

Lehrstuhl für Ergonomie
der Technischen Universität München

**Virtuelle Absicherung manueller Fahrzeugmontage-
vorgänge mittels digitalem 3-D-Menschmodell –
Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion**

Domingo Rodríguez Flick

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. phil. K. Bengler

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb, i.R.

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Die Dissertation wurde am 24.03.2010 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.07.2010 angenom-
men.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist in Zusammenarbeit mit der BMW Group, dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München und der Firma Siemens Tecnomatix entstanden.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Verwirklichung dieser Arbeit unterstützt und so zum Gelingen meiner Forschungsaktivitäten maßgeblich beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb vom Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München sowohl für die Möglichkeit, mich auf diesem interessanten Forschungsgebiet zu betätigen, als auch für sein Vertrauen, seine Betreuung und seine vielfältigen Ideen und Anregungen.

Ich bedanke mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, für die Übernahme des Ko-Referats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Ferner möchte ich Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler vom Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München herzlich danken, der den Vorsitz der Prüfungskommission übernommen hat.

Ein ganz besonderer Dank ergeht weiterhin Herrn Dr.-Ing. Jörn Trilk, Leiter der Abteilung CA-Methoden und -Prozesse bei der BMW Group, für die freundliche Aufnahme in der Abteilung, die vielen interessanten Gespräche sowie die uneingeschränkte und motivierende Unterstützung. Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der BMW Group und im Speziellen bei meinem Doktorandenkollegen Herrn Dr. Stefan Kaltenbrunner für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima bedanken.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Ulrich Raschke und Herrn Dr.-Ing. Manuel Geyer von Siemens Tecnomatix für die Bereitstellung der Software eM-Human danken.

Auch meinen Freunden, die immer ein offenes Ohr für meine Fragen hatten, und insbesondere Herrn Dr. med. Christoph Werner für die zahllosen Diskussionen und seine große Hilfsbereitschaft gilt ein besonderer Dank.

Herzlichst gedankt sei auch meinen Geschwistern Christian, Maria Bettina und Silvia sowie meiner Freundin Tanja für ihre Geduld und große Hilfe. Sie gaben mir immer die nötige Kraft und motivierten mich kontinuierlich dazu, diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Von ganzem Herzen danke ich besonders meinen Eltern Silvia und Domingo, die mir meine akademische Ausbildung ermöglicht haben und auf deren bedingungslose Hilfe und Rückhalt ich immer zurückgreifen konnte.

Ihnen widme ich diese Arbeit.

München, im September 2010

Domingo Rodríguez Flick

Für meine Eltern.

„Ein System ist nur so gut wie die Funktionalität dahinter. Gute Benutzbarkeit ersetzt nicht die aufgabengerechte Funktionalität.“

Maxim Bauer, Software-Ergonomie-Experte

Kurzfassung

Digitale 3-D-Menschmodelle werden in der Automobilindustrie immer häufiger für frühzeitige ergonomische Untersuchungen manueller Montagevorgänge eingesetzt. Derzeit sind allerdings die Handhabung dieser Modelle und hierbei die Benutzerinteraktion mit der Bedienoberfläche der Simulationsprogramme mit einem hohen Bedienungsaufwand verbunden.

Die vorliegende Arbeit betrachtet zuerst ein solches Mensch-Computer-System mit Hilfe der Aussagen erfahrener und potentieller Benutzer dieser Programme. Darauf wird der derzeit notwendige Handlungsprozess bei der virtuellen Montageabsicherung mittels digitalem 3-D-Menschmodell anhand einer repräsentativen Untersuchung beschrieben. Hierbei werden das Mensch-Computer-System bezüglich der geschilderten Problematik bei der Mensch-Computer-Interaktion beurteilt und für dabei identifizierte Schwachstellen abgeleitete, mögliche Optimierungsmaßnahmen in eine für ihre Umsetzung sinnvolle Reihenfolge gebracht.

Abstract

Particularly in the automobile industry digital 3D human models are becoming more important for early ergonomic testing of manual assembly operations. However, increased user inputs are associated with handling 3D human models and also with interactions at the assembly simulation software interface.

This paper first examines this type of human-computer system with information from expert and potential users of this sort of simulation software. Then using a typical assembly inspection, the necessary steps to virtually examine manual assembly operations using 3D human models are described. This way, the human-computer system will be assessed in terms of the human-computer interaction problems described. In order to overcome the identified weaknesses, possible optimisations are presented. These are then ranked according to relevance for putting them into practice afterwards.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
TABELLENVERZEICHNIS	XII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XIII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung.....	4
1.3 Zielsetzung.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit.....	5
2 EINGRENZUNG DER THEMATIK UND STAND DER TECHNIK	7
2.1 Produkt- und Prozessabsicherung des Gesamtfahrzeuges	7
2.2 Aufgaben und Ziele der Produkt- und Prozessabsicherung.....	8
2.3 Verfahren zur Absicherung der manuellen Montage	9
2.3.1 Hardware-Absicherung	10
2.3.2 Virtuelle Absicherung	10
2.3.2.1 Einfache Visualisierung.....	11
2.3.2.2 Ein-/ Ausbausimulation von Bauteilen.....	11
2.3.2.3 Ein-/ Ausbausimulation von Bauteilen mit digitalem 3-D-Menschmodell.....	11
2.3.2.4 Virtuelle Realität (VR)	12
2.3.2.5 Augmented Reality (AR).....	12
2.3.3 Vorteile der virtuellen Absicherung gegenüber der Hardware-Absicherung	13
2.3.4 Fokus der Arbeit.....	13

2.4	Stand der Technik.....	14
2.4.1	Digitale 3-D-Menschmodelle zur virtuellen Absicherung manueller Montagevorgänge.....	14
2.4.1.1	Aufbau und grundlegende Funktionalitäten der betrachteten Modelle.....	15
2.4.1.2	Human Builder (SAFEWORK).....	16
2.4.1.3	Jack.....	16
2.4.1.4	RAMSIS.....	17
2.4.2	CAD-Systeme mit integriertem 3-D-Menschmodell zur virtuellen Absicherung manueller Montagevorgänge.....	18
2.4.2.1	Grundlegende Funktionalitäten der betrachteten CAD-Systeme.....	19
2.4.2.2	CATIA.....	19
2.4.2.3	DELMIA.....	21
2.4.2.4	Process Simulate Human.....	22
3	THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	24
3.1	Definition grundlegender Begriffe.....	24
3.1.1	Ergonomie.....	24
3.1.2	Software-Ergonomie.....	25
3.1.3	Gebrauchstauglichkeit.....	26
3.1.4	Intuitivität.....	28
3.2	Software-ergonomische Gestaltung interaktiver Computersysteme.....	29
3.2.1	Betrachtungsobjekt: Mensch-Computer-System.....	29
3.2.1.1	Aufgabe.....	30
3.2.1.2	Interaktives Anwendungssystem.....	30
3.2.1.3	Benutzer.....	31
3.2.1.4	Nutzungskontext.....	31
3.2.1.5	Aufgabenbewältigung.....	32
3.2.1.6	Funktionalität.....	32
3.2.1.7	Benutzung.....	33
3.2.2	Gestaltungsprobleme interaktiver Computersysteme.....	33
3.2.3	Software-ergonomische Gestaltungsgrundsätze.....	34
3.2.3.1	Mensch-Computer-Funktionsteilung.....	34
3.2.3.2	Dialoggestaltung.....	35
3.2.3.3	Benutzerbeteiligung beim Gestaltungsprozess.....	36
3.3	Software-ergonomische Evaluation interaktiver Computersysteme.....	37
3.3.1	Evaluationsverfahren.....	38
3.3.2	Angewendetes Evaluationsverfahren.....	39
3.3.3	Charakteristische Merkmale eines idealen Handlungsprozesses (SOLL-Prozess).....	41

4	ANALYSE DES BETRACHTETEN MENSCH-COMPUTER-SYSTEMS	42
4.1	Aufbau des Systems	42
4.2	Beschreibung des Systems	43
4.2.1	Unterstützende Erfassungsmethode: Fragebogen.....	43
4.2.2	Systemelemente.....	45
4.2.2.1	Aufgabe	45
4.2.2.2	Interaktives Anwendungssystem	51
4.2.2.3	Benutzer	55
4.2.2.4	CAD-Datenbank.....	56
4.2.2.5	Nutzungskontext.....	57
4.3	Zu untersuchende Aspekte des Mensch-Computer-Systems	58
5	EVALUATION UND OPTIMIERUNG DER MENSCH-COMPUTER-INTERAKTION	59
5.1	Ausgewähltes Beispiel: Simulation der Lenkspindelmontage.....	59
5.1.1	Beschreibung des Montagevorganges	59
5.1.2	Ziele der Simulation des Montagevorganges	60
5.1.3	3-D-CAD-Modelle des Simulationsszenarios	61
5.1.3.1	Bestandteile eines Montagevorganges im Allgemeinen	61
5.1.3.2	Für die Simulation relevante Bestandteile der Lenkspindelmontage.....	63
5.2	Evaluation und Optimierung des Handlungsprozesses	63
5.2.1	Phase I: Bestimmung der relevanten CAD-Daten mit Ausnahme des 3-D-Menschmodells.....	65
5.2.1.1	Beschreibung der Phase.....	65
5.2.1.2	Definition der Anforderungen	65
5.2.1.3	Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)	66
5.2.1.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	67
5.2.1.5	Zusammenfassung der Phase.....	72
5.2.2	Phase II: Visualisierung und Positionierung der 3-D-CAD-Modelle	74
5.2.2.1	Beschreibung der Phase.....	74
5.2.2.2	Definition der Anforderungen	74
5.2.2.3	Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)	75
5.2.2.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	76
5.2.2.5	Zusammenfassung der Phase.....	89

5.2.3	Phase III: Definition der Menschmodellparameter und Visualisierung des 3-D-Menschmodells	92
5.2.3.1	Beschreibung der Phase.....	92
5.2.3.2	Definition der Anforderungen	92
5.2.3.3	Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)	93
5.2.3.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	93
5.2.3.5	Zusammenfassung der Phase.....	95
5.2.4	Phase IV: Positionierung des 3-D-Menschmodells	96
5.2.4.1	Beschreibung der Phase.....	96
5.2.4.2	Definition der Anforderungen	96
5.2.4.3	Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)	97
5.2.4.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	98
5.2.4.5	Zusammenfassung der Phase.....	105
5.2.5	Phase V: Umsetzung der Montageuntersuchung.....	106
5.2.5.1	Beschreibung der Phase.....	106
5.2.5.2	Definition der Anforderungen	107
5.2.5.3	Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)	108
5.2.5.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	109
5.2.5.5	Zusammenfassung der Phase.....	127
5.2.6	Phase VI: Dokumentation der Montageuntersuchung.....	128
5.2.6.1	Beschreibung der Phase.....	128
5.2.6.2	Definition der Anforderungen	128
5.2.6.3	Minimal notwendiger Handlungsprozesses (SOLL-Prozess)	128
5.2.6.4	Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion.....	130
5.2.6.5	Zusammenfassung der Phase.....	132
5.3	Zusammenfassung und Priorisierung der erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen	132
5.3.1	Vorgehensweise	133
5.3.2	Ergebnisse	133
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	138
	LITERATURVERZEICHNIS	141
	ANHANG A	149
	ANHANG B	154
	ANHANG C	156

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: CHANCE ZUR VERÄNDERUNG INNERHALB DES PEP UND ZEHNERREGEL DER FEHLERKOSTEN IN ANLEHNUNG AN [66][92][106]	1
ABBILDUNG 1-2: ENTWICKLUNG DER BAURAUMDICHTE IM MOTORRAUM IM LAUFE DER ZEIT. LINKS: BMW 320-326 (DREIßIGER JAHRE). RECHTS: BMW 3ER (MODELLJAHR 2009) [11]2	
ABBILDUNG 1-3: DEMOGRAPHISCHER WANDEL IN DEUTSCHLAND. ALTERSAUFBAU 2009 UND PROGNOSE FÜR 2040: VERSCHIEBUNG DER ALTERSTRUKTUR [116].....	3
ABBILDUNG 1-4: EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE FAHRZEUGINDUSTRIE UND IHRE AUSWIRKUNGEN	4
ABBILDUNG 1-5: AUFBAU DER ARBEIT	6
ABBILDUNG 2-1: BRÜCKENFUNKTION ZWISCHEN ENTWICKLUNG (LINKS), SERIENPRODUKTION (MITTE) UND DEM KUNDEN (RECHTS) [12].....	7
ABBILDUNG 2-2: ZIEL DER PRODUKT- UND PROZESSABSICHERUNG BEI DER BMW GROUP [12].	9
ABBILDUNG 2-3: GEGENÜBERSTELLUNG PMU / DMU [36].....	9
ABBILDUNG 2-4: VERGLEICH AUSGEWÄHLTER VIRTUELLER TECHNIKEN	12
ABBILDUNG 2-5: DIGITALE 3-D-MENSCHMODELLE IN VERSCHIEDENEN EINSATZBEREICHEN [38][56][87][113]. V.L.N.R. IM UHRZEIGERSINN: AUTOMOBILENTWICKLUNG, MOTORRADENTWICKLUNG, ARBEITSPLATZGESTALTUNG, OPERATIONSRAUM UND FLUGZEUGBRANCHE.	14
ABBILDUNG 2-6: DAS 3-D-MENSCHMODELL HUMAN BUILDER IN VERSCHIEDENEN DARSTELLUNGSFORMEN [115].....	16
ABBILDUNG 2-7: DAS 3-D-MENSCHMODELL JACK – DREI WEIBLICHE (LINKS) UND DREI MÄNNLICHE (RECHTS) MENSCH-TYOLOGIEN [24].....	17
ABBILDUNG 2-8: DAS 3-D-MENSCHMODELL RAMSIS – ALS KNOCHENMODELL, ALS HAUTLINIENMODELL, ALS VOLUMEN- UND PRÄSENTATIONSMODELL [55].....	17
ABBILDUNG 2-9: FAHRZEUGINNENRAUMANALYSE. LINKS: 3-D-MENSCHMODELL RAMSIS [95]. RECHTS: 3-D-MENSCHMODELL HUMAN BUILDER [94].....	20
ABBILDUNG 2-10: SIMULATIONSSZENARIEN BEI DER ARBEITSPLATZANALYSE [28][29].....	21
ABBILDUNG 2-11: 3-D-MENSCHMODELL RAMSIS IN PROCESS SIMULATE HUMAN.....	23
ABBILDUNG 3-1: SCHEMA DER ELEMENTE UND BEZIEHUNGEN EINES MENSCH-COMPUTER-SYSTEMS IN ANLEHNUNG AN [125]	30
ABBILDUNG 3-2: DISKREPANZ ZWISCHEN VERMUTETER UND TATSÄCHLICHER FUNKTIONALITÄT EINES KOMPLEXEN SYSTEMS (VENN-DIAGRAMM) [43][79].....	32
ABBILDUNG 3-3: KONZEPTIONELLE SICHT DER SCHNITTSTELLEN EINES INTERAKTIVEN COMPUTERSYSTEMS UND DER ZUGEORDNETEN PROBLEMBEREICHE [99].....	33
ABBILDUNG 3-4: GRUNDSÄTZE DER DIALOGGESTALTUNG (DIN EN ISO 9241-110) [32][89]	36
ABBILDUNG 3-5: PROZESSMODELL BENUTZERORIENTIERTER SOFTWARE-ENTWICKLUNG ENTSPRECHEND DER NORM DIN EN ISO 13407 [14][32][33]	37

ABBILDUNG 3-6: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ABWEICHUNG ZWISCHEN EINER IDEALEN UND REALEN HANDLUNGSSEQUENZ ZUR LÖSUNG EINER AUFGABE [17] ...	40
ABBILDUNG 4-1: AUFBAU DES BETRACHTETEN MCS IN ANLEHNUNG AN [125]	42
ABBILDUNG 4-2: BISHERIGE METHODEN ZUR ABARBEITUNG DER GESTELLTEN AUFGABEN (TEIL II – FRAGE 1).....	46
ABBILDUNG 4-3: BISHERIGER EINSATZZWECK VON CAD-SYSTEMEN MIT 3-D-MENSCHMODELL (TEIL I – FRAGE 1).....	47
ABBILDUNG 4-4: BESTMÖGLICHER EINSATZZWECK VON CAD-SYSTEMEN MIT INTEGRIERTEM 3-D-MENSCHMODELL (TEIL II – FRAGE 2).....	47
ABBILDUNG 4-5: UNTERSUCHTE MONTAGEVORGÄNGE (TEIL II – FRAGE 3).....	48
ABBILDUNG 4-6: PHASEN EINES NORMIERTEN PEP IM FAHRZEUGBAU BEI DER BMW GROUP ..	49
ABBILDUNG 4-7: UNTERSUCHUNGSZEITPUNKTE DER MANUELLEN MONTAGEVORGÄNGE (TEIL II – FRAGE 4).....	49
ABBILDUNG 4-8: HÄUFIGKEIT DER MONTAGEUNTERSUCHUNGEN MIT 3-D-MENSCHMODELL PRO JAHR (TEIL I – FRAGE 2)	50
ABBILDUNG 4-9: VERWENDETE CAD-SYSTEME MIT 3-D-MENSCHMODELL (TEIL I – FRAGE 4) ..	52
ABBILDUNG 4-10: VORTEILE DES EINSATZES EINES DIGITALEN 3-D-MENSCHMODELLS (TEIL II – FRAGE 6).....	52
ABBILDUNG 4-11: NACHTEILE DES EINSATZES EINES DIGITALEN 3-D-MENSCHMODELLS (TEIL II – FRAGE 7).....	53
ABBILDUNG 4-12: ZEITLICHER AUFWAND ZUR AUFBEREITUNG DES SZENARIOS BZW. ZUR DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNG (TEIL I – FRAGE 5)	54
ABBILDUNG 4-13: BENUTZERKLASSE DER ERFAHRENEN BEFRAGTEN (I = 28) (TEIL I – FRAGE 6)	56
ABBILDUNG 4-14: VEREINFACHTE GEOMETRIEN DURCH TESSELIERUNG, D.H. DURCH REDUZIERUNG DER FASSETTEN [20].....	57
ABBILDUNG 4-15: BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN ELEMENTEN DES BETRACHTETEN MCS	58
ABBILDUNG 5-1: SIMULATIONSSZENARIO DER LENKSPINDELMONTAGE (RECHTS) MIT DETAILSICHT DER LENKSPINDEL (LINKS)	59
ABBILDUNG 5-2: BAURAUUM MIT GEPLANTEM MONTAGEWEG DER HAND (GEPUNKTETE PFEILLINIE).....	60
ABBILDUNG 5-3: ZUR VERFÜGUNG STEHENDER MONTAGEDURCHLASS (BEGRENZT DURCH DIE SCHWARZ-WEIß GESTRICHELTE LINIE)	61
ABBILDUNG 5-4: 3-D-CAD-MODELLE DER BESTANDTEILE EINES MONTAGESIMULATIONSSZENARIOS.....	62
ABBILDUNG 5-5: 3-D-CAD-MODELLE DER RELEVANTEN BESTANDTEILE FÜR DAS SIMULATIONSSZENARIO DER LENKSPINDELMONTAGE	63
ABBILDUNG 5-6: PHASEN ZUR ERSTELLUNG EINER SIMULATION MANUELLER MONTAGEVORGÄNGE MIT DIGITALEN 3-D-MENSCHMODELLEN.....	64

ABBILDUNG 5-7: IDEALABLAUF ZUR BESTIMMUNG DER RELEVANTEN CAD-DATEN (RECHTS UNTEN), HIER ORANGE DARGESTELLT, MIT AUSNAHME DES 3-D-MENSCHMODELLS (SOLL-PROZESS)	66
ABBILDUNG 5-8: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR BESTIMMUNG UND VISUALISIERUNG DER RELEVANTEN CAD-DATEN IN CATIA V5 (IST-PROZESS)	68
ABBILDUNG 5-9: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR KONVERTIERUNG DER RELEVANTEN CAD-DATEN (IST-PROZESS)	69
ABBILDUNG 5-10: VORGESCHLAGENES OPTIMIERTES DATENMANAGEMENT	70
ABBILDUNG 5-11: OPTIMIERTER HANDLUNGSPROZESS ZUR BESTIMMUNG DER RELEVANTEN CAD-DATEN MIT AUSNAHME DES 3-D-MENSCHMODELLS	73
ABBILDUNG 5-12: LINKS: POSITIONIERTE 3-D-CAD-MODELLE DER RELEVANTEN CAD-DATEN DES BETRACHTETEN MONTAGEVORGANGES. RECHTS: NACH HINZUFÜGEN RESTLICHER BESTANDTEILE.	74
ABBILDUNG 5-13: IDEALABLAUF ZUR VISUALISIERUNG UND POSITIONIERUNG DER 3-D-CAD-MODELLE (SOLL-PROZESS)	75
ABBILDUNG 5-14: SCHRITTE ZUR VISUALISIERUNG UND POSITIONIERUNG DER 3-D-CAD-MODELLE	76
ABBILDUNG 5-15: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR VISUALISIERUNG UND POSITIONIERUNG ALLER BESTANDTEILE MIT AUSNAHME DES WERKZEUGES (IST-PROZESS)	77
ABBILDUNG 5-16: SEITENANSICHT DES SZENARIOS. LINKS: BESTANDTEILE IN NULLLAGE. RECHTS: BESTANDTEILE IN DER GEPLANTEN MONTAGELAGE	78
ABBILDUNG 5-17: FRONTKLAPPE IM GESCHLOSSENEN (GRÜN GEZEIGT) UND OFFENEN ZUSTAND	79
ABBILDUNG 5-18: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR ZUSÄTZLICHEN EINSTELLUNG DER FRONTKLAPPE (IST-PROZESS)	80
ABBILDUNG 5-19: LINKS: WERKZEUG IN DER AUSGANGSPPOSITION. RECHTS: WERKZEUG IN DER GEWÜNSCHTEN POSITION.	81
ABBILDUNG 5-20: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR VISUALISIERUNG UND POSITIONIERUNG DES WERKZEUGES (IST-PROZESS)	82
ABBILDUNG 5-21: ACHSENKREUZ AM WERKZEUGAUFSATZ (LINKS) UND AM SCHRAUBLOCH (RECHTS).....	83
ABBILDUNG 5-22: POSITIONIERTES WERKZEUG MIT KOLLISION (LINKS) UND OHNE KOLLISION (RECHTS).....	83
ABBILDUNG 5-23: OPTISCHE TÄUSCHUNG IM 3-D-RAUM: ANSICHTEN AUS VERSCHIEDENEN BLICKRICHTUNGEN. LINKS: WERKZEUGAUFSATZ SCHEINT AM SCHRAUBLOCH ZU SEIN. RECHTS: AUS EINER ANDEREN PERSPEKTIVE WIRD DER NOCH VORHANDENE ABSTAND SICHTBAR.	84
ABBILDUNG 5-24: AUTOMATISCHE AUSRICHTUNG VON OBJEKTEN [35].....	85

ABBILDUNG 5-25: LINKS: BISHER POSITIONIERTE BESTANDTEILE. RECHTS: BESTANDTEILE NACH ZUSÄTZLICHER EINSTELLUNG DER PRODUKTIONSTECHNIK.	85
ABBILDUNG 5-26: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR ZUSÄTZLICHEN EINSTELLUNG DER BESTANDTEILE ENTSPRECHEND DER BEWEGUNGSKINEMATIK DER PRODUKTIONSTECHNIK (IST-PROZESS)	86
ABBILDUNG 5-27: OBERES ACHSENKREUZ: ERZEUGT DURCH DIE „PLACEMENT MANIPULATOR“-FUNKTION. UNTERES ACHSENKREUZ: TATSÄCHLICH BENÖTIGTES ACHSENKREUZ.	87
ABBILDUNG 5-28: LINKS: NACHTRÄGLICH HINZUGEFÜGTES BESTANDTEIL IN DER AUSGANGSPOSITION. RECHTS: BESTANDTEIL IN DER GEWÜNSCHTEN POSITION.	88
ABBILDUNG 5-29: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR POSITIONIERUNG VON NACHTRÄGLICH HINZUGEFÜGTEN BESTANDTEILEN (IST-PROZESS).....	89
ABBILDUNG 5-30: OPTIMIERTER ABLAUF FÜR DIE VISUALISIERUNG UND POSITIONIERUNG DER 3-D-CAD-MODELLE	91
ABBILDUNG 5-31: WEIBLICHES UND MÄNNLICHES 3-D-MENSCHMODELL RAMSIS.....	92
ABBILDUNG 5-32: IDEALABLAUF ZUM DEFINIEREN DER MENSCHMODELLPARAMETER UND VISUALISIEREN DES 3-D-MENSCHMODELLS BZW. HAND-ARM-SYSTEMS (SOLL-PROZESS)	93
ABBILDUNG 5-33: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUM DEFINIEREN DER MENSCHMODELLPARAMETER UND VISUALISIEREN DES 3-D-MENSCHMODELLS (IST-PROZESS)	94
ABBILDUNG 5-34: MERKMALSRAUM DER RAMSIS-TYOLOGIE, GEBILDET DURCH DIE LEITMAßE KÖRPERHÖHE, PROPORTION UND KORPULENZ [55].....	94
ABBILDUNG 5-35: 3-D-MENSCHMODELL VOR (GRÜN DARGESTELLT) UND NACH DER POSITIONIERUNG	96
ABBILDUNG 5-36: IDEALABLAUF ZUR POSITIONIERUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS UND EINSTELLUNG EINER GEEIGNETEN ANFANGSKÖRPERHALTUNG (SOLL-PROZESS)	97
ABBILDUNG 5-37: SCHRITTE ZUR POSITIONIERUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS	98
ABBILDUNG 5-38: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR RÄUMLICHEN POSITIONIERUNG UND EINSTELLUNG DER GRUNDKÖRPERHALTUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS (IST-PROZESS).....	98
ABBILDUNG 5-39: KÖRPERTEILE, IN DIE DAS 3-D-MENSCHMODELL RAMSIS AUFGETEILT IST..	99
ABBILDUNG 5-40: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR EINSTELLUNG EINER KOLLISIONSFREIEN ANFANGSKÖRPERHALTUNG (IST-PROZESS).....	100
ABBILDUNG 5-41: AUTOMATISCHE POSITIONIERUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS IN BAUTEILNÄHE	102
ABBILDUNG 5-42: ZUSÄTZLICHE POSITIONIERUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS MITHILFE EINES IMAGINÄREN KREISES. LINKS: SEITLICHE ANSICHT. RECHTS: DRAUFSICHT.....	102
ABBILDUNG 5-43: UNTERSCHIEDLICHES VERHALTEN ZWEIER ÄHNLICHER FUNKTIONALITÄTEN	103

ABBILDUNG 5-44: ANGABE DER BEVORZUGTEN FLÄCHE – HIER DER KAROSSERIEBODEN	104
ABBILDUNG 5-45: AUTOMATISCHE PROGNOSE SINNVOLLER KOLLISIONSFREIER ANFANGSGRUNDKÖRPERHALTUNGEN (AUTO-AUSWAHL).....	104
ABBILDUNG 5-46: OPTIMIERTER ABLAUF ZUR POSITIONIERUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS	105
ABBILDUNG 5-47: UMGESetzte MONTAGEUNTERSUCHUNG	106
ABBILDUNG 5-48: VORDEFINIERTe STANDARDGREIFARTEN	107
ABBILDUNG 5-49: IDEALABLAUF ZUR UMSETZUNG DER MONTAGEUNTERSUCHUNG (SOLL-PROZESS)	108
ABBILDUNG 5-50: SCHRITTE ZUR UMSETZUNG DER MONTAGEUNTERSUCHUNG	109
ABBILDUNG 5-51: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUM GREIFEN EINES GEGENSTANDES MIT HILFE DER „AUTO GRASP“-FUNKTION (IST-PROZESS).....	110
ABBILDUNG 5-52: MANUELLE EINSTELLUNG DER HANDPOSITION. LINKS: ERSTE ANNÄHERUNG, PROBLEMSTELLEN UND BEWEGUNGSVORSCHLÄGE. MITTE: MANUELLE BEWEGUNG DER HAND MIT HILFE DER „MAN JOG“-FUNKTION. RECHTS: KOLLISIONSFREIE HANDPOSITION.	111
ABBILDUNG 5-53: GREIFDEFINITION FÜR EIN AKKU-WINKELSCHRAUBER (FIKTIVES BEISPIEL). LINKS: AUSGANGSSITUATION. RECHTS: ERMITTELTE GREIFDEFINITION.	112
ABBILDUNG 5-54: PROBLEME BEIM AUTOMATISCHEN GREIFEN EINES BAUTEILS. LINKS: DURCHDRINGUNG DES BENACHBARTEN LENKGETRIEBEZAPFENS. RECHTS: GEWÜNSCHTER GRIFF.	112
ABBILDUNG 5-55: UNTERSCHIEDLICHES VERHALTEN ZWEIER ÄHNLICHER FUNKTIONALITÄTEN. OBEN: ZUSÄTZLICHE DREHUNG DER HAND WÄHREND DER LINEAREN BEWEGUNG. UNTEN: DIE LAGE DER HAND BLEIBT BEIBEHALTEN.....	113
ABBILDUNG 5-56: BEISPIELE VON VORDEFINIERTEN GREIFARTEN.....	113
ABBILDUNG 5-57: VORDEFINIERTE GREIFMAKROS FÜR WERKZEUGE.....	114
ABBILDUNG 5-58: FESTGELEGTE STÖRGEOMETRIE (ROT DARGESTELLT).....	115
ABBILDUNG 5-59: AUTOMATISCHE SUCHE NACH EINER KOLLISIONSFREIEN HANDPOSITION	115
ABBILDUNG 5-60: OPTIMIERTER PROZESS ZUM KOLLISIONSFREIEN GREIFEN EINES GEGENSTANDES	116
ABBILDUNG 5-61: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR ERMITTLUNG EINER KOLLISIONSFREIEN UND REALITÄTSNAHEN GESAMTKÖRPERHALTUNG (IST-PROZESS)	117
ABBILDUNG 5-62: SICHTKONTROLLMÖGLICHKEITEN. LINKS: SICHTKEGEL („VISION ENVELOPE“). RECHTS: SICHTFENSTER („VISION WINDOW“).	118
ABBILDUNG 5-63: SUCHE NACH EINER KOLLISIONSFREIEN UND REALITÄTSNAHEN GESAMTKÖRPERHALTUNG. LINKS: AUSGANGSSITUATION. MITTE: FUNKTION ZUR ZUSÄTZLICHEN ANPASSUNG DES 3-D-MENSCHMODELLS. RECHTS: ERMITTELTE KÖRPERHALTUNG.....	119

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 5-64: RESTRIKTIONSEBENEN (LINKS) UND VORGENOMMENE EINGABEN FÜR DIE „RAMSIS POSTURE WIZARD“-FUNKTION BEI DER BETRACHTETEN MONTAGEUNTERSUCHUNG (RECHTS): GREIFZIEL (GELBER PFEIL) UND RESTRIKTIONSEBENEN FÜR DIE RECHTE HAND.	120
ABBILDUNG 5-65: OPTIMIERTER PROZESS ZUR ERMITTLUNG EINER KOLLISIONSFREIEN UND REALITÄTSNAHEN GESAMTKÖRPERHALTUNG.....	121
ABBILDUNG 5-66: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR PRÜFUNG DER ZUGÄNLICHKEIT DER HAND ALLEINE SOWIE SAMT GEGENSTAND (IST-PROZESS)	122
ABBILDUNG 5-67: GEGENSTAND WIRD BEI DER MONTAGEUNTERSUCHUNG MITEINBEZOGEN	123
ABBILDUNG 5-68: SEQUENZ VON KOLLISIONSFREIEN KÖRPERHALTUNGEN WÄHREND DER PFADSUCHE. OBEN: BETRACHTETE MONTAGEUNTERSUCHUNG (NUR HAND). UNTEN: HAND MIT GEGENSTAND.	123
ABBILDUNG 5-69: OPTIMIERTER PROZESS ZUR SUCHE EINES KOLLISIONSFREIEN PFADES	125
ABBILDUNG 5-70: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR ERGONOMISCHEN BEWERTUNG DER STATISCHEN KÖRPERHALTUNG (IST-PROZESS).....	126
ABBILDUNG 5-71: ERGONOMISCHE ANALYSE STATISCHER ARBEITSHALTUNGEN MITTELS DER OWAS-METHODE. LINKS: ERGONOMISCH GÜNSTIGE KÖRPERHALTUNG (KEINE EINFÄRBUNGEN VORHANDEN). RECHTS: ERGONOMISCH UNGÜNSTIGE RÜCKENHALTUNG (GELB DARGESTELLT).....	126
ABBILDUNG 5-72: IDEALABLAUF ZUR DOKUMENTATION DER ERMITTELTEN KÖRPERHALTUNG (SOLL-PROZESS)	129
ABBILDUNG 5-73: IDEALABLAUF ZUR DOKUMENTATION DES KOMPLETTEN SZENARIOS (SOLL-PROZESS)	129
ABBILDUNG 5-74: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR DOKUMENTATION DER MONTAGEUNTERSUCHUNG (IST-PROZESS)	130
ABBILDUNG 5-75: DERZEIT NOTWENDIGER HANDLUNGSPROZESS ZUR DOKUMENTATION DER ERMITTELTEN KÖRPERHALTUNG (IST-PROZESS)	131
ABBILDUNG 5-76: VORGESCHLAGENES OPTIMIERTES DATENMANAGEMENT BEI DER DOKUMENTATION DER MONTAGEUNTERSUCHUNG	132
ABBILDUNG 5-77: RESULTIERENDE REIHENFOLGE DER ANFORDERUNGSKRITERIEN	134
ABBILDUNG 5-78: WICHTIGKEIT DER ÜBERGEORDNETEN SOFTWARE-ERGONOMISCHEN ANFORDERUNGEN	137
ABBILDUNG 6-1: VERBAU DER SEITLICHEN SCHALLISOLIERUNG – ÜBEREINSTIMMUNG DER ERGEBNISSE. LINKS: SIMULIERTE KÖRPERHALTUNG SAMT SICHTFELD UND ERGONOMISCHER BEWERTUNG NACH OWAS (FARBlich UND IN FORM EINES CODES DARGESTELLT). RECHTS: TATSÄCHLICH EINGENOMMENE KÖRPERHALTUNG (FOTOGRAFIEAUFNAHME: BMW GROUP).....	154

ABBILDUNG 6-2: VERBAU DER OBEREN HECKKLAPPENVERKLEIDUNG – ÜBEREINSTIMMUNG DER ERGEBNISSE. LINKS: SIMULIERTE KÖRPERHALTUNG SAMT ERGONOMISCHER BEWERTUNG NACH OWAS. RECHTS: TATSÄCHLICH EINGENOMMENE KÖRPERHALTUNG (FOTOGRAFIEAUFNAHME: BMW GROUP).	154
ABBILDUNG 6-3: ERREICHBARKEITSANALYSE UND UMGESETZTE OPTIMIERUNGSMABNAHME (FOTOGRAFIEAUFNAHMEN: BMW GROUP)	155
ABBILDUNG 6-4: ZUGÄNGLICHKEITS- UND AUSBAUANALYSE EINES TÜRSCHLOSSES	155
ABBILDUNG 6-5: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON PEP UND KOSTEN [23]: REAKTIVE (A) VS. PRO-AKTIVE (B) VORGEHENSWEISE AM BEISPIEL ERGONOMISCHER ERKENNTNISS	156

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: EIGENSCHAFTEN UND FUNKTIONALITÄTEN DER 3-D-MENSCHMODELLE IM ÜBERBLICK [6][83][104][109][110].....	18
TABELLE 3-1: FORM EINER BENUTZERKLASSIFIKATION [54][60].....	31
TABELLE 5-1: AUSZUG AUS EINER FIKTIVEN BAULISTE	71
TABELLE 5-2: AUSZUG AUS EINER FIKTIVEN BAULISTE MIT DER ZUSÄTZLICHEN ANGABE VON EINSTELLUNGSWERTE DER EINZELNEN BESTANDTEILE MIT AUSNAHME DES WERKZEUGES	90
TABELLE 5-3: PRIORISIERUNG DER OPTIMIERUNGSMAßNAHMEN (RECHTE SPALTE), ERFÜLLT = ✓, TEILWEISE BZW. NICHT ERFÜLLT = Ø.....	136

Abkürzungsverzeichnis

ABA	=	Anforderungs- und Belastungsanalyse
AR	=	Augmented Reality
CAX-Methoden	=	Computer Aided Methoden
CAD	=	Computer Aided Design
CW	=	Cognitive Walkthrough
DIN	=	Deutsches Institut für Normung
DMU	=	Digital Mock-Up
EDV	=	Elektronische Datenverarbeitung
HTML	=	HyperText Markup Language
JT	=	Jupiter Tessellation
KH	=	Körperhaltung
MCF	=	Mensch-Computer Funktionsteilung
MCI	=	Mensch-Computer-Interaktion
MCS	=	Mensch-Computer-System
MM	=	3-D-Menschmodell
MMS	=	Mensch-Maschine-System
MTM	=	Methods Time Measurement
NIOSH	=	National Institut of Occupation Safety and Health
OWAS	=	Ovako Working Posture Analysing System
PDM	=	Product-Data-Management
PEP	=	Produktentstehungsprozess
PMU	=	Physical Mock-Up
PP	=	Produktions-Prozess
PQM	=	Produkt-Qualitäts-Management
PRISMA	=	Produktdaten Informationssystem mit Archiv
RULA	=	Rapid Upper Limb Assessment
SAE	=	Society of Automotive Engineers
VR	=	Virtuelle Realität
XML	=	Extensible Markup Language

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Die produzierenden Unternehmen in der Automobilindustrie sind heutzutage zusehends durch die Nachfrage nach Fahrzeugen mit individuellen kundenspezifischen Lösungen geprägt. Dies führt zwangsläufig zu einer deutlichen Erhöhung der Modell- und Variantenvielfalt und damit gleichermaßen zu einer Steigerung der Komplexität von Produkt und Produktionssystem [70]. In einer sich stetig verändernden Gesellschaft mit zum Teil stark wachsenden und neuen Märkten werden die Fahrzeughersteller immer mehr zu einer laufenden Neu- und Weiterentwicklung von Technologien und Produktionsprozessen bei zugleich immer kürzer werdenden Innovations- und Produktlebenszyklen gezwungen [5][9][63].

Dieses Spannungsfeld und die Einhaltung restriktiver Kostenziele verbieten lange Anlauf- und Optimierungsphasen des Produktes und des Produktionssystems. Um im Produktionssystem einen steileren Produktionsanlauf [65][119] zu erreichen, ist dessen fehlerfreies Funktionieren von Beginn an notwendig [13]. Dies kann nur dann nachhaltig sichergestellt werden, wenn Probleme durch präventives Handeln (Fehlerverhütung statt Fehlerentdeckung) frühestmöglich im Produktentstehungsprozess (PEP) erkannt und bis zum Serienstart beseitigt werden, sodass das Produkt schnell zur Serienreife gebracht werden kann (s. Abbildung 1-1) [66].

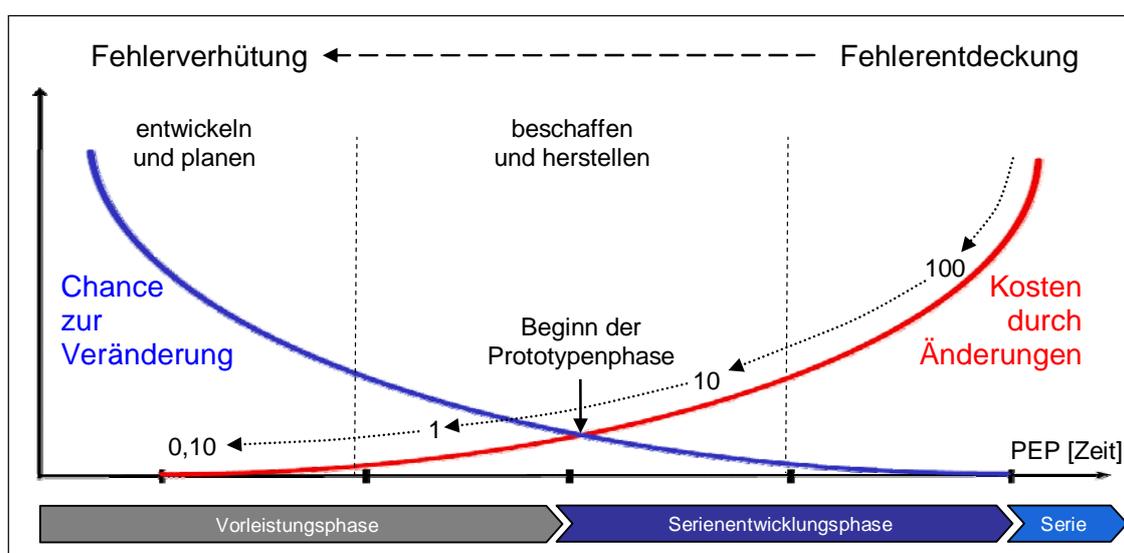


Abbildung 1-1: Chance zur Veränderung innerhalb des PEP und Zehnerregel der Fehlerkosten in Anlehnung an [66][92][106]

Eine effiziente Beeinflussbarkeit der Produkt- und Prozessqualität liegt demzufolge in der so genannten Vorleistungsphase, also noch vor der Prototypenphase vor. Dort sind die Chancen zur Veränderung am größten, während sie sich im Weiteren immens reduzieren. Frühzeitige Änderungen kommen auch den Änderungskosten zugute, da diese Kosten im Verlauf des PEP exponentiell steigen. Werden beispielsweise Mängel nicht in der Vorleistungsphase, sondern im ungünstigsten Fall erst durch den Kunden nach dem Serienanlauf entdeckt, sind die Kosten für die Beseitigung der Mängel um den Faktor 1000 höher [66].

In diesem Zusammenhang nimmt der frühzeitige Absicherungsprozess, der als Ergebnis ein serientaugliches Gesamtfahrzeug hervorbringen soll, zunehmend eine wichtige Position ein. Besonders die Untersuchungen manueller Montagevorgänge werden infolge der angesprochenen Zunahme von Innovationen im Fahrzeug und daraus resultierender engerer und deutlich erschwerter Montageverhältnisse bei nahezu gleich bleibendem Bauraum immer häufiger notwendig (s. Abbildung 1-2).



Abbildung 1-2: Entwicklung der Bauraumdichte im Motorraum im Laufe der Zeit. Links: BMW 320-326 (dreißiger Jahre). Rechts: BMW 3er (Modelljahr 2009) [11]

Diese Untersuchungen finden derzeit meistens im späteren Verlauf des PEP an realen Prototypen oder Teilaufbauten des Fahrzeuges statt. Um jedoch kostenintensive Änderungsmaßnahmen zur Beseitigung von eventuell erst dort aufgespürten Fehlern zu vermeiden, ist die Verlagerung solcher Untersuchungen in eine frühere Phase des PEP unabdingbar. Vor diesem Hintergrund nimmt die Bedeutung von Simulationsverfahren weiter zu [68][101]. Diese so genannten CAx-Methoden (CA steht für Computer Aided, d.h. rechnerunterstützt; der Buchstabe x ist ein Platzhalter für unterschiedliche Buchstaben, wie beispielsweise CAD für Computer Aided Design) reichen von einer einfachen Visualisierung des geplanten Fahrzeuges bis hin zu komplexen Ein- und Ausbauuntersuchungen von Bauteilen. Sie ermöglichen

es, Planungsentwürfe vor ihrer Realisierung auf ihre Leistungsfähigkeit hin zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren [70].

Um darüber hinaus aussagekräftigere Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ergonomischer Gesichtspunkte der Fahrzeugmontage wie Zugänglichkeit, Erreichbarkeit und Einsehbarkeit erzielen zu können, bietet sich hierbei die Verwendung digitaler dreidimensionaler Menschmodelle an [86]. Anhand dieser Modelle können unter anderem Bandarbeitsplätze im Sinne einer pro-aktiven Vorgehensweise (s. Anhang C, Abbildung 6-5) rechtzeitig analysiert sowie ergonomisch und altersgerecht ausgelegt werden. Letzteres wird in Folge des demografischen Wandels und der Verschiebung der Altersstruktur (s. Abbildung 1-3) zunehmend wichtiger für das Wohlbefinden und die Motivation der Mitarbeiter. Denn nicht zuletzt ist es ein wichtiges Erfolgskapital eines Unternehmens, dass die Produktivität der Mitarbeiter möglichst hoch ist und diese wiederum stark in Abhängigkeit zur Arbeitsmotivation steht sowie deutlich von den herrschenden Arbeitsbedingungen beeinflusst wird.



Abbildung 1-3: Demographischer Wandel in Deutschland. Altersaufbau 2009 und Prognose für 2040: Verschiebung der Alterstruktur [116]

In der nachfolgenden Abbildung 1-4 sind die oben genannten Einflussfaktoren auf die Fahrzeugindustrie mit ihren Auswirkungen zusammengefasst, durch die der virtuellen

Absicherung manueller Montagevorgänge mittels digitalem 3-D-Menschmodell größte Bedeutung zukommt.

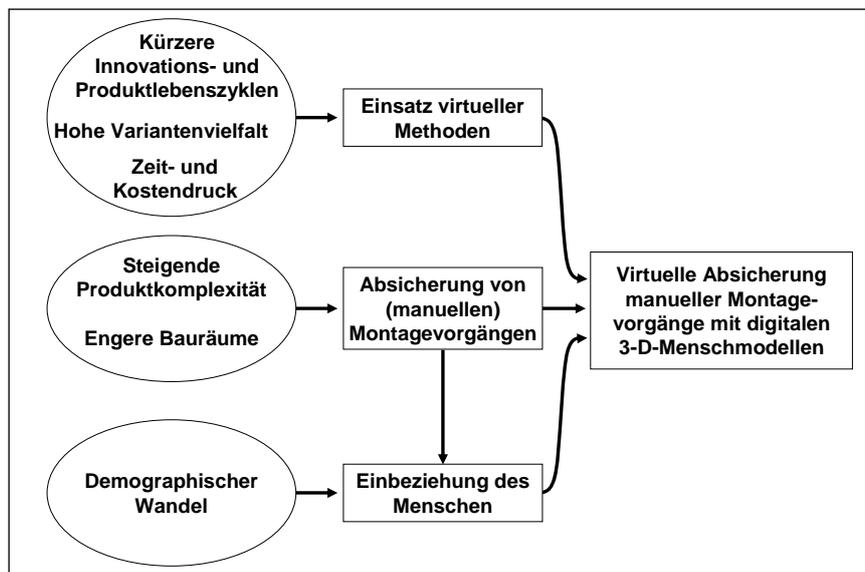


Abbildung 1-4: Einflussfaktoren auf die Fahrzeugindustrie und ihre Auswirkungen

1.2 Problemstellung

Die zusätzliche Verwendung digitaler 3-D-Menschmodelle erhöht im Vergleich zu anderen Methoden (s. Abschnitt 2.3.2) die Aussagequalität bei der virtuellen Absicherung von manuellen Fahrzeugmontagevorgängen, bringt allerdings insbesondere folgende Probleme mit sich:

- Zum einen stellt sich die Frage, wie genau die anthropometrische Gestaltung des 3-D-Menschmodells ist, d.h. welche Daten über Maße und Proportionen des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und Akzeleration (durchschnittliche Zunahme der Körpermaße mit der Bevölkerungsentwicklung) zur Verfügung stehen, und wie realistisch die Bewegungsmöglichkeiten des 3-D-Menschmodells sind. Mit dieser Problematik haben sich in der Vergangenheit bereits mehrere Autoren ausführlich im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten und Beiträgen beschäftigt (vgl. [3][46][47][78][109][110][118][129]). Aus diesem Grunde soll darauf in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.
- Zum anderen spielt die Handhabung des 3-D-Menschmodells und somit die Interaktion des Benutzers mit der Bedienoberfläche des dazu herangezogenen Computerprogrammes und gleichermaßen die Bedienungsabläufe eine

wesentliche Rolle. Hier besteht das Problem, dass die Ein- und Ausbausimulationen mit digitalen 3-D-Menschmodellen zurzeit sowohl bei der Aufbereitung der Szenarien als auch bei der Durchführung der Montagesimulationen mit einem hohen Aufwand verbunden sind [44][70][97][124]. Zudem werden bei identischen Absicherungsaufgaben unterschiedliche Untersuchungsergebnisse verschiedener Benutzer und auch zeitlich getrennter Untersuchungen ein und desselben Benutzers festgestellt [69].

Die aufgeführten Aspekte beeinflussen die Akzeptanz dieser Programme beachtlich und wirken sich negativ auf den Einsatz dieser Art von virtuellen Methoden aus.

1.3 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten, die den Programmbenutzer (in diesem Fall den Montageabsicherer) bei der virtuellen Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitaler 3-D-Menschmodelle sowohl in der frühen als auch in darauf folgenden Phasen des Entwicklungsprozesses optimal unterstützen. Dazu werden unter Berücksichtigung softwareergonomischer Grundsätze vorherrschende Schwachstellen im dafür derzeit notwendigen Handlungsprozess (IST-Prozess) gesucht. Der Aufwand bei der Szenarioaufbereitung und Simulationsdurchführung soll durch die Optimierungsmaßnahmen verringert sowie die Handhabung des 3-D-Menschmodells und die Bedienbarkeit der Simulationssoftware optimiert werden.

Insgesamt ergibt sich daraus die Forderung, dem Benutzer eine benutzerfreundliche und aufgabenorientierte Gestaltung der Bedienoberfläche und der zu Grunde liegenden Programmfunktionalitäten anzubieten. Damit soll er von weitgehend EDV-spezifischen Tätigkeiten befreit werden, um sich auf die Primäraufgabe, nämlich die der Absicherung des Gesamtfahrzeuges, konzentrieren zu können. Das Resultat ist eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis, die durch eine geringere, aber trotzdem reifere Prototypenzahl und eine frühzeitige Montageprozessoptimierung entsteht.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 wird eine Eingrenzung der Thematik vorgenommen. Hier wird die unternehmensinterne Abteilung „Technologie Gesamtfahrzeug“, in der diese

Dissertation entstanden ist, mit ihrer Hauptaufgabe, der Absicherung des serientauglichen Gesamtfahrzeuges, und den dazu verwendeten Methoden vorgestellt. Ferner wird in diesem Kapitel der Stand der Technik der Simulation mit digitalem 3-D-Menschmodell dargestellt.

Im anschließenden Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion behandelt. Auf dessen Basis wird dann im darauf folgenden Kapitel 4 das in dieser Arbeit betrachtete Mensch-Computer-System im Detail beschrieben. Kapitel 3 und 4 bilden das Fundament zur Evaluation des derzeitigen Handlungsprozesses zur Montagesimulation mit 3-D-Menschmodellen. Diese Evaluation findet in Kapitel 5 statt und beinhaltet die Formulierung von Anforderungen an die Montagesimulation mit 3-D-Menschmodellen, die SOLL-IST-Gegenüberstellung des Handlungsprozesses in Bezug auf Schwachstellen sowie die Vorstellung und Priorisierung von Lösungsansätzen zur Optimierung des IST-Prozesses.

Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf zukünftige Aktivitäten und Entwicklungen (Kapitel 6).

In Abbildung 1-5 ist eine schematische Darstellung des Aufbaus dieser Arbeit zu finden.

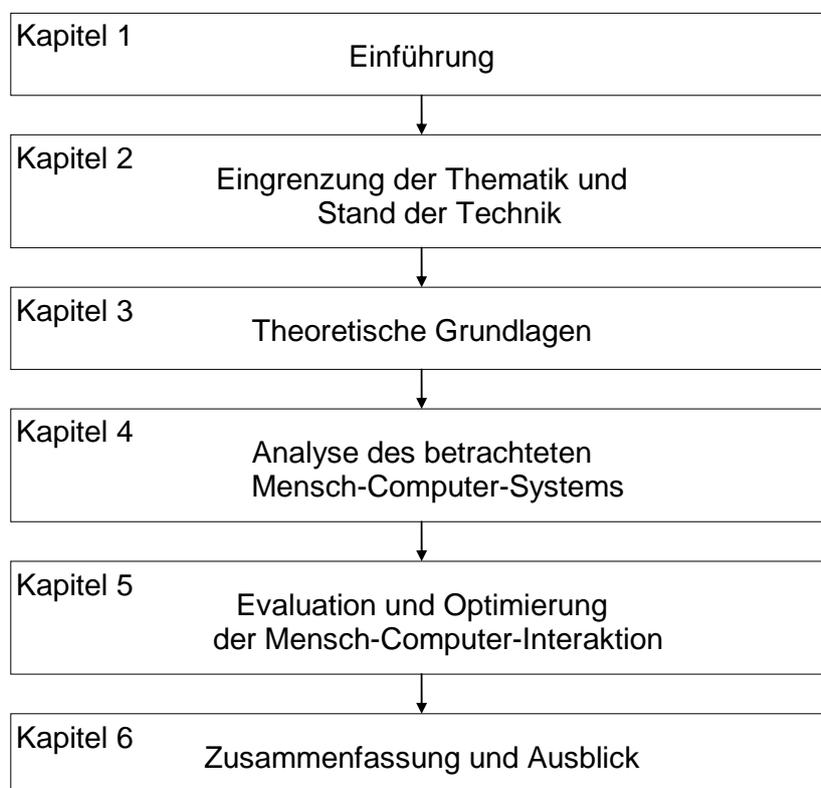


Abbildung 1-5: Aufbau der Arbeit

2 Eingrenzung der Thematik und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird die unternehmensinterne Abteilung (in der BMW Group die Abteilung „Technologie Gesamtfahrzeug“) vorgestellt, die sich um die Produkt- und Prozessabsicherung des Gesamtfahrzeuges beschäftigt. Es werden ihre konkreten Aufgaben und Ziele näher gebracht und die für deren Erledigung zur Verfügung stehenden Verfahren erläutert. Hierin wird der Fokus auf das spezielle Verfahren gelegt, welches in der folgenden Arbeit analysiert wird. Abschließend befasst sich dieses Kapitel mit dem Stand der Technik der Systemlösungen, die dieses Verfahren unterstützen.

2.1 Produkt- und Prozessabsicherung des Gesamtfahrzeuges

Die Abteilung „Technologie Gesamtfahrzeug“ übernimmt als Teil des Produktionsbereiches zum einen im Unternehmen die bereichsübergreifende Brückenfunktion zwischen den Fachbereichen der Technischen Entwicklung und der Serienproduktion und zum anderen die Verbindung von der Serienproduktion zum Kunden. Sie stellt damit eine der wichtigsten Kommunikationsplattformen in der Produktentstehung dar (s. Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Brückenfunktion zwischen Entwicklung (links), Serienproduktion (Mitte) und dem Kunden (rechts) [12]

Insbesondere verantwortet sie den Bau von erprobungstauglichen Versuchsfahrzeugen, liefert dem Produktionsnetzwerk serientaugliche Gesamtfahrzeuge und garantiert ihre Kundentauglichkeit über den gesamten Lebenszyklus [12].

2.2 Aufgaben und Ziele der Produkt- und Prozessabsicherung

Bei der Absicherung des serientauglichen Gesamtfahrzeuges werden sowohl die Funktion des Produktes als auch dessen Herstellbarkeit innerhalb des geplanten Produktionsumfeldes sichergestellt. Dabei gilt es, während des Entwicklungsprozesses und darüber hinaus Fragestellungen hinsichtlich geometrischer, funktionaler und prozesstechnischer Integration im Fahrzeugprojekt zu klären.

Im Rahmen der *geometrischen Integration* werden die statische Lage aller Komponenten im Fahrzeug und die ergonomische Erreichbarkeit aller Schalter sowie Bedienelemente abgesichert. Zusätzlich wird die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften kontrolliert.

Bei der *funktionalen Integration* werden die funktionalen Produkteigenschaften eines Fahrzeuges abgesichert, und es werden bestimmte Ziele wie z.B. Fahreigenschaften und Gewicht sichergestellt.

Die *prozesstechnische Integration* lässt sich in drei Kategorien untergliedern:

- Absicherung der Montage in der geplanten Verbaureihenfolge
- Freiraumüberprüfung
- Servicemontagezugänglichkeit (Demontage / Nacharbeit)

Die Aufgabe der Montage ist es, aus Teilen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden, ein Produkt höherer Komplexität mit vorgegebener Funktion in einer bestimmten Zeit zusammenzubauen [103]. Die Absicherung der Montage in der geplanten Verbaureihenfolge untersucht Schritt für Schritt die Montierbarkeit der Fahrzeuge im Produktionsprozess (PP). Dabei wird nicht nur die Montierbarkeit der Bauteile und Bauteilgruppen betrachtet, sondern auch die Zugänglichkeit von evtl. nötigen Werkzeugen sowie der Raumbedarf der Montagemitarbeiter (Fügefreiraum). In der Freiraumüberprüfung wird die Anordnung der Bauteile entsprechend ihres dynamischen Verhaltens untersucht, d.h. beispielsweise ob ein Rad kollisionsfrei einfedern kann. Bei der Überprüfung der Servicemontagezugänglichkeit werden Reparatur- und Servicearbeiten hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit abgesichert.

Zusammenfassend betrachtet ist das Ziel bei all diesen Aufgaben, Probleme im Vorhinein aufzudecken und frühzeitig Korrekturmaßnahmen einzuleiten, d.h. Fehler-

prävention (Fehlerverhütung) statt Fehlerbeseitigung (Fehlerentdeckung) (s. Abbildung 2-2 und Abschnitt 1.1, Abbildung 1-1).

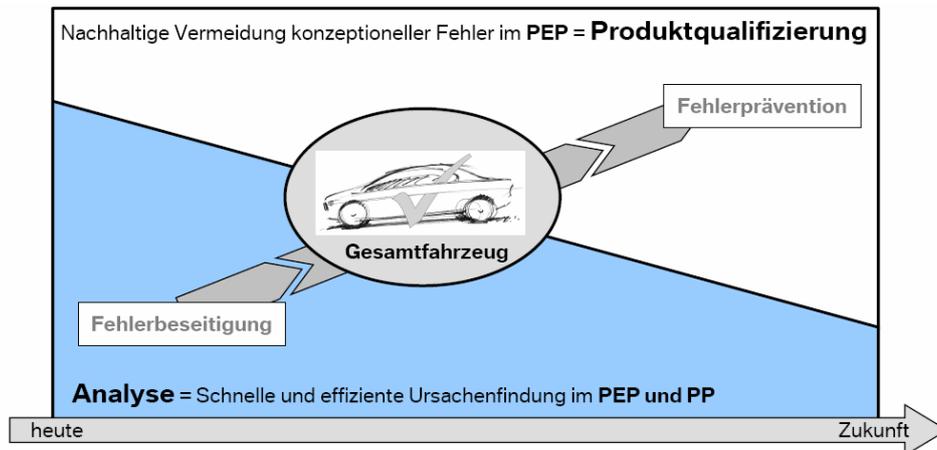


Abbildung 2-2: Ziel der Produkt- und Prozessabsicherung bei der BMW Group [12]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Absicherung der Montage, konkret mit der Absicherung manueller Montagevorgänge. Im Folgenden werden deshalb die zur Bewältigung dieser Aufgabe zur Verfügung stehenden Verfahren beschrieben.

2.3 Verfahren zur Absicherung der manuellen Montage

Derzeit gibt es zwei Möglichkeiten zur Absicherung der manuellen Montage:

- Hardware-Absicherung (Absicherung am physikalischen Prototypen oder Physical Mock-Up (PMU)) (s. Abbildung 2-3, links) und
- virtuelle Absicherung (Absicherung am digitalen Prototypen oder Digital Mock-Up (DMU)) (s. Abbildung 2-3, rechts).

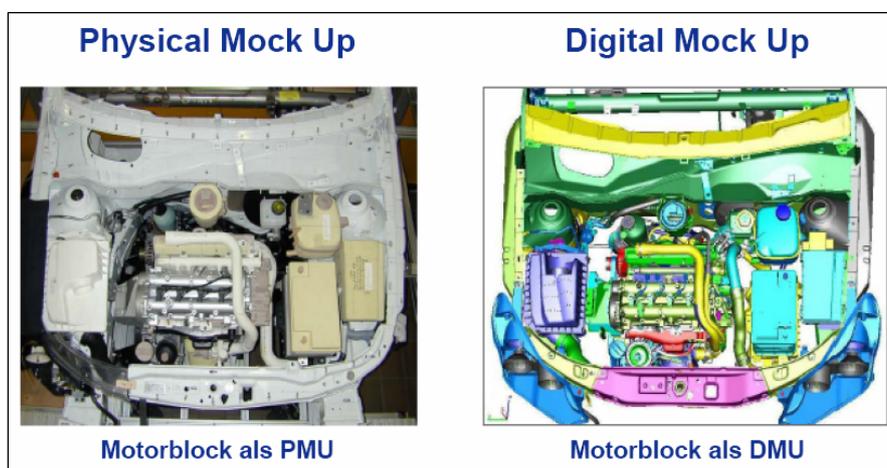


Abbildung 2-3: Gegenüberstellung PMU / DMU [36]

Trotz permanenter Weiterentwicklung der Werkzeuge zur virtuellen Absicherung, lassen sich noch nicht alle angesprochenen Aufgaben (s. Abschnitt 2.2) ausschließlich am Rechner absichern, sondern werden weiterhin an physikalischen Prototypen gelöst.

2.3.1 Hardware-Absicherung

Sowohl in der Automobilindustrie wie auch in der Luftfahrt- und Maschinenbauindustrie ist es seit langer Zeit gängige Praxis, physikalische Modelle (Prototypen) zu erstellen. Die Ausprägung der Modelle hängt stark vom gewünschten Untersuchungszweck ab, z.B. Konzeptfahrzeuge, Komponenten- und Aggregateträger, Crashfahrzeuge, Teilaufbauten aus Laminat oder Musterbauteile aus Rapid Prototyping-Verfahren (Verfahren zur schnellen Herstellung von Musterbauteilen). Die Modelle dienen unter anderem der Erprobung der fahrdynamischen Eigenschaften, der Überprüfung des Crash-Verhaltens und der Bestätigung des Fertigungs- und Montageprozesses.

Im Prototypenbau erkannte Problempunkte der manuellen Montage werden in einem Problemlösungsprozess bearbeitet. Die Herstellung der Prototypen und die anschließende Testphase sind jedoch sehr zeitintensiv und mit hohen Kosten verbunden. In der frühen Entwicklungsphase eines Fahrzeuges kann der Aufbau eines Prototypen zwischen 6 und 12 Wochen dauern [49]. Die in der Testphase erzielten Ergebnisse wirken sich deshalb erst im späteren Verlauf der Entwicklungsphase auf den Konstruktionsprozess aus. Des Weiteren werden während der Aufbauzeit gleichzeitig konstruktive Änderungen vorgenommen, was zur Folge hat, dass der Prototyp bei seiner Fertigstellung schon nicht mehr dem aktuellen Entwicklungsstand entspricht. Durch Anwendung virtueller Methoden, die auf die aktuellen Entwicklungsdaten zugreifen, werden diese Problematiken teilweise umgangen, sodass auf einzelne physikalische Modelle verzichtet werden kann.

2.3.2 Virtuelle Absicherung

Im Gegensatz zur Hardware-Absicherung werden im Rahmen der virtuellen Absicherung Eigenschaften und Verhaltensweisen des zu analysierenden Produktes sowie seines Fertigungsprozesses anhand von CAx-Methoden nachgebildet [123]. Dafür werden digitale Versuchsmodelle benötigt, die die Geometrie- und Materialinformationen des Produktes und der Fertigungsanlagen repräsentieren. Diese digitalen

Prototypen stellen somit „die wirklichkeitsgetreue Beschreibung eines Produktes im Rechner dar. Sie bestehen aus Dokumenten, Attributen und Strukturen (kurz CAD-Daten) und sind damit eine auf ein bestimmtes Endprodukt (z.B. Fahrzeug) bezogene, abgegrenzte Datenmenge“ [37].

Digital Mock-Up trägt dazu bei, Erkenntnisse über die Serientauglichkeit des Produktes in einer sehr frühen Entwicklungsphase zu erhalten und erhöht somit die Qualität und die Reife von physikalischen Prototypen. Im Idealfall bestätigen dann die physikalischen lediglich die Erkenntnisse aus den digitalen Prototypen.

Die virtuelle Absicherung lässt sich in Abhängigkeit des Bedarfs, der Darstellungsart der Daten und der Nutzerinteraktionsmöglichkeiten in mehrere Computer unterstützte Methoden unterteilen. Die zur Absicherung der manuellen Montage derzeit eingesetzten Methoden sind in den nachfolgenden Abschnitten einzeln beschrieben.

2.3.2.1 Einfache Visualisierung

Hierbei werden die notwendigen digitalen dreidimensionalen CAD-Daten des Produktes auf einer 2-D-Grafikdarstellungsoberfläche (z.B. Bildschirm) abgebildet (s. Abbildung 2-4, A). Die zu erledigende Untersuchung, z.B. die Prüfung des Bauraums, wird durch Betrachten des Bauraums aus verschiedenen Blickwinkeln mit zusätzlichen Abstandsmessungen durchgeführt. Diese Methode stellt die klassische Anwendung des DMU dar.

