelle 8: RULA Auswertung der Legevorgänge	50
Tabelle 9: RULA – Auswertung des realen Versuches.....	54
Tabelle 10: zusammenfassende Auswertungstabelle.....	54
Tabelle 11: RULA Auswertung des verbesserten Prozesses	57

Anhang

Grundlagen Software EMA (imk automotive)

Der EMA Work Designer von imk automotive ist eine Softwarelösung eines deutschen Entwicklers, welche der effizienten Arbeitsplatzgestaltung und Prozessplanung manueller und teilautomatisierter Tätigkeiten bzw. Mensch-Roboter-Kollaborationssysteme behandelt. Dieses System soll laut Hersteller speziell für die Gestaltung, Bewertung und Optimierung von Produktionsprozessen in Fertigung und Montage entwickelt worden sein. In dieser Arbeit wird der EMA Work Designer 1.9.1.1 x64 verwendet.

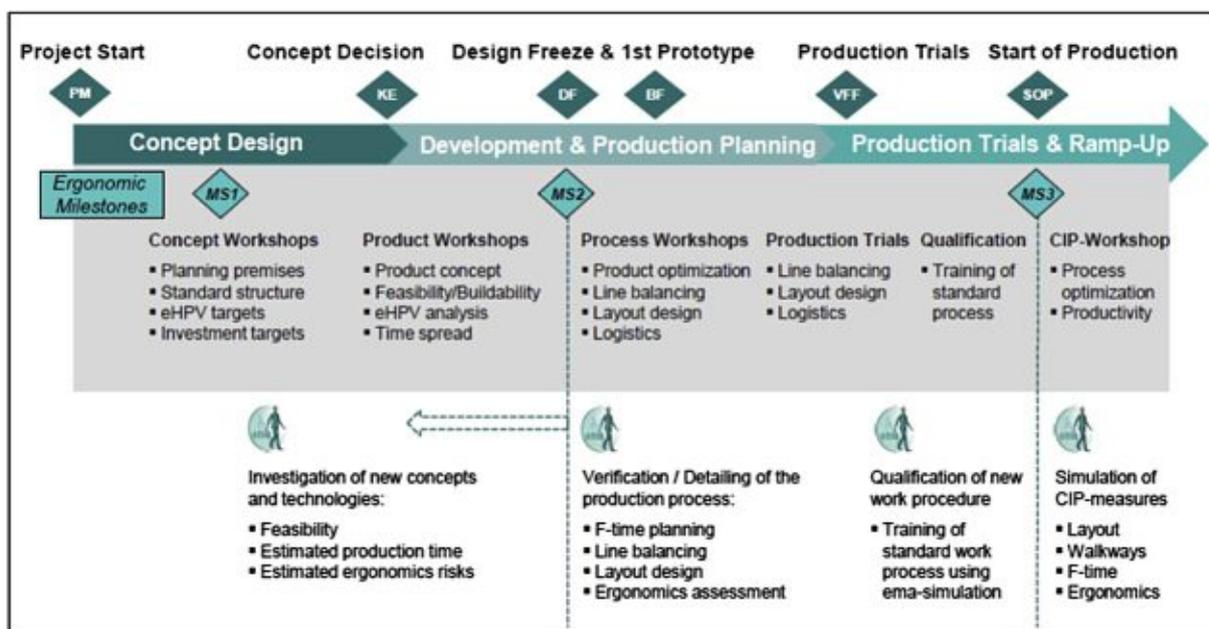


Abbildung 28: EMA Anwendungsbereiche im Produktionsentwicklungsprozess⁴⁵

Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Einsatzgebiete von EMA über die verschiedenen Etappen des Produktionsentwicklungsprozesses. Umso früher EMA in diesen Prozess für ergonomisches Design und Produktionsprozessdesign eingesetzt wird, desto günstiger sind nachfolgende Änderungen im Bereich der Produktion. Zu Beginn des Projektes findet EMA Anwendung in Machbarkeitsstudien und groben ergonomischen Abschätzungen. Es können daher in der Startphase eines Projektes die Aussagen über mögliche „bottlenecks“, Prozesszeit oder Arbeitsleistung gemacht werden. In der darauffolgenden Phase wird EMA genutzt, um Verfeinerungen am Arbeitsplatzlayout vorzunehmen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit mit virtuellen Workshops die Werker auf das Arbeitsszenario vorzubereiten. Dabei stellt EMA ein Feedback durch MTM Zeitanalyse, Spaghetti Diagrammen und EAWS Analysen zur Verfügung. In der dritten Phase können virtuelle Testläufe entscheidende Erkenntnis über Änderungen

⁴⁵ Fritzsche [u. a.], 2019, S. 570.

bringen. Daraus folgt, dass kurz vor dem Abschluss der Planungsphase sehr wohl kostengünstige Änderungen vorgenommen werden können. Weiters kann die Simulation die Grundlage für Arbeitsanweisungen ausgeben. In der abschließenden Etappe des Produktionsentwicklungsprozesses kann EMA dazu verwendet werden, dass kontinuierliche Verbesserungsprozesse virtuell eingearbeitet werden können. Darüber hinaus können weitere Produktvarianten oder neue Werkzeuge eingebunden werden, ohne die laufende Montagelinie zu stoppen.⁴⁶

Generell kann gesagt werden, dass die Suche nach dem Optimum in einem Produktionsprozess durch die virtuelle Versuchsumgebung von EMA beschleunigt wird. EMA kann dazu genutzt werden, um einen „digital twin“ des gesamten Produktionssystems abzubilden, welcher für neue Produkte und Produktionsstätten weltweit eingesetzt werden kann.⁴⁷

Datenimport

Bei EMA kann das Importieren von CAD-Dateien sehr einfach vollzogen werden. Besondere Beachtung muss den Dateiformaten geschenkt werden. EMA unterstützt Dateiformate wie beispielsweise .DAE, .JT, .DXF, .WRL oder .OBJ. Mit dem xml-basierten Collada Format .DAE sollte ein offener Austausch der Daten zwischen verschiedenen 3D-Programmen etabliert werden. Aber mit diesem Dateiformat generiert EMA ein 3D-Modell, welches um den Faktor 1000 kleiner skaliert wurde. Man kann zwar die Skalierung im Anschluss festlegen, aber es kann trotzdem zu Fehlern in der Gesamtsimulation führen.

In dieser Arbeit wurden alle dreidimensionalen Modelle mit dem Jupiter Tessellation (.JT) Format importiert. Dabei ist kein weiteres skalieren der Modelle erforderlich.

Um nun eine dreidimensionale CAD-Datei importieren zu können, muss EMA gestartet werden. Dabei öffnet sich automatisch ein leeres Projekt, in dem lediglich eine Lichtquelle, ein Koordinatensystem und der Boden geladen sind. Diese Objekte können im Reiter „Objekte“ begutachtet werden. Das Importieren wird ebenfalls im Reiter „Objekte“ vorgenommen. Mit dem Button „Objekt(e) aus Datei hinzufügen“ erscheint ein Pop-up Explorer Fenster. Hier können ein Objekt oder mehrere Objekte in das Projekt geladen werden.

⁴⁶ vgl. Fritzsche [u. a.], 2019, S. 570.

⁴⁷ vgl. Bauer [u. a.], 2019, S. 60.



Abbildung 29: CAD Datenimport

Wenn die Datei ausgewählt wurde, erscheint ein Fragefenster, welches den Typ des Imports verlangt. Es kann als Objektstruktur oder als Einzelobjekt geladen werden. Anschließend erscheint ein Fenster, indem die Objekteigenschaften angepasst werden können. Beispielsweise kann eine Skalierung des Objektes vorgenommen werden.

Für Daten welche Normteile, herkömmlichen Objekten (z.B. Tische, Sessel, usw.) oder Digitalen Menschmodellen entsprechen, steht eine Objektbibliothek zur Verfügung. Rechts neben dem „Objekt(e) aus Datei hinzufügen“-Button befindet sich der „Bibliotheks-Element hinzufügen“-Button, welche die EMA Objektbibliothek erscheinen lässt. Hier kann das gewünschte Objekt ausgewählt werden und mit „Objekt(e) laden“ werden diese dem Projekt hinzugefügt.

Manipulation

Die Manipulation von Objekten kann mithilfe von einem Klick auf das zu verschiebende Objekt aktiviert werden. Dabei erscheint das Initialkoordinatensystem des Objektes. Im Objektfenster in der rechten, oberen Bildschirmhälfte kann die aktuelle Lage des Objektes relativ zum Ursprung des Projektes begutachtet werden. Diese Grundparameter werden mit den 6 Freiheitsgraden dargestellt.

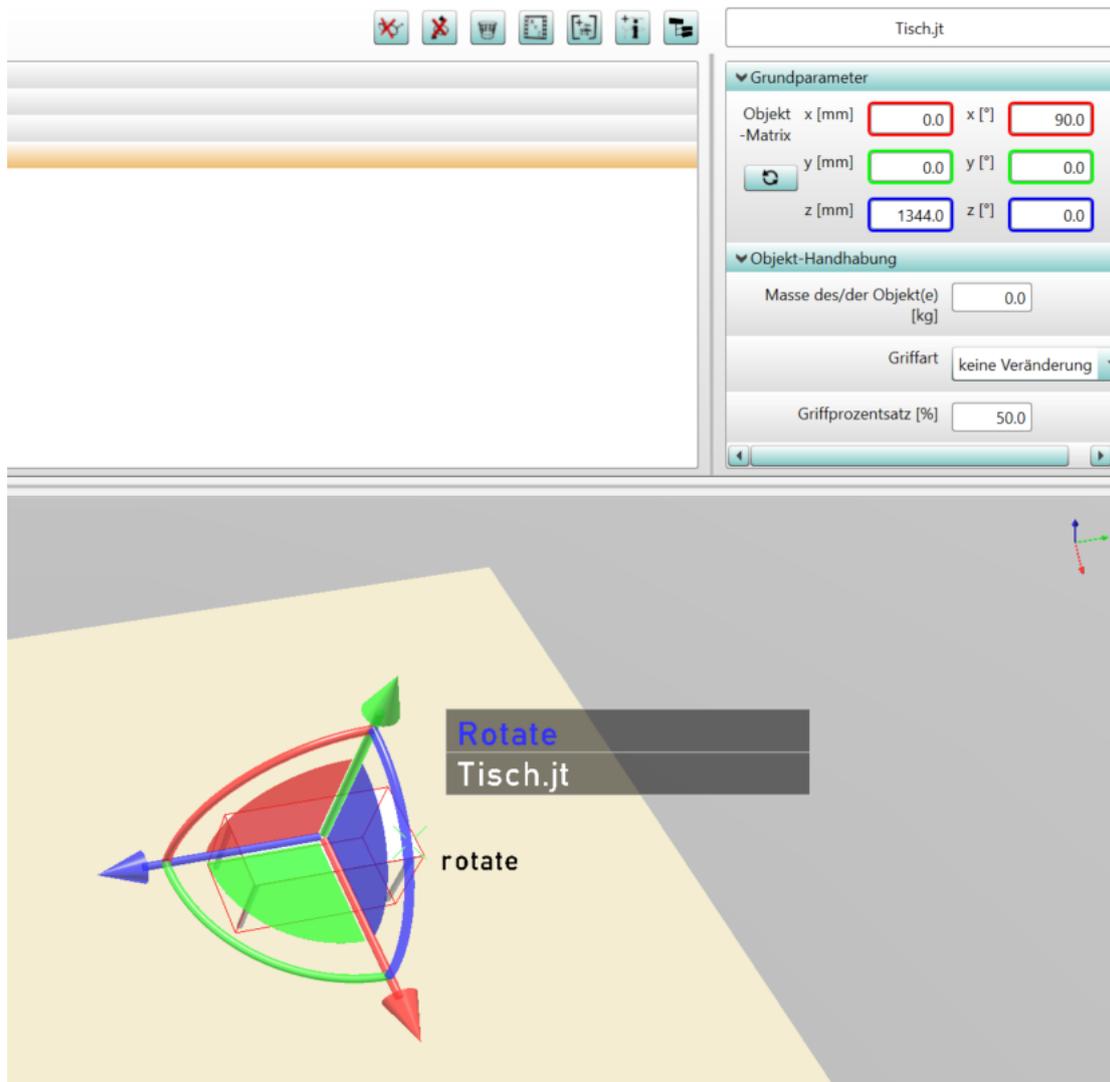


Abbildung 30: Grundparameter und Darstellung im Raum

Um eine translatorische Bewegung hervorzurufen, kann einfach mit einem Klick auf die Achse, das Objekt entlang dieser Achse bewegt werden. Für rotatorische Bewegungen funktioniert dies analog anhand der Viertelkreise bezüglich der jeweiligen Achsen. Eine andere Methode um ein Objekt translatorisch oder rotatorisch im Projektraum zu verschieben, ist die manuelle Eingabe der Koordinaten in Millimeter und Rotationen in Grad, im Bereich der Grundparameter des Objektes.

