Doudou Zhang Erarbeitung von personenindividuellen beweglichen Menschmodellen zur Integration in digitale Prozessketten für die Entwicklung funktioneller Bekleidung



## Doudou Zhang

Erarbeitung von personenindividuellen beweglichen Menschmodellen zur Integration in digitale Prozessketten für die Entwicklung funktioneller Bekleidung Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

ISBN 978-3-95908-320-1

© 2023 Dresden und München Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG http://www.thelem.de

TUDpress ist ein Imprint von Thelem Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved. Gesetzt vom Autor. Printed in Germany.

## Erarbeitung von personenindividuellen beweglichen Menschmodellen zur Integration in digitale Prozessketten für die Entwicklung funktioneller Bekleidung

Fakultät Maschinenwesen Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik

#### Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M. Sc. Doudou Zhang

geboren am 01.12.1992

im September 2022

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. Martin Schmauder

#### Danksagungen

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden im Rahmen mehrerer interdisziplinärer DFG-, IGF- und ZIM-Forschungsvorhaben. An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski für den Anstoß zur Themenwahl, für die hervorragende Betreuung und die stete Förderung dieser Arbeit. Damit war es mir möglich, mich auf zentrale Fragestellung der Arbeit zu konzentrieren. Ich möchte Ihr meine tiefe Dankbarkeit dafür ausdrücken, dass sie mir die Möglichkeit gegeben hat, zu wachsen und an mich zu glauben. Ohne ihren unermüdlichen Einsatz, ihre fachliche Kompetenz, die äußerst hilfreichen Diskussionen sowie die wertvollen Hinweise für das Manuskript wäre das Gelingen der vorliegenden Arbeit sicher nicht in dieser Qualität möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder danke ich ganz herzlich für die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Prof. Dr.-Ing. habil. Yordan Kyosev möchte ich meinen Dank für die angenehmen Arbeitsbedingungen und für die stetige Motivation zum Publizieren meiner Ergebnisse aussprechen.

Bedanken möchte ich mich bei den Firmen Autodesk, Lectra, CLO3D Virtual Fashion, Russian3DScanner, OpenSim und Ziva Dynamics für die zur Verfügung gestellte Software. Des Weiteren bedanke ich mich auch ganz herzlich beim Max-Planck-Institut, Ziva Dynamics und OpenSim für die Aushändigung der Menschmodelle, die eine wichtige Basis meiner Arbeit bilden. Ganz besonders gilt mein Dank Herrn Andy van Straten von

der Firma Ziva Dynamics, der meine vielen Fragen geduldig und kompetent beantwortet hat.

Meinen Kolleginnen Dr.-Ing. Jana Siegmund, Dipl.Ing. Ellen Wendt, Dr.-Ing. Huangmei Lin und Dipl.Ing. (FH) Jessica Boll danke ich für die fachliche Unterstützung bei den Themen Bodyflying, Radsport, Assistenzsysteme, taktile Warnung und 4D-Scannen.

Darüber hinaus danke ich Frau Dipl.-Ing. Ellen Wendt für ihre großartige Arbeit bei der Durchsicht meines Manuskripts und ihre wertvollen Kommentare und Vorschläge, die mir geholfen haben, qualitativ bessere Ergebnisse zu erzielen.

Allen Familienangehörigen, Freunden und Arbeitskollegen danke ich für die seelische und moralische Unterstützung in sämtlichen Lebenslagen.

Des Weiteren ist es mir wichtig, meinem Freund Markus Kramer Danke zu sagen. Er hat mich nicht nur mit Rat, Verständnis und lieben Worten auf meinem Weg begleitet hat, sondern hat mir auch Tipps zur Python-Programmierung und zur Durchsicht meines Manuskripts gegeben.

Diese Arbeit widme ich meinen geliebten Eltern, die mir immer wieder Zuversicht gegeben und mich bestärkt haben, auch in schwierigen Phasen nicht aufzugeben und mein Ziel konsequent weiterzuverfolgen.

## Inhaltsverzeichnis

Αŀ	okürz	ungsve	erzeichnis	iv
Αŀ	bildu	ıngsver	rzeichnis	vi
Ta	belle	nverzei	ichnis	xii
1.	Einle	eitung	und Problemstellung	1
2.	Ziels	setzung	g und Lösungsweg	4
3.	Star	nd der	Technik hinsichtlich der Anwendung von innovativen Methoden	
	im E	Entwick	klungszyklus von Bekleidungsprodukten	7
	3.1.	Statisc	che Oberflächenmodelle	. 9
		3.1.1.	Kreative Oberflächenmodelle	. 10
		3.1.2.	Rekonstruktive Oberflächenmodelle	. 10
		3.1.3.	Interpolatives Oberflächenmodell	. 14
	3.2.	Beweg	gliche Oberflächenmodelle	. 20
		3.2.1.	Beispielbasiertes datengetriebenes Modellieren	. 21
		3.2.2.	Anatomiebasiertes Modellieren	. 23
			3.2.2.1. Skelettaufbau (Rig)	. 26
			3.2.2.2. Rigging	. 27
			3.2.2.3. Automatisches Platzieren des Skeletts	. 28
			3.2.2.4. Transformation	. 29
		3.2.3.	Bewegungserfassung	. 29
			3.2.3.1. Motion Capture	. 29
			3.2.3.2. 4D-Scanner	. 33
			3 2 3 3 Move4D	38

			3.2.3.4.	FBX (Filmbox)	40
		3.2.4.	Physikal	isch basierte Menschmodelle	40
		3.2.5.	Biomech	anische Menschmodelle	44
	3.3.	Beklei	dungskon	struktion	47
		3.3.1.	2D-CAD	Schnitttechnik [134]	47
		3.3.2.	3D-CAE	Schnitttechnik	48
			3.3.2.1.	Passformsimulation von Bekleidung	48
			3.3.2.2.	3D-Konstruktion von Bekleidung [134] $\hdots$	50
4.	Aus	gewählt	te Beispi	ellösungen zur Anwendung beweglicher Menschmodelle	53
	4.1.	Kinem	atische M	lodelle zur Entwicklung funktioneller Bekleidung für den	
		Sport			53
		4.1.1.	Radfahr	en	54
			4.1.1.1.	Anpassung der Netzstruktur an individuelle Scandaten .	59
			4.1.1.2.	SMPL-Modell	59
			4.1.1.3.	Erzeugung einer anwendungsorientierten Haltung	61
			4.1.1.4.	Schnittkonstruktion mit 3D-Konstruktionslösungen $\ .$	67
		4.1.2.	Bodyflyi	ng	70
			4.1.2.1.	Erzeugung der Flughaltungen	70
			4.1.2.2.	Schnittkonstruktive Aspekte	74
	4.2.	Physik	alisch ba	siertes Menschmodell als Grundlage für die Konstruktion	
		textile	r Mansch	etten zur individuellen Warnung mittels elektrischer Signale	81
		4.2.1.	Generier	ung und Animation des personenindividuellen Skeletts	81
		4.2.2.	Erzeugu	ng und Animation der Muskeln	86
		4.2.3.	Faszien .		91
		4.2.4.	Erzeugu	ng und Animation der Fettschicht	92
	4.3.	Biome	chanische	s Modell zur Entwicklung von Assistenzbekleidung	97
		4.3.1.	Pre-Pro	eessing für die Berechnung der Muskelkräfte	98
			4.3.1.1.	Skalierung zur Entwicklung eines personenindividuellen	
				Modells	98
			4.3.1.2.	Import von 4D-Scandaten zur Modellierung der Bewe-	
				gung in OpenSim	102
			4.3.1.3.	Erfassung externer Kräfte - Bodenreaktionskräfte	105