2.3.2.2 Ein-/ Ausbausimulation von Bauteilen

Dies ist eine der gängigsten Methoden. Die Vorgehensweise entspricht der der einfachen Visualisierung. Allerdings werden hier ergänzende Funktionalitäten herangezogen, mit denen man manuell und falls vorhanden, automatisch kollisionsfreie Ein- und Ausbaupfade von Bauteilen berechnen und visualisieren lassen kann (s. Abbildung 2-4, B). Sind keine kollisionsfreien Ein- und Ausbaupfade vorhanden, werden die Engstellen farblich aufgezeigt.

2.3.2.3 Ein-/ Ausbausimulation von Bauteilen mit digitalem 3-D-Menschmodell

Hier wird zusätzlich ein digitales 3-D-Menschmodell in das Untersuchungsszenario eingefügt, anhand dessen z.B. die Zugänglichkeit oder Erreichbarkeit einer Montage-

stelle plastischer nachgebildet werden kann. Somit ist eine genauere und objektivere Prüfung mit aussagekräftigeren Ergebnissen möglich (s. Abbildung 2-4, C).

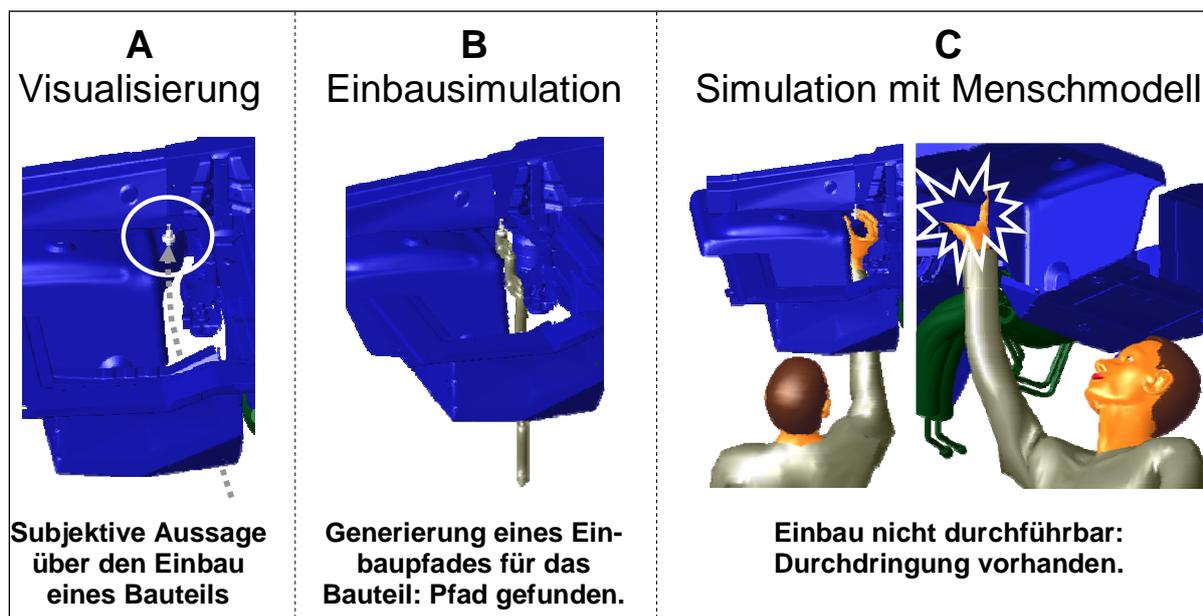


Abbildung 2-4: Vergleich ausgewählter virtueller Techniken

2.3.2.4 Virtuelle Realität (VR)

Eine „Virtuelle Realität“ ist darauf ausgerichtet, durch eine „immersive“, multisensorische Erfahrung den Eindruck zu schaffen, in einer „künstlichen Welt“ integriert zu sein. Um diese synthetische Umgebung zu erzeugen, wandeln leistungsstarke Computer enorme Datenmengen in räumliche Bilder um. In Abhängigkeit vom Blickwinkel und der Position des Betrachters werden in Echtzeit bewegte Bilder auf bis zu sechs Wände projiziert und über eine Spezialbrille der räumliche Eindruck einer virtuellen Umgebung vermittelt. Beim Betrachter werden so sensorische Empfindungen hervorgerufen. In der virtuellen Umgebung kann sich der Anwender frei bewegen, mit ihr interagieren und sie letztlich auch umgestalten [49][82][85][91][102][130].

2.3.2.5 Augmented Reality (AR)

In der Augmented Reality bzw. „erweiterten Realität“ werden virtuelle Informationen mit der Realität in Echtzeit überlagert. Dem Benutzer werden kontextabhängige Informationen – abgeleitet vom betrachteten Objekt – über eine spezielle Brille in sein Sichtfeld am richtigen geometrischen Ort eingeblendet. Dies können sowohl Instruktionen zur Reparatur, als auch die Darstellung virtueller Geometriedaten sein. Die Überlagerung virtueller Geometriedaten neuer Fahrzeugkonzepte mit bereits

bestehenden Hardwareaufbauten eines Vorgängermodells bietet eine gute Vergleichsmöglichkeit bei der Simulationserstellung. Somit ermöglicht diese Technologie z.B. die Prüfung des geeigneten Verbauortes eines in der Realität noch nicht vorhandenen Bauteils [91][102].

2.3.3 Vorteile der virtuellen Absicherung gegenüber der Hardware-Absicherung

Die wesentlichen Vorteile der virtuellen Untersuchungsverfahren gegenüber der Hardware-Untersuchung sind im Folgenden aufgeführt:

- Sehr frühe Untersuchungsmöglichkeit, ohne eine Hardware zu benötigen
- Optimierung des Produktes sowie des Prozesses in iterativen Schleifen, bevor ein Prototyp gebaut wird
- Grundlage der Untersuchungen auf dem aktuellsten Entwicklungs- und Konstruktionsstand
- Reduzierung des kostenintensiven Prototypenbaus auf ein Minimum
- Herstellungskosten, die infolge zu spät gefundener Fehler entstehen, werden vermieden und kostenintensive Nachbesserungen minimiert.

Um die kosten- und zeitintensiven Hardwareaufbauten auf ein Minimum zu reduzieren, ist es sinnvoll Methoden der virtuellen Absicherung verstärkt einzusetzen und weiter zu entwickeln. Zudem ergibt sich insgesamt eine Verkürzung der Entwicklungszeit.

2.3.4 Fokus der Arbeit

In dieser Arbeit wird speziell das Verfahren mit digitalem 3-D-Menschmodell betrachtet (s. Abschnitt 2.3.2.3). Sie befasst sich mit der software-ergonomischen Evaluation und Optimierung des derzeit notwendigen Handlungsprozesses zur Erstellung von Simulationen manueller Montagevorgänge mittels digitalem 3-D-Menschmodell (s. Kapitel 5). Im Folgenden werden die für das angesprochene Montageabsicherungsverfahren derzeit auf dem Markt verfügbaren 3-D-Menschmodelle und CAD-Systeme näher beschrieben.

2.4 Stand der Technik

Digitale 3-D-Menschmodelle finden heute weit verbreitet Anwendung und stellen ein immer wichtigeres Hilfsmittel sowohl bei Design und Entwicklung zukünftiger Produkte als auch bei Planung und Gestaltung neuer Arbeitssysteme dar. Dies gilt besonders für die Flugzeug- und Automobilindustrie. Jedoch werden diese virtuellen Menschmodelle zunehmend auch in anderen Bereichen eingesetzt, wie z.B. in der Medizin [111], beim Militär [105] sowie in der Luft- und Raumfahrt [108].

Eine Übersicht über verschiedene Einsatzbereiche digitaler 3-D-Menschmodelle zeigt Abbildung 2-5.

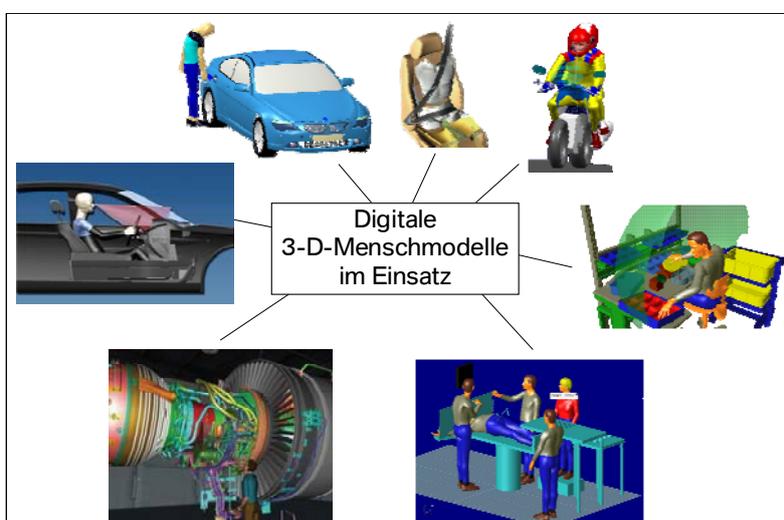


Abbildung 2-5: Digitale 3-D-Menschmodelle in verschiedenen Einsatzbereichen [38][56][87][113]. V.l.n.r. im Uhrzeigersinn: Automobilentwicklung, Motorradentwicklung, Arbeitsplatzgestaltung, Operationsraum und Flugzeugbranche.

2.4.1 Digitale 3-D-Menschmodelle zur virtuellen Absicherung manueller Montagevorgänge

Zur computergestützten Modellierung und Analyse dreidimensionaler menschlicher Körperhaltungen und Bewegungsabläufe in der Fahrzeugproduktion werden von der Industrie aus der Auswahl zahlreicher angebotener virtueller 3-D-Menschmodelle im Wesentlichen die Produkte „Human Builder“ (SAFEWORK) [104], „Jack“ [6] und „RAMSIS“ [109] verwendet [83][110]. Der Funktionsumfang und Aufbau dieser drei Modelle ist weitestgehend gleich. Deshalb werden im Folgenden zunächst Aufbau und grundlegende Funktionalitäten der drei betrachteten Modelle vorgestellt. Daraufhin werden die Modelle im Einzelnen hinsichtlich ihrer Entwicklung, ihres Aufbaues und ihren spezifischen Funktionalitäten kurz beschrieben.

2.4.1.1 Aufbau und grundlegende Funktionalitäten der betrachteten Modelle

Die hier betrachteten 3-D-Menschmodelle basieren auf hochexakten, statistisch validierten Körperdaten (so genannten anthropometrischen Daten), parametrisiert nach ethnischer Zugehörigkeit oder speziellen Kundendaten. Weiterhin unterscheiden diese 3-D-Menschmodelle ein inneres Modell, das dem menschlichen Skelett entspricht, von einem äußeren Modell, mit dem die Hautoberfläche anhand eines an verschiedenen Stellen mit dem Skelett verbundenen Hautlinienmodells nachgebildet wird. Über dieses Hautlinienmodell wird eine virtuelle, bei Bewegungen kontinuierlich neu berechnete Haut gelegt. Daraus ergibt sich das Volumenmodell, aus dem zu Präsentationszwecken ein Präsentationsmodell aufbereitet werden kann (s. Abschnitt 2.4.1.4, Abbildung 2-8).

Die 3-D-Menschmodelle bieten eine exakte Gelenknachbildung und berücksichtigen während der Bewegung festgelegte Einschränkungen. Die Körperhaltung kann mittels empirischer Modelle, inverser Kinematik [48][59] oder durch direkte Einstellung einzelner Gelenke manipuliert werden. Im Gegensatz zum wirklichen Bewegungsablauf, wie z.B. beim Heben eines menschlichen Armes, bei dem die Bewegungskette (Kinematik) erst von der Schulter zum Oberarm, dann zum Unterarm und schließlich zur Hand verläuft (auch Vorwärtskinematik genannt), ist die Steuerung und Animation von 3-D-Menschmodellen einfacher und schneller von dem Ende einer Bewegungskette her zu kontrollieren, an dem sich alle anhängigen Teile ausrichten. Diese umgekehrte Bewegungssteuerung wird daher inverse Kinematik genannt und baut auf dem Prinzip der hierarchischen Verknüpfung einzelner Teile wie z.B. von Beinen oder Armen eines 3-D-Menschmodells auf. Die inverse Kinematik dient der natürlichen Gesamtbewegung des 3-D-Menschmodells bei Bewegung der Hände, Hüften oder Füße, während die direkte Kinematik zur Feinabstimmung einzelner Körpersegmente innerhalb ihrer Freiheitsgrade dient.

Alle drei Modelle sind als „Stand-Alone-Systeme“, d.h. Einzelanwendungen, bei dem die zu untersuchenden CAD-Daten via Standardschnittstellen eingespielt werden können, verfügbar und auch integriert in CAD- und Animationssystemen, wie z.B. „CATIA“, „DELMIA“ und „Process Simulate Human“, zu finden. Diese CAD-Programme werden in Abschnitt 2.4.2 näher beschrieben. Die Einzelanwendungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet, da der Fokus dieser Systeme nicht auf der Untersuchung manueller Montagevorgänge liegt.

2.4.1.2 Human Builder (SAFEWORK)

Das 3-D-Menschmodell „Human Builder“ (s. Abbildung 2-6), ursprünglich SAFEWORK, wurde von der Firma „SAFEWORK“ ab 1984 entwickelt und gehört heute zur Firma „Dassault Systemès“, wo es in einige Softwareprodukte u.a. für die Durchführung von ergonomischen Untersuchungen implementiert ist [94][104][115]. Die Möglichkeit dieses Modells zur Varianz der Figuren (mit diversen Abhängigkeiten wie z.B. Nationalitäten, Somatotypen, Akzeleration, usw.) ist im Vergleich zu den anderen Modellen begrenzt [83]. Auch eine Weiterentwicklung des Modells wird heute nicht verfolgt.

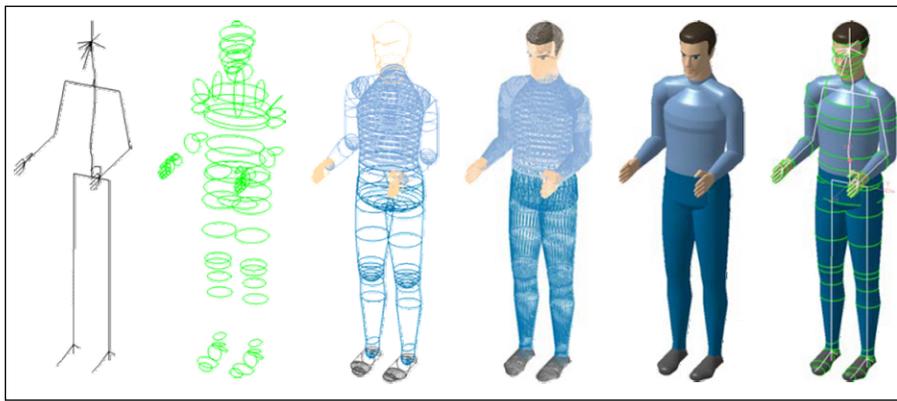


Abbildung 2-6: Das 3-D-Menschmodell Human Builder in verschiedenen Darstellungsformen [115]

2.4.1.3 Jack

Das „Jack“ Modellierungs- und Simulationsprogramm wurde in den 1980er und 1990er Jahren am „Center for Human Modeling and Simulation“ an der Universität von Pennsylvania für Ergonomiestudien der NASA Space Shuttle entwickelt und verwendet Körpermaße von anthropometrischen Datenbanken wie z.B. CAESAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource) [21]. Konzipiert als ein Produkt für die Durchführung von ergonomischen Untersuchungen des Produktdesigns [129] wurde das 3-D-Menschmodell auch bei der Simulation von Montage- und Wartungsarbeiten im US-Militär sowie in anderen staatlichen und gewerblichen Unternehmen eingesetzt. Inzwischen wird dieses 3-D-Menschmodell von der Firma „Siemens“ vermarktet [6].

Dieses 3-D-Menschmodell bietet eine einfache Programmierschnittstelle, anhand derer zusätzliche Funktionalitäten an die unternehmensspezifischen Bedürfnisse

angepasst werden können [24][81]. Abbildung 2-7 zeigt das 3-D-Menschmodell in sechs verschiedenen Mensch-Typologien.



Abbildung 2-7: Das 3-D-Menschmodell Jack – drei weibliche (links) und drei männliche (rechts) Mensch-Typologien [24]

2.4.1.4 RAMSIS

Das 3-D-Menschmodell „RAMSIS“ (Rechnergestütztes Anthropologisches Mathematisches System zur Insassensimulation) wurde in Zusammenarbeit der Firma „TecMath“, der TU München und Vertretern der deutschen Automobilindustrie und Sitzherstellern entwickelt [109]. Heute wird das ursprünglich in einer sitzenden Haltung befindliche Menschmodell RAMSIS von der Firma „Human Solutions“ vertrieben und weltweit in mehr als 70 % aller Automobilunternehmen eingesetzt [56]. Insgesamt besteht es aus 90 statistisch abgesicherten anthropometrischen Typen je Population (je Geschlecht 45 Typen) und berücksichtigt die Akzelerationsprognose (Zunahme der Körperhöhe von Generation zu Generation) [55].

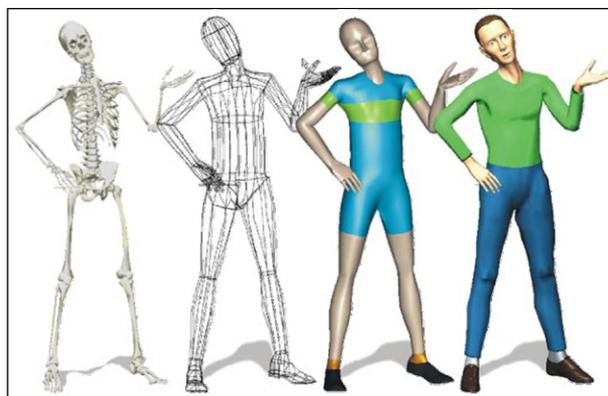


Abbildung 2-8: Das 3-D-Menschmodell RAMSIS – als Knochenmodell, als Hautlinienmodell, als Volumen- und Präsentationsmodell [55]

In Tabelle 2-1 sind die wesentlichen Eigenschaften und Funktionalitäten der beschriebenen 3-D-Menschmodelle tabellarisch zusammengefasst.

Eigenschaften / Funktionalitäten	Human Builder	Jack	RAMSIS
Anthropometrisch	x	x	x
Skelett, Haut, Geschlecht	x	x	x
Populationen	5	1	10
Alter	x		x
Proportionen			x
Perzentile	99 Perzentile	5 Perzentile	99 Perzentile
Positionierung über vordefinierte Haltungen, Gelenkwinkel oder inverse Kinematik mit exakter Gelenknachbildung	x	x	x
Akzeleration			x
Sichtbarkeit, Erreichbarkeit, Zugänglichkeit	x	x	x
Lastenhandhabung	x	x	x
Statische Haltungsanalyse	x	x	x
Ermüdungs-/ Erholungszeitanalyse	x	x	
Arbeitsumsatz		x	
Zeitanalysen nach MTM (Methods Time Measurement)	x	x	x
Komfortbewertungen	x	x	x
Kraftanalyse bzw. Maximalkräfte	x	x	x
Gurtverlauf			x
Spiegelsichtanalyse			x
VR-Kopplung	x		x
CAD-Systeme	CATIA, DELMIA	Process Simulate Human	Process Simulate Human, CATIA

Tabelle 2-1: Eigenschaften und Funktionalitäten der 3-D-Menschmodelle im Überblick [6][83][104][109][110]

2.4.2 CAD-Systeme mit integriertem 3-D-Menschmodell zur virtuellen Absicherung manueller Montagevorgänge

Für die Simulation von manuellen Montagevorgängen anhand von 3-D-Menschmodellen sind kommerziell im Wesentlichen drei CAD-Systeme verfügbar, die bei der bereits durchgeführten Vorstellung der 3-D-Menschmodelle angesprochen wurden: CATIA, DELMIA und Process Simulate Human. Analog zur Beschreibung der 3-D-Menschmodelle werden im Folgenden zunächst grundlegende Funktionalitäten der drei betrachteten CAD-Systeme vorgestellt. Daraufhin werden kurz spezifische Funktionalitäten der einzelnen Systeme beschrieben.

2.4.2.1 Grundlegende Funktionalitäten der betrachteten CAD-Systeme

In der folgenden Aufzählung sind die wichtigsten Merkmale aller betrachteten Anwendungen zusammengefasst:

- Ortsflexible Positionierung der 3-D-Menschmodelle
- Haltungsbibliothek
- Automatische Berechnung von Körperhaltungen zur Analyse von:
 - Kollisionsanalyse
 - Greifhaltung
 - Körperbalance
- Ergonomische Haltungsanalysen nach OWAS (Erfassungs- und Einstufungsmethode für Arbeitshaltungen) [117], RULA (Beurteilung der Haltung des oberen Körperbereiches) [80] oder NIOSH (Analysemöglichkeiten für das Anheben, Transportieren und Absenken von Gegenständen) [127]
- Analysemöglichkeit für Menschmodelle verschiedener Anthropometrien (Szenarioanalysen)
- Analyse des Blick- und Sehfeldes
- Erreichbarkeits- und Zugänglichkeitsstudien: Automatische Berechnung von Erreichbarkeitshüllkurven als Platzhalter
- Simulation menschlicher Bewegungen

2.4.2.2 CATIA

Die Firma Dassault Systèmes bietet mit CATIA in der Version 5 (kurz CATIA V5) eine Anwendung zur digitalen Produktentwicklung an und deckt hiermit ein breites Spektrum von branchenspezifischen Konstruktionsprozessen ab. Mittels der darin implementierten 3-D-Menschmodelle RAMSIS und Human Builder können in der CATIA V5-CAD-Produktentwicklungsumgebung zusätzlich ergonomische Analysen durchgeführt werden. Die bereitgestellten Werkzeuge ermöglichen die Definition ergonomischer Größen, die Festlegung von Geschlechts- und Zielgruppenangaben, Ergonomiemaniipulationen, Animationsdefinitionen und komplexe Perspektivensimulationen. Da der ursprüngliche Einsatzschwerpunkt von CATIA V5 allerdings im Bereich des

Produktdesigns und -packaging liegt und sich dabei die ergonomischen Untersuchungen auf Insassensimulation sowie Analyse und Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen beziehen [76] (s. Abbildung 2-9), sind die Funktionalitäten nicht auf Montage-simulation ausgelegt.

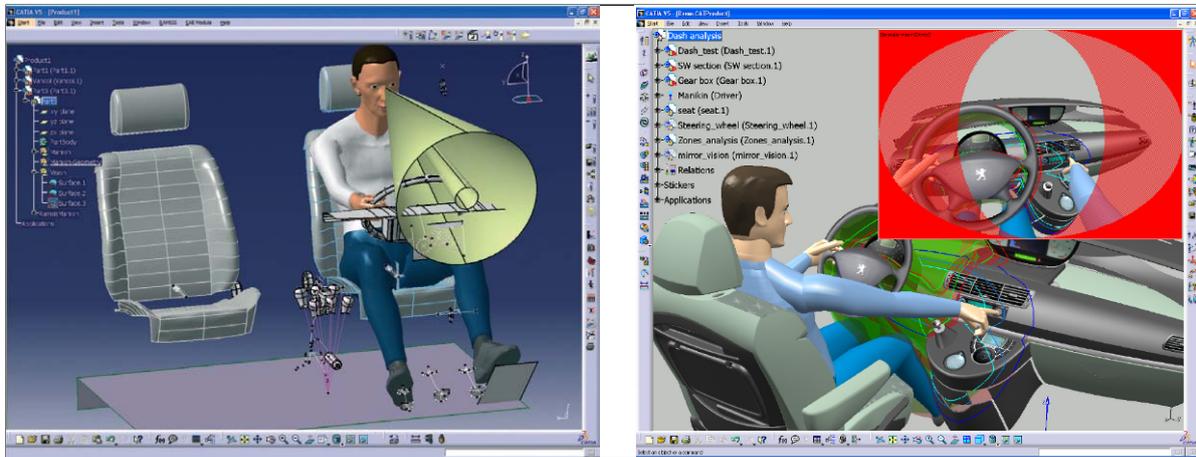


Abbildung 2-9: Fahrzeuginnenraumanalyse. Links: 3-D-Menschmodell RAMSIS [95]. Rechts: 3-D-Menschmodell Human Builder [94]

In der folgenden Aufzählung sind die spezifischen Merkmale dieser Anwendung zusammengefasst [56]:

- Automatische Berechnung einer realistischen Fahrerhaltung basierend auf umfangreichen Untersuchungen mit realen Personen
- Spezielle Haltungsmodelle für PKW, LKW, Rennwagen, Flugzeuge
- Integration von SAE-Standards (Society of Automotive Engineers-Standards)
- Spiegelsichtanalyse
- Berechnung der haltungsbedingten maximalen Betätigungskraft
- Berechnung von Gurtverläufen
- Kompatibilität mit 3-D-Bodyscanner zur Erzeugung individueller RAMSIS Menschmodelle.

Wird CATIA zur Konstruktion benutzt, können diese Daten direkt ohne zeitraubenden Import oder Export von Geometrien zur Untersuchungen von Montagevorgängen verwendet werden. Für die Durchführung von detaillierteren ergonomischen Untersuchungen und bei der Betrachtung und Auswertung von Bewegungsanalysen im Produktionsprozess bietet Dassault Systemès die Anwendung DELMIA an.

2.4.2.3 DELMIA

DELMIA dient der frühzeitigen virtuellen Gestaltung von Prozessen, Produktionsressourcen und Werkseinrichtungen. DELMIA V5 bietet innerhalb der Software „DELMIA Human Builder“ Funktionalitäten zur ergonomischen Beurteilung von manuellen Montagetätigkeiten sowie zur Gestaltung von Arbeitsplätzen in der Produktionsumgebung. Anhand des darin implementierten 3-D-Menschmodell Human Builder können Sachverhalte auf ergonomische Aspekte hin untersucht werden (s. Abbildung 2-10).

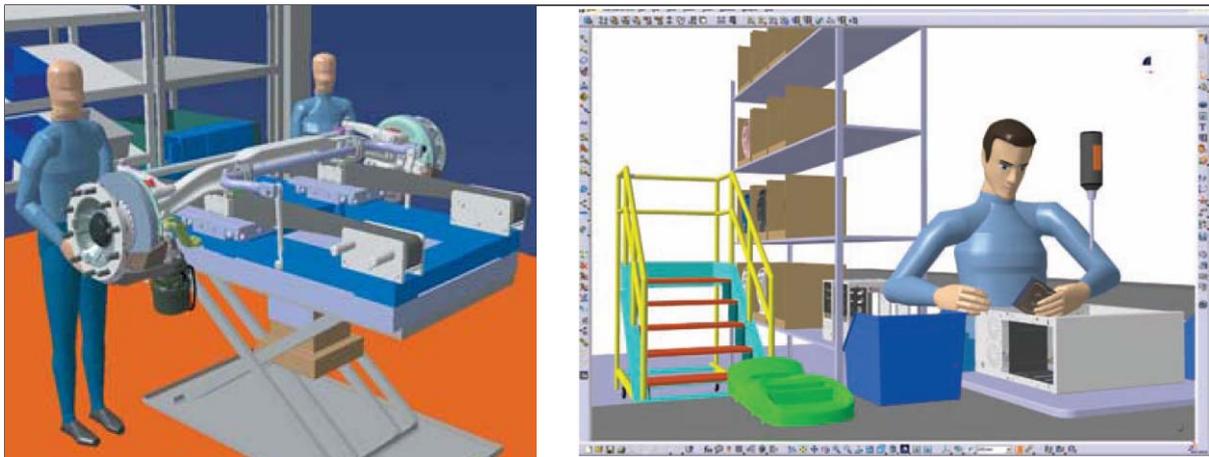


Abbildung 2-10: Simulationsszenarien bei der Arbeitsplatzanalyse [28][29]

Für die Simulation des 3-D-Menschmodells steht ein spezielles Modul zur Verfügung, die „DELMIA Human Task Simulation“. Es dient der Erstellung, Simulation, Analyse und Validierung der Tätigkeiten, die ein Arbeiter bei Fertigung, Installation, Betrieb oder Wartung von Produkten am Arbeitsplatz zu bewältigen hat. Bewegungen in der Fertigungsumgebung wie Laufwege, das Verändern der Körperhaltung, das Nachfolgen eines Bewegungspfad eines Objektes, oder das Aufnehmen und Ablegen eines Produktes im Arbeitsbereich können untersucht und beurteilt werden [27].

Hier sind die spezifischen Merkmale dieser Anwendung zusammengetragen [27][39]:

- Analyse des Energieaufwandes zur Beurteilung der Ermüdung
- Biomechanik für Arbeitsbelastungen
- Schiebe- und Ziehanalysen nach der Methode von SNOOK & CIRIELLO [114]
- Virtual Reality Funktionen
- Erstellung HTML-gestützter Berichte (HyperText Markup Language)

2.4.2.4 Process Simulate Human

Die Firma „Siemens PLM Software GmbH“ bietet mit der Software „Tecnomatix“ ein umfassendes Portfolio von „Digital Manufacturing“-Lösungen an, die Innovationen ermöglichen, indem sie alle Fertigungsbereiche mit der Produktentwicklung verbinden: Von der Prozessdefinition und -planung über die Simulation und Überprüfung in einer virtuellen 3-D-Umgebung bis zur tatsächlichen Fertigung. Damit können im Vorfeld Fertigungskonzepte über den gesamten Lebenszyklus von neuen Produkten virtuell überprüft werden. Diese Anwendung ist vollständig in das Teamcenter „Manufacturing Backbone“ von „Unigraphics Solutions GmbH“ (UGS) integriert. Dieser „Manufacturing Backbone“ verbindet die Daten der Produktentwicklung mit den Elementen des Fertigungsprozesses, den Informationen über die Fertigungsumgebung und den Ressourcen und kann Montageprozesse, manuelle Operationen, Schweißvorgänge, usw. in einer Umgebung betrachten [113].

Zur ergonomischen Konzeption eines Arbeitsplatzes und Überprüfung manueller Montagevorgänge wird das Modul „Process Simulate Human“ (früher „eM-Human“) herangezogen. Die Arbeitssequenz kann anhand eines der hier vollständig integrierten virtuellen 3-D-Menschmodelle (RAMSIS oder Jack) definiert, bewertet und optimiert werden. Dadurch kann bei der Planung von Fertigungsprozessen sichergestellt werden, ob die Produktkomponenten erreicht, montiert und gehalten werden können, so dass der Arbeitsplatz passend für die Anthropometrie der Arbeiter gestaltet wird [96][113]. Schwer zugängliche bzw. sehr beengte Arbeitsumgebungen, spezielle Haltungen des Werkers (z.B. Liegen, Knien, Beugen) und schlecht einsehbare Einbaubereiche können somit nach ergonomischen Gesichtspunkten analysiert und optimiert werden. Die Voraussetzung für solche Untersuchungen ist ein stehendes 3-D-Menschmodell. Deshalb wurde das ursprünglich in einer sitzenden Haltung befindliche Menschmodell RAMSIS hier zusätzlich modifiziert und in eine stehende Haltung gebracht.

Abbildung 2-11 zeigt ein Szenario in Process Simulate Human bei einer manuellen Montageuntersuchung im Fahrzeugheckbereich.

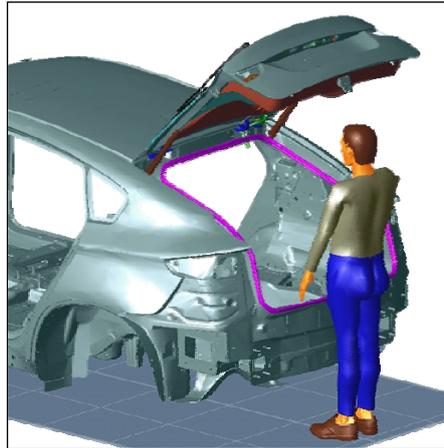


Abbildung 2-11: 3-D-Menschmodell RAMSIS in Process Simulate Human

Im Folgenden sind die spezifischen Merkmale dieses Programmes aufgelistet [40][93]:

- Assistent für automatisches Greifen
- Online-Visualisierung und Dokumentation von Ergebnissen
- Animation (Filmerstellung)
- Unterstützung des 3-D-Datenformats JT (Jupiter Tessellation)
- Erstellung von Berichten im Format XML [16].

3 Theoretische Grundlagen

Das Kernthema dieser Arbeit bildet die Evaluation und Optimierung der derzeit nötigen Mensch-Computer-Interaktion bei der virtuellen Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitalen 3-D-Menschmodellen (s. Kapitel 5). Dazu werden zunächst die in diesem Kontext grundlegenden Begrifflichkeiten erläutert. Daraufhin werden Kriterien und Richtlinien für die ergonomische Gestaltung der Software interaktiver Computersysteme (im Folgenden auch als interaktive Anwendungssysteme bezeichnet) dargelegt. Schließlich erfolgen die Vorstellung allgemein anerkannter Evaluationsverfahren zur software-ergonomischen Beurteilung dieser Systeme und eine nähere Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Verfahrens.

3.1 Definition grundlegender Begriffe

3.1.1 Ergonomie

Das Wort Ergonomie galt in der deutschen Fachsprache bis etwa 1980 vorwiegend als Synonym für Arbeitswissenschaft und setzt sich aus zwei griechischen Wörtern zusammen [41]:

- *ergon* = menschliche Arbeit, Werk
- *nomos* = Regel, Gesetz oder Ordnung [64]

Die Ergonomie als wissenschaftliche Disziplin erforscht die Beziehung zwischen dem Menschen und seiner Arbeit, Umgebung und Arbeitsmittel, insbesondere in Bezug auf die Vermeidung gesundheitlicher Schäden. Sie hat zum Ziel, Arbeitsaufgaben, -mittel und -bedingungen nach den ganzheitlichen Bedürfnissen und Eigenschaften des arbeitenden Menschen zu gestalten und zwar unter Einsatz von anatomischem, physiologischem und psychologischem Wissen. Durch gesündere, sicherere und produktivere Arbeitsplätze und Arbeitsabläufe soll somit die Belastung des arbeitenden Menschen auch prospektiv so gering wie möglich gehalten werden [72][84][126].

Bezogen auf die Analyse der Arbeit an interaktiven Computersystemen kann im Weiteren zwischen den drei Aspekten Hardware-Ergonomie, Organisations-Ergonomie und Software-Ergonomie differenziert werden [60]. Die *Hardware-Ergonomie* konzentriert sich auf eine benutzergerechte Gestaltung technischer

Geräte. Die *Organisations-Ergonomie* untersucht hingegen die Einbettung dieser Systeme in Organisationen. Schließlich fokussiert die *Software-Ergonomie*, grundsätzlich ein Spezialgebiet der Systemergonomie [42], die Beziehung zwischen dem interaktiven Computersystem und dem Benutzer [60]. Gerade unter dem zuletzt erwähnten Aspekt wird in dieser Arbeit der benötigte Handlungsprozess bei der Erledigung der vorgegebenen Aufgabe evaluiert. Darum soll nachfolgend der Begriff Software-Ergonomie inhaltlich vertieft werden.

3.1.2 Software-Ergonomie

Der Umgang mit Computern ist heute in vielen Bereichen unabdingbar geworden. Dabei wird die Arbeit an oder mit dialogorientierten Computersystemen wesentlich durch die Programme, d.h. die Software geprägt. Die Gestaltung der Benutzeroberfläche und die nötigen Bedienabläufe sollten sich demnach an den Aufgaben, Arbeitsweisen, Fähigkeiten und Nutzungssituationen des Systembenutzers orientieren [42]. Gerade dieses Ziel wird von der Software-Ergonomie verfolgt. Der konkrete Gegenstandsbereich dieses disziplinübergreifenden Wissenschaftszweiges der Arbeitswissenschaft ist die benutzerorientierte und aufgabenzentrierte Gestaltung der Mensch-Computer-Interaktion (MCI) [98][122]. Im Allgemeinen wird die MCI wie folgt definiert [60]:

„Unter Mensch-Computer-Interaktion wird der wechselseitige Nachrichtenaustausch zwischen dem Benutzer und dem interaktiven Anwendungssystem verstanden.“

Folglich beruht die MCI auf einer synergetischen Kombination aus Technik, Design und Ergonomie. Nur durch diese interdisziplinäre Kooperation können die Designvorstellungen und die benutzergerechte Gestaltung mit den technischen Rahmenbedingungen so zusammengeführt werden, dass ein funktionsfähiges, ästhetisch ansprechendes und gleichzeitig auch bedienbares Produkt entsteht [89]. Dafür werden die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Elementen „Aufgabe“, „Benutzer“ und „Computer“ unter Berücksichtigung organisatorischer Strukturen gestaltet und evaluiert. Sowohl die einzelnen Elemente als auch die Beziehungen, die untereinander herrschen, werden in Abschnitt 3.2.1 näher beleuchtet.

Ferner zielt die Software-Ergonomie nach BULLINGER [19] auf den „befriedigenden, effizienten und fehlertoleranten Umgang der Benutzer mit der Informationstechnolo-

gie“. Dies erfordert ein möglichst gebrauchstaugliches und intuitives System (s. Abschnitt 3.1.3 bzw. 3.1.4). Hierdurch soll eine hohe Akzeptanz rechnergestützter Arbeitsmittel beim Benutzer erreicht werden. Weitere Ziele sind eine erhöhte Motivation, Kreativität und Produktivität der Benutzer bei gleichzeitig geringeren Fehlerquoten und vermindertem Qualifizierungsaufwand. Es sollen effektive und effiziente Arbeitsergebnisse erzielt, ein großer Handlungsspielraum und große Handlungskompetenz für den Benutzer geschaffen werden [73]. Indirekte Wirkungen, wie etwa die erhöhte Motivation oder geringerer Stress, lassen sich nur schwer quantifizieren und nicht immer eindeutig auf die gesteigerte Benutzungsqualität einzelner Dialogsysteme zurückführen, müssen aber dennoch als ökonomischer Nutzen gewertet werden [2][60].

3.1.3 Gebrauchstauglichkeit

Mit der zunehmenden Bedeutung interaktiver Computersysteme rückt das Konzept der Gebrauchstauglichkeit (engl. „Usability“, auch „Benutzungsfreundlichkeit“, „Benutzerfreundlichkeit“ oder „Benutzbarkeit“ [88]) in das Rampenlicht softwareergonomischer Anforderungen [98]. Eine möglichst hohe Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Computersystems ist ein wichtiges Ziel beim Entwurf von Benutzungsschnittstellen. Dabei geht es darum, komplizierte Dinge auf einfache Art und Weise auszudrücken, mit dem Ziel, komplizierte Aufgabenstellungen durch Softwareentwicklungen einfacher und leichter zu lösen.

Nach der DIN EN ISO 9241-11 [31] ist die Gebrauchstauglichkeit eines Produktes

„das Ausmaß, in dem es von einem bestimmten Benutzer verwendet werden kann, um spezifizierte Ziele in einem bestimmten Nutzungskontext effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“.

Anders formuliert, die Gebrauchstauglichkeit steht für eine besonders einfache, zum Benutzer und seinen Aufgaben passende Bedienbarkeit einer Software, d.h. inwieweit das Computerprogramm geeignete Funktionalitäten für die Erledigung der Aufgabe ohne unnötige Interaktionen nachweist. Hat der Anwender früher eher auf die Funktionalität einer Software geachtet, so spielt heute die Qualität der Mensch-Computer-Interaktion eine immer wichtigere Rolle beim Einsatz von Software. Ein Benutzer, der von der Fülle an Funktionalitäten einer Software erschlagen wird, verliert jegliche Motivation, diese Software zu verwenden und wird in Zukunft versu-

chen, diese soweit wie möglich zu vermeiden. Deshalb ist besonders wichtig, eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche zu gestalten, damit der Benutzer seine Aufgaben auch bei erhöhtem Funktionsumfang schnell und mit minimalem Aufwand durchführen kann. Einen allgemeingültigen Satz von Gestaltungsrichtlinien für die Benutzungsfreundlichkeit anzugeben, wird als schwierig erachtet, weil „es den Benutzer an sich nicht gibt – und damit auch nicht die Benutzungsfreundlichkeit“ [98]. Als Hilfestellung soll im Folgenden jedoch die Beschreibung der drei Hauptanforderungskriterien gebrauchstauglicher Systeme nach ISO 9241 Teil 11 dienen:

- **Effektivität:** Die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen [31]. Die Genauigkeit der Zielerreichung lässt sich dadurch ermitteln, in welchem Ausmaß die Qualität des mit dem Produkt erstellten Ergebnisses die spezifizierten Kriterien erfüllt. Der Begriff der Vollständigkeit der Zielerreichung kann als das Maß angesehen werden, inwieweit die vorgegebenen Ziele erreicht werden. In der Praxis können Genauigkeit und Vollständigkeit prozentual angegeben und das Produkt dieser beiden Werte als Effektivitätskoeffizient definiert werden. Eine subjektive Evaluierung erreicht man durch Befragung, eine objektive durch Kriterien-/ Zielcheckliste [8].
- **Effizienz:** Die Effizienz setzt ein effektives Ergebnis voraus und ist der im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Arbeitsergebnis / Ziel erreichen [31]. Sie wird dadurch gemessen, dass die Effektivität in Relation zu den zur Aufgabenabarbeitung und Zielerreichung benötigten Ressourcen gesetzt wird. Zum Beispiel kann die zeitliche Effizienz als Verhältnis von Effektivität und Zeit zur Zielerreichung angesehen werden. Hier kann ebenso eine subjektive Evaluierung durch Befragung erreicht und eine objektive Evaluierung durch Aufwandsbestimmungen wie Zeitmessung oder Anzahl von Funktionsaufrufen zur Erreichung eines Zieles gemessen werden [8].
- **Zufriedenheit:** Die Zufriedenheit steht begrifflich für Beeinträchtigungsfreiheit und positive Einstellung der Benutzer gegenüber der Nutzung des Systems [31]. Sie berücksichtigt die subjektiven Bewertungen der Benutzer, wobei der Nutzungskontext die Benutzer, ihre Ziele und Aufgaben sowie die verfügbaren Werkzeuge und die physische und soziale Umgebung einschließt. Die Zufrie-

denheit kann objektiv bedingt durch Messung physiologischer Parameter und subjektiv durch Befragung und Bewertungsskalen ermittelt werden.

Des Weiteren findet sich in der spezifischen Fachliteratur eine auf empirischen Parametern beruhende, inhaltliche Definition der Gebrauchstauglichkeit. Sie äußert sich folglich in [7][58][89]:

- der Leichtigkeit und Schnelligkeit, mit der sich die Benutzung technischer Komponenten erlernen lässt (geringer Schulungs- und Service-Aufwand),
- der Leichtigkeit und Schnelligkeit, mit der sich technische Komponenten für eine Aufgabe benutzen lassen (erleichterter Bedienungsaufwand),
- der Akzeptanz technischer Komponenten bei den Benutzern und dem Aufwand, den Benutzer freiwillig zur Kenntniserweiterung über technische Komponenten erbringen und
- einer somit insgesamt gesteigerten Attraktivität und Wirtschaftlichkeit.

Wie hier zu erkennen ist, kann die Gebrauchstauglichkeit von Software durch viele Faktoren beeinflusst werden. STEVE KRUG eruiert die Gebrauchstauglichkeit in seinem Buch mit dem Titel „Don't make me think!“ [67]. Darin kommt er zu der Folgerung, dass alles, was sich dem Benutzer nicht intuitiv erschließt, die Benutzungsfreundlichkeit bis hin zur völligen Unbenutzbarkeit erschweren kann.

3.1.4 Intuitivität

Eine häufig gestellte Anforderung an eine digitale Umsetzung lautet: „Das System soll intuitiv benutzbar sein.“ Wird diese Anforderung nicht zu einem gewissen Grad erreicht, ist jede noch so gelungene Funktionalität eines Programmes ineffektiv. Im Folgenden soll zunächst nochmals die Bedeutung von intuitiver Benutzbarkeit verdeutlicht werden. Zudem stellt sich die Frage, ob diese qualitativ und quantitativ messbar ist [58].

Intuitive Benutzbarkeit lässt sich wie folgt definieren [57]:

„Ein technisches System ist intuitiv benutzbar, wenn es durch nicht bewusste Anwendung von Vorwissen durch den Benutzer zu effektiver Interaktion führt.“

Auf welchem Wege man eine intuitive Benutzbarkeit herstellt, und ob dieser Weg und das zu erwartende Ergebnis auch im Vorhinein bestimmbar sind, ist differenziert zu betrachten. Die Definitionsprobleme diesbezüglich beginnen bereits damit, dass in der deutschen Sprache keine Verbform des Substantivs „Intuition“ vorkommt. Im Duden als maßgeblichem Nachschlagewerk findet sich kein entsprechender Eintrag wie z.B. das Verb „intuieren“. Ebenso erfolglos wird man in vergleichbaren Spezifikations- und Pflichtenheften ein Kapitel zum Thema „Intuierung der Umsetzung“ finden. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Begriffe nicht existieren. Für eine interaktiv durch einen Benutzer zu steuernde Software wird jedoch ein gewisses Maß an Intuitivität vorausgesetzt [58].

Ob ein System intuitiv nutzbar ist oder nicht, hängt stark von den individuellen Vorkenntnissen und Erfahrungen der Benutzer ab und kann somit oftmals erst im Nachhinein festgestellt werden. Erst nachdem eine Umsetzung vorliegt, kann ermittelt werden, ob es zu einer „durch nicht bewusste Anwendung von Vorwissen“ [57] effektiven Interaktion des Benutzers kommt. Der heute gebräuchlichste Weg, der Anforderung nach einer intuitiv benutzbaren Umsetzung gerecht zu werden, liegt in dem Einsatz nachgeschalteter Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit. Dabei werden Entwicklungsstände auf ihre intuitive Benutzbarkeit hin untersucht und reflektiert. Die Untersuchungsmethodiken werden in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt.

3.2 Software-ergonomische Gestaltung interaktiver Computersysteme

Im Folgenden werden das „Mensch-Computer-System“ an sich und die darin eventuell zu findenden Probleme im Detail beschrieben. Darauf werden Grundsätze der software-ergonomischen Gestaltung interaktiver Computersysteme vorgestellt.

3.2.1 Betrachtungsobjekt: Mensch-Computer-System

Ergonomische Betrachtungen beschäftigen sich prinzipiell mit Mensch-Maschine-Systemen. Ein Mensch-Maschine-System (MMS) wird von [45][62][120] wie folgt definiert:

„Bei einem Mensch-Maschine-System wirkt der Mensch mit einer Maschine mit dem Ziel zusammen, eine selbstgewählte oder vorgegebene Aufgabe innerhalb einer Arbeitsumgebung zu lösen.“

Mit dem Begriff Maschine wird dabei ein allgemeines technisches System bezeichnet, wie z.B. eine Produktionsanlage, eine Software oder ein Fortbewegungsmittel. Übernimmt ein Computer die Rolle der Maschine, wird von einem Mensch-Computer-System (MCS) gesprochen [22][60]. Dieses lässt sich in die Bestandteile Benutzer (Mensch), durchzuführende Aufgabe (Tätigkeit), interaktives Anwendungssystem (Computer) und Nutzungskontext (Unternehmensorganisation) und deren Beziehungen zueinander aufspalten (s. Abbildung 3-1) [60].

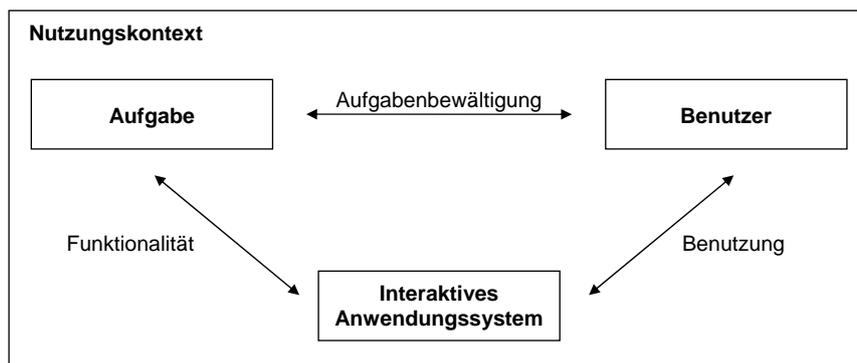


Abbildung 3-1: Schema der Elemente und Beziehungen eines Mensch-Computer-Systems in Anlehnung an [125]

Die Definition der in diesem Schema dargestellten Elemente und Beziehungen wird im Folgenden durchgeführt.

3.2.1.1 Aufgabe

Eine Aufgabe ist eine Problemstellung, bei der durch zielorientiertes Verhalten eines Akteurs ein vorhandener Zustand (Arbeitsobjekte, andere Akteure) in einen bestimmten, neuen Zustand überführt werden soll [79]. In der Norm DIN EN ISO 9241-11 [31] werden Aufgaben definiert als:

„Die zur Zielerreichung erforderlichen Aktivitäten.“

Aufgaben nehmen eine zentrale Rolle bei der ergonomischen Evaluation einer Software ein. Dafür ist eine detaillierte Aufgabenanalyse notwendig.

3.2.1.2 Interaktives Anwendungssystem

Hierunter versteht man den automatisierten Teil des betrieblichen Informationssystems, der dem Benutzer Eingriffsmöglichkeiten in den Kontroll- und Datenfluss bietet. Im MCS repräsentiert das interaktive Anwendungssystem den Aspekt Computer [60].

3.2.1.3 Benutzer

Unter Benutzer versteht man eine Person, die mit einem bestimmten Anwendungssystem zur Lösung einer Aufgabe innerhalb eines Nutzungskontextes interagiert [60]. In Bezug auf das MCS kann man Benutzer in drei Gruppen einteilen. Die einzelnen Benutzergruppen weisen unterschiedliche Anforderungen an die zu gestaltende Benutzungsschnittstelle auf (s. Tabelle 3-1).

Benutzergruppe	Anforderungen an die Benutzungsschnittstelle
Anfänger	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach und sichtbar • Keine Informationsüberflutung • Anschauliche Analogien
Fortgeschrittene (Gelegenheitsbenutzer)	<ul style="list-style-type: none"> • Mentale Referenzen auf das Aufgabenmodell • Piktogramme und Dynamik
Experten	<ul style="list-style-type: none"> • Effiziente Interaktion • Abkürzungen (Shortcuts)

Tabelle 3-1: Form einer Benutzerklassifikation [54][60]

Von der Anfänger-Phase (ungeübter und sporadischer Benutzer) wird je nach Nutzungshäufigkeit das Stadium des gelegentlichen Benutzers (geübter und sporadischer Benutzer) erreicht. Zwischen dem Gelegenheitsbenutzer und dem Experten (geübter und regelmäßiger Benutzer) besteht laut BUBB [17] der größte Unterschied. Der Übergang zum Experten wird dann vollzogen, wenn alle Möglichkeiten eines interaktiven Systems beherrscht werden [34]. Hinzuzufügen sei noch, dass diese Klassifizierung von BUBB [17] um die Gruppe der „Ungeschickten“ (ungeübter und regelmäßiger Benutzer) erweitert wird.

3.2.1.4 Nutzungskontext

In Anlehnung an die DIN EN ISO 9241-11 [31] lässt sich die Umgebung, in der der Benutzer mit dem Computersystem arbeitet, durch den Terminus Nutzungskontext umschreiben. Dies umfasst die Benutzer, die Arbeitsaufgaben, die Arbeitsmittel (Hardware, Software, Materialien) sowie die soziale und physische Umgebung, in der die Arbeitsmittel genutzt werden [60].

3.2.1.5 Aufgabenbewältigung

Die Beziehung zwischen Benutzer und Aufgabe bestimmt, inwieweit der Benutzer in der Lage ist, die ihm anvertrauten Aufgaben zu erfüllen, und ob er diese als zumutbar empfindet. Bei der ganzheitlichen Bewertung der ergonomischen Qualität eines Computersystems interessiert vor allem, inwieweit die Aufgabenbewältigung durch das Gerät unterstützt oder behindert wird, ob also die Primäraufgabe „Aufgabenbewältigung“ durch die Sekundäraufgabe „Benutzung des Computersystems“ überlagert bzw. in den Hintergrund gedrängt wird [90].

3.2.1.6 Funktionalität

Unter der Funktionalität eines Computersystems versteht man, inwieweit dieses die Bewältigung gestellter Aufgaben unterstützt, und damit aufgabenrelevant und „aufgabenangemessen“ ist [90]. Die in Software-Produkten vorhandenen Funktionalitäten werden vom Benutzer oftmals nicht im vollen Umfang genutzt, da neue oder bereits bekannte verborgen oder nicht genutzt werden während weitere realisierbare Funktionalitäten vermutet werden [79]. In Abbildung 3-2 ist die Diskrepanz zwischen Benutzererwartung und tatsächlicher Funktionalität anschaulich skizziert.

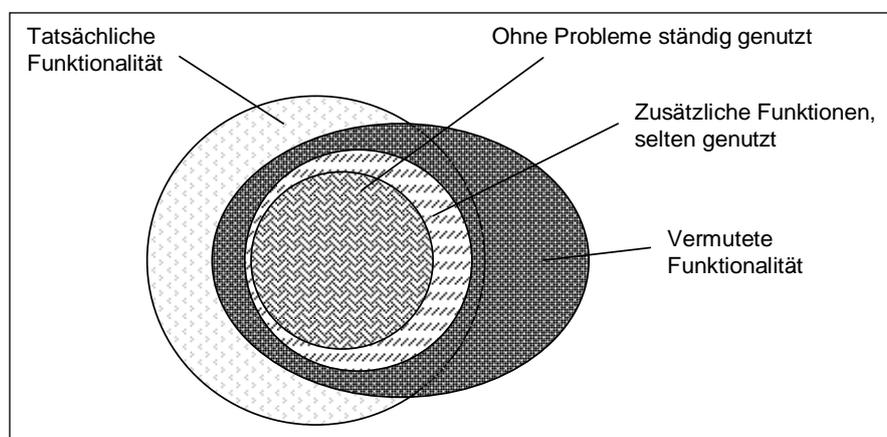


Abbildung 3-2: Diskrepanz zwischen vermuteter und tatsächlicher Funktionalität eines komplexen Systems (Venn-Diagramm) [43][79]

Wenn Funktionsumfang und -logik des Computersystems die Erledigung von Arbeitsaufgaben nicht in geeigneter Weise unterstützen, kann es zu Handlungsblockaden, -wiederholungen und -unterbrechungen sowie zur Wahl von Umwegen kommen, die einen kompensatorischen Zusatzaufwand bedeuten [121]. Die Ursache für die suboptimale Nutzung von Systemfunktionalitäten ist oftmals fehlendes Wissen der Benutzer über deren Funktionsweise und Handhabung. Dies gilt vor allem für

neue Funktionalitäten [79]. Bei der software-ergonomischen Evaluation ist deshalb darauf zu achten, inwieweit die vorhandene oder nicht vorhandene Funktionalität die Qualität der Benutzung beeinflusst.

3.2.1.7 Benutzung

Durch die Interaktion zwischen Benutzer und Computersystem wird bestimmt, mit welchem Handhabungsaufwand die Bedienung des Computersystems für den Benutzer verbunden ist. Die Reduzierung dieses Aufwandes ist zentraler Bewertungsgegenstand der Software-Ergonomie und bestimmt die ergonomische Qualität der Benutzung [90].

3.2.2 Gestaltungsprobleme interaktiver Computersysteme

Wird zur Bearbeitung einer Aufgabe ein interaktives Computersystem eingesetzt, sind drei Gestaltungsprobleme zu lösen: das Sachproblem, das Interaktionsproblem und das Präsentationsproblem (s. Abbildung 3-3).

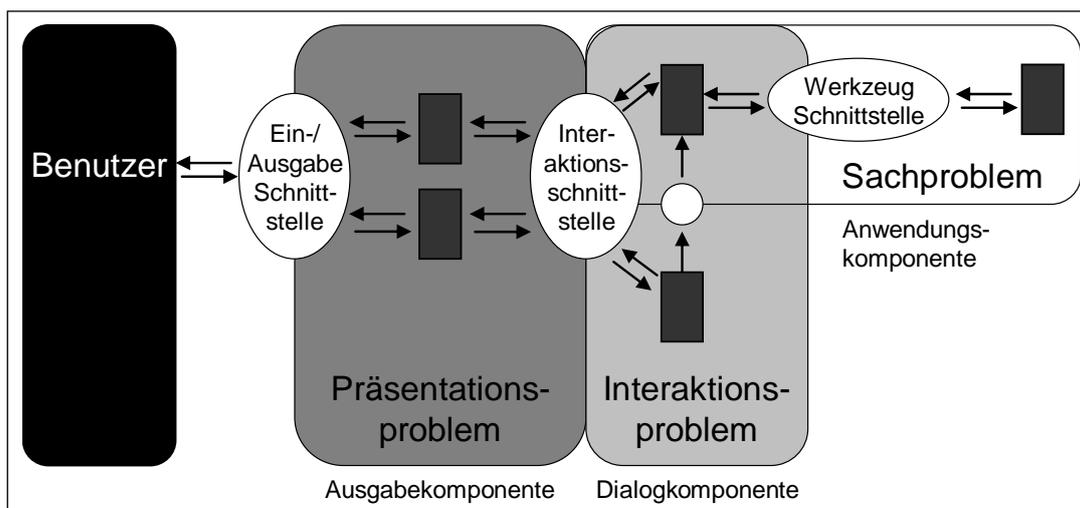


Abbildung 3-3: Konzeptionelle Sicht der Schnittstellen eines interaktiven Computersystems und der zugeordneten Problembereiche [99]

Das *Sachproblem* besteht darin, dem Benutzer im Rahmen seiner inhaltlichen primären Aufgabenbearbeitung alle notwendigen Funktionalitäten ausreichend, aber nicht zu detailliert anzubieten. Die Lösung des Sachproblems bedeutet die aufgaben- und benutzerangepasste Gestaltung der *Werkzeugschnittstelle* mit allen zur Bearbeitung der gestellten Aufgaben notwendigen Anwendungsfunktionen [99].

Das *Interaktionsproblem* kommt im Wesentlichen durch die Begrenzungen der *Ein-/Ausgabeschnittstelle* und *Interaktionsschnittstelle* zustande. Die Handhabung

der Dialogfunktionen sollte so einfach wie möglich sein und dem Benutzer keinerlei zusätzlichen kognitiven Aufwand abfordern [99].

Das *Präsentationsproblem* besteht darin, die vom Benutzer wahrnehmbaren Ausgaben des Computers so zu gestalten, dass der Benutzer bei seiner Aufgabenbearbeitung mit allen notwendigen Informationen in seinem aktuellen Aufmerksamkeitsfokus auf der *Ausgabeschnittstelle* versorgt wird und auch hierzu möglichst wenig Dialogfunktionen benötigt [99].

3.2.3 Software-ergonomische Gestaltungsgrundsätze

Um die zuvor beschriebenen Gestaltungsprobleme zu lösen und die Akzeptanz eines Computersystems durch die Benutzer zu steigern, wären folgende Gestaltungsaspekte frühzeitig im Entwicklungsprozess der Software maßgeblich [26][99]:

- a) Arbeitsteilung und -organisation (soziotechnischer Bereich)
- b) Mensch-Computer-Funktionsteilung (Werkzeugschnittstelle)
- c) Dialoggestaltung (Interaktionsschnittstelle)
- d) Hardware-Ergonomie (Gestaltung des Arbeitsplatzes bzw. der Ein-/ Ausgabeschnittstelle)
- e) Benutzerbeteiligung beim Gestaltungsprozess

Da in dieser Arbeit eine bereits fertig entwickelte Softwarelösung hinsichtlich der Mensch-Computer-Funktionsteilung und der Dialoggestaltung betrachtet wird, werden im Folgenden lediglich diese beiden Aspekte näher durchleuchtet. Zudem wird im Hinblick auf den in dieser Arbeit gelegten Interaktionsschwerpunkt die Benutzerbeteiligung beim Gestaltungsprozess einer Software erläutert. Die Methodik zur Evaluation dieser Softwarelösung wird im Abschnitt 3.3 detailliert vorgestellt.

3.2.3.1 Mensch-Computer-Funktionsteilung

In der Mensch-Computer-Funktionsteilung (MCF) wird im Detail festgelegt, welche Arbeitsanteile auf den Computer übertragen werden, um eine optimale Unterstützung des Benutzers zu gewährleisten. Eine aufgabenorientierte Systemgestaltung sollte die unterschiedlichen Fähigkeiten vom Mensch und Softwaresystem berücksichtigen. Sowohl für den Menschen als auch für den Computer gibt es spezifische Stärken und Schwächen. Der Computer als Arbeitsmittel dient primär dazu, den Benutzer bei

seinen Arbeiten zu unterstützen und von unzumutbaren, formalisierbaren, d.h. sich ständig wiederholenden Aufgaben zu entlasten. Der Routineanteil des Arbeitsumfanges sollte durch den Einsatz von EDV-Systemen auf ein sinnvolles Ausmaß reduziert werden [99]. Die in einem zusammenhängenden Aufgabenkontext erforderlichen Funktionalitäten sollten möglichst kompakt angeboten werden, um Medienbrüche oder Unterbrechungen des Arbeitsablaufes zu vermeiden. Das Ergebnis der MCF ist die Werkzeugschnittstelle [52][98][100].

3.2.3.2 Dialoggestaltung

Bei der Gestaltung der interaktiven Software geht es um die äußere Form der Umsetzung der Vorgaben aus der MCF [98]. Zusätzliche Belastungen des Benutzers durch das Interaktionsproblem über die Interaktionsschnittstelle sind dabei so gering wie möglich zu halten. Die Bedeutung einer ergonomischen Gestaltung einer Interaktionsschnittstelle hängt besonders davon ab, welche Aufgaben sie zu erfüllen hat. Dem Benutzer soll die zur Verfügung stehende Systemleistung möglichst effektiv angeboten werden. Je größer die Anzahl der angebotenen Funktionalitäten eines Computersystems wird, desto schwieriger ist es, diese einzeln in einer übersichtlichen Form in der Bedienoberfläche zu integrieren. Aus diesem Grund soll die Bedienoberfläche dem Benutzer nur die Untermenge an der Systemkapazität zur Verfügung stellen, die er für seine aktuelle interaktive Arbeit benötigt. Auch sollte der Eingabeaufwand für eine Aktion über die Bedienoberfläche weitestgehend reduziert sein [4]. Die Grundsätze der hierzu notwendigen Dialoggestaltung (DIN EN ISO 9241-110 [32]) sind in Abbildung 3-4 dargestellt.



Abbildung 3-4: Grundsätze der Dialoggestaltung (DIN EN ISO 9241-110) [32][89]

3.2.3.3 Benutzerbeteiligung beim Gestaltungsprozess

Die fachliche Komplexität und Dynamik heutiger Anwendungen erschwert die Softwareentwicklung zunehmend. Zusätzlich sind die Sicht des Softwareentwicklers und die des Benutzers oftmals sehr unterschiedlich oder sogar entgegengesetzt. Diese konträre Sichtweise liegt in den unterschiedlichen Funktionswelten begründet. Weil der Softwareentwickler primär auf der Basis von Algorithmen und Datenstrukturen denkt und handelt, erfolgt die Abbildung der systeminternen Zustandsräume auf die Benutzungsoberfläche sozusagen „von innen“ heraus [98]. Der Benutzer dagegen nimmt ein interaktives System weitgehend nur „von außen“ wahr [98]. Auch muss zwischen weniger geübten und erfahrenen Benutzern unterschieden werden.

Damit eine notwendige Anpassung aus Benutzersicht so gering wie möglich gehalten wird und die Systeme so intuitiv wie möglich bedienbar sind, ist eine enge Zusammenarbeit von Benutzern als Experten für das zu unterstützende Fachgebiet und Softwareentwicklern als Experten für Informatikwerkzeuge bei der Systementwicklung erforderlich [99]. Es gibt hierzu die vier folgenden benutzerorientierten Gestaltungsaktivitäten, die während der Systementwicklung auszuführen sind [32][99]:

- a) Verständnis und Festlegung des Nutzungskontexts
- b) Festlegung von Benutzeranforderungen und organisatorischen Anforderungen mit Priorisierung

- c) Entwurf von Gestaltungslösungen
- d) Beurteilung von Gestaltungslösungen in Anbetracht der Anforderungen

Der benutzerorientierte Gestaltungsprozess sollte in einem frühen Stadium des Softwareentwicklungsprojektes beginnen und im Wesentlichen aus einem Kreislauf bestehen, in dem sich die Analyse des Nutzungskontextes, die Anforderungsdefinition, die Software-Entwicklung und die Testläufe der Benutzer zyklisch wiederholen, bis das System die Anforderungen erfüllt. Die DIN EN ISO 13407 [33] stellt ein entsprechendes Prozessmodell vor (s. Abbildung 3-5).

