

Integration flexibler Bauteile
in eine Umgebung
der virtuellen Realität
für den Einsatz in einer
Montagesimulation

Von dem Fachbereich Mathematik
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Inform. Ralf Rabätje
geboren am 10.12.1970, in Wolfsburg

15. Oktober 2002

Referent : Prof. F.E. Wolter
Koreferent : Prof. H. Matthies
Tag der Promotion : 05.07.2002
Datum der Veröffentlichung : 15.10.2002

Abstrakt

Diese Dissertation beschreibt die Integration deformierbarer Objekte in ein VR System zur Durchführung von Montagesimulationen. Die flexiblen Bauteile sind hierbei Schläuche innerhalb eines Fahrzeuges. Diese werden mit corotatorischen Balken simuliert. Die Simulation wurde weiterhin durch spezielle Lastfälle erweitert, um alle notwendigen Montageoperationen abzubilden. Das VR System wird dabei als intuitive Mensch-Maschine Schnittstelle verwendet, um mit den Simulationsdaten zu interagieren. Vergleiche mit klassischen Finite Element Programmen wurden durchgeführt, um die Simulationsgüte zu überprüfen.

Schlagwarte: deformierbare Objekte, Virtuelle Realität, Montagesimulation

abstract

This dissertation describes the integration of deformable objects into a VR assembly simulation. The deformable objects are flexible hoses, which are simulated using corotational beams. The simulation is enhanced by specific load cases in order to fully match the needs of the assembly tasks. A virtual reality system is used as an intuitive man-machine interface to the calculation model. Comparisons between the results obtained by this system and classical finite element programs are given to get an error estimate for the simulation.

Keywords: deformable objects, virtual reality, assembly simulation.

Vorwort

Nun da die Dissertation abgeschlossen ist, gilt es denen zu danken, ohne deren Hilfe und Unterstützung diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Joseph Tomas und Dr. Barry Trippit bedanken, ohne deren Gedankenaustausch einige Hürden mehr Anlauf benötigt hätten. Weiterhin möchte ich allen Kollegen im VR Labor der Volkswagen Forschung danken, die mich in den letzten Jahren ertragen haben. Besonderen Dank gilt Peter Zimmermann, der mich in meiner Arbeit immer unterstützt und ein äußerst angenehmes Arbeitsklima geschaffen hat. Nicht vergessen werden soll Herr Dr. Michael Symietz, ohne den diese Arbeit nie begonnen worden wäre und der immer wieder durch hilfreiche Anregungen neue Anstöße gegeben hat.

Neben allen fachlichen Kollegen, möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Hier sind zunächst meine Eltern zu nennen. Sie haben mir meinen langen Ausbildungsweg finanziell und emotional ermöglicht. In den letzten fünf Jahren musste jedoch meine Frau einiges erdulden. Ich danke Ihr deshalb besonders, daß Sie die ganzen schlechten Launen ertragen hat und mir trotz unserer Kinder, die Möglichkeit zum ruhigen Lernen und Schreiben gegeben hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung der Arbeit	3
1.4	Übersicht über die folgenden Kapitel	3
2	Einordnung in die aktuelle Forschung	5
2.1	Simulation von deformierbaren Objekten	5
2.1.1	Modellierung mit deformierbaren Objekten	6
2.1.2	Animation mit deformierbaren Objekten	9
2.1.3	Ansätze der Robotik	14
2.1.4	Ansätze in der virtuellen Realität	17
2.2	VR-Montagesimulation	20
2.3	Zusammenfassung	20
3	Simulationsanforderungen	23
3.1	Analyse flexibler Bauteile im Fahrzeug	23
3.1.1	Bestimmung und Auswahl flexibler Bauteile	23
3.1.2	Klassifizierung von Leitungen in Bezug zu dem gesuchten Simulationsmodell	26
3.2	Vermessung flexibler Bauteile	29
3.2.1	Der Druckversuch	33
3.2.2	Der Zugversuch	41
3.2.3	Bewertung der Versuche	49
3.3	Analyse der Montagetätigkeiten	56
3.3.1	Ermittlung notwendiger manueller Tätigkeiten	56
3.3.2	Klassifikation der manuellen Tätigkeiten	57
3.3.3	Festlegung geeigneter Belastungsgrenzen	58
3.4	Bestimmung des Anforderungsprofils	68
3.4.1	Bedingungen aus dem Einsatz von VR	68
3.4.2	Auswertung der Materialvermessung	69
3.4.3	Die menschlichen Tätigkeiten und Belastungsgrenzen	69

4	Mathematische Grundlagen zur Simulation einer Leitung	71
4.1	Auswahl des Simulationsverfahrens	71
4.1.1	Der allgemeine Balken	74
4.1.2	Verallgemeinerungen für dreidimensionale Balken	77
4.2	Berechnungsgrundlagen für die Bewegungen einer Leitung	81
4.2.1	Der Aufbau des verwendeten Balkens	82
4.2.2	Die Bewegungsgrundlagen des Balkens	83
4.2.3	Die zeitliche Integration der Balkenbewegung	85
4.3	Erweiterungen für den Einsatz in einer Montagesimulation	88
4.3.1	Einbeziehung von Schlauchversteifungen	88
4.3.2	Grundlagen zur Berechnung von Kontaktproblemen	93
4.3.3	Kollisionen mit der starren Umgebung	96
4.3.4	Kollision zweier Leitungen	98
4.3.5	Aufschieben einer Leitung auf einen Anschlußstutzen	100
4.3.6	Befestigung mit Hilfe von Leitungsclipsen	101
4.4	Zusammenfassung	103
5	Integration des Simulationsverfahrens in ein VR-System	105
5.1	Einführung in das VR-System	105
5.1.1	Beschreibung des VR-Systems	105
5.1.2	Die Kollisionserkennung	107
5.1.3	Das Rendering	108
5.1.4	Anforderungen auf Grund der Echtzeitbedingung	109
5.1.5	Ermittlung der Randbedingungen	112
5.2	Eingliederung in den VR-Regelkreis	113
5.2.1	Optimierung der Daten	113
5.2.2	Kommunikationsverfahren beider Systeme	115
5.2.3	Parallelisierung des Simulationsverfahrens	119
5.3	Berechnung der Simulationseingabedaten	122
5.3.1	Erstellung der Simulationsdatenbasis	122
5.3.2	Translation und Rotation der Leitungen	124
5.3.3	Kollisionen mit starren Bauteilen	127
5.3.4	Kollisionen mit flexiblen Leitungen	131
5.3.5	Behandlung von Anschlußstutzen	132
5.3.6	Behandlung von Leitungsclipsen	134
5.3.7	Einbeziehung der Kraftschwellen	135
5.4	Zusammenfassung	135
6	Evaluierung der Simulationslösungen	137
6.1	Überprüfung der Echtzeitanforderung	137
6.1.1	Ermittlung der Berechnungszeiten	137
6.1.2	Bewertung der Daten	141
6.2	Vergleich mit bestehenden Simulationsverfahren	145

6.2.1	Auswahl der FEM Programme	145
6.2.2	Versuchsbeschreibung	147
6.2.3	Auswertung der gemessenen Kräfte	149
6.2.4	Vergleich der Deformationslagen	161
6.2.5	Bewertung der Versuche	169
6.3	Zusammenfassung	170
7	Zusammenfassung und Ausblick	173
7.1	Zusammenfassung	173
7.2	Ausblick	176
A	Berechnung großer Rotationen	179
A.1	Berechnung kleiner Rotationen	179
A.2	Rodrigues Formel zur Berechnung großer Rotationen	180
A.3	Verwendung eines alternativen Rotationsvektors	181
A.4	Behandlung zusammengesetzter Rotationen	182
A.5	Quaternionen und Eulerparameter	182
A.5.1	Defintion von Quaternionen	182
A.5.2	Bezug zu großen Rotationen	183
B	Das Newmark Beta Verfahren	185
B.1	Die Integrationsvorschrift	185
B.2	Stabilitätsbetrachtungen	185
B.2.1	Explizites Newmark β Verfahren	187
B.2.2	Zentrale Differenzenmethode	188
B.2.3	Fox und Goodwin	188
B.2.4	Lineares Beschleunigungsverfahren	188
B.2.5	Trapezregel	188
B.2.6	Hilbert-Hughes-Taylor α Verfahren	189

Abbildungsverzeichnis

3.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	28
3.2	Beispiel eines Kühlwasserschlauches	30
3.3	Kraft-Weg Kennlinie	33
3.4	Aufbau eines Druckversuchs	34
3.5	Schematische Darstellung des Schneidvorganges mit Hilfe einer Drehmaschine	35
3.6	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 1	36
3.7	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 2	37
3.8	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 3	38
3.9	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4	39
3.10	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5	40
3.11	Versuchsaufbau des Zugversuchs	41
3.12	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 1	44
3.13	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 2	45
3.14	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 3	46
3.15	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4	47
3.16	Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5	48
3.17	Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 1	51
3.18	Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 2	52
3.19	Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 3	53
3.20	Vergleich der Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4	54
3.21	Vergleich der Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5	55
3.22	Druck gegen eine vertikale Wand (stehend)	60
3.23	Druck gegen eine vertikale Wand (hockend)	60
3.24	Druck gegen eine horizontale Wand (sitzend)	60
3.25	Zug an einem Hebel (stehend)	61
3.26	Zug an einem Hebel (hockend)	61
3.27	Zug an einem Handgriff	61
3.28	Drehung an einem T-Griff	63
3.29	Drehung eines Schraubendrehers	63
3.30	Beispiel eines Anschlußstutzens	64
3.31	Aufschiebversuche mit Schlauch 3	66
3.32	Aufschiebversuche mit Schlauch 5	67