	4	4.3.2.	Simulati	on der Muskelkräfte in <i>OpenSim</i>		107
			4.3.2.1.	Inverse Kinematik		108
			4.3.2.2.	Statische Optimierung		110
			4.3.2.3.	Darstellung der berechneten Muskelkräfte $\ \ldots \ \ldots$		111
5.	Vergl	eich u	nterschie	edlicher Lösungsansätze		118
6.	Zusar	nmenf	fassung ı	ınd Ausblick		123
Ar	hang	A. Fal	nrradhalt	ung		144
	A.1. 1	Haltun	g001 .			144
	A.2. 1	Haltun	g002			144
	A.3. 1	Haltun	g003 .			145
Ar	nhang	B. Flu	gpositio	n		146
	B.1. 1	Bauchl	age			146
	B.2. 1	Rücker	lage .			148
	В.3. \$	Sitfly .				148
	B.4. 1	Duffy .				149
	B.5. 1	Headdo	own			150
	B.6. 1	Bodyfl	ying Prol	pand 2		152
Ar	nhang	C. Da	tenvorbe	ereitung		154
	C.1. A	Abstan	dsberech	nung		154
	C.2. 1	Darstel	llung von	Markerdaten in einer .trc-Datei		154
	C.3. 1	Darstel	llung von	Gelenkwinkeln in einer .mot-Datei		159
	C.4. 1	Konver	tierung o	ler Messplattendatei in einer .mot-Datei		163
Ar	nhang	D. Mı	ıskelpara	meter der unteren Gliedmaßen des Menschen		167

### Abkürzungsverzeichnis

DC3D ...... Design Concept 3D

DLP ..... Digital Light Processing

FBX ..... Filmbox

FEM ..... Finite-Elemente-Methode

FPGAs ...... Field-Programmable Gate Arrays

FRAMES .... Frames and Robust Algorithms for Extreme Size Models

**GRF** ..... Ground Reaction Force

HA ..... Hohe Auflösung

IBV ..... Institut für Biomechanik der Polytechnischen Universität Valencia

ICP ..... Iterative Closest Point

IK ..... Inverse Kinematik

 $\mathbf{MRT} \ \dots \dots \ \mathbf{Magnetresonanztomographie}$ 

MA ..... Mittlere Auflösung

NIH ...... National Institute of Health

NURBS ..... Non-Uniform Rational B-Splines

PCA ..... Principal Component Analysis

RRA ..... Residual Reduction Algorithm

SCAPE ..... Shape Completion and Animation for People

SDD ...... Skeleton Driven Deformation

SfM ..... Structure from Motion

SL ..... Structured Light

SMPL ...... Skinned Multi-Person Linear Model

StVK ...... Saint Venant-Kirchhoff

trc ..... track row column

**ZAT** ..... Ziva Anatomy Transfer

## Abbildungsverzeichnis

3.1.	Hauptanwendungsgebiete von Menschmodellen	8
3.2.	Beispiele für arbeitswissenschaftlich nutzbare digitale Menschmodelle $\left[2\right]$ .	9
3.3.	Oberflächennetz einer weiblichen Person, aufgenommen mithilfe eines	
	Bodyscanners [3]. Ansicht von (a) links, (b) vorn und (c) oben. (d) rechtes	
	Bein in zwei Zoomstufen	11
3.4.	Für die CAESAR Datensammlung wurden einige Personen in verschie-	
	denen Haltungen aufgenommen [7] $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	12
3.5.	3D-Körperscanner	12
3.6.	Aufbereitung der Individualscandaten [14]	13
3.7.	Internationale Reihenmessungen [8] $\hdots$	14
3.8.	Aufbau des Hauptnetzes des Oberflächen-Template-Modells: (a) Zylinder	
	als Annäherung für Arm, Schulter, Rumpf und Bein, (b) horizontales	
	Verschieben der Scheitelpunkte der Zylinder auf die Oberfläche, (c)	
	Verbinden der vier Zylinder und der Scheitelpunkte dazwischen zu einem	
	Oberflächennetz sowie Löschen der Punkte rechts der Mittelachse, (d)	
	Spiegeln an der Mittelachse und Verbinden der beiden Hälften zu einem	
	Netz sowie Verschweißen der Scheitelpunkte entlang der Mittelachse $[3]\;$ .	15
3.9.	Beispiel eines automatischen Ausrichtungsprozesses. Von links nach	
	rechts: Template in Ausgangsstellung, Laserscan zum Einpassen, Templa-	
	te an die Scandaten angepasst, Abstand Scan zum Template (dunkelblau	
	= 0,  rot = 5  mm) [15]	16
3.10	. Anpassung des Zylinders an das Bein in der Schnittebene, rechts. Dabei	
	zeigen (a) Zylinder, Bein, (b) Schnittstrahlen (grün), (c) verschobene	
	Scheitelpunkte des Zylinders [3]	16
3.11	. Body Talk DeSkription [19]	17
3.12	PCA Avalution GmbH	18