Darüber hinaus kann die Objekt-Handhabung bestimmt werden. Dabei wird die Masse des Bauteils eingetragen oder die Griffart des Objektes festgelegt.

Abschließend können noch spezielle Manipulationsformen angewendet werden, welche im Bereich Layout am linken Bildschirmrand aktiviert werden können. Beispielsweise kann ein Objekt in Abhängigkeit eines Bezugsobjektes in der Objektmitte platziert werden. Um zum Beispiel ein Objekt kongruent auf einen Tisch platzieren zu können, wird mit dem Button „Anhand Bezugsobjekt-Hüllkörper ausrichten (oben)“ und den beiden Objekten diese Aktion definiert. Es erscheint ein

Dialogfenster, ob die ausgewählten Objekte auch als Kindobjekte unterhalb des gewählten Referenzobjektes eingefügt werden sollen. Nun wird die Aktion vollzogen und die beiden Objekte sind lückenfrei verbunden.

Simulationssequenz

Die Simulationssequenz kann im Reiter „Verhalten“ erstellt werden. Dort findet man verschiedene Verrichtungen vor, welche für Menschmodelle und Objekte unterteilt sind. Dabei werden die Objektbewegungen ausschließlich für Roboter und der Gleichen verwendet. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit ein Motion Capturing zu betreiben. Die Bewegungsdaten müssen vorliegen und können anschließend eingespielt werden.

Die Simulationssequenz wird mit Verrichtungsbewegungen, welche sich mit dem standardisierten Grundbewegungen decken, sequenziell aufgebaut. Per drag-and-drop können die Verrichtungen in die Simulationssequenz geladen werden. Dabei kann zwischen mehreren Digitalen Menschmodellen ausgewählt werden, falls mehrere im Projekt vorhanden sind.

Eine Laufbewegung wird beispielsweise in die Simulationssequenz geladen. Diese wird definiert durch einen Zielort und einem Laufpfad oder einem Ziel-Objekt definiert. Wenn zum Beispiel ein Objekt aufgenommen werden soll, kann dieses Objekt als Ziel-Objekt bestimmt werden und das Digitale Menschmodell bestreitet den direkten Weg zum Ziel-Objekt. Andererseits kann ein Laufpfad mit Ziel-Position festgelegt werden, indem neue Objekte erstellt werden. Diese Objekte beinhalten die Pfadpunkte und die Ziel-Position als Koordinaten, welche im weiteren Verlauf der Arbeit noch sehr nützlich werden, um Laufpfade deckungsgleich abbilden zu können.

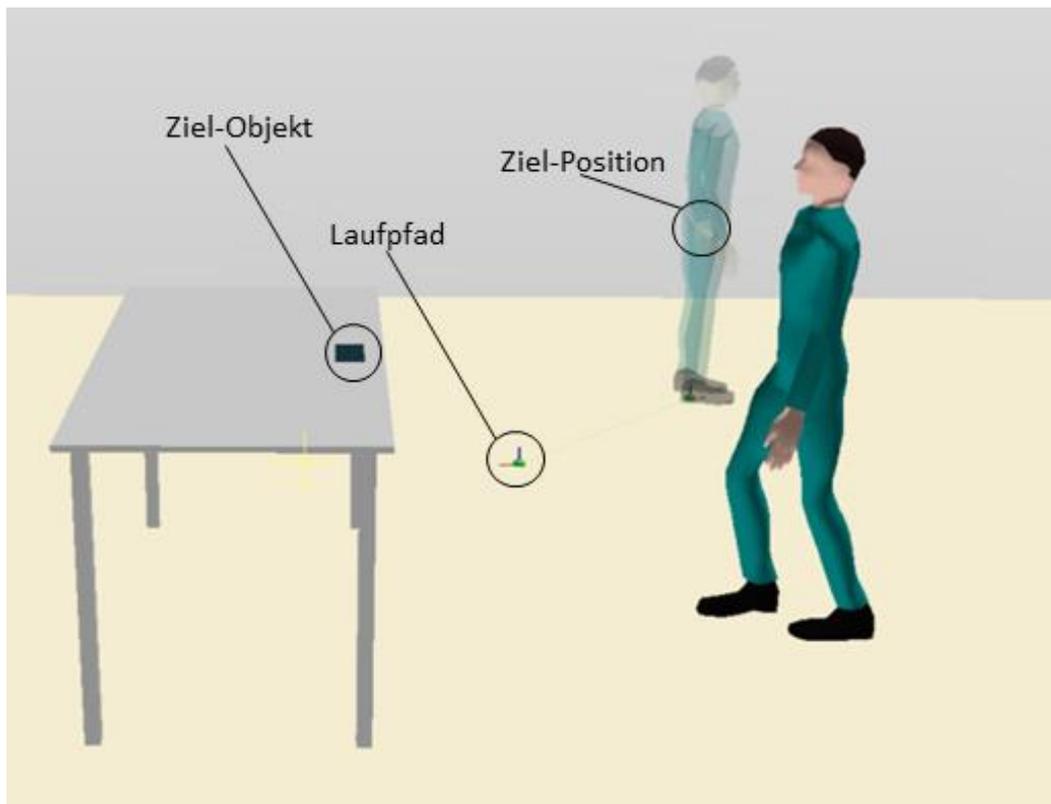


Abbildung 31: Laufbewegungsdefinition mittels Ziel-Objekt oder Laufpfad

Darüber hinaus können Prozessbeschreibungen sowie Körperhaltungsparameter zur Laufbewegung hinzugefügt werden.

Alle anderen weiteren Grundbewegungen können analog zur Laufbewegung erstellt werden. Wenn die Simulationssequenz fertig erstellt wurde, kann man die Simulation mit dem Button „Simulieren“ berechnen lassen. Mit einem Klick auf den „Play“-Button am unteren Bildschirmrand läuft die Simulation nun ab. Während der Erstellung von Simulationssequenzen, kann es nützlich sein, Objekte ein- und auszublenden. Dies kann im Objektbaum im Reiter „Objekte“ mit dem Brillensymbol neben dem Objektnamen erreicht werden. Weiter stellt es sich als nützlich heraus die Bewegungsbausteine der Simulationssequenz mit Namen zu versehen, um eine übersichtliche Notation zu schaffen.

Auswertung

Im Anschluss an die Simulation, welche die kinematischen Zusammenhänge der Objekte bereitstellt, bietet EMA die Möglichkeit Auswertungen bzw. Analysen dieser Simulationen zu generieren. Grundsätzlich ist die Auswertung in EMA in zwei verschiedene Teile gegliedert. Zum einen in die Ergonomie Auswertung (Reiter „Ergonomie“) mit einem EAWS-Modul und zum anderen in den Teil welcher Ergebnisse (Reiter „Ergebnisse“) abdeckt. Der Ergebnis-Teil umfasst Analysewerkzeuge und Dashboards für Weg- und Zeitanalysen mit Taktzeitdiagrammen und Verrichtungsabhängigkeiten.

- Weganalyse

Die Weganalyse wird mit einem so genannten Spaghetti-Diagramm dargestellt. Dabei wird die Reihenfolge der Tätigkeitspositionen auf einem Arbeitsplatzlayout dargestellt und die Laufwege entlang der Laufpfade mit Linien verbunden. Die Länge der Linien bildet den zurückgelegten Weg des Digitalen Menschmodells ab. Ein Spaghetti-Diagramm kann im Reiter „Ergebnisse“ und der Schaltfläche „Spaghetti-Diagramm“ erstellt werden. Diese Ansicht bietet weiters die Möglichkeit zwischen mehreren Digitalen Menschmodellen auszuwählen, welche sich in der aktuellen Simulation befinden. Außerdem ist es möglich einzelne Pfade und Arbeitspositionen auszublenden. Mit dem Diskettensymbol am oberen Bildschirmrand kann diese Darstellung in eine .CSV, .XSLX oder .PNG Datei exportiert werden.

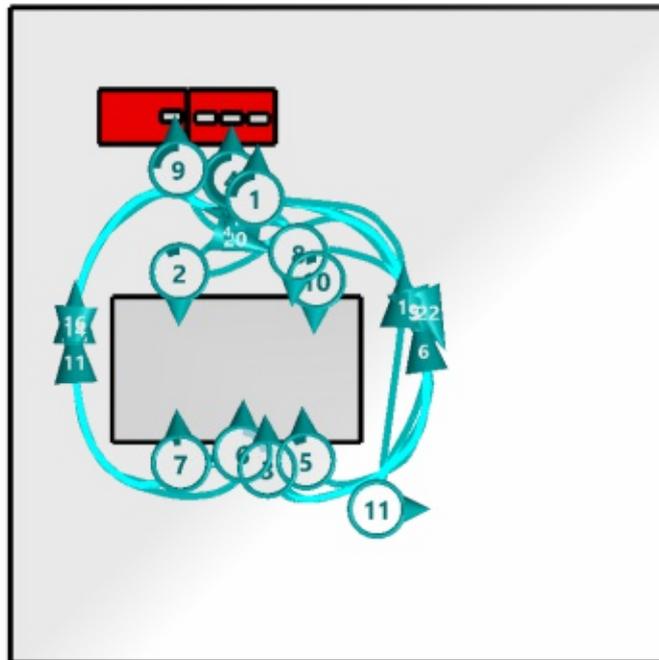


Abbildung 32: Beispiel eines Spaghetti-Diagramms

- Zeitanalyse

Da die Simulationssequenz mit standardisierten Bausteinen aufgebaut wurde, macht sich EMA diesen Aspekt zu Nutze, um eine Zeitanalyse auszuführen. Im Gegensatz zu TX verwendet EMA die Auflösungsklasse MTM-UAS, welches eine größere Auflösung nutzt. Diese Auflösungsklasse UAS findet im Allgemeinen Einsatz im Bereich der Serienfertigung mit begrenzt langzyklischen Wiederholungen (Prozesstyp 2). Erstellt wird die Zeitanalyse ebenfalls im Reiter „Ergebnisse“ auf der Schaltfläche „Zeitanalyse“ erstellt. Man kann wiederum zwischen mehreren Digitalen Menschmodellen auswählen, für welche man die Zeitanalyse ausfahren möchte. Dabei gibt die Zeitanalyse den MTM-Code und die diversen Zeiten der Simulationssequenz für jede Bewegung an.

UAS Analyse											
#	Bezeichnung	Kode	Hand	TMU	A x H	TMU beeinfl.	TMU unbeeinfl.	Gesamt TMU	Dauer [s]	Ø Dauer [s]	Turnus [%]
1	Körperbewegung	KA		25.0	2 * 1	50.0	0.0	50.0	1.80	1.80	100.00
2	Visuelle Kontrolle	VA		15.0	1 * 1	15.0	0.0	15.0	0.54	0.54	100.00
3	Platzieren	PA3	R	25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
4	Körperbewegung	KA		25.0	6 * 1	150.0	0.0	150.0	5.40	5.40	100.00
5	Visuelle Kontrolle	VA		15.0	1 * 1	15.0	0.0	15.0	0.54	0.54	100.00
6	Körperbewegung	KA		25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
7	Aufnehmen & Platzieren	AA2	L	35.0	1 * 1	35.0	0.0	35.0	1.26	1.26	100.00
8	Aufnehmen & Platzieren	AB2	L + R	45.0	1 * 1	45.0	0.0	45.0	1.62	1.62	100.00
9	Körperbewegung	KA		25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
10	Bewegungszyklus	ZB1		10.0	1 * 1	10.0	0.0	10.0	0.36	0.36	100.00
11	Visuelle Kontrolle	VA		15.0	1 * 1	15.0	0.0	15.0	0.54	0.54	100.00
12	Platzieren	PA3	R	25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
13	Körperbewegung	KA		25.0	6 * 1	150.0	0.0	150.0	5.40	5.40	100.00
14	Prozesszeit	PT		83.3	1 * 1	0.0	83.3	83.3	3.00	3.00	100.00
15	Körperbewegung	KA		25.0	6 * 1	150.0	0.0	150.0	5.40	5.40	100.00
16	Aufnehmen & Platzieren	AA1	L	20.0	1 * 1	20.0	0.0	20.0	0.72	0.72	100.00
17	Körperbewegung	KA		25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
18	Körperbewegung	KA		25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
19	Aufnehmen & Platzieren	AA1	L + R	20.0	1 * 1	20.0	0.0	20.0	0.72	0.72	100.00
20	Körperbewegung	KA		25.0	6 * 1	150.0	0.0	150.0	5.40	5.40	100.00
21	Bewegungszyklus	ZB1		10.0	1 * 1	10.0	0.0	10.0	0.36	0.36	100.00

Prozesszeit laut MTM-UAS: 2180,56 [TMU] ~ 78,5 [s] (1,31 [min])
Ø Prozesszeit laut MTM-UAS: 2180,56 [TMU] ~ 78,5 [s] (1,31 [min])

Abbildung 33: Beispiel einer Zeitanalyse inklusive MTM-UAS Analyse

Am rechten unteren Bildschirmrand wird die Prozesszeit laut MTM-UAS in TMU und Sekunden angegeben.