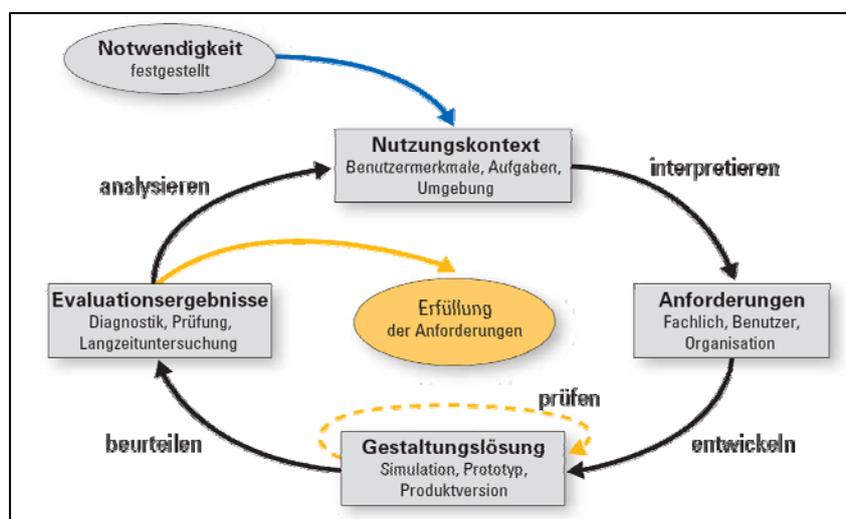


Abbildung 3-5: Prozessmodell benutzerorientierter Software-Entwicklung entsprechend der Norm DIN EN ISO 13407 [14][32][33]

3.3 Software-ergonomische Evaluation interaktiver Computersysteme

Eine fertige Benutzeroberfläche bzw. eine Zwischenstufe der zu entwickelnden Benutzeroberfläche eines Computerprogrammes kann auf ihre software-ergonomische Qualität in so genannten Design-Test-Zyklen überprüft werden [14]. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf ihre Eignung bezüglich der vorgesehenen Benutzer und deren Aufgabe gelegt. Die durchgeführte systematische Art von Qualitätsprüfung in Form einer Beschreibung inklusive Bewertung und Beurteilung unter Berücksichtigung von Beeinflussungen eines Objektes in Beziehung auf ein Subjekt nennt man Evaluation [15][30]. Die Durchführung einer Evaluation ist zwar in vielen Fällen schwer und aufwändig, eignet sich aber, „da es meist nur über diesen Weg zu anforderungsgerechten interaktiven Anwendungssystemen kommt“ [53]. Der damit verbundene Aufwand kann sich nach den daraus abgeleiteten Verbesserungen in

kurzer Zeit durch effizientere Nutzung und durch zufriedenerer Benutzer auszuhalten [53].

3.3.1 Evaluationsverfahren

Die Durchführung einer Evaluation verlangt zunächst geeignete software-ergonomische Evaluationskriterien. Im Abschnitt 3.2 wurden in diversen Normen und Richtlinien bereits software-ergonomische Evaluationskriterien und Anforderungen an Software-Produkte vorgestellt. Diesen Bedingungen werden nur sehr wenige Bewertungs- oder Maßskalen zur Seite gestellt. Daher haben sich während der Anwendung der Normen vielfältige Evaluationsverfahren entwickelt, die zwar nicht genormt wurden, aber handlungsleitende Beispiele und Hinweise geben [2][26]. Inzwischen sind Verfahren für unterschiedliche Zwecke verfügbar, die sich im Wesentlichen anhand folgender Kriterien klassifizieren lassen [2]:

Anhand der Akteure:

- Von Experten durchgeführte Verfahren wie Inspektionen, Reviews, Begutachtungen, Walkthroughs; Prüfung vorzugsweise gegen Checklisten, Prüfaufgaben oder gegen Gesetze und Normen (*analytische Evaluationsverfahren*)
- Vom Nutzer durchgeführte Prüfungen wie Usability-Tests, Befragungen, teilnehmende Beobachtungen; Prüfung anhand von Prüfaufgaben mit Probanden oder potentiellen Benutzern (*empirische Evaluationsverfahren*)

Anhand des Zeitpunktes:

- Formative Evaluation, d.h. entwicklungsbegleitende Prüfung
- Summative Evaluation, d.h. Prüfung des fertigen Produktes

Anhand des Veranlassers:

- beim Hersteller: entwicklungsbegleitende oder -abschließende Prüfungen
- bei Anwendern und / oder Benutzern: Eingangsprüfungen

Anhand des Prüfungsortes:

- Prüfungen unabhängig von Einsatzort / Arbeitsplatz
- Prüfungen am Einsatzort / Arbeitsplatz

Die einzelnen Evaluationstypen können auch kombiniert angewandt werden. Entscheidend bei der Evaluation ist es, das geeignetste Verfahren auszuwählen, an die Randbedingungen anzupassen und angemessene Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen abzuleiten. Mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung lassen sich ergonomische Evaluationsverfahren in nahezu allen Phasen der Entwicklung einsetzen. Im Mittelpunkt steht hierbei immer die Frage der Aufgabenangemessenheit.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Evaluation des Handlungsprozesses zur Erstellung einer Simulation manueller Montagevorgänge mit digitalen 3-D-Menschmodellen ein von Experten durchgeführtes Evaluationsverfahren herangezogen. Eine Beschreibung von Expertentests und des angewendeten Verfahrens folgt in Abschnitt 3.3.2.

3.3.2 Angewendetes Evaluationsverfahren

Das in dieser Arbeit aus Gründen der Praktikabilität herangezogene Evaluationsverfahren ist der „Cognitive Walkthrough“ (CW), auch unter der Bezeichnung „Design Review“ zu finden. Dieses Verfahren ist ein expertenbasiertes aufgabenorientiertes Evaluationsverfahren, bei dem die Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Produktes untersucht wird, und gehört zu den analytischen Evaluationsverfahren. Dies bedeutet, es werden keine empirischen Benutzerdaten erhoben, sondern die Urteile eines oder mehrerer Experten herangezogen [74]. Der Experte auf dem Gebiet der Mensch-Computer-Interaktion versetzt sich in die Rolle des Benutzers und „beurteilt aufgrund der anwendbaren Normen und seiner Erfahrung“ [26] anhand von konkreten vorgegebenen Handlungsabläufen einer bestimmten Aufgabe das fertige Produkt oder der Entwurf der Benutzungsschnittstelle. Dabei geht er davon aus, dass der Benutzer den Weg des geringsten kognitiven Aufwands (SOLL-Prozess) gehen wird. Hierzu sollte der Experte soviel wie möglich über die von der Interaktion betroffene Zielgruppe und die vorgesehenen Aufgaben der Benutzer wissen. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Evaluationsverfahren wurde deshalb der Experte oder vielmehr die Gruppe der konsultierten Experten, die in der Montageabsicherung der BMW Group mit dieser Form von Simulation vertraut sind, für mehrere Arbeitskreise rekrutiert.

Die schrittweise Abarbeitung der vorgesehenen Prüfaufgabe reduziert nicht nur die Untersuchungskomplexität, sondern stellt auch detailliert den Bezug zur eigentlichen Arbeitsaufgabe dar, sodass auch das Kriterium der Aufgabenangemessenheit ge-

prüft werden kann [1][2]. Konkret wird reflektiert und überprüft, ob die Software-Anwendung ihre Aufgabe erfüllt, ob die Gestaltung der Benutzungsschnittstelle aufgabenorientiert ist, welche Probleme ggf. auftreten und ob die Software-Anwendung den Erwartungen bzw. Anforderungen des Anwenders entspricht [74].

Das Grundgerüst bilden dabei folgende Schritte [25][74]:

1. Definition der typischen Benutzergruppe und des Benutzerverhaltens bei Nutzung der Software-Anwendung (Benutzercharakteristik) (s. Abschnitt 4.2.2.3).
2. Definition einer oder mehrerer typischer und realistischer Aufgabenstellungen, die der Benutzer lösen möchte (s. Abschnitt 5.1).
3. Festlegung des Weges, den der Benutzer zur Lösung der jeweiligen Aufgabe idealerweise gehen wird (SOLL-Prozess).
4. Durchführung der tatsächlich nötigen Handlungsschritte zur Lösung der Aufgabe (IST-Prozess) und Festlegung von Schwachstellen bzw. Ableitung von Verbesserungsvorschlägen.

In der folgenden Abbildung 3-6 sind beispielhaft SOLL- und IST-Prozess schematisch dargestellt. Sind Abweichungen zwischen beiden Prozessen (Δ) zu erkennen, sollten diese anhand von Verbesserungsvorschlägen weitgehend beseitigt werden.

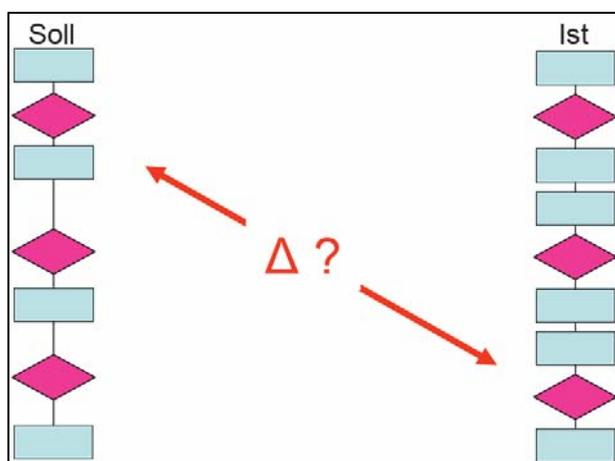


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Abweichung zwischen einer idealen und realen Handlungssequenz zur Lösung einer Aufgabe [17]

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, „dass erfahrene Tester viele Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit entdecken, die ein ungeschulter oder nicht entsprechend sensibilisierter Tester übersehen würde“ [26]. Weitere Vorteile sind eine rasche Durchführbarkeit, relativ niedrige Kosten und der mögliche Einsatz in einer

frühen Phase des Entwicklungsprozesses [25]. Der Nachteil liegt darin, dass es sich um ein qualitatives Verfahren handelt und sich eine Quantifizierung von Systemeigenschaften damit nicht vornehmen lässt. Der Erfolg hängt somit von der Erfahrung der beteiligten Personen ab. Deshalb werden diese Methoden auch „als ‚Common-Sense-Verfahren‘ beschrieben, d.h., die Evaluation findet gewissermaßen auf Grundlage von Allgemeinwissen und dem gesunden Menschenverstand‘ statt“ [53].

3.3.3 Charakteristische Merkmale eines idealen Handlungsprozesses (SOLL-Prozess)

Um die Nutzung eines Computerprogrammes so effizient wie möglich zu machen, gilt es, einen idealen Handlungsprozess zu gestalten. Die Merkmale, die einen solchen Prozess (SOLL-Prozess) kennzeichnen, leiten sich nach Ansicht des Autors aus den software-ergonomischen Gestaltungsgrundsätzen ab und sind hier zusammengetragen (teilweise in ähnlicher Form wieder zu finden in der DIN EN ISO 9241-110 [32]):

Charakteristika des SOLL-Zustandes sind folgende Punkte:

- Individualisierbarkeit, d.h. Möglichkeit zur Festlegung von benutzerspezifischen Eingaben
- Mensch-Computer-Funktionsteilung, d.h. Reduzierung von Routineaufgaben für den Benutzer auf ein Minimum
- Aufgabenangemessene und effiziente Führung des Benutzers durch das Programm (nur logische Sprünge zwischen Funktionalitäten und Reduzierung von Prozessschritten)
- Aufgabenspezifische Anzeige von Funktionen (Reduzierung des Eingabeaufwandes)
- Fehlerrobustheit, d.h. Unempfindlichkeit gegenüber Bedienfehlern
- Alle vom Benutzer verlangten Interaktionen müssen in Bezug zu der zu lösenden Aufgabe stehen und zur Lösung der primären Aufgabe führen.

Der Benutzer soll so weiterhin die Möglichkeit haben, jederzeit die Geschehnisse flexibel zu steuern, einzugreifen und zu kontrollieren.

4 Analyse des betrachteten Mensch-Computer-Systems

Bevor in Kapitel 5 die Evaluation und Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion zur Erstellung einer Simulation manueller Montagevorgänge mit digitalen 3-D-Menschmodellen durchgeführt wird, wird hier zunächst der Aufbau des in der BMW Group für diese Art von Untersuchungen verwendeten MCS dargestellt und näher durchleuchtet. Daraufhin werden das MCS und seine Elemente anhand der Ergebnisse einer Befragung beschrieben, in deren Rahmen erfahrene und potentielle Benutzer mittels eines Fragebogens zum gegenwärtigen Stand der betrieblichen Praxis befragt wurden. Schließlich werden die Beziehungen zwischen den Elementen und somit die Stellhebel zur optimalen Anpassung des betrachteten MCS vorgestellt. Diese stehen bei der später folgenden Evaluation und Optimierung im Fokus.

4.1 Aufbau des Systems

Wie bei den theoretischen Grundlagen beschrieben, besteht ein MCS in der Regel aus vier Elementen:

- die **Aufgabe**
- das **interaktive System**
- der **Benutzer**
- der **Nutzungskontext**

Gleichermaßen ist das hier betrachtete MCS aufgebaut. Lediglich eine **CAD-Datenbank** ist als weiteres wesentliches Element ergänzt worden. Sie steht in direkter Beziehung zum interaktiven System und enthält die notwendigen CAD-Daten für die Aufbereitung eines Untersuchungsszenarios (s. Abbildung 4-1).

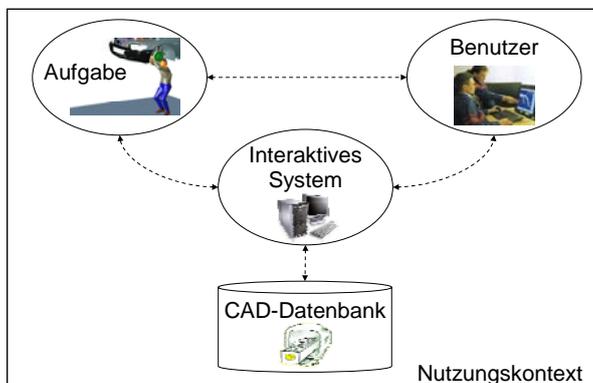


Abbildung 4-1: Aufbau des betrachteten MCS in Anlehnung an [125]

4.2 Beschreibung des Systems

4.2.1 Unterstützende Erfassungsmethode: Fragebogen

Zur detaillierten Beschreibung wurde als Untersuchungsmethode die Benutzerbefragung eingesetzt. Hauptbeweggrund für diese Entscheidung war, dass im Wesentlichen die Mitarbeiter der Montageabsicherung für die Durchführung dieser Art von Montagesimulationen verantwortlich sind und deshalb auf diesem Wege und direkt aufgrund ihrer Erfahrungen Merkmale, Anforderungen, Wünsche und Erwartungen am besten ermittelt werden können.

Das Verfahren der Befragung kann prinzipiell entsprechend der Kommunikationsart in die drei Gruppen der mündlichen, telefonischen und schriftlichen Befragung unterteilt werden [107]. Zur Durchführung der Befragung wurde in dieser Arbeit ein Fragebogen verwendet. Die Hauptschwierigkeiten, auf die bei der Gestaltung eines Fragebogens geachtet werden muss, können in vier Kategorien unterteilt werden: Äußere Umstände (z.B. uninteressantes Befragungsthema), menschliche Unzulänglichkeiten (z.B. Urteilsvermögen), Selbstdarstellung (z.B. Über-/ Untertreiben) und Beantwortungstaktik durch den Befragten (z.B. Herauslesen von Wertvorstellungen) [10]. Deshalb ist beim Aufbau eines Fragebogens darauf zu achten, dass der Ablauf chronologisch und logisch zusammenhängend konzipiert ist. Die Formulierungen sollen außerdem allgemeinverständlich, eindeutig, kurz und neutral gehalten werden [10][50][107]. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die eingesetzten Strukturtypen der Fragen. In Abhängigkeit vom Strukturierungsgrad können sie im Wesentlichen in offene (Fragen ohne vorgegebene Antwortmöglichkeiten), geschlossene (Alternativfragen, Mehrfachfragen, Skalafragen, usw.) direkte Fragen (Sinn und Zweck der Frage ist erkennbar) und indirekte Fragen (Sinn und Zweck der Frage ist verschleiert, um bewusst verfälschte Antworten zu vermeiden) gegliedert werden [99].

Im Rahmen der hier durchgeführten Erhebung wurde eine schriftliche Befragung in Form eines Fragebogens mit geschlossenen Fragen und Bewertungsfragen vorgenommen (s. Anhang A). Der Vorzug der schriftlichen Befragung gegenüber persönlichen und telefonischen Gesprächen beruht überwiegend auf folgenden Vorteilen [75][99]:

- a) Die befragte Person kann den Fragebogen dann ausfüllen, wenn sie Zeit dazu hat, ggf. auch in mehreren Schritten zu verschiedenen Zeitpunkten.

- b) Die Situation bei der Beantwortung ist ggf. vollständig anonym und vertraulich.
- c) Erläuternde Unterlagen können, auch wenn sie komplex sind, ohne Zeitdruck durchgelesen werden.
- d) Die Qualität der Befragungsergebnisse wird nicht durch den Interviewer beeinflusst.
- e) Insgesamt werden dadurch mehr Befragte erreicht.
- f) Nicht zuletzt entfällt der Kontaktierungs- und Befragungsaufwand beim Erheber, was zu einem kostengünstigen Vorgehen führt.

Zu den wesentlichen Nachteilen der schriftlichen Befragung gehört, dass über Gründe und Motive derjenigen, die nicht antworten, keinerlei Informationen vorliegen. Erschwerend kommt bei schriftlichen Befragungen hinzu, dass die Rücklaufquoten stark variieren können. Im Allgemeinen sind Rücklaufquoten unter 30 % als kritisch, 30-50 % als akzeptabel und über 50 % als gut bis sehr gut anzusehen [99]. An der hier durchgeführten Befragung beteiligten sich von den zu dem Zeitpunkt 53 potentiellen Endbenutzern der Software insgesamt 42, wobei 28 davon über Erfahrung mit dem Einsatz von 3-D-Menschmodellen verfügten. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 80 %.

Der zur Befragung gestaltete Fragebogen besteht aus drei Teilgebieten:

- I. *Erfahrungen* mit dem Einsatz von digitalen 3-D-Menschmodellen
- II. *Charakterisierung* des Einsatzes von 3-D-Menschmodellen bei der virtuellen Absicherung von manuellen Montagevorgängen
- III. *Bewertung der Anforderungen* an den Einsatz von 3-D-Menschmodellen

Das erste Teilgebiet des Fragebogens wurde ausschließlich von Benutzern mit Erfahrung bearbeiten. Die restlichen zwei Teilgebiete wurden von allen Befragten bearbeitet. Diese Unterscheidung wird bei den Ergebnissen der einzelnen Fragen durch die zusätzliche Angabe der Zahl der Befragten (i) gekennzeichnet.

In der Summe besteht der Fragebogen aus 14 geschlossenen Fragen und 18 Bewertungsfragen. Im ersten und zweiten Teilgebiet des Fragebogens werden zu den sechs bzw. sieben gestellten Fragen standardisierte Antworten zum Ankreuzen (teilweise unter der Möglichkeit von Mehrfachnennungen (n)) eingesetzt. Diese Vorgehensweise gilt im Allgemeinen als ein etabliertes arbeitswissenschaftliches Verfahren und erleichtert zusätzlich die Auswertung [18][77]. Ein Nachteil dieser

Befragungsform ist allerdings, dass alle Antworten bereits vor der Befragung bekannt sein müssen, um sie in den Fragebogen zu integrieren. Um dieses Problem zu umgehen, wurden neben Antworten zum Ankreuzen auch Platzhalter für zusätzliche Bemerkungen / Vorschläge eingesetzt. Dadurch konnte ein Kompromiss geschaffen werden, um einerseits den Mitarbeitern bei den Antworten Freiraum zu verschaffen und andererseits den Auswertungsaufwand in Grenzen zu halten und vergleichbare Ergebnisse zu produzieren.

Im dritten Teilgebiet des Fragebogens werden bis auf eine geschlossene Frage nur Bewertungsfragen eingesetzt. Hier werden von den potenziellen Endbenutzern der Software die zuvor von Experten in dieser Art von Simulationen festgelegten Anforderungen an die virtuelle Absicherung mit 3-D-Menschmodell bewertet. Die Vorstellung der Ergebnisse dieses Teilgebietes findet aufgrund der geeigneteren thematischen Zuordnung erst in Kapitel 5 statt.

Im Folgenden findet die Beschreibung der einzelnen Elemente des betrachteten MCS statt. Bei dieser Beschreibung finden sich die ausgewerteten Ergebnisse aus dem ersten und zweiten Teil des Fragebogens. Hierbei wird bei den einzelnen Fragen die Häufigkeit jeder gewählten Option in Prozent (%) von der Anzahl der gesamten eingegangenen gültigen Antworten (100 %) berechnet und in Balkenform grafisch dargestellt. Bei allen Fragetypen gilt, dass nicht beantwortete Fragen in der Auswertung weder aufgelistet noch in der Statistik berücksichtigt werden. Bei den Textfragen werden alle Antworten chronologisch nach Umfrageingang aufgelistet.

4.2.2 Systemelemente

4.2.2.1 Aufgabe

Die Aufgabe, die vom Mitarbeiter der Absicherung bewältigt werden muss, ist die Absicherung manueller Montagevorgänge und beinhaltet mehrere Teilaufgaben. Im Wesentlichen ist es die Prüfung der Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Einsehbarkeit eines Montageortes bei manuellen Montagetätigkeiten in der Fahrzeugproduktion. Außerdem wird eine ergonomisch optimierte Gestaltung der Montageplätze mit einer passenden Eintaktung angestrebt.

Anhand welcher Methoden diese Aufgaben bisher abgearbeitet werden, zeigt Abbildung 4-2. Die darin zu findenden Prozentangaben beziehen sich unter Berück-

sichtigung von Mehrfachausagen auf 115 Nennungen, die die Befragten ($i = 42$) insgesamt abgegeben haben.

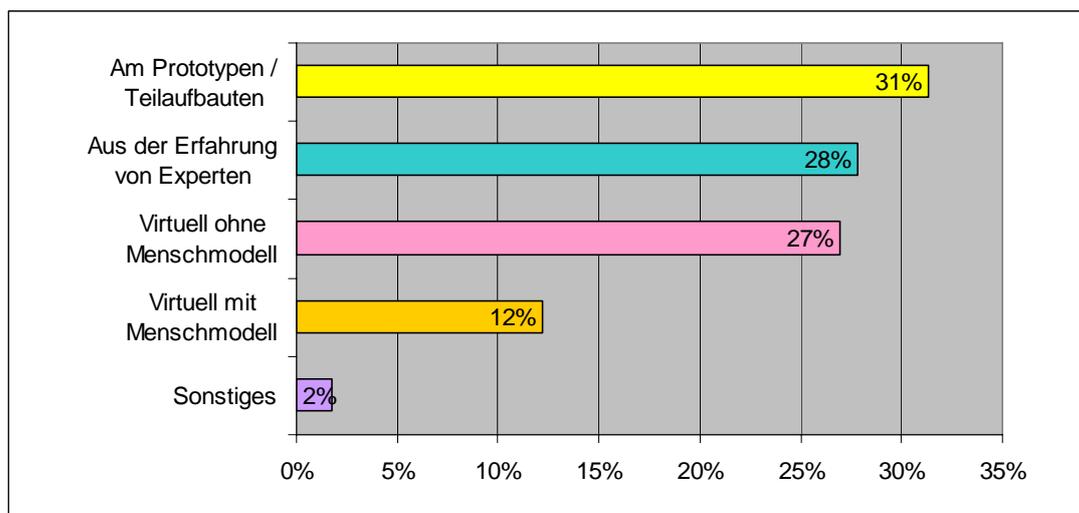


Abbildung 4-2: Bisherige Methoden zur Abarbeitung der gestellten Aufgaben (Teil II – Frage 1)

Die Absicherungsaufgaben werden derzeit immer noch vorzugsweise am Prototypen durchgeführt. Diese Methode wird dicht gefolgt von der Absicherung durch die Erfahrung von Experten und von der Absicherung durch die virtuelle Betrachtung ohne 3-D-Menschmodell. Die virtuelle Absicherung mittels 3-D-Menschmodell findet hingegen derzeit nur selten Verwendung. Unter dem Aspekt „Sonstiges“ wurden zusätzlich als Methoden das Heranziehen von Checklisten oder unternehmensspezifische Verfahren zur Ergonomiebewertung aufgeführt.

Digitale 3-D-Menschmodelle werden zur Erledigung dieser Aufgaben also bereits eingesetzt. Aus Abbildung 4-2 ergibt sich jedoch, dass mit 12 % der Nennungen also 14 der Befragten virtuelle 3-D-Menschmodelle benutzten, also nur die Hälfte der in der Verwendung hiermit Erfahrenen. Dies bedeutet, dass sich also bereits vor Beginn eines Simulationsprozesses die Hälfte der damals potentiellen Benutzer gegen eine Verwendung des 3-D-Menschmodells entschieden hat; ein weiteres Indiz für die Notwendigkeit von Optimierungen.

Den genauen Zweck, für welchen die erfahrenen Benutzer ($i = 28$) diese CAD-Systeme bislang einsetzen zeigt Abbildung 4-3. Es waren dazu Mehrfachausagen ($n = 59$) möglich.

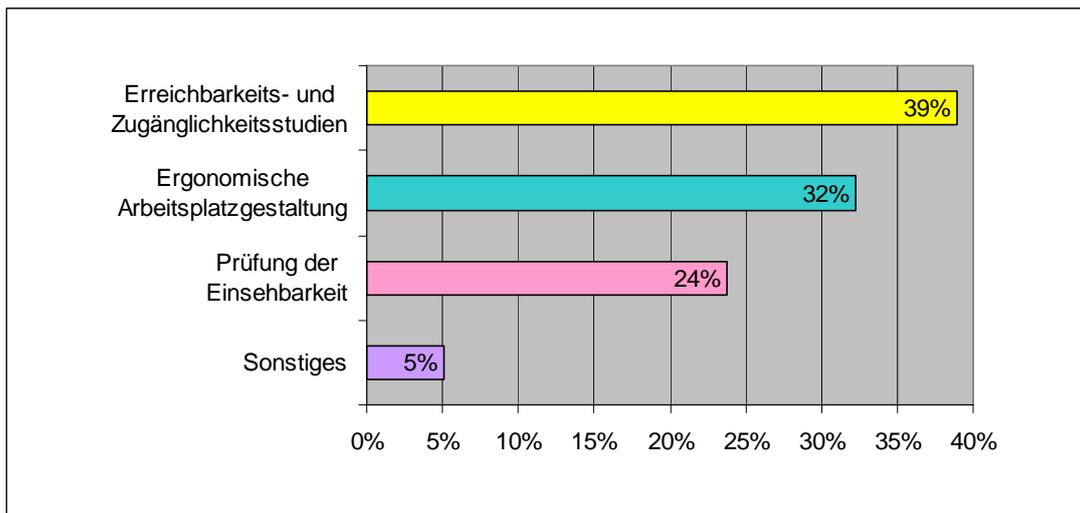


Abbildung 4-3: Bisheriger Einsatzzweck von CAD-Systemen mit 3-D-Menschmodell (Teil I – Frage 1)

Der Fokus liegt damit derzeit auf Erreichbarkeits- und Zugänglichkeitsuntersuchungen. Die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung und die Prüfung der Einsehbarkeit haben nachgeordnete Bedeutung. Zusätzlich wurden drei Einsatzmöglichkeiten genannt, nämlich die Abtaktungsoptimierung, die Materialbereitstellung und die Optimierung des Arbeitsablaufes in punkto Effizienz (Prozessoptimierung).

Eine sehr ähnliche Aufteilung zeigt das Ergebnis der Frage nach dem Zweck, wofür die Befragten (i = 42) ein 3-D-Menschmodell einsetzen würden (s. Abbildung 4-4). Es waren dazu ebenfalls Mehrfachaussagen (n = 89) möglich.

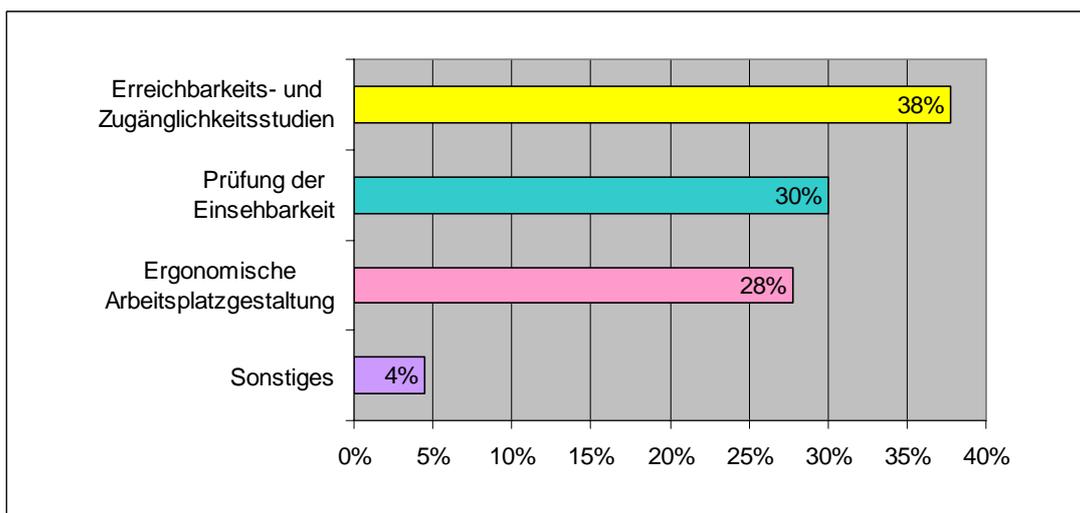


Abbildung 4-4: Bestmöglicher Einsatzzweck von CAD-Systemen mit integriertem 3-D-Menschmodell (Teil II – Frage 2)

Die Aussagen über den bisherigen Zweck (s. Abbildung 4-3) decken sich somit weitestgehend mit den Aussagen über den bestmöglichen Zweck vom Einsatz von CAD-Systemen mit 3-D-Menschmodellen. Auch unter dem Aspekt „Sonstiges“ tauchten ähnliche Einsatzbereiche auf: Abtaktungsoptimierung, Materialbereitstellung, Planung neuer Anlagen und Beurteilung der Werkerbelastung.

Der Einsatz von 3-D-Menschmodellen ist jedoch derzeit noch mit einem erhöhten zeitlichen Aufwand verbunden (s. Abschnitt 4.2.2.1, Abbildung 4-12). Deshalb ist sehr wichtig zu wissen, welche Art von Montagevorgängen hauptsächlich untersucht wird. Abbildung 4-5 zeigt auf Basis von 82 Nennungen die Montagevorgänge, die laut der Befragten ($i = 42$) derzeit überwiegend betrachtet werden.

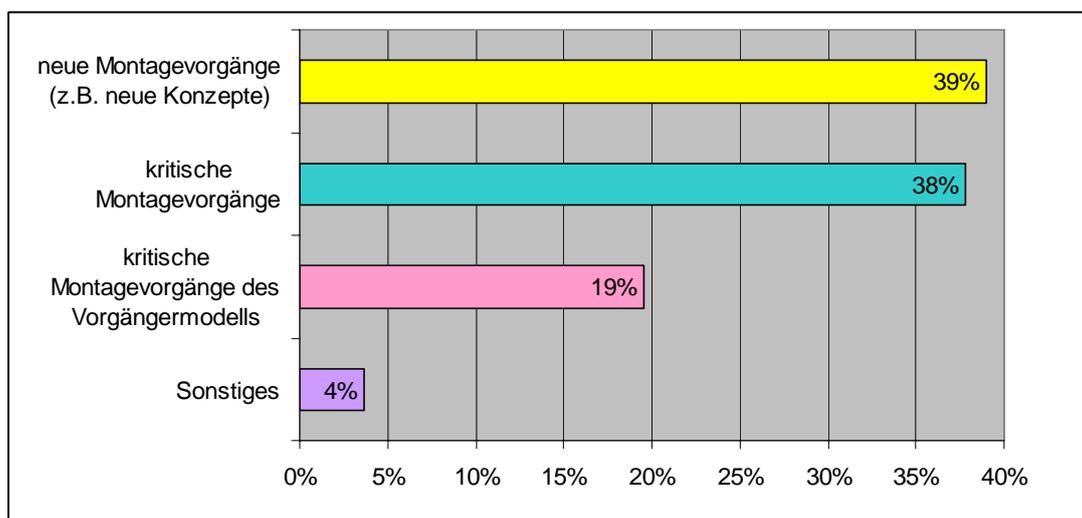


Abbildung 4-5: Untersuchte Montagevorgänge (Teil II – Frage 3)

Es stellte sich dabei heraus, dass hauptsächlich neue und kritische Montagevorgänge eines aktuellen Fahrzeugprojektes untersucht werden. Kritische Montagevorgänge des Vorgängermodells werden ebenso betrachtet, aber in geringerem Ausmaß. Montagevorgänge, die sich von einem Fahrzeugmodell hin zu seinem Nachfolgemodell nur geringfügig geändert haben, werden nicht näher betrachtet. Hier reicht die über die Jahre gesammelte Erfahrung der Mitarbeiter aus der Absicherung und aus der Montageplanung in den meisten Fällen aus, um eine aussagekräftige Bewertung über zukünftige Montagevorgänge zu liefern. Eine Ausnahme bilden laut Aussage der Befragten unter dem Punkt „Sonstiges“ die Bereiche der Motorenmontage und des Karosseriebaus sowie Projekte, die eine Optimierung des bestehenden Produktionssystems bezwecken. In diesen Fällen werden alle Montagevorgänge bzw. im Karosseriebau alle Werkereinlegeplätze untersucht.

Wichtig ist auch der Zeitpunkt, wann die definierten Montagevorgänge untersucht werden. Grundsätzlich sollte dies so früh wie möglich im PEP geschehen. Allerdings sind die benötigten CAD-Daten in einer sehr frühen Phase nur in einem groben Detaillierungsgrad vorhanden und etliche Fahrzeugkonzeptlösungen noch nicht entschieden. Beide Problematiken machen es zwingend notwendig, sich gründliche Gedanken über den sinnvollen Einsatzzeitraum der Simulation mit 3-D-Menschmodell im PEP zu machen. Zur Verdeutlichung sind zunächst in Abbildung 4-6 die Phasen eines normierten Fahrzeug-PEP dargestellt.



Abbildung 4-6: Phasen eines normierten PEP im Fahrzeugbau bei der BMW Group

Die Zeitpunkte im Fahrzeugprojekt, an denen die angesprochenen Montagevorgänge nach Aussage der Befragten ($i = 42$) derzeit untersucht werden, stellt Abbildung 4-7 dar (Mehrfachnennungen ($n = 99$) waren möglich).

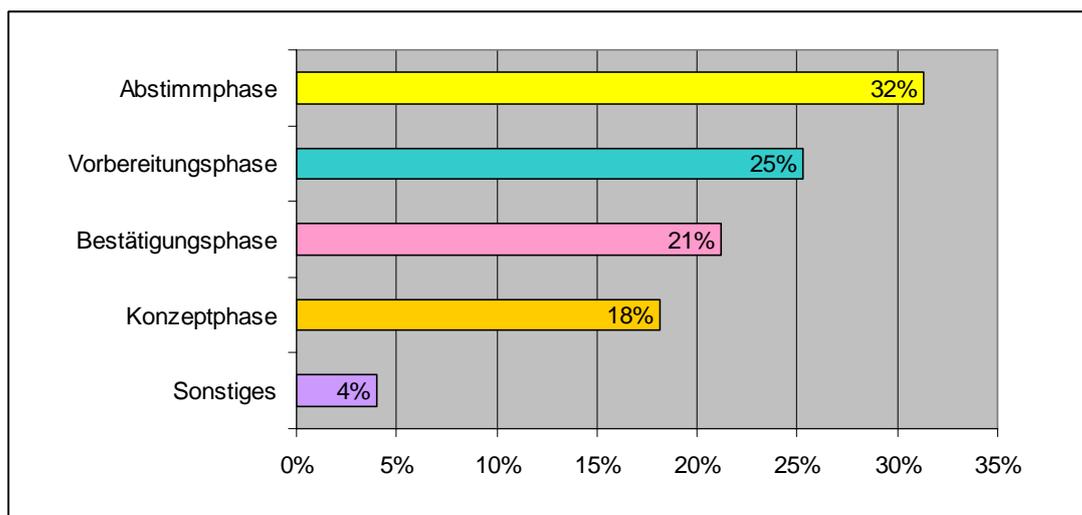


Abbildung 4-7: Untersuchungszeitpunkte der manuellen Montagevorgänge (Teil II – Frage 4)

Weit über die Hälfte der Montageuntersuchungen finden derzeit in der so genannten „Frühen Phase“ (Abstimm- und Vorbereitungsphase) statt. Aber auch schon in der Konzeptphase werden Untersuchungen durchgeführt. Hier sind bereits die ersten virtuellen Baugruppen verfügbar. Da aber im Entwicklungs- und Fertigungsprozess noch viele Änderungen an Produkt und Montageprozess vorgenommen werden, machen hier detaillierte virtuelle Montageuntersuchungen nur in Einzelfällen Sinn. Zu

einem späteren Zeitpunkt, in der Bestätigungsphase, werden virtuelle Untersuchungen nach und nach durch Untersuchungen an realen Prototypen ersetzt. Zudem wurden von den Befragten Hinweise darauf gegeben, wann virtuelle Montageuntersuchungen durchgeführt werden sollte:

- „Untersuchungen sollen so früh wie möglich durchgeführt werden, z.B. auf Basis von kritischen Ergonomiethemen aus anderen Projekten (Lessons learned), die im Nachfolgeprojekt übernommen werden sollen.“
- „Untersuchungen sollen auch in der Serienproduktion durchgeführt werden.“

Aus dem gerade Vorgestellten lässt sich ableiten, dass sinnvollerweise erst mit dem Beginn der Vorbereitungsphase mit der virtuellen Montageuntersuchung mit 3-D-Menschmodell begonnen werden sollte. Diese Untersuchungen sollten bestenfalls mit dem Ende der Abstimmphase beendet sein.

Von Interesse ist auch die Häufigkeit, mit der virtuelle Montageuntersuchungen mit 3-D-Menschmodell derzeit durchgeführt werden. Die Aussagen der erfahrenen Befragten ($i = 28$) zeigt Abbildung 4-8.

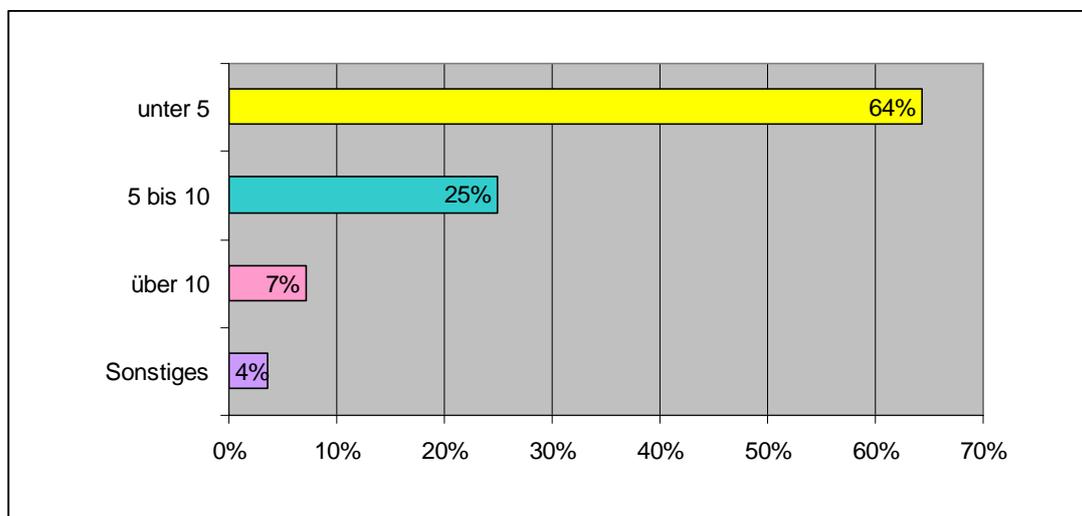


Abbildung 4-8: Häufigkeit der Montageuntersuchungen mit 3-D-Menschmodell pro Jahr (Teil I – Frage 2)

Virtuelle Montageuntersuchungen mit 3-D-Menschmodell werden also bisher nur äußerst selten durchgeführt. Ein Befragter gab an, dass die Anzahl der Untersuchungen von der Projektphase abhängig sei, nämlich „in der frühen Phase“ (keine Prototypen vorhanden) über 10 und in den späteren Bauphasen unter 5 (Prototypenabsicherung favorisiert).

Einen weiteren wesentlichen Aspekt stellt die Vorgehensweise dar, in der solche Montageuntersuchungen durchgeführt werden (Teil I - Frage 3). Laut den Experten ($i = 28$) liegt in 93 % der Fälle kein festgelegtes, standardisiertes Schema vor. Lediglich zwei der Befragten (7 %) beantworteten diese Frage mit „Ja“. Einer davon gab eine abteilungsinterne Positionierungsvorschrift als Anleitung an, der zweite stellte folgende Vorgehensweise vor:

1. Virtuelle Sichtung der ersten Daten
2. Priorisierung der kritischen Varianten (auch durch Erfahrungen aus den Fahrzeugvorgängermodellen)
3. CAD-Daten sammeln und aufbereiten
4. Durchführung der Simulationen
5. Ergebnisse in Gremien wie z.B. Bauraum- bzw. Fachteam vorstellen
6. Änderungen einfordern / erarbeiten
7. Nach Umsetzung der Änderungen Bestätigung in der Hardwareabsicherung

Diese Vorgehensweise stellt keinen Standard dar, erweist sich aber zunächst als sinnvoll und sollte bei der Definition eines Standards als Diskussionsbasis dienen.

4.2.2.2 Interaktives Anwendungssystem

Das zur Verfügung stehende interaktive Anwendungssystem ist im betrachteten Fall ein Computer, darin integriert eine Simulationssoftware, die mithilfe eines 3-D-Menschmodells die Überprüfung von manuellen Montagevorgängen in einem virtuellen Untersuchungsszenario ermöglicht. Nach Aussage der erfahrenen Benutzer ($i = 28$) haben diese bereits an folgenden CAD-Systemen mit 3-D-Menschmodell Erfahrungen gesammelt (s. Abbildung 4-9). Es waren dazu Mehrfachaussagen ($n = 37$) möglich.

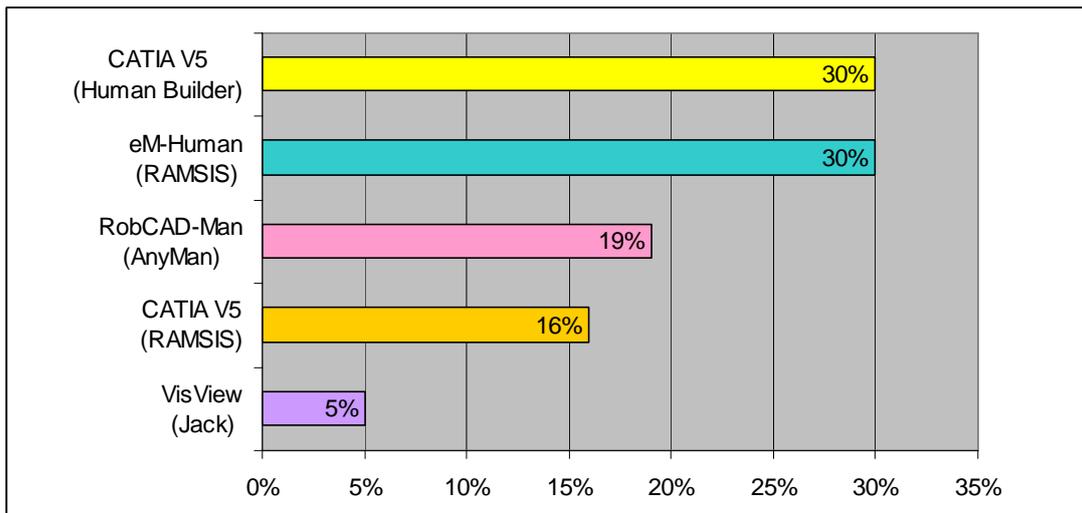


Abbildung 4-9: Verwendete CAD-Systeme mit 3-D-Menschmodell (Teil I – Frage 4)

Wie aus der Grafik ersichtlich ist, wurden bislang Erfahrungen in den gängigsten CAD-Systemen gesammelt. Die Vorteile und Nachteile des Einsatzes eines digitalen 3-D-Menschmodells werden nach Aussage der Befragten (i = 42) im Folgenden vorgestellt.

Bei den Vorteilen ergab sich auf Basis von 97 Nennungen die in Abbildung 4-10 dargestellte Aufteilung.

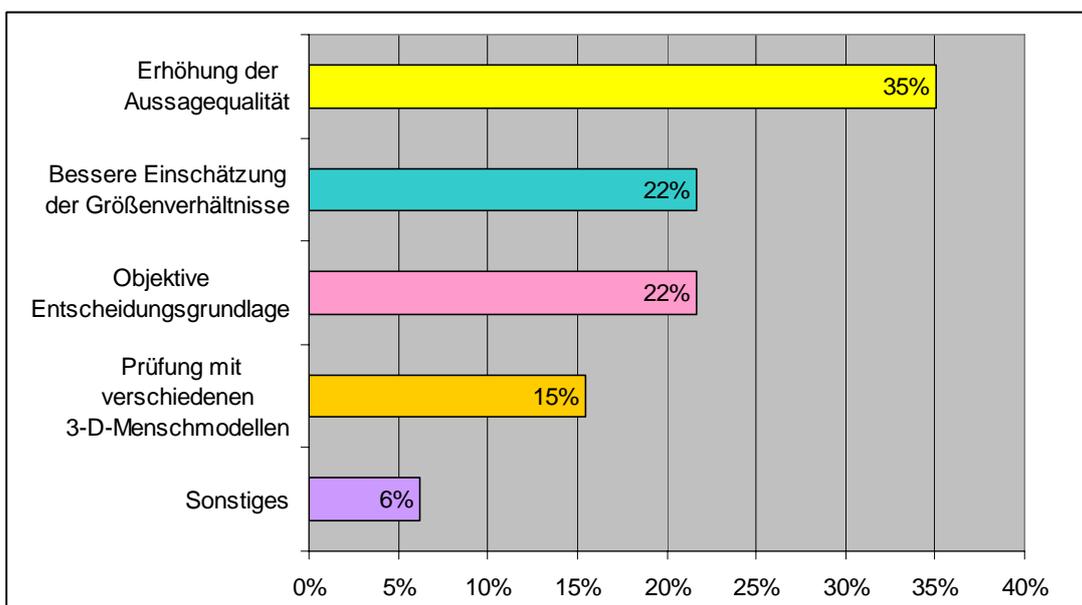


Abbildung 4-10: Vorteile des Einsatzes eines digitalen 3-D-Menschmodells (Teil II – Frage 6)

Als wesentlicher Vorteil ist die Erhöhung der Aussagequalität gegenüber einfacheren Visualisierungen z.B. ohne 3-D-Menschmodell zu vermerken.

Zusätzlich wurden folgende Aussagen gemacht:

- Zeitlicher Vorsprung gegenüber der realen Absicherung an der Hardware
- Einsparung von Kosten für Hardwareaufbauten
- Vermeidung von Fehlplanung
- geringer Änderungsaufwand im CAD, dadurch hohe Teilequalität und Erprobungsreife
- bessere Vorstellung des Montagevorgangs.

Bei den Nachteilen ergab die Auswertung eine eindeutige Aussage. Hier fielen die meisten Nennungen auf den „hohen Bedienungsaufwand“ (s. Abbildung 4-11).

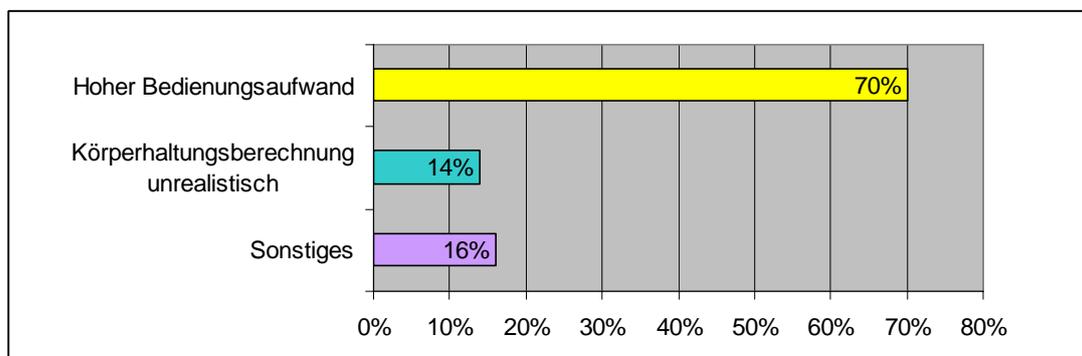


Abbildung 4-11: Nachteile des Einsatzes eines digitalen 3-D-Menschmodells (Teil II – Frage 7)

Es wurden folgende weitere Nachteile genannt:

- fehlende Direktanbindung an native Daten in bestimmten Systemen, notwendige Konvertierung der Daten
- beschränkte Aussagekraft hinsichtlich ergonomischer Betrachtungen, z.B. wegen fehlender bzw. aufwändiger Kräfte-/ Gewichtesimulation
- individuell unterschiedliches räumliches Vorstellungsvermögen der Mitarbeiter
- zu viele notwendige Randbedingungen für Körperhaltungsberechnung; mögliche falsche oder unvollständige Definition der Randbedingungen
- Abhängigkeit des Ergebnisses von der Restriktionswahl /-reihenfolge
- endgültige Optimierung erst in der Hardware
- geringe Akzeptanz durch Produktion

Inwiefern sich dies auf die Aufbereitung des Untersuchungsszenarios bzw. die Durchführung der Untersuchungen zeitlich auswirkt, zeigt Abbildung 4-12.

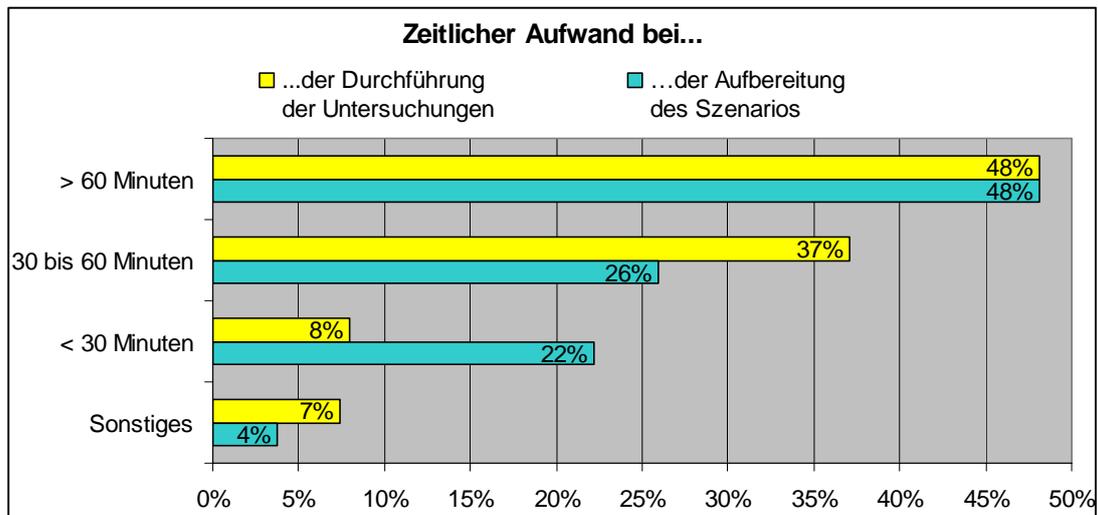


Abbildung 4-12: Zeitlicher Aufwand zur Aufbereitung des Szenarios bzw. zur Durchführung der Untersuchung (Teil I – Frage 5)

Aus der Auswertung der Antworten ($i = 27$, eine Enthaltung) resultierte, dass nahezu die Hälfte der erfahrenen Befragten sowohl für die Aufbereitung des Szenarios als auch für die Durchführung der Untersuchung über 60 Minuten benötigen.

Zudem wies einer der Befragten darauf hin, dass die Dauer der Aufbereitung des Szenarios unterschiedlich und abhängig vom Zweck der Untersuchung sei. Bezüglich des Aufwandes bei der Durchführung der Untersuchung gab ein Befragter an, dass der Aufwand vom Auftraggeber und dessen Bewertungsmaßstäben abhängig sei. Ein weiterer bezifferte die Dauer der Durchführung einer Untersuchung auf einen bis drei Tage.

Zusammenfassend betrachtet besteht ein erhöhter zeitlicher Aufwand sowohl zur Aufbereitung des Szenarios als auch für die Durchführung der Untersuchungen. Gerade die aufwändige Aufbereitung des Szenarios wirkt sich negativ auf die Motivation der Benutzer dieser CAD-Systeme aus, da dieser Mehraufwand bei der Bewältigung der Primäraufgabe hinderlich ist.

Zudem ist interessant, wie die Benutzer ($i = 42$) die virtuelle Absicherung im Vergleich zur Absicherung am Prototypen beim Prüfen von manuellen Montagevorgängen bewerten (Teil II - Frage 5). Dabei sahen 88 % der Befragten in der virtuellen Absicherung eine ergänzende Funktion, die restlichen 12 % gar eine ersetzende Funktion. Zusätzliche Kommentare sind hier aufgeführt:

- Bei eindeutiger virtueller Absicherung mit i.O. Ergebnis (Ergebnis: in Ordnung) kann auf Hardwareabsicherung verzichtet werden; bei grenzwertigen oder n.i.O. Ergebnissen (Ergebnis: nicht in Ordnung) ist eine Hardwareabsicherung unverzichtbar.
- Prototypen sind vor Serieneinsatz nicht vollständig virtuell ersetzbar.
- In der virtuellen Absicherung alle Arbeitsplätze betrachten, an der Hardware nur eine punktuelle Absicherung durchführen (im Karosseriebau).

Bei der Absicherung des manuellen Montageprozesses gilt derzeit die virtuelle Absicherung als unbestritten sinnvoll und wird zunehmend eingesetzt. Einen vollständigen Ersatz von Prototypen bietet sie jedoch noch nicht, hilft aber wesentlich bei deren Reduzierung und Erhöhung ihres Reifegrades.

In der vorliegenden Arbeit wird als interaktives Anwendungssystem zur Evaluation der benötigten Handlungsprozesse während der Simulation manueller Montagevorgänge mittels 3-D-Menschmodell beispielhaft die Simulationssoftware eM-Human, heute Process Simulate Human, verwendet. Diese wurde zur Analyse der betrachteten Produktionsprozesse bei der BMW Group genutzt, nachdem sie in sorgfältiger Prüfung der benötigten Funktionalitäten auch im Rahmen einer vergleichenden Diplomarbeit [61] als das geeignetste Programm zur Analyse von Montagetätigkeiten und der Werkerergonomie ermittelt wurde. Sie wurde deshalb und aufgrund der vorgestellten Ergebnisse ausgewählt, mittels derer erkennbar ist, dass diese Software und ihre Vorgängerversion („RobCAD-Man“) in der BMW Group regelmäßig zum Einsatz kamen und kommen und Optimierungsbedarf hinsichtlich ihrer Bedienung besteht.

4.2.2.3 Benutzer

Entscheidend für die Gestaltung und damit für die spätere Bedienbarkeit sowie Akzeptanz eines interaktiven Anwendungssystems ist die Benutzerklasse, an die das CAD-System gerichtet sein soll. Die Simulation mit 3-D-Menschmodell soll fachbereichs- und projektübergreifend von verschiedenen Mitarbeitern, z.B. aus der Gesamtfahrzeugabsicherung oder aus der Montageplanung, durchgeführt werden [51]. Diese können somit ihr eigenes Know-How in die Untersuchungen einbringen, ohne dass ein Simulationsexperte involviert werden muss. Da diese Untersuchungen in

unregelmäßigen Abständen stattfinden, ihre Anzahl über das Jahr verteilt relativ gering ist (s. Abschnitt 4.2.2.1, Abbildung 4-8) und also eher sporadisch genutzt werden, ist davon auszugehen, dass überwiegend „Gelegenheitsbenutzer“ angesprochen sein werden. Eine Auswertung der gewonnenen Daten bestätigt diese These und führt zu folgendem Ergebnis: Es zeigt sich, dass die aktuellen Benutzer dieser CAD-Systeme im Wesentlichen in zwei Benutzerklassen aufgeteilt werden können, nämlich der „geübten und sporadischen“ Benutzer (Gelegenheitsbenutzer) und der „ungeübten und sporadischen“ Benutzer (Anfänger) (s. Abbildung 4-13).

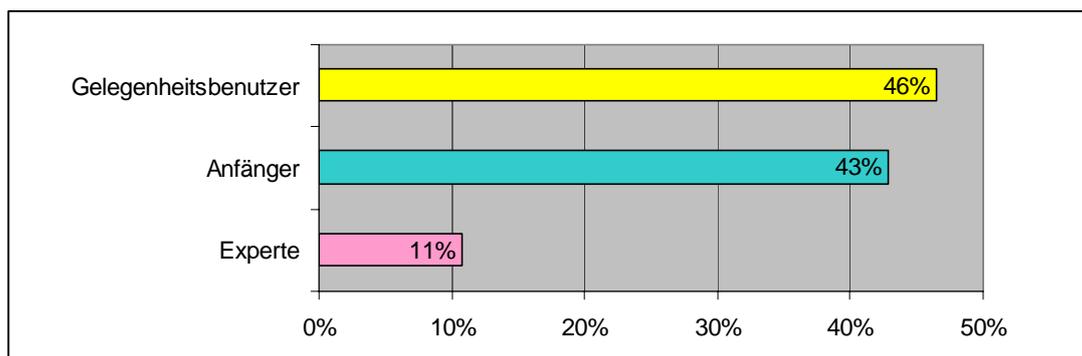


Abbildung 4-13: Benutzerklasse der erfahrenen Befragten ($i = 28$) (Teil I – Frage 6)

Das System sollte zur sinnvollen Unterstützung des Menschen eine benutzergerechte, intuitive Bedienoberfläche und aufgabenangemessene Funktionalitäten aufweisen. Nur auf diese Weise kann eine angenehme und wirkungsvolle Mensch-Computer-Interaktion zustande kommen, die es dem Benutzer ermöglicht, seine Aufgaben effizient und effektiv zu bewältigen.

4.2.2.4 CAD-Datenbank

Jede virtuelle Montageuntersuchung benötigt digitale Geometriedaten (CAD-Daten). Dazu müssen die notwendigen Daten in einem für die Simulationssoftware geeigneten Format zur Verfügung stehen und auf direktem Wege abrufbar sein. Dies bietet ein weiteres Element des vorgestellten MCS, die CAD-Datenbank.

Zur Verwaltung und Verteilung der großen CAD-Datenmengen ist der Einsatz eines Product-Data-Management-Systems (PDM-System) erforderlich. Das PDM-System von der BMW Group heißt PRISMA (Produktdaten Informationssystem mit Archiv).

Darin werden unter anderem die in den CAD-Systemen CATIA V4 und CATIA V5 erzeugten Originalmodelle sämtlicher Fahrzeugumfänge, Montagestrukturen und Werkzeuge in digitaler Form zentral abgelegt sowie aktuell und konsistent gehalten. Das Datenformat ist bei CATIA V4 Modellen das *.model und bei CATIA V5 Modellen das *.CATPart. Um die Performance bei DMU-Untersuchungen zu verbessern, werden allerdings vorzugsweise tesselierte Daten verwendet (s. Abbildung 4-14). Diese vereinfachten Geometrien werden aus den Originalmodellen über einen automatischen Tesselierungsprozess in das Datenformat *.cgr konvertiert und in so genannten „Projekt-Caches“ abgelegt. Diese Caches sind projektbezogene CAD-Datenbanken eines Fahrzeuges und werden automatisch aktualisiert und konsistent gehalten. Die reibungslose Beschaffung dieser Daten spielt somit eine entscheidende Rolle für die Durchführung dieser Untersuchungen.

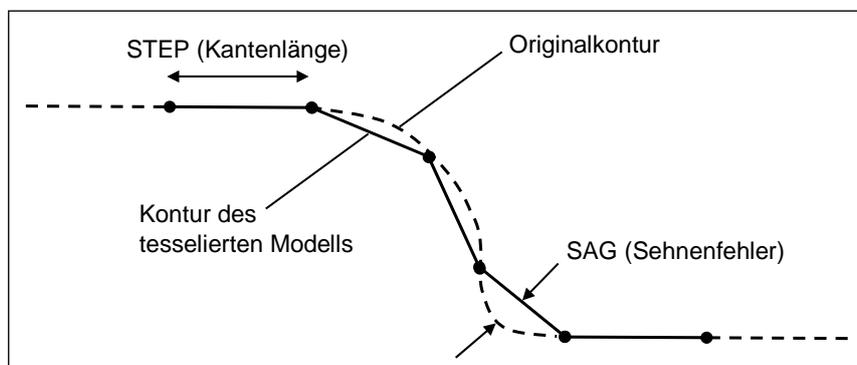


Abbildung 4-14: Vereinfachte Geometrien durch Tesselierung, d.h. durch Reduzierung der Fassetten [20]

4.2.2.5 Nutzungskontext

Der Nutzungskontext stellt die unmittelbaren räumlichen Arbeitsverhältnisse dar. Dabei spielen Einflussgrößen wie Temperatur, Lärm, Beleuchtung, usw. eine besondere Rolle und beeinflussen direkt die Arbeitsweise der Mitarbeiter. In unserem konkreten Fall gehen wir bei der Nutzung des Computers von idealen Raumverhältnissen eines Büroraumes aus, wo die herrschende Temperatur, der Geräuschpegel und die Beleuchtung optimale Werte für die ungestörte Ausübung der primären Aufgabe erreichen. Deshalb wird in dieser Arbeit nicht näher auf dieses Element eingegangen.

4.3 Zu untersuchende Aspekte des Mensch-Computer-Systems

Ein MCS ist nur dann effektiv und effizient funktionsfähig, wenn alle seine Elemente bestens aufeinander abgestimmt sind. Dies bedarf in erster Linie einer optimalen Anpassung der Beziehungen des MCS (s. Abbildung 4-15). Somit stellen diese Beziehungen die grundlegenden Stellhebel zur optimalen Anpassung des betrachteten MCS dar.

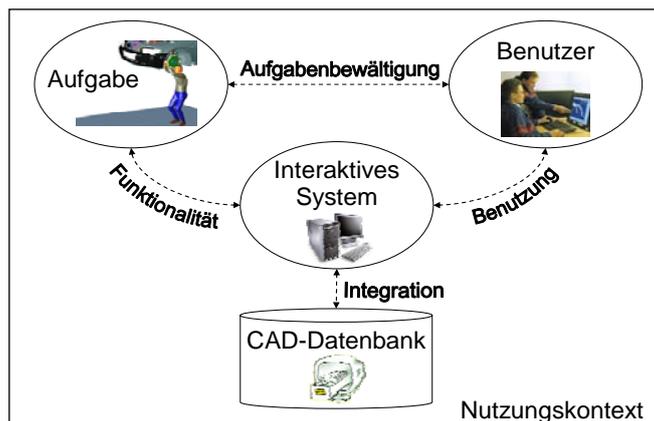


Abbildung 4-15: Beziehungen zwischen den Elementen des betrachteten MCS

Wie im theoretischen Teil dieser Arbeit beschrieben, sind bei interaktiven Computersystemen generell drei Gestaltungsprobleme zu lösen: Das Sachproblem, das Interaktionsproblem und das Präsentationsproblem. In unserem konkreten System liegt das Sachproblem in der Beziehung „Funktionalität“ und die beiden anderen in der Beziehung „Benutzung“. Die Beziehung „Integration“ stellt hier ein zusätzliches Problem dar, nämlich die Einbindung des interaktiven Systems in das organisatorische Geschehen. Die Beziehung „Aufgabenbewältigung“ stellt kein Gestaltungsproblem des MCS an sich dar.

Deshalb liegt in dieser Arbeit besonderes Augenmerk auf der Benutzung des interaktiven Systems, seinen zur Verfügung stehenden Funktionalitäten und seiner Integration ins Unternehmen.

5 Evaluation und Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion

In diesem Kapitel wird der benötigte Handlungsprozess bei der virtuellen Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels digitalen 3-D-Menschmodellen hinsichtlich software-ergonomischer Aspekte schrittweise beschrieben, analysiert und beurteilt. Zudem sollen mögliche Schwachstellen des Prozesses ermittelt sowie Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden.