4.1	Beispiel eines 3D Objektes	72
4.2	Beispiel eines 2D Objektes	72
4.3	Beispiel eines 1D Objektes	72
4.4	Ein Balkenelement	74
4.5	Die Kräfte und Momente am Balken	74
4.6	Die neutrale Faser eines Balkens	75
4.7	Die Biegung \mathbf{m} am Balken	76
4.8	Beispiel eines dreidimensionalen Balkens	78
4.9	Aufbau des Timoshenko Balkens.	80
4.10	Der Knoten eines Belytschko Balkens	82
4.11	Der verwendete Balken	82
4.12	Beispiel einer Leitungsversteifung	88
4.13	Der Zentralknoten einer Leitungsversteifung	89
4.14	Die virtuelle Feder zwischen Start- und Zielpunkt	91
4.15	Rotation des Starrkörpers durch Translation eines Knotens	92
4.16	Anpassung der Geschwindigkeit bei kinematischem Kontakt.	94
4.17	Durchdringung einer Leitung mit einer starren Ebene der Montageumgebung	97
4.18	Kollision zweier Balken	99
4.19	Skizze eines Preßverbandes	100
4.20	Befestigungsclipse einer Leitung	101
4.21	Simulation eines Leitungsclipslastfalles	102
5.1	Die ermittelten Informationen der Kollisionserkennung.	108
5.2	Beispiel Sichtpyramide	109
5.3	Beispiel von Dreieckstripes	110
5.4	Die Stripen der Leitungshülle	114
5.5	Die Zylinder der Kollisionsleitung	115
5.6	Der Aufbau des VR-Leitungsobjektes	116
5.7	Der Datenaustausch zwischen dem VR-System und dem Simulationsmodell.	119
5.8	Die Parallelisierung zwischen beiden Systemen.	120
5.9	Die Parameter eines Leitungsclipses.	123
5.10	Die Parameter eines Anschlußstutzens.	124
5.11	Das Abbild der menschlichen Hand im VR-System	125
5.12	Die Bewegung der Leitung	126
5.13	Beispiel einer VR-Objektdurchdringung	128
5.14	Beispiel für fehlerhafte Normalen eines Konstruktionsteiles	128
5.15	Beispiel für die Anpassung der Kollisionsebenennormale	129
5.16	Beispiel für die falsche Anpassung der Kollisionsebenennormale	130
5.17	Projektion der Endpunkte und Anpassung der Kollisionsnormalen	131
5.18	Der zweite Schritt zur Anpassung der Kollisionsnormalen	132
5.19	Beispiel für die automatische Ausrichtung der Leitung.	133

6.1	Die Bewegung der Leitung	138
6.2	Die Kollision der Leitung mit einer starren Ebene	138
6.3	Der Lastfall der Leitungskollision	139
6.4	Der Lastfall der Leitungsclipse	140
6.5	Der Lastfall der Anschlußstutzen	140
6.6	Diagramm der Berechnungszeiten	143
6.7	Darstellung der Differenzen der Berechnungszeiten	144
6.8	Skizze einer Balkenscherung.	146
6.9	Darstellung des ersten Versuches	148
6.10	Darstellung des zweiten Versuches	148
6.11	Darstellung des dritten Versuches	149
6.12	Darstellung des vierten Versuches	149
6.13	Die gemessenen Kräfte bei Dehnung entlang der Längsachse.	150
6.14	Die Differenz zwischen den Balkenelementen bei Dehnung entlang der Längsachse.	151
6.15	Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 12.5mm.	152
6.16	Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 15mm.	152
6.17	Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 17.5mm.	152
6.18	Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 20mm.	152
6.19	Die gemessenen Kräfte bei Stauchung der Leitung entlang der Längsachse.	153
6.20	Die Differenz der Kräfte bei einer Stauchung entlang der Längsachse.	154
6.21	Darstellung der plötzlichen Deformation des PAMCRASH Balken- elementes.	155
6.22	Darstellung der langsamen Deformation des Madymo Balkenele- mentes.	155
6.23	Darstellung der langsamen Deformation des verwendeten Balken- elementes.	155
6.24	Die Kräfte bei Stauchung der Leitung entlang aller Hauptachsen	156
6.25	Die Differenz der gemessenen Kräfte bei Stauchung entlang aller Hauptachsen	157
6.26	Die Kräfte bei Stauchung und Rotation der Leitung	159
6.27	Die Differenz der Kräfte bei Stauchung und Rotation der Leitung	160
6.28	Die maximalen Abstände bei Stauchung der Leitung entlang der Längsachse.	162
6.29	Deformation des eingesetzten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 10mm.	163
6.30	Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 22.5mm.	163
6.31	Deformation des eingesetzten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 35mm.	164
6.32	Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 47.5mm.	164

6.33	Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 60mm.	164
6.34	Die verschiedenen Deformationslagen des eingesetzten und des Madymo Balkenelementes.	165
6.35	Die maximalen Abstände bei Stauchung der Leitung entlang aller Achsen.	166
6.36	Die maximalen Abstände bei Stauchung und Rotation der Leitung.	168
A.1	Berechnung einer kleinen Rotation durch Addition	179
A.2	Berechnung des Vektors $\Delta\mathbf{p}$ durch Addition zweier Vektoren	180

Tabellenverzeichnis

3.1	Liste flexibler Bauteile	25
3.2	Auswahl der vermessenen Schläuche	32
3.3	Tabelle der Druckelastizitätsmodule	35
3.4	Tabelle der Zugelastizitätsmodule	43
3.5	Tabelle aller Elastizitätsmodule	50
3.6	Kräfte des Menschen für den Druck gegen eine Ebene (Richtwerte)	60
3.7	Kräfte des Menschen für den Druck gegen eine Ebene (Grenzwerte)	60
3.8	Kräfte des Menschen für Zug (Richtwerte)	61
3.9	Kräfte des Menschen für Zug (Grenzwerte)	62
3.10	Kräfte des Menschen für Drehung (Richtwerte)	62
3.11	Kräfte des Menschen für Drehung (Grenzwerte)	63
5.1	Tabelle der verschiedenen Lastfälle.	118
B.1	Übersicht über die verschiedenen Newmark β Verfahren und ihre Genauigkeiten	187

Symbolverzeichnis

\mathbf{a}	:	Darstellung eines Vektors
\mathbf{A}	:	Darstellung einer Matrix
p	:	Position eines Punktes
$v \frac{[\mathbf{m}]}{[\mathbf{s}]}$:	Geschwindigkeit, im folgenden : $v = \dot{p}$
$a \frac{[\mathbf{m}]}{[\mathbf{s}^2]}$:	Beschleunigung, im folgenden : $a = \dot{v} = \ddot{p}$
\dot{a}	:	einmalige Ableitung nach der Zeit
\ddot{a}	:	zweimalige Ableitung nach der Zeit
$\omega \frac{[\mathbf{Grad}]}{[\mathbf{s}]}$:	Winkelgeschwindigkeit
$\alpha \frac{[\mathbf{Grad}]}{[\mathbf{s}^2]}$:	Winkelbeschleunigung, im folgenden : $\alpha = \dot{\omega}$
\mathbf{J}	:	Jacobi Matrix
\mathbf{M}	:	Matrix aller Massepunkte eines Objektes
\mathbf{D}	:	Matrix aller Dämpfungskoeffizienten eines Objektes
\mathbf{K}	:	Matrix aller Steifigkeitsparameter eines Objektes
$\sigma \frac{[\mathbf{N}]}{[\mathbf{mm}^2]}$:	Spannung
ε	:	Dehnung
$E \frac{[\mathbf{N}]}{[\mathbf{mm}^2]}$:	Elastizitätsmodul
μ	:	Querkontraktionszahl
ν	:	Poissonsche Konstante
$m \text{ [kg]}$:	Masse eines Objektes
$V \text{ [m}^3\text{]}$:	Volumen eines Objektes
$\varrho \frac{[\mathbf{kg}]}{[\mathbf{m}^3]}$:	Dichte eines Materials
$\tau \frac{[\mathbf{N}]}{[\mathbf{mm}^2]}$:	Schubspannungen innerhalb eines Körpers
$G \frac{[\mathbf{N}]}{[\mathbf{mm}^2]}$:	Der Gleitmodul eines Materials

$I_{xx}[\mathbf{m}^4]$:	Flächenträgheitsmoment zweiten Grades entlang der X-Achse
$I_{yy}[\mathbf{m}^4]$:	Flächenträgheitsmoment zweiten Grades entlang der Y-Achse
$I_{zz}[\mathbf{m}^4]$:	Flächenträgheitsmoment zweiten Grades entlang der Z-Achse
1 Kg = 9.81 N	:	Umrechnung zwischen Gewicht und Kraft
E A	:	Dehnungssteifigkeit eines Balkens
EI_{yy}	:	Biegesteifigkeit eines Balkens
EI_{xx}	:	Torsionssteifigkeit eines Balkens

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Der heutige Wettbewerbsdruck zwingt die Unternehmen, ihre Produkte möglichst kostengünstig und schnell entwickeln, herstellen, warten und recyceln zu können. Bei all den genannten Tätigkeiten spielt die Montage- und Demontagefähigkeit eines Produktes eine wesentliche Rolle. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, die Montageeigenschaften eines Produktes so früh wie möglich in die Konstruktion eines neuen Produktes einfließen zu lassen. Die Analyse des Produktes mittels des „Designs for Manufacture“ [1] ¹ oder des „Spiess-Verfahrens“ [2] ² sind Techniken, dieses Ziel zu erreichen. Tiefgreifendere Erkenntnisse sind jedoch aus der konkreten Montagesimulation zu gewinnen.

Der Begriff der „Virtuellen Realität“ (VR)³ beschreibt eine neue Form der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Sie hielt auf Grund ihrer Eigenschaften Einzug in viele Bereiche der Industrie [3]. Für eine genaue Begriffsdefinition soll hier auf [4] verwiesen werden. Trotzdem werden an dieser Stelle einige wesentliche Eigenschaften der Virtuellen Realität erwähnt:

- Die Erzeugung einer künstlichen, im Rechner generierten Welt, mit der versucht wird, die Realität nachzuempfinden.
- Der Mensch ist ein Bestandteil dieser künstlichen Welt und nimmt an ihr über akustische, visuelle aber auch haptische Reize teil. Dies wird oft durch

¹Hierbei handelt es sich um ein Analyseverfahren, bei dem versucht wird, die Teileanzahl zu minimieren und identifizierbare Schwierigkeiten zu beseitigen. Zunächst wird die theoretische minimale Teileanzahl ermittelt. Hieraus leitet sich eine Montagezeit ab. Aus der Teileanzahl und der Montagezeit wird eine Kennzahl berechnet, die die Effizienz des Produktes aus Sicht der Montage beschreibt.

²Auch hierbei wird, wie bei dem „Design for Manufacture“, eine Kennzahl ermittelt, die die Montagefähigkeit eines Produktes beschreibt. Der Unterschied besteht in einer anderen Datenbasis und der daraus resultierenden geänderten Berechnung der Kennzahl.

³Im allgemeinen wird auch der englische Begriff „Virtual Reality“ verwendet.

den Begriff des „Immersionsgrades“ umschrieben. Hiermit wird ein Maß der menschlichen Empfindung, die erzeugte Welt als real anzusehen, beschrieben.

- Der Mensch interagiert mit der Welt durch seine direkte Manipulation ⁴.
- Der Mensch ist ein aktives Glied des Simulationsregelkreises, d.h. das technische System muß in der Lage sein, auf jede Aktion des Benutzers unmittelbar⁵ eine Reaktion folgen zu lassen. Hieraus leitet sich die Forderung nach Echtzeitfähigkeit ab, welche wiederum stark mit dem Immersionsgrad gekoppelt ist.

Diese Eigenschaften machen den Einsatz von VR für die Simulation manueller Montagevorgänge [6], [7], [8] und [9], auf die sich auch die vorliegende Arbeit beschränkt⁶, besonders interessant.