3.13. Avatare der Firma Avalution GmbH [21] $\ \ldots \ \ldots$	
3.14. Alvaform [23]	
3.15. SCAPE-Methode (Shape Completion and Animation for	r People) [25] :
3.16. Schablonenbasierte Körpermodellierung [5]	
3.17. Prozess der Adaption des kinematischen Template-Mo	dells an das
Oberflächenmodell einer realen Person [3]	
3.18. Online-Dienst Mixamo	
3.19. Links: Vorderansicht eines menschlichen Skeletts [82] ; I	Rechts: Vereinfa-
chung der Skelettstruktur	
3.20. Skelettaufbau	
3.21. (a) Berechnung der Koordinaten des Gelenks; (b) Platzi	ieren des Skeletts
3.22. Transformation	
3.23. Vicon [86]	
3.24. Ansichten des magnetischen Trackinganzugs [87]	
3.25. Xsens [88]	
3.26. 4D-Körper-Scanner	
3.27. Architektur des 4D-Scanners der Technischen Universitä	it Warschau [94] .
3.28. Hardware [110]	
3.29. Software-Prozess [110]	
3.30. MRT-Muskelmodell [113]	
3.31. Anatomie-Transfer [118]	
3.32. Aufbau eines Skelettmuskels (a) und von Zug- und Drud	eksehnen (b) [82] .
3.33. Muskelsystem. Gelbe Linien: Muskelfasern; rote Punkte	e: Befestigungen
am Knochen	
3.34. Überblick über den Arbeitsablauf zur Erstellung einer b	oiomechanischen
Simulation in <i>OpenSim</i> [121]	
3.35. Anybody Modellingsystem [128]	
3.36. Position der Kontaktpunkte unter dem Fuß des Muske	
(oben links), Seitenansicht der Kontaktpunkte mit Da	
Versatzabstände (unten links) und der Punktaktivierun	
Bodenkontakt (rechts) [131]	
3.37. Passformsimulation bei Bewegung	

3.38.	Entwicklung körpernaher Sportbekleidung unter Verwendung von $De$ sign $Concept\ 3D$ von Lectra in den drei Schritten (a) 3D-Konstruktion,	
2 20	(b) Schnittteilabwicklung von 3D nach 2D und (c) 3D-Visualisierung [142]	50
J.JJ.	Entwicklung körpernaher Sportbekleidung unter Verwendung von $CLO3D$ (a) 3D-Konstruktion, (b) Schnittteilabwicklung von 3D nach 2D	51
4.1.	Verschiedene Positionen des Radfahrers: (a) Aufrechte Position (UP); (b) Abgelegte Position (DP); (c) Time-Trail Position (TTP) [145]	54
4.2.	Erfassung und Aufbereitung der Körperdaten durch Scannen in Standardhaltung (T-Pose)	56
4.3.	Erfassung und Aufbereitung der Körperdaten durch Scannen in Rennhaltung (Proband 1)	57
4.4.	Anwendung eines kinematischen Menschmodells zur Animation von	91
	Scandaten - Realisierung einer sportarttypischen Körperhaltung (Beispiel: Radrennsport)	58
4.5.	Anpassung der Netzdaten in R3DS WRAP 3.3	59
4.6.	(a) SMPL weibliches Modell (b) SMPL männliches Modell (grün: Skelett)	60
4.7.	(a) Knochenstruktur und Namen des SMPL-Modells (b) Plugin (SMPL	
4.8.	- Rigging & Pose Corrections Toolbox für $Maya$ )	61
4.0.		co
4.9.	Scandaten mit angepasster Netzstruktur	62
	(b) Blend Shape hinzufügen (c) Shape Editor	62
4.10.	Verschiedene Ansichten in $Maya$	63
4.11.	(a) Importierter 3D-Scan zum Abgleich mit dem kinematischen Modell	
	(b) Rotation des gesamten Körpers $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	64
4.12.	Rotation der Arme	65
4.13.	Finetuning - Links: Animation des kinematischen Menschmodells auf	
	Basis der Scandaten; Rechts oben: Austausch der Handgeometrie; Rechts	
	unten: Implementierung des realen Kopfes inklusive Helm	66
4.14.	Geometriedaten zur (a) Herstellung einer physischen Testpuppe zur	
	Verwendung im Windkanal; (b) Verwendung in der Strömungssimulation	
	[146]	66

4.15.	Radfahrhaltungen, Drehungswinkel Rumpf variiert zwischen den Haltun-	
	gen 001-004	7
4.16.	3D-Konstruktion - T-Pose	8
4.17.	Abwicklung der Schnittteile des Radsportanzuges 6	9
4.18.	3D-Konstruktion - Rumpfneigung 45° 6	9
4.19.	Bodyflying-Anzug A-Pose	5
4.20.	3D-Modelle der Flugpositionen für Proband 1	6
4.21.	Farbdarstellung der Dehnung	7
4.22.	Farbdarstellung des Druckes	7
4.23.	Haltungsbezogene Schnittentwicklung für das Bodyflying - Links: Schnitt-	
	teile in 3D, Rechts 2D-Schnittteile	8
4.24.	2D-Schnittteile des Bodyflyinganzugs	9
4.25.	Vergleich der haltungsabhängigen 2D-Schnittteile des Bodyflyinganzugs,	
	gestapelt: (a) Unzureichende Vernetzung (b) Oberer Ärmel (c) Vorderes	
	Hosenteil (d) Hinteres Hosenteil	9
4.26.	Angleichung der Netzstruktur - Links: Template $Ziva$ , Rechts: Proband . 8	1
4.27.	Anatomy Transfer (ZAT) - Skelett	2
4.28.	Skelett des Probanden	2
4.29.	Obere Extremität als Ganzes [82]	3
4.30.	Arm- und Schulterskelett	3
4.31.	Rigging	4
4.32.	Bewegungen im Ellenbogen- und Radioulnargelenk: a. Pronationsstellung;	
	b. Supinationsstellung [82]	4
4.33.	Rigging-Prozess: rot (Zielbeschränkung), grün (Verknüpfung), violett	
	(Positionsbeschränkung)	5
4.34.	Ziva-Workflow [153]	5
	Links: Schultergelenk-/Oberarm- und Unterarmmuskulatur [82]; Rechts:	
	Digitale Muskulatur	6
4.36.	Materialeigenschaft-Muskel	7
4.37.	Links: TricepsLateral (1,0); Rechts: DeltoidAcromial (0,1) 8	7
	Links: Scandaten der Schulter-Arm-Haltung; Rechts: Armhaltung zur	
	Validierung der Manschettenkonstruktion 9	0
4.39.	Schulter- und Armmuskulatur von vorn	0