- Ergonomische Auswertung

Im Reiter „Ergonomie“ steht eine EAWS (Ergonomic Assessment Work-Sheet) zur Verfügung. Dabei ist wichtig, dass in der vorangegangenen Simulationssequenz alle Aktionskräfte, Fingerkräfte und Massenkräfte definiert wurden. Ansonsten hat die EAWS-Analyse keine Aussagekraft. Das EAWS-Modul von EMA bietet darüber hinaus die Möglichkeit einige Details genauer zu betrachten. Dies beinhaltet Körperhaltungen, Ergonomie-Zwischenwerte, Kraft-Fälle, Last-Fälle, Körperteil Höhenangaben und EAWS-Details. Weiters kann man in den Einstellungen den Übergang von dynamischer zu statischer Bewegung adjustieren, was eine deutliche Veränderung des Ergebnisses hervorrufen kann. [Einstellungen > EAWS > Mindestdauer statischer Körperhaltungen [s] : default „4“]

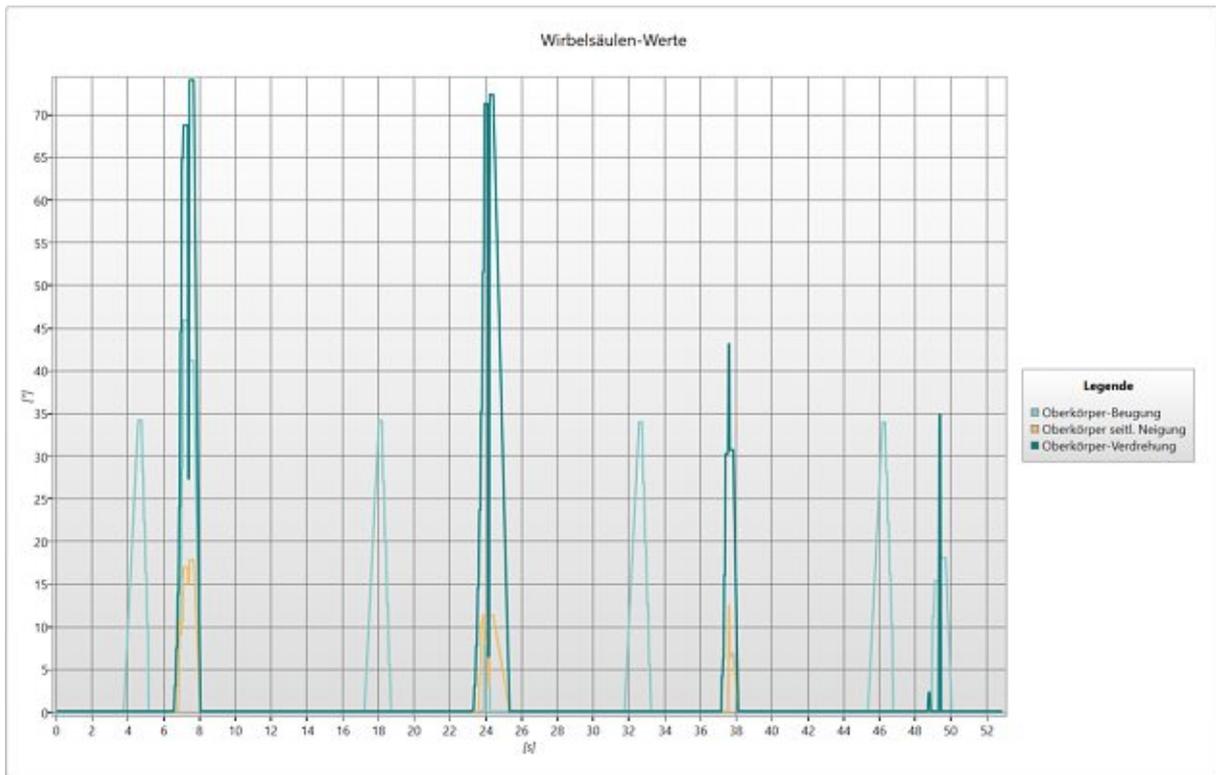


Abbildung 34: Wirbelsäulen-Werte im EAWS-Modul

Das EAWS-Modul von EMA gibt außerdem einen so genannten Ergo-Check an, welcher am rechten oberen Bildschirmrand mit den Farben grün-gelb-rot dargestellt sind.

- Erreichbarkeitsanalyse

Die Erreichbarkeit kann man bei EMA lediglich visuell durch den Ablauf der Simulationssequenz beurteilen. Dabei stehen auch keine halbkugelförmigen Hüllflächen zur Verfügung, welche diese Beurteilung um einiges erleichtern würden.

- Sichtfeldanalyse

Das Softwarepaket EMA verfügt kein spezielles Tool mit dem das Sichtfeld des Werkers beurteilt werden kann.

Grundlagen Software Siemens Tecnomatix

Das Softwarepaket Tecnomatix von Siemens bietet eine Software-Lösung, welche Fertigungsbereiche von der Prozessdefinition und -planung über die Simulation und Validierung bis zur tatsächlichen Fertigung verbindet. Neben den Programmen „Plant Simulation“ und „Process Designer“ bietet die Sparte „Process Simulate“ die Möglichkeit Roboteroperationen und Operationen anderer Ressourcen, wie zum Beispiel Menschen, in deren Abfolge bestimmt und simuliert werden. Diese Arbeit

verwendet ausschließlich das Softwarepaket Siemens Tecnomatix – Process Simulate 15.1.2.

Dabei stehen drei Programme zur Verfügung. Neben dem Programm Human, stehen auch noch Programme zur Simulation von Schweißvorgängen und Montagevorgängen bereit. Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Programm Human. Dabei können manuelle Aufgaben in einer virtuellen dreidimensionalen Arbeitsumgebung interaktiv aufgebaut und verbessert werden. Das Ziel dieser Applikation ist eine Steigerung der Produktivität, Verbesserung der Ergonomie und den Erhalt von verständlicher Arbeitsprozessdokumentation.⁴⁸

Datenimport

Um eine Simulation durchführen zu können muss man die physische Umgebung so real als möglich virtuell abbilden. Dazu benötigt man diese physischen Objekte als ein dreidimensionales Modell, welches durch verschiedene CAD-Systeme erzeugt werden können. Im Fall der Arbeit wurden die CAD-Files mit Autodesk Inventor erstellt, exklusive dem fan cowl-Modell, welches vom Hersteller zur Verfügung gestellt wurde.

Um ein neues Projekt zu erstellen wird im „Welcome!“ Fenster der Button „Create New Study“ ausgewählt. Im Pop-up Fenster kann noch der „Study Type“ und das „Template“ festgelegt werden. Im Fall dieser Arbeit handelt es sich um eine „RobcadStudy“. Mit „Create“ wird der Vorgang abgeschlossen.

Der Datenimport erfolgt in der Process Simulate Umgebung, nachdem ein neues/geladenes Projekt im Pop-up Fenster erstellt/ausgewählt wurde. Im Reiter „File“ wird „Import/Export“ und „Convert and Insert CAD Files“ ausgewählt.

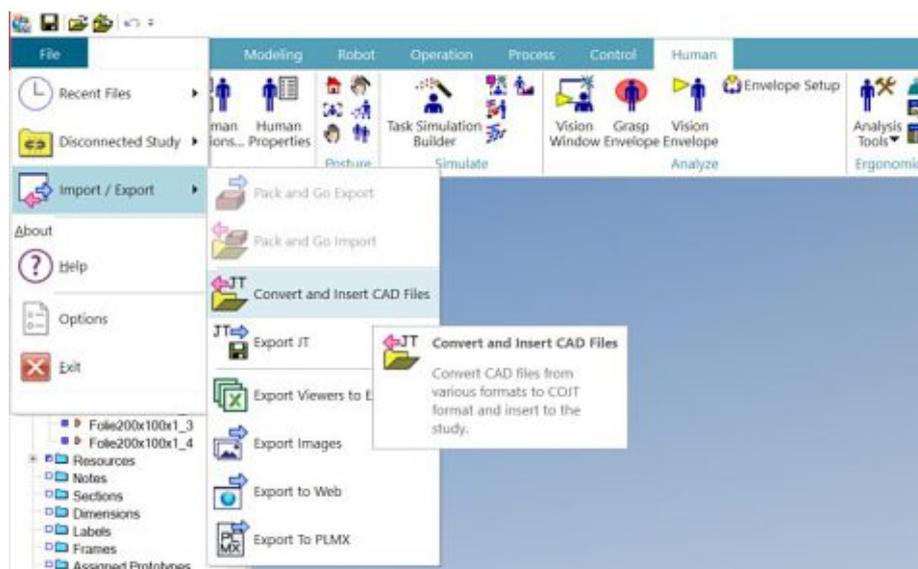


Abbildung 35: CAD Datenimport

⁴⁸ vgl. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2017.

Im folgenden Pop-up Fenster „Add“ auswählen

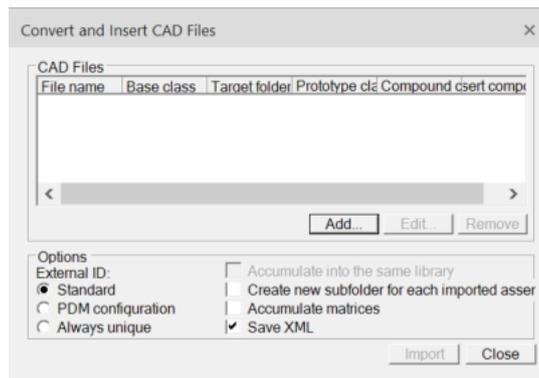


Abbildung 36: CAD Datenimport Pop-up Fenster

Anschließend die gewünschte Datei im „Öffnen“ Fenster auswählen. Dabei ist zu beachten, dass es sich um ein .JT Dateiformat handelt. Das Grafikformat JT (Jupiter Tessellation) ist ein ISO-Standard-Grafikformat für 3D-Daten, welches anstelle von nativen CAD-Dateiformaten eingesetzt wird. Der Dateiimport von .STEP oder .STP erzeugt bei TX einen fehlerhaften Datenimport. Um eine JT Datei zu erhalten wurde Autodesk Inventor Professional 2016 verwendet. Mit „Öffnen“ der gewünschten Datei erscheint ein weiteres Pop-up Fenster mit dem Titel „File Import Settings“. In diesem Fenster kann die gewünschte Klasse festgelegt werden. Mit dem Haken bei „Insert component“ und anschließendem „OK“ wird der Import in eine Liste aufgenommen.

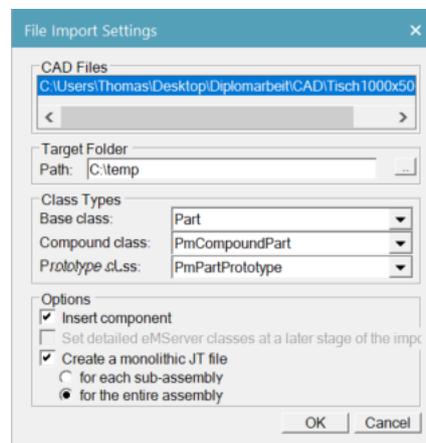


Abbildung 37: CAD Datenimport File Import Settings

Mit dem erneuten hinzufügen durch „Add“ und dem wiederholten Vorgang können mehrere Daten gleichzeitig importiert werden. Wenn alle gewünschten Dateien zum Import ausgewählt und die Importeinstellungen vorgenommen wurden, kann der Datenimport mit dem Button „Import“ gestartet werden. Dabei werden im Hintergrund Datenkonverter gestartet, welche eine Bestätigung des Prozesses mit der Meldung „Conversion completed successfully.“ ausgeben. Wichtig zu beachten ist, dass für jedes Teil oder Objekt, das schon einmal importiert wurde eine Kopie des JT Objektes mit einem anderen Dateinamen erstellt werden muss, ansonsten funktioniert der

Import nicht. Mit „Close“ wird der Importprozess abgeschlossen und das Objekt wird im Ursprungs-Koordinatensystem eingefügt.