1.2 Problemstellung

VR-Systeme lassen sich auf Grund ihrer Interaktionsmöglichkeiten und des abgebildeten Realitätsgrades in verschiedene Kategorien unterteilen:

1. In dieser Kategorie handelt es sich um eine feste, dargestellte Szene, die nicht durch den Benutzer manipuliert werden kann. Ihm ist es lediglich möglich, seinen Betrachterstandpunkt innerhalb der Szene beliebig zu verändern. Beispiele für diese Kategorie sind Architekturvisualisierungen, die in der Literatur auch unter dem Begriff des „walk-through“ bekannt sind.
2. Neben den Eigenschaften der ersten Kategorie ist es dem Benutzer hier möglich, die Szene z.B. über Greifen und Verschieben der Objekte zu verändern. Es wurde in [11] gezeigt, daß auch in dieser Kategorie bereits montagerelevante Ergebnisse mit Hilfe von VR erzielt werden können.
3. Die Objekte weisen nicht mehr, wie in der zweiten Kategorie, ein rein passives Verhalten auf, sondern besitzen nun gewisse Eigenschaften. Diese können z.B. in Form einer Objektmasse, mit deren Hilfe ein Schwerkrafteinfluß simuliert werden kann, oder in Form ihrer Deformationseigenschaften vorliegen.

⁴Die Operationen erfolgen auf den Objekten selbst, z.B. durch Greifen und Verschieben. Die Interaktion muß nicht über bestimmte Metaphern, wie Menüs oder Symbole wie z.B. Papierkörbe etc. erfolgen.

⁵Durch die Echtzeitanforderung der Virtuellen Realität muß die Reaktion innerhalb weniger Millisekunden erfolgen. In der Literatur [5] ist hierfür ein Schwellwert von mindestens 10 Bildern pro Sekunde angegeben. In diesem Fall muß die Reaktion innerhalb von 100 Millisekunden erfolgen.

⁶Im folgenden ist der Begriff „Montagesimulation“ immer als Simulation manueller Montagevorgänge zu verstehen.

Ist man bestrebt, ein möglichst umfassendes Wissen über das Montageverhalten eines Objektes zu erlangen, so ist die Verwendung eines VR-Systems der dritten Kategorie unumgänglich.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Aus der Fülle möglicher Objekteigenschaften innerhalb eines VR-Systems der dritten Kategorie, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Beschränkung auf flexible Bauteile⁷ für den Einsatz in einer Montagesimulation. Diese soll in der Konzeptphase neuer Produkte eingesetzt werden. Hierdurch ist man in der Lage, schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt Einfluß auf die Konstruktion zu nehmen und verschiedene Varianten bezüglich ihrer Montageeigenschaften zu testen.

Entscheidend für das zu verwendende Simulationsmodell ist seine Eignungsfähigkeit im Hinblick auf die zu simulierenden Montagetätigkeiten. Aus diesem Grund muß man sich folgende Fragestellungen, die bei der Montagesimulation von besonderem Interesse sind, vor Augen halten:

- Ist die Montage generell durchführbar ?
- Welche Betriebsmittel⁸ werden eingesetzt ?
- Welche Belastungen treten für den Monteur auf ?
- Welche Probleme treten bei der Montage auf ?
- In welchem zeitlichen Rahmen ist die Montage durchführbar ?

Aus diesen Fragestellungen und dem Einsatz in einem VR-System leiten sich folgende Anforderungen an das Simulationsmodell ab:

- Echtzeitanforderung
- Simulation der Objektform
- Bestimmung der Belastungen in Form von wirkenden Kräften

1.4 Übersicht über die folgenden Kapitel

In Kapitel zwei wird zunächst ein Überblick über die bisherige Forschung zu den Themengebieten der deformierbaren Objekte und der Montagesimulation unter

⁷Im folgenden werden flexible Bauteile auch mit dem Begriff der deformierbaren Objekte beschrieben.

⁸Unter Betriebsmittel sind Montagewerkzeuge, Hebebühnen etc. zu verstehen.

Verwendung der virtuellen Realität ⁹ gegeben. In Kapitel drei werden die notwendigen Simulationsanforderungen ermittelt. Hierzu werden die zu simulierenden Bauteile und die mit ihnen durchgeführten Tätigkeiten analysiert. Ziel ist dabei die Erstellung eines Anforderungskataloges an das zu suchende Simulationsverfahren. Kapitel vier beinhaltet die Beschreibung des verwendeten Simulationsansatzes. In Kapitel fünf wird die Verbindung zwischen dem Simulationsverfahren und der VR-Montageuntersuchung hergestellt. Kapitel sechs bewertet das Verfahren in Bezug auf den erzielten Realismus. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse des geschaffenen Simulationsverfahrens mit anderen Simulationstechniken verglichen. In Kapitel sieben wird schließlich eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten gegeben.

⁹Montagesimulationen, die die Mensch-Maschine Schnittstelle der virtuellen Realität verwenden, werden im folgenden mit dem Begriff *VR-Montagesimulation* bezeichnet.

Kapitel 2

Einordnung in die aktuelle Forschung

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über bisherige Anwendungen deformierbarer Objekte und den dabei verwendeten Simulationsverfahren. Darüber hinaus werden bekannte Forschungen zu dem Thema der VR-Montagesimulation in Hinblick auf die Integration physikalischer Objekteigenschaften beleuchtet.

2.1 Simulation von deformierbaren Objekten

Eine gestiegene Rechnerleistung und der Wunsch nach einer umfassenderen Abbildung der Realität schufen eine Fülle verschiedenster Anwendungsgebiete für die Simulation deformierbarer Objekte. Auf Grund unterschiedlicher Anforderungen und Ziele innerhalb der Anwendungen gliedert sich das folgende Unterkapitel in die Bereiche *Modellierung*, *Animation*, *Telexrobotik* und *Virtuelle Realität*. Die vorgestellten Artikel werden dabei hinsichtlich der folgenden Punkte für ihren Einsatz in einer VR-Montagesimulation kritisch beleuchtet:

- Echtzeitfähigkeit
- Berechnung der wirkenden Deformationskräfte
- Interaktionsmöglichkeiten mit dem Simulationsmodell
- Einschränkung der Deformationsursachen¹

Die Bewegung und Deformation des Objektes wird in den meisten folgenden Verfahren auf folgende Gleichung zurückgeführt :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}\mathbf{p} = \mathbf{f} \quad (2.1)$$

¹Gesucht ist ein Simulationsverfahren, das in der Lage ist, Deformationen zu berechnen, die sich aus dem Eingreifen des Benutzers, aus der Gravitation, aus der Massenträgheit und aus Kollisionen ergeben.

2.1.1 Modellierung mit deformierbaren Objekten

Die Generierung neuer Objekte kann in Abhängigkeit von dem verwendeten geometrischen Modell sehr komplex und nicht sehr intuitiv sein. Aus diesem Grund wird seit Mitte der Achtzigerjahre nach neuen Wegen gesucht, mit Hilfe von physikalischen Beziehungen den Gestaltungsprozeß zu vereinfachen. Die aus der Mechanik entliehenen Differentialgleichungen mit ihren Komponenten wie Massen, Dämpfungen und Steifigkeiten, dienen lediglich dazu, dem Benutzer eine für ihn verständlichere Schnittstelle zu dem zugrundeliegenden geometrischen Modell zu bieten. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Differentialgleichungen in einer für die spezifische Aufgabenstellung geeigneten Weise spezialisiert und vereinfacht. Eine Übertragung der vorgestellten Berechnungsverfahren für die physikalisch korrekte Simulation von Objekten ist nur in einem sehr eingeschränkten Maße möglich. Dennoch soll auf die Vorstellung der verschiedenen Verfahren nicht verzichtet werden, um so einen Gesamteindruck von der Bandbreite physikalischer Simulationen zu erhalten.

Entscheidende Arbeiten im Bereich der deformierbaren Objekte und im speziellen der Modellierung mit ihnen wurden von Terzopoulos geleistet. So wird zum Beispiel in [10] ein Ansatz vorgestellt, mit dessen Hilfe man 3D-Geometrien aus 2D-Bildern extrahieren kann. Dabei werden verallgemeinerte Zylinder so deformiert, daß sie die Kontur der dargestellten Objekte widerspiegeln. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, besteht ein Zylinder aus einer äußeren Hülle und einer Linie, die seinen Verlauf bestimmt. Beide Bestandteile sind dabei über dedizierte Punkte miteinander verbunden, um sowohl den globalen Verlauf als auch lokale Veränderungen der Zylinderoberfläche bestimmen zu können. Unter Verwendung seiner Materialeigenschaften, wie z.B. Masse und Dämpfung, läßt sich eine Deformation des Zylinders durch Anwendung von internen und externen Kräften berechnen. Die internen Kräfte ziehen dabei den Zylinder zusammen, um so zum einen die Ausgangsform wiederherzustellen, und zum anderen eine Achsensymmetrie zu gewährleisten. Die externen Kräfte deformieren den Zylinder derart, daß seine Hülle mit der Kontur eines Bildbereiches kongruent ist. Die Veränderung der beiden Komponenten wird durch Gleichung 2.1 beschrieben, wobei die internen Kräfte \mathbf{Kp} durch $\frac{\partial \xi(v)}{\partial v}$ ersetzt werden. Um die unterschiedlichen Eigenschaften der Linie und der Hülle zu simulieren, existiert die Funktion $\xi(v)$ für beide Bestandteile in unterschiedlicher Ausprägung. Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt unter Verwendung der Technik der finiten Differenzen. Die Kritikpunkte an dem Verfahren für den Einsatz in einer VR-Montagesimulation beziehen sich vorwiegend auf die Punkte *Echtzeitfähigkeit* und *Deformationskräfte*. So kann nicht entschieden werden, ob die Berechnung der Objektdeformation in Echtzeit erfolgt oder nicht. Des weiteren werden zwar Deformationskräfte berechnet, doch die Differentialgleichung wurde an das Problem der Bildrekonstruktion angepaßt. Sie geben somit keinerlei physikalische Verhaltensweisen

realer Bauteile wieder. Eine reale Belastung für den Monteur kann deshalb aus diesem Simulationsmodell nicht abgeleitet werden. Die Interaktionsmöglichkeiten des Systems müßten an die speziellen Anforderungen der Montagesimulation angepaßt werden. Der Benutzer hat bei dem bisherigen Verfahren die Möglichkeit, extern Kräfte dem System hinzuzufügen. Diese Möglichkeit muß auch bei der Montagesimulation vorhanden sein, damit der Mensch das Objekt greifen und verschieben kann. Die Ermittlung der externen Kräfte aus der Grauwertdifferenz des Bildes kann in einer Montagesimulation nicht stattfinden. An ihre Stelle müßten Kollisions- und Gravitationskräfte treten. Auf Grund der nicht sichergestellten Echtzeitfähigkeit und der physikalisch nicht korrekten Berechnung der Deformationskräfte ist der Einsatz dieses Simulationsverfahrens in einer VR-Montagesimulation nicht anzustreben.