4.40.	Schulter- und Armmuskulatur von der Seite	91
4.41.	Materialeigenschaften-Faszien	91
4.42.	Geometrie der Fettschicht	92
4.43.	Materialeigenschaften-Fettschicht	93
4.44.	Vergleich zwischen der Wirkung des Druckes und der Oberflächenspan-	
	nung [153]	93
4.45.	Animierte Armbewegung	94
4.46.	Größenabhängige Konstruktion der Manschette auf dem Oberarm $[154]$ .	94
4.47.	Vergleich der Oberarmumfänge für die simulierten Haltungen	95
4.48.	Vergleich des Oberarmumfangs: rot - kinematische Modellierung, blau -	
	physikalische Modellierung	96
4.49.	Vergleich des Oberarmumfangs: rot - Scandaten, blau - physikalische	
	$\label{eq:Modellierung} \mbox{Modellierung} \ \ \dots \ \ \ \dots \$	96
4.50.	Ausgewählte Muskeln	98
4.51.	Links: Template-Modell (Gait 2392) von <i>OpenSim</i> mit Markerpunkten;	
	Rechts: Markerpunkte anhand der Scandaten interaktiv bestimmt	
	(Proband 1)	100
4.52.	Skalierungsprinzip [121]	100
4.53.	Skalierung anhand der Markerpaare	101
4.54.	Markerpaare in $OpenSim$	101
4.55.	Links: Template; Rechts: Ergebnis der Skalierung (Proband 1) $\ \ldots \ \ldots$	102
4.56.	Freiheitsgrade der Gelenke in $\mathit{OpenSim}$	103
4.57.	Vergleich der Benennung beider Modelle	103
4.58.	Links: Gelenkkoordinaten eines Frames; Rechts: Modellierung der Auf-	
	stehbewegung in $OpenSim$ (Proband 1)	104
4.59.	Modellierung der Aufstehbewegung in $\textit{OpenSim}$ (Proband 2)	104
4.60.	Messsystem mit Bio Ware ® und zwei Messplattformen Typ 9260AA [164]	105
4.61.	Links: 3-Komponenten-Kraftsensor; Rechts: Ausgangssignale der Mess-	
	plattform [164]	106
4.62.	Links: Kistler-Koordinatensystem; Rechts: $\textit{OpenSim}\text{-}Koordinatensystem$ .	106
4.63.	Links: Scan-Aufnahme mit Messplatte und Tennisball; Rechts: Messdia-	
	gramm Bodenreaktionskraft in z-Richtung	107

4.64.	Messtechnische Erfassung der Bodenreaktionskräfte und Aufnahme der	
	Bewegungsdaten (Proband 2)	107
4.65.	Überblick über den Workflow in $\textit{OpenSim}$ [165] $\ \ldots \ \ldots \ \ldots$	108
4.66.	Gelenkwinkel aus FBX	109
4.67.	Gelenkwinkel aus IK	109
4.68.	Modellierung der Aufstehbewegung (Proband 2), die grünen Pfeile	
	veranschaulichen die Bodenreaktionskräfte, die grüne Kugel entspricht	
	dem Massenschwerpunkt	110
4.69.	Muskelgruppe am Rumpf (Proband 2) $\dots$	112
4.70.	Muskelgruppe der Hüfte (Proband 2) $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	112
4.71.	Muskelgruppe am Knie (Proband 2)	112
4.72.	Flexion des Rumpfes	113
4.73.	Extension des Rumpfes	114
4.74.	Flexion des Hüftgelenks	114
4.75.	Extension des Hüftgelenks	115
4.76.	Flexion des Kniegelenks	116
4.77.	Extension des Kniegelenks	117
5.1.	Software-Liste	118
5.2.	Kalkulierte Entwicklungszeit Menschmodell/Schnittkonstruktion mithilfe	
	des SMPL-Modells	119
5.3.	Kalkulierte Entwicklungszeit des physikalisch basiertes Menschmodells	
	mithilfe Ziva VFX	121
5.4.	Kalkulierte Entwicklungszeit des biomechanischen Menschmodells mit-	
	hilfe OpenSim	122

## **Tabellenverzeichnis**

3.1.	Anwendung des parametrischen Modells [24]	2
3.2.	4D-Körper-Scanner	35
3.3.	Technische Daten	39
4.1.	Darstellung der Flugposition und der Windanströmungsrichtung $[152]$	7.
4.2.	Überführung des Modells in die Flug position Duffy $\ \ldots \ \ldots \ \ldots$	73
4.3.	3D-Modelle der Flugpositionen	74
4.4.	Versuche im ILR-Tunnel und im Vertikalwindtunnel [152]	80

#### 1. Einleitung und Problemstellung

In der Textilbranche werden traditionell Kleidungsstücke anhand von physischen Körpermodellen entwickelt. Dieser Prozess ist mit zahlreichen Iterationen verbunden und bietet keinen konstruktiven Zusammenhang zwischen den 2D-Schnitten eines Modells und dem räumlichen Erscheinungsbild. Die Produktentwicklung ist deshalb zeitaufwendig und fehleranfällig. Durch die Verwendung von digitalen menschlichen Avataren können die Effizienz gesteigert und das Produkt auf den Kunden personalisiert werden. Für das Design und die Konstruktion von Kleidung werden deshalb mehr und mehr 3D-CAE-Lösungen eingesetzt, die auf der Nutzung statischer Menschmodelle in Standardhaltung basieren. Zur Konstruktion von Funktionskleidung sind jedoch nutzungstypische Körperhaltungen erforderlich, die häufig erhebliche Abweichungen von den üblichen Scanhaltungen aufweisen. Um den Tragekomfort und die Funktionalität auf Basis mechanischer und/ oder thermischer Kennwerte der verwendeten Materialien exakt abbilden zu können, ist deshalb die Modellierung/Simulation der Kleidung in nutzungstypischen Positionen bzw. bei Bewegung erforderlich. Die damit einhergehenden Veränderungen von Körperform und Körpermaßen können mit den derzeit verfügbaren statischen Menschmodellen nur unzureichend abgebildet und in die konfektionstechnische Produktentwicklung für Sport-, Medizin- und Schutzbekleidung einbezogen werden.

Die Abschätzbarkeit der Produktform und der Funktionalität sowie der damit erzielbaren Ästhetik sind bei Bekleidung sowohl im statischen als auch im dynamischen Zustand sehr aufwendig und mit einer Vielzahl von Iterationsschritten während der Entwicklung verbunden. Wie bereits gesagt, kommen meist physische Testungen der Prototypen bis zur Erstellung von Modellschnitten für den serienreifen Prozess hinzu. Die Vorhersage mit Methoden der kinematischen bzw. physikalischen Simulation zur virtuellen Auslegung der Produktgeometrie und Produkteigenschaften auf Basis von digitalen Standardbzw. Individualmodellen in Bewegung oder in typischen Nutzungssituationen der Bekleidung birgt großes Potenzial für Einsparungen an Entwicklungszeit und materiellen

Ressourcen und befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium. Die realitätsnahe Darstellung der anatomischen Komplexität des Menschen in Bewegung und mit Bekleidung definieren die wissenschaftliche Aufgabenstellung der vorliegenden Dissertation.