Um einen Arbeitsprozess simulieren zu können ist ein Digitales Menschmodell unabdingbar. Da TX unzählige Datenbanken an anthropometrischen Profilen hinterlegt hat, ist ein Datenimport nicht erforderlich. Die Digitalen Menschmodelle werden direkt vom Programm erstellt. In der TX Umgebung muss im Reiter „Human“ der Button „Create Human“ ausgewählt werden.

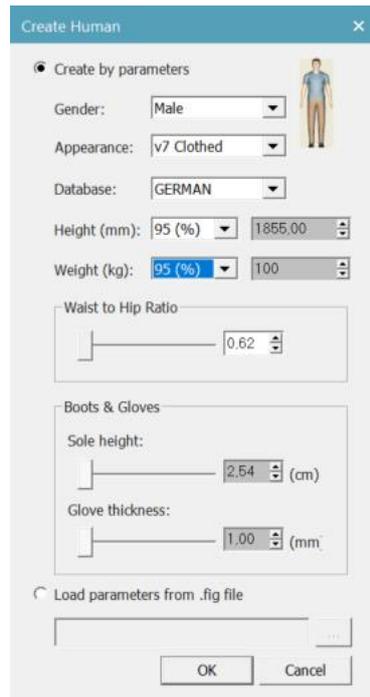


Abbildung 38: Erstellen eines Digitalen Menschmodells

Dabei kann aus anthropometrischen Datenbanken, wie beispielsweise ANSUR, CHINESE, NHANES, etc. ausgewählt werden. Im Fall dieser Arbeit wird aufgrund des geographischen Standpunktes, das Digitale Menschmodell aus der Datenbank „GERMAN“ ausgewählt. Darüber hinaus kann das Perzentil, welche die Abdeckung der Bevölkerung bestimmt, ausgewählt werden. Einen weiteren Parameter, welcher die Korpulenz des Digitalen Menschmodells, kann mit „Waist to Hip Ratio“ festgelegt werden. Mit „OK“ wird das Digitale Menschmodell im Ursprungs-Koordinatensystem in das Projekt eingefügt.



Abbildung 39: Eingefügtes Digitales Menschmodell im Koordinatensprung

Das Digitale Menschmodell mit dem Namen Jack wurde in den „Resources“ im „Object Tree“ eingefügt.

Manipulation

Um ein importiertes Objekt oder ein Digitales Menschmodell an eine gewünschte Stelle zu setzen, kann der „Placement Manipulator“ eingesetzt werden. Dazu wird das zu manipulierende Objekt, sei es ein importiertes CAD-File oder ein Digitales Menschmodell mit einem Klick angewählt. Anschließend wird der „Placement Manipulator“ aktiviert.

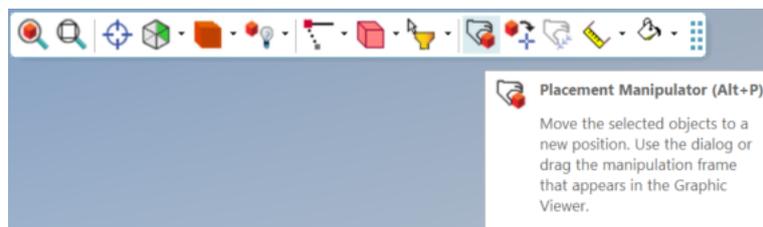


Abbildung 40: Placement Manipulator

Nun öffnet sich das „Placement Manipulator“ Fenster. In diesem Fenster kann man das gewünschte Objekt (CAD-File oder Digitales Menschmodell) auf eine durch 6 Freiheitsgraden bestimmte Position verschieben oder rotieren. Dabei ist zu beachten, dass es sich um ein relatives Koordinatensystem handelt, welches im geometrischen Mittelpunkt des Digitalen Menschmodells oder dem vordefinierten Koordinatensystem des importierten Objektes positioniert ist. Man kann das Absolut-Koordinatensystem (Ursprungs-Koordinatensystem) für die Manipulation verwenden. Dabei muss man im Feld „Location Relative to:“ das Drop-Down Menü wählen und „Original Frame“ auswählen. Um nun die Position zu verändern, muss im „Placement Manipulator“ die gewünschte Translation oder Rotation angegeben werden.

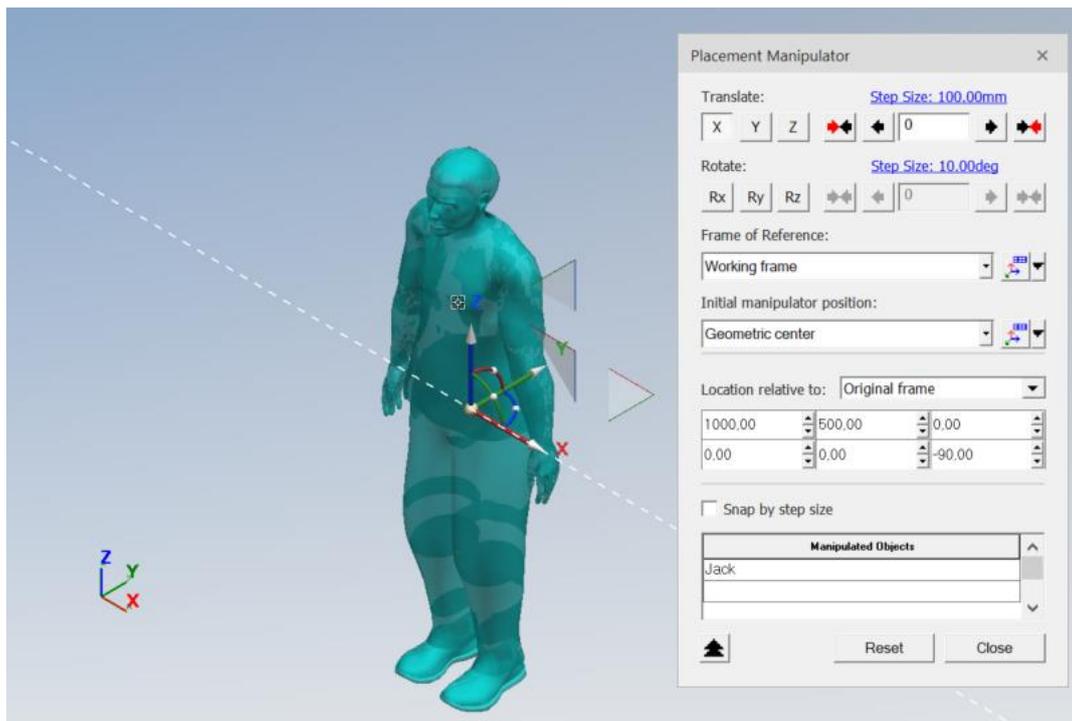


Abbildung 41: Placement Manipulator mit Koordinatensystem relativ zum Ursprung

In Abbildung 28 wurde eine Translation um 1000 mm in die X-Achse, um 500 mm in die Y-Achse und eine Rotation um die Z-Achse mit -90° erwirkt. Dabei ist zu beachten, dass man zuerst die Rotation vorgibt und anschließend die Translation, um eine Vorzeichenumkehr der Koordinaten zu verhindern. Mit „Close“ wird die Manipulation übernommen.

Simulationssequenz

Zur Erstellung einer Simulationssequenz ist es erforderlich den „Task Simulation Builder“ einzusetzen. Dieser wird im Reiter „Human“ mit dem Button „Task Simulation Builder“ aktiviert.



Abbildung 42: Task Simulation Builder

Im „Task Simulation Builder“ muss zuerst eine Simulationssequenz festgelegt werden. Mit „Create New Simulation“ erscheint ein Pop-up Fenster wo „Name:“ und „Scope“

festgelegt werden kann. Wenn nur eine Simulationssequenz erstellt wird, kann man die default Werte mit „OK“ bestätigen.

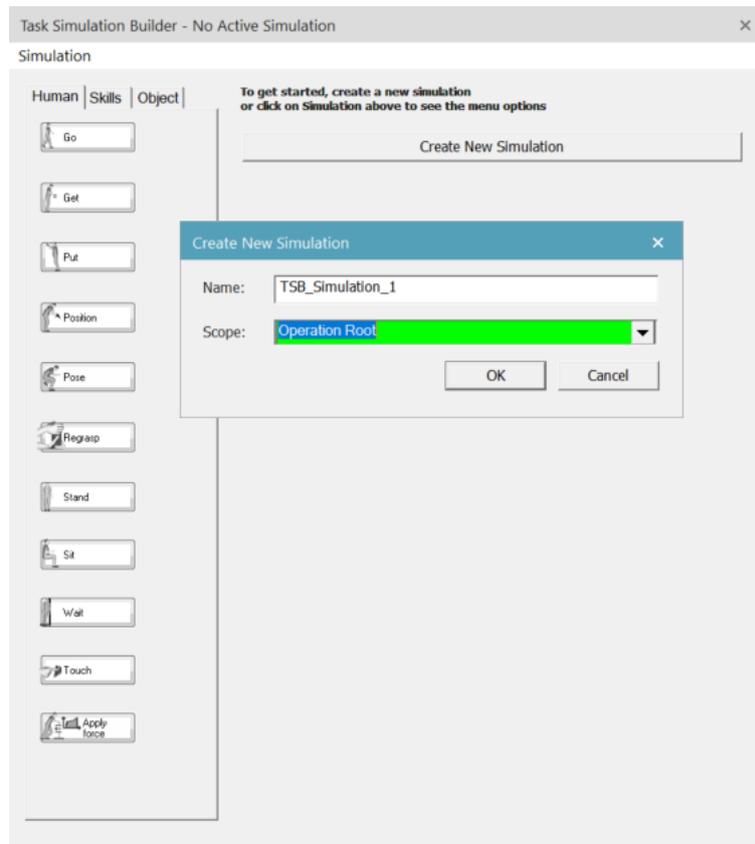


Abbildung 43: erstellen einer neuen Simulationssequenz im TSB

Nun können die einzelnen Prozessschritte nach MTM-1 Prozessbausteinen nachgestaltet werden. Zu beachten ist dabei, dass TX nur mit der MTM-1 Notation arbeitet. Außerdem ist es wichtig zu wissen, dass in TX manche Prozessbausteine kombiniert erstellt werden können, aber in der Ausgabe als einzelne MTM-1 Bausteine ausgegeben werden. Als Beispiel ist hier ein „Get“ Baustein anzuführen, welcher Fußweg, Körperdrehung, Beugen und eine Greifbewegung beinhalten kann. Dieses Feature bietet die Möglichkeit sehr schnell Prozessschritte abzubilden, ohne alle Grundbewegungen vollständig einzufügen.