Allgemeinere Modellierungsmöglichkeiten von Objekten werden in [12], [13] und [14] durch sogenannte „D-NURBS“ aufgezeigt. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung des klassischen NURBS² Ansatzes. Dieser ist auf Grund einer Vielzahl an Freiheitsgraden (Kontrollpunkte, Knotenvektoren und Gewichte) für eine detaillierte Gestaltung oftmals sehr komplex und wenig intuitiv. Der Grund hierfür ist in der indirekten Manipulation der Geometrie zu sehen. Diese Schwierigkeit soll durch die Verwendung von D-NURBS³ vermieden werden. Diese ermöglichen eine automatische Bestimmung der flächenbeschreibenden Parameter, wie z.B. der Kontrollpunkte und Gewichte. Hierzu gibt der Konstrukteur zunächst eine Massen- und Dämpfungsverteilung auf der Fläche vor. Durch das Hinzufügen externer Kräfte wird die zugrundeliegende Fläche anschließend unter Verwendung der Lagrangeschen Dynamik deformiert. Hierdurch wird die Erweiterung der klassischen NURBS Formel um den Parameter *Zeit* erforderlich. Man erhält somit eine Gleichung der Form:

$$\mathbf{s}(u, v, t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \mathbf{p}_{i,j}(t) w_{i,j}(t) B_{i,k}(u) B_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j}(t) B_{i,k}(u) B_{j,l}(v)} \quad (2.2)$$

Die Gewichte und Kontrollpunkte der Fläche \mathbf{p} sind nun von der Zeit abhängig und können ebenfalls mit Gleichung 2.1 berechnet werden. Hierbei wird jedoch der Ausdruck der Kraft \mathbf{f} in externe Kräfte $\mathbf{f}_{\mathbf{p}}^e(\mathbf{p})$ und interne Kräfte $\mathbf{f}^i(\mathbf{p})$ aufgeteilt. Die externe Kraft ist dabei durch folgenden Ausdruck gegeben :

$$\mathbf{f}_{\mathbf{p}}^e(\mathbf{p}) = \iint \mathbf{J}^T f(u, v, t) dudv \quad (2.3)$$

²NURBS = non-uniform rational B-Splines

³D-NURBS = dynamic non-uniform rational B-Splines

und die interne Kraft durch :

$$\mathbf{f}^i(\mathbf{p}) = \iint \mu \mathbf{J}^T \dot{\mathbf{J}} dudv \quad (2.4)$$

Wobei \mathbf{J} jeweils der Jacobi Matrix mit den Kontrollpunkten und Gewichten entspricht. Unter Verwendung des Gaußschen Quadraturverfahrens wird die obige nicht-lineare Differentialgleichung gelöst, um so die notwendigen Flächenparameter zu erhalten.

Die Verwendung des Verfahrens in einer virtuellen Umgebung kann ausgeschlossen werden, da neben der Berechnung der physikalischen Differentialgleichungen ein Konvertierungsschritt zu einem darstellbaren Dreiecksnetz erforderlich ist. Beide Aufgaben sind bei komplexeren Objekten derzeit nicht gleichzeitig in Echtzeit berechenbar.

Ein weiteres Verfahren zur Modellierung mit Hilfe von Deformationen stellt die „Free-Form-Deformation“ (Abk. FFD) dar. Hierbei wird ein dreidimensionales Gitter aus Bezier-Volumen um das zudeformierende Objekt gespannt. Jeder Objektpunkt besitzt somit eine eindeutige Parametrisierung innerhalb des Netzes. Wird das Netz verändert, so kann dies auf das zugrundeliegende Objekt übertragen werden, da man in der Lage ist, von den Gitterpunkten auf die Objektpunkte zu schließen. Die klassische FFD besitzt die Einschränkung, lediglich rechteckige Gitter verwenden zu können.

Coquillart stellt in [15] eine Erweiterung der FFD vor. Man ist dabei in der Lage, beliebige prismatische Netze zu verwenden. Diese können aus einer Toolbox entnommen oder aus vorhandenen Netzen, mit Hilfe von Übergangsbedingungen, generiert werden. Die Eigenschaft, daß jeder Objektpunkt eine eindeutige Parametrisierung im objektumrandenden Gitter besitzt, ist auch hier sichergestellt. Durch die Bewegung eines Gitterpunktes erfolgt die Deformation des zugrundeliegenden Objektes. Das Verfahren ist jedoch dadurch eingeschränkt, daß jeweils nur ein einzelner Punkt des Gitters bewegt werden darf.

Die Operationen zur Berechnung der Objektdeformation sind sehr einfach, wodurch die Echtzeitfähigkeit sicher erreicht werden kann. Die Deformation des Objektes unterliegt jedoch keinerlei physikalischen Gesetzmäßigkeiten, wodurch zum einen Deformationen erreicht werden, die physikalisch unmöglich sind und zum anderen werden keine realistischen Deformationskräfte berechnet. Hierdurch kann nicht ermittelt werden, welchen Belastungen der Monteur während der Montage ausgesetzt ist. Aus diesem Grund eignet sich dieser Ansatz nicht für den Einsatz in einer Montagesimulation.

Ein weiterer Ansatz zur Free-Form-Deformation wird in [16] vorgestellt. Der Deformationsraum wird dabei nicht mehr durch Bezier-Volumen aufgespannt, sondern durch Gitter beliebiger Topology. Die Abbildung der Objektpunkte auf die Punkte des Gitters erfolgt durch einen erweiterten Catmull-Clark Ansatz. Des weiteren erlaubt das Verfahren die gleichzeitige Bewegung mehrerer Gitterpunkte.

Für die Bewertung des Verfahrens und den Einsatz in einer Montagesimulation gilt jedoch das Gleiche wie bei [15], da es sich auch hier um ein rein geometrisches Verfahren handelt.

Andrew Witkin et al. beschreibt in [19] einen Ansatz, Objekte mit Hilfe von Kräften zu modellieren. Unabhängig von dem zugrundeliegenden geometrischen Modell werden jedem zu verändernden Objekt drei Funktionen zugeordnet. Die Funktionen geben über folgende Eigenschaften Aufschluß:

- die Position des Modells
- die Normale der Modellfläche
- eine Beziehung, ob man sich innerhalb oder außerhalb des Modells befindet

Aus diesen Funktionen wird eine Energiefunktion aufgebaut, mit deren Hilfe man die Objektparameter bestimmen kann. Die Summe aller Objektenergiefunktionen entspricht der Energiefunktion des Gesamtsystems. Mit Hilfe eines Gradientenabstiegsverfahrens wird das Minimum dieser Energiefunktion ermittelt. Hieraus leiten sich die geometriebeschreibenden Parameter der Objekte ab. Sollte sich das System in einem lokalen Minimum verfangen, so kann durch Eingreifen des Benutzers das Erreichen eines globalen Minimas sichergestellt werden.

Auch hier wird kein physikalischer Sachverhalt wiedergegeben. Es kann somit nicht sichergestellt werden, daß die mit der Montagesimulation gewonnenen Ergebnisse auf die Realität übertragbar sind. Somit ist von einem Einsatz dieses Verfahrens in einer VR-Montagesimulation abzusehen.

2.1.2 Animation mit deformierbaren Objekten

War es bei der Modellierung von Objekten noch völlig irrelevant, inwieweit die Physik des zugrundeliegenden Objektes berücksichtigt wird, so gilt dies bei der Animation von Objekten nur eingeschränkt. Zwar kommt es auch hier weniger auf die korrekte Abbildung der physikalischen Realität an, die Animation muß jedoch visuell überzeugen, d.h. sie muß dem Betrachter real erscheinen.

Ein relativ einfaches Verfahren zur Animation von Objekten wird von Metaxas und Terzopoulos in [17] vorgestellt. Die zu simulierenden Objekte setzen sich dabei aus einfachen Grundkörpern zusammen. Hierbei handelt es sich um die Grundkörper Kugel, Zylinder oder Superquadrik⁴. Die globale Deformation der Grundkörper erfolgt zunächst über ihre Geometrieparameter, wie z.B. Länge und Radius. Für die Berechnung lokaler Deformationen ist die Unterteilung

⁴Eine Quadrik besteht aus allen Punkten \mathbf{p} in einem affinen Raum \mathcal{A}^n , die eine quadratische Gleichung in der Form $Q(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T \mathbf{C} \mathbf{p} + 2\mathbf{c}^T \mathbf{p} + c = 0$ erfüllen. Sie enthält dabei alle realen und imaginären Punkte, die die obige Gleichung erfüllen. Für weitere Informationen vergleiche [43].

des Grundkörpers in mehrere Objektbereiche erforderlich. Jedem Objektbereich wird dabei eine generelle Koordinate im lokalen Koordinatensystem des Objektes zugeordnet. Dies ermöglicht die Verwendung der Lagrangeschen Mechanik zur Berechnung der lokalen Deformationen. Um sowohl elastische als auch plastische Deformation simulieren zu können, wird jedem Objektpunkt ein Referenzpunkt zugeordnet. Hierdurch ist die Objektform durch die Lage der Referenzpunkte und der Verschiebung der diskretisierten Objektpunkte bestimmt. Die Verschiebung der Objektpunkte wird dabei mit Gleichung 2.1 gelöst, wobei zu den Kräften externe Momente \mathbf{m} addiert werden. Um Constraints (Bewegungseinschränkungen) berücksichtigen zu können, die sich aus Kollisionen mehrerer deformierbarer Objekte ergeben, wird die Lagrangesche Multiplikatorenmethode angewendet. Hierbei wird davon ausgegangen, daß zu Beginn der Simulation keine Constraints wirksam sind und die Objektpunkte keine Geschwindigkeit aufweisen. Die Beschleunigung und die Lagrangeschen Multiplikatoren des nächsten Zeitschrittes ergeben sich dabei aus der bekannten Position und Geschwindigkeit des aktuellen Zeitschrittes. Die zeitliche Integration des Systems erfolgt dabei unter Verwendung der Euler rückwärts Methode in folgender Form:

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \dot{\mathbf{p}}_n + \Delta t \ddot{\mathbf{p}}_{n+1} \quad (2.5)$$

und

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \Delta t \dot{\mathbf{p}}_{n+1} \quad (2.6)$$

Die dabei auftretenden numerischen Stabilitätsprobleme werden mit der Baumgartschen Stabilisierungsmethode behoben.