Die Gestaltung und die technologische Umsetzung neuer Produkte aus textilen Materialien wird wesentlich durch die richtige Darstellung der menschlichen Anatomie bei Bewegung und des Materialverhaltens beeinflusst. Dies bildet die Basis für konstruktive Aufgaben. Die Erstellung beweglicher Menschmodelle kann auf zwei Wegen erfolgen. Das beispielbasierte datengetriebene Modellieren, welches auf umfangreichen Scandatenbanken basiert, die je nach Anforderungen der Industrie analysiert werden können. Dies kann z.B. die Erstellung von Größentabellen, die Erarbeitung größenspezifischer durchschnittlicher Menschmodelle oder die Erstellung von Größenempfehlungen für individuelle Produkte umfassen. Mehrere Organisationen, wie das US-Verteidigungsministerium oder Firmen wie Human Solutions GmbH, Avalution GmbH oder Alvanon HK Ltd, um nur einige exemplarisch zu nennen, haben bereits Studien über die Bevölkerung in ihren jeweiligen Ländern, Europa und weltweit durchgeführt und große Scandatenbanken erstellt.

Bei dem täglichen Tragen von Funktionskleidung muss höchster Komfort gewährleistet werden. Deshalb werden zunehmend Datenbanken mit unterschiedlichen Bewegungen aufgenommen. Die effiziente Nutzung der Scandaten (3D bzw. 4D) ist allerdings immer noch ein großes Problem. Auch wenn derartige Datenbanken schon sehr umfangreich sind, steht die aktuell gesuchte Bewegung häufig nicht zur Verfügung oder lässt sich nicht auf den zu betrachtenden Probandenkreis übertragen. Riesige Datenmengen erschweren außerdem die industrielle Nutzung auf handelsüblichen Computern.

Die zweite Methode zur Erstellung beweglicher Menschmodelle besteht in der kinematischen bzw. physikalischen sowie der biomechanischen Modellierung des menschlichen Körpers. Ein anatomisches Modell des Körpers wird hierbei durch Oberflächendaten, meist mittels Scanner gewonnen, sowie Knochen und weichem Gewebe (Muskeln, Fettschicht) beschrieben. Die Deformation der Körperoberfläche wird bei der Bewegung sowohl durch das Skelett als auch durch das unter der Oberfläche liegende Gewebe bestimmt. Diese Methode soll künftig die akkurate Erstellung von Bewegungen erlauben, die z. B. aufgrund ihrer Lage im Raum mit Hilfe von Scannern nur schwer zu erfassen sind. Darüber hinaus lassen sich Aussagen über erforderliche Muskelkräfte bei definierten Bewegungen gewinnen.

Die gewonnenen Körperform- bzw. Bewegungsdaten können in einem zweiten Schritt in einer Schnittkonstruktions- und Passformsimulationssoftware zur Schnittentwicklung genutzt werden.

Die biomechanische Körpersimulation ist neben der klassischen Bekleidungsentwicklung, insbesondere für die Konzeption von textilen Assistenzsystemen, von Bedeutung. Hierdurch soll eine gezielte Materialauswahl ermöglicht werden, um die benötigte Unterstützung der Muskeln durch textile Lösungen zu erreichen.

Die Modellierung des Menschen ist ein sehr zeitaufwändiger Prozess. Daher ist es erforderlich, die Übertragung der modellierten komplexen Anatomie und der Oberflächendeformation bei Bewegung auf andere Scandaten computergestützt per Skript zu realisieren. Dies ist ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit.

### 2. Zielsetzung und Lösungsweg

In der Bekleidungsindustrie ergeben sich aus dem marktwirtschaftlichen Druck, neue Modelle mit hoher Materialvielfalt in einem umfangreichen Größenspektrum und/oder hoher Funktionalität in kurzer Zeit bereitzustellen, Forderungen nach ausgefeilten Entwicklungskonzepten, die ohne physische Prototypen auskommen und die Grundlage für weitergehende Simulationen, z. B. zur Betrachtung des strömungstechnischen Verhaltens, bilden. Darüber hinaus können virtuelle Vorhersagemethoden anhand nutzungstypischer Situationen dazu dienen, geforderte Funktionalitäten ohne messtechnische Analysen zu bewerten.

Langfristiges Ziel der konfektionstechnischen Forschung und Entwicklung ist die virtuelle Produktentwicklung bis zum vollständigen digitalen Prototyp des Menschen mit Bekleidung, um den bestmöglichen Reifegrad bei minimalem Ressourceneinsatz zu generieren.

Aus den dargestellten umfassenden Zielen lässt sich die Nachfrage nach beweglichen Menschmodellen ableiten. Die Form- und Funktionsfindungsphase vom Designentwurf bis zum serienreifen Modellschnitt muss insbesondere bei Funktionskleidung durch adäquate Vorhersagemethoden erheblich verkürzt werden. Mittels Simulation lassen sich Variantenstudien deutlich effektiver durchführen. Die Entwickler gewinnen durch eine umfangreiche Analyse Klarheit über die Einflussparameter auf die Produktform und die Funktionalität (u.a. Kompressionsverhalten, Reibungsverhalten, ergonomischer und thermischer Tragekomfort).

Das generelle Vorgehen zur Entwicklung von personenindividuellen beweglichen Menschmodellen zur Integration in digitale Prozessketten für die Entwicklung funktioneller Bekleidung wird im Rahmen der Arbeit in Teilaufgaben, die zur Erreichung des Zieles notwendig sind, gegliedert.

Das Kapitel 3 befasst sich mit der Recherche zum Stand der Technik und der Forschung zu statischen und beweglichen Modellen des Menschen. Nach grundlegenden Ausführun-

gen zur Erzeugung statischer Oberflächenmodelle werden aus der Fachliteratur bekannte Methoden zur Erarbeitung von beweglichen Menschmodellen vorgestellt. Dabei wird zwischen datengetriebenem Modellieren und anatomiebasiertem Modellieren unterschieden. Teilweise werden beide Methoden auch miteinander verknüpft, um Bewegungsdaten realitätsnah zu implementieren. Zur Anwendung dieser Methoden auf konfektionstechnische Aufgabenstellungen ist meist erhebliches Fachwissen auf dem Gebiet der Computergrafik notwendig. Hierfür werden die fachlichen Grundlagen zusammengestellt. Neben der kinematischen Modellierung, bei der in der Regel nur Oberflächen- und Skelettdaten berücksichtigt werden, stellt die Erarbeitung physikalisch basierter Menschmodelle einen weiteren Entwicklungsschritt dar. Menschliches Gewebe (Muskeln, Sehnen, Fettgewebe) werden unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften dieser Strukturen modelliert und eignen sich deshalb besser, Deformationen der Körperoberfläche durch externe Kräfte oder bei Bewegung abzubilden. Um Muskelkräfte, die zur Bewältigung von Alltags- oder Arbeitsaufgaben benötigt werden, zu ermitteln, erfordert es biomechanische Modelle.