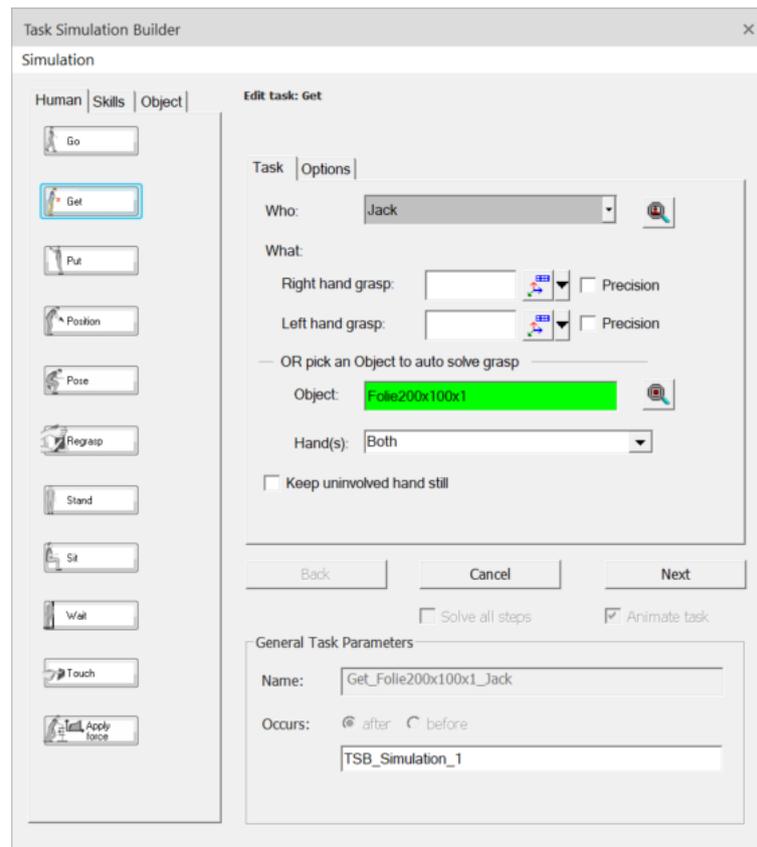


Abbildung 44: „Get“ Baustein im TSB

Um eine „Get“ Bewegung zu erzeugen, wählt man im TSB den „Get“ Button. Anschließend erscheint im TSB ein „Edit task: Get“ Fenster, in welchem man festlegen kann welches Digitale Menschmodell den aktuellen Prozess ausführen soll. In Abschnitt „What:“ wird festgelegt welches Objekt gegriffen/gebracht werden soll. Dabei sind zwei Verfahren verfügbar. Zum einen kann man die zu greifende Stelle am Objekt mit einem Koordinatensystem festlegen und eine erhöhte Genauigkeit, falls erforderlich, einstellen. Zum anderen bietet TX die Möglichkeit ein automatisches Greifen zu erzeugen. Dieses Verfahren nennt sich „auto solve grasp“. Dabei wird die Greifbewegung automatisch vom Programm berechnet. Bei der manuellen Festlegung der Greifbewegung durch ein Koordinatensystem, können der Greifpunkt und die Greifart speziell modelliert werden. Anschließend wird die Verwendung der linken, rechten oder beider Hände festgelegt. Im Abschnitt „General Task Parameters“ kann festgelegt werden an welcher Stelle dieser Prozessbaustein in die Simulationssequenz eingefügt werden soll. Mit „Next“ kann die Erstellung fortgesetzt werden.

Dabei wird der bisherige Ablauf animiert und kann im Hauptfenster von TX beobachtet werden. Dabei bewegt sich das Digitale Menschmodell auf direktem Weg zur Stelle, von der aus das zu greifende Teil gegriffen werden kann. In diesem Abschnitt der Einstellung kann die Haltung während der Fortbewegung („Change Walk Posture“), die Endstellung des Digitalen Menschmodells vor der Greifbewegung („Change Destination“) und eine oder mehrere Wegpunkte erstellt werden, welche auf dem Weg

zur Destination passiert werden sollen. Die Festlegung der Endposition erfolgt genau gleich wie die Manipulation eines Objektes mittels Koordinatensystems. Wenn die gewünschte Endposition gefunden wurde, kann man den Manipulator mit „Close“ schließen. Der Vorgang wird mit Bestätigung mittels grünen Hakens übernommen. Nach kurzer Berechnungszeit wird eine Vorschau erstellt, welche automatisch abläuft. Es werden die Schrittbewegungen mit roten Füßen am Boden abgebildet. Analog kann der Bewegungspfad („Add Walk Via Point“) ebenfalls mit der Manipulatoreinstellungen erstellt werden.

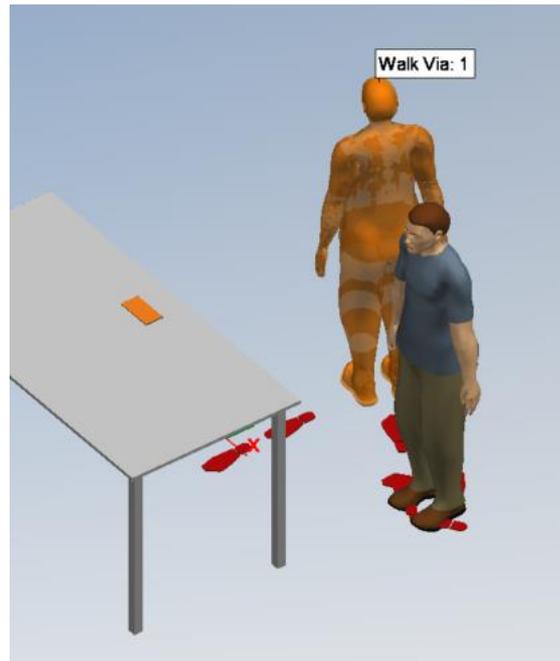


Abbildung 45: Endposition und Wegpfad erstellen

Anschließend kann die Greifposition festgelegt werden. Linke und rechte Hand können dabei separat voneinander mittels Manipulators in die Endposition verschoben werden. Mit dem grünen Haken die Position übernehmen und mit „Done“ den „Get“-Vorgang abschließen.

Für die weitere Gestaltung der Simulationssequenz mit anderen Prozessbausteinen, kann analog vorgegangen werden.

Jeder Prozessbaustein wird im „Operation Tree“ angeführt. Um die Simulationssequenz visuell ablaufen zu lassen, muss man die Simulationssequenz (default: „TSB_Simulation_1“) per Drag-and-Drop in den „Sequence Editor“ ziehen. Der „Sequence Editor“ befindet sich im unteren Bereich des Bildschirms, wo auch der „Path Editor“ und der „Collision Viewer“ angesiedelt sind. Mit den Multimedia-Buttons kann die Simulationssequenz abgespielt und die Simulationsgeschwindigkeit angepasst werden.

Auswertung

Der Abschnitt der Auswertung schließt an die abgeschlossene Simulationssequenz an. Diese Arbeit beschäftigt sich zum einen mit einer wirtschaftlichen Auswertung, konkret Weganalyse und MTM-1, und einer ergonomischen Auswertung mittels EAWS oder NIOSH.

- Weganalyse

Um eine Weganalyse oder ein Spaghetti-Diagramm erstellen zu können, sollte die Simulationssequenz mit dem „Task Simulation Builder“ erstellt werden. Die Weganalyse wird direkt im TSB generiert. Anfangs betätigt man den Button „Task Simulation Builder“, dabei erscheint ein Pop-up Fenster. Nun klickt man im oberen Bereich auf den Reiter „Simulation“ und wählt „Analysis“. Weiters „Create Walk Analysis Report“.

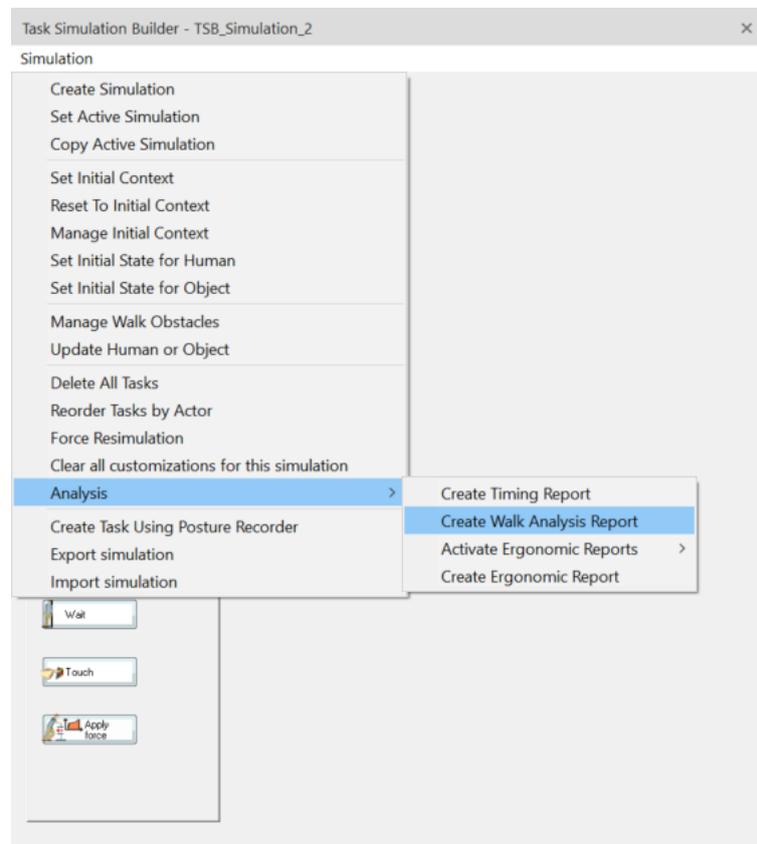


Abbildung 46: Erstellen einer Weganalyse

Ein neues Pop-up Fenster erscheint, in welchem man den Namen des Berichts festlegen kann und bei Bedarf Bildschirmfotos von der Simulationssequenz erstellen kann. Mit der Bestätigung dieses Fensters wird ein Bericht erstellt, welcher im „Report Viewer“ geöffnet werden kann. Alle Berichte von TX werden im „Report Viewer“ gesammelt und gespeichert, egal um welche Analyse es sich handelt. Der „Report Viewer“ kann in der Toolbar im Abschnitt „Ergonomics“ geöffnet werden.

- Zeitanalyse

Die Erstellung von einer MTM-Analyse ist ein Werkzeug, um die Zeit eines Arbeitsablaufes im Vorhinein bestimmen zu können. Siemens Tecnomatix Process Simulate verwendet die Auflösung MTM-1, welche für die Mengenfertigung obligat ist. Um einen MTM-Bericht erstellen zu können, muss exakt analog vorgegangen werden, wie bei der Weganalyse. „Task Simulation Builder“ öffnen, auf Simulation und Analysis gehen und „Create Timing Report“ auswählen. Dieser Bericht wird selbstverständlich im TSB generiert und kann im „Report Viewer“ begutachtet werden. Es wird eine Tabelle der analysierten Simulationssequenz ausgegeben, welche die Aufgabe (Task), die Aktion (Action), die Dauer in Sekunden (Duration (s)) und den MTM-Code (Code). Darüber hinaus kann man diese Tabelle, sowie alle anderen Berichte im „Report Viewer“ exportiert werden können und in anderen Dateiformaten abgespeichert werden.

- Ergonomische Auswertung

Das Programmpaket Process Simulate bietet die Möglichkeit einige verschiedene ergonomische Bewertungsverfahren anzuwenden. Dabei sind die Verfahren NIOSH und OWAS für jede Simulation mit einem Menschmodell anzuwenden, da es sich um eine Haltungsbasierte Analyse handelt. Darüber hinaus können auch Auswertungen der Ermüdung, der statischen Kraftausübung, des unteren Rückens und der summierten Rückenbelastung vollzogen werden. Im Gegensatz zu den genannten Verfahren können das EAWS-Verfahren und „Ergonomic Metrics“ für Simulationssequenzen erstellt werden, welche mit dem „Task Simulation Builder“ erstellt wurden. Um eine Ergonomie Analyse erstellen zu können, muss zuerst ein Setup vorgenommen werden. Im TSB wird der Reiter Simulation gedrückt und mit „Analysis“ sowie „Activate Ergonomic Reports“ kommt man zur Schaltfläche „Activate Ergonomic Report(s): for Jack (des jeweiligen digitalen Menschmodells)“.

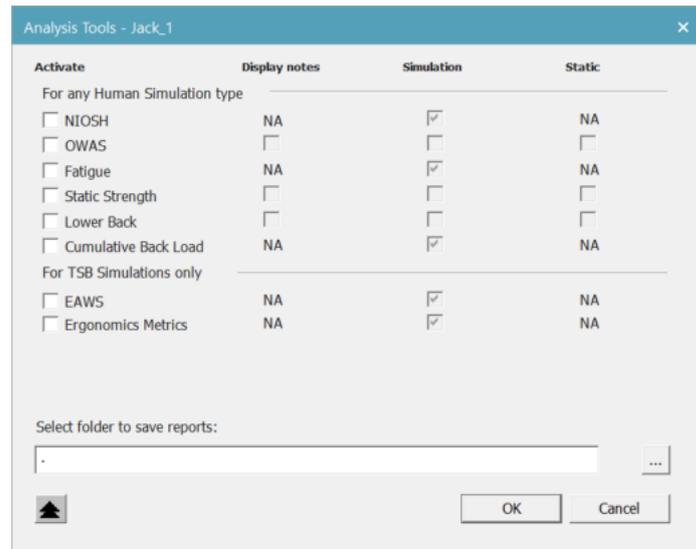


Abbildung 47: Analysesetup für ergonomische Analyse

Nun kann man auswählen welche ergonomischen Analyse-Berichte angefertigt werden sollen. Mit einer Auswahl per Haken können die Verfahren definiert werden. Mit „OK“ wird die Einstellung übernommen. Um die Berichte zu erstellen, wird im TSB „Simulation“ und „Analysis“ gewählt, wo sich die Schaltfläche „Create Ergonomic Report“ befindet. Mit einem Klick auf diese Schaltfläche wird die Berichtgenerierung gestartet, welche man zyklisch in Pop-up Fenster vorfindet. Mit der jeweiligen Bestätigung des Dialogs wird der Bericht und etwaige Bildschirmfotos erstellt, welche im „Report Viewer“ sichtbar werden.