Bewertet man das Verfahren für den möglichen Einsatz in einer VR-Montagesimulation, so sprechen folgende Punkte für diesen Ansatz:

- Die an den Objektpunkten wirkenden Kräfte und Momente werden berechnet. Dadurch erhält man die notwendigen Informationen über die auftretenden Belastungen für den Monteur.
- Das Verfahren ist in der Lage, sowohl Verschiebungen verschiedener Objektpunkte zu berechnen, als auch die Wirkung von Kollisionen zu bestimmen.
- Das Verfahren scheint in der Lage zu sein, Situationen wie Bewegen und Befestigen der zu montierenden Objekte zu simulieren.

Lediglich das Kriterium der *Echtzeitfähigkeit* ist nur mit starken Einschränkungen erfüllt. Bei einem Einsatz dieses Verfahrens muß gegebenenfalls ein Kompromiß zwischen der gewünschten Deformationsgenauigkeit und der Punktzahl getroffen werden. Es ist zu erwarten, daß diese auf Grund der Verwendung der Lagrangeschen Multiplikatorenmethode nicht sehr groß werden darf.

Ein völlig anderer Ansatz zur Bestimmung von Objektdeformationen wird in [18] vorgestellt. Der entscheidende Unterschied liegt in dem Aufbau der Objekte.

Ausgehend von den Punkten eines Objektskeletts werden Isopotentialflächen erzeugt. Durch die Isopotentialflächen wird die dreidimensionale Form des Objektes beschrieben. Eine Deformation der Objekte tritt auf, falls es zu einer Kollision mit anderen deformierbaren oder starren Objekten kommt. Die dabei entstehenden Kontaktflächen können mit Hilfe dieses Ansatzes korrekt berechnet werden. Dies wird erreicht, indem die Eindringtiefe und -richtung mit der Steifigkeit des Objektes in Beziehung gesetzt wird. Die Steifigkeit ergibt sich dabei aus der negativen Ableitung an einem Kollisionspunkt P auf der Objektoberfläche. Die dabei entstehenden Deformationskräfte werden im restlichen Körper verteilt. Des weiteren wird vorausgesetzt, daß die Objekte aus sehr stark gedämpftem Material bestehen, d.h. die Deformation wirkt sich nur innerhalb eines kleinen Bereiches aus. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, wird die Größe des Deformationsbereiches und der Abfall der Deformationskraft innerhalb dieses Bereiches mit Hilfe von separaten Parametern gesteuert.

Bei dem Verfahren von Gascuel handelt es sich mehr um einen heuristischen Ansatz zur Bestimmung von Objektdeformationen. Die genauen physikalischen Eigenschaften der Objekte werden kaum berücksichtigt. Dadurch kann keinerlei Rückschluß von der Simulation auf die Realität erfolgen. Dies muß aber bei dem Einsatz in einer VR-Montagesimulation sichergestellt sein.

Terzopoulos und Fleischer stellen in [20] ein System vor, mit dem man in der Lage ist, sowohl elastische als auch plastische Deformationen zu berechnen. Die Objekte können dabei zum Beispiel aus Materialien wie Schnüren, Gummi, Stoff, Papier oder flexiblem Metall bestehen. Zur Berechnung der Deformation werden zwei Verfahren vorgestellt. Der klassische Ansatz mit Hilfe der Lagrangeschen Mechanik und ein Hybrid Ansatz. Bei dem letzten Verfahren wird die undeformierte Form in einem Referenzobjekt gespeichert. Die Deformation wird lediglich durch eine Verschiebung einzelner Objektpunkte angegeben. Soll nun eine plastische Deformation berechnet werden, so wirkt sich die Deformation nicht mehr ausschließlich auf die Objektpunkte aus, sondern beeinflußt auch die relevanten Referenzpunkte. Es ergibt sich somit ein neuer undeformierter Zustand, zu dem die einzelnen Objektpunkte zurückkehren. Der Algorithmus zur Bestimmung der Deformation gliedert sich dazu in die folgenden drei Punkte:

1. Diskretisierung der Differentialgleichungen in den Materialkoordinaten des Objektes
2. Integration der diskretisierten Differentialgleichungen nach der Zeit
3. Lösung des spärlich besetzten linearen Gleichungssystems mit einer Choleski-Zerlegung für kleinere Systeme oder mit einem konjugierten Gradienten Verfahren oder einer alternierenden impliziten Richtungsmethode für größere Systeme

Das Verfahren der Lagrangeschen Mechanik eignet sich dabei besser für Objekte mit geringerer Steifigkeit. Der hybride Ansatz liefert hingegen bessere Ergebnisse für Objekte mit einer höheren Steifigkeit.

Betrachtet man reale Bauteile, die bei einer Montage von Interesse sind, so zeichnen sie sich durch ihre relativ große Steifigkeit aus. Dies verhindert den Einsatz der klassischen Lagrangeschen Mechanik. Die Verwendung des hybriden Ansatzes legt jedoch eine Obergrenze der Objektpunkte fest, die in Echtzeit berechnet werden können. Wird der vorgestellte Ansatz um nichtlineare Faktoren wie z.B. Kollisionen erweitert, so gelangt man zu einem ähnlichen Verfahren, wie es bereits in [17] vorgestellt worden ist. Das Kriterium der *Echtzeitfähigkeit* bleibt somit auch hierbei ein Faktor, der den Einsatz in einer VR-Montagesimulation ausschließen kann.

Ein sehr schneller Ansatz zur Simulation von physikalischen Systemen wird von Grzeszcuk et al. in [22] vorgestellt. Die Simulationsergebnisse von physikalischen Systemen werden hierbei durch ein neuronales Netz approximiert. Hierdurch gelangt man zu einer wesentlich schnelleren Simulation, da das neuronale Netz mehrere Zeitintegrationsschritte⁵ des physikalischen Systems in einem Schritt ausführen kann. Das neuronale Netz wird hierfür zunächst mit einigen Simulationsbeispielen des physikalischen Systems unter Verwendung des Backpropagation Algorithmus trainiert. Dieser Vorgang kann mehrere CPU Stunden dauern. Nach der Trainingsphase verallgemeinert das Netz von den erlernten Beispielen auf beliebige Eingabewerte. Um eine Konvergenz des Systems sicherzustellen, werden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Das Netz lernt lediglich die Veränderungen in den Eingaben.
- Die Eingaben werden in das Einheitsintervall transformiert und skaliert.
- Es wird eine Hierarchie von neuronalen Netzen aufgebaut. Jedes Netz beschreibt einen Teil des physikalischen Systems.

Dauert die Animation länger als einige hundert Bilder, so kann sich der Approximationsfehler aufsummieren. Hierdurch weicht das Simulationsergebnis stark von dem realen Verhalten des Systems ab. Durch die Einführung von mehreren Korrekturschritten anhand des physikalischen Systems kann eine korrekte Animation auch über einen längeren Zeitraum sichergestellt werden. Auf Grund der unterschiedlichen Rechenzeiten der beiden Systeme muß auf sehr einfache Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden, um das schnellere neuronale Netz nicht unnötig zu verlangsamen. In dem vorgestellten Verfahren wird dies durch Verwendung der Euler Methode zur Integration der zugrundeliegenden Differentialgleichung erreicht.

⁵In dem vorliegenden Artikel entspricht ein Simulationsschritt des neuronalen Netzes in etwa 50 Simulationsschritte des physikalischen Systems.

Der entscheidende Grund, von der Verwendung dieses Ansatzes abzusehen, ist die Beibehaltung des zugrundeliegenden physikalischen Systems. Man ist somit gezwungen zwei Verfahren zu implementieren, um ihre gegenseitigen Schwächen zu minimieren. Aus Komplexitätsgründen sollte jedoch ein einziges Verfahren angestrebt werden, das den Anforderungen der VR-Montagesimulation gerecht wird.

Ein großes Forschungsgebiet für die Simulation von deformierbaren Objekten stellt die Animation von Stoffen und Kleidungsstücken dar. Wichtige Arbeiten sind hier von Nadia Thalmann und Pascal Volino geleistet worden [22], [23], [24], [25] und [26]. Es handelt sich dabei weitestgehend um Feder-Masse Systeme, mit deren Hilfe die Deformation des Textiles berechnet wird. Der Stoff wird dabei durch Dreiecke diskretisiert. Seine Masse konzentriert sich dabei in den Knotenpunkten der Dreiecke. Die Kanten entsprechen Feder-Elementen, die eine Bestimmung der Deformation ermöglichen. Lediglich die in [25] und [26] vorgestellten Verfahren erlauben dabei die Berechnung der Stoffdeformation in Echtzeit. Die Simulation von Stoffen und Textilien ist so komplex, daß bei den obigen Verfahren mehr Gewicht auf die visuelle als auf die physikalische Korrektheit gelegt wurde. Darüber hinaus sind Stoffe bei der Montage in einem Automobil ohne Bedeutung, so daß die für die Simulation von Stoffen optimierten Verfahren keine Relevanz für eine Montagesimulation besitzen.

Ein weiterer effizienter Ansatz zur Simulation von Stoffen wird in [27] gegeben. Der Stoff wird hier zunächst durch mehrere Dreiecke diskretisiert, wobei ihre Eckpunkte den Massepunkten des Stoffes entsprechen. Aus dem Newtonschen Gesetz $\ddot{\mathbf{p}} = \frac{\mathbf{f}_i}{\mathbf{m}_i}$ wird mit Hilfe der Euler Methode die Geschwindigkeit und die neue Position der Knoten berechnet. Die Simulation von Biegungen, Scherungen oder Kollisionen erfolgt über zusätzliche Energiefunktionen, die eine Kräfteverteilung innerhalb des Stoffes gewährleisten. Durch die einfache Integrationsformel und die Verwendung einfacher Energieverteilungsfunktionen ist das Verfahren in der Lage, Stoffe mit maximal 300 Masseknoten in Echtzeit zu simulieren. Von der Verwendung dieses Simulationsverfahrens ist aus den bereits für die Artikel [22] etc. genannten Gründen abzusehen.