Die Modellvarianten werden in ihrem Aufbau erläutert, geeignete Softwarelösungen genannt und ein Schwerpunkt darauf gelegt, wie eine Individualisierung der digitalen Modelle möglich wird.

Die Erstellung und Anwendung anatomischer Modelle dient dabei immer dem Ziel, konfektionstechnische Entwicklungs- und/oder Marketingaufgaben durch digitale Tools zu unterstützen. Der Stand der Technik in der Bekleidungskonstruktion wird hierzu kurz dargestellt und es werden Schwachstellen aufgezeigt.

Kapitel 4 widmet sich der Anwendung digitaler Modelle in ihrer unterschiedlichen Komplexität. Dazu werden Beispiele aus dem Bereich funktioneller Bekleidung für den Sport, für die Arbeitssicherheit sowie Assistenzbekleidung ausgewählt. Der Schwerpunkt der Darlegungen liegt dabei auf der Generierung der benötigten Menschmodelle. Zur Validierung der Ergebnisse stehen 3D- und 4D-Scandaten der betrachteten Probanden zur Verfügung. Der Einsatz von Templates wird ausführlich begründet und demonstriert. Um den Themenbereich dieser Arbeit einzugrenzen, wird die sich anschließende Schnitttechnik nur ansatzweise beschrieben.

Im Kapitel 5 werden die unterschiedlichen Lösungsansätze verglichen. Die Erkenntnisse hinsichtlich der Komplexität der Modelle und dem damit verbundenen Entwicklungsaufwand, der teilweise mit umfangreichen soft- und hardwareseitigen Vorausset-

zungen einhergeht, werden zusammengefasst. Ein Ziel besteht darin, zu beschreiben, wie realitätsnah Körperpositionen und Bewegungen dargestellt werden können und welche Abweichungen unter Berücksichtigung der Nutzungsszenarien zulässig sind. Daraus lassen sich Empfehlungen für die industrielle Nutzung ableiten. Dabei geht es um eine praxisrelevante Auslegung der benötigten Computerressourcen und Rechenzeiten, die Automatisierung der Prozessschritte und die Minimierung der Zahl der benötigten Softwareumgebungen.

Das Kapitel 6 enthält die Zusammenfassung und gibt einen Ausblick auf künftig zu bearbeitende Forschungsschwerpunkte.

# 3. Stand der Technik hinsichtlich der Anwendung von innovativen Methoden im Entwicklungszyklus von Bekleidungsprodukten

Die Notwendigkeit, Menschen virtuell darzustellen, findet sich in vielen unterschiedlichen Anwendungsbereichen wieder. Ende der 60er Jahre kamen die ersten digitalen Menschmodelle in der Automobil- und Luftfahrtindustrie zur Untersuchung von Fahrzeug-Innenräumen und der komfortablen Erreichbarkeit verschiedener Bedienelemente zum Einsatz. Das Forschungsinteresse an derartigen Problemstellungen war weltweit sehr groß. Im Anhang der Dissertation von MÜHLSTEDT [1] werden Softwarelösungen für historisch bedeutende digitale Menschmodelle aufgeführt und beschrieben. Diese Systeme wurden im Laufe der Jahre weiterentwickelt, aber auch teilweise wieder eingestellt oder zusammengeführt [2]. Die sowohl in der Dissertation, als auch im Buch genannte Aufzählung betrachtet die Menschmodelle hauptsächlich bezüglich arbeitswissenschaftlicher und ergonomischer Fragestellungen.

Später, in den 1980er Jahren, wurden verfügbare Modelle der Automobil- und Luftfahrtindustrie erweitert und damit auch für ein breiteres Anwendungsspektrum verfügbar gemacht. Die eigentlichen arbeitswissenschaftlichen digitalen Menschmodelle wurden immer vielseitiger einsetzbar und der Funktionsumfang wuchs. Die zunehmende Rechenleistung bot hierfür die erforderliche hardwareseitige Voraussetzung. Gleichzeitig verringerte sich die Anzahl der Modelle, da der Aufwand zur Erstellung eines neuen Modells sowie zur Pflege und Integration eines bestehenden Modells in CAE-Softwarelösungen anstieg. Von da an verschob sich der Schwerpunkt der Entwicklung und Forschung in

Richtung Film- und Spieleindustrie sowie zu E-Commerce.

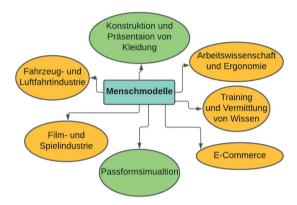


Abbildung 3.1. Hauptanwendungsgebiete von Menschmodellen

"Wird die Vielzahl der Anwendungen und der damit verbundenen Fragestellungen berücksichtigt, ist nachvollziehbar, dass die Forschungsthematik immer umfangreicher wird. Die Zusammenhänge sind so komplex und die Freiheitsgrade so groß, dass es nicht ein einziges Modell gibt, das alle Anforderungen gleichermaßen erfüllt " [3]. Die beabsichtigten Einsatzgebiete beeinflussen in erheblichem Maße die Beschreibungsdimension: während beispielsweise für ergonomische Erreichbarkeits- und Haltungsanalysen anthropometrische Auswertungen eine entscheidende Rolle spielen (siehe Abbildung 3.2), basieren Menschmodelle für Bewegungs- und Belastungsanalysen, z.B. im sportmedizinischen Bereich, hauptsächlich auf Kenntnissen der Biomechanik, um die funktionale Sicht exakt abzubilden und zu gestalten.

Für die textile Produktentwicklung ist neben anthropometrischen Anforderungen der Detailgrad der Oberflächendarstellung von entscheidender Bedeutung. Die aktuell existierenden digitalen Menschmodelle sind zur virtuellen Gestaltung von Bekleidungsprodukten, insbesondere unter Berücksichtigung von funktionalen Aspekten im Sport-, Medizin- und Schutzbekleidungsbereich, häufig nicht ausreichend, da entweder die anthropometrischen Grundsätze nicht exakt berücksichtigt werden oder die Oberflächendarstellung, speziell bei Deformation infolge der Bewegung, nicht realistisch erfolgt. Des

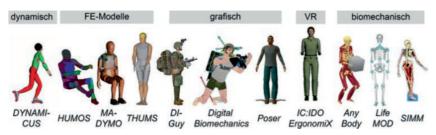


Abbildung 3.2. Beispiele für arbeitswissenschaftlich nutzbare digitale Menschmodelle [2]

Weiteren werden die Körpermaße und Klassifizierungen der Bevölkerung in Form von Maßtabellen nicht ausreichend beachtet. Eine Anbindung an aufwendig erstellte Datenbanken aus Reihenmessungen (z.B. Deutschland SizeGERMANY [4]) wird vorrangig skelettbezogen unter Beachtung anthropometrischer Variablen vorgenommen. Skalierungen zur Darstellung des 0,5 bis 99,5 Perzentils männlicher und weiblicher Modelle erfolgen meist nur nach Körperhöhe und Gewicht. Ingenieurtechnische Herangehensweisen zur optischen Erfassung von Oberflächendaten und zur Skelettgenerierung werden mehr und mehr mit computergrafischen Methoden verknüpft, um zu einer effizienten Form der Modellierung hochkomplexer geometrischer Formen und deren Deformation bei Bewegung zu gelangen.

Nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt die Entwicklung und Überprüfung von Bekleidung mithilfe digitaler Simulationsmethoden lediglich auf Basis statischer Menschmodelle. Dies ist insbesondere bei Funktionskleidung nicht ausreichend. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit Chancen der Übertragung und Erweiterung des Wissensstandes der Ingenieurtechnik und der Game-Industrie untersucht, um animierbare Avatare für die Entwicklung von Bekleidung zu nutzen.

#### 3.1. Statische Oberflächenmodelle

Laut [5] gibt es zur Modellierung eines virtuellen dreidimensionalen Oberflächenmodells eines realen Menschen drei Hauptansätze, die in der Dissertation von MEIXNER [3] umfänglich beschrieben werden:

- · kreativ,
- rekonstruktiv und
- interpolativ.

#### 3.1.1. Kreative Oberflächenmodelle

Traditionell gibt es menschliche Modelle, die von Künstlern geschaffen werden und deren Fertigstellung viel Zeit in Anspruch nimmt [6]. Meist bildet eine Zeichnung die Grundlage für ein dreidimensionales Menschmodell. Als Vorlage werden meist zweidimensionale, manchmal auch dreidimensionale Aufnahmen verwendet. Dieser Prozess ist aufwändig, lässt sich aber nicht vermeiden, wenn ein eigenes Modell mit selbst definierter Topologie eingesetzt werden soll. Dies ist häufig in der Spieleindustrie der Fall, wenn Fantasiefiguren kreiert werden. Derartige Modelle bestehen aus Polygonnetzen, die je nach Anwendung detailliert oder relativ grob sein können. In der Regel sind sie "wasserdicht", d.h. es gibt keine Löcher in der Oberflächenbeschreibung. Aufgrund des großen Aufwands ist die Automatisierbarkeit der Modellerstellung sehr gering.

#### 3.1.2. Rekonstruktive Oberflächenmodelle

Rekonstruktive Oberflächenmodelle sind Abbildungen realer Menschen, die mit optischen Erfassungssystemen aufgenommen werden können. Die äußere Geometrie der individuellen Modelle wird realitätsnah abgebildet. Zum Innenaufbau der Modelle liegen in der Regel keine Informationen vor. Die Generierung qualitativ hochwertiger Oberflächenmodelle wird zunehmend automatisiert. Dreidimensionale Oberflächenmodelle können mithilfe verschiedener Aufnahmeverfahren erzeugt werden. Weil der Mensch nur eine kurze Zeit still stehen kann, sind Handscanner, die über die Oberfläche des Menschen bewegt werden, kaum eine ausreichende Option. Sie können allerdings für die Erfassung von Körperteilen eingesetzt werden. Die Detailaufnahmen werden über unterschiedliche Markierungssysteme bzw. Algorithmen meist automatisch zusammengesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Bodyscanner der Firma Vialux Messtechnik und Bildverarbeitung GmbH eingesetzt, um eine kontaktfreie, schnelle und zuverlässige Reproduzierbarkeit der Oberflächendaten zu gewährleisten. Abbildung 3.3 zeigt die Darstellung dieser Daten für eine Person in verschiedenen Ansichten und Detailgraden. In

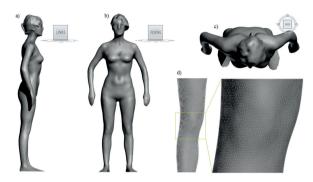


Abbildung 3.3. Oberflächennetz einer weiblichen Person, aufgenommen mithilfe eines Bodyscanners [3]. Ansicht von (a) links, (b) vorn und (c) oben. (d) rechtes Bein in zwei Zoomstufen.

Abbildung 3.3.(d) sind das rechte Bein und das Knie als Detailaufnahme dargestellt, um einen Eindruck von der Feinheit der Netzstruktur zu vermitteln.

Das Ergebnis des 3D-Scannens ist eine Punktewolke, die durch die Oberflächenkoordinaten der Punkte beschrieben wird. Wird beim Scannen gleichzeitig eine Textur erfasst, kommen zu den Punktkoordinaten die Punktnormalen hinzu. Beide Informationen werden meist im Obj-Format gespeichert.

Eine Punktewolke ist somit nach Definition eine Beschreibung der Oberfläche X als eine Sammlung von Sensor-Messwerten, wobei jeder Messwert die Koordinate eines Oberflächenpunkts und eine Schätzung der Oberflächennormalen an diesem Punktenthält. Die Punktewolke wird als  $\mathcal{P}^X = (\mathcal{V}^X, \mathcal{N}^X)$  bezeichnet.

 $\mathcal{V}^X = (x_1, \dots, x_{N_X})$  ist eine Menge von 3D-Oberflächenpunktkoordinaten.

 $\mathcal{N}^X = (n_1, \dots, n_{N_X})$  sind die entsprechenden Normalenvektoren mit Einheitslänge.

Punktewolken sind sehr nützlich für die Darstellung von 3D-Sensordaten. Sie liefern jedoch nur unvollständige Informationen über die zugrunde liegende kontinuierliche Oberfläche (siehe Abbildung 3.4).

Das Wichtigste ist, dass Punktewolken nicht explizit die Oberflächenkonnektivität und damit die Topologie modellieren. Viele kontinuierliche Oberflächen können eine plausible Anpassung an die Muster einer Punktewolke sein. Die Formunsicherheit wird durch das Messrauschen erhöht, das sich bei keinem optischen Erfassungsprozess vermeiden lässt.