- Erreichbarkeitsanalyse

Um die Erreichbarkeit überprüfen zu können, bietet TX die Möglichkeit halbkugelförmige Hüllflächen einzublenden. Diese halbkugelförmigen Hüllflächen beschreiben den Aktionsraum der beiden Arme des digitalen Menschmodells. Mit der Schaltfläche „Grasp Envelope“ an der Toolbar unter „Analyse“ kann diese Ansicht aktiviert werden. Dieses simple aber äußerst ausschlaggebende Tool kann während der gesamten Simulationssequenz grafisch eingeblendet werden, was eine Analyse über die gesamte Simulationszeit ermöglicht.

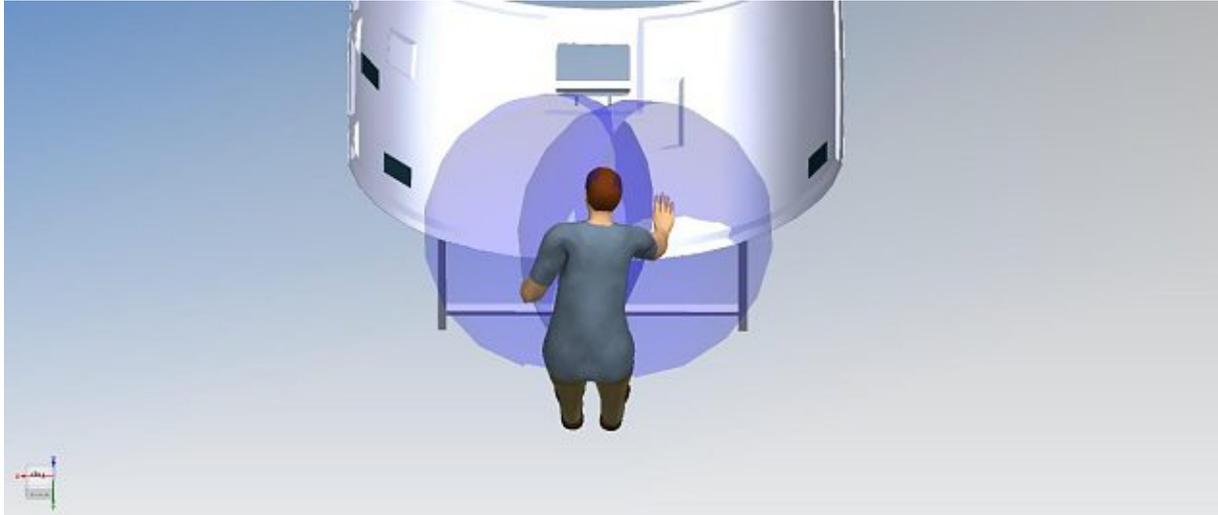


Abbildung 48: Erreichbarkeitsanalyse mittels halbkugelförmigen Hüllflächen

- Sichtfeldanalyse

Ein weiterer wichtiger Aspekt der digitalen Ergonomie ist visuelle Wahrnehmung des Werkers. Da es in dreidimensionalen Simulationen schwierig ist das Sichtfeld des Werkers eingrenzen zu können, bietet TX zwei animierte Kegel an, welche das aktuelle Sichtfeld repräsentieren. Diese Funktion wird im Reiter „Human“ bei Bereich „Analyze“ und „Vision Envelope“ aktiviert.

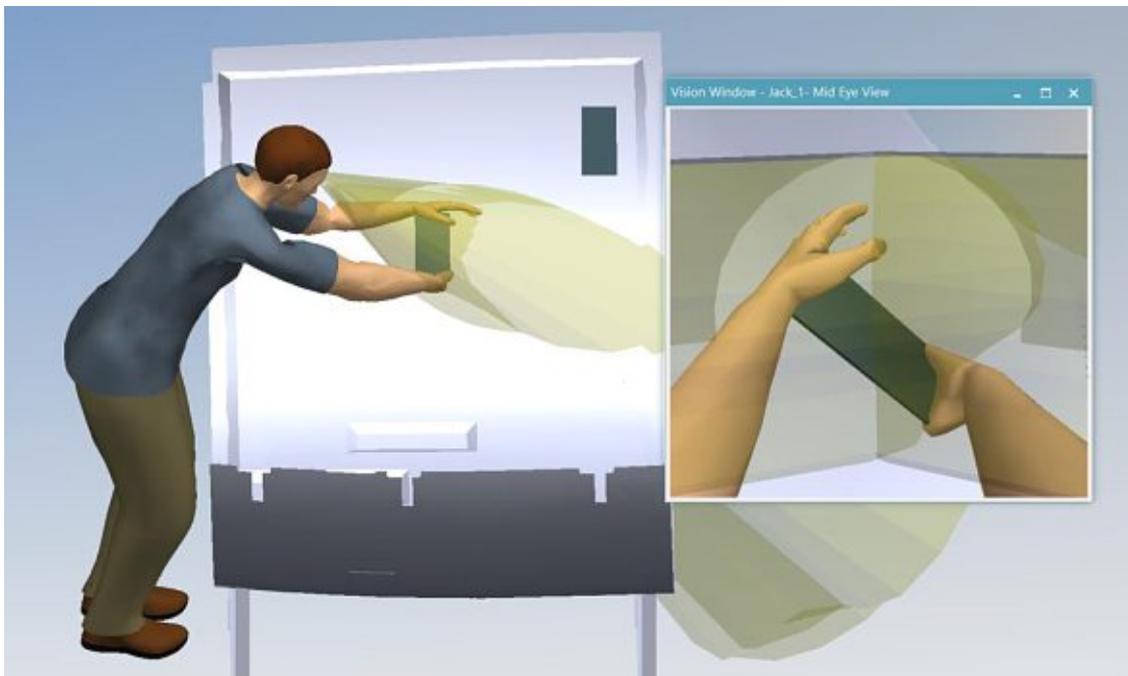


Abbildung 49: Sichtfeldanalyse

Ein zusätzliches Tool, welches die Sichtfeldanalyse erleichtert, bietet die Funktion „Vision Window“. Diese kann im Reiter „Human“, Bereich „Vision Window“ aktiviert werden. Nach Aktivierung wird ein Zusatzfenster eingeblendet, welches das Sichtfeld aus dem Blickwinkel des Werkers anzeigt.

Zeitanalyse 0.50 Perzentil männlich EMA

Parameter	
Ersteller	Thomas
Datum	26.11.2020, 10:01
Filter	-
Werker	Menschmodell, 50. Perzentil, männlich, deutsch
Arbeit an Sitz- Steh- Arbeitsplatz	nein
Anwendung des hohen Methodenniveaubereichs	nein
F-Zeit [s]: 78,5	
F-Zeit [min]: 1,3083	

Zeitanalyse											
#	Beschreibung	Kode	Hand	TMU	A x H	Regeln	TMU beeinfl.	TMU unbeeinfl.	TMU Summe	Dauer in [s] Summe	Dauer in [min] Summe
1	Gehe zu Anweisung	KA		25	2 * 1		50	0	50	1,80	0,03
2	Anweisung lesen	VA		15	1 * 1		15	0	15	0,54	0,01
3	Prozess starten	PA3	R	25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
4	Gehe zu Anweisung	KA		25	6 * 1		150	0	150	5,40	0,09
5	Anweisung lesen	VA		15	1 * 1		15	0	15	0,54	0,01
6	Gehe zu Tisch	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
7	Folie abziehen	AA2	L	35	1 * 1		35	0	35	1,26	0,02
	Folie entsorgen										
8	Matte aufnehmen	AB2	L + R	45	1 * 1		45	0	45	1,62	0,03
	Matte auf die vom Laser angezeigte Position platzieren										
9	Gehe zu Montageposition	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
10	Festdrücken + Qualität kontrollieren	ZB1		10	1 * 1		10	0	10	0,36	0,01
11	Blickverschiebung Projektion	VA		15	1 * 1		15	0	15	0,54	0,01
12	Bestätigen	PA3	R	25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
13	Gehe zu Projektion	KA		25	6 * 1		150	0	150	5,40	0,09
14	Arbeitsanweisung auf Projektion lesen	PT		83	1 * 1		0	83	83	3,00	0,05
15	Gehe zu Tisch	KA		25	6 * 1		150	0	150	5,40	0,09
16	Folie abziehen	AA1	L	20	1 * 1		20	0	20	0,72	0,01
	Folie in Ablagebox										
17	Gehe zu Ablagebox	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
18	Gehe zu Matte	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02

19	Matte aufnehmen	AA1	L + R	20	1 * 1		20	0	20	0,72	0,01
	Matte platzieren										
20	Gehe zu Projektion	KA		25	6 * 1		150	0	150	5,40	0,09
21	Festdrücken (wischen)	ZB1		10	1 * 1		10	0	10	0,36	0,01
22	Bestätigen	PT		56	1 * 1		0	56	56	2,00	0,03
23	Gehe zu Projektion	KA		25	2 * 1		50	0	50	1,80	0,03
24	Arbeitsanweisung lesen	PT		56	1 * 1		0	56	56	2,00	0,03
25	Gehe zu Tisch	KA		25	5 * 1		125	0	125	4,50	0,08
26	Folie abziehen	AD2	L	45	1 * 1		45	0	45	1,62	0,03
	Folie in Ablagebox										
27	Matte aufnehmen	AC2	L + R	55	1 * 1		55	0	55	1,98	0,03
	Matte platzieren										
28	Gehe zu Projektion	KA		25	5 * 1		125	0	125	4,50	0,08
29	Gehe zu Projektion	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
30	Blickverschiebung zur Projektion	PT		56	1 * 1		0	56	56	2,00	0,03
31	Bestätigen	PA3	R	25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
32	Gehe zu Projektion	KA		25	6 * 1		150	0	150	5,40	0,09
33	Arbeitsanweisung lesen	PT		56	1 * 1		0	56	56	2,00	0,03
34	Gehe zu Tisch	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
35	Folie abziehen	AA3	L	50	1 * 1		50	0	50	1,80	0,03
	Folie in Ablagebox										
36	Matte aufnehmen	AC2	L + R	55	1 * 1		55	0	55	1,98	0,03
	Matte platzieren										
37	Gehe zu Projektion	KA		25	1 * 1		25	0	25	0,90	0,02
38	Bestätigen	PA1	R	10	1 * 1		10	0	10	0,36	0,01
39	Gehe zu Startpunkt	KA		25	5 * 1		125	0	125	4,50	0,08
Summe:											