David Baraff et al. zeigt in [28] ein Verfahren zur Vermeidung von Durchdringungen bei flexiblen Objekten. Die Deformation der Körper wird dabei als Funktion beschrieben, die die Objektpunkte aus einer Referenzlage in den deformierten Zustand überführt. Für die Bewegung des Körpers wird davon ausgegangen, daß die Beschleunigung für einen idealen Körper ⁶ nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grund wird versucht, den Fehler zu dem idealen Körper zu

⁶Für einen idealen Körper gilt die Newtonsche Gleichung: $\mathbf{f} = m \cdot \mathbf{a}$

minimieren. Das Fehlermaß wird dabei durch die Formel 2.7 berechnet.

$$E = \frac{1}{2} \int \varrho(\mathbf{p}) |\dot{\mathbf{p}}(\mathbf{p}) - \mathbf{f}(\mathbf{p}) \varrho(\mathbf{p})|^2 dV \quad (2.7)$$

Um die Kollision auf möglichst effiziente Weise aufzulösen, werden die Objekte geeignet diskretisiert. Unter der Annahme, daß nur endlich viele Punkte den jeweils anderen Körper durchdringen, ist eine Verschiebung dieser Punkte ausreichend, um die Kollision aufzulösen. Trifft ein Objektpunkt während der Kollision auf einen anderen Körper, so erfährt dieser Punkt im ersten Schritt einen Impuls, um ein weiteres Eindringen zu verhindern. Der Impuls bewirkt eine plötzliche Geschwindigkeitsänderung an der Kontaktstelle. Für einen idealen Körper gilt, daß nur der Kontaktpunkt eine Geschwindigkeitsänderung erfährt. Da von einem nicht idealen Körper ausgegangen wird, muß versucht werden, die Geschwindigkeitsdifferenzen in den Objektpunkten zum idealen Körper zu minimieren. Dies erfordert die Verwendung der folgenden Fehlerfunktion:

$$E' = \frac{1}{2} \int \varrho(\mathbf{p}) |\Delta \dot{\mathbf{p}}(\mathbf{p})|^2 dV \quad (2.8)$$

Ein Impuls dauert in der Regel nur eine unendliche kurze Zeit. Um eine Deformation des flexiblen Körpers bei einer längeren Kollision zu erzielen, wird nach dem Impuls eine Kontaktkraft berechnet. Sie stellt eine Beziehung zwischen dem Maß der Durchdringung und den wirkenden Kräften her. Hierdurch werden drei Ziele erreicht:

- Die weitere Durchdringung der Objekte wird verhindert.
- Ein Kontakt über einen endlichen Zeitraum wird sichergestellt.
- Das flexible Objekt wird durch die Kräfte deformiert.

Die Verwendung von Impulsen besitzt die Einschränkung, daß mehrere Kollisionenpunkte nicht gleichzeitig berechnet werden können. Durchdringen mehrere Punkte ein anderes Objekt, so muß jeder Punkt sequentiell der obigen Prozedur unterzogen werden.

Das vorgestellte Verfahren erlaubt lediglich die Berechnung von Deformationen, die sich aus Kollisionen ergeben. Während einer Montage ergeben sich aber Deformationen auch aus Gravitationseinflüssen oder Massenträgheiten. Somit wäre die Verwendung zwei verschiedener Verfahren notwendig. Dies sollte aber möglichst vermieden werden.

2.1.3 Ansätze der Robotik

Im Gegensatz zu den Verfahren aus den Themengebieten *Modellierung* und *Animation* wird bei den Verfahren aus dem Anwendungsgebiet der Robotik wesent-

lich mehr Gewicht auf die physikalisch korrekte Simulation gelegt. Dies ist notwendig, da hier eine Übertragung der gewonnenen Simulationsergebnisse auf die Realität angestrebt wird.

Ein sehr einfaches Beispiel für die Simulation von deformierbaren Objekten wird in [29] gegeben. Es handelt sich dabei um einen gummierten Roboterendeffektor. Dieser besteht aus einem Metallstift, der eine Hülle aus Gummi besitzt. Untersucht wird die sich einstellende Deformation bei einer Kollision zwischen dem Endeffektor und einer Ebene. Um diese Aufgabe zu lösen, erfolgt zunächst eine Diskretisierung der Gummihülle durch ein Feder-Masse Netz. Dabei besitzen alle Punkte des Netzes die gleiche Masse und alle Federelemente die gleiche Steifigkeit und Dämpfung. Um die Eigenschaften des Gummis zufriedenstellend simulieren zu können, ist ein spezieller Aufbau des Netzes erforderlich. So werden einige Federn mit dem Masseknoten des starren Grundkörpers und jeder Masseknoten innerhalb der Gummihülle mit seinen 26 engsten Nachbarknoten verbunden. Um die Vielzahl der Federelemente berechnen zu können, wird die Bewegung der Masseknoten mit der sehr einfachen Newton Gleichung $\mathbf{f} = m \cdot \mathbf{a}$ beschrieben. Die Integration dieser Beziehung erfolgt ebenfalls über das sehr einfache Euler-Verfahren. Durchdringt im Laufe der Simulation ein Massepunkt die Ebene, so wird er auf die Ebene projiziert und dort festgeklebt. Dies entspricht einer unendlich großen Reibung. Durch die Verkürzung seiner Federn stellt sich somit eine Deformation des übrigen Netzes ein.

Auf Grund der großen Anzahl der Verbindungsfedern ist das Verfahren nur bei wenigen Masseknoten in der Lage, die Deformation in Echtzeit zu berechnen. Des weiteren erschwert das sehr einfache Integrationsverfahren die Portierung der gewonnenen Ergebnisse auf die Realität, da sich die Ergebnisse nach einer längeren Simulationsdauer zum Teil erheblich von der Realität unterscheiden.

Christian Laugier et al. stellen in [30] ein weitaus besseres Verfahren zur Simulation deformierbarer Objekte vor. Die Objekte werden hier durch Partikel beschrieben, die über Verbindungselemente miteinander verbunden sind. Die Diskretisierung der Objekte erfolgt durch einen automatischen Ansatz, bei dem das Objekt in Tetraheder unterteilt wird, wobei diese gleiche Trägheitseigenschaften besitzen müssen. Je feiner diese Diskretisierung erfolgt, desto flexibler verhält sich das Objekt. Bei den Verbindungselementen kann es sich um die folgenden drei Arten handeln:

1. ein Feder-Dämpfer Element
2. ein Torsionselement, bei dem ein fester Winkel zwischen drei Punkten angestrebt wird
3. ein Scharnierelement, wobei zwei Punkte eine Rotationsachse vorgeben, und zwei weitere Punkte um diese rotieren

Die Bewegung der einzelnen Partikel ergibt sich aus der Newtonschen Gleichung. Die Integration dieses Ausdrucks liefert so die Geschwindigkeit und Position der Partikel. Die numerische Lösung erfolgt dazu durch das explizite Euler vorwärts Verfahren :

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \dot{\mathbf{p}}_n + \Delta t \ddot{\mathbf{p}}_n + O\left(\frac{\Delta t^2}{2} \dot{\mathbf{a}}_n\right) \quad (2.9)$$

und

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \Delta t \dot{\mathbf{p}}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{p}}_n + O\left(\frac{\Delta t^3}{6} \dot{\mathbf{a}}_n\right) \quad (2.10)$$

Um die Stabilität des Systems sicherzustellen, wird die Zeitschrittweite dynamisch angepaßt. Hierbei geht man von folgender Überlegung aus. Die mechanische Energie setzt sich aus der kinetischen und der potentiellen Energie zusammen. Ihr Niveau bestimmt die notwendige Zeitschrittweite. Erfährt das System keine äußere Anregung, so bleibt die Energie erhalten. Tritt Reibung zwischen zwei Objekten auf, so nimmt die Energie ab. Bei einer Kollision erhöht sich das interne Energieniveau. Überschreitet das Energieniveau innerhalb der bisherigen Zeitschrittweite einen Schwellwert, so wird die Zeitschrittweite verringert und die Berechnung von neuem gestartet. Nimmt die Energie ab, so kann die Zeitschrittweite erhöht werden. Durch diese Maßnahme erreicht man ein stabiles Simulationsverhalten. Trotz der adaptiven Zeitschrittweite ist das System dank einer Komplexität von $O(n)$ in der Lage, maximal 200 Partikel in Echtzeit zu simulieren. Hierbei handelt es sich um eine Roboterhand, die einen Gummiball greifen und halten muß.

In Verbindung mit der Penalty-Methode aus Artikel [31] erscheint dieses Verfahren für den Einsatz in einer VR-Montagesimulation geeignet zu sein. Es ist echtzeitfähig und in der Lage, sowohl Kollisionen als auch Deformationen aus Massenträgheiten zu berechnen. Außerdem kann der Benutzer mit dem Modell beliebig interagieren. Darüber hinaus werden die notwendigen Belastungen für den Monteur anhand der wirkenden Kräfte berechnet.

Joukhadar und Laugier vergleichen in [31] zwei Modelle zur Behandlung von Kollisionen in der Simulation von dynamischen Systemen. Eine Möglichkeit Kollisionen physikalisch zu simulieren, ist die Verwendung des Impulsansatzes. Hierbei wird davon ausgegangen, daß die Kollision nur eine sehr kurze Zeitspanne andauert. Eine weitere Durchdringung der beiden Objekte wird vermieden, indem die Geschwindigkeit und Beschleunigung so angepaßt werden, daß sich die beiden Objekte anschließend voneinander entfernen. Auf Grund der sehr kurzen Kontaktdauer ist die Berücksichtigung von Reibung enorm schwierig. Das Verfahren eignet sich vorwiegend für sehr starre Objekte, da die kurze Kontaktdauer die Bestimmung lokaler Deformationen nicht gestattet. Die zweite Möglichkeit, Kollisionen zu simulieren, ist die Verwendung der Penalty Methode. Hierbei wird davon ausgegangen, daß die Deformationen und Kollisionskräfte der beiden Objekte proportional zu der Eindringtiefe sind. Eine Feder drückt nun die betroffenen Objektbereiche auseinander, wobei der Kontakt der beiden Objekte über

einen längeren Zeitraum bestehen bleibt. Hierdurch wird die Simulation von Reibung und die Bestimmung lokaler Deformationen ermöglicht. Deshalb eignet sich die Penalty Methode sehr gut für den Einsatz bei flexiblen Objekten. Im Gegensatz zu der Impulsmethode weist sie jedoch eine höhere Rechenzeit auf und ist instabiler, da die numerische Integration von einer Zeitkonstanten abhängt. Die Penalty Methode ist aber wesentlich leichter zu implementieren und, wie in [30] gezeigt wurde, kann die Stabilität durch die Verwendung einer adaptiven Zeitschrittweite erhöht werden.

Betrachtet man die für die Montagesimulation interessanten Bauteile in einem Fahrzeug, so handelt es sich vorwiegend um flexible Objekte. Dies motiviert, trotz der höheren Rechenzeit, den Einsatz der Penalty Methode. Da aber in [31] lediglich Kollisionen behandelt werden, muß zusätzlich ein Verfahren gefunden werden, daß die Simulation von Gravitation und Massenträgheiten ermöglicht.