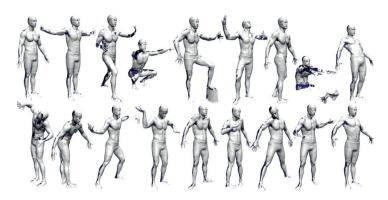


Abbildung 3.4. Für die CAESAR Datensammlung wurden einige Personen in verschiedenen Haltungen aufgenommen [7]

Obwohl es viele Messsysteme zur Erfassung von Körpern in 3D gibt (siehe Abbildung 3.5), können die erfassten Daten meist nicht ohne Weiteres als ein Modell des menschlichen Körpers in Softwareumgebungen verwendet werden. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Scantechnologie so entwickelt, dass es möglich wird, eine Person in wenigen Sekunden dreidimensional zu erfassen [8]. DAANEN [9] veröffentlichte eine Übersicht von 3D-Körperscansystemen mit Informationen zu Auflösung, Scan-Volumen, Scan-Fläche, Scandauer und Preisangaben.



Abbildung 3.5. 3D-Körperscanner

Es gibt zwei Hauptprobleme. Das erste Problem besteht darin, dass der Scan einer

Person aus einer ungeordneten Punktestruktur mit Fehlstellen besteht. Darüber hinaus haben verschiedene Scans derselben oder verschiedener Personen eine unterschiedliche Anzahl von Punkten. Das zweite Problem besteht darin, dass sich die Form des menschlichen Körpers, z.B. durch die Atmung oder eine ungewollte Bewegung, zeitabhängig verändert [13]. Streulicht, Reflexionen und Überlappungen bei den Erfassungskameras verursachen Streupunkte und zu große Punktedichten. Streupunkte werden zwar zum Teil von der Bearbeitungssoftware entfernt, doch nahe am Körper liegende Streupunkte sind häufig manuell zu eliminieren. Ebenso muss eine Reduktion in Bereichen zu großer Punktedichten manuell durchgeführt werden, um ein qualitativ hochwertiges Oberflächennetz (Mesh) zu erzielen (siehe Abbildung 3.6). Um das Polygonnetz zu erzeugen, werden die Punkte miteinander verbunden. Die sogenannten Knoten müssen mindestens eine Verbindung zum Restnetz haben. Die Scandaten weisen in bestimmten Körperbereichen durch Abschattung oder ungünstige Winkel der Körperoberfläche zur Lichtquelle Lücken auf, die automatisch oder manuell geschlossen werden müssen. Um die Körperkrümmungen exakt abzubilden, ist meist die manuelle Arbeitsweise zu bevorzugen [14]. "Die Ausgangsdaten eines Bodyscanners sind hinsichtlich Netzgröße und Speicherumfang meist ungeeignet, um direkt animiert zu werden. Da die Netze ungeordnet sind, sind die Knotenverteilung und die Nummerierung nicht reproduzierbar "[3].

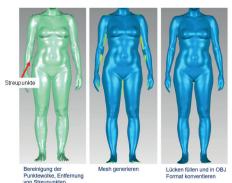


Abbildung 3.6. Aufbereitung der Individualscandaten [14]

Auf Basis der Scandaten erfolgt die anthropometrische Vermessung, die in den letzten Jahren in vielen Ländern Europas, den USA und China durchgeführt wurde (siehe

Abbildung 3.7).

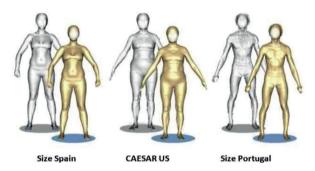


Abbildung 3.7. Internationale Reihenmessungen [8]

#### 3.1.3. Interpolatives Oberflächenmodell

Zur Erstellung eines virtuellen Menschmodells kommen meist mehrere Verfahren zum Einsatz. Ziel ist es, eine Datenbasis von Menschmodellen zu generieren. Startpunkt der interpolativen Verfahren sind Template-Modelle. Als Template wird ein Modell bezeichnet, das einen definierten Aufbau (Netzstruktur und -topologie) hat und als eine Art dreidimensionale Schablone verwendet werden kann. Um diese zu erzeugen, werden z. B. rekonstruktiv erstellte Oberflächenmodelle in Template-Modelle überführt. Die einfachste Variante zur Berechnung weiterer Menschmodelle ist die lineare Interpolation jedes einzelnen Knotenpunktes von zwei Template-Modellen. Um keine unerwünschten Randeffekte zu erhalten, müssen die Topologie zwingend übereinstimmen und die Haltung eine Ähnliche sein. In der Dissertation von MEIXNER [3] wurde der Aufbau des Oberflächen-Template-Modells detailliert beschrieben. Die Vorgehensweise beginnt jeweils mit einem Zylinder für das rechte Bein, den rechten Arm, den Rumpf und den Schulterbereich (siehe Abbildung 3.8(a)). Das Oberflächennetz wird zunächst in relativ grobe, rechteckige, regelmäßige Teilflächen eingeteilt. Die Verfeinerung des Oberflächennetzes kann später automatisiert durchgeführt werden. Jeder Scheitelpunkte jedes Zylinders wird auf die in diesem Fall verwendeten Daten des Magnetresonanztomographie (MRT)-Modells verschoben (siehe Abbildung 3.8 (b)). Anschließend werden die vier Zylinder miteinander zu einem Oberflächennetz verbunden (siehe Abbildung 3.8(c)).

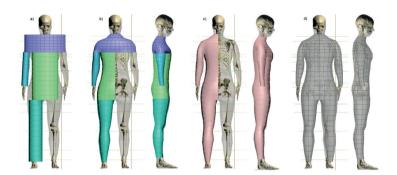


Abbildung 3.8. Aufbau des Hauptnetzes des Oberflächen-Template-Modells: (a) Zylinder als Annäherung für Arm, Schulter, Rumpf und Bein, (b) horizontales Verschieben der Scheitelpunkte der Zylinder auf die Oberfläche, (c) Verbinden der vier Zylinder und der Scheitelpunkte dazwischen zu einem Oberflächennetz sowie Löschen der Punkte rechts der Mittelachse, (d) Spiegeln an der Mittelachse und Verbinden der beiden Hälften zu einem Netz sowie Verschweißen der Scheitelpunkte entlang der Mittelachse [3]

Das abgebildete Netz wird kopiert, horizontal gespiegelt und verbunden. Dadurch lassen sich unstrukturierte Scandaten (im abgebildeten Fall MRT-Daten) in Oberflächenmodelle mit definierter Topologie überführen. In der Computergrafik-Wissenschaft bezeichnet man das Angleichen der Knotenpunkte des Template-Modells an eine Zieloberfläche als Registration. Die Registration ist unverzichtbar bei Anpassung einer großen Menge von Körperscans an ein Template. Dadurch haben alle erstellten Menschmodelle die gleiche Netzstruktur. Dieser Prozess sollte weitestgehend automatisch erfolgen [15] (siehe Abbildung 3.9). In [15] wird dazu der ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) verwendet.