Summe:	2181	78,50	1,31
---------------	------	-------	------

Zeitanalyse 0.50 Perzentil männlich TX

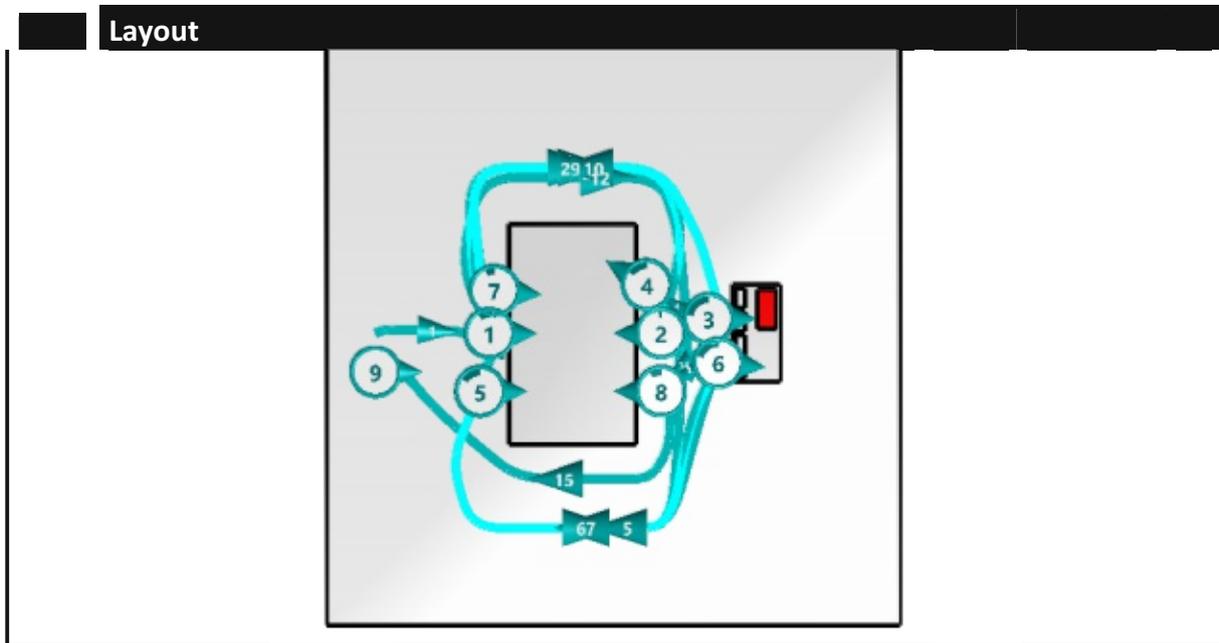
Total Simulation Duration: 119.8s

Jack			
Task	Action	Duration (s)	Code
Go_to_target_Jack		1.8	
	Walk	1.839	W5FT
Pose_Jack_0		0.9	
	Pose	0.89	Pose
Touch_InventorFan_Cowl_mit_Rahmen_V01_Jack		2.4	
	Bend_And_Reach	1.422	B + R12.254A(r)
	Touch	1	Touch
Go_to_target_Jack_1		8.5	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	7.376	W19FT
Pose_Jack_1		1	
	Pose	1	Pose
Get_Folie200x100x1_Jack		2	
	Walk	0.438	W1FT
	Turn_Body	0	TBC1
	Bend_And_Reach	1.516	B + R18.918A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Put_Folie200x100x1_Jack		0.7	

	Reach	0.63	R29.341A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Get_Matte200x100x5_2_Jack		0.5	
	Reach	0.472	R18.447A(b)
	Grasp	0.072	G1A(b)
Go_to_target_Jack_2		2.5	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	1.382	W4FT
Put_Matte200x100x5_2_Jack		1.2	
	Walk	0.744	W2FT
	Turn_Body	0	TBC1
	Reach	0.41	R15.319A(b)
	Release	0.072	RL1(b)
Apply_force_Matte200x100x5_2_Jack		2	
	Force_Profile	2	Force_Profile(right)
Go_to_target_Jack_3		0	
	Walk	0.032	W0FT
Pose_Jack_2		1	
	Pose	1	Pose
Go_to_target_Jack_4		8.2	
	Walk	8.166	W21FT
Pose_Jack_3		3	
	Pose	3	Pose
Get_Folie200x100x1_4_Jack		8.6	
	Walk	6.976	W18FT
	Bend_And_Reach	1.516	B + R18.955A(r)
	Grasp	0.072	G1A(r)
Go_to_target_Jack_5		2	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	0.82	W2FT
Put_Folie200x100x1_4_Jack		1.6	
	Bend_And_Reach	1.487	B + R17.193A(r)
	Release	0.072	RL1(r)
Go_to_target_Jack_6		1.9	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	0.78	W2FT
Get_Matte200x100x5_4_Jack		1.5	
	Bend_And_Reach	1.454	B + R14.184A(b)
	Grasp	0.072	G1A(b)
Put_Matte200x100x5_4_Jack		9.3	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	7.481	W20FT
	Reach	0.569	R25.211A(b)
	Release	0.072	RL1(b)
Apply_force_Matte200x100x5_4_Jack		3	
	Force_Profile	3	Force_Profile(right)
Go_to_target_Jack_7		0	
	Walk	0.033	W0FT
Pose_Jack_4		1	
	Pose	1	Pose
Go_to_target_Jack_8		1.3	
	Walk	1.344	W4FT
Pose_Jack_5		2	
	Pose	2	Pose
Get_Folie200x100x1_2_Jack		7.9	
	Walk	6.48	W17FT
	Bend_And_Reach	1.39	B + R11.303A(l)
	Grasp	0.072	G1A(l)
Put_Folie200x100x1_2_Jack		0.6	
	Reach	0.504	R21.461A(l)
	Release	0.072	RL1(l)
Get_Matte200x100x5_Jack		0.5	
	Reach	0.443	R16.598A(b)
	Grasp	0.072	G1A(b)
Put_Matte200x100x5_Jack		8.5	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	6.682	W18FT
	Reach	0.569	R25.375A(b)
	Release	0.072	RL1(b)
Apply_force_Matte200x100x5_4_Jack_1		2	
	Force_Profile	2	Force_Profile(left)
Go_to_target_Jack_9		0.9	
	Walk	0.889	W2FT
Pose_Jack_6		1	
	Pose	1	Pose
Go_to_target_Jack_10		7.7	
	Walk	7.692	W20FT
Pose_Jack_7		2	
	Pose	2	Pose
Get_Folie200x100x1_3_Jack		2.9	
	Walk	1.403	W4FT
	Bend_And_Reach	1.422	B + R13.881A(l)

Put_Folie200x100x1_3_Jack	Grasp	0.072	G1A(l)
		0.7	
Get_Matte200x100x5_3_Jack	Reach	0.63	R29.417A(l)
	Release	0.072	RL1(l)
		0.5	
Put_Matte200x100x5_3_Jack	Reach	0.443	R16.880A(b)
	Grasp	0.072	G1A(b)
		4.3	
	Arise_From_Bend	1.148	AB
Apply_force_Matte200x100x5_3_Jack	Walk	1.496	W4FT
	Bend_And_Reach	1.613	B + R25.490A(b)
	Release	0.072	RL1(b)
		2	
Go_to_target_Jack_11	Force_Profile	2	Force_Profile(left)
		1.2	
Pose_Jack_8	Arise_From_Bend	1.148	AB
	Walk	0.033	W0FT
Go_to_target_Jack_12	Pose	3	Pose
		6	
	Walk	6.014	W16FT

Weganalyse 0.50 Perzentil männlich EMA



Menschmodell, 50. Perzentil, männlich, deutsch

Arbeitspositionen

#	Dauer [s]	Verrichtungen	Anteil [%]
1	4,33	1 - Gehe zu Anweisung 2 - Anweisung lesen 3 - Prozess starten 38 - Gehe zu Projektion 39 - Blickverschiebung zur Projektion 40 - Bestätigen	8,51
2	0,98	4 - Gehe zu Anweisung 5 - Anweisung lesen	1,93

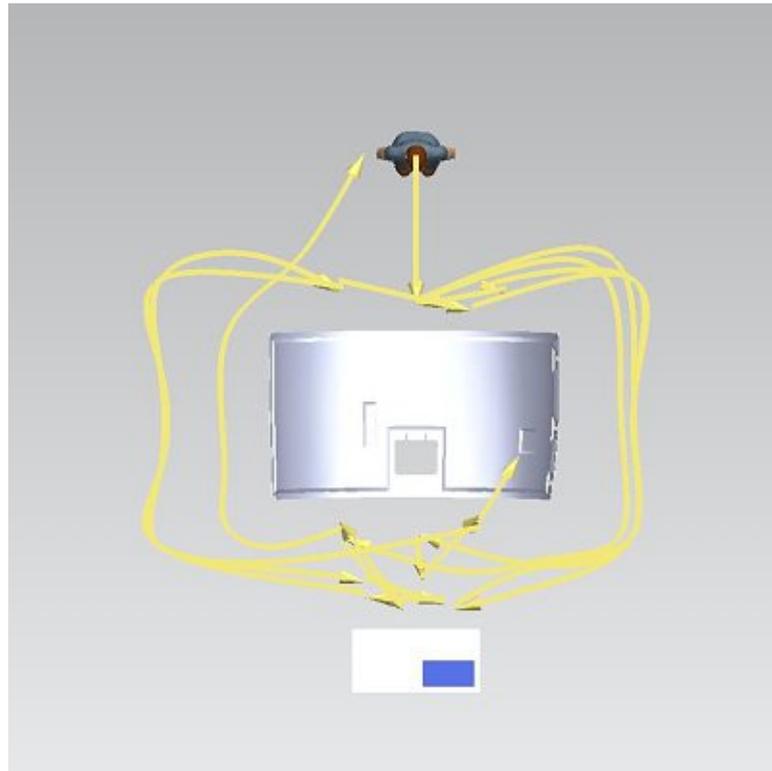
3	11,45	6 - Gehe zu Tisch 7 - Folie abziehen 0 - Folie abziehen (Folie abziehen) 1 - (Folie abziehen) 8 - Folie entsorgen 9 - Matte aufnehmen 0 - Matte aufnehmen (Matte aufnehmen) 1 - (Matte aufnehmen) 21 - Gehe zu Ablagebox 22 - Folie in Ablagebox 32 - Gehe zu Tisch 33 - Folie abziehen 34 - Folie in Ablagebox 35 - Matte aufnehmen 0 - Matte aufnehmen (Matte aufnehmen) 1 - (Matte aufnehmen)	22,49
4	7,80	10 - Gehe zu Montageposition 11 - Matte auf die vom Laser angezeigte Position platzieren 12 - Aufrichten 13 - Festdrücken + Qualität kontrollieren 0 - Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken + Qualität kontrollieren) 1 - 1. Zyklus Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken + Qualität kontrollieren) 2 - 2. Zyklus Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken + Qualität kontrollieren) 14 - Aufrichten 15 - Blickverschiebung Projektion 16 - Bestätigen	15,33
5	7,96	17 - Gehe zu Projektion 18 - Arbeitsanweisung auf Projektion lesen 25 - Gehe zu Projektion 26 - Matte platzieren 27 - Festdrücken (wischen) 0 - Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken (wischen)) 1 - 1. Zyklus Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken (wischen)) 2 - 2. Zyklus Hand zu Ziel bewegen (Festdrücken (wischen)) 28 - Aufrichten 29 - Bestätigen	15,64

6	10,36	19 - Gehe zu Tisch 20 - Folie abziehen 0 - Folie abziehen (Folie abziehen) 1 - (Folie abziehen) 23 - Gehe zu Matte 24 - Matte aufnehmen 0 - Matte aufnehmen (Matte aufnehmen) 1 - (Matte aufnehmen) 43 - Gehe zu Tisch 44 - Folie abziehen 0 - Folie abziehen (Folie abziehen) 1 - (Folie abziehen) 45 - Folie in Ablagebox 46 - Matte aufnehmen 0 - Matte aufnehmen (Matte aufnehmen) 1 - (Matte aufnehmen)	20,36
7	3,44	30 - Gehe zu Projektion 31 - Arbeitsanweisung lesen 36 - Gehe zu Projektion 37 - Matte platzieren	6,76
8	4,57	41 - Gehe zu Projektion 42 - Arbeitsanweisung lesen 47 - Gehe zu Projektion 48 - Matte platzieren 49 - Aufrichten 50 - Bestätigen	8,97
9	0,00	51 - Gehe zu Startpunkt	0,00

Pfade

#	Dauer [s]	Verrichtungen	Länge [m]	Typ
1	1,08	1 - Gehe zu Anweisung	1,20	Lauf-Pfad
2	4,64	4 - Gehe zu Anweisung	5,15	Lauf-Pfad
3	0,90	6 - Gehe zu Tisch	0,54	Lauf-Pfad
4	0,90	10 - Gehe zu Montageposition	0,74	Lauf-Pfad
5	5,28	17 - Gehe zu Projektion	5,87	Lauf-Pfad
6	4,60	19 - Gehe zu Tisch	5,11	Lauf-Pfad
7	4,54	25 - Gehe zu Projektion	5,04	Lauf-Pfad
8	0,95	30 - Gehe zu Projektion	1,06	Lauf-Pfad
9	4,03	32 - Gehe zu Tisch	4,48	Lauf-Pfad
10	3,91	36 - Gehe zu Projektion	4,34	Lauf-Pfad
11	0,90	38 - Gehe zu Projektion	0,62	Lauf-Pfad
12	5,07	41 - Gehe zu Projektion	5,64	Lauf-Pfad
13	0,90	43 - Gehe zu Tisch	0,78	Lauf-Pfad
14	0,90	47 - Gehe zu Projektion	0,86	Lauf-Pfad
15	3,93	51 - Gehe zu Startpunkt	4,37	Lauf-Pfad