2.1.4 Ansätze in der virtuellen Realität

In [21] stellt Frau Hergenröther zwei Ansätze vor, um innerhalb einer virtuellen Umgebung deformierbare Objekte zu simulieren. Dabei wird das Ziel der Volumenerhaltung verfolgt, da dieser Aspekt bei der Simulation technischer Bauteile eine große Rolle spielt. Die zu simulierenden Objekte werden zunächst durch ein Feder-Masse Netz ersetzt. Die Masse des Objektes wird auf alle Knoten gleichmäßig verteilt und alle Federn weisen eine gleiche Federsteifigkeit auf. Zur weiteren Vereinfachung werden die Objekte durch ein gleichmäßiges Gitter angenähert. Hierdurch können Probleme bei Körpern mit einer komplexen Geometrie entstehen, da ihre Form unter Umständen nicht sehr genau approximiert wird. Die Lösung der Differentialgleichungen erfolgt mit Hilfe der Technik der finiten Differenzen. Um auch für Systeme mit einer höheren Steifigkeit eine Echtzeitfähigkeit zu erzielen, ist die Verwendung eines der folgenden Verfahren erforderlich.

Bei dem ersten Ansatz handelt es sich um ein sogenanntes „Mehrgitter“ Verfahren. Das Objekt besitzt dabei mehrere Gitter mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Die externen Kräfte werden zunächst mit dem feinsten Gitter simuliert. Nach wenigen Simulationsschritten wird das Ergebnis auf das nächst gröbere Gitter übertragen. Dies erfolgt solange, bis das größte Gitter erreicht ist. Auf dieser Ebene wird die Simulation fortgesetzt, bis eine Konvergenz der Deformation erreicht ist. Anschließend erfolgt die Transformation des Ergebnisses auf die feineren Gitter. In jeder Detaillierungsstufe wird das Feder-Masse Netz solange berechnet, bis sich eine Konvergenz einstellt. Durch Verwendung dieses Verfahrens wird die externe Kraft wesentlich schneller im Gitter verteilt. Dadurch ergibt sich ein deutlicher Zeitvorteil gegenüber klassischen Verfahren, da mit größeren Integrationsschrittweiten gerechnet werden kann. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für Objekte, die mit einer Vielzahl an Massepunkten beschrieben sind. Es bleibt jedoch zu bemerken, daß dieses Verfahren nicht echt-

zeitfähig ist und somit für den Einsatz in einer VR-Umgebung ausscheiden muß. Das zweite Verfahren wird als sogenanntes „Wellenverfahren“ bezeichnet. Wird festgestellt, daß die externe Kraft die Anordnung des Netzes zerstört, d.h. ein Knoten wird über ein bestimmtes Maß hinaus ausgelenkt, so wird die Kraft auf die benachbarten Knoten verteilt. Dies erfolgt heuristisch, wobei die Kraft am Ursprungsknoten dezimiert wird. Die Verschiebung der dabei betroffenen Knoten wird anschließend berechnet. Sollten auch sie zu weit ausgelenkt werden, so wird ihre Eingangskraft ebenfalls verringert und auf die Nachbarknoten verteilt. Liegen alle Verschiebungen innerhalb der Toleranzschwelle oder ist die äußere Hülle des Objektes erreicht, so erfolgt die Berechnung des gesamten Gitters. Hierbei werden alle Massen mit der vorgegebenen Schrittweite simuliert. Der Vorteil liegt in der möglichen Verwendung einer höheren Integrationsschrittweite bei einer recht guten Stabilität. Das Verfahren besitzt jedoch zwei große Nachteile:

1. Die Verteilung der Kraft innerhalb des Netzes funktioniert nur im undefor-mierten Netz, d.h. es können nur statische Lastfälle betrachtet werden.
2. Innerhalb von [21] durchgeführte Tests des Verfahrens auf einer SGI Onyx mit einem 200Mhz R10000⁷ Prozessor zeigen, daß mit 729 Masseknoten eine Bildrate von 11 Bildern pro Sekunde erreicht werden kann. Bei einer größeren Anzahl ist die Echtzeitfähigkeit nicht mehr gewährleistet.

Sind mehrere Objekte an der Simulation beteiligt, so verringert sich entweder die erreichbare Bildrate oder die Anzahl der zu verwendenden Objektpunkte. Aus diesem Grund erscheint der vorgestellte Ansatz für die Montagesimulation als ungeeignet.

Das häufigste Einsatzgebiet für flexible Objekte in der virtuellen Realität ist die Simulation der Minimalinvasiven Chirurgie. Hierbei wird das dynamische Verhalten der menschlichen Organe simuliert. Diese zeichnen sich, im Gegensatz zu technischen Objekten, durch eine sehr geringe Steifigkeit aus. Dies erhöht die Stabilität der Simulation und ermöglicht die Verwendung größerer Integrations-schrittweiten.

Ein Ansatz zur Simulation menschlicher Organe wird in [32] vorgestellt. Das menschliche Organ wird durch ein Feder-Masse Netz diskretisiert. Die Simulation dieses Netzes erfolgt mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy Ansatzes. Die Federelemente werden dabei durch vier Eingabeneuronen und einem Ausgabeneuron beschrieben. Für die Berechnung eines Masseknotens ist die Verwendung eines dreischich-tigen Netzes, wobei jede Schicht ein Neuron enthält, erforderlich. Aus diesen Sub-netzen wird das komplette neuronale Netz zusammengestellt, um die Dynamik des gesamten Organs zu simulieren. Bevor das Organ simuliert werden kann,

⁷Ein heutiger PC mit einer Taktfrequenz von 1GHz ist nahezu doppelt so schnell, jedoch besteht dort das Problem einer mangelnden grafischen Ausgabequalität und -geschwindigkeit.

ist das Training des neuronalen Netzes erforderlich. Dies erfolgt durch die Verwendung des Backpropagation Algorithmus. Als Eingaben können dabei sowohl Messungen der realen Organe als auch Simulationsergebnisse eines physikalischen Systems verwendet werden. Sollte das Ergebnis nicht zufriedenstellend ausfallen, so kann man die internen Parameter durch a priori Wissen verändern. Hierfür steht ein Fuzzy System zur Verfügung, das aus dem linguistischen Wissen die entsprechenden Netzparameter ableitet. Um die Stabilität des Systems sicherzustellen, verwendet auch dieses Verfahren eine adaptive Zeitschrittweite. Sollte die Differenz zwischen der Kraft aus dem vorherigen Zeitschritt und des aktuellen Zeitschrittes einen Schwellwert überschreiten, so wird die Eingangskraft verringert und die Simulation startet erneut. Dies wird solange wiederholt, bis die ursprüngliche Kraft erreicht ist.

Das System ist auf Grund des einfachen Netzaufbaus in der Lage, menschliche Organe in Echtzeit zu simulieren. Die Interaktionsmöglichkeiten sind dabei recht umfangreich⁸. Es zeigte sich jedoch an einem Beispiel, daß technische Objekte nur sehr unzureichend mit diesem Ansatz simuliert werden können. Auf Grund ihrer höheren Steifigkeit kommt es zu Schwingungen, die das System trotz der adaptiven Zeitschrittweite instabil werden lassen.

Ein weiterer Ansatz zur Simulation von menschlichem Gewebe wird von Herrn Kuhn in [33] und [34] vorgestellt. Auch hier werden die Objekte durch Feder-Masse Netze approximiert. Die dynamische Simulation des Netzes erfolgt dabei unter Anwendung der Differentialgleichung eines gedämpften Feder-Masse Schwingers, dessen Bewegung sich ebenfalls mit Gleichung 2.1 berechnen läßt. Um sowohl lokale Deformationen, als auch Starrkörperbewegungen simulieren zu können, ist das Feder-Masse Netz in drei Schichten angeordnet. Die äußere Schicht entspricht der Oberfläche des Objektes. Sie besitzt ein vollkommen elastisches Verhalten und dient zur Simulation lokaler Eindrückungen. Die Knoten der zweiten Schicht sind mit einem oder mehreren Knoten der äußeren Schicht verbunden. Sie bestimmen die Referenzlage der äußeren Knoten. Eine Verschiebung der Knoten dieser Schicht bewirkt eine plastische Deformation. Die dritte Schicht besteht lediglich aus einem einzigen Knoten, der mit den Knoten der zweiten und ersten Schicht verbunden ist. Mit Hilfe dieses Zentralknotens kann die Starrkörperbewegung des gesamten Organs simuliert werden. Die dynamische Simulation der obigen Differentialgleichung erfolgt unter Verwendung des Euler-Verfahrens mit impliziter Dämpfung⁹. Die internen Netzparameter, wie Federsteifigkeit, Dämpfung und Integrationsschrittweite, werden durch Anwendung von Referenzanregungen und einem Optimierungsverfahren bestimmt. Ein interaktives Finetuning bleibt jedoch erforderlich, um realistische Ergebnisse zu

⁸Sie reichen von einfachen Bewegungen, über Kollisionen bis hin zu Schnitten

⁹ $\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \frac{1}{1+\frac{d\Delta t}{m}}(\dot{\mathbf{p}}_n + \frac{\Delta t}{m}(\mathbf{f}_{A,n+1}^e + \mathbf{f}_{n+1}^i(\mathbf{p}_n, \dot{\mathbf{p}}_n)))$ und $\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \mathbf{B} \cdot \Delta t \cdot \dot{\mathbf{p}}_n$. Wobei d der Dämpfung, Δt der Integrationsschrittweite, m der Masse des Knotens, \mathbf{f}^e der externen Kräfte, \mathbf{f}^i der internen Kräfte und \mathbf{B} einer Beschränkungsmatrix für die Geschwindigkeit entspricht.

erzielen. Bei der vorgestellten Anwendung einer Gallenblasenoperation ist das System in der Lage, maximal 400 Masseknoten bei einer Bildrate von 10 Bildern pro Sekunde zu simulieren.

Auch hier zeigten Tests [46], daß Objekte mit einer höheren Steifigkeit nicht in Echtzeit simuliert werden können. Aus diesem Grund muß nach einer anderen Möglichkeit der Objektsimulation gesucht werden.

2.2 VR-Montagesimulation

Die Mensch-Maschine Schnittstelle der virtuellen Realität hat in den letzten Jahren eine enorme Entwicklung erfahren. Hierdurch taten sich immer neue Anwendungsfelder auf. So wurde auch die Montagesimulation in einer virtuellen Umgebung ermöglicht, um dadurch zu versuchen, physikalische Prototypen einzusparen. Aus diesem Grund entstanden in den letzten Jahren einige Montagesimulationen, die die Technik der virtuellen Realität nutzen.

Auf Grund der Echtzeitanforderung simulieren die meisten Systeme [6], [7], [8], [9], [35], [37] und [38] lediglich die geometrischen Randbedingungen der Montage. Physikalische Eigenschaften der Objekte, wie Gewicht, Reibung oder Deformationseigenschaften bleiben gänzlich unberücksichtigt. Nur das System [36] ist in der Lage, Kräfte und Momente bei der Montage von starren Objekten zu simulieren. Wird ein Objekt gegriffen, so werden mehrere Federelemente zwischen dem Objekt und der virtuellen Hand eingefügt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Schwerkraft, der Massenträgheit und der Objektmomente. Auftretende Kollisionen werden ebenfalls mit Hilfe von Federelemente berechnet. Trotz des sehr einfachen Ansatzes kann lediglich die Montage von stark vereinfachten Objekten simuliert werden. Die Komplexität von Bauteilen aus einem Fahrzeug würde hier die Echtzeitberechnung sprengen.