5.1 Ausgewähltes Beispiel: Simulation der Lenkspindelmontage

Aufgrund der darin vielfältig zu berücksichtigenden Untersuchungsaspekte wird aus der Montage eines Fahrzeuges exemplarisch die Simulation der Lenkspindelmontage (hier bei der Fertigung einer Limousine) herangezogen und nur in Einzelfällen auf weitere Beispiele (s. Anhang B) zurückgegriffen. In der folgenden Abbildung 5-1 ist das dazugehörige Simulationsszenario dargestellt.

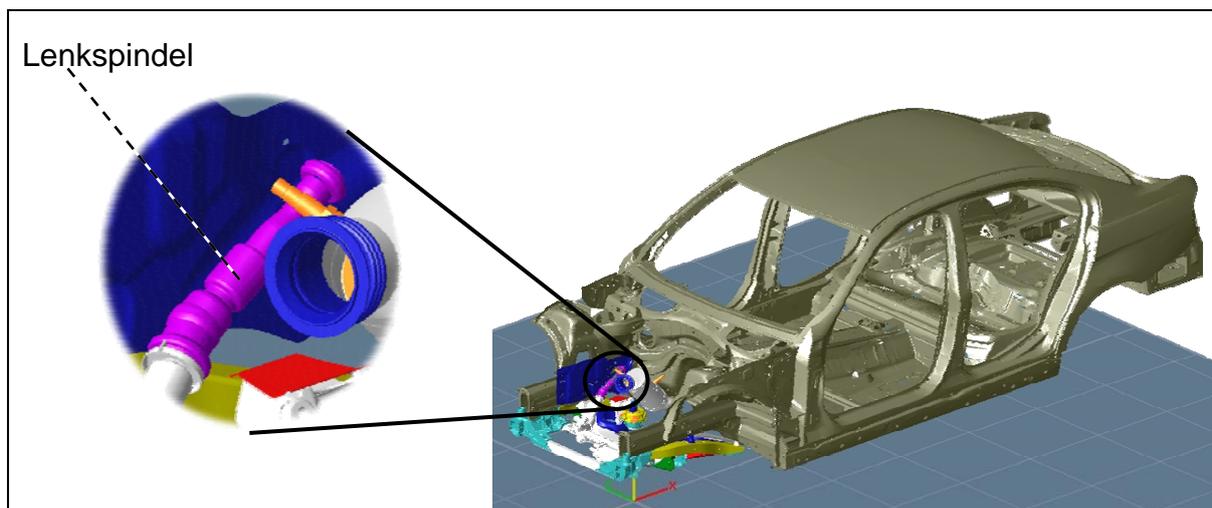


Abbildung 5-1: Simulationsszenario der Lenkspindelmontage (rechts) mit Detailsicht der Lenkspindel (links)

5.1.1 Beschreibung des Montagevorganges

Die Arbeitsanweisung gibt dem Montagearbeiter vor, die bereits im Bauraum des Fahrzeuges freihängend angebrachte Lenkspindel vom unteren Fahrzeugbereich aus mit einer Hand aufzunehmen, auf dem Lenkgetriebezapfen anzubringen und mit der Druckkraft F fest zu fügen (s. Abbildung 5-2). Im Anschluss soll eine visuelle

Kontrolle der Fügestelle durch den Montagearbeiter stattfinden. Für den Montagevorgang ist vorgesehen, dass sich die Karosserie in einer frei schwebend erhöhten Position befindet. Dies soll dem Montagearbeiter ermöglichen, seine Tätigkeit in einer stehenden Körperhaltung auszuüben.

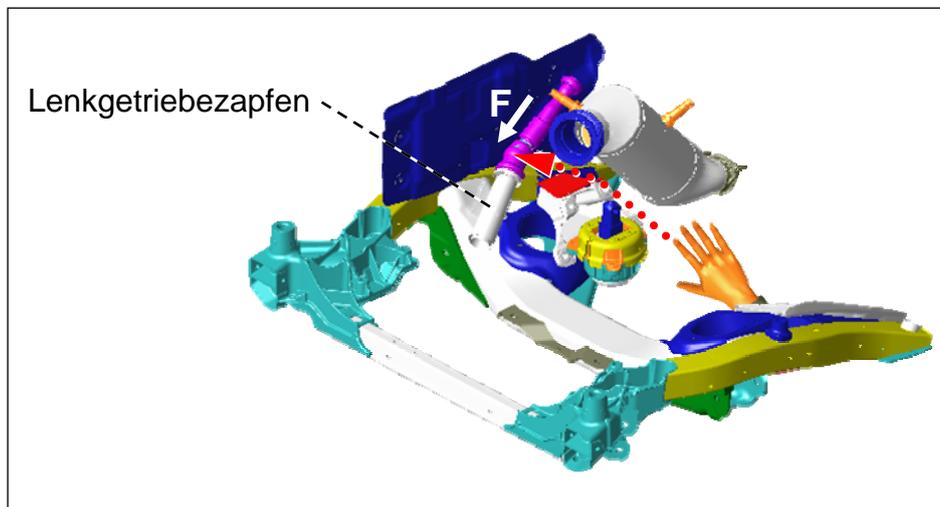


Abbildung 5-2: Bauraum mit geplantem Montageweg der Hand (gepunktete Pfeillinie)

5.1.2 Ziele der Simulation des Montagevorganges

Ziel der virtuellen Montageuntersuchung mit digitalen 3-D-Menschmodellen ist die Montageabsicherung. Das heißt, dass einerseits eine Aussage über eine manuelle Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der Lenkspindel für den Montagearbeiter bei dem in diesem Fall engen Bauraum getroffen werden soll (s. Abbildung 5-3). Erreichbarkeit liegt dann vor, wenn ein Objekt ohne Hindernisse im Greifraum liegt. Zugänglichkeit setzt darüber hinaus Kollisionsfreiheit voraus. Folglich müssen zusätzlich Hindernisse im Greifraum berücksichtigt werden. Es handelt sich damit um eine geometrische Betrachtung unter räumlichen Restriktionen [131]. Andererseits soll das virtuelle 3-D-Menschmodell darüber Aufschluss geben, ob für den Montagearbeiter auch eine ausreichende Einsehbarkeit der Montagestelle gegeben ist.

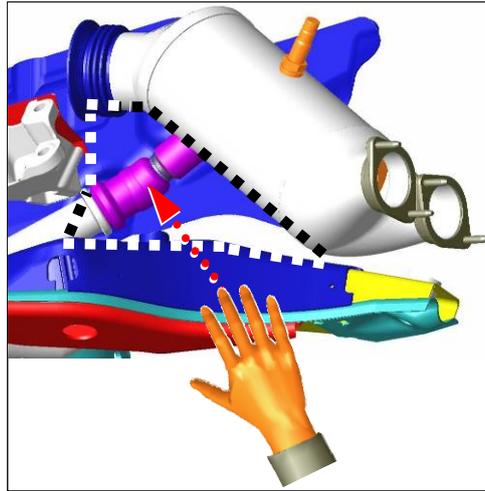


Abbildung 5-3: Zur Verfügung stehender Montagedurchlass (begrenzt durch die schwarz-weiß gestrichelte Linie)

Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und benötigte Einsehbarkeit vorausgesetzt, ist das nächste Ziel eine ergonomische Bewertung des Montagearbeitsplatzes. Diese beinhaltet unter anderem die Prüfungen auf ein mögliches Erbringen der benötigten Druckkraft durch den Montagearbeiter und auf langfristige Durchführbarkeit der Montagetätigkeit ohne gesundheitliche Langzeitschäden für den Mitarbeiter. Allerdings wird in dieser Arbeit nicht der dynamische Arbeitsablauf betrachtet. In der vorliegenden Arbeit wird sich der Autor auf eine ergonomische Bewertung der statischen Körperhaltung beschränken.

5.1.3 3-D-CAD-Modelle des Simulationsszenarios

Grundvoraussetzung für die Durchführung einer Montagesimulation sind die für das entsprechende Szenario nötigen 3-D-CAD-Modelle der Bestandteile des betrachteten Montagevorganges. Diese Modelle werden aus den CAD-Daten erzeugt und im CAD-System visualisiert.

5.1.3.1 Bestandteile eines Montagevorganges im Allgemeinen

Aus welchen Bestandteilen ein Simulationsszenario für die Untersuchung von Montagevorgängen prinzipiell bestehen kann, zeigt Abbildung 5-4.

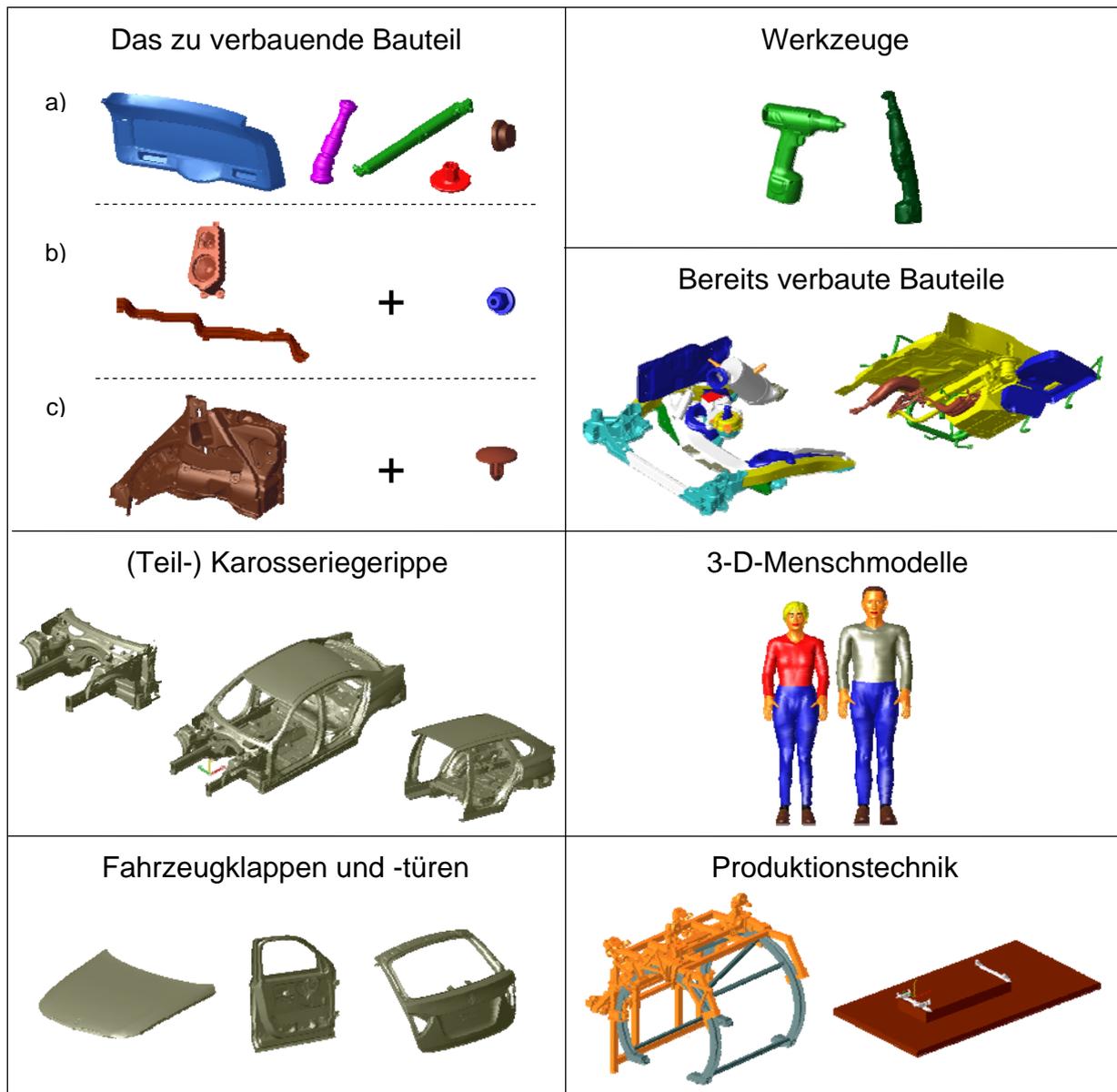


Abbildung 5-4: 3-D-CAD-Modelle der Bestandteile eines Montagesimulationsszenarios

Hinter dem zu verbauenden Bauteil können sich unterschiedliche Komponenten verbergen. Diese sind entweder:

- Ein einzelnes Bauteil (Verkleidung, Lenkspindel, Gasfeder, Stopfen, etc.),
- ein Bauteil mit Befestigungselementen, die zur Befestigung ein Werkzeug benötigen (z.B. ein Lautsprecher oder Kabelschacht mit den jeweils dazugehörigen Schrauben und Muttern) oder
- ein Bauteil mit Befestigungselementen, die vom Montagearbeiter von Hand montiert werden können (z.B. eine Schallisolierung mit Montageclips).

Des Öfteren sind jedoch einzelne der aufgeführten Bestandteile entweder im Montagevorgang nicht vorhanden oder im Simulationsszenario nicht notwendig. Sie sollen auch im Szenario zur Erhöhung der Softwareperformance bei der späteren Montageuntersuchung nicht betrachtet werden. So sind z.B. die komplette Fahrzeugrohkarosserie, die jeweils eingesetzte Struktur der Produktionstechnik sowie die Fahrzeugklappen und -türen nicht immer für die Montageuntersuchungen notwendig. Speziell die Fahrzeugtüren werden im Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet, da sie zu Beginn der Fahrzeugmontage abgehängt werden, um während der Montage Kratzer zu vermeiden und die Zugänglichkeit des Fahrzeuges für die Montagearbeiter zu erleichtern. Erst am Ende der Montagelinie werden die inzwischen vormontierten Türen wieder angebracht.

5.1.3.2 Für die Simulation relevante Bestandteile der Lenkspindelmontage

Für die beabsichtigte Untersuchung der Lenkspindelmontage sind die 3-D-CAD-Modelle der Bestandteile, die für das Simulationsszenario benötigt werden, in Abbildung 5-5 dargestellt.

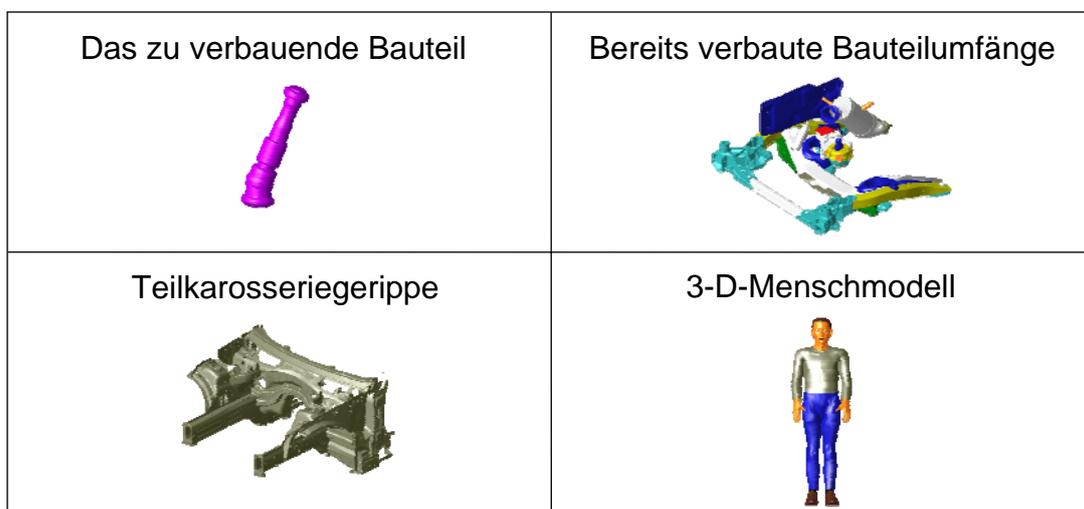


Abbildung 5-5: 3-D-CAD-Modelle der relevanten Bestandteile für das Simulationsszenario der Lenkspindelmontage

5.2 Evaluation und Optimierung des Handlungsprozesses

Vorangestellt seien diverse Anmerkungen zum methodischen Vorgehen und Verständnis bei der Evaluation des betrachteten Handlungsprozesses: Der grundsätzliche Ablauf zur Erstellung einer Montagesimulation mit digitalen 3-D-Menschmodellen

wird der Einfachheit halber in sechs logisch zusammenhängende Phasen, wie in Abbildung 5-6 schematisch dargestellt, untergliedert.

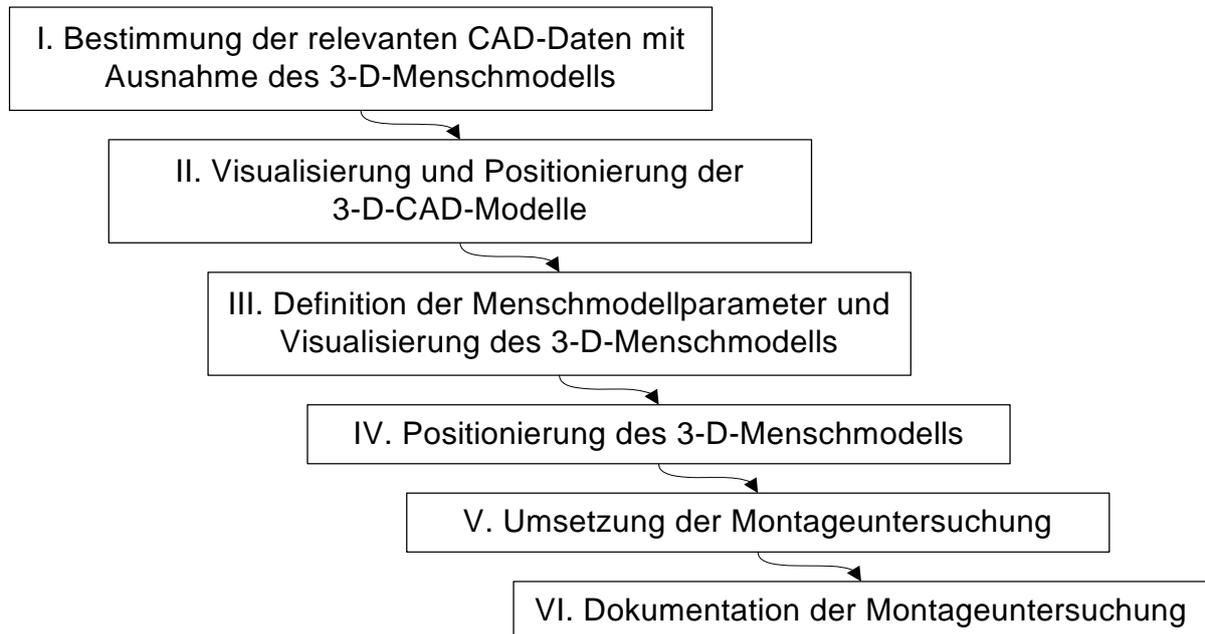


Abbildung 5-6: Phasen zur Erstellung einer Simulation manueller Montagevorgänge mit digitalen 3-D-Menschmodellen

Jede der sechs Phasen wird ihrerseits in fünf Schritten ausgearbeitet:

1. Beschreibung der Phase
2. Definition der Anforderungen: Die Anforderungen an virtuelle Absicherungen manueller Montagetätigkeiten mit digitalen 3-D-Menschmodell wurden im Rahmen mehrerer Arbeitskreise (Workshops) mit in dieser Art von Simulation erfahrenen Mitarbeitern aus der Montageabsicherung der BMW Group ermittelt (vgl. [26]) und werden jeweils in diesem Schritt dargelegt.
3. Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess): In diesem Schritt liegt der Fokus darauf, die minimal notwendigen Bedienschritte des Benutzers (Aktionen und Eingaben), z.B. Aufruf einer Funktion, Eingabe von Suchkriterien, usw. aufzuzeigen, die das Softwareprogramm benötigt, um das jeweilige Ziel der Phase zu erreichen. Diese Informationen wurden ebenso im Rahmen der durchgeführten Arbeitskreise ermittelt und festgelegt. Für die Evaluation eignet sich besonders die Visualisierung des Handlungsprozesses in Form von Flussdiagrammen [17] in Verbindung mit rollenbasierten vertikalen Schwimmbahnen (s. Abbildung 5-7) [128].

4. Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion (SOLL-IST-Vergleich): In diesem Schritt wird aus der gesammelten Erfahrung vieler durchgeführter Untersuchungen die gegenwärtige Vorgehensweise ebenso in Form von Flussdiagrammen vorgestellt und dem SOLL-Prozess sowie den zuvor formulierten Anforderungen gegenübergestellt. Als Folge des durchgeführten Vergleiches werden eventuelle Schwachstellen des Prozesses ermittelt und mögliche Optimierungsmaßnahmen einerseits zur Erfüllung gestellter Anforderungen und andererseits zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung solcher Simulationen abgeleitet und geschildert.
5. Zusammenfassung der Phase

Mit dieser Vorgehensweise und der damit möglichen unmittelbaren thematischen Nähe wird eine größere Übersichtlichkeit und einfachere Handhabung der Arbeit erreicht als bei genereller Trennung zwischen Anforderungsanalyse, Sollwiedergabe, kompletter Darstellung des IST-Zustandes und anschließender Diskussion.

5.2.1 Phase I: Bestimmung der relevanten CAD-Daten mit Ausnahme des 3-D-Menschmodells

5.2.1.1 Beschreibung der Phase

Die CAD-Datenbestände aller Fahrzeugprojekte eines Automobilherstellers sind sehr umfangreich und befinden sich in einer zentralen unternehmensinternen CAD-Datenbank. Inhalt dieser Phase ist die Bestimmung der für die anstehende Untersuchung relevanten CAD-Daten mit Ausnahme der des digitalen 3-D-Menschmodells, welche gesondert in der dritten Phase behandelt werden.

5.2.1.2 Definition der Anforderungen

Diese Phase unterliegt folgenden Anforderungen:

- Nutzung der Originalmodelle der Geometriedaten (CAD-Daten)
- Automatisierte Bestimmung der relevanten CAD-Daten

5.2.1.3 Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)

Der Idealablauf zwischen Aktionen bzw. Eingaben und Ausgaben ist in Abbildung 5-7 in grafischer Form dargestellt. Die linke Bahn stellt die *minimal notwendigen Bedienschritte* durch den Benutzer dar. In der mittleren Bahn sind die *ausgelösten Systemprozesse* aufgestellt. In der rechten Bahn sind die *Ausgaben* zu finden.

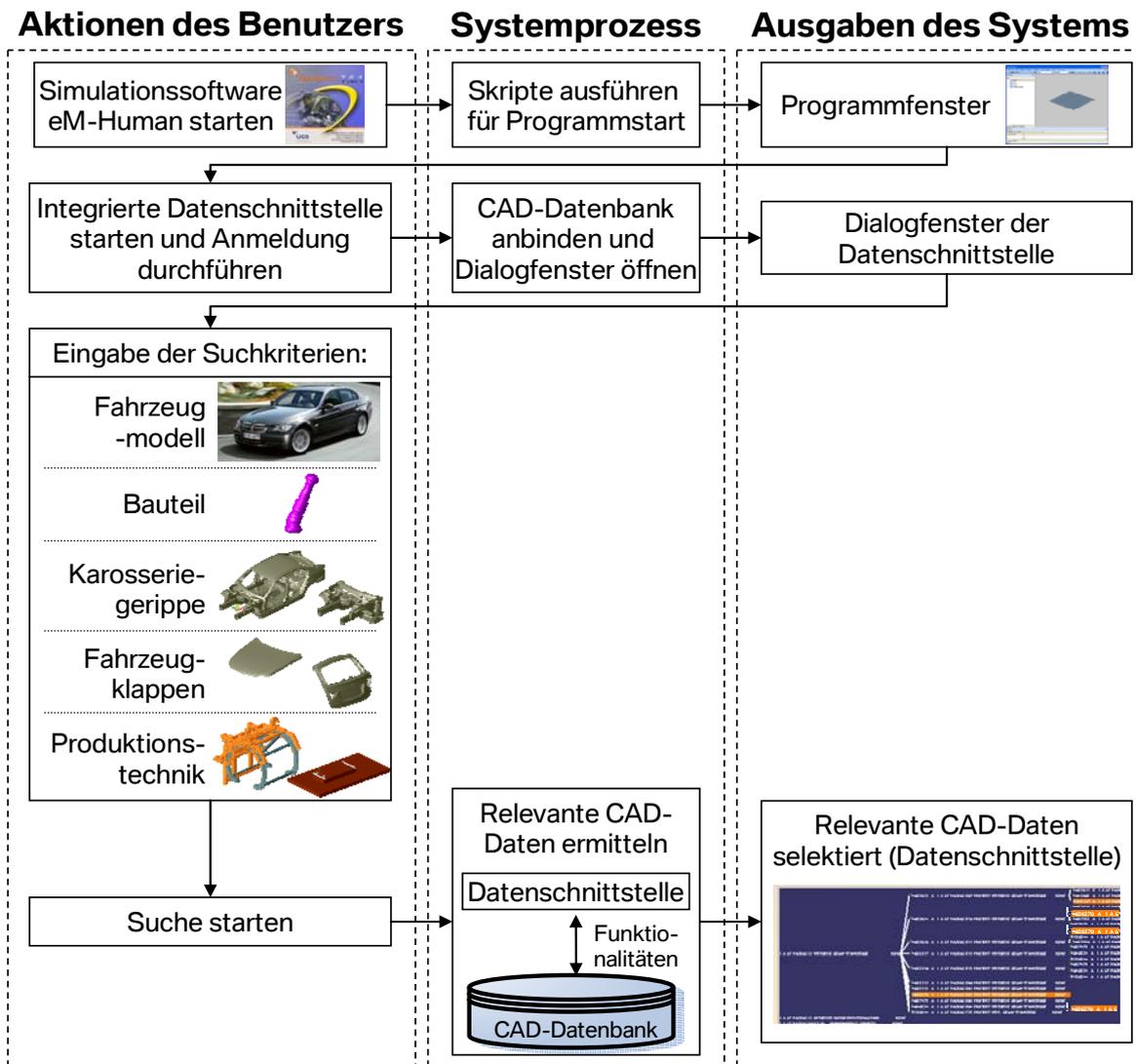


Abbildung 5-7: Idealablauf zur Bestimmung der relevanten CAD-Daten (rechts unten), hier orange dargestellt, mit Ausnahme des 3-D-Menschmodells (SOLL-Prozess)

Zunächst wird die betrachtete Simulationssoftware eM-Human gestartet und eine Anbindung an die CAD-Datenbank hergestellt. Darauf sind die Suchkriterien festzulegen. Diese sind in der linken Bahn der Abbildung 5-7 aufgelistet und sollen vom Benutzer in die Datenschnittstelle eingegeben werden. Für die Suche benötigt das System die Eingabe der ersten zwei Kriterien, im betrachteten Fall die BMW 3er Limousine (mit der gewünschten Lenker- und Motorvariante) und die Lenkspindel.

Anhand dieser sollte nach Aussage der Experten das System in der Lage sein, aus der CAD-Datenbank die CAD-Daten für die einzelnen Untersuchungsfälle automatisch zu ermitteln. Um jedoch die Suche auf die relevanten CAD-Daten einzuschränken, muss der Benutzer vorweg außerdem die Entscheidung treffen, ob und in welcher Form die drei folgenden Bestandteile im Simulationsszenario betrachtet werden:

- das Karosseriegerippe: vollständig, teilweise oder gar nicht (im betrachteten Fall der Vorderwagen),
- die Fahrzeugklappen: alle, eine (z.B. die Frontklappe) oder gar keine (im betrachteten Fall gar keine) und
- die Produktionstechnik: vollständig (z.B. das C-Gehänge, s. Abbildung 5-7), teilweise oder gar nicht (im betrachteten Fall gar nicht).

Die somit als relevant ermittelten CAD-Daten unter den Ausgaben in der rechten Bahn sind im Graph des Strukturbaumes orange gekennzeichnet.

5.2.1.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die für die Montageuntersuchungen herangezogene Simulationssoftware eM-Human besitzt keine Datenschnittstelle zur unternehmensinternen CAD-Datenbank. Außerdem unterstützt sie weder das Datenformat der im Unternehmen vorhandenen CAD-Originalmodelle der Szenariogeometrie (*.model bzw. *.CATPart) noch das Ersatzformat der davon bereits tesselierten, d.h. vereinfachten, Geometriedaten (*.cgr). Bei der bisherigen Vorgehensweise (s. Abbildung 5-8, besonders zeitintensive Schritte sind mit dem Symbol  gekennzeichnet) hat dies zur Folge, dass der Benutzer zunächst die relevanten CAD-Daten in einem zusätzlichen CAD-System (CATIA V5), das die verfügbaren CAD-Daten visualisieren kann, zusammenstellt. Daraufhin wird aus den ermittelten CAD-Daten über mehrere Konvertierungsschritte das erforderliche Datenformat aufwändig manuell generiert.

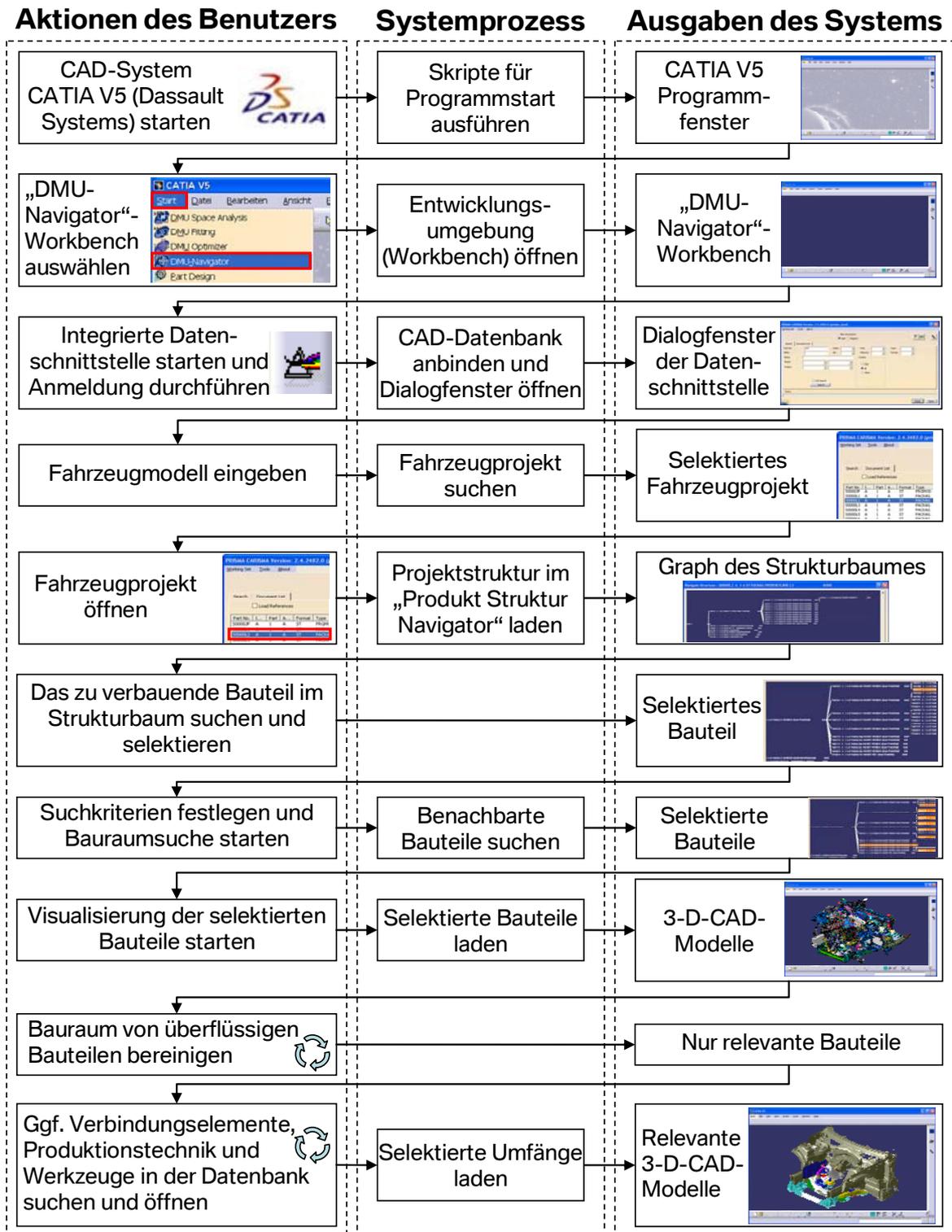


Abbildung 5-8: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Bestimmung und Visualisierung der relevanten CAD-Daten in CATIA V5 (IST-Prozess)

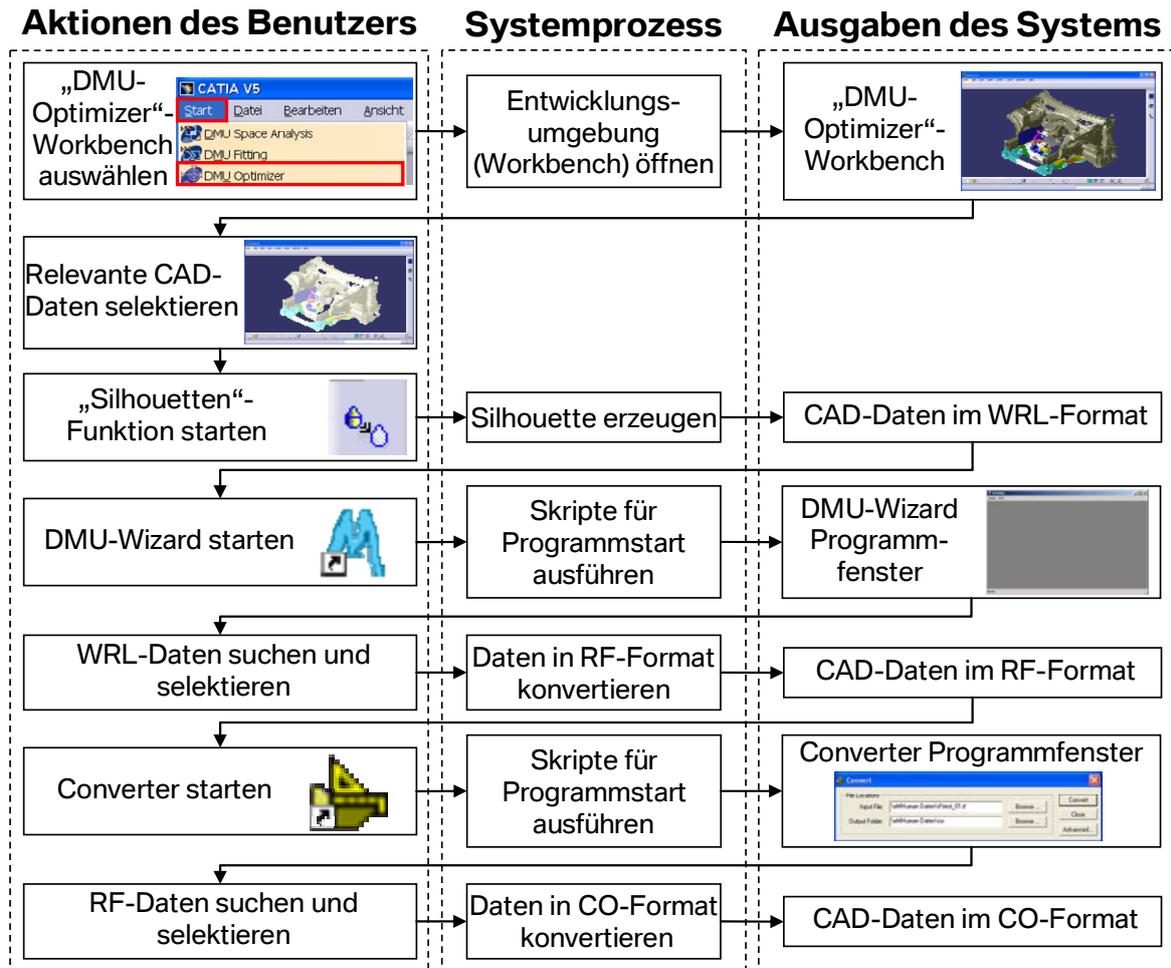


Abbildung 5-9: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Konvertierung der relevanten CAD-Daten (IST-Prozess)

An dem oben dargestellten Ablauf ist erkennbar, dass die derzeitige Vorgehensweise durch eine Vielzahl von manuellen Aktionen und Eingaben geprägt ist (s. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9, linke Bahn). Hinter einigen Aktionen, wie z.B. bei der Bereinigung des Bauraumes, verbirgt sich ein hoher manueller Aufwand. Dabei wird vom Softwarebenutzer detailliertes Wissen über die genauen Bauteilumfänge, die bei der jeweiligen Untersuchung betrachtet werden müssen, und auch über den Montageprozess per se verlangt. Durch die daraus entstehende uneinheitliche Methode zur Bestimmung der relevanten CAD-Daten besteht überdies die Möglichkeit, von der ursprünglichen Montageplanung abweichende Untersuchungsszenarien zur Analyse heranzuziehen. Somit wird die geforderte automatische Bestimmung der relevanten CAD-Daten nicht erfüllt.

Auch die Anforderung einer direkten Nutzbarkeit der bereits vorhandenen unternehmensinternen CAD-Daten der relevanten Umfänge wird nicht erfüllt. Stattdessen

werden die als relevant ermittelten CAD-Daten entweder gesamthaft in eine Datei oder aufwändig einzeln in diverse Dateien gespeichert und diese über mehrere Schritte in das erforderliche Dateiformat konvertiert. Die Bereitstellung einer einzelnen Datei wirkt sich hemmend auf den Arbeitsfluss aus, z.B. wenn Modelländerungen und dadurch bedingte Änderungen gewisser CAD-Daten stattgefunden haben und gleichzeitig eine sofortige Visualisierung erforderlich ist. In diesem Fall muss das komplette Szenario erneut zusammengestellt und konvertiert werden. Wenn zusätzlich einzelne Bauteile im Szenario bewegt werden sollen, hilft nur die getrennte Speicherung der einzelnen Bestandteile. Außerdem erfordert die lokale Speicherung der in unterschiedliche Formate konvertierten CAD-Daten zusätzlichen Speicherplatz und darüber hinaus einen erhöhten Verwaltungs- und Aktualisierungsaufwand.

Eine Erleichterung in diesem Zusammenhang stellt die vollautomatische Konvertierung der vorhandenen CAD-Daten in das erforderliche Zielformat dar. Neben dem spezifischen Tecnomatix CO-Format unterstützt die Simulationssoftware auch das weltweit verbreitete JT-Format. Deshalb ist eine Konvertierung der Daten in eines dieser Formate zweckmäßig. Durch deren Speicherung in dieselbe zentrale CAD-Datenbank sowie laufende automatische Aktualisierung wird sichergestellt, dass die benötigten CAD-Daten in der Datenbank singularär auftauchen und gleichzeitig unternehmensweit abrufbar sind. Damit auch diese Daten von eM-Human direkt abgerufen werden können, ist zusätzlich eine dort integrierte Datenschnittstelle notwendig (s. Abbildung 5-10).

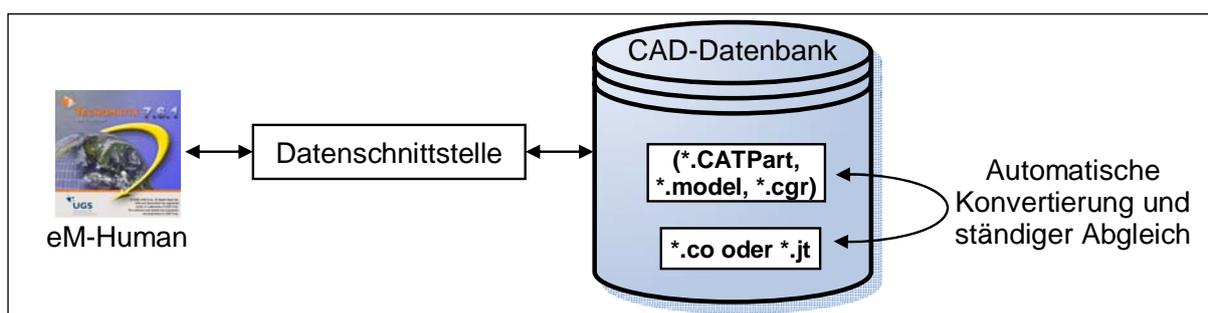


Abbildung 5-10: Vorgeschlagenes optimiertes Datenmanagement

Durch diese Optimierungsmaßnahmen kann auf die Nutzung von CATIA V5 verzichtet werden. Lediglich die zwei dort bereits vorhandenen Funktionalitäten der Bauteilsuche und der nachbarschaftlichen Bauraumsuche sind in die neue Datenschnittstelle zu implementieren. Für eine schnelle und eindeutige Bestimmung der relevanten CAD-Daten ist jedoch eine zusätzliche dritte Funktionalität erstrebenswert. Diese soll

automatisch die CAD-Daten der im Fahrzeug bereits verbauten Bauteile ermitteln. Dafür bildet eine Bauliste die Montagereihenfolge des virtuellen Fahrzeuges ab (s. Tabelle 5-1).

Takt	Bauteil mit Montagertext	Befestigungs-konzept	Montagewerkzeug	Produktionstechnik
35	Tülle für Zulaufschlauch in Stirnwand montieren	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
35	Abdecktopf in Seitenwand montieren	Schraube ASA M8X28	Akku-Schrauber xy	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
35	Einfüllklappe auf Scharnierarm Abdecktopf montieren	Sechskantschraube M6X40	Akku-Schrauber xy	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
36	Anschlagpuffer Frontklappe montieren rechts	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
36	Anschlagpuffer Frontklappe montieren links	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
36	Kombihalter montieren	Schraube ASA M8X28	Akku-Schrauber xy	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
36	Bowdenzug Frontklappe montieren (Linkslenker)	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
36	Gasfeder Heckklappe rechts montieren	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
37	Gasfeder Heckklappe links montieren	-	-	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung
37	Schallisolierung-Radhaus links und rechts montieren	Stopfen D5	-	C-Gehänge

Tabelle 5-1: Auszug aus einer fiktiven Bauliste

In der Bauliste stehen alle in das Fahrzeug zu verbauenden Bauteile in der vorgesehenen Reihenfolge (Prozesssicht) tabellarisch zur Verfügung und sind jeweils mit den dazugehörigen CAD-Daten (Produktsicht) aus der CAD-Datenbank verknüpft. Um darüber hinaus bei Bedarf zusätzlich relevante CAD-Daten vom System automatisch bestimmen zu lassen, beinhaltet diese Datei weitere Informationen. Dies sind, falls im Montagevorgang vorhanden, konkrete Angaben zu Befestigungselementen, dafür eingesetzte Montagewerkzeuge und die jeweilige Produktionstechnik, die ebenso mit den jeweiligen CAD-Daten verknüpft sind. Der Inhalt dieser Tabelle wird einmalig manuell von den jeweiligen Montageplanern ausgefüllt und mit den erforderlichen Verknüpfungen versehen. Danach wird diese Liste laufend aktuell gehalten und bei einem neuen Fahrzeugprojekt als Ausgangsbasis eingesetzt.

Anhand der Kombination der drei Funktionalitäten wird einerseits das Filtern der sich in Bauteilnähe befindlichen Bauteile und andererseits die ausschließliche Einbeziehung der bis dahin verbauten Bauteile ermöglicht. Im Hinblick auf eine rasche Ermitt-

lung der gesuchten Umfänge durch das System ist allerdings auf die Abfolge der Abarbeitung dieser Funktionalitäten zu achten. Wird das zu verbauende Bauteil zu einem frühen Zeitpunkt montiert, so ist die Anzahl der bereits verbauten Bauteile in Bauteilnähe eher gering. Aus diesem Grunde sollte das System zuerst die Bauteile ermitteln, die bis zu diesem Zeitpunkt im Fahrzeug schon verbaut worden sind, und darauf folgend die nachbarschaftliche Bauraumsuche durchführen. Wird hingegen das Bauteil zu einem späteren Zeitpunkt verbaut, so ist die umgekehrte Abarbeitung dieser zwei Funktionalitäten empfehlenswert. Der Zeitpunkt dieser Funktionalitätenumkehr ist zuvor festzulegen und hängt überwiegend von der Anzahl an Montagevorgängen des einzelnen Fahrzeuges ab.

5.2.1.5 Zusammenfassung der Phase

Der derzeit hohe Arbeitsaufwand für den Benutzer in Phase I ergibt sich im Wesentlichen aus zwei Aspekten:

- Die zunächst weitestgehend manuelle Zusammenstellung des Simulations-szenarios in einem zusätzlichen CAD-System (CATIA V5) und
- die darauf notwendige Datenkonvertierung der ermittelten CAD-Daten.

Eine Erleichterung in diesem Zusammenhang stellt die vollautomatische Konvertierung der vorhandenen CAD-Daten in das erforderliche Zielformat dar. Damit auch diese Daten von eM-Human direkt abgerufen werden können, ist zusätzlich eine Datenschnittstelle notwendig. Diese soll anhand bestehender Funktionalitäten und einer zusätzlichen Funktionalität, die die CAD-Daten der im Fahrzeug bereits verbauten Bauteile ermittelt, alle relevanten CAD-Daten automatisch bestimmen.

Zur Umsetzung des zuvor postulierten Idealablaufes (s. Abschnitt 5.2.1.3, Abbildung 5-7), werden die soeben vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen in der Abbildung 5-11 ganzheitlich zusammengetragen.

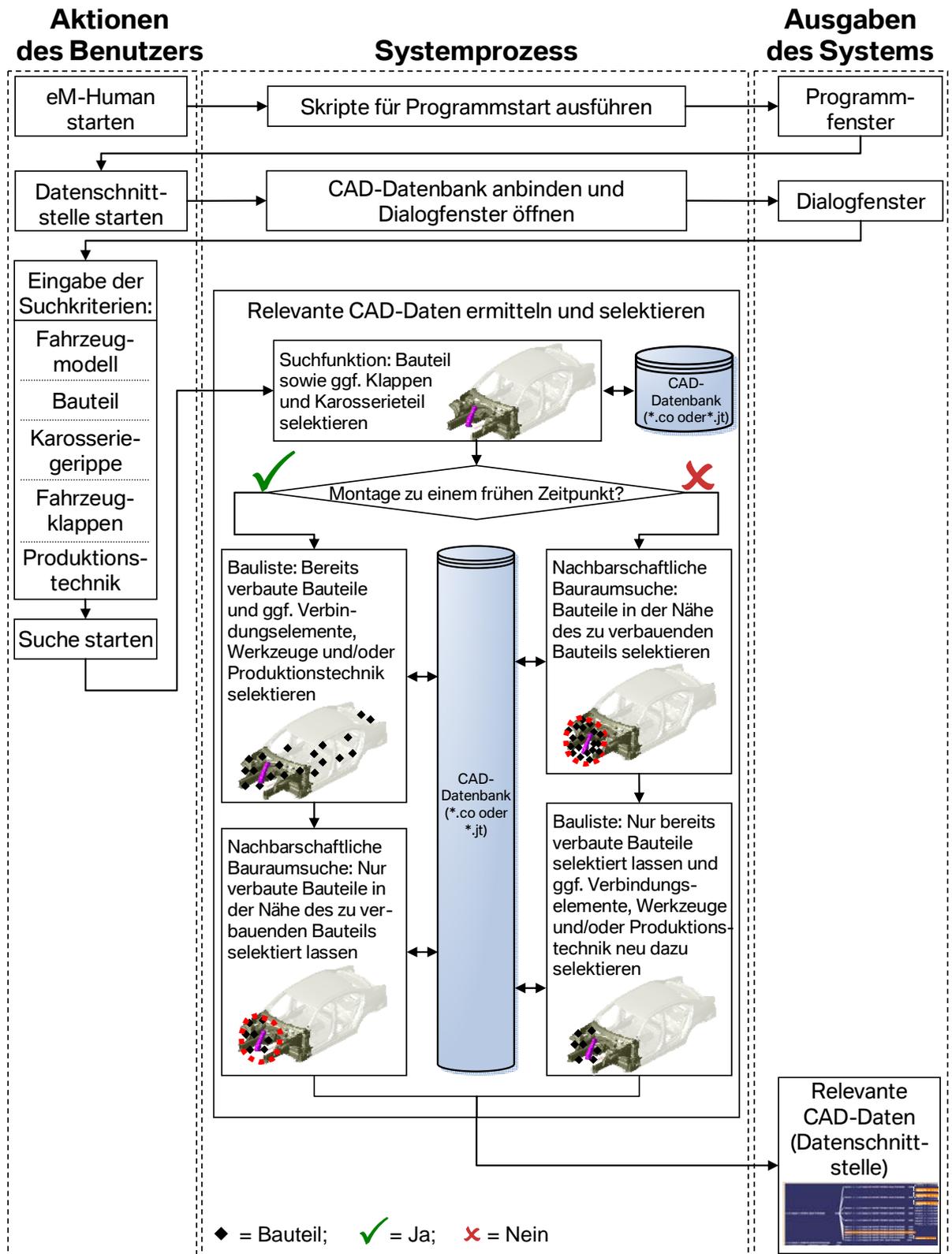


Abbildung 5-11: Optimierter Handlungsprozess zur Bestimmung der relevanten CAD-Daten mit Ausnahme des 3-D-Menschmodells

5.2.2 Phase II: Visualisierung und Positionierung der 3-D-CAD-Modelle

5.2.2.1 Beschreibung der Phase

In dieser Phase werden die 3-D-CAD-Modelle der zuvor ermittelten relevanten CAD-Daten visualisiert und in die für den konkreten Montagevorgang geplante Lage im Szenario gebracht (s. Abbildung 5-12, links). Damit in der folgenden Evaluation ein breites Spektrum an möglichen Szenariokonstellationen mit den dafür benötigten Bedienschritten eingeschlossen wird, werden in dieser Phase alle restlichen Bestandteile (z.B. Produktionstechnik, Klappen,...) betrachtet, die bei der Untersuchung im Szenario zusätzlich vorkommen können (s. Abbildung 5-12, rechts).

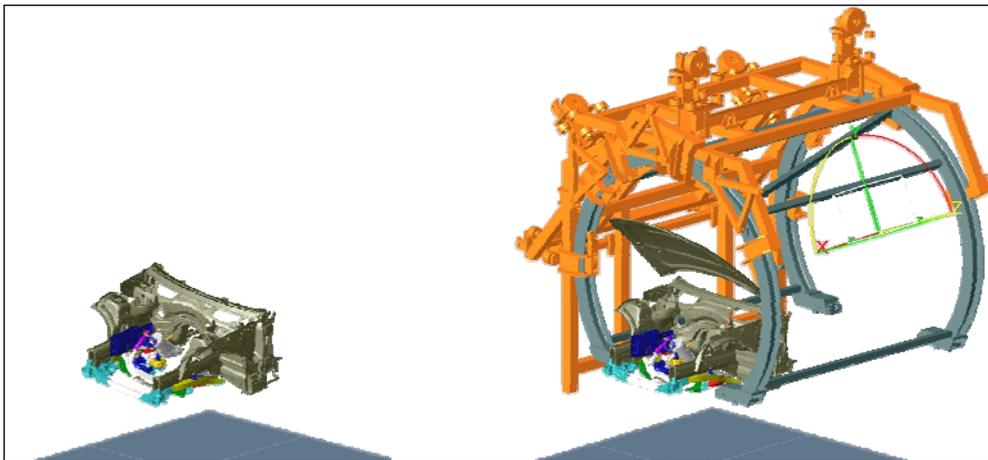


Abbildung 5-12: Links: Positionierte 3-D-CAD-Modelle der relevanten CAD-Daten des betrachteten Montagevorganges. Rechts: Nach Hinzufügen restlicher Bestandteile.

5.2.2.2 Definition der Anforderungen

Die Anforderung für diese Phase lautet:

- Positionierung und Ausrichtung der Szenariobestandteile im Raum: Dies beinhaltet, dass alle Bestandteile im Szenario in Abhängigkeit des Montageortes in der exakt vorgesehenen Position und Ausrichtung angebracht werden.

5.2.2.3 Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)

Idealerweise ist der in Abbildung 5-13 gezeigte Ablauf erforderlich. Die dargestellten Bauteile in der Bahn „Aktionen des Benutzers“ gehören nicht zur in diesem Fall behandelten Montageuntersuchung und dienen nur der Veranschaulichung.

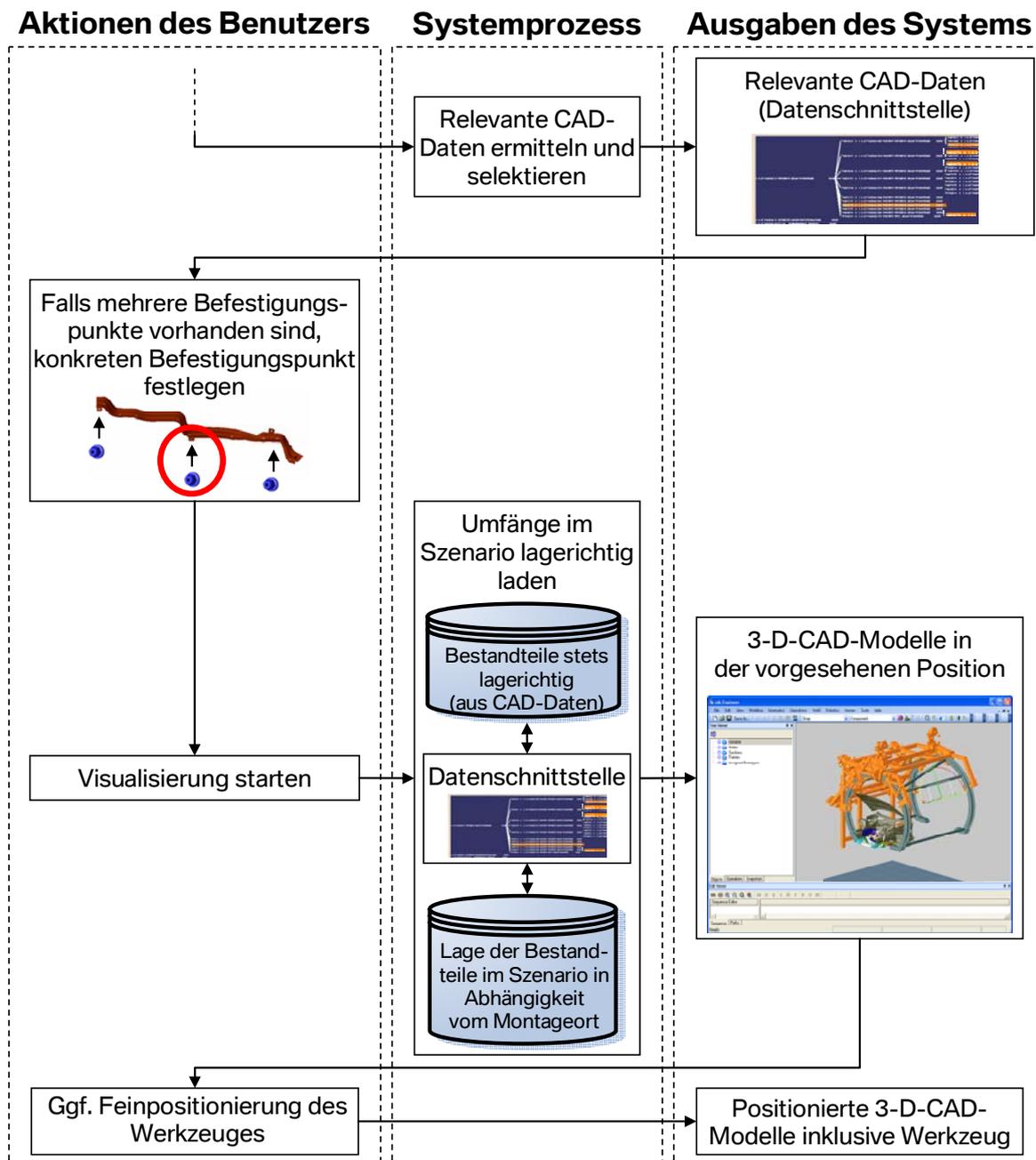


Abbildung 5-13: Idealablauf zur Visualisierung und Positionierung der 3-D-CAD-Modelle (SOLL-Prozess)

Dieser Prozess setzt voraus, dass die Lage sämtlicher Szenariobestandteile in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (mathematisches Kürzel: 3-D-KOS) definiert ist und einerseits automatisch aus den CAD-Daten entnommen wird, andererseits in

diesem alle Bestandteile auch in Abhängigkeit vom Montageort (Takt in der Fertigungslinie) automatisch positioniert werden. Dabei wird der konkrete Montageort in der Fertigungslinie über den Montagezeitpunkt des zu verbauenden Bauteils, das bereits in Phase I festgelegt wurde, aus der Bauliste ermittelt. Wenn gleichzeitig mehrere Befestigungspunkte vorhanden sind, kann bei der Montage eines Bauteils in Abhängigkeit davon, welcher spezielle Befestigungspunkt im untersuchten Szenario betrachtet werden soll, lediglich das benötigte Werkzeug unterschiedlich positioniert werden, sofern dieses benötigt wird. In solch einem Fall ist die Eingabe des betrachteten Befestigungspunktes vom Benutzer zuvor festzulegen. Mit dieser Eingabe und nach dem Start der Visualisierung sollen die 3-D-CAD-Modelle im Szenario lagerichtig angebracht werden (s. Abbildung 5-13, rechts Mitte). Da das Werkzeug variabel um den Befestigungspunkt positioniert sein kann und eventuell Kollisionen auftreten können, wird dieses gegebenenfalls zuletzt von Hand zusätzlich positioniert.

5.2.2.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die bisherige Vorgehensweise weist einen komplexen Handlungsprozess auf. Dieser wird deshalb in kleinere Schritte unterteilt (s. Abbildung 5-14) und zunächst einzeln abgehandelt. Sich hier eventuell ergebende Optimierungsmöglichkeiten werden zu einem optimierten Gesamtprozess zusammengetragen.

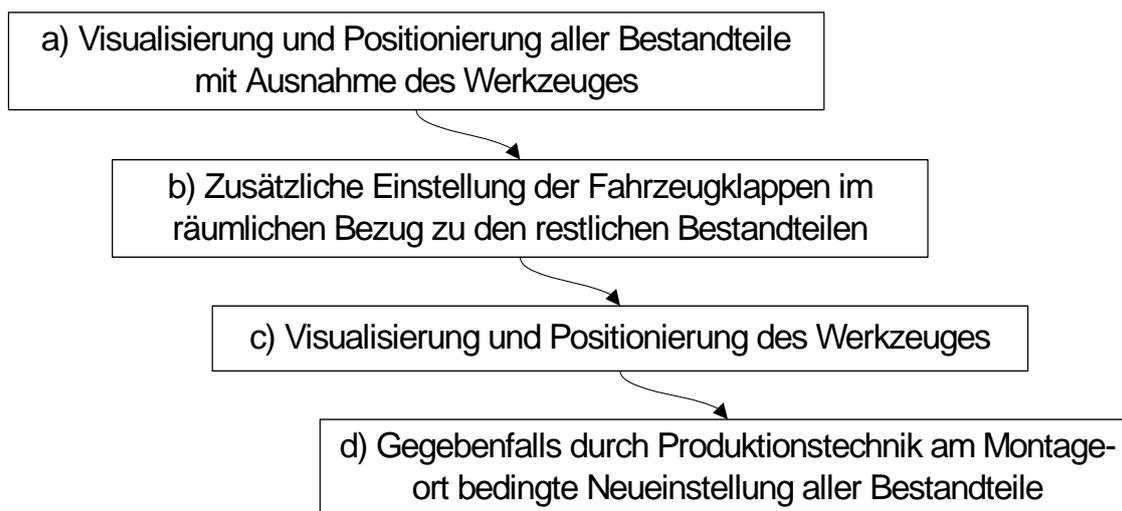


Abbildung 5-14: Schritte zur Visualisierung und Positionierung der 3-D-CAD-Modelle

Nachdem das Simulationsszenario aufbereitet wurde, müssen oft nachträglich weitere Bestandteile lagerichtig hinzugefügt werden, wenn Änderungen am Bestandteil

selbst vorgenommen oder weitere Bestandteile bei Änderungen der Montagereihenfolge hinzugefügt werden. Dieser Fall wird im Anschluss behandelt (e).

a) Visualisierung und Positionierung aller Bestandteile mit Ausnahme des Werkzeug

Abbildung 5-15 zeigt den derzeit notwendigen Handlungsprozess.

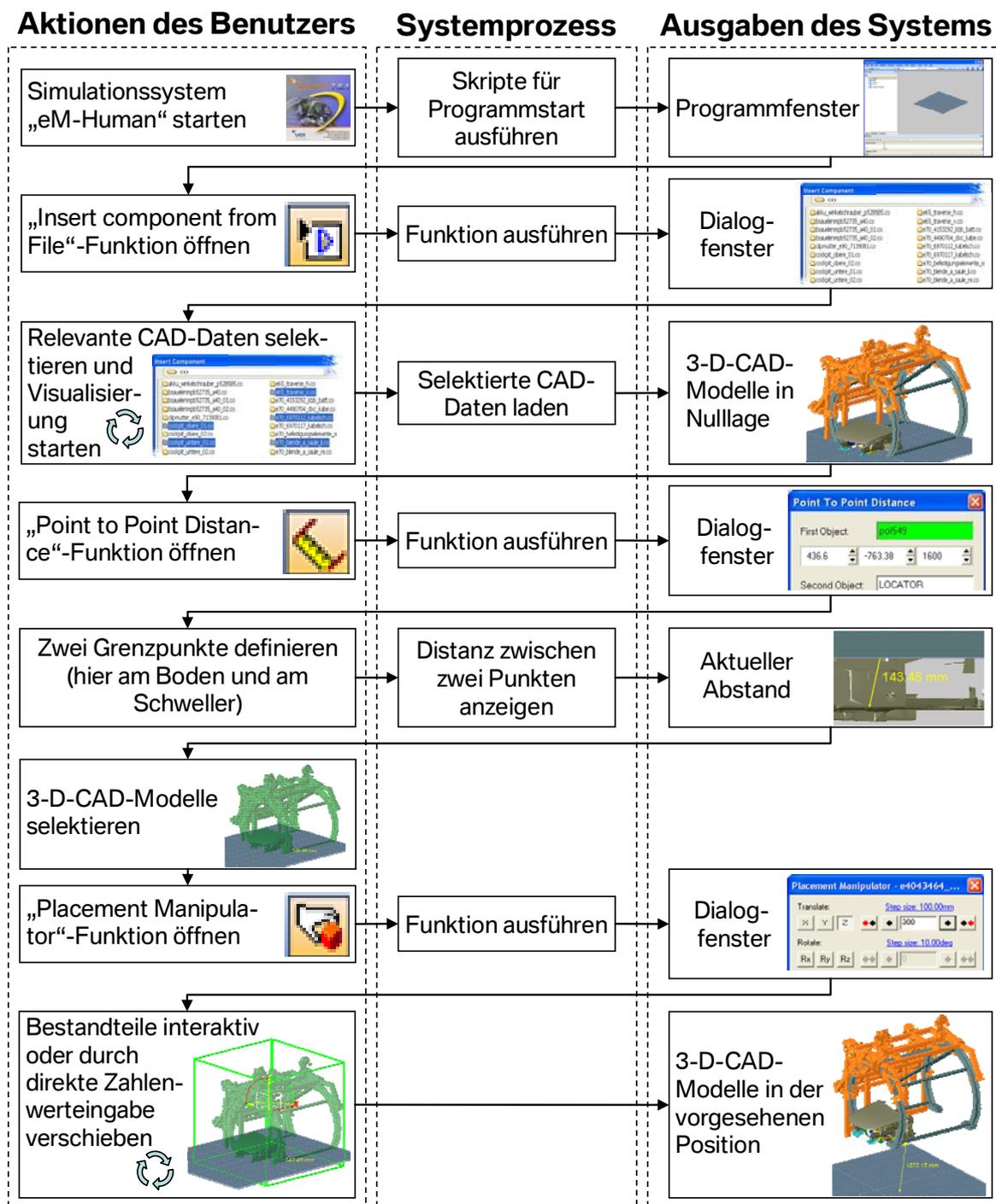


Abbildung 5-15: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Visualisierung und Positionierung aller Bestandteile mit Ausnahme des Werkzeuges (IST-Prozess)

Auch in diesem Handlungsprozess ist erkennbar, dass der Benutzer viele Eingaben manuell vornehmen muss. Hervorzuheben ist, dass die Simulationssoftware eM-Human entgegen dem zuvor postulierten Idealablauf bisher erst in dieser Phase gestartet wird. Ferner muss der Benutzer bei der manuellen Wahl der zuvor konvertierten relevanten CAD-Daten darauf achten, dass er nur die Bestandteile selektiert, die zu der betrachteten Montageuntersuchung gehören. Dieser Mehraufwand, der eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt, wird jedoch durch die Realisierung der in der vorherigen Phase vorgeschlagenen Datenschnittstelle beseitigt. Somit können die dort ermittelten CAD-Daten direkt in eM-Human geladen werden.