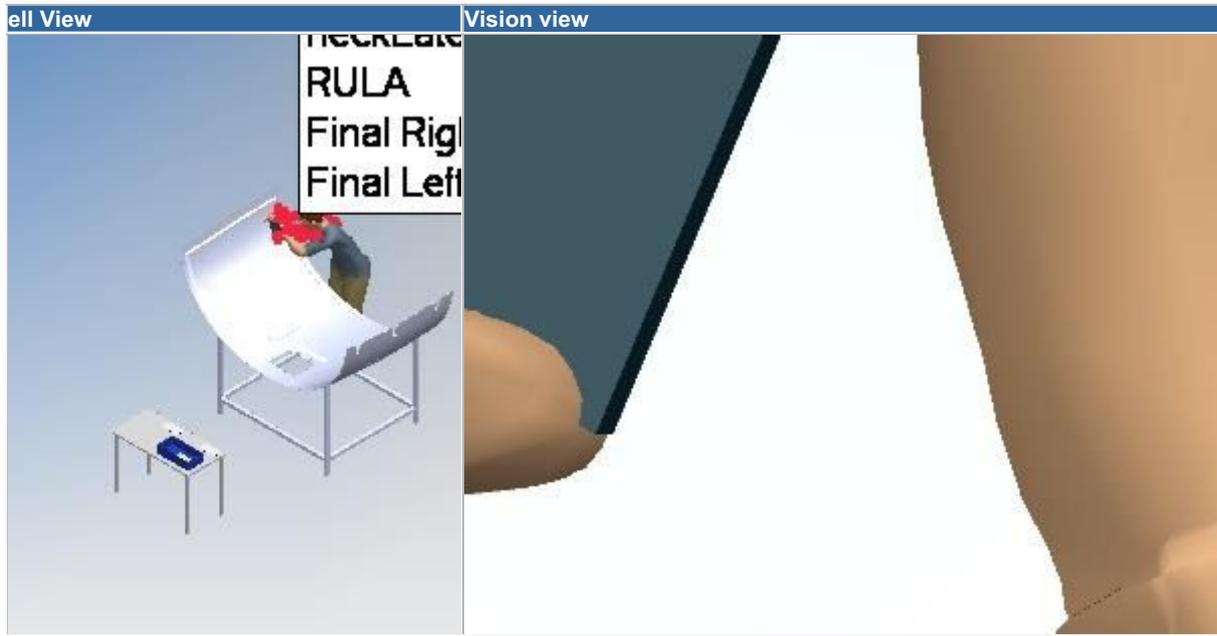
Weganalyse 0.50 Perzentil weiblich



Task	Jack	Walk Duration (sec)	Walk Distance (m)	Code
Go_to_target_Jack		1.8	1.2	W5FT
Pose_Jack_0		0	0	
Touch_InventorFan_Cowl_mit_Rahmen_V01_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_1		7.4	5.7	W19FT
Pose_Jack_1		0	0	
Get_Folie200x100x1_Jack		0.4	0.4	W1FT
Put_Folie200x100x1_Jack		0	0	
Get_Matte200x100x5_2_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_2		1.4	0.7	W4FT
Put_Matte200x100x5_2_Jack		0.7	0.6	W2FT
Apply_force_Matte200x100x5_2_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_3		0	0	W0FT
Pose_Jack_2		0	0	
Go_to_target_Jack_4		8.2	6.3	W21FT
Pose_Jack_3		0	0	
Get_Folie200x100x1_4_Jack		7	5.3	W18FT
Put_Folie200x100x1_4_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_5		0.8	0.7	W2FT
Get_Matte200x100x5_4_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_6		0.8	0.6	W2FT
Put_Matte200x100x5_4_Jack		7.5	5.4	W20FT
Apply_force_Matte200x100x5_4_Jack		0	0	
Go_to_target_Jack_7		0	0	W0FT
Pose_Jack_4		0	0	
Go_to_target_Jack_8		1.3	1.1	W4FT
Pose_Jack_5		0	0	
Get_Folie200x100x1_2_Jack		6.5	4.9	W17FT
Put_Folie200x100x1_2_Jack		0	0	
Get_Matte200x100x5_Jack		0	0	
Put_Matte200x100x5_Jack		6.7	4.9	W18FT
Apply_force_Matte200x100x5_4_Jack_1		0	0	
Go_to_target_Jack_9		0.9	0.7	W2FT
Pose_Jack_6		0	0	
Go_to_target_Jack_10		7.7	5.9	W20FT
Pose_Jack_7		0	0	
Get_Folie200x100x1_3_Jack		1.4	0.7	W4FT
Put_Folie200x100x1_3_Jack		0	0	
Get_Matte200x100x5_3_Jack		0	0	
Put_Matte200x100x5_3_Jack		1.5	0.8	W4FT
Apply_force_Matte200x100x5_3_Jack		0	0	

Go_to_target_Jack_11	0	0	W0FT
Pose_Jack_8	0	0	
Go_to_target_Jack_12	6	4.3	W16FT
Totals	68.1	50	-

RULA Analyse 0.50 Perzentil männlich

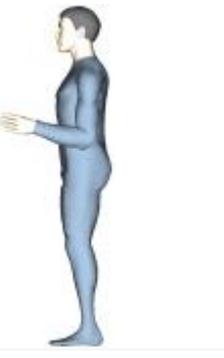


A. Arm and Wrist Analysis - Right Arm					Score
Step 1: Locate Upper Arm Position					
-20 to 20	less than -20	20 to 45	45 to 90	more than 90	
1	2	2	3	4	
UpperArm Angle					1
Step 1a: Adjust...					
If shoulder is raised +1					
If upper arm is abducted +1					
If arm is supported or person is leaning -1					
Final Upper Arm Score:					5
Step 2: Locate Lower Arm Position					
60 to 100	more than 100 or less than 60				

1	2				
Lower Arm Angle		70			
Step 2a: Adjust...					
If arm is working across midline of body or out to side of body +1					
Final Lower Arm Score:					1
Step 3: Locate Wrist Position					
0	-15 to 15	more than 15	less than -15		
1	2	3	3		
Wrist Angle		5			
Step 3a: Adjust...					
If wrist is bent away from midline +1					
Final Wrist Score:					4
Step 4: Wrist Twist					
If wrist is twisted mainly in mid-range	If twist at or near end of twisting range				
1	2				
Wrist Twist Angle		-1			
Wrist Twist Score:					1
Step 5: Locate Posture score from Table A - right:					6
Step 6: Add Muscle Use Score					+
If posture mainly static (i.e. held for more than 1 minute) +1					
If action repeatedly occurs 4 times per minute or more +1					
Muscle Use Score:					0
Step 7: Add Force Use Score					+
If load less than 2Kg +0					
If 2Kg to 10Kg (intermittent) +1					
If 2Kg to 10Kg (static or repeated) OR more than 10Kg (intermittent) +2					
If more than 10Kg (static or repeated) OR shocks +3					

Carried Weight:	<input type="text" value="0"/>
Force Use Score:	<input type="text" value="0"/>
Step 8: Final Wrist and Arm code:	=
Use to find the row on Table C - right:	<input type="text" value="6"/>
Final RULA result for Right arm - from Table C:	<input type="text" value="7"/>

A. Arm and Wrist Analysis - Left Arm					Score
Step 1: Locate Upper Arm Position					
-20 to 20	less than -20	20 to 45	45 to 90	more than 90	
					
1	2	2	3	4	
UpperArm Angle					<input type="text" value="7"/>
Step 1a: Adjust...					
If shoulder is raised +1					
If upper arm is abducted +1					
If arm is supported or person is leaning -1					
Final Upper Arm Score:					<input type="text" value="3"/>

Step 2: Locate Lower Arm Position					
60 to 100	more than 100 or less than 60				
					
1	2				
LowerArm Angle					<input type="text" value="7"/>
Step 2a: Adjust...					
If arm is working across midline of body or out to side of body +1					
Final Lower Arm Score:					<input type="text" value="2"/>

Step 3: Locate Wrist Position					
0	-15 to 15	more than 15	less than -15		

						
1	2	3	3			
Wrist Angle		-6				
Step 3a: Adjust...						
If wrist is bent away from midline (ulnar/radial deviation) +1						
Final Wrist Score:					4	

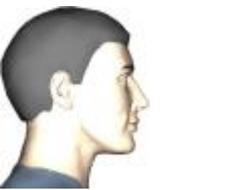
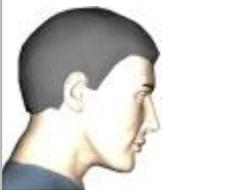
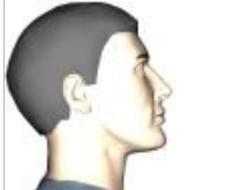
Step 4: Wrist Twist						
If wrist is twisted mainly in mid-range		If twist at or near end of twisting range				
						
1	2					
Wrist Twist Angle		8				
Wrist Twist Score:					2	

Step 5: Locate Posture score from Table A - left:					5
--	--	--	--	--	---

Step 6: Add Muscle Use Score					+
If posture mainly static (i.e. held for more than 1 minute) +1					
If action repeatedly occurs 4 times per minute or more +1					
Muscle Use Score:					0

Step 7: Add Force Use Score					+
If load less than 2Kg +0					
If 2Kg to 10Kg (intermittent) +1					
If 2Kg to 10Kg (static or repeated) OR more than 10Kg (intermittent) +2					
If more than 10Kg (static or repeated) OR shocks +3					
Carried Weight:		0			
Force Use Score:					0

Step 8: Final Wrist and Arm code:					=
Use to find the row on Table C - left:					5
Final RULA result for Left arm - from Table C:					7

B. Neck, Trunk and Leg Analysis					Score
Step 9: Locate Neck Position					
0 to 10	10 to 20	more than 20	in extension		
					
1	2	3	4		

NeckPitch	3	
Step 9b: Adjust...		
	If neck is twisted +1	
	If neck is side bending +1	
Final Neck Score:		2

Step 10: Locate Trunk Position					
-10 to 10	10 to 20	20 to 60	more than 60 or less than -10		
					
1	2	3	4		
BodyPitch	2				
Step 10b: Adjust...					
	Model is seated - trunk well supported: =1				
	Model is seated - trunk not well supported: =2				
	If trunk is twisted +1				
	If trunk is side-bending +1				
Final Trunk Score:					5

Step 11: Legs		
	If legs and feet are supported and balanced +1	
	If not +2	
Final Legs Score:		2

Step 12: Look up Posture score from Table B:	7
---	---

Step 13: Add Muscle Use Score		+
	If posture mainly static (i.e. held for more than 1 minute) +1	
	If action repeatedly occurs 4 times per minute or more +1	
Muscle Use Score:		0

Step 14: Add Force Use Score		+
	If load less than 2Kg +0	
	If 2Kg to 10Kg (intermittent) +1	
	If 2Kg to 10Kg (static or repeated) OR more than 10Kg (intermittent) +2	
	If more than 10Kg (static or repeated) OR shocks +3	
Carried Weight:	0	
Force Use Score:		0

Step 15: Final Neck, Trunk and Leg code:	=
Use to find the column on Table C - right:	7

TABLE A - Right									
Upper Arm	Lower Arm	Wrist							
		1		2		3		4	
		Wrist Twist 1	Wrist Twist 2						
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	2	3	3	3	4	4
2	1	2	2	2	3	3	3	4	4
	2	2	2	2	3	3	3	4	5
	3	2	3	3	3	3	4	4	5
3	1	2	3	3	3	4	4	5	5
	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	3	2	3	3	4	4	4	5	5
4	1	3	4	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	3	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	7	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

TABLE A - Left									
Upper Arm	Lower Arm	Wrist							
		1		2		3		4	
		Wrist Twist 1	Wrist Twist 2						
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	2	3	3	3	4	4
2	1	2	2	2	3	3	3	4	4
	2	2	2	2	3	3	3	4	5
	3	2	3	3	3	3	4	4	5
3	1	2	3	3	3	4	4	5	5
	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	3	2	3	3	4	4	4	5	5
4	1	3	4	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	3	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	7	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

TABLE B												
Neck	Trunk											
	1		2		3		4		5		6	
	Legs 1	Legs 2										
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7

3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

TABLE C Right							
Final A Score	Final B Score						
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

TABLE C Left							
Final A Score	Final B Score						
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

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