Positiv zu beurteilen ist die Tatsache, dass bis auf das Werkzeug, das gesondert im zweiten Schritt behandelt wird, die im so genannten Fahrzeug-KOS definierte Lage aller 3-D-CAD-Modelle, auch im Lageverhältnis zueinander, aus den CAD-Daten entnommen wird. Den Koordinatenursprung repräsentiert der Fahrzeugnullpunkt, welcher sich bei Fahrzeugen in der Mitte einer gedachten Linie zwischen den Mittelpunkten der Vorderräder befindet. Die x-Achse zeigt entgegen der Fahrtrichtung des Fahrzeuges, die z-Achse nach oben und die y-Achse nach rechts. Somit wird die Fahrzeugkarosserie anfangs am Boden generiert (s. Abbildung 5-16, links).

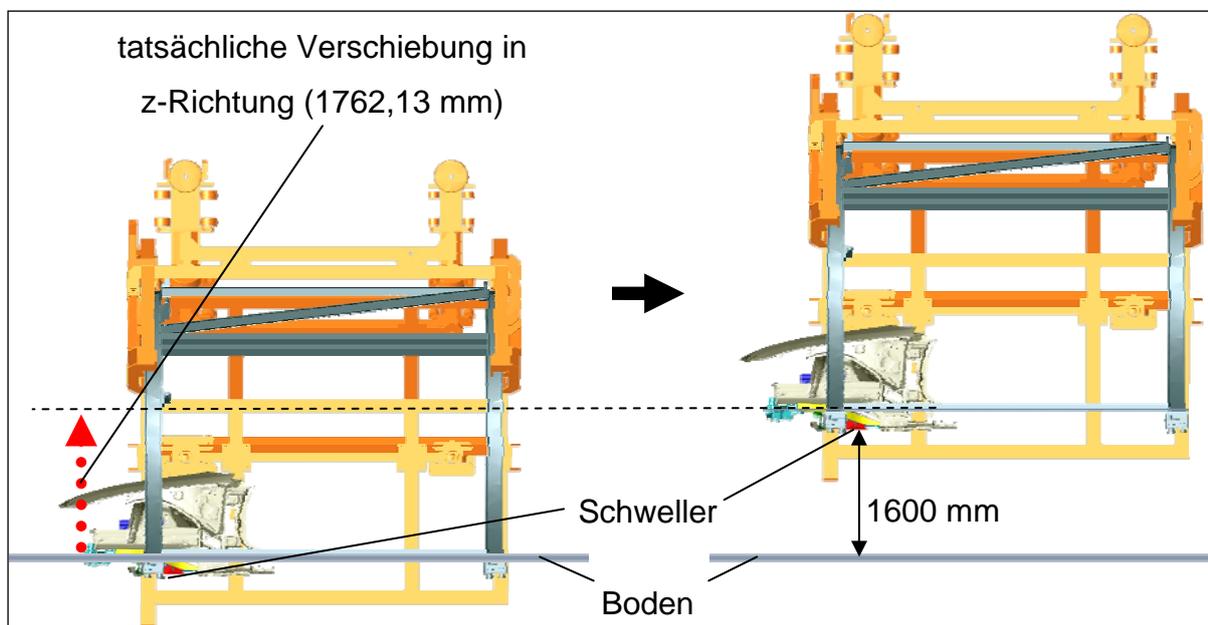


Abbildung 5-16: Seitenansicht des Szenarios. Links: Bestandteile in Nulllage. Rechts: Bestandteile in der geplanten Montagelage.

Für die räumliche Ausrichtung der Bestandteile ist die Lage der Karosserie maßgeblich. Die genaue Lage wird von der Montageplanung vorgegeben und soll sich für den konkreten Montagevorgang in einer frei schwebend waagerechten erhöhten

Position befinden. Deshalb muss diese darauf aufwändig samt allen Bestandteilen vertikal im Raum verschoben werden. Dafür wird der Abstand zwischen dem Schwel-ler und dem Boden eingestellt (in diesem Fall $z = 1600$ mm). Um diesen Abstand einzustellen, behilft man sich der „Point to Point Distance“-Funktion. Anschließend erfolgt die Verschiebung der Bestandteile mit Hilfe der „Placement Manipulator“-Funktion anhand zweier zuvor festgelegter Punkte im aktuellen Abstand, ihrer Werte im KOS mitsamt der Komponenten und des sich daraus ergebenden Vektors. Dem-nach werden die Bestandteile im Rahmen eines langwierigen Prozesses so lange im Raum bewegt, bis die z-Komponente den gewünschten Wert aufweist.

Von Vorteil wäre an dieser Stelle, zu jedem Montageort die benötigte Verschiebung der Karosserie und der anderen Bestandteile bezüglich des Szenariokoordinatenur-sprungs (in diesem Fall $1762,13$ mm in z-Richtung) zu kennen. Dieser Wert wird z.B. in der Datenschnittstelle, bevor die dort ermittelten CAD-Daten visualisiert werden, eingegeben und hieraus die Bestandteile im Szenario in der geplanten Lage visuali-siert (s. Abbildung 5-16, rechts). Ferner kann die Eingabe der Werte gänzlich erspart bleiben, wenn diese z.B. in der Bauliste bei jedem Takt zu finden sind, und die Da-tenschnittstelle diese automatisch übernimmt.

b) Zusätzliche Einstellung der Fahrzeugklappen im räumlichen Bezug zu den restli-chen Bestandteilen

Die Fahrzeugklappen werden im Regelfall im geschlossenen Zustand im Szenario geladen. Bei manchen Montagevorgängen ist es jedoch erforderlich, diese in einem bestimmten Öffnungswinkel einzustellen. Beispielhaft wird hier die zusätzliche Ein-stellung der Frontklappe behandelt (s. Abbildung 5-17).

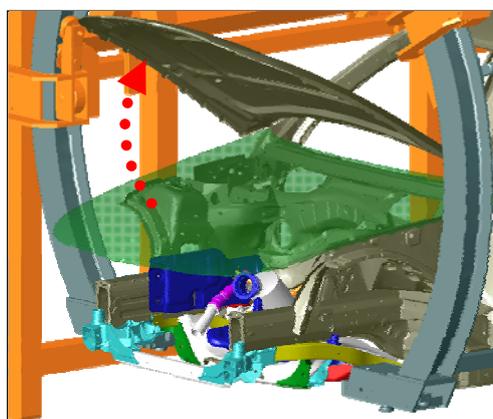


Abbildung 5-17: Frontklappe im geschlossenen (grün gezeigt) und offenen Zustand

Abbildung 5-18 zeigt in zusammengefasster Form die derzeitige Vorgehensweise.

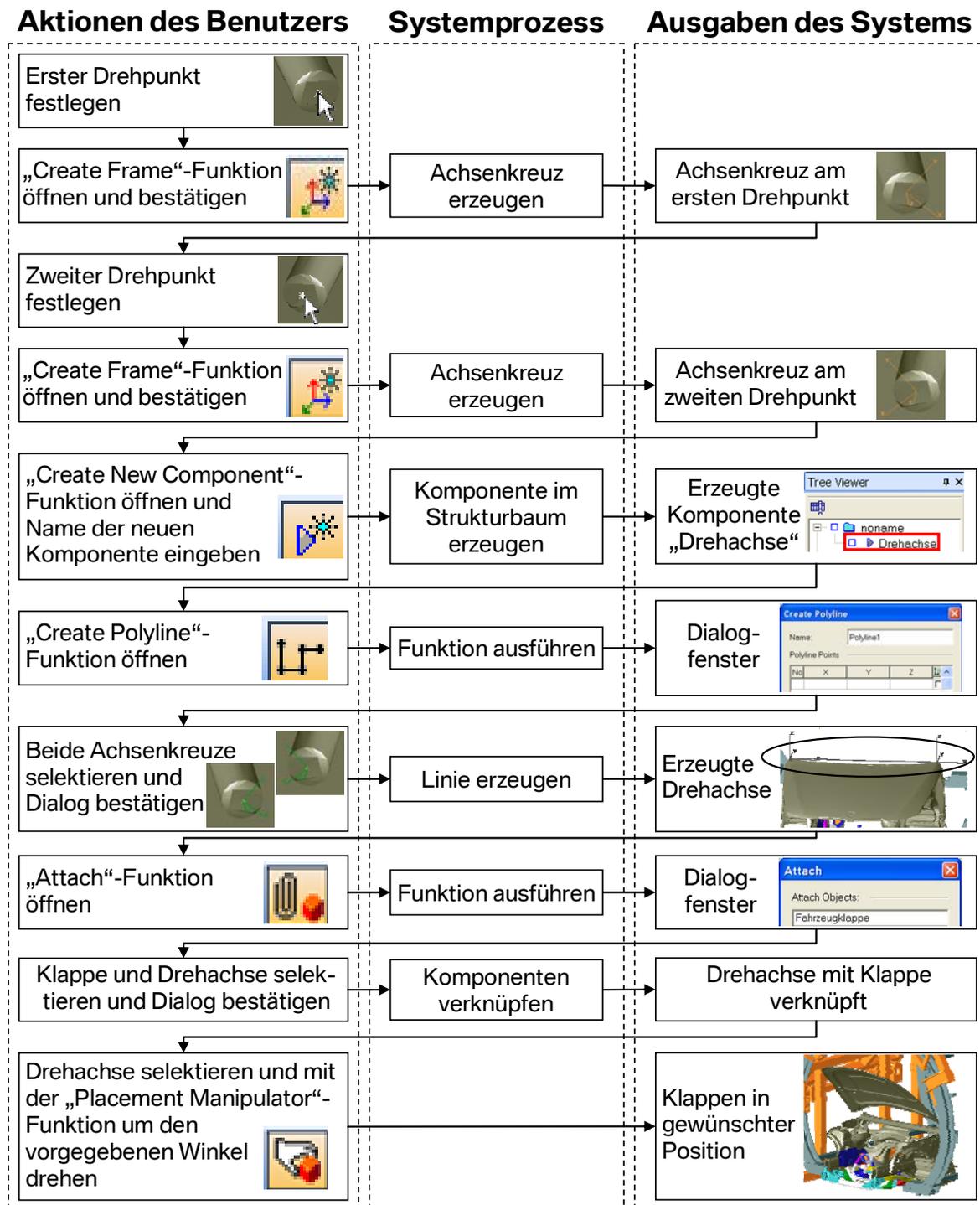


Abbildung 5-18: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur zusätzlichen Einstellung der Frontklappe (IST-Prozess)

Die Bewegungskinetik der Klappe, anhand derer diese eingestellt werden könnte, steht in der Simulationssoftware nicht zur Verfügung. Deshalb wird bei eingelenkigen Scharnieren über mehrere Schritte manuell eine Drehachse als Hilfsgeometrie erzeugt, diese mit der Klappe verknüpft und anschließend mit Hilfe der Drehachse der

gewünschte Öffnungswinkel eingestellt. Diese Vorgehensweise ist sehr zeitintensiv und beim Erzeugen der Drehachse durch die manuelle Wahl der Drehpunkte ungenau. Weiterhin ist bei mehrgelenkigen Scharnieren keine feste Drehachse vorhanden und somit diese Methode faktisch nicht realisierbar, da nur mit einer sehr groben Annäherung von Drehpunkten gearbeitet werden kann.

Abhilfe brächten an dieser Stelle entweder die Bereitstellung der Bewegungskinematik der Klappen oder die Dokumentation der geplanten Position der Klappen zu jedem Takt, bestenfalls in der Bauliste. Anhand der ersten Optimierungsmaßnahme könnten die Klappen flexibel und mit weniger Aufwand als bisher eingestellt werden. Im zweiten Fall müssten nicht einmal zusätzliche Aktionen oder Eingaben vorgenommen werden und die Klappen würden automatisch in der gewünschten Position im Szenario auftauchen.

c) Visualisierung und Positionierung des Werkzeuges

Manche Montagevorgänge benötigen ein Werkzeug für die ordnungsgemäße Befestigung der Bauteile an das Fahrzeug. Standardmäßig wird das 3-D-CAD-Modell des Werkzeuges am Koordinatenursprung erzeugt (s. Abbildung 5-19, links) und darauf in die gewünschte Position gebracht (s. Abbildung 5-19, rechts).

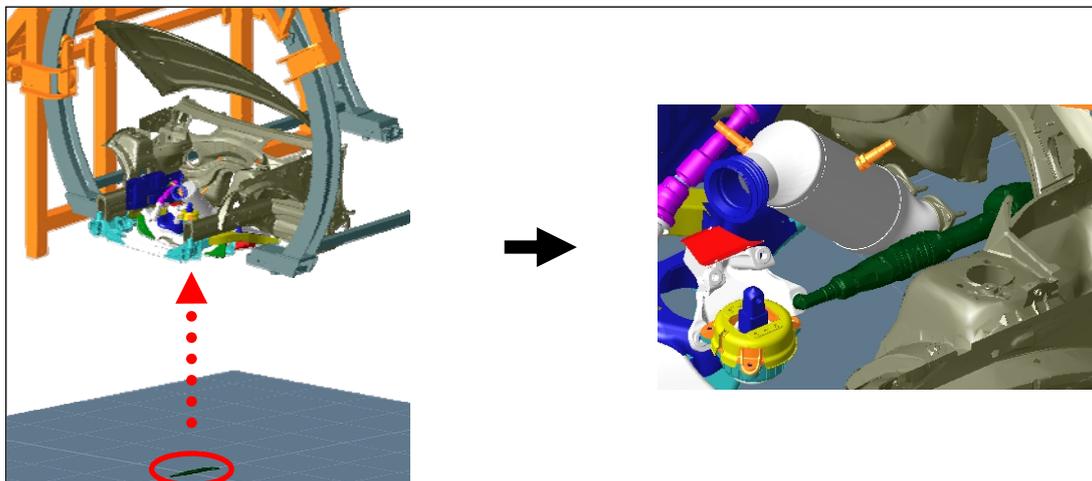


Abbildung 5-19: Links: Werkzeug in der Ausgangsposition. Rechts: Werkzeug in der gewünschten Position.

In der folgenden Abbildung 5-20 wird die bisherige bevorzugte Vorgehensweise für die Visualisierung und Positionierung eines Werkzeuges im Szenario beschrieben.

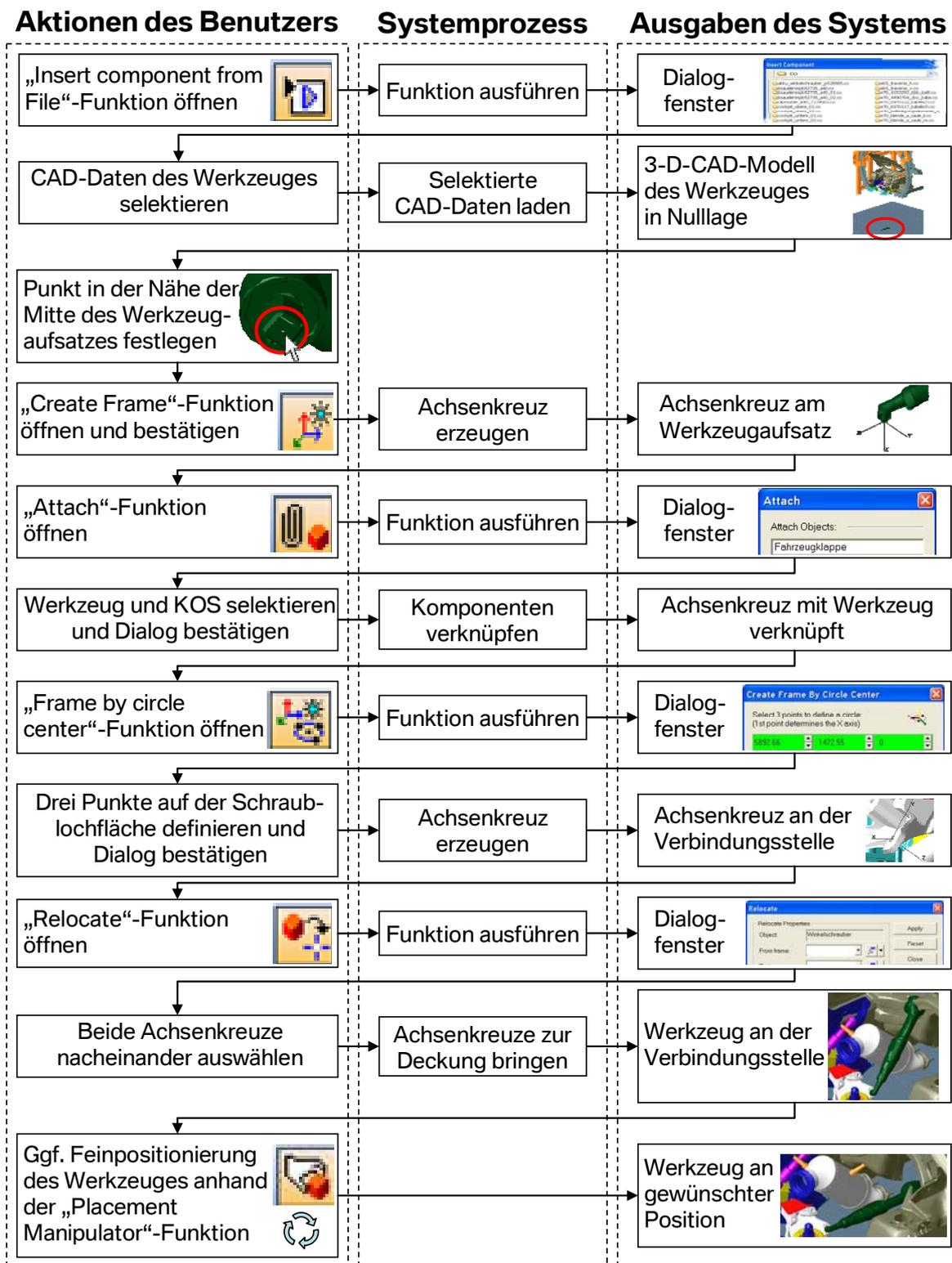


Abbildung 5-20: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Visualisierung und Positionierung des Werkzeuges (IST-Prozess)

Die Positionierung des Werkzeuges erfolgt, indem zwei manuell erzeugte Achsenkreuze (engl. „frames“) zur Deckung gebracht werden. Damit dies leichter fällt, ist beim Erzeugen der beiden Achsenkreuze besonders wichtig, dass jeweils die gleiche

Koordinatenachse der tatsächlichen Drehachse des Werkzeugaufsatzes und des Schraubloches entspricht (in diesem Fall die z-Achse) (s. Abbildung 5-21). Beim Werkzeugaufsatz wird dies durch einen Mausklick auf die Stirnfläche erreicht. Beim Schraubloch handelt es sich jedoch um einen Hohlkörper der nicht mittels Mausklick erfasst werden kann. Zur Achsenfestlegung muss zunächst anhand von drei Punkten manuell die Schraublochfläche festgelegt werden, die senkrecht zur Drehachse liegt.

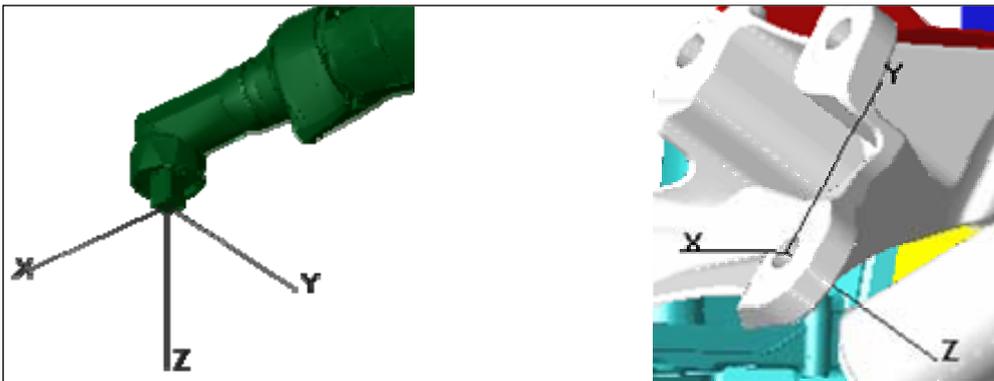


Abbildung 5-21: Achsenkreuz am Werkzeugaufsatz (links) und am Schraubloch (rechts)

Anschließend wird, wenn Kollisionen vorhanden sind oder die Position noch nicht zufrieden stellend ist, das Werkzeug über das mit dem Werkzeugaufsatz verknüpften Achsenkreuz zusätzlich um die Drehachse gedreht (s. Abbildung 5-22).

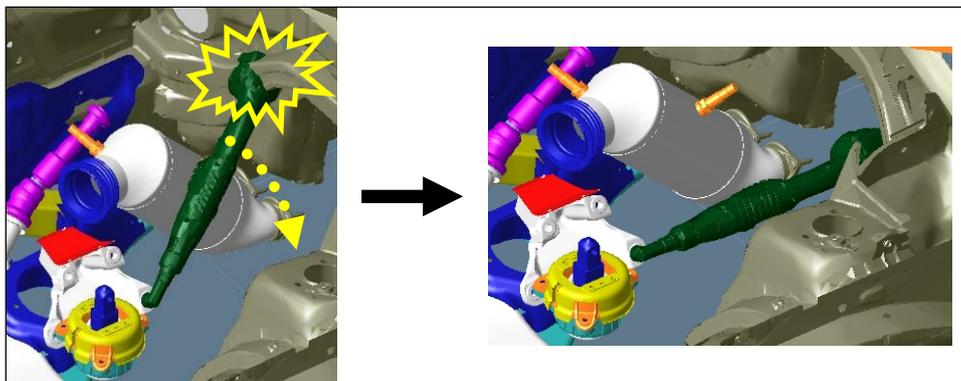


Abbildung 5-22: Positioniertes Werkzeug mit Kollision (links) und ohne Kollision (rechts)

Diese Vorgehensweise ist mit einem hohen Aufwand verbunden und bedarf einer Optimierung. Eine deutliche Beschleunigung des Vorgangs kann z.B. durch bereits in den CAD-Daten angebrachte charakteristische Achsenkreuze von Werkzeugen sowie von Verbindungsstellen bzw. -elementen erreicht werden. Somit könnte das Werkzeug bei bekanntem Befestigungspunkt und nach Implementierung in die Datenschnittstelle der bestehenden Funktionalität, die beide Achsenkreuze aufeinander

bringt, im Szenario gleichzeitig mit den restlichen Bestandteilen so visualisiert werden, dass es in der richtigen Drehachse um den Befestigungspunkt angebracht ist und der Benutzer die gewünschte Position in Abhängigkeit von der Position des Werkers auswählen kann. Wünschenswert wäre auch eine Funktion zur automatischen Vermeidung von Kollisionen.

Das Werkzeug kann auch vollständig per Hand mittels der „Placement Manipulator“-Funktion interaktiv verschoben werden, ohne zusätzliche Hilfsgeometrien dafür zu benötigen. Dies ist jedoch aufgrund des dreidimensionalen Raumes und der Tatsache, dass das Szenario nicht gleichzeitig aus mehreren Blickrichtungen betrachtet werden kann, sehr aufwändig und ungenau durchzuführen (s. Abbildung 5-23).

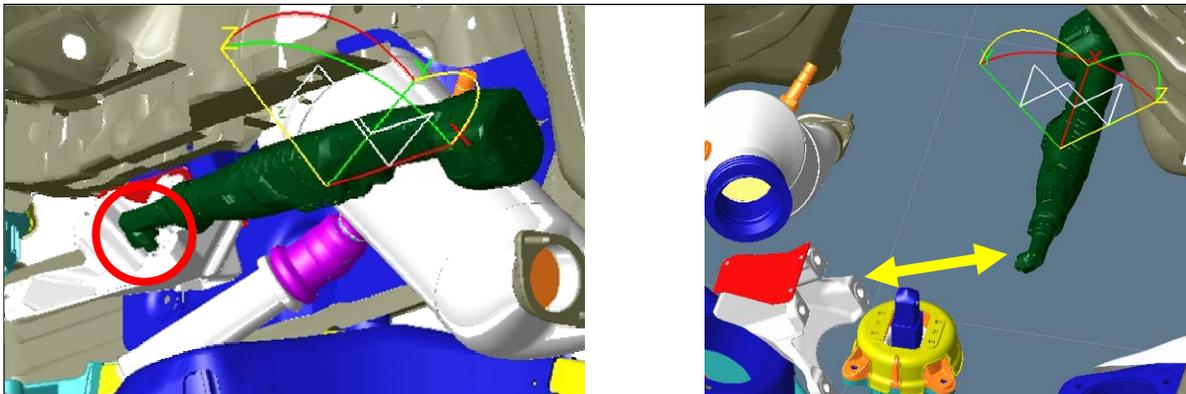


Abbildung 5-23: Optische Täuschung im 3-D-Raum: Ansichten aus verschiedenen Blickrichtungen. Links: Werkzeugaufsatz scheint am Schraubloch zu sein. Rechts: Aus einer anderen Perspektive wird der noch vorhandene Abstand sichtbar.

In diesem Zusammenhang bringt im zweidimensionalen Raum die automatische Ausrichtung von Objekten eine deutliche Erleichterung. In der Literatur beschreibt EICKVONDER [35] diesen Ansatz. Dabei wird ein Objekt (z.B. eine Schraube), sobald es nahe genug an der Zielposition ist, automatisch passend ausgerichtet und lässt sich nur noch entlang der Ausrichtungskante bewegen (s. Abbildung 5-24). Dies erleichtert deutlich die Positionierung von Objekten, die aufgrund ihrer Funktion in einer bestimmten Ausrichtung zueinander stehen müssen (z.B. Schrauber und Mutter). In ähnlicher Art und Weise könnte eine Erweiterung dieser Funktion die Positionierung von Objekten im dreidimensionalen Raum deutlich unterstützen.

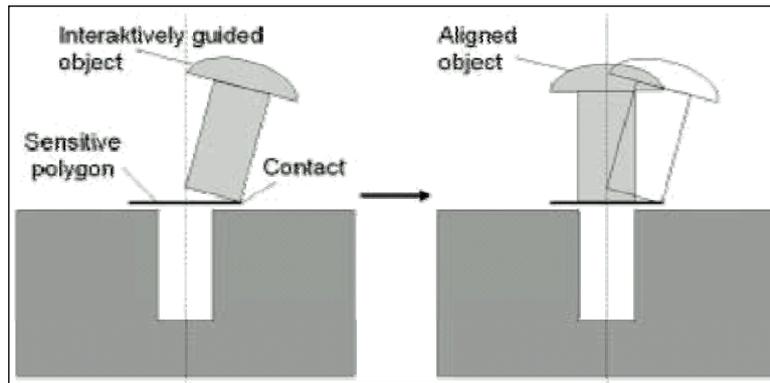


Abbildung 5-24: Automatische Ausrichtung von Objekten [35]

d) Gegebenfalls durch Produktionstechnik am Montageort bedingte Neueinstellung aller Bestandteile

Bei manchen Montagevorgängen befindet sich die Produktionstechnik mitsamt der Karosserie zusätzlich in einer zur Horizontalen geschwenkten Position. Dies ist bei der Montage der Lenkspindel nicht der Fall, soll aber hier beispielhaft betrachtet werden (s. Abbildung 5-25).

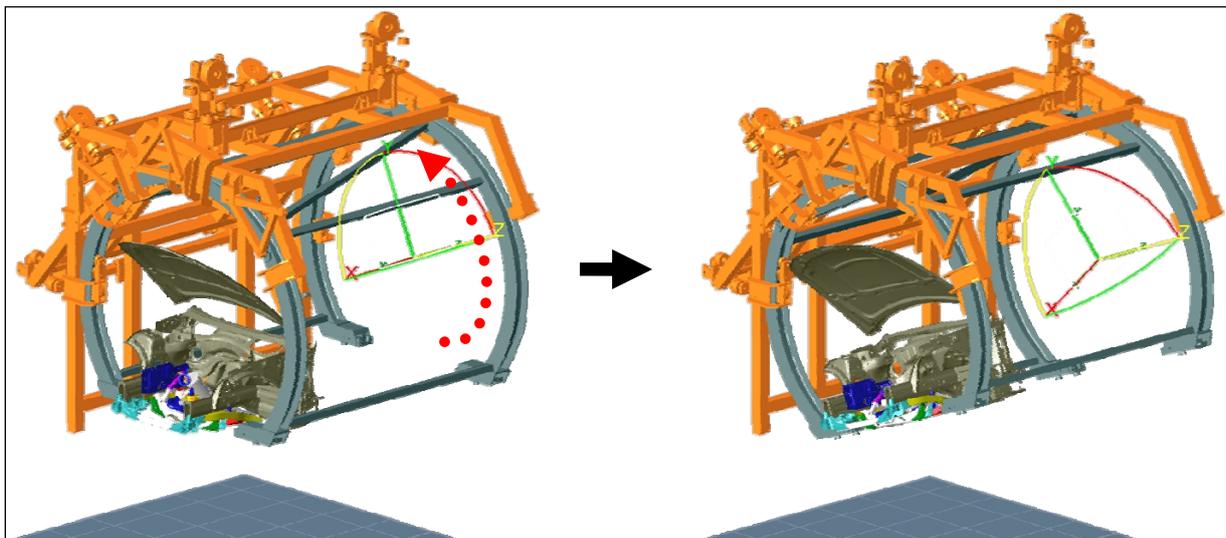


Abbildung 5-25: Links: Bisher positionierte Bestandteile. Rechts: Bestandteile nach zusätzlicher Einstellung der Produktionstechnik.

Der bisher dafür benötigte Ablauf wird in Abbildung 5-26 gezeigt.

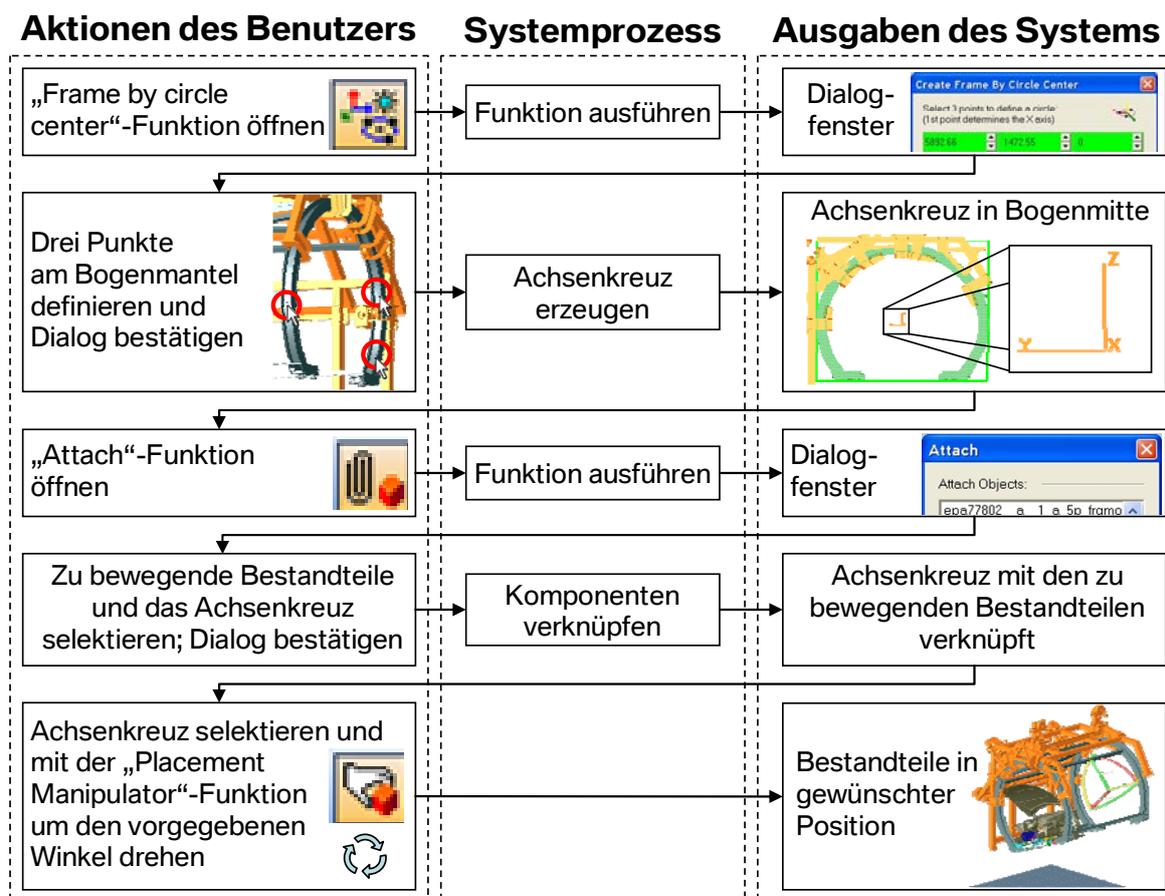


Abbildung 5-26: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur zusätzlichen Einstellung der Bestandteile entsprechend der Bewegungskinetik der Produktionstechnik (IST-Prozess)

Auch hier muss zunächst die eigentliche Drehachse des drehbaren Strukturteiles (grauer Bogen in C-Form) per Hand erzeugt und mit den zu bewegendenden Bestandteilen verknüpft werden. Darauf können diese durch das Drehen des neu erzeugten Achsenkreuzes in die gewünschte Position geschwenkt werden. Diese Hilfsgeometrie ist gerade deshalb nötig, weil anhand anderer Methoden wie z.B. durch Selektierung des Strukturteiles und das darauf folgende Starten der „Placement Manipulator“-Funktion diese Funktionalität ein Achsenkreuz im Zentrum des umschließenden Quaders erzeugt, dieses aber nicht auf der tatsächlichen Drehachse des Strukturteiles liegt (s. Abbildung 5-27). Aufgrund der soeben beschriebenen Problematik besteht auch hier ein Optimierungsbedarf.

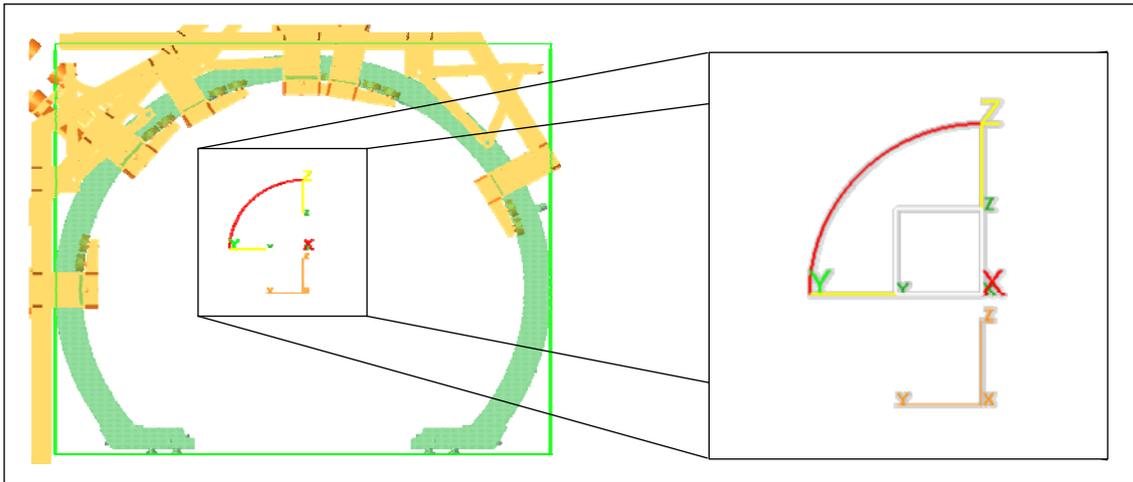


Abbildung 5-27: Oberes Achsenkreuz: Erzeugt durch die „Placement Manipulator“-Funktion. Unteres Achsenkreuz: tatsächlich benötigtes Achsenkreuz.

Eine Verbesserung wäre hier entweder durch die Bereitstellung der Bewegungskinetik der Produktionsstruktur oder durch die Dokumentation der geplanten Position des drehbaren Strukturteiles zu jedem Takt in der Bauliste möglich. Hierbei könnten zum einen die zu bewegenden Bestandteile selektiert werden und darauf flexibel in die gewünschte Lage gebracht werden. Im anderen Falle müsste der Benutzer nicht einmal zusätzliche Aktionen oder Eingaben vornehmen, vorausgesetzt die zu bewegenden Bestandteile sind auch in den Daten hinterlegt mit dem drehbaren Strukturteil verknüpft.

e) Positionierung von nachträglich hinzugefügten Bestandteilen

Ein Szenario mit den aktuellsten 3-D-CAD-Modellen ist die Basis einer jeden Simulation. Nach Aufbereitung des Simulationsszenarios müssen bei Änderungen am Bestandteil selbst oder an der Montagereihenfolge des Öfteren nachträglich weitere Bestandteile lagerichtig hinzugefügt werden. Dies wird hier am Beispiel eines Unterbodenschutzes behandelt. Die Bestimmung der dazugehörigen CAD-Daten und die darauf folgende Konvertierung in das erforderliche Format geschehen analog zu Phase I und werden deshalb hier nicht betrachtet.

Genauso wie beim Werkzeug wird hier der neue Bestandteil am Szenariokoordinatenursprung geladen (s. Abbildung 5-28, links) und darauf in die gewünschte Position gebracht (s. Abbildung 5-28, rechts).

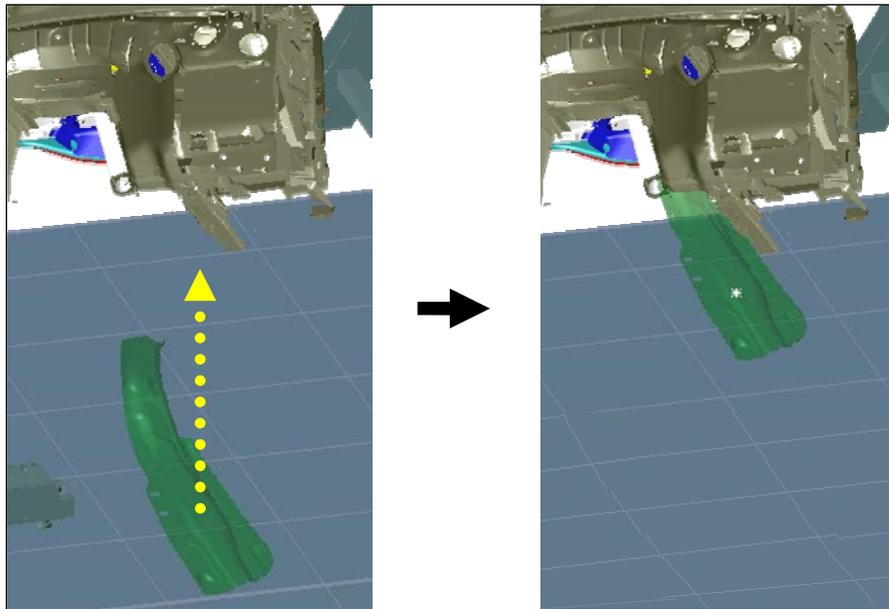


Abbildung 5-28: Links: Nachträglich hinzugefügtes Bauteil in der Ausgangsposition. Rechts: Bauteil in der gewünschten Position.

Auf der folgenden Abbildung 5-29 sind die einzelnen Schritte, die bisher dafür benötigt werden, schematisch zu finden. In diesem Fall wird der zusätzliche Bestandteil umständlich in seine exakte Position gebracht. Die Beschaffung der Verschiebungs- und Rotationskoordinaten verlangt hier viele manuelle Eingabeschritte. Da einem bestehenden Szenario aber relativ häufig veränderte bzw. neue Bestandteile hinzugefügt werden müssen, ist es umso mehr angebracht, auch hier Maßnahmen zur Aufwandsreduzierung zu ergreifen.

Eine Optimierung könnte erneut anhand der Bauliste und der Datenschnittstelle geschaffen werden. Letztere sollte in der Lage sein, Änderungen der Montagereihenfolge in der Bauliste sowie Änderungen der sich auf die einzelnen Positionen beziehenden Bauteile zu erkennen. In diesem Abgleich werden neue oder geänderte Bestandteile erkannt und dem Szenario in die automatisch aus der Bauliste entnommene korrekte Position gebracht. Bestandteile, die aus der Bauliste entfallen sind, werden vom Szenario entfernt.

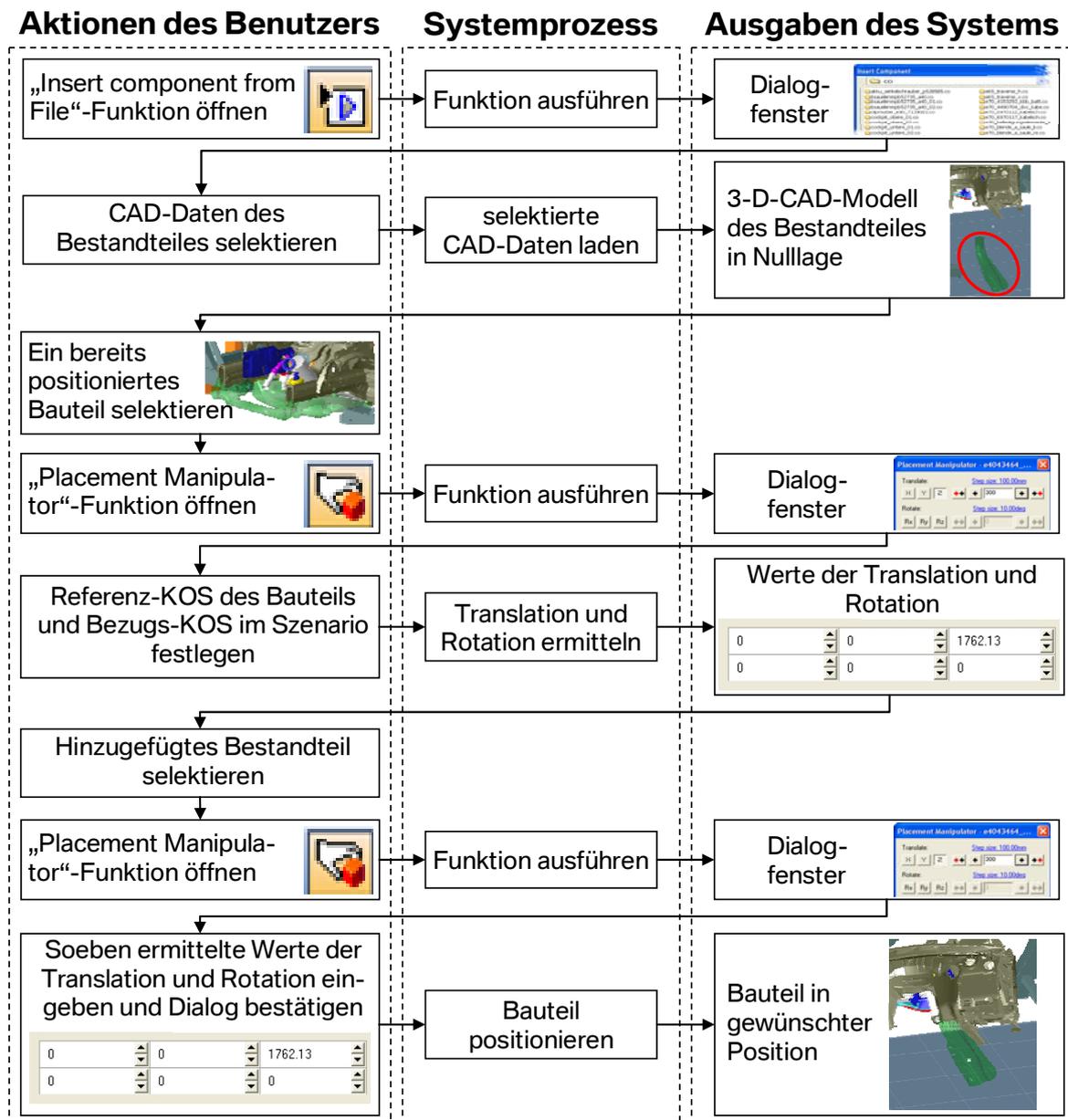


Abbildung 5-29: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Positionierung von nachträglich hinzugefügten Bauteilen (IST-Prozess)

5.2.2.5 Zusammenfassung der Phase

Die Aufbereitung des Simulationsszenarios wird derzeit aufwändig manuell durchgeführt und erfüllt die gestellte Anforderung einer Positionierung und Ausrichtung der Szenariobauteile nur befriedigend. So verlangt die Positionierung aller Bauteile im Raum, das zusätzliche Einstellen der Fahrzeugklappen oder die korrekte Platzierung des Werkzeuges vom Benutzer viele Aktionen und Eingaben. Automatisch wird nur die im so genannten Fahrzeug-KOS definierte Lage aller

3-D-CAD-Modelle (bis auf das Werkzeug), auch im Lageverhältnis zueinander, aus den CAD-Daten entnommen. Deshalb bedarf es einer Optimierung.

Zusammenfassend ergeben sich im Wesentlichen zwei Verbesserungsvorschläge: Einerseits die Erweiterung der in der ersten Phase vorgestellten Bauliste um die geplante Position der einzelnen Bestandteile mit Ausnahme des Werkzeuges im Szenario zu jedem Takt (s. Tabelle 5-2). Diese Werte werden einmal aufgenommen und laufend aktuell gehalten.

Takt	Bauteil mit Montagertext	Produktionstechnik	Position der Karosserie	Zusätzliche Einstellung der Produktionstechnik	Position der Klappen
35	Tülle für Zulaufschlauch in Stirnwand montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
35	Abdecktopf in Seitenwand montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
35	Einfüllklappe auf Scharnierarm Abdecktopf montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
36	Anschlagpuffer Frontklappe montieren rechts	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
36	Anschlagpuffer Frontklappe montieren links	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
36	Kombihalter montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
36	Bowdenzug Frontklappe montieren (Linkslenker)	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
36	Gasfeder Heckklappe rechts montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
37	Gasfeder Heckklappe links montieren	Lacktraversen auf Querförderer ohne Höhenverstellung	z-Koordinate	-	Rx, Ry, Rz
37	Schallsollierung-Radhaus links und rechts montieren	C-Gehänge	z-Koordinate	Rx, Ry, Rz	Rx, Ry, Rz

Tabelle 5-2: Auszug aus einer fiktiven Bauliste mit der zusätzlichen Angabe von Einstellungswerte der einzelnen Bestandteile mit Ausnahme des Werkzeuges

Andererseits sind zusätzlich die charakteristischen Achsenkreuze von Werkzeugen sowie von Verbindungsstellen bzw. -elementen in den CAD-Daten bereitzustellen, damit das Werkzeug schneller am Verbindungspunkt bzw. -element positioniert werden kann.

Zur Umsetzung des postulierten Idealablaufes (s. Abbildung 5-13, Seite 75) werden die soeben vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen in der Abbildung 5-30 gänzlich zusammengetragen.

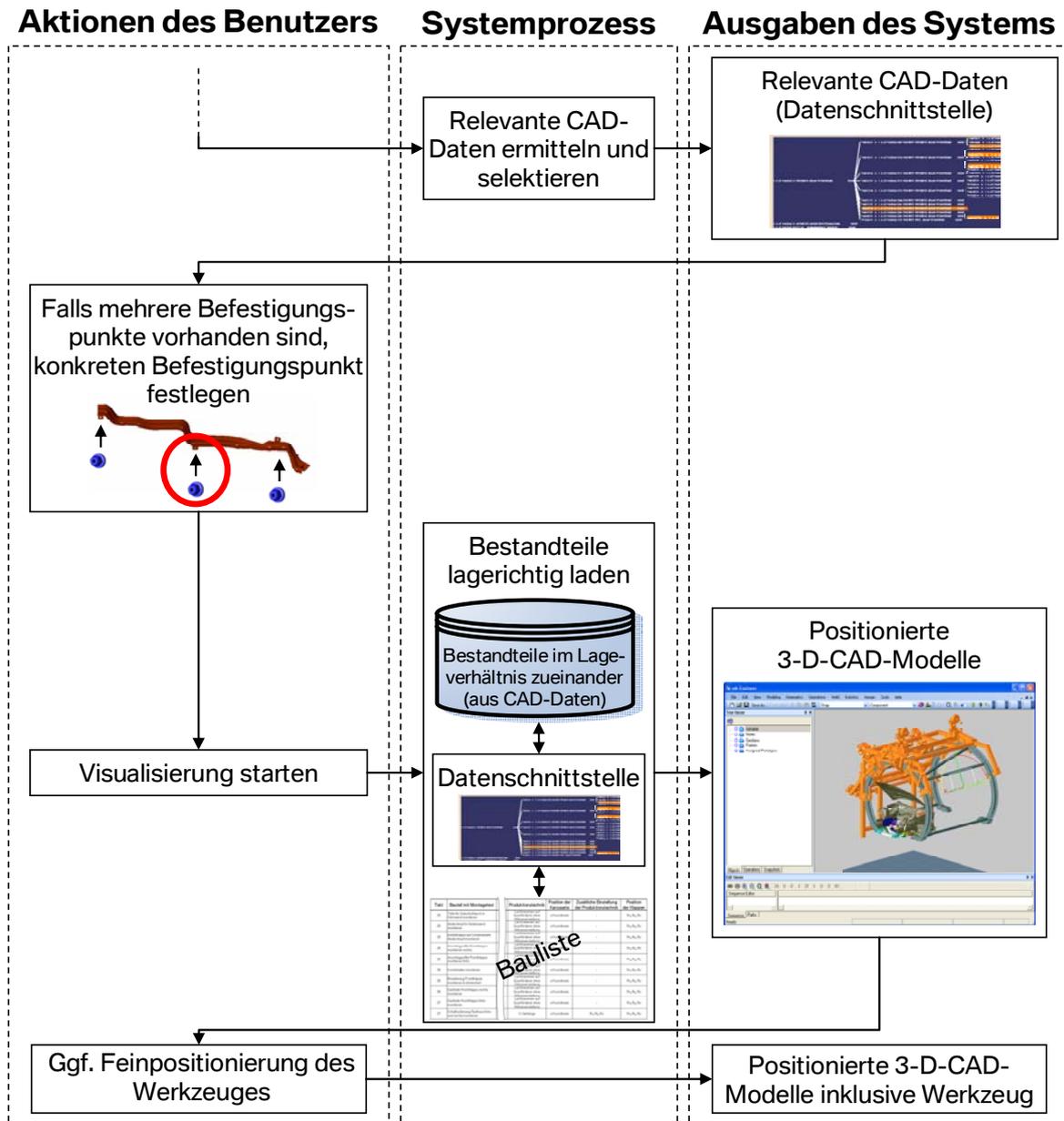


Abbildung 5-30: Optimierter Ablauf für die Visualisierung und Positionierung der 3-D-CAD-Modelle

5.2.3 Phase III: Definition der Menschmodellparameter und Visualisierung des 3-D-Menschmodells

5.2.3.1 Beschreibung der Phase

Das Untersuchungsszenario ist erst dann vollständig, wenn das digitale 3-D-Menschmodell (s. Abbildung 5-31) im Szenario geladen und korrekt platziert ist.

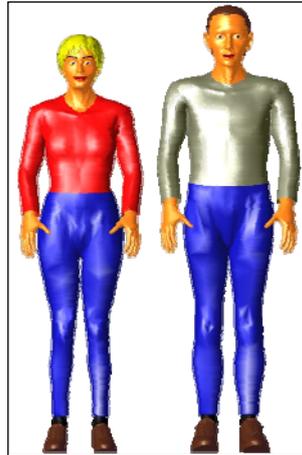


Abbildung 5-31: Weibliches und männliches 3-D-Menschmodell RAMSIS

In dieser Phase werden zunächst die erforderlichen Körpercharakteristika vom Benutzer festgelegt. Diese Parameter werden in Abhängigkeit von der durchzuführenden Untersuchung und des Untersuchungszweckes bestimmt. Anschließend wird das 3-D-Menschmodell im Szenario visualisiert. Die darauf notwendige Positionierung soll Gegenstand der nächsten Phase sein.

5.2.3.2 Definition der Anforderungen

In dieser Phase sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Bereitstellung von 3-D-Menschmodellen mit verschiedenen Ausprägungen: Bei der individuellen typengerechten Auslegung von Arbeitsplätzen und Prüfung der Montierbarkeit eines Fahrzeuges ist die Variation von Körpermaßen erforderlich. Dazu zählt die spezifische Einstellung der drei Leitmaßen Körpergröße, Proportion und Korpulenz.
- Realitätsnahe und korrekte Körperhaltungsberechnung: Der Detaillierungsgrad der simulierbaren Körperbewegungen und Körperhaltungen hängt stark von der Anzahl und Anordnung der realisierten Modellfreiheitsgrade ab. Dabei ist es notwendig, sowohl reale als auch spezifische Einschränkungen von Ge-

lenken zu berücksichtigen, speziell bei Untersuchungen, bei denen leistungsgewandelte oder mit Schutzbekleidung ausgestattete Montagemitarbeiter betrachtet werden. Zudem sollen auch Angaben zu Geschlecht und Alter vorgenommen werden können. Für die Untersuchung der Montierbarkeit des Fahrzeuges reicht das 5., 50. und 95. Perzentil des Frau- und Mannmodells aus. In der Regel wird bei den betrachteten Untersuchungen zunächst ein 3-D-Menschmodell mit durchschnittlichen Werten, also 50. Perzentil, verwendet und darauf basierend die Untersuchung mit 3-D-Menschmodellen mit Extremmaßen durchgeführt.

- Wahl zwischen einem vollständigen 3-D-Menschmodell und einem 3-D-Hand-Arm-System: Manche Untersuchungen können mit einem einfachen Hand-Arm-System des 3-D-Menschmodells schneller und komfortabler durchgeführt werden als mit einem vollständigen 3-D-Menschmodell. Dabei handelt es sich meistens um Untersuchungen, bei denen nur eine Aussage hinsichtlich der Zugänglichkeit in engen Bauräumen getroffen werden soll.

5.2.3.3 Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)

Abbildung 5-32 zeigt den idealen Handlungsprozess, um das gewünschte 3-D-Menschmodell in das Szenario zu laden.

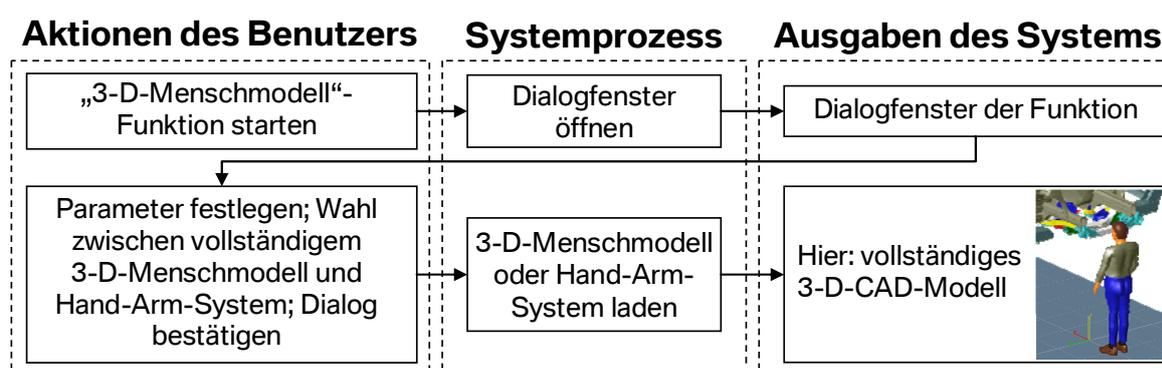


Abbildung 5-32: Idealablauf zum Definieren der Menschmodellparameter und Visualisieren des 3-D-Menschmodells bzw. Hand-Arm-Systems (SOLL-Prozess)

5.2.3.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die bisherige Vorgehensweise ist in der folgenden Abbildung 5-33 aufgeführt.

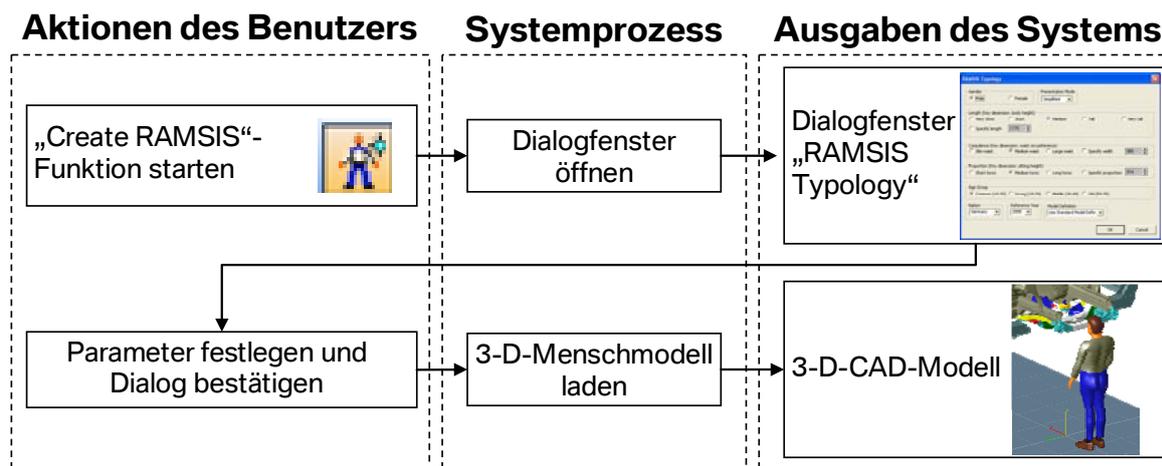


Abbildung 5-33: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zum Definieren der Menschmodellparameter und Visualisieren des 3-D-Menschmodells (IST-Prozess)

Wird der IST- mit dem SOLL-Prozess verglichen, so ist erkennbar, dass beide sehr ähnlich sind. Folgend soll jedoch dargestellt werden, inwiefern die gestellten Anforderungen tatsächlich erfüllt oder nicht erfüllt werden.

Die erste Forderung nach der Bereitstellung von 3-D-Menschmodellen mit verschiedenen Ausprägungen wird durch das in eM-Human implementierte RAMSIS-3-D-Menschmodell gänzlich erfüllt. Hier ist die individuelle und parametrische Variation von Leitmaßen wie Körperhöhe, Korpulenz und Proportion in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter möglich. Diese drei Leitmaße spannen dabei einen Raum auf, in dem eine reale Person als Punkt darzustellen wäre (s. Abbildung 5-34).

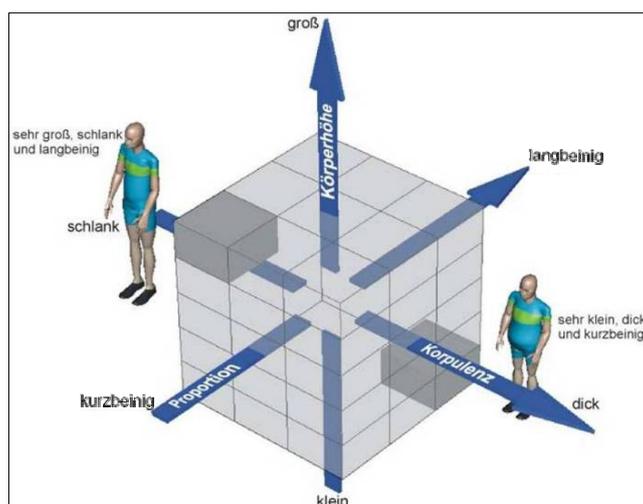


Abbildung 5-34: Merkmalsraum der RAMSIS-Typologie, gebildet durch die Leitmaße Körperhöhe, Proportion und Korpulenz [55]

Durch Teilung dieses Raumes entstehen für jedes Geschlecht 45 statistisch abgesicherte anthropometrische Typen. Deren vordefinierte Modelle sind in einer Daten-

bank hinterlegt. Dabei wurde das Leitmaß „Körperhöhe“ in fünf Gruppen von sehr klein bis sehr groß aufgeteilt. Die Unterteilungen der Leitmaße „Korpulenz“ und „Proportion“ erlauben die Differenzierung nach jeweils drei Untergruppen – dünn, mittel und dick bzw. kurzbeinig, mittel und langbeinig. Zudem wird die Typengenerierung um eine gemittelte Typologie der Altersgruppe von 18-70 Jahren, sowie um drei altersdifferenzierte Gruppen von 18-29, 39-49 und 50-70 Jahren erweitert. Ein in die Typologie implementiertes Akzelerationsmodell berücksichtigt durch Wahl eines bestimmten Referenzjahres über Extrapolierung die Größenzunahme pro Dekade. Schließlich können durch Wahl einer bestimmten Population die anthropometrischen Verschiedenheiten unterschiedlicher Nationen betrachtet werden.

Auch die realitätsnahe korrekte Abbildung der Bewegungsmöglichkeiten menschlicher Gelenke wird zufrieden stellend erfüllt. RAMSIS basiert auf exakten, statistisch validierten Körperdaten und berücksichtigt reale Bewegungs- und Gelenkeinschränkungen [55]. Weiterhin ist es mit mehr als 100 separat verstellbaren Gelenkwinkeln versehen, die auch reale und spezifische Einschränkungen erlauben.

Einen Nachteil des verwendeten 3-D-Menschmodells stellt das Fehlen eines isolierten Hand-Arm-Systems dar. Somit wird die zweite gestellte Anforderung nicht erfüllt. Diese Möglichkeit in abgeänderter Form bieten allerdings andere 3-D-Menschmodelle, wie z.B. das so genannte „AnyMan“ [113]. Dieses lässt das getrennte Laden einer Hand zu. In ähnlicher Art und Weise sollte das RAMSIS-3-D-Menschmodell die Möglichkeit zur Wahl zwischen beiden Alternativen bieten und somit lediglich einfache Zugänglichkeitsuntersuchungen ohne Berücksichtigung der Körperhaltung ermöglichen.

5.2.3.5 Zusammenfassung der Phase

Das 3-D-Menschmodell wird als letzter Bestandteil dem Szenario hinzugefügt. Die dafür geforderte Bereitstellung von 3-D-Menschmodellen mit verschiedenen Ausprägungen und Abbildung der Bewegungsmöglichkeiten menschlicher Gelenke wird dabei vom verwendeten 3-D-Menschmodell RAMSIS vollwertig ermöglicht. Nur die erwünschte Möglichkeit zur Wahl zwischen einem vollständigen 3-D-Menschmodell und einem Hand-Arm-System wird nicht unterstützt. Diese Option wird jedoch von anderen 3-D-Menschmodellen angeboten und sollte in RAMSIS nur für die Betrachtung von Zugänglichkeitsuntersuchungen implementiert werden.

5.2.4 Phase IV: Positionierung des 3-D-Menschmodells

5.2.4.1 Beschreibung der Phase

Nun wird das zuvor am Szenariokoordinatenursprung visualisierte 3-D-Menschmodell platziert. Hierbei wird es unter Berücksichtigung der umgebenden Geometrien einerseits in eine für die anstehende Montageuntersuchung realistische Position zur Montagestelle und andererseits in eine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung im Raum gebracht. Die Lenkspindelmontage wird im Stehen durchgeführt. Da das 3-D-Menschmodell im Szenario standardisiert in dieser Grundkörperhaltung visualisiert wird, muss es im Fall der Lenkspindelmontage nur im Raum positioniert und nicht zusätzlich in eine andere Grundkörperhaltung (z.B. sitzend) transformiert werden (s. Abbildung 5-35, links).

Eine zusätzliche Einstellung der Körperhaltung ist somit nicht erforderlich. Um dies jedoch in der folgenden Evaluation trotzdem zu betrachten, wird in dieser Phase beispielhaft ein anderes Untersuchungsszenario herangezogen, in dem auch die Anfangskörperhaltung zusätzlich eingestellt werden muss (s. Abbildung 5-35, rechts).

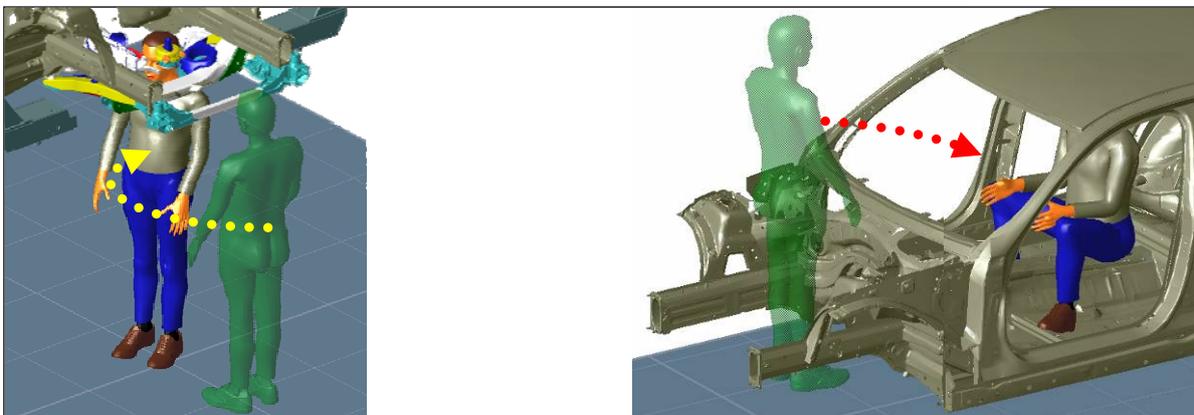


Abbildung 5-35: 3-D-Menschmodell vor (grün dargestellt) und nach der Positionierung

5.2.4.2 Definition der Anforderungen

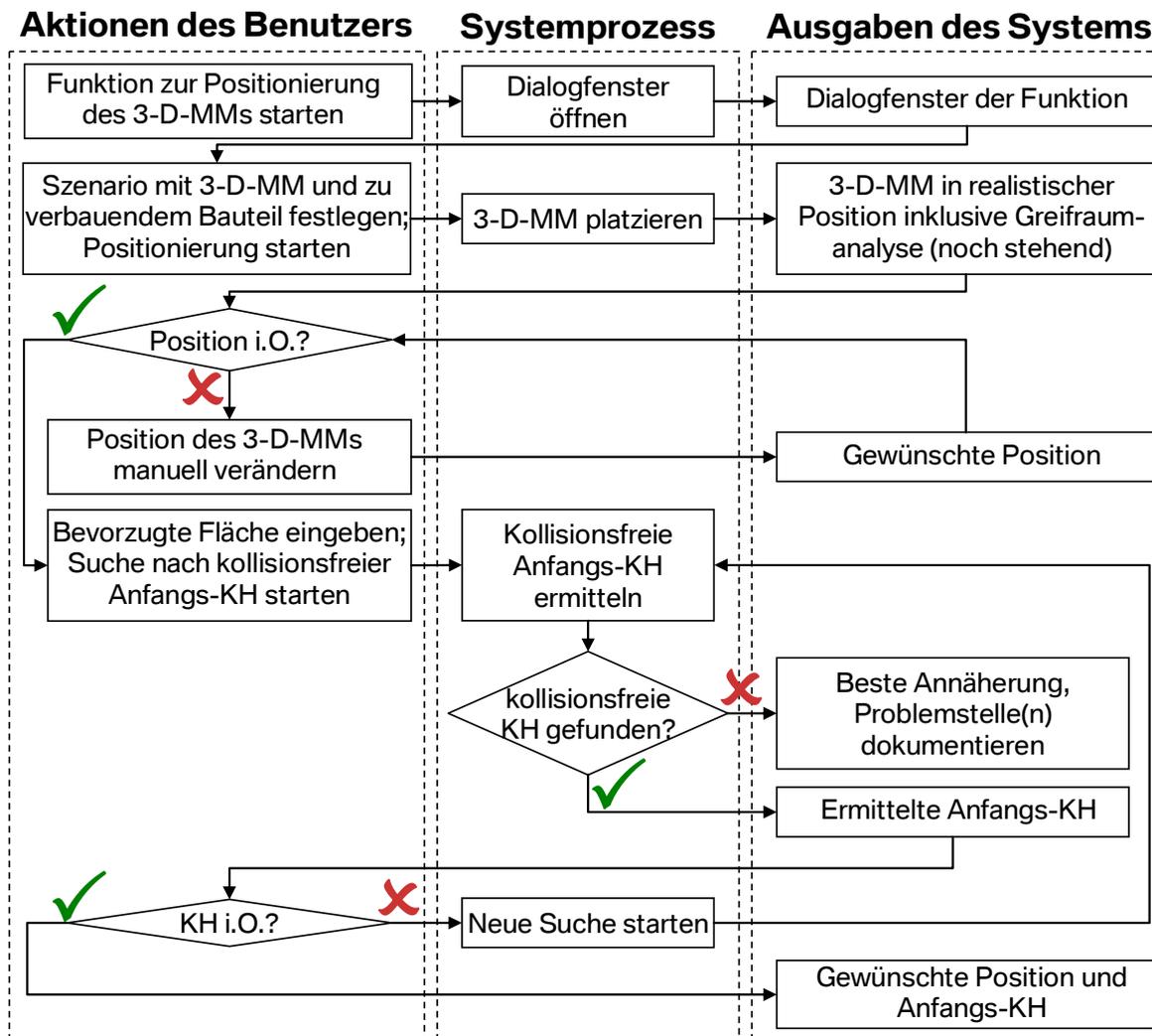
Die Anforderungen hinsichtlich der Positionierung des 3-D-Menschmodells sind im Folgenden aufgelistet:

- Bereitstellung einer Programmbibliothek mit standardisierten Grundkörperhaltungen (z.B. stehend, sitzend, kniend, usw.)

- Kollisionsfreie Positionierung und Ausrichtung des 3-D-Menschmodells im Raum (analog Phase II)

5.2.4.3 Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)

Der ideale Ablauf ist in Abbildung 5-36 dargestellt.



Abkürzungen: i.O. = „in Ordnung“; KH = Körperhaltung; MM = Menschmodell

Abbildung 5-36: Idealablauf zur Positionierung des 3-D-Menschmodells und Einstellung einer geeigneten Anfangskörperhaltung (SOLL-Prozess)

Ausgehend von diesen Aktionen und unter genauer Beachtung des Szenarioumfeldes (Fahrzeuggeometrie, Produktionsstrukturen und Boden) sollte das 3-D-Menschmodell weitestgehend automatisch positioniert und in eine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung gebracht werden.

5.2.4.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die Positionierung des 3-D-Menschmodells geschieht derzeit in zwei Schritten (vgl. auch [69]):

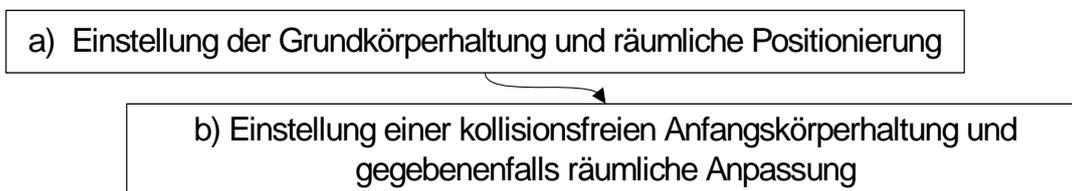


Abbildung 5-37: Schritte zur Positionierung des 3-D-Menschmodells

a) Einstellung der Grundkörperhaltung und räumliche Positionierung

Zunächst wird das 3-D-Menschmodell mit einer realistischen Grundkörperhaltung in Beziehung zur Montagestelle (in diesem Fall im Fahrzeuginnenraum im Bereich des Getriebetunnels) gebracht (s. Abbildung 5-38).

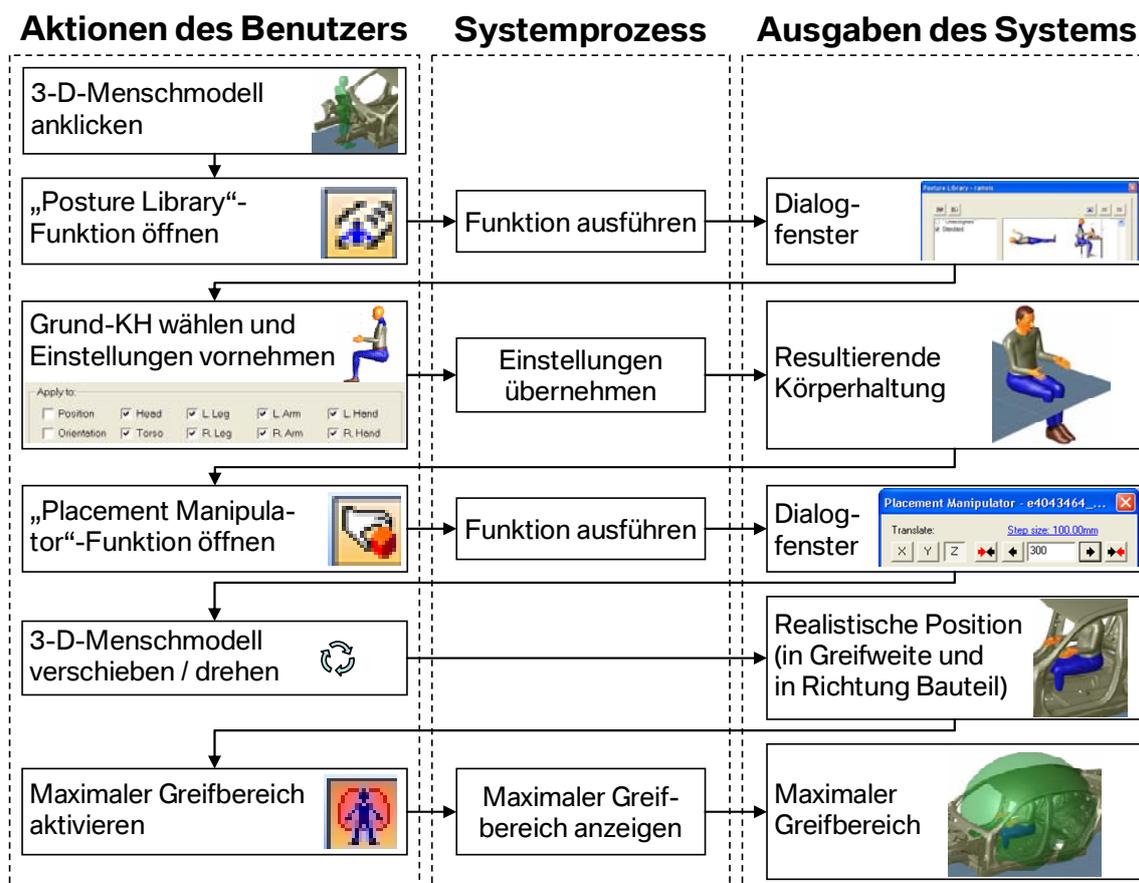


Abbildung 5-38: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur räumlichen Positionierung und Einstellung der Grundkörperhaltung des 3-D-Menschmodells (IST-Prozess)

Wie in Abbildung 5-38 zu sehen ist, wird derzeit als erstes anhand einer in der Software integrierten Körperhaltungsbibliothek („Posture Library“) die Grundkörperhaltung eingestellt. Diese Bibliothek verfügt über standardisierte Grundkörperhaltungen, die vordefinierte Einstellungswerte der einzelnen Körperteile besitzen, in die das 3-D-Menschmodell aufgeteilt ist (s. Abbildung 5-39). Für welche Körperteile die vordefinierten Werte übernommen werden sollen, kann der Benutzer individuell bestimmen.

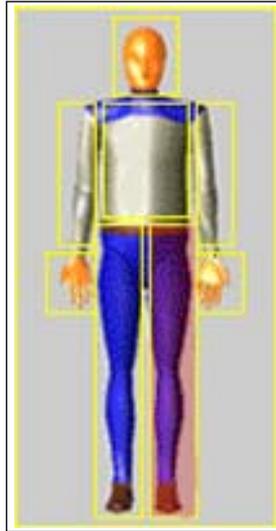


Abbildung 5-39: Körperteile, in die das 3-D-Menschmodell RAMSIS aufgeteilt ist

Nachdem die Grundkörperhaltung eingestellt wurde, wird als nächstes das 3-D-Menschmodell in eine realistische Position im Raum gebracht. Dies geschieht mit bereits in der Software vorhandenen Funktionalitäten. Zuletzt wird geprüft, ob die Montagestelle im Greifraum liegt. Die zur Verfügung stehende Funktionalität zeigt ohne Berücksichtigung von Hindernissen in Form einer Punktwolke den maximalen Greifbereich des betrachteten 3-D-Menschmodells ab einem definierbaren feststehenden Gelenk (s. Abbildung 5-38, rechts unten), standardgemäß das Lumbosacral-Gelenk (im Beckenbereich). Diese Funktionalität kann auch als Orientierung bereits während der Positionierung des 3-D-Menschmodells aktiviert sein. Somit kann immer der aktuell zur Verfügung stehende Greifraum verfolgt werden.

b) Einstellung einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung und gegebenenfalls räumliche Anpassung

In einem zweiten Schritt wird für das soeben positionierte 3-D-Menschmodell eine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung gesucht und, sofern notwendig, unter Beibehal-

tung der Kollisionsfreiheit sinnvoll an die räumlichen Gegebenheiten angepasst. Bisher wird wie folgt vorgegangen (s. Abbildung 5-40).

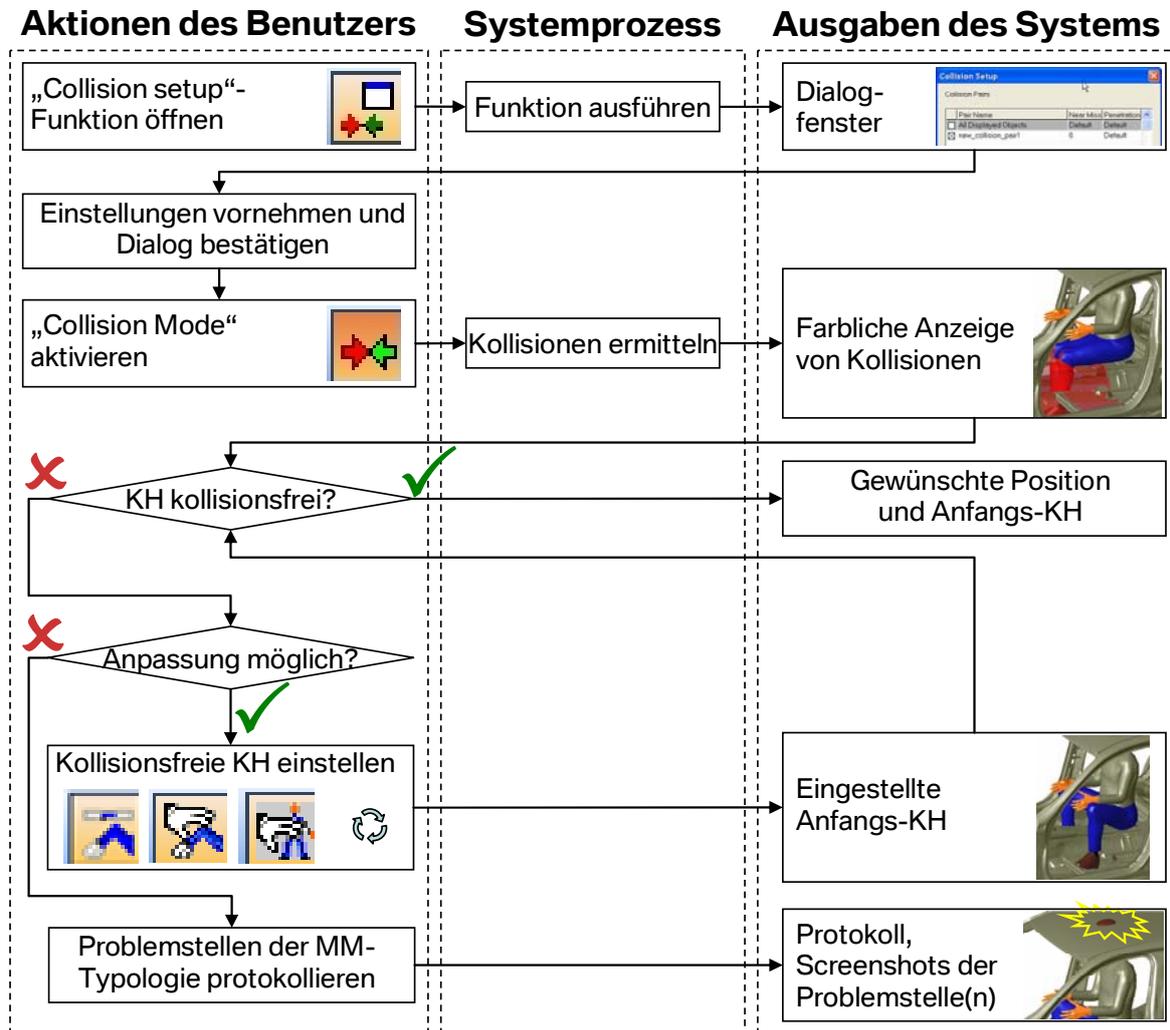


Abbildung 5-40: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Einstellung einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung (IST-Prozess)

Kollisionen und Durchdringungsstellen zwischen Objekten lassen sich anhand des in der Software implementierten „Collision Mode“ ermitteln und werden farblich rot dargestellt. Ehe diese Funktionalität aktiviert wird, muss festgelegt werden, welche Objekte zu betrachten sind. Des Weiteren kann hier ebenso die Entfernung eingestellt werden, ab welcher sich schon bei einer drohenden Kollision die betroffenen Objekte gelb einfärben sollen. Zusätzlich kann hier eine erlaubte Durchdringungstiefe definiert werden. Sind Kollisionen zwischen dem 3-D-Menschmodell und den Bauteilen vorhanden, oder ist die Körperhaltung nicht zufrieden stellend (hängen beispielsweise die Beine in der Luft), so wird versucht, manuell eine kollisionsfreie Anfangs-

körperhaltung einzustellen. Dazu stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, deren Anwendung stark von der jeweiligen Untersuchung abhängig ist:

- „Joint Jog“-Funktion: Hiermit lassen sich alle Körperteile über Schieberegler einzeln manuell verstellen. Dabei werden die menschlichen Bewegungsmöglichkeiten berücksichtigt. 
- „Man Jog“-Funktion: Mithilfe dieser Funktion können Körperteile entweder durch Nutzung eines Manipulator-KOS oder durch Zahlenwerteingabe verschoben bzw. gedreht werden. Die benachbarten Körperteile bewegen sich dabei nach dem Prinzip der inversen Kinematik. Es können jedoch nur Hände, Füße, Ellenbogen, Becken und Kopf bewegt werden. 
- „Advanced Man Jog“-Funktion: Diese Erweiterung der „Man Jog“-Funktion ermöglicht die Einstellung aller Körperteile. Zusätzlich können Körperteile im Raum fixiert werden und eine benutzerspezifische Kinematik-Kette definiert werden. 

Kann hiermit für die herangezogene 3-D-Menschmodell-Typologie keine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung gefunden werden, so werden die Problemstellen der besten Annäherung z.B. in Form von Screenshots (Bildschirmfotografien) dokumentiert. Die Suche kann bei Bedarf erneut entweder aus einer anderen Position oder mit einer anderen 3-D-Menschmodell-Typologie durchgeführt werden.

Der soeben beschriebene, derzeit notwendige Handlungsprozess wird zunächst durch die bereits existierende Körperhaltungsbibliothek unterstützt und erfüllt somit die erste Anforderung. Diese erleichtert wesentlich die Einstellung einer Grundkörperhaltung und verfügt über eine Vorschaufunktion, die für eine übersichtliche Archivierung von Körperhaltungen und schnelle Suche der entsprechenden Grundkörperhaltung sorgt. Allerdings sollte laut dem postulierten Handlungsprozess das Ziel sein, dass die Software nach erfolgter Positionierung des 3-D-Menschmodells ohne jegliche Vorgabe einer vordefinierten Grundkörperhaltung automatisch eine realistische und kollisionsfreie Anfangskörperhaltung ermittelt. Im Hinblick auf die geforderte Positionierung des 3-D-Menschmodells im Raum bereitet dies, wie auch bereits bei der Positionierung des Werkzeuges in Phase II erwähnt, aufgrund des dreidimensionalen Raumes Schwierigkeiten und ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Um diesen zu umgehen, sollte eine neue Funktionalität anhand des zu betrachtenden 3-D-Menschmodells und des zu verbauenden Bauteils automatisch das

3-D-Menschmodell (vorerst stehend und ohne Berücksichtigung von Kollisionen) in eine Position mit optimaler Greifweite und in Blickrichtung zur Montagestelle bringen können (s. Abbildung 5-41).

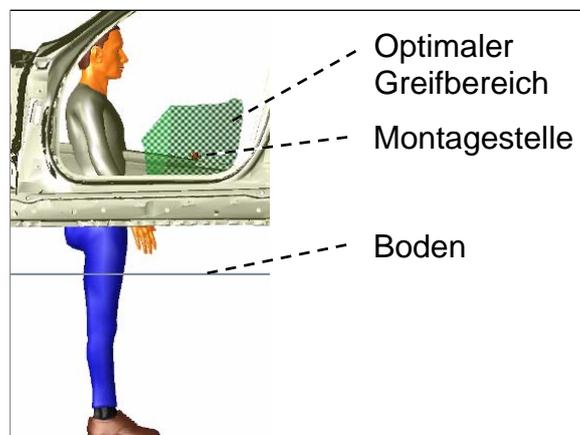


Abbildung 5-41: Automatische Positionierung des 3-D-Menschmodells in Bauteilnähe

Vorerst stehend und ohne Berücksichtigung von Kollisionen gerade deshalb, damit die Software nicht schon an einer eventuell unerwünschten Position aufwändig nach einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung sucht. Deshalb sollte zuvor die von der Software vorgeschlagene Position vom Benutzer bestätigt oder bei Bedarf manuell geändert werden können. Um während der manuellen Änderung der Position die soeben ermittelte optimale Greifweite und Richtung zu der Montagestelle beizubehalten, erweist sich ein imaginärer Kreis als vorteilhaft, entlang dessen das 3-D-Menschmodell bewegt werden kann. Dabei bildet die Montagestelle den Mittelpunkt des Kreises und der Radius die Entfernung zum 3-D-Menschmodell (s. Abbildung 5-42). Dies kann somit durch Verschiebung seines Achsenkreuzes interaktiv in die gewünschte Position gebracht werden.

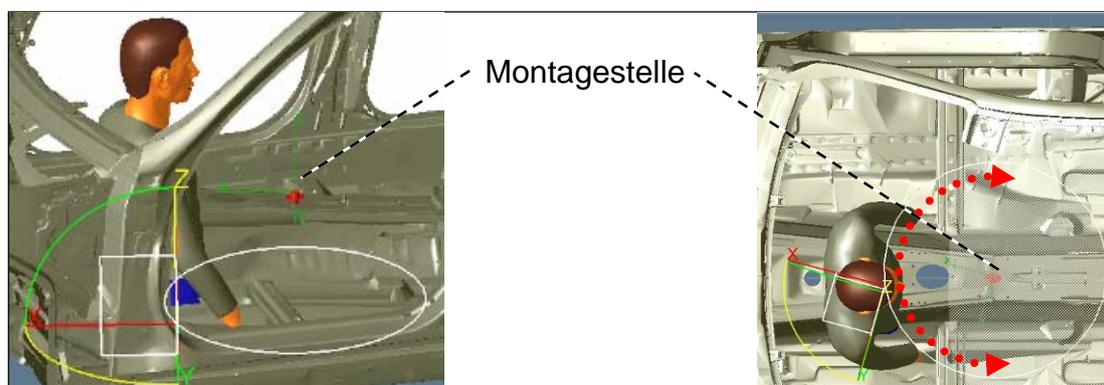


Abbildung 5-42: Zusätzliche Positionierung des 3-D-Menschmodells mithilfe eines imaginären Kreises. Links: Seitliche Ansicht. Rechts: Draufsicht.

Nach Umsetzung der zuvor beschriebenen automatischen Positionierung des 3-D-Menschmodells in optimaler Greifweite kann das derzeit notwendige manuelle Prüfen der Erreichbarkeit gänzlich erspart werden.

Die darauf folgende manuelle Einstellung einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung ist des Öfteren mit einem erhöhten Aufwand verbunden und hängt stark von der zuvor eingestellten Grundkörperhaltung und vom Umfeld ab. So bereitet z.B. die Einstellung einer kollisionsfreien sitzenden Haltung in einem engen Fahrzeuginnenraum einen größeren Aufwand als die Einstellung einer kollisionsfreien stehenden Haltung außerhalb des Fahrzeuges. Die verfügbaren drei Funktionalitäten sind sehr hilfreich, aber gleichzeitig auch sehr umständlich zu bedienen und verhalten sich teilweise sehr unterschiedlich. Bei der „Man Jog“-Funktion ist z.B. darauf zu achten, dass sich einzelne Körperteile durch eine lineare Verschiebung anhand des Manipulator-Achsenkreuzes, z.B. in z-Richtung, dabei zusätzlich drehen können (s. Abbildung 5-43, oben). Dies geschieht bei der Verschiebung durch Zahlenwerteingaben oder durch Verwendung der „Advanced Man Jog“-Funktion hingegen nicht (s. Abbildung 5-43, unten).

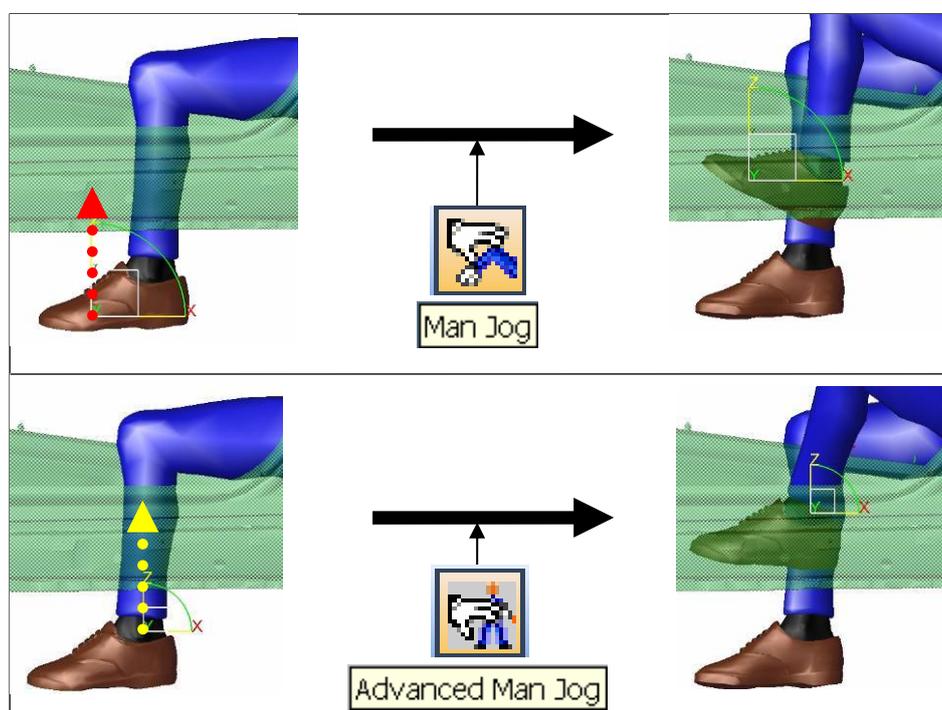


Abbildung 5-43: Unterschiedliches Verhalten zweier ähnlicher Funktionalitäten

Um den Benutzer nicht unnötig zu verwirren, wäre eine Festlegung auf eine einzige Funktionalität erstrebenswert. Diese Optimierung trägt jedoch nicht dazu bei, den manuellen Aufwand bei der Einstellung einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung

zu minimieren. Außerdem ist für den Benutzer ungewiss, ob es eine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung überhaupt gibt. Dies kann derzeit nur aufwändig durch ausdauernde Versuchsläufe ermittelt werden. Deshalb sollte eine neue Funktionalität automatisch mit Hilfe der Angabe einer bevorzugten Fläche (z.B. Karosserieboden, s. Abbildung 5-44), das 3-D-Menschmodell darauf in einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltungen positionieren.

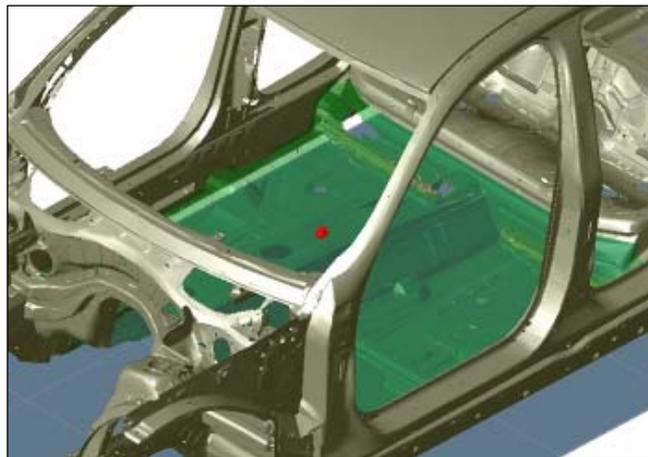


Abbildung 5-44: Angabe der bevorzugten Fläche – hier der Karosserieboden

In Form einer „Auto-Auswahl“-Funktion sollen dann nach und nach realistische Anfangskörperhaltungen vorgeschlagen werden (s. Abbildung 5-45).

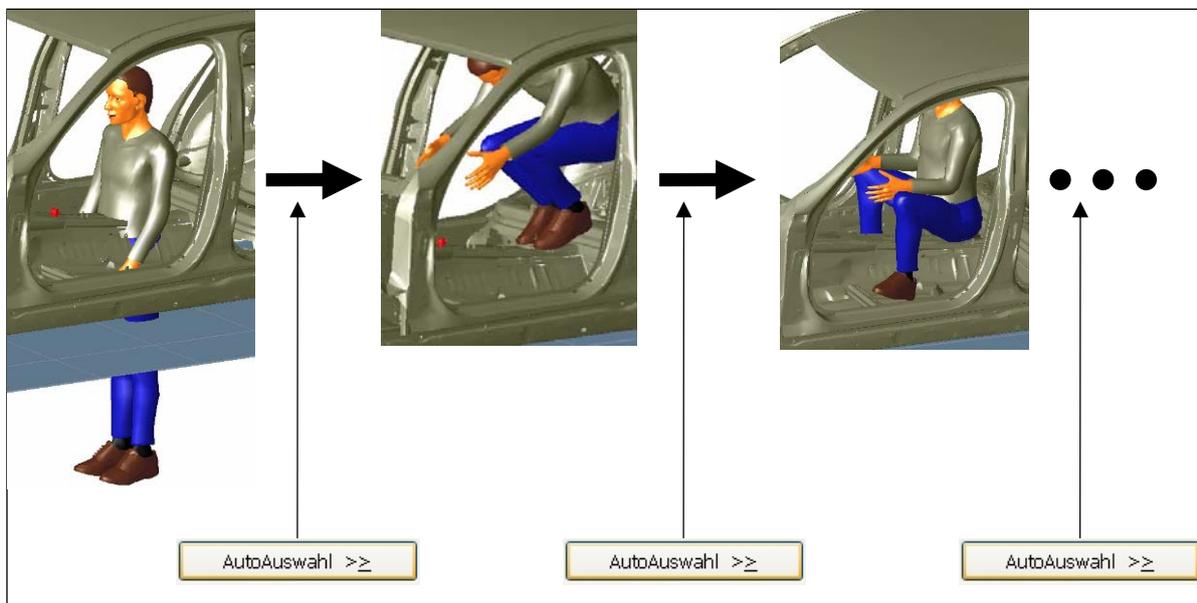


Abbildung 5-45: Automatische Prognose sinnvoller kollisionsfreier Anfangsgrundkörperhaltungen (Auto-Auswahl)

5.2.4.5 Zusammenfassung der Phase

Das 3-D-Menschmodell wird derzeit zunächst mit einer Grundkörperhaltung in eine für die anstehende Montageuntersuchung realistische Position zur Montagestelle gebracht und darauf aufwändig eine kollisionsfreie Anfangskörperhaltung manuell eingestellt. Diese Situation könnte durch zwei Optimierungsmaßnahmen verbessert werden: Die automatische Positionierung des 3-D-Menschmodells in optimaler Greifweite sowie in Richtung zur Montagestelle und die automatische Generierung einer kollisionsfreien Anfangskörperhaltung. Der gesamthaft optimierte Prozess zur Positionierung des 3-D-Menschmodells ist in Abbildung 5-46 dargestellt.

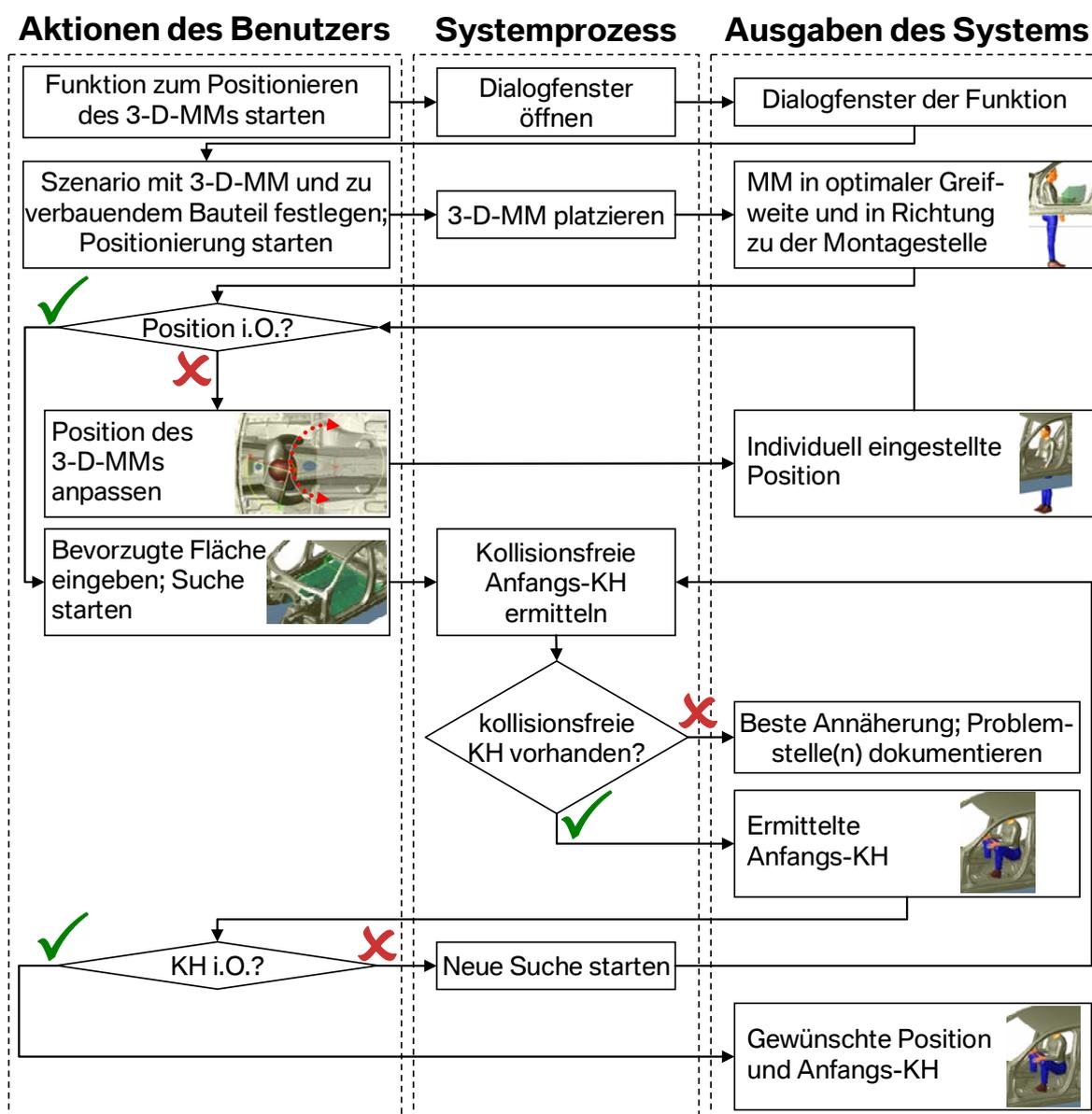


Abbildung 5-46: Optimierter Ablauf zur Positionierung des 3-D-Menschmodells

5.2.5 Phase V: Umsetzung der Montageuntersuchung

5.2.5.1 Beschreibung der Phase

Die bisher beschriebenen Phasen dienen in erster Linie lediglich der Vorbereitung des Simulationsszenarios für die Durchführung der virtuellen Montageuntersuchung mit 3-D-Menschmodell. Diese wird in dieser Phase behandelt. Wie in Abschnitt 5.1.2 bereits erläutert, soll geprüft werden, ob die Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und benötigte Einsehbarkeit für den Montagemitarbeiter gegeben sind. Im Anschluss erfolgt eine ergonomische Bewertung der ermittelten statischen Körperhaltung anhand von standardisierten Bewertungsverfahren. Diese Bewertung gibt erste Erkenntnisse über die Güte des Montagearbeitsplatzes. Abbildung 5-47 zeigt auf der linken Seite das 3-D-Menschmodell in einer realistischen Position und Anfangskörperhaltung sowie auf der rechten Seite die simulierte Körperhaltung samt ergonomischer Bewertung nach OWAS und das dazugehörige Sichtfeld des Montagemitarbeiters.

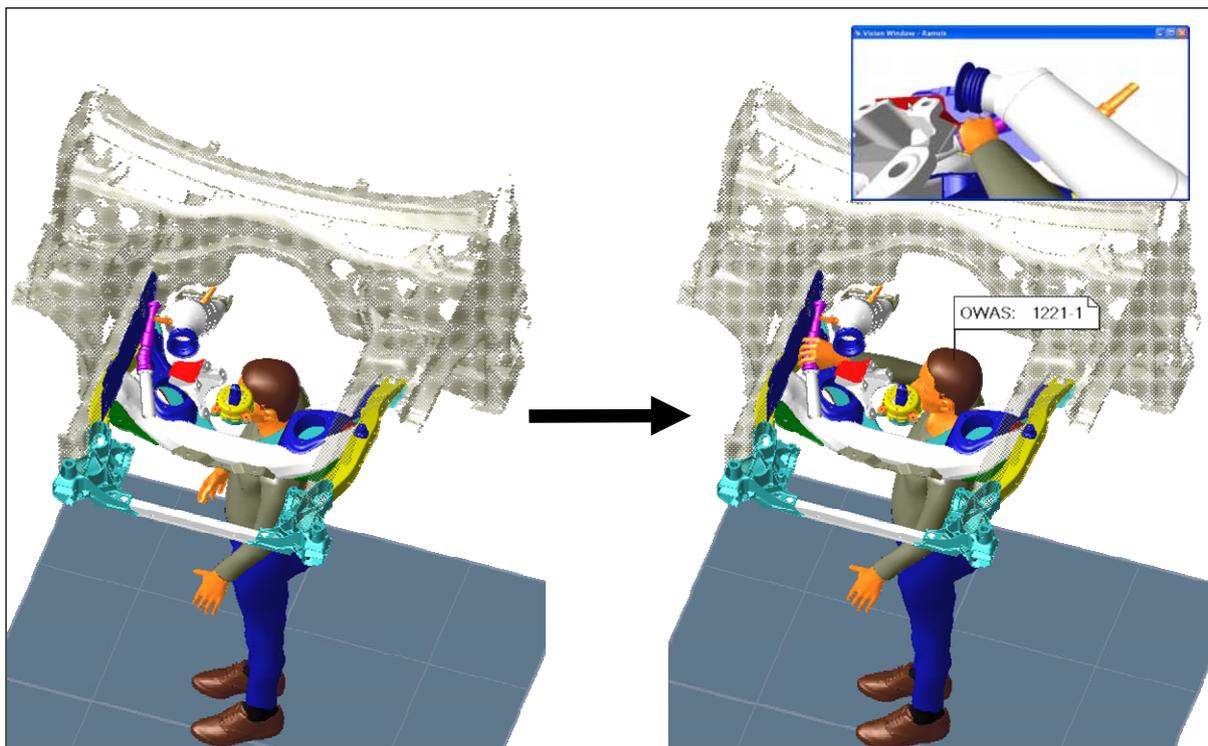


Abbildung 5-47: Umgesetzte Montageuntersuchung

5.2.5.2 Definition der Anforderungen

Die Anforderungen zur Umsetzung der Montageuntersuchung sind hier aufgestellt:

- Fertige vordefinierte Greifarten bereitstellen (z.B. offene Hand, Faust, Fingerdruckkraft, usw.) (s. Abbildung 5-48)
- Automatische Vermeidung von Selbstdurchdringungen des 3-D-Menschmodells
- Berücksichtigung der Eigenschaften der zu montierenden Bauteile und des benachbarten Bauraums (z.B. Gewicht, scharfe Kanten, usw.)
- Ergonomische Bewertung der resultierenden Körperhaltung
- Ergonomische Bewertung des dynamischen Bewegungsablaufes (Hüllgeometrien des Ausbaupfades als Platzhalter generieren)
- Bereitstellung unternehmensspezifischer Bewertungsverfahren (z.B. Anforderungs- und Belastungsanalyse (ABA) – BMW-interne Methode zur Ergonomiebewertung)

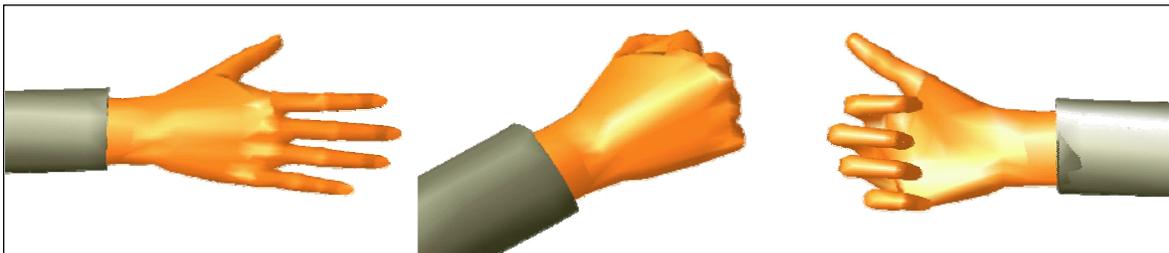


Abbildung 5-48: Vordefinierte Standardgreifarten

5.2.5.3 Minimal notwendiger Handlungsprozess (SOLL-Prozess)

Der minimale Handlungsprozess ist in der folgenden Abbildung 5-49 vorgestellt.

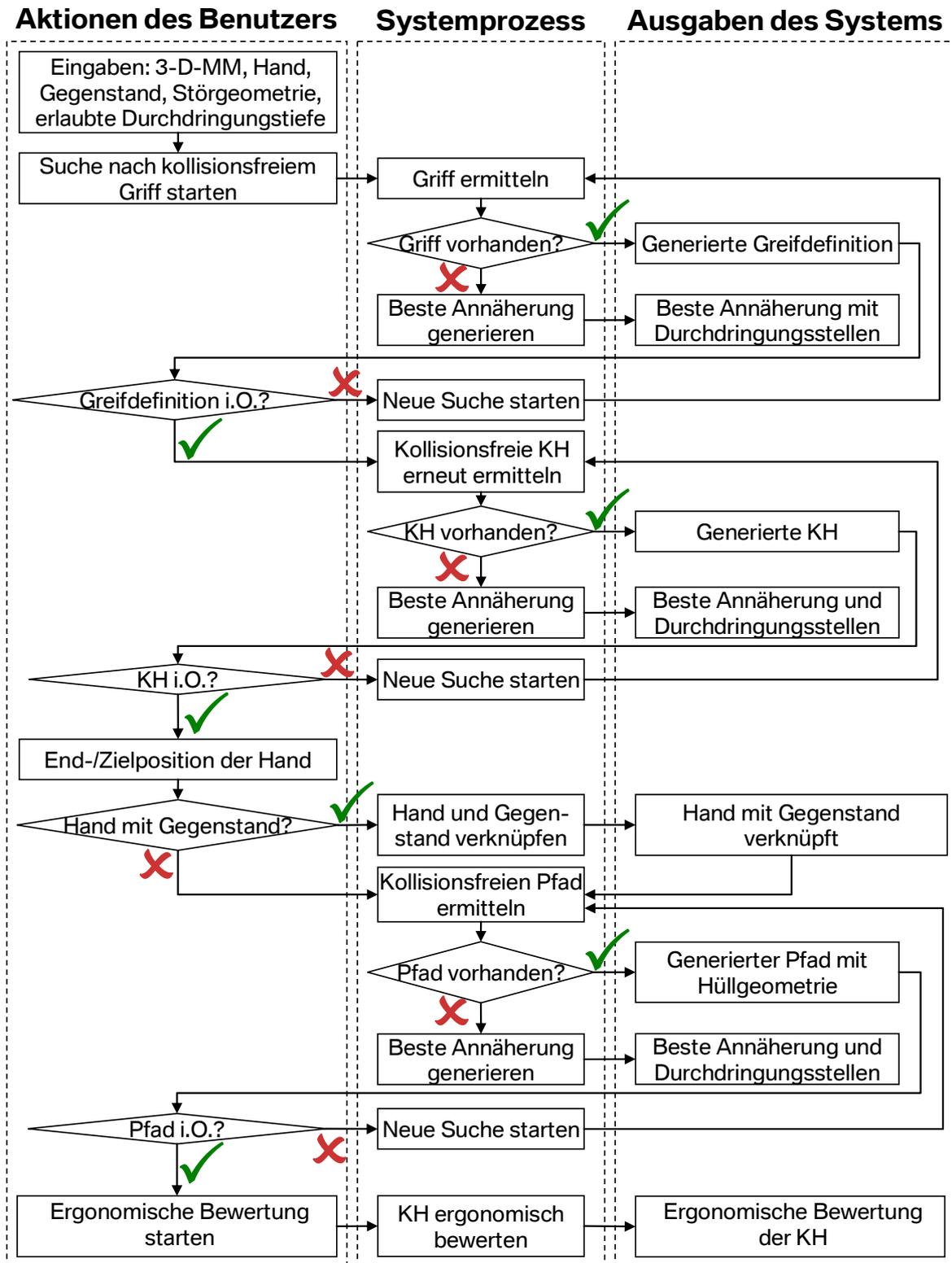


Abbildung 5-49: Idealablauf zur Umsetzung der Montageuntersuchung (SOLL-Prozess)

5.2.5.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die Positionen des zu montierenden Bauteils und des für dessen Montage eventuell benötigten Werkzeuges im eingebauten Zustand sind bekannt. Hieraus kann man den optimalen Griff des Bauteils oder des Werkzeuges im verbauten Zustand ableiten. Da dies die Durchführung der Montageuntersuchung erleichtert, wird diese anhand des Ausbaus dieser Gegenstände betrachtet (Rückwärtsbewegung). Die sich ergebende Vorgehensweise wird aufgrund ihrer Komplexität in kleinere Schritte unterteilt (s. Abbildung 5-50) und einzeln abgehandelt. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden in dieser Phase die Karosserieteile ausgeblendet. Diese haben auf das Ergebnis der Montageuntersuchung ohnehin keinen Einfluss.

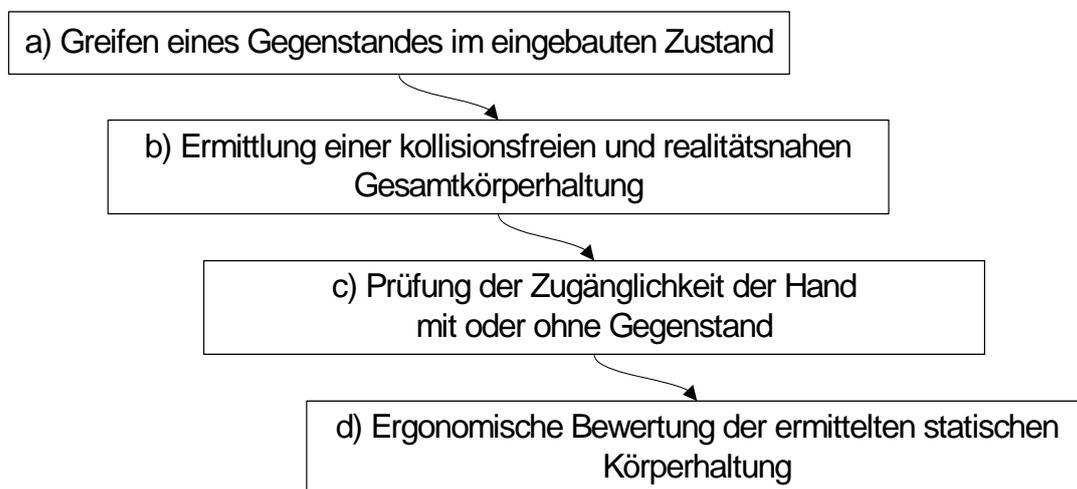


Abbildung 5-50: Schritte zur Umsetzung der Montageuntersuchung

a) Greifen eines Gegenstandes im eingebauten Zustand

Die derzeitige Vorgehensweise bei der Montageuntersuchung wird überwiegend von der Greifdefinition geprägt. Die Art, wie ein Gegenstand gegriffen wird, beeinflusst die weitere Körperhaltung beachtlich. Das Greifen von Gegenständen kann in der Simulationssoftware anhand zweier ähnlicher Funktionen nachgebildet werden. In Abbildung 5-51 wird die favorisierte „Auto Grasp“-Funktion bei der derzeitigen Vorgehensweise zum Greifen der Lenkspindel näher betrachtet. Das Greifen von Werkzeugen wird im Anschluss unter Berücksichtigung eventueller Besonderheiten extra behandelt.

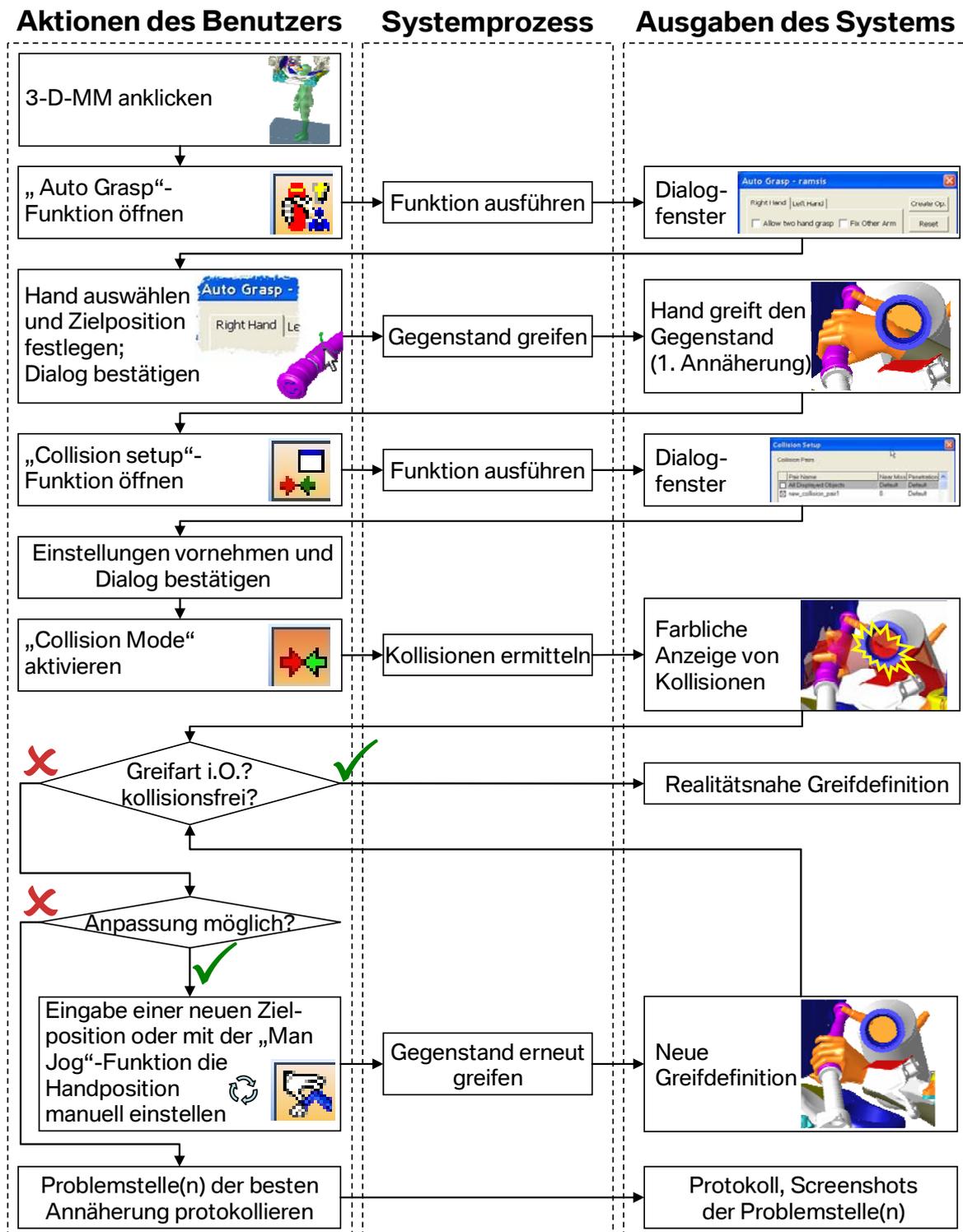


Abbildung 5-51: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zum Greifen eines Gegenstandes mit Hilfe der „Auto Grasp“-Funktion (IST-Prozess)

Anhand der in der „Auto Grasp“-Funktion vorgenommenen Eingaben wird der Gegenstand automatisch mit der festgelegten Hand (hier die rechte Hand) gegriffen, ohne auf Kollisionen mit anderen Bestandteilen zu achten. Dies stellt die erste Annäherung der Greifdefinition dar. Im betrachteten Fall ist die resultierende Greifart

zufrieden stellend. Um eventuelle Kollisionen der Hand mit anderen Bestandteilen aufzudecken, wird nach der Eingabe von Werten für eine erlaubte Durchdringungstiefe sowie für die Anzeige von drohenden Kollisionen die Kollisionsanalysefunktion aktiviert. In diesem Fall sind Durchdringungen der Hand mit anderen Bestandteilen vorhanden (s. Abbildung 5-52, links). Deshalb wird darauf in einem iterativen Prozess mittels der in der „Auto Grasp“-Funktion integrierten „Man Jog“-Funktion nach einer kollisionsfreien und denkbaren Handposition gesucht (s. Abbildung 5-52, rechts). Um gleichzeitig Kollisionen anzuzeigen, kann währenddessen die Kollisionserkennungsfunktion aktiv sein.

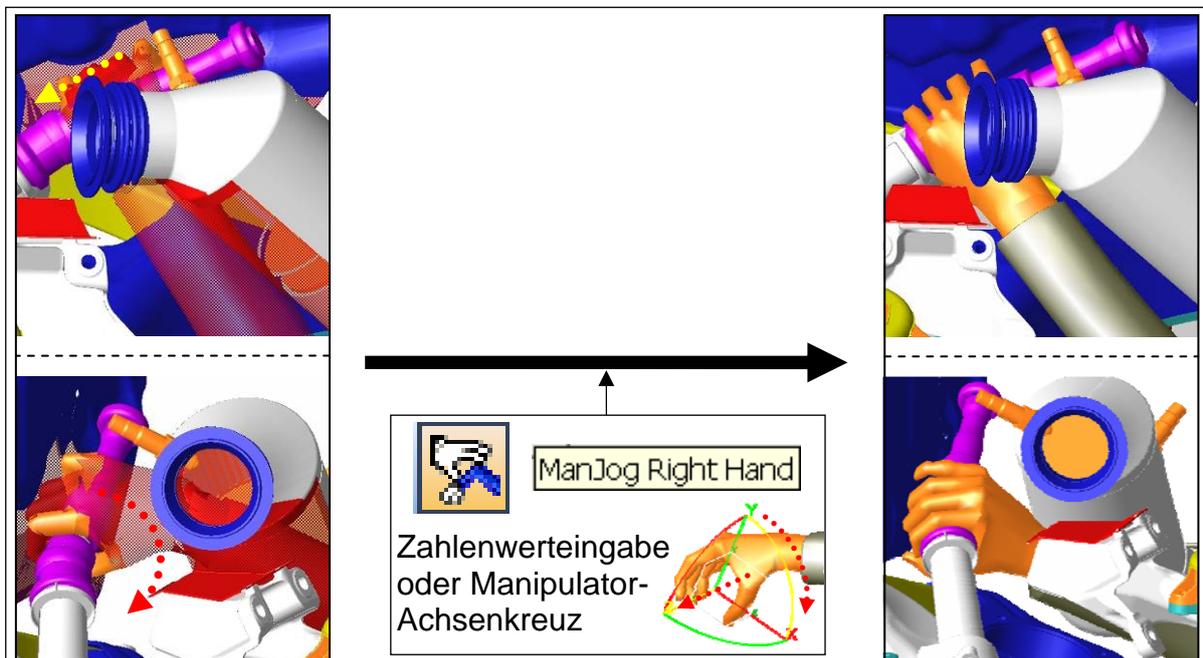


Abbildung 5-52: Manuelle Einstellung der Handposition. Links: Erste Annäherung, Problemstellen und Bewegungsvorschläge. Mitte: Manuelle Bewegung der Hand mit Hilfe der „Man Jog“-Funktion. Rechts: Kollisionsfreie Handposition.

Nach jeder manuellen Bewegung der Hand berechnet die „Auto Grasp“-Funktion sofort eine neue Greifdefinition. Sind die Anpassungsmöglichkeiten zur Ermittlung einer kollisionsfreien Handposition ausgeschöpft, werden die Problemstellen der besten Annäherung anhand von Screenshots dokumentiert.

Kommt ein Werkzeug zum Einsatz, wird zudem geprüft, ob dieses mit der Hand bzw. mit den Händen kollisionsfrei gegriffen werden kann. Die Vorgehensweise geschieht analog zu dem zu montierenden Bauteil. Infolgedessen wird hier auf eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise verzichtet und lediglich ein Beispiel gezeigt (s. Abbildung 5-53).

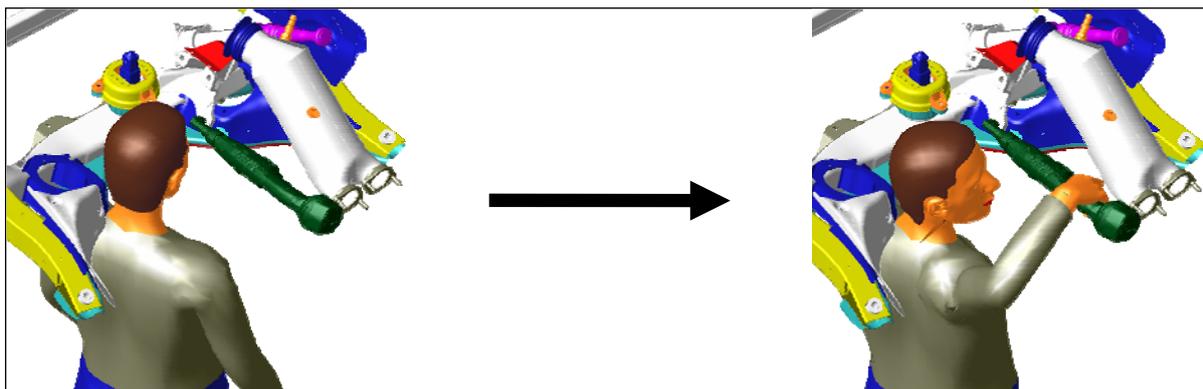


Abbildung 5-53: Greifdefinition für ein Akku-Winkelschrauber (Fiktives Beispiel). Links: Ausgangssituation. Rechts: Ermittelte Greifdefinition.

Die derzeitige Vorgehensweise zeigt eine Reihe von Funktionalitäten, die den Softwarebenutzer beim Nachbilden des Greifens eines Gegenstandes unterstützen. Die „Auto Grasp“-Funktion erlaubt anhand der geringen erforderlichen Eingaben und der Bereitstellung eines einfachen Dialogfensters eine recht komfortable Methode zum Greifen von Gegenständen, zeigt aber einen Optimierungsbedarf auf. Zum Beispiel ist zu beachten, dass angrenzende Komponenten von der Funktion nicht berücksichtigt werden. Die Hand greift damit durch diese hindurch (s. Abbildung 5-54, links). Die Funktion sollte jedoch beide Komponenten miteinbeziehen und einen kollisionsfreien Handgriff berechnen (s. Abbildung 5-54, rechts).

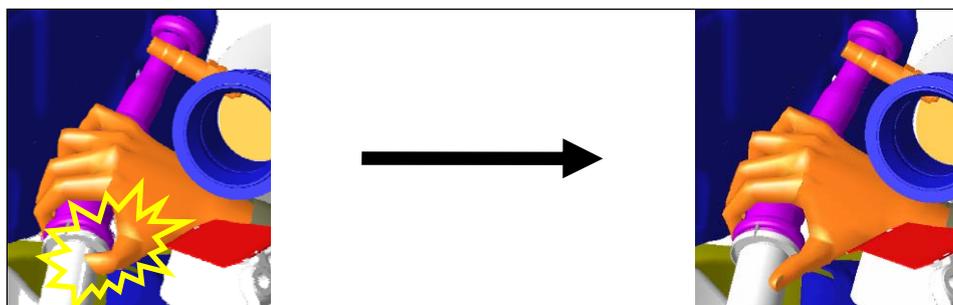


Abbildung 5-54: Probleme beim automatischen Greifen eines Bauteils. Links: Durchdringung des benachbarten Lenkgetriebezapfens. Rechts: Gewünschter Griff.

Des Weiteren tritt beim linearen Verschieben der Hand (hier in positiver x-Richtung) (s. Abbildung 5-55, links oben) mittels des von der „Man Jog“-Funktion erzeugten Achsenkreuzes das gleiche Phänomen (die Hand dreht sich gleichzeitig von allein) wie in Phase IV auf (s. Abbildung 5-55, rechts oben). Auch hier ist die Verschiebung durch Zahlenwerteingabe oder anhand des von der „Advanced Man Jog“-Funktion erzeugten Achsenkreuzes zu empfehlen (s. Abbildung 5-55, rechts unten).

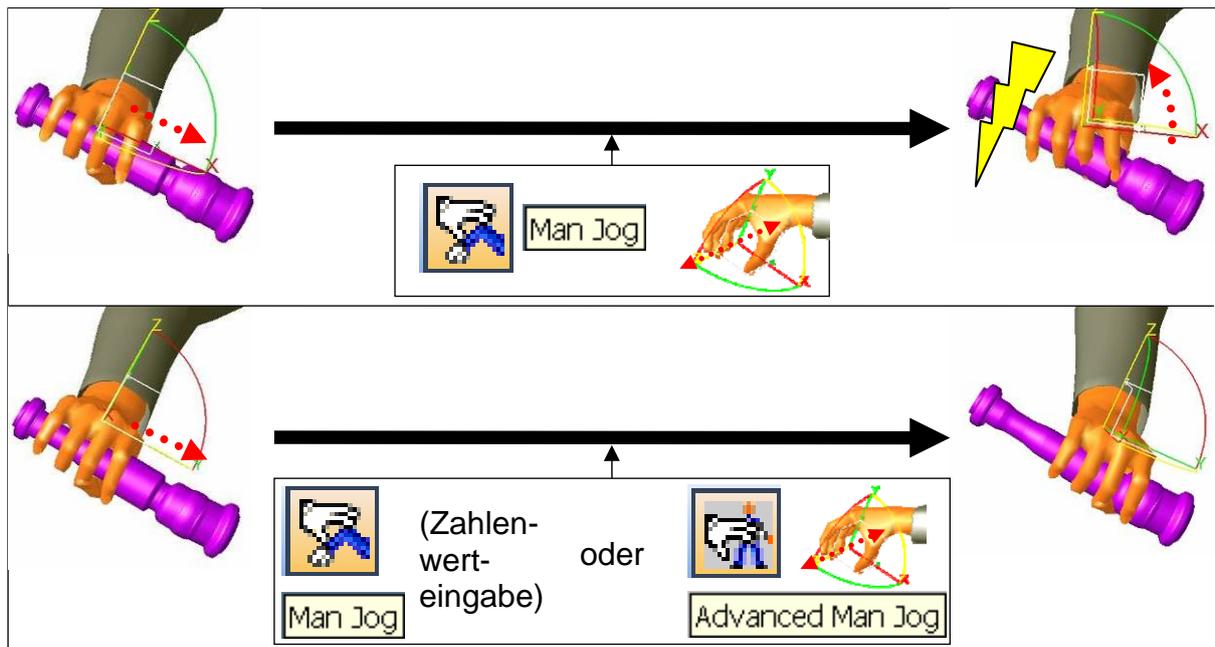


Abbildung 5-55: Unterschiedliches Verhalten zweier ähnlicher Funktionalitäten. Oben: Zusätzliche Drehung der Hand während der linearen Bewegung. Unten: Die Lage der Hand bleibt beibehalten.

Ferner sind keine vordefinierten Greifarten in der „Auto Grasp“-Funktion vorhanden. Dazu ist eine zweite Greiffunktion, die „Grasp Wizard“-Funktion, notwendig. Diese bietet fertige Greifarten, die direkt übernommen und manuell angepasst werden können (s. Abbildung 5-56).

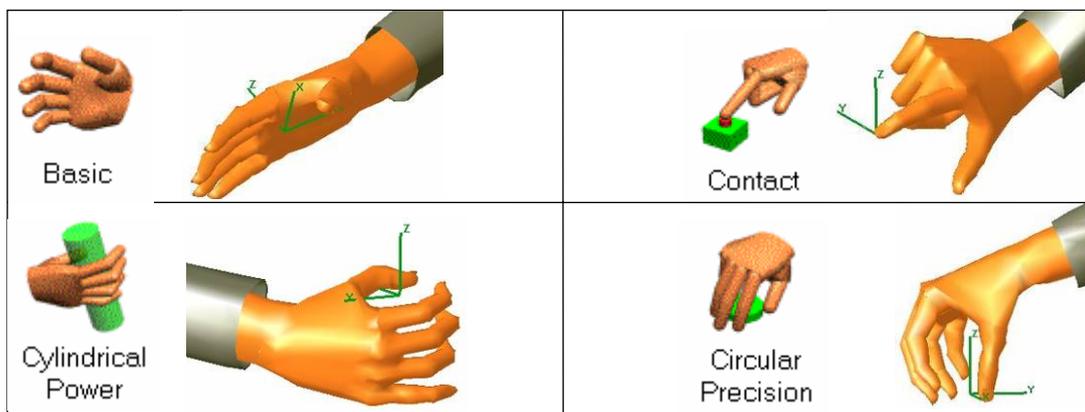


Abbildung 5-56: Beispiele von vordefinierten Greifarten

Positiv zu vermerken ist, dass die „Auto Grasp“-Funktion nach der Eingabe einer neuen Zielposition oder Verschiebung der Hand sofort automatisch erneut nach dem Gegenstand greift. Dabei werden die Körperteilgewichte des 3-D-Menschmodells miteinbezogen und eine balancierte Gesamtkörperhaltung ermittelt.

Zusammenfassend betrachtet werden die gestellten Anforderungen zum Greifen von Gegenständen erfüllt. Um jedoch den bestehenden Aufwand zu reduzieren, bieten sich einige Optimierungsmaßnahmen an. Besonders bei wiederkehrenden Greifdefinitionen wäre die Erstellung von Greifmakros (so genannte „holdings“) sinnvoll. Diese werden einmalig erzeugt, zusammen mit dem jeweiligen Gegenstand gespeichert und können danach per Knopfdruck immer wieder verwendet werden. Gerade bei Werkzeugen, die wenige konkrete Greifarten aufweisen, sind diese Makros sehr hilfreich. Für Bauteile sind Greifmakros ebenso nützlich. Allerdings lässt sich das Greifen von Bauteilen schwieriger standardisieren. Deshalb ist hierfür die weitere Nutzung der „Auto Grasp“-Funktion zu empfehlen. Die folgende Abbildung 5-57 zeigt beispielhaft die Greifmakros von zwei unterschiedlichen Werkzeugen.

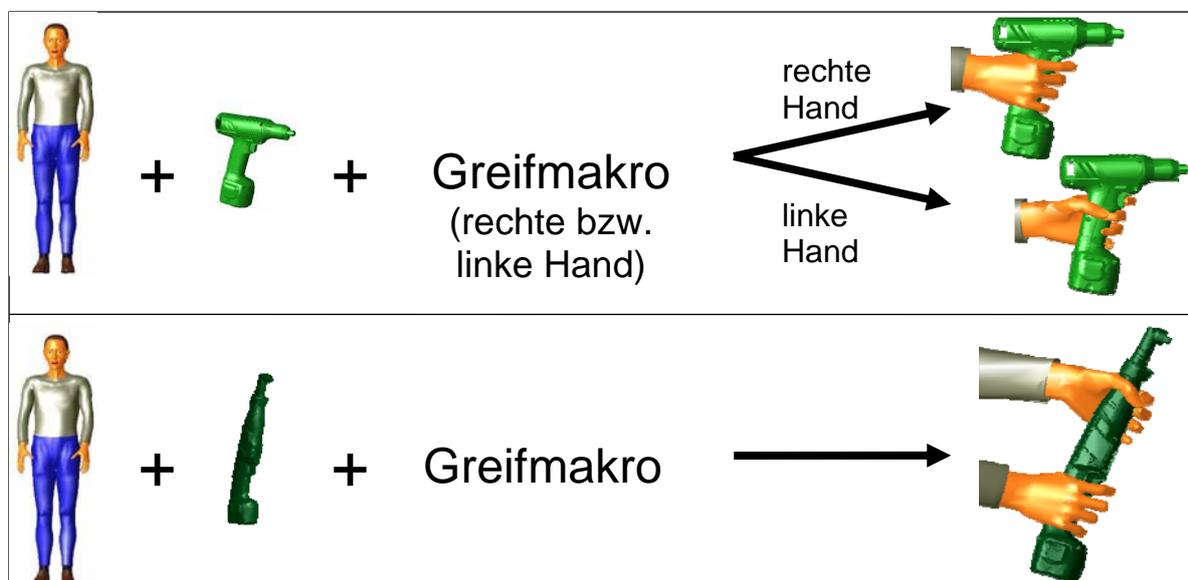


Abbildung 5-57: Vordefinierte Greifmakros für Werkzeuge

Der meiste manuelle Aufwand steckt in der Suche nach einer kollisionsfreien Greifdefinition. Besonders bei engen Bauräumen kann dies sehr mühsam und zeitaufwändig sein. Deshalb ist anzustreben, ein nach Festlegung der Störgeometrie (s. Abbildung 5-58) automatisch kollisionsfreies Greifen von Gegenständen zu ermöglichen. Kann auch so keine Lösung gefunden werden, soll das Programm sukzessive die Durchdringungstiefe bis zu einem maximalen definierbaren und zulässigen Wert automatisch erhöhen. Nach erfolgreicher Berechnung werden die Durchdringungsstellen generiert. Ist es trotz Durchdringungstiefe nicht möglich, eine Greifdefinition zu finden, kann die beste Annäherung an den Gegenstand ermittelt und dem Anwender zur Verfügung gestellt werden.

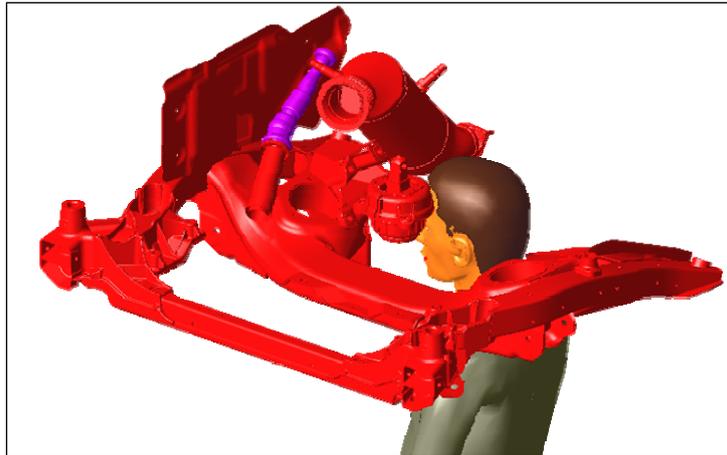


Abbildung 5-58: Festgelegte Störgeometrie (rot dargestellt)

Treten Kollisionen beim Greifen eines Werkzeuges auf (s. Abbildung 5-59, links), sollte zunächst versucht werden, diese durch Verstellen des Werkzeuges, z.B. um die Funktionsachse herum (s. Abbildung 5-59, Mitte oben), ohne dabei die Greifdefinition zu ändern, automatisch von der Software beseitigen zu lassen. Kann so keine kollisionsfreie Handposition ermittelt werden, wird als nächstes versucht, dies durch tangentielle Verschiebung der Hand auf der Mantelfläche des Werkzeuges (s. Abbildung 5-59, Mitte unten) in einem definierten Bereich zu erreichen. Bei Bauteilen wird direkt letztere Vorgehensweise angewendet.

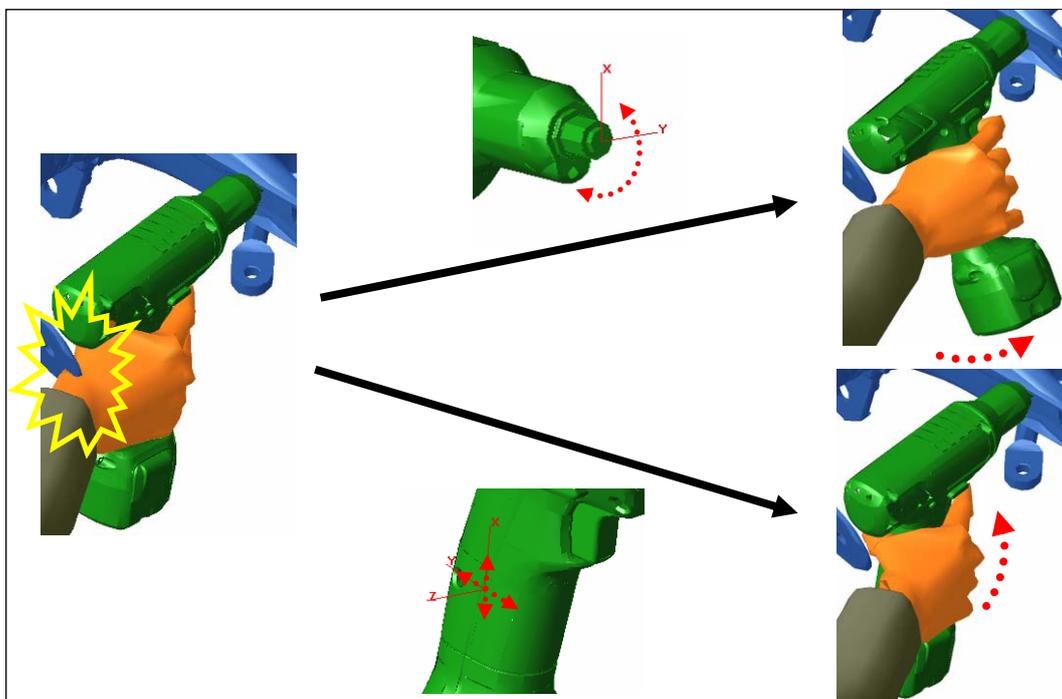


Abbildung 5-59: Automatische Suche nach einer kollisionsfreien Handposition

Im Folgenden ist der optimierte Handlungsprozess zum Greifen einer Komponente zusammengefasst dargestellt (s. Abbildung 5-60).

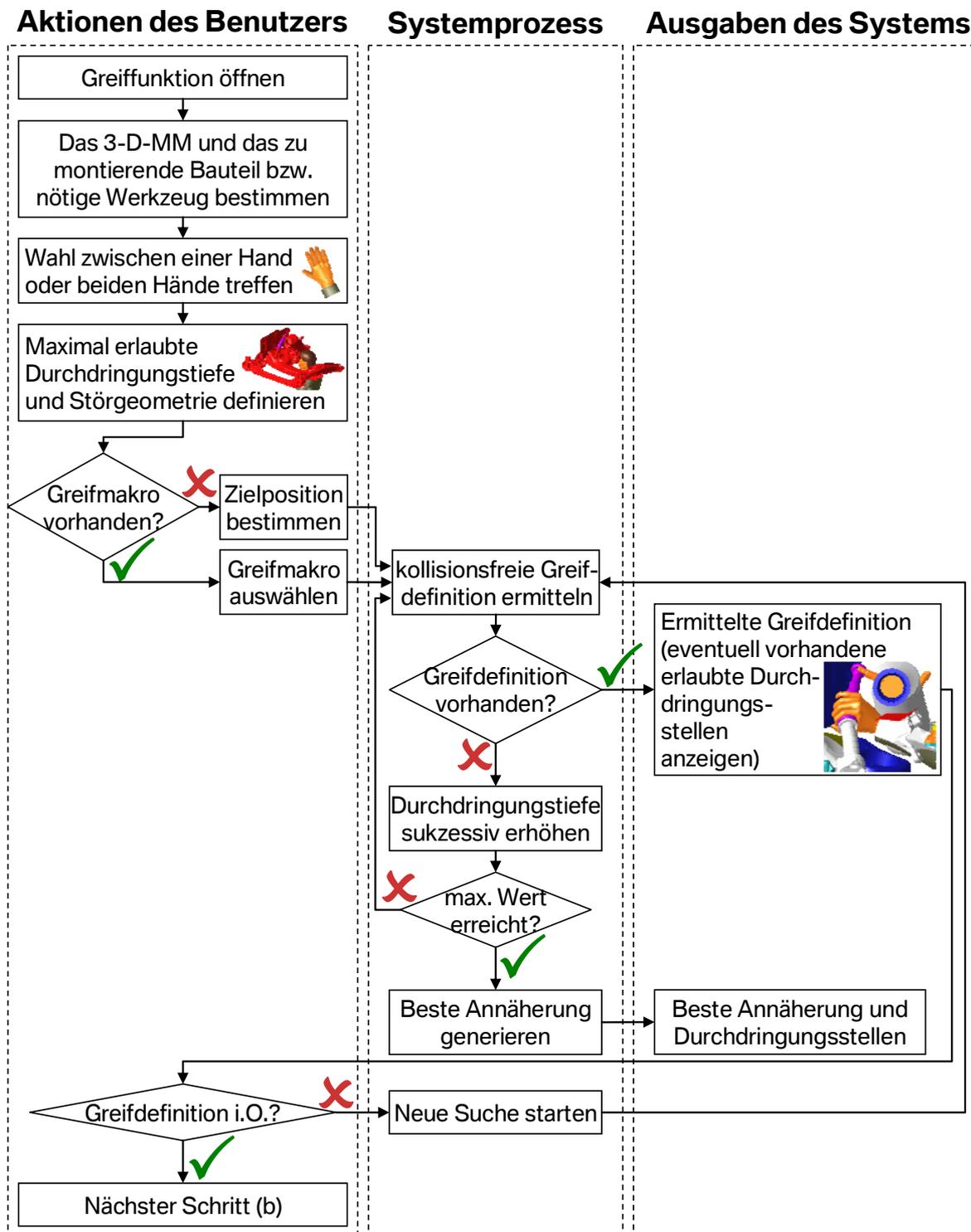


Abbildung 5-60: Optimierter Prozess zum kollisionsfreien Greifen eines Gegenstandes

b) Ermittlung einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung

Konnte eine Greifdefinition erfolgreich ermittelt werden, gilt es in einem nächsten Schritt eine erneut kollisionsfreie und realitätsnahe Gesamtkörperhaltung einzustellen, die, wenn möglich, eine Einsehbarkeit der Montagestelle bietet.

Im Folgenden sind die derzeit nötigen Schritte zusammengefasst dargestellt (s. Abbildung 5-61).

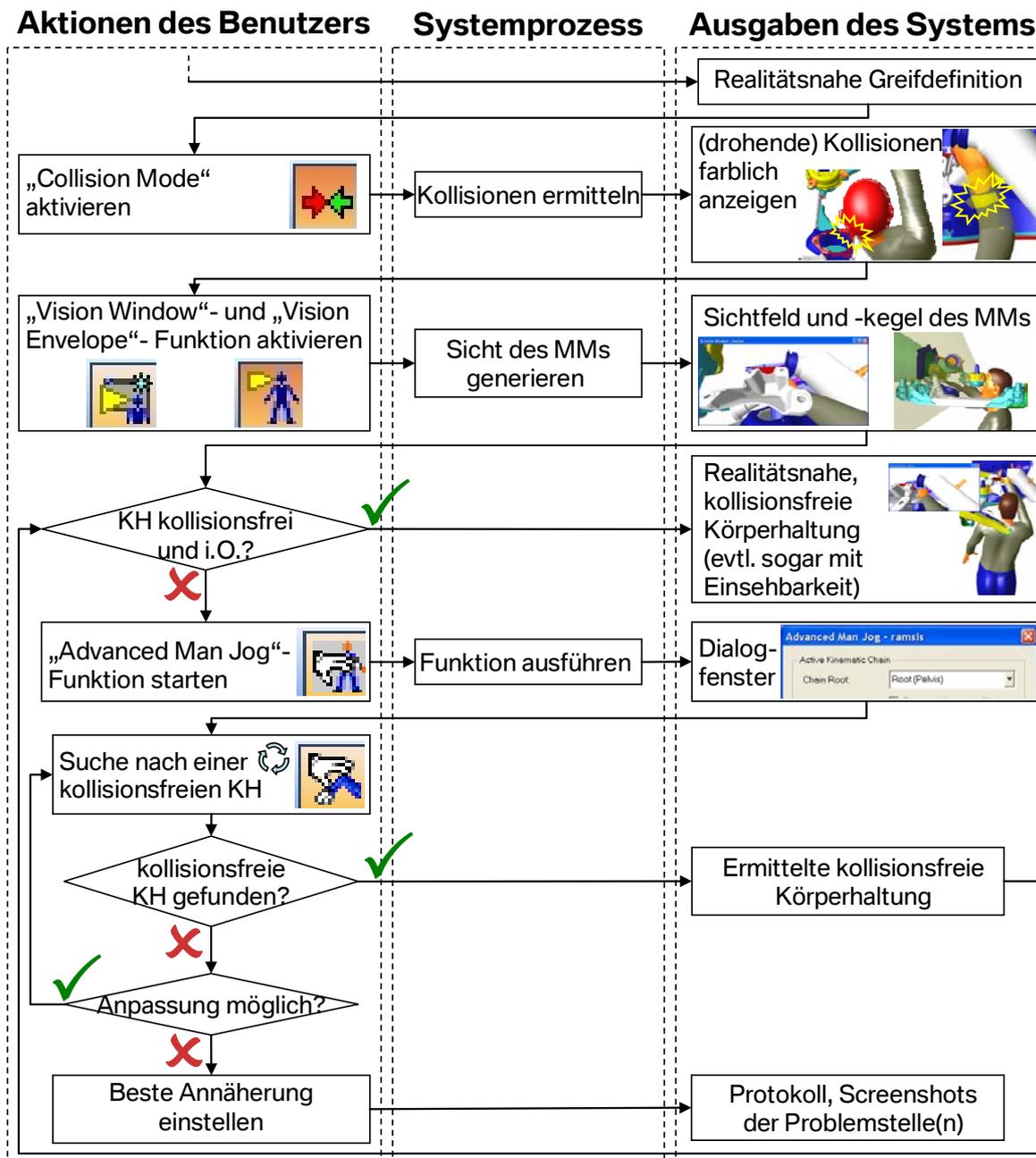


Abbildung 5-61: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Ermittlung einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung (IST-Prozess)

Beim derzeit notwendigen Handlungsprozess wird zunächst geprüft, ob die vorhandene Körperhaltung Durchdringungsstellen bzw. (drohende) Kollisionen aufweist und eine ausreichende Einsehbarkeit gewährt. Die „Vision Envelope“-Funktion zeigt in Form eines Sichtkegels den aktuellen optimalen und maximalen Sichtbereich des Menschmodells (s. Abbildung 5-62, links). Die „Vision Window“-Funktion hingegen ermöglicht die Sicht des 3-D-Menschmodells durch seine Augen zu sehen (s. Abbildung 5-62, rechts).

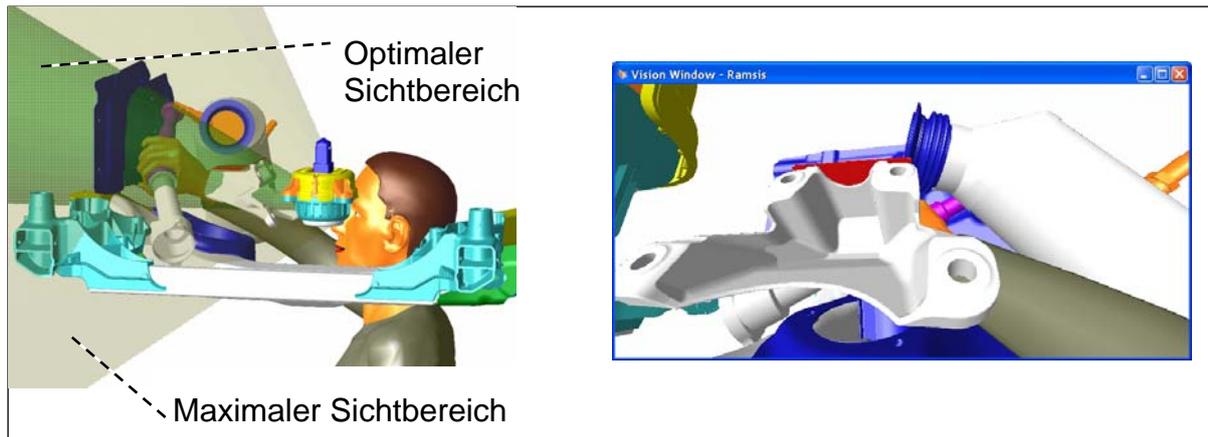


Abbildung 5-62: Sichtkontrollmöglichkeiten. Links: Sichtkegel („Vision Envelope“). Rechts: Sichtfenster („Vision Window“).

Die betrachtete Körperhaltung zeigt in der rechten Bahn der Abbildung 5-61 Durchdringungsstellen (rot dargestellt) und drohende Kollisionen (gelb dargestellt) auf. Außerdem verrät das Sichtfenster (s. Abbildung 5-62, rechts), dass die momentane Körperhaltung keine freie Sicht auf die Montagestelle bietet. Aus diesen Gründen muss die Körperhaltung in einem weiteren Schritt zusätzlich manuell angepasst werden. Anhand der „Advanced Man Jog“-Funktion kann beispielsweise die zuvor ermittelte Greifdefinition der Hand fixiert (s. Abbildung 5-63, unten) und darauf einzelne Gelenke (Ellenbogen, Schulter, Hals,...) interaktiv mit den von der dort integrierten „Man Jog“-Funktion erzeugten Achsenkreuzen manuell eingestellt werden. Gleichzeitig sind sowohl die Kollisionserkennungsfunktion als auch die Sichtkontrollfunktionen aktiv. Anhand dieser können während der Bewegung des 3-D-Menschmodells die Veränderungen im Hinblick auf Kollisionen und die Sicht verfolgt werden. Kann hiermit keine Lösung gefunden werden, ist die beste Annäherung einzustellen und sind Problemstellen zu protokollieren. Abbildung 5-63 zeigt bildhaft die soeben beschriebenen Aspekte.

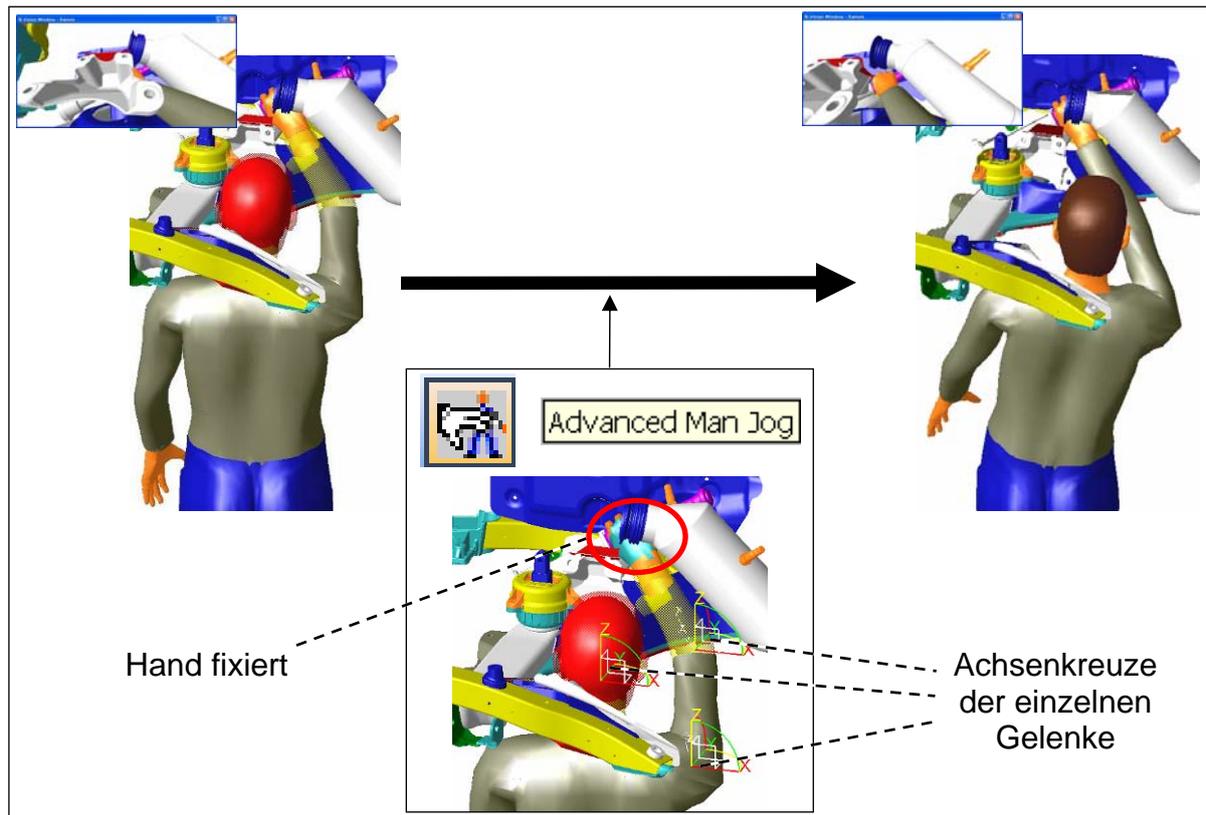


Abbildung 5-63: Suche nach einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung. Links: Ausgangssituation. Mitte: Funktion zur zusätzlichen Anpassung des 3-D-Menschmodells. Rechts: Ermittelte Körperhaltung.

Die derzeit notwendige manuelle Suche nach einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung zeigt sich als sehr zeit- und arbeitsintensiv. Die vielen Verstellmöglichkeiten einzelner Gelenke erlauben die Einstellung einer Fülle an unterschiedlichen Körperhaltungen. Dabei muss zusätzlich auf eventuell vorkommende Selbstdurchdringungen des 3-D-Menschmodells geachtet werden. Außerdem besteht keine Gewissheit, dass es überhaupt eine Lösung für die gestellte Aufgabe gibt. Dies kann nur durch wiederholte Anpassungsversuche festgestellt werden. Die bereitgestellte Kollisionserkennungsfunktion zeigt alle (drohenden) Kollisionen auf, jedoch keine Werte der Durchdringung selbst. Somit gibt diese auch keine direkten Empfehlungen zum Bewegen des 3-D-Menschmodells und dient lediglich als Warnfunktion. Unterstützung bieten auch die verfügbaren Funktionalitäten zur Sichtanalyse.

Trotz dieser unterstützender Funktionalitäten erfolgt die Suche nach einer kollisionsfreien Körperhaltung mit Sicht auf die Montagestelle ausschließlich manuell durch den Benutzer. Zielführend wäre eine Funktionalität, die anhand der Festlegung der

Störgeometrie automatisch nach einer kollisionsfreien Körperhaltung möglichst mit Einsehbarkeit der Montagestelle sucht. Dabei soll die zuvor generierte Greifdefinition beibehalten werden. Eine ähnliche Funktionalität bietet die Simulationssoftware mit der „RAMSIS Posture Wizard“-Funktion bereits an. Diese benötigt die Eingabe von so genannten Restriktionsebenen (s. Abbildung 5-64, links) um die Störgeometrie zu definieren. Jede Restriktionsebene besteht aus einer grünen und einer roten Fläche. Der Raum vor der grünen bzw. hinter der roten Fläche repräsentiert jeweils den erlaubten und den verbotenen Bereich. Bei geometrisch komplexen Bestandteilen (s. Abbildung 5-64, rechts) ist diese Vorgehensweise jedoch kaum praktikabel und sehr aufwändig. An dieser Stelle sollte deshalb, genauso wie beim Greifen eines Gegenstandes, die Umgebungsgeometrie automatisch als Störgeometrie definierbar sein.

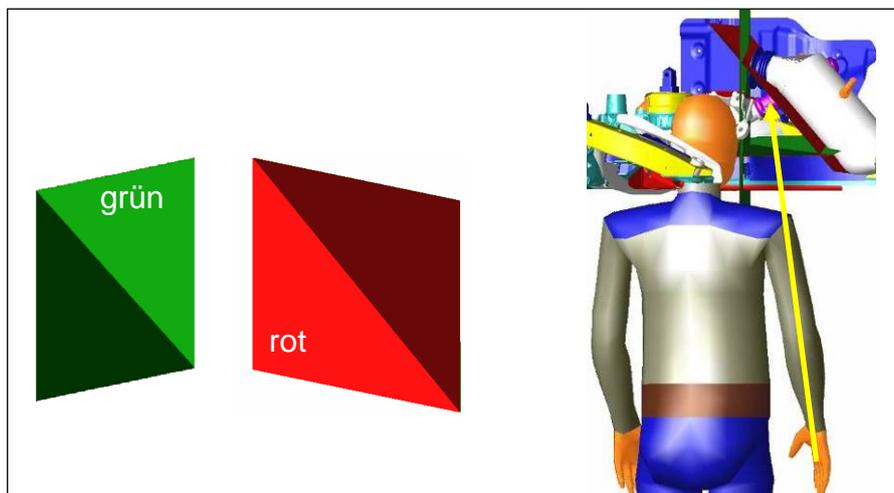


Abbildung 5-64: Restriktionsebenen (links) und vorgenommene Eingaben für die „RAMSIS Posture Wizard“-Funktion bei der betrachteten Montageuntersuchung (rechts): Greifziel (gelber Pfeil) und Restriktionsebenen für die rechte Hand.

Um darüber hinaus ausreichende Einsehbarkeit zu erreichen, sollte die Funktion gleichzeitig versuchen, automatisch den oben bereits beschriebenen optimalen Sichtbereich einzustellen, wenn möglich ohne wesentliche Veränderungen der generierten kollisionsfreien Körperhaltung.

Für die Zukunft wünschenswert wäre eine zusätzliche, neue Funktionalität, anhand derer mittels des 3-D-Menschmodells Möglichkeiten für den Werker, sich an der Karosserie abzustützen, ermittelt werden können. Diese müsste hierbei dadurch bedingte Änderungen der Gesamtkörperhaltung und durch das Anlehnen an Fahrzeugbauteile bedingte Durchdringungstiefen miteinbeziehen. Der damit verbundene

Aufwand wäre mit einer durch das Anlehnen erhöhten Erreichbarkeit des Bauteils und vor allem einer Entlastung des Werkers bei der Aufrechterhaltung der benötigten Körperhaltung zu rechtfertigen [112].

Kann keine Lösung gefunden werden, soll die Durchdringungstiefe sukzessive erhöht werden. Ist trotz Erreichen des Maximalwertes keine kollisionsfreie Körperhaltung zu ermitteln, soll die bestmögliche Annäherung an diese ermittelt und dem Anwender zur Verfügung gestellt werden.

Im Folgenden ist der optimierte Handlungsprozess zur Ermittlung einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung zusammengefasst dargestellt (s. Abbildung 5-65). Dabei werden Eingaben, die hier benötigt werden und bereits beim Greifen des Gegenstandes vorgenommenen wurden, weggelassen (z.B. 3-D-Menschmodell, betrachteter Gegenstand, betrachtete Hand, Durchdringungstiefe, Störgeometrie).

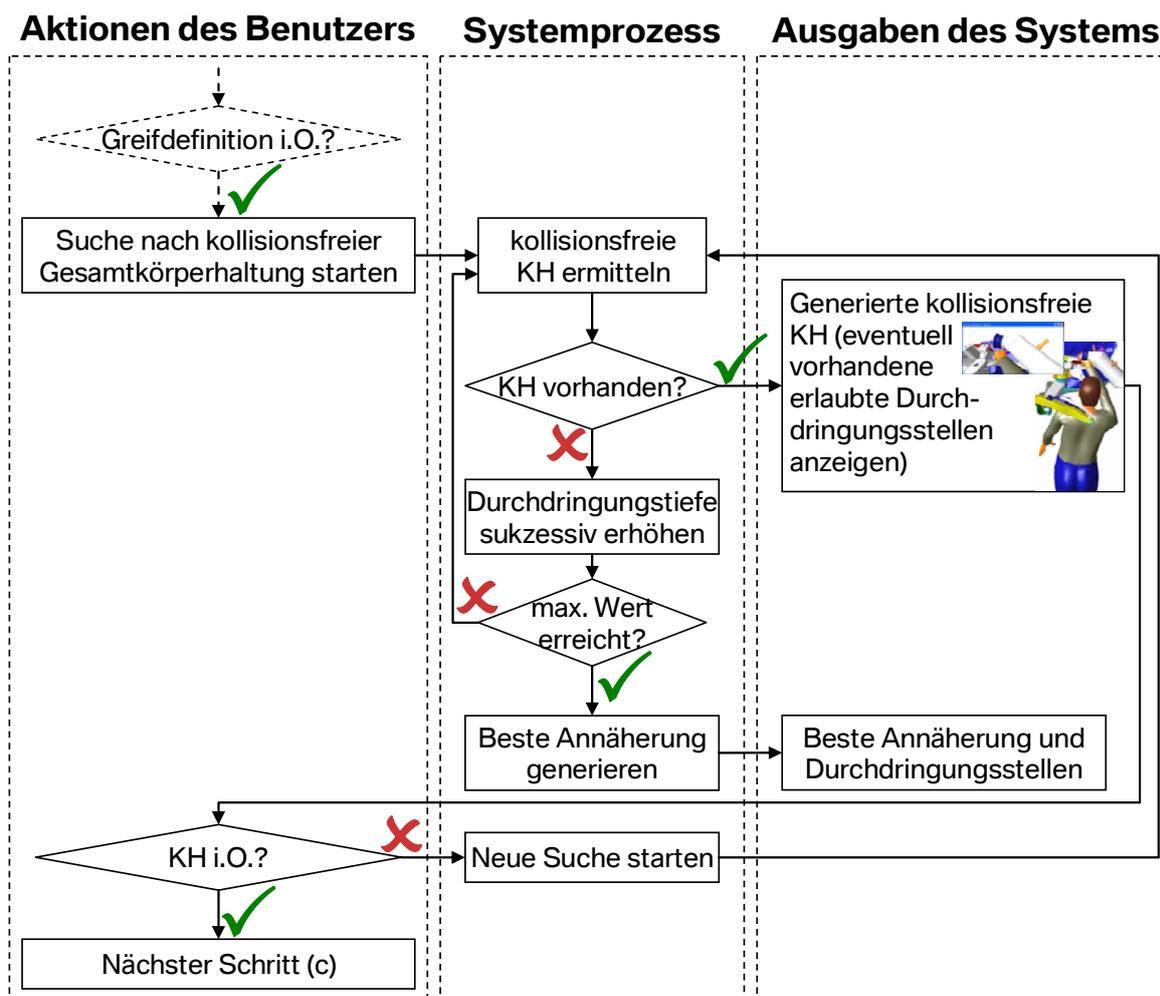


Abbildung 5-65: Optimierter Prozess zur Ermittlung einer kollisionsfreien und realitätsnahen Gesamtkörperhaltung

c) Prüfung der Zugänglichkeit der Hand mit oder ohne Gegenstand

Wurde im vorherigen Schritt eine geeignete kollisionsfreie Körperhaltung beim Greifen des Gegenstandes gefunden, gilt es als Nächstes zu prüfen, ob diese Körperhaltung unter den räumlichen Gegebenheiten überhaupt vom 3-D-Menschmodell entlang eines kollisionsfreien Pfades (hier am Beispiel eines Ausbaupfades) erreicht werden kann. Dabei wird je nach Montageuntersuchung die Hand alleine oder die Hand samt Gegenstand betrachtet. Der derzeit notwendige Handlungsprozess ist in Abbildung 5-66 dargestellt.

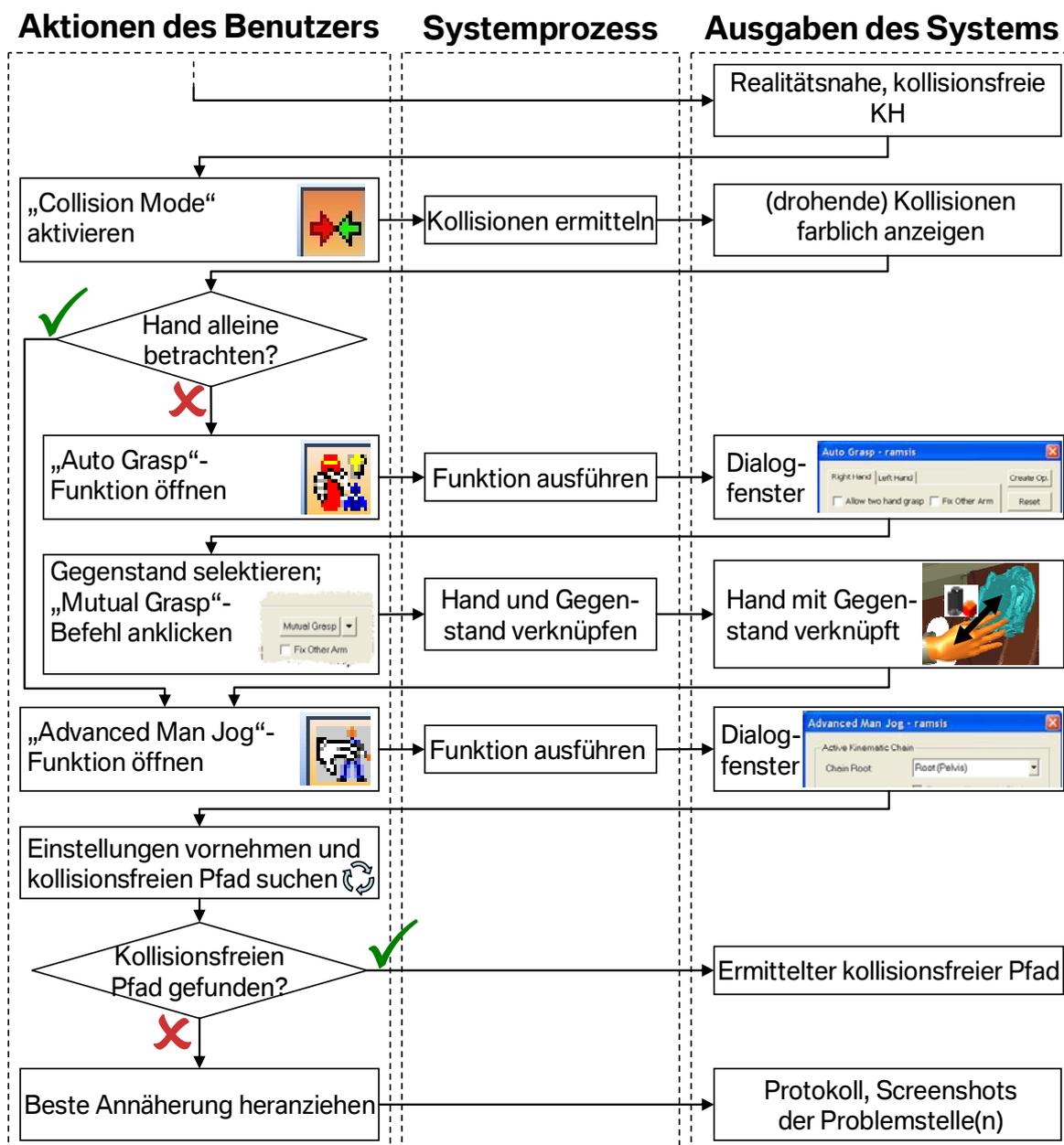


Abbildung 5-66: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Prüfung der Zugänglichkeit der Hand alleine sowie samt Gegenstand (IST-Prozess)

Damit der Benutzer während der Pfadsuche (drohende) Kollisionen farblich angezeigt bekommt, wird zunächst die Kollisionserkennungsfunktion aktiviert. Soll der gegriffene Gegenstand bei der Pfadsuche einbezogen werden (s. Abbildung 5-67), wird dieser zuvor mittels des in der „Auto Grasp“-Funktion integrierten „Mutual Grasp“-Befehls mit der Hand verknüpft.

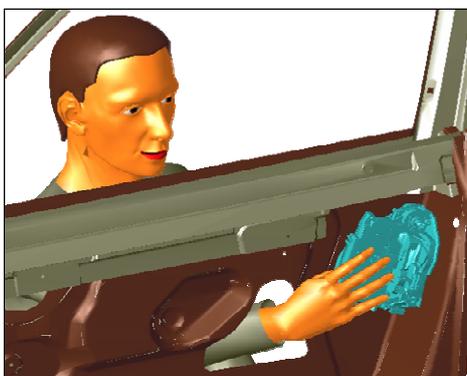


Abbildung 5-67: Gegenstand wird bei der Montageuntersuchung miteinbezogen

Darauf wird anhand der „Advanced Man Jog“-Funktion durch Bewegung verschiedener Gelenke (z.B. Handgelenk und Ellenbogen) und Fixierung von Körperteilen (z.B. Beine, Becken) manuell Schritt für Schritt versucht, einen kollisionsfreien Pfad zu finden (s. Abbildung 5-68). Falls die Hand mit einem Gegenstand betrachtet wird, bleibt die Greifdefinition beibehalten. Die restlichen Körperteile bewegen sich nach dem Prinzip der inversen Kinematik.

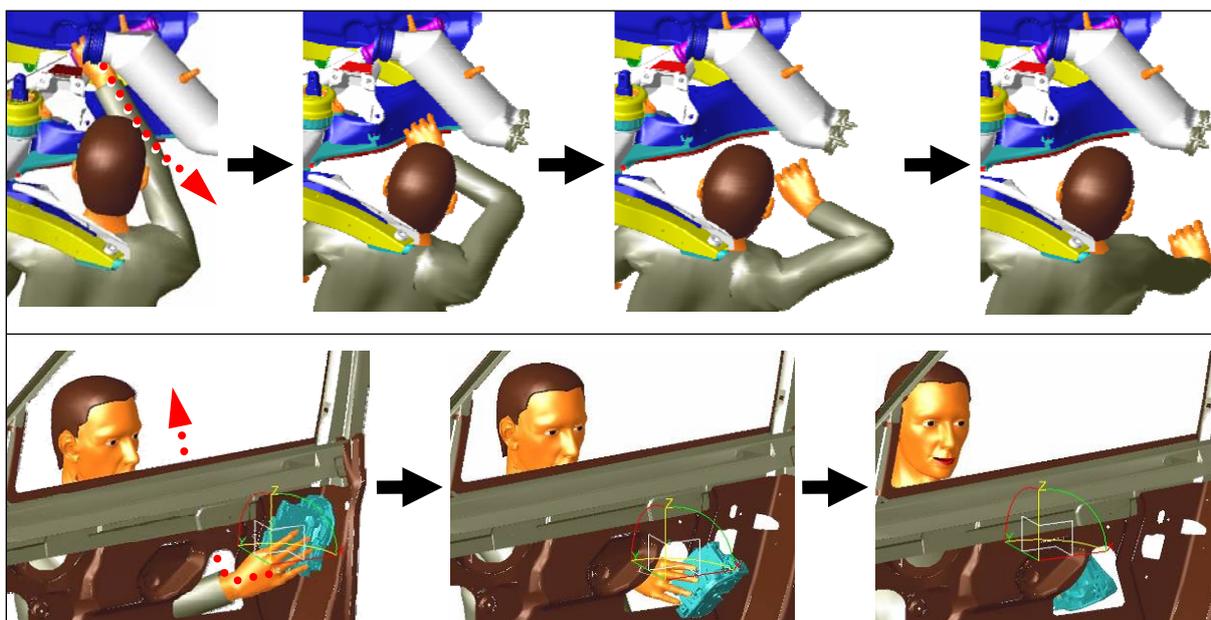


Abbildung 5-68: Sequenz von kollisionsfreien Körperhaltungen während der Pfadsuche. Oben: Betrachtete Montageuntersuchung (nur Hand). Unten: Hand mit Gegenstand.

Kann keine kollisionsfreie Zugänglichkeit der Montagestelle aufgezeigt werden, werden die Problemstellen der besten Annäherung protokolliert.

Die derzeitige Suche nach einem kollisionsfreien Pfad wird rein manuell im „Trial-and Error-Verfahren“ durchgeführt. Obwohl hier bereits die Kollisionserkennungsfunktion zur Verfügung steht, ebenso wie eine bereits vorhandene Funktionalität, die das Mitführen von Gegenständen in der Hand ermöglicht, bedeutet dies derzeit einen sehr großen Aufwand. Beim Verknüpfen des Gegenstandes mit der Hand ist außerdem darauf zu achten, dass bevor der Gegenstand angeklickt wird, die ebenso in der „Auto Grasp“-Funktion zu findende „Snap to object“-Option deaktiviert wird. Ansonsten würde die Funktion automatisch an der selektierten Stelle nach dem Gegenstand greifen und somit den ursprünglichen Griff verstellen. Des Weiteren werden bei der Suche nach dem Ausbaupfad derzeit nur isolierte Körperhaltungen und kein zusammenhängender Pfad ermittelt. Somit kann auch keine Hüllgeometrie eines Pfades angezeigt werden. Aus diesen Gründen sollte die Suche nach einem kollisionsfreien Pfad automatisiert und bei erfolgreicher Berechnung dessen Hüllgeometrie angezeigt werden. Dabei sollte die derzeit nicht erfüllte Anforderung nach der Berücksichtigung gewisser Eigenschaften des Gegenstandes und der benachbarten Bestandteile betrachtet werden. Gerade bei Präsenz von scharfen Kanten oder heißen Bestandteilen sollte dies in die Berechnung eines Pfades mit einfließen und diese möglichst gemieden werden.

Falls keine Lösung gefunden werden kann, so soll auch hier die erlaubte Durchdringungstiefe berücksichtigt werden. Wenn der maximale Wert erreicht wird, so soll die beste Annäherung ermittelt und die Problemstellen angezeigt werden.

Abbildung 5-69 zeigt den optimierten Handlungsprozess zur Suche nach einem kollisionsfreien Pfad für die Hand mit oder ohne Gegenstand. Auch in diesem Flussdiagramm wird zur besseren Übersichtlichkeit auf die Eingaben verzichtet, die bereits beim Greifen des Gegenstandes vorgenommenen wurden und hier genauso benötigt werden.

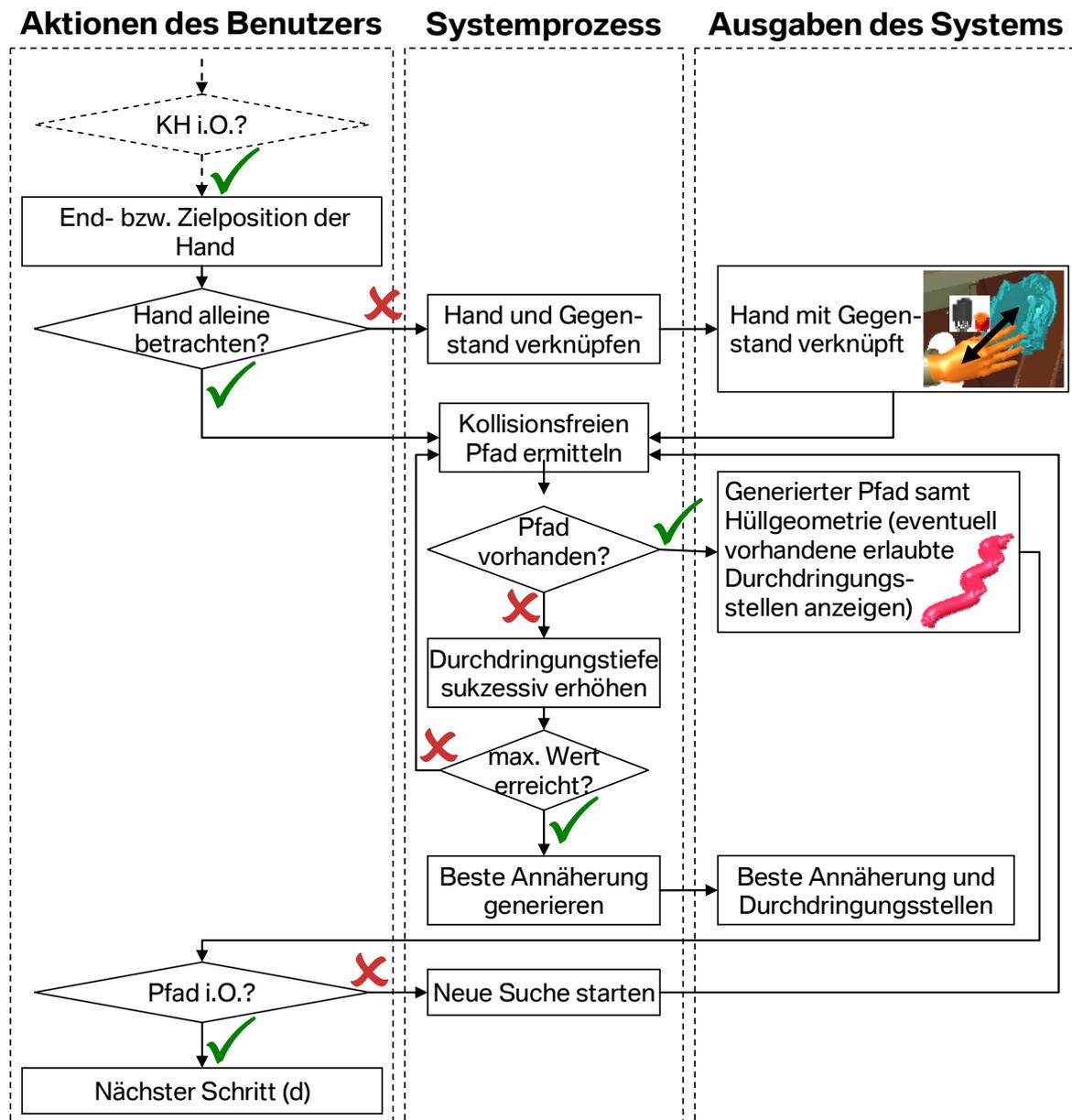


Abbildung 5-69: Optimierter Prozess zur Suche eines kollisionsfreien Pfades

d) Ergonomische Bewertung der ermittelten statischen Körperhaltung

Nachdem eine kollisionsfreie Körperhaltung gefunden wurde und diese vom 3-D-Menschmodell auch unter Berücksichtigung räumlicher und physiologischer Aspekte eingenommen werden kann, wird diese ergonomisch bewertet. Den derzeit notwendigen Handlungsprozess stellt Abbildung 5-70 dar.

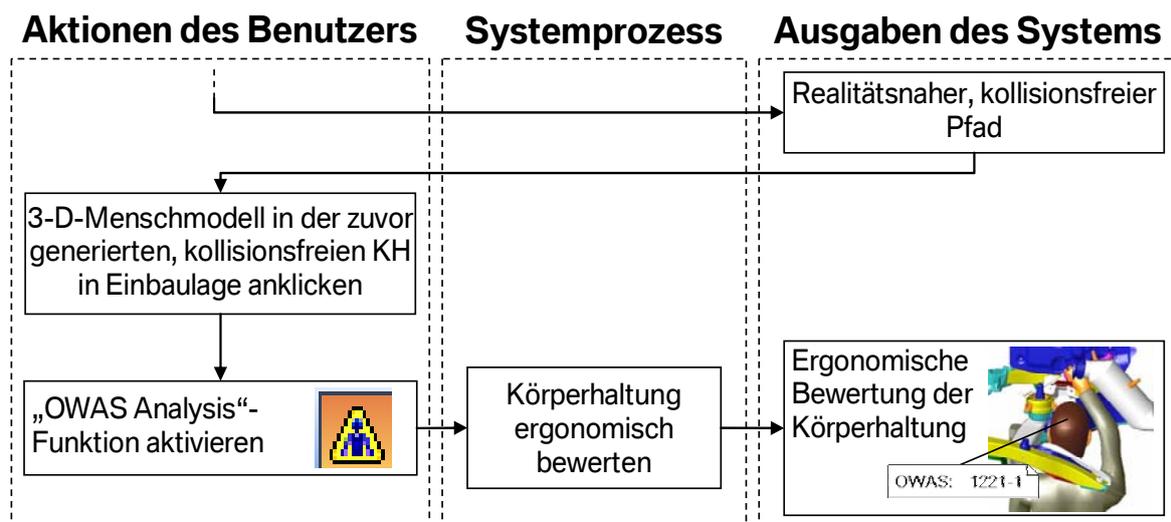


Abbildung 5-70: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur ergonomischen Bewertung der statischen Körperhaltung (IST-Prozess)

Die ermittelte statische Körperhaltung wird nach ergonomischen Gesichtspunkten mit der in der Simulationssoftware implementierten OWAS-Methode analysiert und beurteilt. Dabei handelt es sich um eine einfache und anerkannte Papier- und Bleistiftmethode zur Erfassung, Klassifizierung und Beurteilung von Arbeitshaltungen bezüglich ihrer Gesundheitsgefährdung. Sie beschränkt sich nicht allein auf eine Analyse der Körperhaltung, sondern gibt zugleich die Dringlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen der Arbeitsplatzgestaltung an. Nach dem Aktivieren der Funktionalität wird die Bewertung der Körperhaltung in Form eines Zifferncodes angezeigt (s. Abbildung 5-71, links) und durch unterschiedliche Einfärbungen die Belastungsstufe einzelner Körperteile dargestellt (s. Abbildung 5-71, rechts).

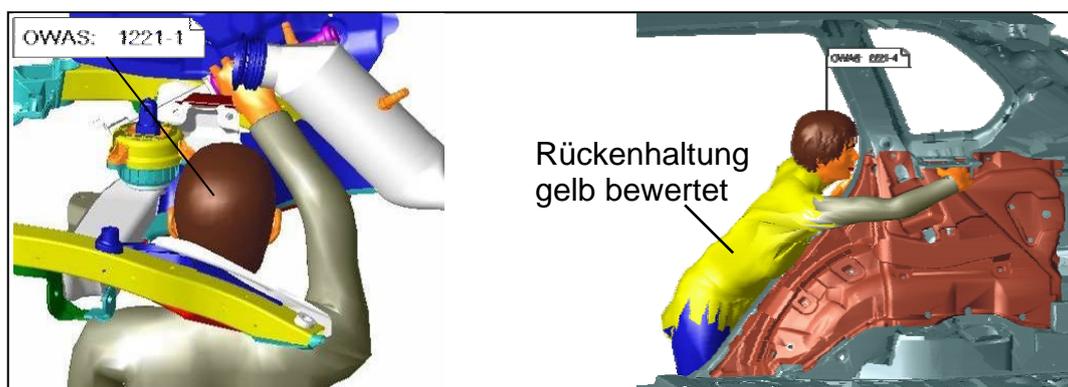


Abbildung 5-71: Ergonomische Analyse statischer Arbeitshaltungen mittels der OWAS-Methode. Links: Ergonomisch günstige Körperhaltung (keine Einfärbungen vorhanden). Rechts: Ergonomisch ungünstige Rückenhaltung (gelb dargestellt).

Der derzeit notwendige Handlungsprozess zur ergonomischen Bewertung der statischen Körperhaltung ist ausreichend kompakt. Die herangezogene Funktion kann ferner jederzeit aktiv sein. Somit können auch während der Bewegung des 3-D-Menschmodells die ergonomische Güte der Körperhaltung verfolgt und Problemstellen schnell erkannt werden.

Die OWAS-Methode, an sich seit den 1970er Jahren ein Standardverfahren zur Haltungsanalyse, ist speziell in den Automobil-produzierenden Unternehmen eine weniger verbreitete Methode [71]. Die meisten dieser Unternehmen besitzen eigene, selbst entwickelte Methoden zur ergonomischen Bewertung bestehender oder geplanter Arbeitsplätze, die an die spezifischen Gegebenheiten angepasst sind. Deshalb wäre die Möglichkeit einer Implementierung der jeweiligen unternehmensspezifischen Methode in die Software wünschenswert. Laut Aussage der Softwarefirma Tecnomatix ist dies auch umsetzbar. Dies würde für eine höhere Transparenz der ergonomischen Bewertung sorgen.

5.2.5.5 Zusammenfassung der Phase

Die derzeitige Umsetzung der Montageuntersuchung benötigt viele verschiedene Funktionalitäten und wird überwiegend aufwändig per Hand durchgeführt. Um den bestehenden Aufwand zu reduzieren, bieten sich mehrere Optimierungsmaßnahmen an, die soeben vorgestellt wurden.

So würden z.B. bei der Generierung einer Greifdefinition vordefinierte Greifmakros das Greifen von Gegenständen erleichtern. Auch erleichterte eine automatische Überprüfung der Sichtverhältnisse die Suche nach einer Körperhaltung mit Einsehbarkeit auf die Montagestelle.

Eine größtmögliche Verbesserung könnte jedoch durch die Realisierung einer Funktionalität erreicht werden, die nach einer komfortablen Definition der Störgeometrie schrittweise automatisch nach einer kollisionsfreien Greifdefinition, Gesamtkörperhaltung sowie einem Ausbaupfad sucht. Diese Funktionalität sollte auch eine definierbare maximale Durchdringungstiefe bei der Berechnung berücksichtigen und bei der Pfadgenerierung die Hüllgeometrie des notwendigen Ausbauraumes anzeigen. Zuletzt sollten für die ergonomische Bewertung der resultierenden statischen Körperhaltung unternehmensspezifische Bewertungsmethoden in die Software implementiert werden können.

5.2.6 Phase VI: Dokumentation der Montageuntersuchung

5.2.6.1 Beschreibung der Phase

In der sechsten und letzten Phase der Evaluation findet die Dokumentation der durchgeführten Montageuntersuchung statt. Dabei sollen alle wichtigen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der virtuellen Montageabsicherung in einer Datenbank gespeichert werden.

5.2.6.2 Definition der Anforderungen

Die Anforderungen hinsichtlich der Dokumentation der Montageuntersuchung sind im Folgenden aufgelistet:

- Speicherung der ermittelten Körperhaltung (resultierende Körper- bzw. Armhaltung in einem allgemein verwendbaren Dateiformat): Hiermit soll bei neuen Fahrzeugprojekten ermöglicht werden, die Verhältnisse hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums zu überprüfen.
- Zentrale Dokumentation der Ergebnisse (komplettes Szenario) in einem durchgängigen Standardformat: Die Montageuntersuchung soll unternehmensweit von allen Mitarbeitern, die im Rahmen des Fahrzeugprojektes an dem betrachteten Bauteil beteiligt sind, ohne Hindernisse und Zeitverzögerung aufgerufen werden können. Bei Aufruf des Szenarios sollen außerdem eventuelle Änderungen an den CAD-Daten der Bestandteile sowie an der Montager Reihenfolge automatisch aktualisiert werden, sodass eine Prüfung der Montage unter Berücksichtigung neuer Daten sofort durchgeführt werden kann.

5.2.6.3 Minimal notwendiger Handlungsprozesses (SOLL-Prozess)

Der minimale Handlungsprozess wird für das Speichern einerseits der ermittelten Körperhaltung und andererseits des kompletten Szenarios getrennt in den folgenden Abbildung 5-72 und Abbildung 5-73 vorgestellt.

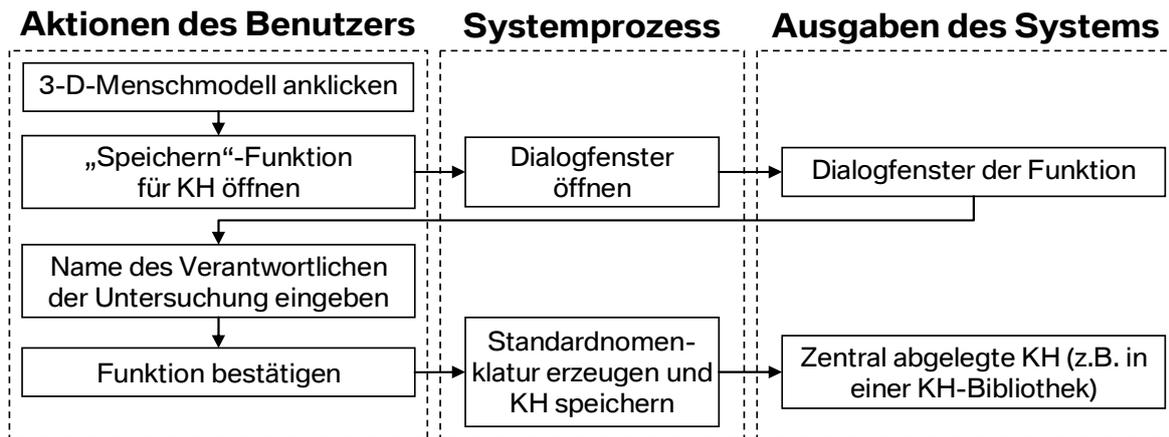


Abbildung 5-72: Idealablauf zur Dokumentation der ermittelten Körperhaltung (SOLL-Prozess)

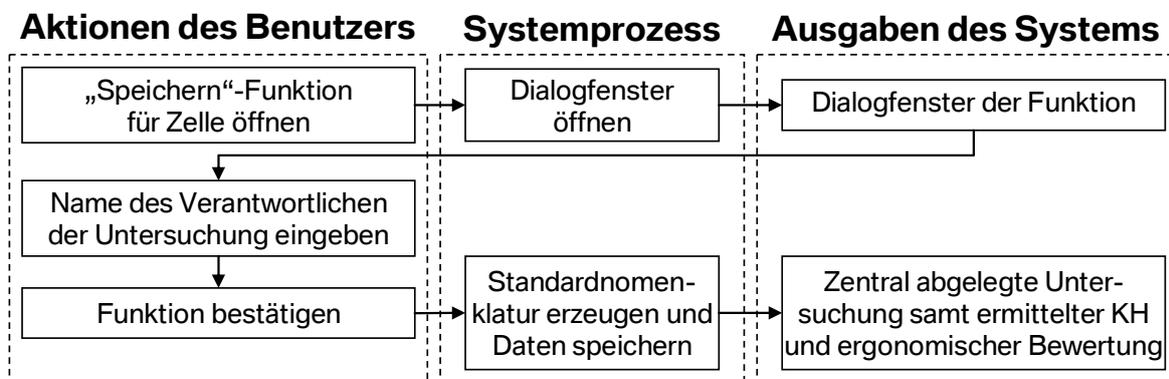


Abbildung 5-73: Idealablauf zur Dokumentation des kompletten Szenarios (SOLL-Prozess)

Um eine einheitliche Namensgebung bei der Speicherung sowohl der ermittelten Körperhaltung als auch der durchgeführten Montageuntersuchung zu gewährleisten, sollte das System automatisch einen Dateinamen erzeugen, der immer die gleichen charakteristischen Angaben der jeweiligen Körperhaltung bzw. Montageuntersuchung beinhaltet und ebenso eine Differenzierung verschiedener Versionen berücksichtigt. Dieser Dateiname sollte lediglich durch den Namen des Verantwortlichen der Montageuntersuchung ergänzt werden. Diese einheitliche Nomenklatur könnte im Falle der Montageuntersuchung folgendermaßen aussehen:

[Fahrzeugtyp]_[Lenkervariante]_[Motorvariante]_[Projektphase]_[Bauteil]_[Menschmodell-Typologie]_[Version]_[Name des Verantwortlichen].[Dateiformat]

Ein Beispiel wäre: E90_RL_N54B30_EBG_Lenkspindel_M50_01_Mustermann.jt

Die erzeugten Dateien sollten darauf an einem zentralen Speicherort abgelegt werden. Im Falle der Körperhaltungen könnte dies z.B. eine Körperhaltungsbibliothek sein. Bei der kompletten Montageuntersuchung würde sich z.B. die CAD-Datenbank dafür eignen.

5.2.6.4 Derzeit notwendiger Handlungsprozess (IST-Prozess) und Diskussion

Die bisherige Vorgehensweise zur Dokumentation der Montageuntersuchung wird in Abbildung 5-74 aufgeführt.

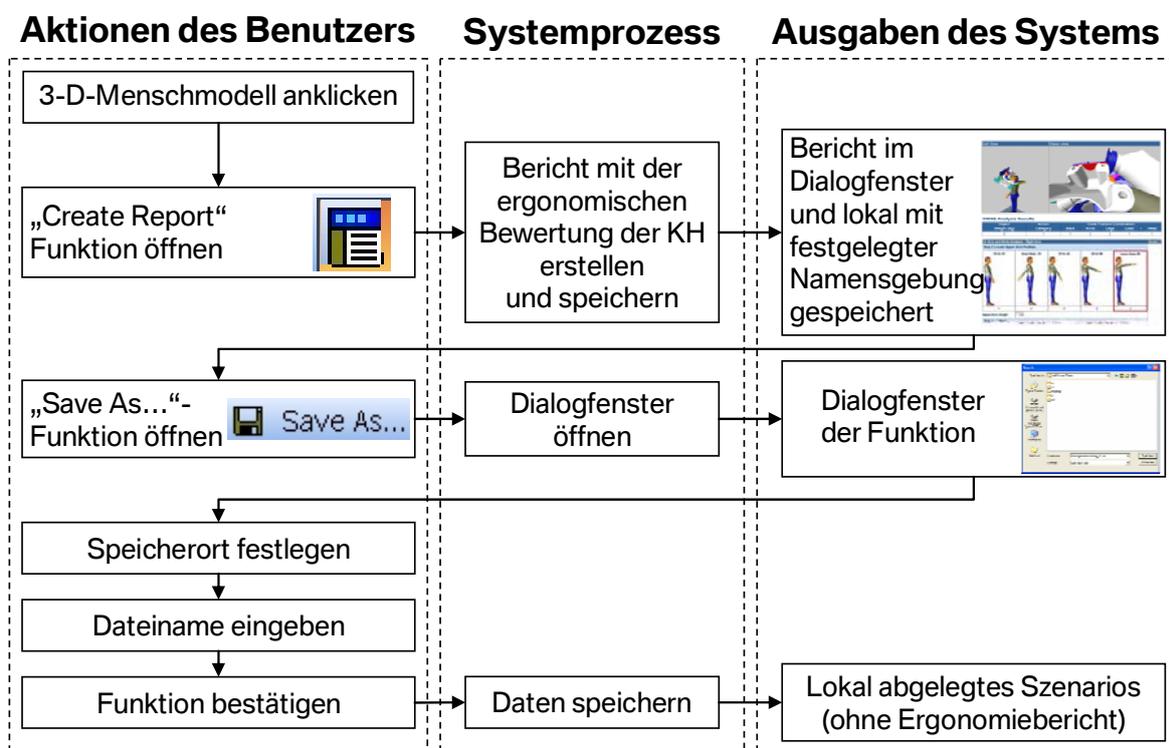


Abbildung 5-74: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Dokumentation der Montageuntersuchung (IST-Prozess)

Um die ermittelte Körperhaltung gesondert zu speichern, ist die in Abbildung 5-75 dargestellte Vorgehensweise nötig.

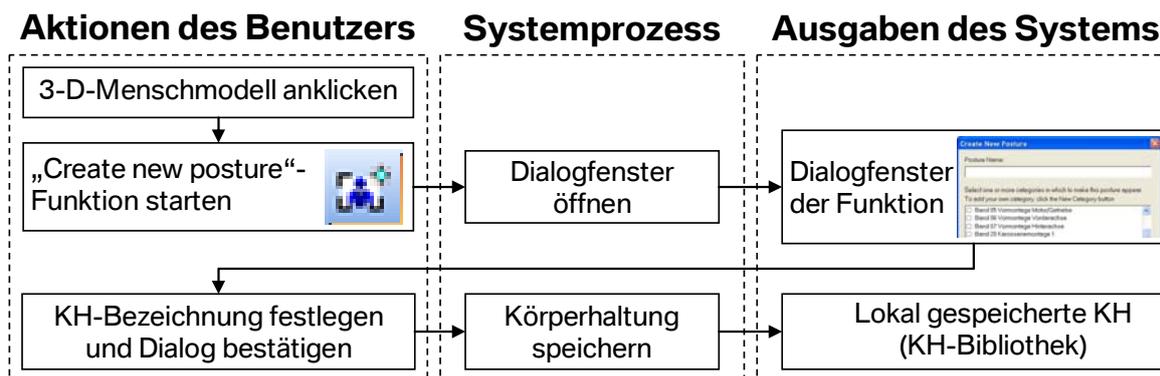


Abbildung 5-75: Derzeit notwendiger Handlungsprozess zur Dokumentation der ermittelten Körperhaltung (IST-Prozess)

Beim geforderten Speichern der ermittelten Körperhaltung werden derzeit alle Werte der Gelenkeinstellungen dieser Körperhaltung lokal in eine in der Software integrierten Körperhaltungsbibliothek gespeichert. An dieser Stelle wäre jedoch wünschenswert, diese Daten in einer zentralen Körperhaltungsbibliothek abzulegen, die es ermöglicht, die sich darin befindenden Körperhaltungen unternehmensweit abrufen zu können.

Das geforderte Speichern des kompletten Untersuchungszenarios scheitert zunächst an der Dokumentation der ergonomischen Bewertung. Diese kann nur gesondert in Form eines Berichtes gespeichert werden. An dieser Stelle sollte die Software die Möglichkeit bieten, die komplette Montageuntersuchung samt ergonomischer Bewertung zu speichern. Des Weiteren ist anzumerken, dass einerseits die Montageuntersuchung lokal gespeichert wird und andererseits diese nicht standardisierte Dateiformate aufzeigt (z.B. *.ce oder *.rf). Beides könnte anhand der bereits in der Phase I vorgeschlagenen automatischen Konvertierung und neuen Datenschnittstelle verbessert werden. Letztere sollte bei Aufruf einer gespeicherten Montageuntersuchung gewährleisten, dass die aktuellen CAD-Daten sowie die zu dem Zeitpunkt gültige Montagereihenfolge aus der CAD-Datenbank bzw. Bauliste herangezogen werden (s. Abbildung 5-76).

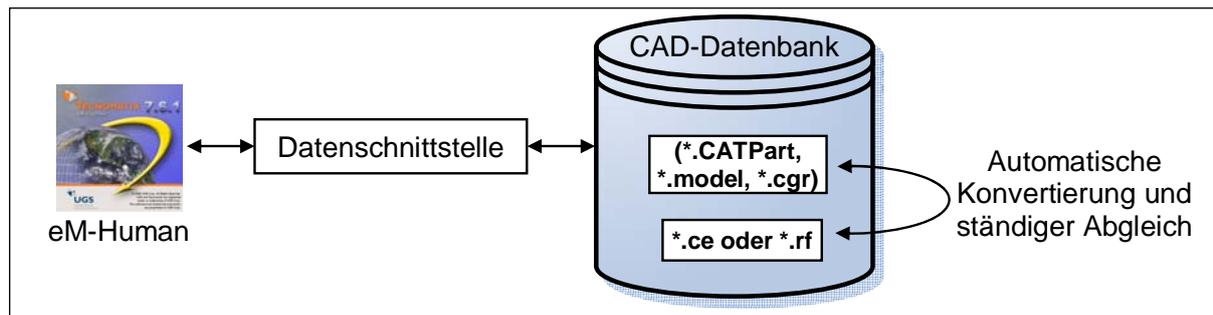


Abbildung 5-76: Vorgeschlagenes optimiertes Datenmanagement bei der Dokumentation der Montageuntersuchung

5.2.6.5 Zusammenfassung der Phase

Die ermittelte Körperhaltung wird derzeit lokal in einer benutzerspezifischen Körperhaltungsbibliothek in der Simulationssoftware abgelegt. Wären diese Daten jedoch in einer zentralen Körperhaltungsbibliothek abgespeichert, könnten auch andere Anwender diese Daten nutzen.

Das geforderte Speichern des kompletten Untersuchungsszenarios scheitert hingegen an der Dokumentation des Ergonomieberichtes. Ein noch größeres Defizit stellt jedoch die Tatsache dar, dass derzeit auch nur eine lokale Speicherung der Montageuntersuchung stattfindet und diese nicht in standardisierte Dateiformate vorgenommen wird. Anhand der bereits in Phase I vorgeschlagenen automatischen Konvertierung der Daten und Implementierung einer Datenschnittstelle könnte eine erhebliche Verbesserung durch eine bei Aufruf einer gespeicherten Montageuntersuchung automatische Aktualisierung der Inhalte der CAD-Datenbank erreicht werden.

5.3 Zusammenfassung und Priorisierung der erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen

Die in Abschnitt 5.2 geforderten vielfältigen Optimierungsmaßnahmen sollen für ihre Umsetzung in einem Folgeschritt in eine sinnvolle Reihenfolge gebracht werden. Diese Priorisierung der Optimierungsmaßnahmen ergibt sich letztlich aus der Priorisierung der Anforderungen ihrerseits.

5.3.1 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurden die von den Experten festgelegten Anforderungskriterien an die Montagesimulation mit 3-D-Menschmodell zusammengetragen, die in den einzelnen Phasen I-VI bereits vorgestellt wurden. Diese wurden in einem weiteren Schritt in Anforderungen an das System und Anforderungen an das 3-D-Menschmodell aufgeteilt und von potenziellen Benutzern der Simulationssoftware anhand von Bewertungsfragen im dritten Teilgebiet des in Kapitel 3 erwähnten Fragebogens bewertet. Hier bestand die Möglichkeit, eine Bewertung in mehreren Stufen vorzunehmen. Die Befragten konnten die einzelnen Anforderungskriterien auf einer 4-stufigen Skala von 1, „unwichtig“, bis 4, „sehr wichtig“, einstufen. Aus dieser Erhebung konnte direkt ermittelt werden, welchen dieser Kriterien vom Standpunkt der Softwarebenutzer eine hohe oder niedrige Bedeutung zugeordnet wird. Darauf werden die Anforderungskriterien in absteigender Reihenfolge nach der erfolgten Bewertung aufgelistet (beginnend mit der höchsten Bewertung). Ferner wird in einer weiteren Tabelle aufgezeigt, welche der einzelnen Anforderungskriterien durch die herangezogene Simulationssoftware eM-Human bereits erfüllt werden. Ebenso werden hier bei den teilweise bzw. nicht erfüllten Anforderungen die erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Hieraus ergibt die Reihenfolge der Anforderungskriterien eine Priorisierung der entsprechenden Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Umsetzungsabfolge. Da vor der Umsetzung der geforderten Optimierungsmaßnahmen diese selbst aufgrund eines hierfür gegebenenfalls zu betreibenden Aufwandes einzeln einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen werden sollten und einige nur mit großem Aufwand erreicht werden können, kann diese Abfolge der Umsetzungen nur als Empfehlung gelten.

Um darüber hinaus eine Aussage treffen zu können, nach welchen Kriterien die befragten Personen generell über die Wichtigkeit der Anforderungen entschieden haben, wurden zudem vier übergeordnete software-ergonomische Anforderungen bewertet.

5.3.2 Ergebnisse

Im folgenden Balkendiagramm sind die festgelegten Anforderungskriterien an die Simulation mit 3-D-Menschmodell in der sich aus den Befragungsergebnissen resultierenden Reihenfolge nach den arithmetischen Mittelwerten aufgeführt (s. Abbildung

5-77, links). Zu jeder Anforderung werden die Anzahl der abgegebenen (A) und die Anzahl der nicht abgegebenen Bewertungen (B) in der Form (A / B) aufgeführt. Nicht abgegebene Bewertungen werden in der statistischen Auswertung jedoch nicht berücksichtigt. Der ermittelte arithmetische Mittelwert wird durch eine gestrichelte Linie und blau gekennzeichneten Werten dargestellt und die einzelnen vergebenen Bewertungen anteilig prozentual aufgeführt (s. Abbildung 5-77).

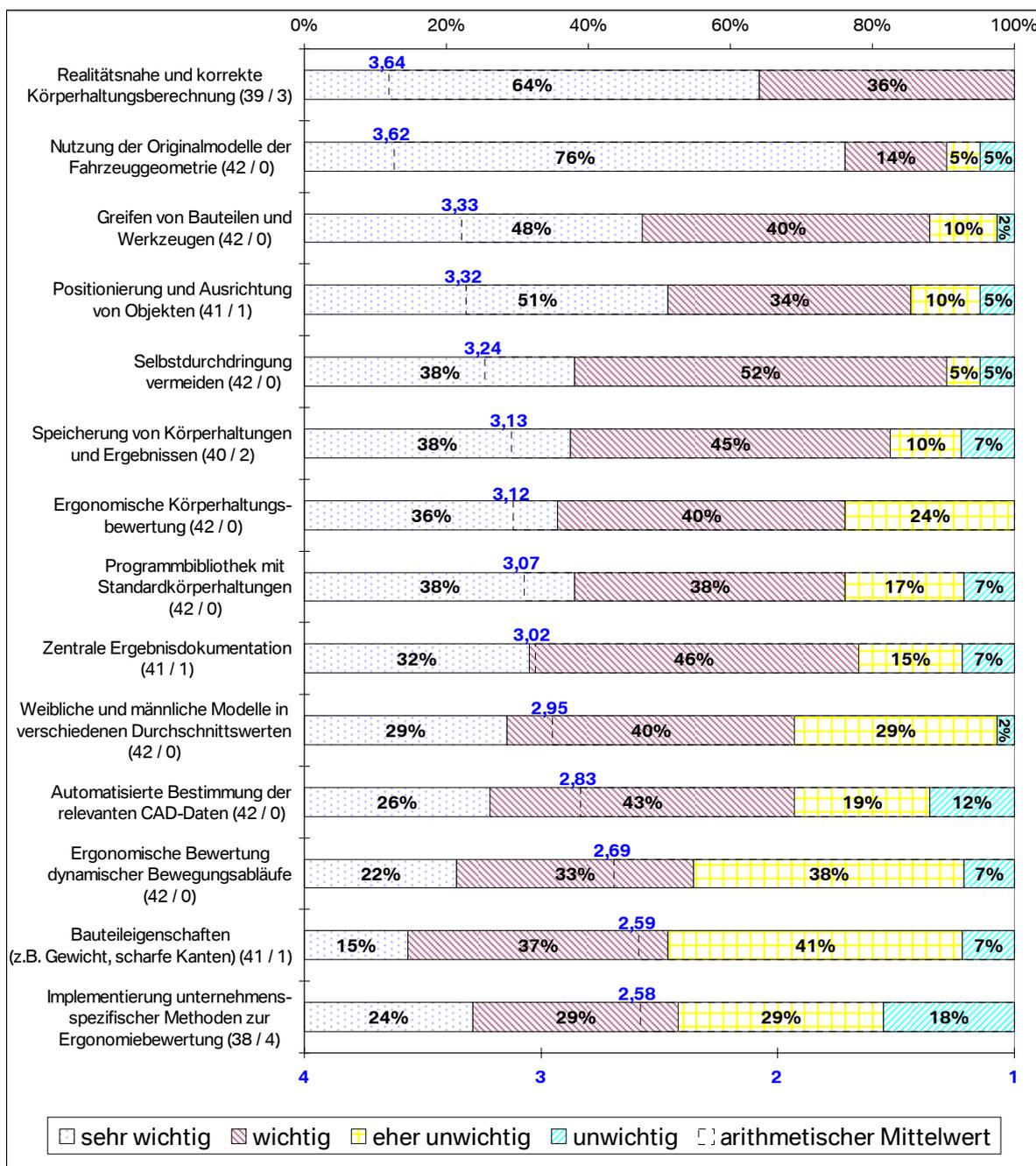


Abbildung 5-77: Resultierende Reihenfolge der Anforderungskriterien

Aus der Grafik wird ersichtlich, dass den Punkten „realitätsnahe und korrekte Körperhaltungsberechnung“ und „Nutzung der Originalmodelle der Fahrzeuggeometrie“

mit einer Bewertung von durchschnittlich 3,64 und 3,62 die höchste Wichtigkeit eingeräumt wird. Als „sehr wichtig“ werden mit einer ähnlich hohen Bewertung von rund 3,3 auch das „Greifen von Bauteilen und Werkzeugen“ bzw. die „Positionierung und Ausrichtung von Objekten“ angegeben. Weitere sieben Kriterien sind mit Bewertungen von im Mittel 3,24 bis 2,83 eingestuft worden und zeigen die Mehrheit der Nennungen in der Kategorie „wichtig“ auf. Diese stellen daher eine „wichtige“ Rolle dar. Die restlichen drei Kriterien weisen die geringste Bewertung auf (zwischen 2,69 und 2,58). Sie zeigen die Mehrheit der Nennungen in den beiden Kategorien „sehr wichtig“ sowie „wichtig“ auf (beide Kategorien aufsummiert zwischen 52 % und 55 %) und werden deshalb ebenso als „wichtig“ betrachtet.

Außerdem wurde gefragt, ob nach Ansicht der Benutzer für die Durchführung der Untersuchung ein vollständiges 3-D-Menschmodell oder ein 3-D-Hand-Arm-System benötigt wird (Mehrfachnennungen möglich (n = 48)). Dies ergab folgendes Ergebnis: 31 Nennungen (65 %) waren für ein komplettes 3-D-Menschmodell, 17 Nennungen (35 %) bevorzugten hingegen ein 3-D-Hand-Arm-System. Nur 17 % der Befragten (7 von 41, eine Enthaltung) wollten beide Modelle zur Auswahl haben. Somit wird die Mehrheit der zukünftigen Benutzer mit dem bereits in der Software implementierten kompletten 3-D-Menschmodell zufrieden gestellt. Ein 3-D-Hand-Arm-System wird deshalb nicht benötigt.

Nachfolgend sind in der linken Spalte der Tabelle 5-3 die eingestuften Anforderungskriterien in der festgelegten Reihenfolge aufgelistet. In der mittleren Spalte ist unter Berücksichtigung software-ergonomischer Grundsätze die Erfüllung der Anforderungen durch die betrachtete Simulationssoftware aufgeführt und bei den teilweise bzw. nicht erfüllten Anforderungen die erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen in der rechten Spalte aufgezeigt.

Anforderungen	Erfüllung	Optimierungsmaßnahme(n)
Realitätsnahe und korrekte Körperhaltungsberechnung	∅	Automatische Kollisionsvermeidung; Abstützmöglichkeiten; Eingaben von Kräften
Nutzung der Originalmodelle der Fahrzeuggeometrie	∅	Automatische Konvertierung der vorhandenen CAD-Daten und deren Speicherung sowie Aktualisierung in eine zentrale Datenbank; Datenschnittstelle implementieren
Greifen von Bauteilen und Werkzeugen	∅	vordefinierte Greifmakros
Positionierung und Ausrichtung von Objekten	∅	Automatische Positionierung in Abhängigkeit vom Montageort am Band; 3-D-Menschmodell automatisch in eine realistische und kollisionsfreie Position zur Montagestelle bringen
Selbstdurchdringung vermeiden	∅	Automatische Kollisionsvermeidung (speziell des 3-D-Menschmodells)
Speicherung von KH und Ergebnissen	∅	zentrale Körperhaltungsbibliothek
Ergonomische Körperhaltungsbewertung	✓	
Programmbibliothek mit Standardkörperhaltungen	✓	
Zentrale Ergebnisdokumentation	∅	standardisierte Dateiformate zentral abgelegt und laufend aktuell gehalten
Weibliche und männliche Modelle in verschiedenen Durchschnittswerten	✓	
Automatisierte Bestimmung der relevanten CAD-Daten	∅	Bauliste mit Verbaureihenfolge
Ergonomische Bewertung dynamischer Bewegungsabläufe	in dieser Arbeit nicht betrachtet	
Bauteileigenschaften (z.B. Gewicht, scharfe Kanten)	∅	CAD-Daten durch weitere Argumente erweitern; Diese Angaben in der Funktion für die automatische Kollisionsvermeidung und bei Ergonomieuntersuchungen berücksichtigen
Implementierung unternehmensspezifischer Methoden zur Ergonomiebewertung	✓	

Tabelle 5-3: Priorisierung der Optimierungsmaßnahmen (rechte Spalte), erfüllt = ✓, teilweise bzw. nicht erfüllt = ∅.

Zuletzt wird die Aussage der befragten Personen über die Wichtigkeit der übergeordneten software-ergonomischen Anforderungen dargestellt (s. Abbildung 5-78).

Hier wird deutlich sichtbar, welche hohe Bedeutung die Benutzerfreundlichkeit der Simulationssoftware für die potentiellen Benutzer hat. Es folgen die Forderungen nach der Integration der Software in das Unternehmen und nach geeigneten Funktionalitäten. Am wenigsten wichtig erscheint der Automatisierungsgrad.

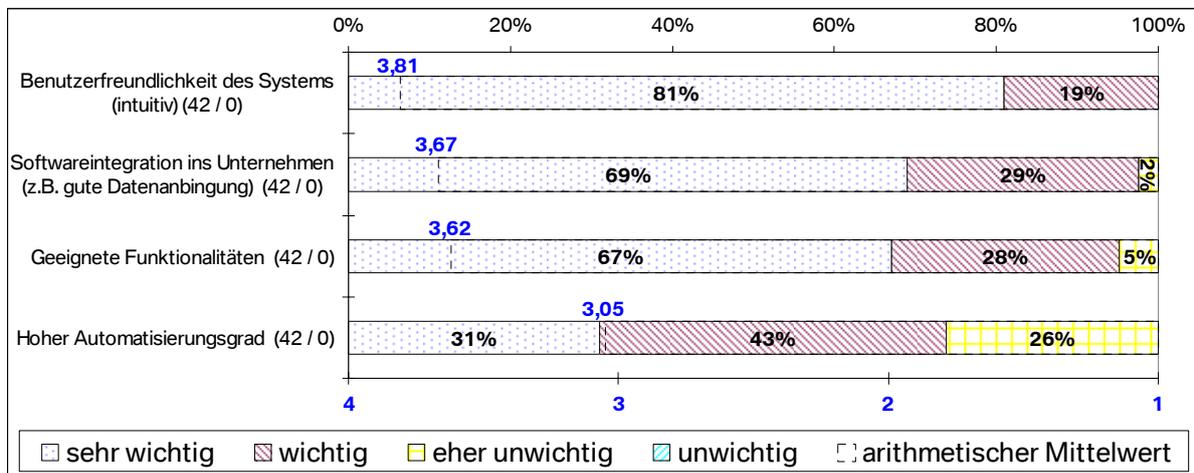


Abbildung 5-78: Wichtigkeit der übergeordneten software-ergonomischen Anforderungen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von digitalen 3-D-Menschmodellen in der virtuellen Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge gilt derzeit als unbestritten sinnvoll. Besonders in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses erweist sich diese Absicherungsmethode als sehr hilfreich und ermöglicht Montagekonzepte rechtzeitig zu beurteilen sowie ergonomisch und altersgerecht zu gestalten.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte software-ergonomische Evaluation des derzeitigen Handlungsprozesses zur Montagesimulation mit 3-D-Menschmodellen zeigt jedoch Optimierungspotenziale auf, was mit ein Grund dafür sein dürfte, dass 3-D-Menschmodelle trotz ihres Nutzens dennoch bisher eher selten verwendet werden. Zur Effizienzsteigerung der Mensch-Computer-Interaktion gilt es, vorwiegend zwei Aspekte zu optimieren: Einerseits das Datenmanagement und den damit verbundenen CAD-Datentransfer, andererseits die Erweiterung vorhandener bzw. die Entwicklung neuer Funktionalitäten, die den Eingriff des Softwarebenutzers bei der Umsetzung einer Untersuchung mit digitalem 3-D-Menschmodell auf ein Minimum reduzieren.

Bei der Optimierung des Datenmanagements spielen die automatische Konvertierung und Aktualisierung der Originaldaten sowie die Bereitstellung einer Datenschnittstelle, um die konvertierten Daten aus der CAD-Datenbank aufzurufen, eine wesentliche Rolle. Auch sind die Bereitstellung des Fahrzeuges in Verbaureihenfolge und die automatische Platzierung der Umfänge in Abhängigkeit des Montagebandbereiches bei der Szenariovorbereitung zweckmäßig.

Hinsichtlich der Funktionalitäten bzw. Eigenschaften, die ein digitales 3-D-Menschmodell derzeit für diese Art von Untersuchungen zusätzlich aufweisen sollte, sind in erster Linie die automatische Kollisionsvermeidung zwischen dem 3-D-Menschmodell und anderen Geometrien, die Möglichkeit der Eingabe von Kräften sowie die Bereitstellung vordefinierter Greifmakros von Bedeutung. Die automatische Kollisionsvermeidung ist für einzelne Bauteile oder Baugruppen bereits auf dem Markt verfügbar, jedoch für ein komplexes Mehrkörpersystem wie ein komplettes 3-D-Menschmodell aufgrund seiner zahlreichen Einflussfaktoren und Freiheitsgrade mit der heutigen Rechenleistung noch nicht serientauglich realisierbar. Die Möglich-

keit der Eingabe von Kräften ist in Verbindung mit dem Kraft-Haltungsmodell notwendig. Bislang sind Abstützmöglichkeiten des 3-D-Menschmodells nicht darstellbar und werden bei der Berechnung der Gesamtkörperhaltung nicht berücksichtigt. Dies wäre für eine realitätsnahe und korrekte Körperhaltungsberechnung (z.B. beim Anlehnen des Werkers) zweckmäßig. Schließlich bieten auch vordefinierte Greifmakros für Werkzeuge und Bauteile, die standardisiert eine Greifart aufweisen, eine wesentliche Erleichterung bei der Simulationsdurchführung.

Im Zuge dieser Überlegungen wäre es somit sinnvoll, die erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen im Rahmen weiterführender, den Simulationsprozess verbessernder Studien hinsichtlich ihres Einflusses einerseits auf den Bedienungsaufwand und damit die Akzeptanz der Software und andererseits auf die berechnete Gesamtkörperhaltung zu überprüfen. Die letztendliche Umsetzung dieser Maßnahmen sollte jedoch erst nach einer gründlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen.

Insofern darf der Wert dieser Arbeit nicht in Bezug auf einen gewonnenen Innovationsgrad bemessen, sondern vielmehr als Ausgangspunkt und damit Basis für weitere, den Simulationsprozess verbessernde Studien gesehen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] ANSORGE, P.: Entwicklungsbegleitende ergonomische Reviews und Usability-Tests. In: Softwaretechnik-Trends 18:2, S. 11, 1998.
- [2] ANSORGE, P.; FRICK, G.; FRIEDRICH, J.; HAUPT, U.: "Ergonomie geprüft" - Das Ende der Benutzungsprobleme? In: IM - Die Fachzeitschrift für Information Management & Consulting, 14(3), S. 59-64, 1999.
- [3] ARLT, F.: Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, 1999.
- [4] ARNSCHEIDT, H.-U.: Ergonomische Gestaltung von CAD-Programmen am Beispiel der Analyse von Umlaufrädergetrieben. Dissertation an der Universität der Bundeswehr Hamburg, 1991.
- [5] Automobilindustrie ist Schrittmacherbranche des nächsten Jahrhunderts. Studie "Automobiltechnologie 2010" von Mercer Management Consulting und der HypoVereinsbank, 2001. In: http://www.innovations-report.de/html/berichte/wirtschaft_finanzen/bericht-4550.html (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [6] BADLER, N. I.; PHILLIPS, C. B.; WEBBER, B. L.: Simulating Humans: Computer Graphics, Animation, and Control. Oxford University Press, New York, 1993.
- [7] BAGGEN, R.; HEMMERLING, S.: Evaluation von Benutzbarkeit in Mensch-Maschine-Systemen. In: TIMPE, K.-P.; JÜRGENSOHN, T.; KOLREP, H. (Hrsg.): Mensch-Maschine-Systemtechnik. Düsseldorf: Symposion Publishing, S. 232-284, 2000.
- [8] BAUER, D.; RÖCKMANN, D.: Methoden der Bewertung von Software. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1999.
- [9] Bayern innovativ (Gesellschaft für Innovation und Wissenstransfer mbH), Jahreskongress mit Ausstellung „Zulieferer Innovativ 2005“, Ingolstadt, 06. Juli 2005, Statements Pressegespräch: „Innovationen als Motor der deutschen Automobilindustrie“. In: <http://www.bayern-innovativ.de/CE664695-ED0D-11D9-AE48-00034709FE0C> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [10] BEREKOVEN, L.; ECKERT, W.; ELLENRIEDER, P.: Marktforschung. Methodische Grundlagen und praktische Anwendung (11. Auflage). Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006.
- [11] BMW Media Pool (Konzernarchiv). BMW-interne Quelle.
- [12] BMW Technologie Gesamtfahrzeug. Präsentation, BMW-interne Quelle, 2007.
- [13] BRACHT, U.; BERGBAUER, J.: Digitale Fabrikplanung in einer Virtuellen Umgebung. In: Proc. "Simulation und Visualisierung". 14. Märztagung, Magdeburg, S.3-8, 2003.
- [14] BRÄUTIGAM, L.; SCHNEIDER, W.: Projektleitfaden Software-Ergonomie. Wiesbaden: Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Geschäftsstelle hessen media, InvestitionsBank Hessen AG, 2003.
- [15] BRANDT, T.: Evaluation in Deutschland: Professionalisierungsstand und -perspektiven. Münster: Waxmann, 2009.
- [16] BRAY, T.: Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fourth Edition) – Origin and Goals. World Wide Web Consortium, September 2006 In: <http://www.w3.org/TR/2006/REC-xml-20060816/> (letzter Zugriff: 06.03.10)

- [17] BUBB, H.: Softwareergonomie. Vorlesungsskript, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, 2008.
- [18] BULLINGER, H.-J.: Ergonomie – Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- [19] BULLINGER, H.-J.: Software-Ergonomie in der Praxis: Richtlinien, Methoden und Werkzeuge für die Gestaltung interaktiver Systeme. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [20] CAD und CAD / CAM – Termin 3. Praktikum am Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technische Universität München, 2006.
- [21] CAESAR – The most comprehensive source for body measurement data. SAE International, 2005.
- [22] ÇAKIR, A. E.; HART, D.J.; STEWART, T.F.M.: Bildschirmarbeitsplätze: Ergonomie, Arbeitsplatzgestaltung, Gesundheit und Sicherheit, Aufgabenorganisation. Berlin, Heidelberg, New York, u.a.: Springer Verlag, 1980.
- [23] CHAFFIN, D. B.: Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. In: Proceedings of the XVth Congress of the IEA, Seoul, Volume 1, S. 2–5, 2003.
- [24] Classic Jack fact sheet. In: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/Images/4917_tcm73-4952.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [25] Cognitive Walkthrough. In: <http://www.mediasupervision.de/content/e117/e2520/> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [26] DAHM, M.: Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion. München: Pearson Verlag, S. 23, 2006.
- [27] DELMIA Ergonomic Design & Analysis. Produktbeschreibung, Dassault Systemès-interne Quelle.
- [28] DELMIA V5 – Human. In: http://www.cardix.com/pdf/delmia/DELMIA_V5_Human.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [29] DELMIA Workplace Ergonomics – PLM Express Ergonomics. In: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/fileservers/vogelonline/companyfiles/2083.pdf> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [30] Deutsche Gesellschaft für Evaluation e.V. – Standards für Evaluation. Köln: DeGEval (Hrsg.), 2002.
- [31] DIN EN ISO 9241-11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit; Leitsätze. 1998.
- [32] DIN EN ISO 9241-110: Grundsätze der Dialoggestaltung. 2006 (Ersetzt DIN EN ISO 9241-10, Ausgabe: 1996).
- [33] DIN EN ISO 13407: Benutzer-orientierte Gestaltung interaktiver Systeme. 1999.
- [34] EBERLEH, E.; OBERQUELLE, H.; OPPERMAN, R.: Einführung in die Software-Ergonomie, Grundwissen 1 (2. Auflage). Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1994.
- [35] EICKVONDER, B.: Virtuelle Realität in der Produktentwicklung – Virtuelle Montage. Seminar aktuelle Themen der virtuellen Realität, RWTH Aachen, Wintersemester 2002-2003.
- [36] EIGNER, M.: Virtuelle Produktentwicklung I. Vorlesungsskript, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, Technische Universität Kaiserslautern, 2006. In: http://vpe.mv.uni-kl.de/cms/fileadmin/user_upload/PDF/VPE1/WS_06-07/VPEI_07_20061218.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)

-
- [37] EIGNER, M.; STELZER, R.: Product Lifecycle Management – Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management (2., neu bearbeitete Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [38] Einsatz von 3-D-Menschmodellen in der Ergonomie. Präsentation, BMW-interne Quelle.
- [39] EIB, K.: Methoden und Werkzeuge der digitalen Fabrik – Effiziente, kostengünstige Produktion. Digital Manufacturing, S. 8-10, 2/2008.
- [40] eM-Human – Manual assembly design and analysis. In: http://www.human-solutions.com/download/pdf/eMPower_Ramsis_en.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [41] Ergonomie-Netzwerk: Was ist Ergonomie? In: <http://www.ergonetz.de/what-is-ergonomics/index-e.html> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [42] Ergonomische Enzyklopädie. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München. In: <http://www.lfe.mw.tum.de/lehrstuhl/ergonomie.htm> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [43] FISCHER, G.; LEMKE, A.; SCHWAB, T.: Knowledge-based Help Systems. In: Proceedings of the CHI '85; acm press, S. 161-167, 1985.
- [44] FRITZSCHE, L.; JENDRUSCH, R.: Prospektive Arbeitsgestaltung mit digitalen Menschmodellen – Validität der Ergonomiebewertung von simulierten Arbeitsabläufen in der Automobilmontage. Konferenzbeitrag zur Internationalen Frühjahrstagung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Dortmund, 2009.
- [45] GEISER, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation. München: Oldenbourg, 1990.
- [46] GEUß, H.: Ein anthropometrisches Messverfahren für das CAD-Menschmodell RAMSIS. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1994.
- [47] GEYER, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung. Dissertation am Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik der Technischen Universität München, 1997.
- [48] Glossar_de ARCHmatik-Glossar und -Lexikon: Inverse Kinematik. In: http://www.glossar.de/glossar/z_rendering.htm (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [49] GOMES DE SÁ, A.; ZACHMANN, G.: Virtual Reality as a Tool for verification of assembly and maintenance processes. In: Computers and Graphics 23 (3), S. 389-403, 1999.
- [50] GÖRTLER, E.; ROSENKRANZ, D.: Mitarbeiter-Kundenbefragung – Methoden und praktische Umsetzung. KAMISKE, G. (Hrsg.). München: Hanser Verlag, 2006.
- [51] GREEN, R.F.: A generic process for human model analysis. In: Proceedings of the Digital Human Modeling Conference, München, 2000.
- [52] GROTE, G.: A participatory approach to the complementary design of highly automated work systems. In: BRADLEY, G.; HENDRICK, H. (eds.): Human Factors in Organizational Design and Management-IV. Amsterdam: Elsevier, S. 115-120, 1994.
- [53] HERCZEG, M.: Software-Ergonomie (3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). München: Oldenbourg Verlag, 2009.
- [54] HERDA, N.; JANSON, A.; REIF, M.; SCHINDLER, T.; AUGSBURGER, W.: Entwicklung des Intranets SPICE: Erfahrungsbericht einer Praxiskooperation. In: Reihe Bamberger Beiträge zur Wirtschaftsinformatik, Band 54, 1999.
-

- [55] HUDELMAIER, J.: RAMSIS, der virtuelle Motorradfahrer. In: http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Konferenzen/2003/01_Hudelmaier.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [56] Human Solutions GmbH. In: http://www.human-solutions.com/automotive/index_de.php (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [57] HURTIENNE, J.; MOHS, C.; MEYER, H. A.; KINDSMÜLLER, M. C.; ISRAEL, J. H.: Intuitive Use of User Interfaces – Definition und Herausforderungen. i-com: Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien, München, S. 38-41, 2006.
- [58] Intuitive Benutzbarkeit von digitalen Systemen. In: <http://www.mediasuper-vision.de/content/e804/> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [59] Inverse Kinematik. In: http://www.infinity-vision.de/semimax/aufbau/paletten/hierarchien/inverse_kinematik/link_info.htm (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [60] JANSON, A.: Usability-Engineering als Instrument des Managements informationstechnologischer Veränderungsprozesse in Unternehmen. Dissertation an der Fakultät für Sozial- und Wirtschaftswissenschaften der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, 2001.
- [61] JESKE, C.: Montageprozessabsicherung der Werkerergonomie in der Technologie Montage des Unternehmens BMW. Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Jena, 2004.
- [62] JOHANNSEN, G.: Mensch-Maschine-Systeme. Berlin: Springer Verlag, 1993.
- [63] KINKEL, S.; SOM, O.: Strukturen und Treiber des Innovationserfolgs im deutschen Maschinenbau – Verbreitung und Effekte von innovationsunterstützenden Technik-, Organisations- und Kooperationskonzepten. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 41, Karlsruhe: Fraunhofer ISI, S. 1-12, 2007.
- [64] KLUGE, F.: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache (23., erw. Aufl. Bearbeitet von Elmar Seebold). Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1995.
- [65] KUHN, A.; WIENDAHL, H.-P.; SCHUH, G.: Ergebnisbericht zur Studie „Fast Ramp-Up - Schneller Anlauf von Serienprodukten“. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2002.
- [66] KUTRITZ, T.: Umfassendes Qualitätsmanagement für den Bereich Elektronik im Versuchsbau der Automobilindustrie. Dissertation an der Fakultät der Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, 2005.
- [67] KRUG, S.: Don't make me think! A Common Sense Approach to Web Usability, 2nd Ed., New Riders Publishing, 2005.
- [68] LÄMKULL, D.: The daily use of manikins within the manufacturing department at Volvo Car Corporation – working methodology, developments and wanted improvements. In: Proceedings of 37th Annual Conference of Nordic Ergonomics Society, 10.-12. October, Oslo, S. 86-90, 2005.
- [69] LÄMKULL, D.; HANSON, L.; ÖRTENGREN, R.: Consistency in Figure Posturing Results within and between Simulation Engineers. Technical Paper 2006-01-2352, SAE International, Warrendale, PA, U.S.A., 2006.
- [70] LANDAU, K.: Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design – A review of recent developments in human modeling and other design aids. Stuttgart, Verlag ERGON, 2000.
- [71] LANGE, C.; WOHLFARTER, M.: ErgoLAB – Ein Tool zur softwaregestützten OWAS Analyse. Konferenzbeitrag zur Internationalen Frühjahrstagung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, München, 2008.

- [72] LAURIG, W.: Grundzüge der Ergonomie - Erkenntnisse und Prinzipien (4. Auflage). Berlin, Köln: Beuth Verlag, 1992.
- [73] LAUTER, B.: Software-Ergonomie in der Praxis. München: Oldenbourg, 1987.
- [74] LEWIS, C.; WHARTON, C.: Cognitive walkthroughs. In: HELANDER, M. ET AL. (Red.): Handbook of Human-Computer Interactions. Elsevier Press, New York, S. 717–732, 1997.
- [75] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden (2., bearbeitete Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [76] LOCZI, J.; DIETZ, M.; NIELSON, G.: Validation and Application of the 3-D CAD Manikin RAMSIS in Automotive Design. Technical Paper 1999-01-1270, SAE International, Warrendale, PA, U.S.A., 1999.
- [77] LUCZAK, H.: Arbeitswissenschaft (2. vollständig überarbeitete Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
- [78] MARACH, A.; BUBB, H.: Development of a force-dependent posture prediction model for the CAD human model RAMSIS. In: LANDAU, K.: Ergonomics Software Tools in Product and Workplace Design – A review of recent developments in human modeling and other design aids. Stuttgart: ERGON GmbH, S. 105-113, 2000.
- [79] MARRENBACH, J.; KRAISS, K.-F.; HAHN, W.; BENGLER, K.: Entwicklung und Evaluierung einer multimedialen Betriebsanleitung für Kfz-Bordsysteme. In: GÄRTNER, K.-P. (Hrsg.): Multimodale Interaktion im Bereich der Fahrzeug- und Prozessführung. 42. Fachausschusssitzung Anthropotechnik, Vol.2, 24.-25. Oktober, München, S. 139-159, 2000.
- [80] MCATAMNEY, L.; CORLETT, E.N.: RULA: A survey method for investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics 24(2), S. 91-99, 1993.
- [81] Modellierung und Simulation von Menschen mit Jack. In: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/Images/Jack_Human_tcm73-62436.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [82] MONACELLI, G.; SESSA, F.; MILITE, A.: An integrated approach to evaluate engineering simulations and ergonomic aspects of a new vehicle in a virtual environment: physical and virtual correlation methods. In: FISITA, 30th World Automotive Congress, Barcelona, S. 23-27, 2004.
- [83] MÜHLSTEDT, J.; KAUBLER, H.; SPANNER-ULMER, B.: Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 62, S. 79-86, 2008.
- [84] MURRELL, K. F. H.: Document 5 (1949). In: EDHOLM, O. G.; MURRELL, K. F. H.: History of the Ergonomics Research Society 38. The Council of the Ergonomics Research Society (Hrsg.), 1974.
- [85] NAUMANN, A.; ISRAEL, J. H.: Potenzial der Anwendung von VR-Interaktionstechniken im Usability-Testing. MMI-Interaktiv 11, S. 85-97, 2006.
- [86] NAUMANN, A.; ROETTING, M.: Digital Human Modeling for Design and Evaluation of Human-Machine Systems. MMI-Interaktiv 12, S. 27-35, 2007.
- [87] NEUNZERT, H.: Mathematics as a Key to Key Technologies. Bericht 16 des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern, 1999. In: http://www.itwm.fhg.de/de/zentral_berichte/berichte1998bis2000/ (letzter Zugriff: 06.03.10)

- [88] NEUSS, R.: Usability Engineering als Ansatz zum Multimodalen Mensch-Maschine-Dialog. Dissertation am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München, 2001.
- [89] NIEDERMAIER, F. B.: Entwicklung und Bewertung eines Rapid-Prototyping Ansatzes zur multimodalen Mensch-Maschine-Interaktion im Kraftfahrzeug. Dissertation am Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München, 2003.
- [90] OPPERMAN, R.; MURCHNER, B.; REITERER, H.; KOCH, M.: Softwareergonomische Evaluation – Der Leitfaden EVADIS II (2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1992.
- [91] PATRON, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, 2004.
- [92] PFEIFER, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2001.
- [93] Process Simulate – fact sheet. In: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/Images/7457_tcm73-80351.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [94] Product Synthesis Human Builder 2 (HBR) CATIA V5R18 (2004). In: [http://www.edstechnologies.com/assets/pdf/CATIA%20V5/Product%20Synthesis/Human%20Builder%20%20\(HBR\).pdf](http://www.edstechnologies.com/assets/pdf/CATIA%20V5/Product%20Synthesis/Human%20Builder%20%20(HBR).pdf) (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [95] RAMSIS in CATIA V5. In: http://www.human-solutions.de/automotive/current_news_report_de.php?id=349 (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [96] RAMSIS in eM-Human. In: http://www.intailor.com/download/pdf/eMPower_Ramsis_de.pdf (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [97] RASCHKE, U.; KUHLMANN, H.; HOLLICK, M.: On the Design of a Task Based Human Simulation System. Technical Paper 2005-01-2702, SAE International, Warrendale, PA, U.S.A., 2005.
- [98] RAUTERBERG, M.: Ein Konzept zur Quantifizierung software-ergonomischer Richtlinien. Zürich: Verlag der Fachvereine, 1995.
- [99] RAUTERBERG, M.; SPINAS, PH.; STROHM, O.; ULICH, E.; WAEBER, D.: Benutzerorientierte Software-Entwicklung – Konzepte, Methoden und Vorgehen zur Benutzerbeteiligung. In: ULICH, E. (Hrsg.): Mensch – Technik – Organisation, Bd. 3. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 11, 1994.
- [100] RAUTERBERG, M.; STROHM, O.; ULICH, E.: Arbeitsorientierte Gestaltung von Informationsprozessen. In: REICHEL, H. (Hrsg.): Informatik – Wirtschaft – Gesellschaft. Berlin: Springer Verlag, S. 163-168, 1993.
- [101] REINHART, G.; GRUNWALD, S.; RICK, F.: Virtuelle Produktion – Technologie für die Zukunft. VDI-Z 141, Vol. 12, S. 26-29, 1999.
- [102] REINHART, G.; PATRON, C.; MEIER, P.: Virtual Reality und Augmented Reality in der Montage. wt Werkstattstechnik online 92 H. 1/2, S. 12-15, 2002.
- [103] REINHART, G.; SCHNEIDER, B.: Montage. In: KERN, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäfer-Poeschel, 1995, S. 1236-1247.
- [104] SAFEWORK Inc. – Human Modeling Technology. In: http://www.safe-work.com/catia_sw/products.html (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [105] SANTOS, Virtual Soldier Research, 2004. In: <http://www.digital-humans.org/santos/> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [106] SCHAUB, K.; BRITZKE, B.; SANZENBACHER, G.; JASKER, K.; LANDAU, K.: Ergonomische Risikoanalysen mit MTM-Ergo. In: LANDAU, K. (Hrsg.): Montageprozesse gestalten. Stuttgart: ergonomia Verlag, 2004.

-
- [107] SCHOLL, A.: Die Befragung. Sozialwissenschaftliche Methode und kommunikationswissenschaftliche Anwendung. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft mbH, 2003.
- [108] SCHÜHLE, M.; KOLLER, N.: Ergonomiesoftware. Studienarbeit an der Fachhochschule Pforzheim, Grin - Verlag für Akademische Texte, 2004.
- [109] SEIDL, A.: Das Menschmodell RAMSIS – Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1994.
- [110] SEITZ, T.: Videobasierte Messung menschlicher Bewegungen konform zum Menschmodell RAMSIS. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2003.
- [111] SEITZ, T.; MARCOS, P.; RODRIGUEZ FLICK, D.; VERECZKEI, A.; WICHERT, A.; BUBB, H.; FEUSSNER, H.: Ansätze zur Analyse und Verbesserung eines Operationsarbeitsplatzes in der minimal-invasiven Chirurgie. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 58(3), S. 227-231, 2004.
- [112] SEITZ, T.; RECLUTA, D.; ZIMMERMANN, D.: FOCOPP – An Approach for a Human Posture Prediction Model Using Internal / External Forces and Discomfort. Technical Paper 2005-01-2694, SAE International, Warrendale, PA, U.S.A., 2005.
- [113] Siemens PLM Software GmbH. In: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/index.shtml (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [114] SNOOK, S.H.; CIRIELLO, V.M.: The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. Ergonomics, Vol. 34(9), S. 1197-1213, 1991.
- [115] SPANNER-ULMER, B.; MÜHLSTEDT, J.: Professur Arbeitswissenschaft. Skript zur Übung „Ergonomie – Digitale Menschmodelle“, 2008.
- [116] Statistisches Bundesamt: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2050. 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung – Annahmen und Ergebnisse, Wiesbaden, 2006. In: Die Welt, S. 9, 12. Oktober 2009.
- [117] STOFFERT, G.: Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 39, S. 31-38, 1985.
- [118] TARZIA, A.; EYNARD, E.: The anthropometric design of 3D virtual manikins. In: LANDAU, K.: Ergonomics Software Tools in Product and Workplace Design – A review of recent developments in human modeling and other design aids. Stuttgart: ERGON GmbH, S. 62-71, 2000.
- [119] TECKEMEIER, U.; BAUER, D.: Serienanlauf in der Automobilindustrie am Beispiel der Wilhelm Karmann GmbH. Supply Chain Management IV, S. 29-34, 2005.
- [120] TIMPE, K.-P.; KOLREP, H.: Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand. In: TIMPE, K.-P.; JÜRGENSOHN, T.; KOLREP, H. (Hrsg.): Mensch-Maschine-Systemtechnik. Düsseldorf: Symposion Publishing, S. 9-40, 2000.
- [121] TRIEBE, J. K.; WITTSTOCK, M.: Anforderungskatalog für Softwareentwicklung – Auswahl und Anwendung. Bundesanstalt für Arbeitsschutz (Hrsg.). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1996.
- [122] ULICH, E.: Arbeitspsychologie. Stuttgart: Schäffer-Pöschel Verlag, 1991.
- [123] VDI 3633 Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. 2001.

- [124] WALLER, O.; ISNARD, F.; DODDS, G.: Improving Human Interactions in Complex Product Development. In: Proceedings of IEE Colloquium on Virtual Reality Personal Mobile and Practical Applications, London, S. 6/1 - 6/7, 1998.
- [125] WANDMACHER, J.: Software-Ergonomie, Mensch-Computer-Kommunikation: Grundwissen 2. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1993.
- [126] Was ist Ergonomie: Ergonomie. In: <http://www.ergonomie.tum.de/lehrstuhl/ergonomie.htm> (letzter Zugriff: 06.03.10)
- [127] WATERS, T. R.; PUTZ-ANDERSON, V.; GARG, A.: Applications Manual For the Revised NIOSH Lifting Equation. Centers for Disease Control and Prevention, 1994.
- [128] WITTGES, H.: Verbindung von Geschäftsprozessmodellierung und Workflow-Implementierung. Dissertation an der Universität Hohenheim, Deutscher Universitäts-Verlag, 2005.
- [129] WOLFER, B.: Man modeling and human movement simulation in 3D-development trends and prospects for application in ergonomics. In: LANDAU, K.: Ergonomics Software Tools in Product and Workplace Design – A review of recent developments in human modeling and other design aids. Stuttgart: Verlag ERGON, S. 100-104, 2000.
- [130] ZÄH, M. F.; PETZOLD, B.; SPITZWEG, M.; EGERMEIER, H.: Realitätsnahe Einbausimulation mit Ve². wt Werkstattstechnik online 94 H. 9, S. 410-413, 2004.
- [131] ZÜLCH, G.: Arbeitskreis zur VDI-Richtlinie „Der Mensch in der digitalen Fabrik“, Universität Karlsruhe (TH).

Anhang A

Fragebogen Anforderungskatalog

Virtuelle Absicherung manueller Montagevorgänge mittels 3-D-Menschmodell



Einleitung

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

in Betrachtung der steigenden Packagedichte im Fahrzeug bei fast gleich bleibendem Bauraum besteht die Notwendigkeit bereits in der frühen Phase des PEP die Baubarkeit des Gesamtfahrzeuges anhand virtueller Methoden sicherzustellen. Um die Aussagekraft solcher Methoden zu erhöhen, werden zu den gängigen Ein- und Ausbausimulationen von Bauteilen zusätzlich digitale 3-D-Menschmodelle herangezogen. Dabei soll eine standardisierte, benutzerfreundliche Umgebung geschaffen werden, die es dem Anwender ermöglicht, die virtuellen Montageuntersuchungen mit digitalen 3-D-Menschmodellen effektiv und effizient zu erledigen.

Sollten Sie bereits solche Untersuchungen durchgeführt haben, können Sie im Abschnitt „Erfahrungen“ Ihr Feedback dokumentieren. Sollten Sie noch keine solche Untersuchung abgewickelt haben, können Sie diesen ersten Abschnitt überspringen und im zweiten bzw. dritten Abschnitt einerseits den Einsatz von 3-D-Menschmodellen bei der Absicherung manueller Montagevorgängen charakterisieren und andererseits die von Experten in dieser Art von Simulation zuvor festgelegten Anforderungen an dem Einsatz von 3-D-Menschmodellen bewerten.

Die Teilnahme am Fragebogen ist freiwillig.

Vielen Dank für Ihre Unterstützung,
Domingo Rodríguez Flick

Bitte beantworten Sie die Fragen spontan nach Ihrer eigenen subjektiven Einschätzung. Die Bearbeitungszeit beträgt ca. 15 Minuten.



Zutreffendes bitte ankreuzen (Mehrfachnennungen bei Angabe möglich)



zusätzliche Bemerkungen / Vorschläge sind in die dafür vorgesehenen Platzhalter einzutragen

(Jeder Vorschlag erhöht die Chance, die Anforderungen genauer zu definieren!)

I. Erfahrungen				
Wenn Sie bereits Erfahrungen mit dem Einsatz von 3-D-Menschmodellen bei virtuellen Montageuntersuchungen gesammelt haben, können Sie in diesem Abschnitt Ihr Feedback dokumentieren.				
1. Bitte schildern Sie kurz, für welchen Zweck Sie 3-D-Menschmodelle einsetzen oder eingesetzt haben. (Mehrfachnennung möglich)	<input type="checkbox"/> Erreichbarkeits- und Zugänglichkeitsstudien <input type="checkbox"/> Prüfung der Einsehbarkeit <input type="checkbox"/> Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung <input type="checkbox"/> Sonstiges: 			
2. Wie oft im Jahr führen Sie solche Untersuchungen durch?	<input type="checkbox"/> < 5 <input type="checkbox"/> 5-10 <input type="checkbox"/> > 10 Eigene Angabe: 			
3. Geschieht die Durchführung solcher Untersuchungen nach einem festgelegten, standardisierten Schema?	<input type="checkbox"/> Ja Wenn ja, wie?  <input type="checkbox"/> Nein			
4. Setzen Sie oder haben Sie bereits Systeme zur virtuellen Absicherung mit 3-D-Menschmodellen eingesetzt? (Mehrfachnennung möglich)	<input type="checkbox"/> Ja, in CATIA V5 (RAMSIS) <input type="checkbox"/> Ja, in CATIA V5 (Human Builder) <input type="checkbox"/> Ja, in RobCAD-Man (Anyman) <input type="checkbox"/> Ja, in eM-Human (RAMSIS) <input type="checkbox"/> Ja, folgende: 			
5. Der zeitliche Aufwand ist bei...	< 30 Min.	30-60 Min.	> 60 Min.	Sonstiges
...der Aufbereitung des Szenarios	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
...der Durchführung der Untersuchungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6. Zu welcher Benutzerklasse der Systeme ordnen Sie sich ein?	<input type="checkbox"/> Ungeübter und sporadischer Benutzer („Anfänger“) <input type="checkbox"/> Geübter und sporadischer Benutzer („Gelegenheitsbenutzer“) <input type="checkbox"/> Geübter und regelmäßiger Benutzer („Experte“)			

II. Charakterisierung des Einsatzes von 3-D-Menschmodellen bei der Absicherung von manuellen Montagevorgängen	
<p>1. Wie wird die Absicherung von manuellen Montagevorgängen bisher abgearbeitet?</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> Aus der Erfahrung von Experten</p> <p><input type="checkbox"/> Am Prototypen / Teilaufbauten</p> <p><input type="checkbox"/> Virtuell <u>ohne</u> 3-D-Menschmodell</p> <p><input type="checkbox"/> Virtuell <u>mit</u> 3-D-Menschmodell</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>
<p>2. Bitte schildern Sie kurz, für welchen Zweck Sie 3-D-Menschmodelle einsetzen würden.</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> Erreichbarkeits-/ Zugänglichkeitsstudien</p> <p><input type="checkbox"/> Prüfung der Einsehbarkeit</p> <p><input type="checkbox"/> Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>
<p>3. Welches sind die überwiegenden Montagevorgänge, die untersucht werden?</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> neue Montagevorgänge (neue Konzepte)</p> <p><input type="checkbox"/> kritische Montagevorgänge</p> <p><input type="checkbox"/> kritische Montagevorgänge des Vorgängermodells</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>
<p>4. Zu welchem Zeitpunkt kommen solche Aufgaben bei Ihnen im Projekt vor?</p> <p>(Mehrfachnennung möglich; die Phasen sind der Reihe nach geordnet)</p>	<p><input type="checkbox"/> Konzeptphase</p> <p><input type="checkbox"/> Vorbereitungsphase</p> <p><input type="checkbox"/> Abstimmphase</p> <p><input type="checkbox"/> Bestätigungsphase</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>
<p>5. Die virtuelle Absicherung soll die Absicherung an der Hardware...</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> ... ergänzen</p> <p><input type="checkbox"/> ... ersetzen</p> <p>Eigene Bemerkung: </p>
<p>6. Wo sehen Sie die Vorteile beim Einsatz von digitalen 3-D-Menschmodellen?</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> Erhöhung der Aussagequalität</p> <p><input type="checkbox"/> Größenverhältnisse in der virtuellen Welt</p> <p><input type="checkbox"/> Objektive Entscheidungsgrundlage</p> <p><input type="checkbox"/> Prüfung mit verschiedenen 3-D-Menschmodellen</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>
<p>7. Wo sehen Sie die Nachteile beim Einsatz von digitalen 3-D-Menschmodellen?</p> <p>(Mehrfachnennung möglich)</p>	<p><input type="checkbox"/> Hoher Bedienungsaufwand</p> <p><input type="checkbox"/> Körperhaltungsberechnung unrealistisch</p> <p><input type="checkbox"/> Sonstiges: </p>

III. Bewertung der Anforderungen an den Einsatz von 3-D-Menschmodellen				
Dieser Teil des Fragebogens dient dazu, die festgelegten Anforderungen an den Einsatz von 3-D-Menschmodellen hinsichtlich ihrer Bedeutung aus Ihrer Sicht zu bewerten.				
Wie wichtig sind für Sie folgende Anforderungen an die Systeme?	sehr wichtig	wichtig	eher unwichtig	unwichtig
Nutzung nativer Geometriedaten (z.B. aus CATIA V5)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Automatische Bestimmung der relevanten CAD-Daten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ergonomische Untersuchung der resultierenden Körperhaltung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ergonomische Untersuchung des dynamischen Bewegungsablaufs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schnelle Positionierung und Ausrichtung von Bauteilen, Karosserie, etc. im Raum	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bauteileigenschaften (z.B. Gewicht, scharfe Kanten)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Standard Körperhaltungsbibliothek mit vordefinierten Haltungen: Stehen, Sitzen,...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Berechnete Körperhaltung speichern (um Varianten / Änderungen zu prüfen)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zentrale Dokumentation der Ergebnisse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Implementierung von unternehmensinternen Ergonomiebewertungsmethoden (z.B. ABATech)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fortsetzung Teil III

Wie wichtig sind für Sie folgende Anforderungen an das 3-D-Menschmodell?	sehr wichtig	wichtig	eher unwichtig	unwichtig
Verschiedene 3-D-Menschmodelle (Alter, Größe, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Realitätsnahe und korrekte Körperhaltungsberechnung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Selbstdurchdringung des Menschmodells vermeiden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Greifen von Bauteilen und Werkzeugen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Benötigen Sie für Ihre Untersuchungen ein komplettes 3-D-Menschmodell oder reicht Ihnen ein Hand-Arm-Modell aus? (Mehrfachnennung möglich)	<input type="checkbox"/> komplettes 3-D-Menschmodell <input type="checkbox"/> Hand-Arm-Modell			
Bitte bewerten Sie folgende generelle Anforderungen.	sehr wichtig	wichtig	eher unwichtig	unwichtig
Benutzerfreundlichkeit des Systems (intuitiv)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Softwareintegration ins Unternehmen (z.B. gute Datenanbindung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geeignete Funktionalitäten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hoher Automatisierungsgrad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

Anhang B

Ausgewählte Beispiele von virtuellen Montageuntersuchungen

I)

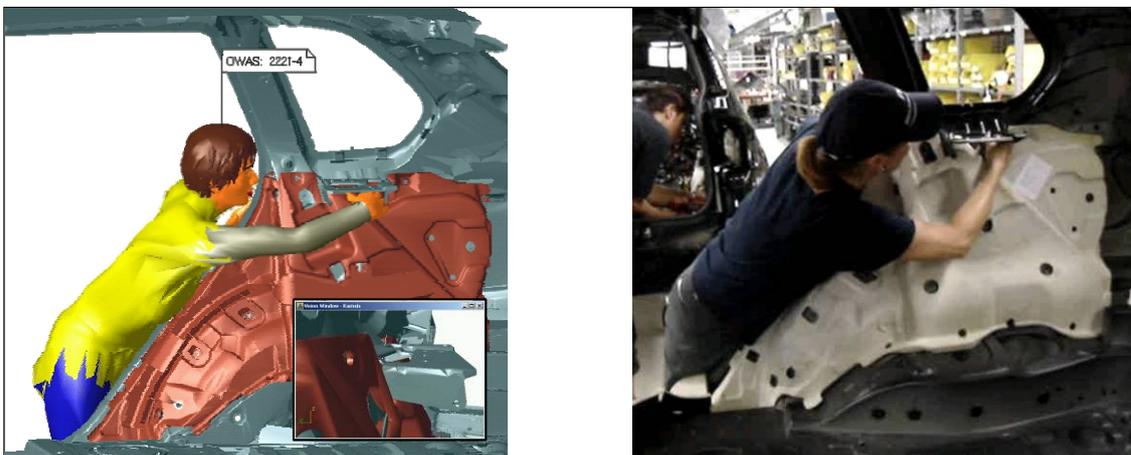


Abbildung 6-1: Verbau der seitlichen Schallisolierung – Übereinstimmung der Ergebnisse. Links: Simulierte Körperhaltung samt Sichtfeld und ergonomischer Bewertung nach OWAS (farblich und in Form eines Codes dargestellt). Rechts: Tatsächlich eingenommene Körperhaltung (Fotografieaufnahme: BMW Group).

II)

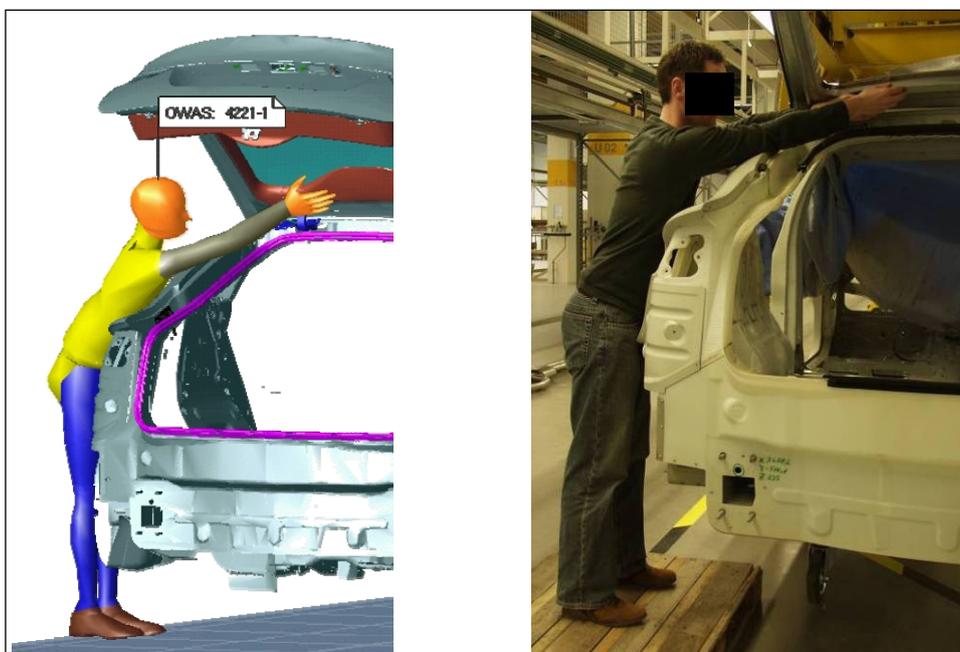


Abbildung 6-2: Verbau der oberen Heckklappenverkleidung – Übereinstimmung der Ergebnisse. Links: Simulierte Körperhaltung samt ergonomischer Bewertung nach OWAS. Rechts: Tatsächlich eingenommene Körperhaltung (Fotografieaufnahme: BMW Group).

III)

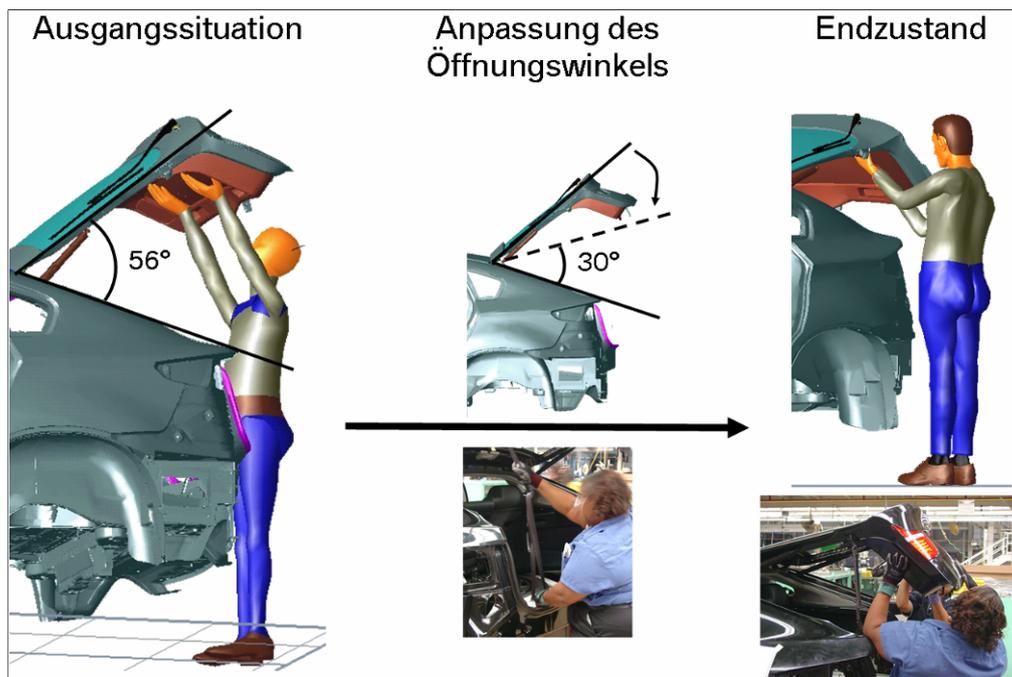


Abbildung 6-3: Erreichbarkeitsanalyse und umgesetzte Optimierungsmaßnahme (Fotografieaufnahmen: BMW Group)

IV)



Abbildung 6-4: Zugänglichkeits- und Ausbauanalyse eines Türschlosses

Anhang C

Strategischer Ansatz

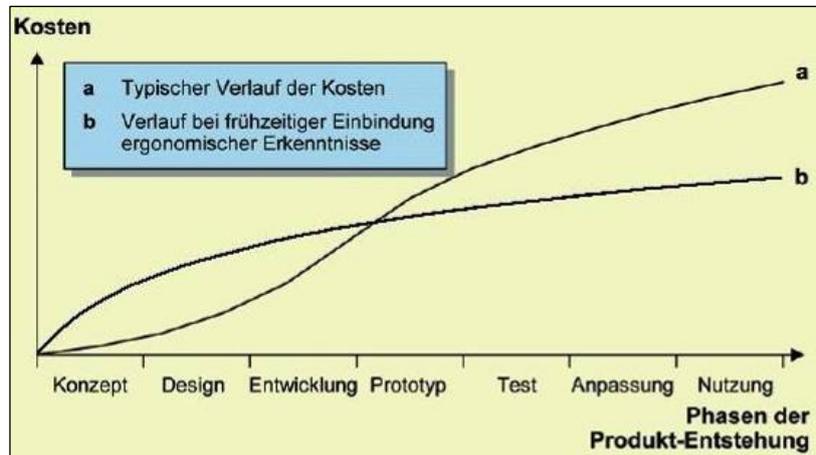


Abbildung 6-5: Exemplarische Darstellung von PEP und Kosten [23]: Reaktive (a) vs. pro-aktive (b) Vorgehensweise am Beispiel ergonomischer Erkenntnis