Aus dem Mangel derzeitiger Systeme flexible Bauteile, wie z.B. Kabel und Schläuche, bei der Montage zu berücksichtigen, leitet sich das Ziel dieser Arbeit ab, ein geeignetes Simulationsverfahren zu entwickeln, das in einer VR-Montagesimulation eingesetzt werden kann.

2.3 Zusammenfassung

Die Vorstellung der verschiedenen Simulationsansätze für flexible Objekte zeigt, daß die Anwendungsbandbreite zwar sehr groß ist, aber die wenigsten einen Rückschluß auf die Realität erlauben. Die physikalisch motivierten Differentialgleichungen dienen oftmals nur als Mittel zum Zweck, und werden selten dazu verwendet, die physikalischen Eigenschaften eines konkreten Objektes abzubilden. Diese Tatsache trifft vor allem auf die Ansätze aus den Themengebieten *Modellierung* und *Animation* zu. Diese Verfahren sind entweder zu langsam oder vereinfach-

chen zu sehr, wodurch der Einsatz in der Montagesimulation ausgeschlossen ist. Die Algorithmen aus dem Themengebiet der *virtuellen Realität* sind derzeit vorwiegend auf die Simulation von organischem Gewebe spezialisiert. Diese zeichnen sich durch ihre geringe Steifigkeit aus, wodurch die Verwendung großer Integrationsschrittweiten möglich ist. Des weiteren existiert kein Verfahren, lebendes Gewebe meßtechnisch zu erfassen. Die Simulation bedarf deshalb nicht der Wiedergabe konkreter Materialeigenschaften, sondern muß vorwiegend den Operateur visuell überzeugen. Die höhere Steifigkeit technischer Objekte erfordert die Verwendung kleinerer Integrationsschrittweiten, wodurch die vorgestellten Verfahren an den Rand der Echtzeitfähigkeit gelangen. Verfahren wie das Wellen-Verfahren versuchen diesen Sachverhalt zu umgehen, jedoch kann die heuristische Verteilung der Eingangskraft eine Übertragung der erzielten Simulationsergebnisse auf die Realität erschweren. Lediglich einige Ansätze aus dem Gebiet der *Robotik* erscheinen für den Einsatz in einer virtuellen Umgebung geeignet. Sie sind schnell genug und ermöglichen den Transfer der Ergebnisse auf die Realität. Zu untersuchen bleibt, ob die Bauteile eines Automobils die Verwendung dieser Simulationsansätze erfordern, oder ob geeignete Vereinfachungen vorgenommen werden können, um sowohl die Simulationsanforderungen als auch die Echtzeitfähigkeit in jedem Fall garantieren zu können.

Eine Betrachtung der vorhandenen Arbeiten zu dem Thema der Montageuntersuchungen, unter Verwendung der Mensch-Maschine Schnittstelle der virtuellen Realität, zeigt, daß der Aspekt der flexiblen Bauteile bislang unberücksichtigt bleibt. Diese Lücke muß aber geschlossen werden, da sich zum Beispiel in einem Vorderwagen¹⁰ eine Vielzahl an Versorgungsleitungen befindet. Diese müssen entweder ausgetauscht oder gelöst werden, um ein anderes Bauteil an seinen Einbauort zu bringen. Erst durch ihre Integration können gesicherte Erkenntnisse über Einbaureihenfolge und Montagewege gewonnen werden.

¹⁰Unter dem Begriff *Vorderwagen* ist der Motorraum eines Fahrzeuges zu verstehen. Dieser erstreckt sich zwischen den seitlichen Kotflügeln, dem vorderen Kühlergrill und der Instrumententafel des Fahrgastraumes.

Kapitel 3

Simulationsanforderungen

Bevor ein Simulationsverfahren abschließend ausgewählt werden kann, müssen die einzuhaltenden Randbedingungen genauer analysiert werden. Entscheidende Einflußfaktoren stellen dabei die zu simulierenden Objekte und die mit ihnen durchzuführenden Tätigkeiten dar. Aus diesem Grund muß untersucht werden, welche flexiblen Bauteile es innerhalb eines Fahrzeuges gibt. Darauf basierend kann eine Analyse der Objekteigenschaften erfolgen. Des weiteren muß festgelegt werden, welche manuellen Arbeitsschritte bei einer Montage mit diesen Objekten ausgeführt werden. Hieraus soll abschließend ein Anforderungskatalog an das gesuchte Simulationsverfahren erstellt werden.

3.1 Analyse flexibler Bauteile im Fahrzeug

Zunächst muß untersucht werden, welche flexiblen Bauteile innerhalb eines Fahrzeuges vorkommen. Diese Objekte müssen auf ihre Relevanz bei Montagen der Serienfertigung, der Wartung und des Recyclings geprüft werden. Zur besseren Handhabung des Systems wäre die Existenz einer Bauteilbibliothek wünschenswert. Aus diesem Grund wird nach Mitteln gesucht, die spezifizierten Bauteile geeignet zu klassifizieren.

3.1.1 Bestimmung und Auswahl flexibler Bauteile

Wie bereits erwähnt, stellen die zu simulierenden Objekte ein wesentliches Auswahlkriterium für das gesuchte Simulationsverfahren dar. Es soll nun ermittelt werden, welche flexiblen Bauteile innerhalb eines Fahrzeuges auftreten, um hieraus die resultierenden Objekteigenschaften abzuleiten.

Möchte man den Bauteilumfang eines Fahrzeuges oder einer Fahrzeugklasse bestimmen, so kann man sich des Hilfsmittels einer Stückliste bedienen. Sie stellt die Liste aller verbauten Einzelteile dar, angefangen von einzelnen Schrauben bis hin zu kompletten Seitenblechen. Jedes einzelne Bauteil ist in der Liste durch

seine Bauteilnummer gekennzeichnet. Möchte man hierzu erfahren, welche Objekte sich hinter den Nummern verbergen, so ist man gezwungen, mit Hilfe dieser Kennziffer eine Datenbank zu konsultieren. Hieraus erhält man schließlich das entsprechende Bauteil. Dieser Weg ist mit hohem Aufwand verbunden, da die Listen einen Umfang von mehr als 100 DIN A4 Seiten besitzen. Aus diesem Grund beschränkt sich die Ermittlung der notwendigen Bauteile innerhalb dieser Arbeit auf Mitarbeiterbefragungen und der Auswertung der Arbeiten [39], [40] und [58]. Hieraus ergibt sich eine Bauteilmenge entsprechend Tabelle 3.1.

Name der Bauteilkategorie	Bauteile	Material
Kraftstoffleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Benzinleitung 	<ul style="list-style-type: none"> • meist Polyamide oder • Ethylenoxid-Chlorepoxypropan-Elastomer
Luftleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Luftleitung zum Motor • Luftleitung in den Fahrgastraum 	<ul style="list-style-type: none"> • mit Textilien ummantelte Metallspirale • Duroplaste
Steuerleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Unterdruckbremskraftverstärkerleitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamide
Bremsleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulikbremsleitungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomere Innen meist Styrol-Butadien-Kautschuk Aussen meist Chlorbutadien Elastomere mit einer Reyon Gewebeeinlage
elektrische Leitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Zündleitungen • Lautsprecherkabel, etc. 	meist mit PVC ummantelter Metalldraht
Klimaleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Schlauch zum Transport von Kältemitteln der Klimaanlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomere Schlauch
Kühlwasser-Leitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlwasserschläuche 	<ul style="list-style-type: none"> • EPDM Elastomere mit Gewebeeinlage meist Reyon
Bowdenzüge	<ul style="list-style-type: none"> • Gaszug • Kupplungszug, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plastik Hülle mit eingefädelttem Stahldraht
Dichtungen	<ul style="list-style-type: none"> • Tür-, Fenster- oder Klappendichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomere meist EPDM
Peilstäbe	<ul style="list-style-type: none"> • Ölmeßstab 	<ul style="list-style-type: none"> • Metall
Transmissionsriemen	<ul style="list-style-type: none"> • Keilriemen • Zahnriemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomere mit Gewebeversteifung

Tabelle 3.1: Liste flexibler Bauteile

Es wird ersichtlich, daß es sich bei dem Großteil der aufgelisteten Bauteile um Leitungsobjekte¹ handelt. Lediglich die Bauteile der Dichtungen, der Peilstäbe und der Transmissionsriemen zählen nicht zu dieser Kategorie. Die Dichtungen bleiben bei den folgenden Untersuchungen unberücksichtigt, da es sich gezeigt hat, daß sie bei der Serienfertigung und dem Recycling nur ein geringes Problempotential besitzen. Bei Wartungstätigkeiten haben diese Bauteile keinerlei Bedeutung. Aus den Mitarbeiterbefragungen geht hervor, daß Transmissionsriemen montiert werden, indem sie mit Hilfe von Spezialwerkzeug auf die Laufräder gespannt werden. Hierzu werden die Räder gelöst, um so den Riemen abnehmen oder aufsetzen zu können. Die Probleme, die bei einer solchen Montage auftreten, stehen nicht im Zusammenhang mit den Transmissionsriemen, sondern beziehen sich in der Regel auf die Unzugänglichkeit für die Spezialwerkzeuge. Die Simulation von flexiblen Bauteilen ist hierbei von geringerem Interesse. Aus diesem Grund wird innerhalb dieser Arbeit auf die Abbildung der Transmissionsriemen verzichtet. Die Baugruppe der Peilstäbe soll ebenfalls unberücksichtigt bleiben, da sie bei der Serienfertigung, dem Recycling und der Wartung ebenfalls kein Problempotential besitzen.

Auf Grund der oben getroffenen Aussagen, daß es sich bei den für die Montagesimulation relevanten Bauteilen innerhalb eines Fahrzeuges um Leitungsobjekte handelt, kann man zusammenfassend folgende Anforderung an das Simulationsmodell festhalten :

Gesucht ist ein Simulationsmodell, das in der Lage ist, Leitungen aus Kunststoff oder flexiblem Metall mit einer kreisförmigen Grundfläche und einem gegebenenfalls gekrümmten Verlauf zu simulieren.

3.1.2 Klassifizierung von Leitungen in Bezug zu dem gesuchten Simulationsmodell

Es soll nun untersucht werden, wie die obigen Leitungen im Hinblick auf ein gesuchtes physikalisches Simulationsmodell klassifiziert werden können. Hieraus sollen sich die Eingangsparameter für das Verfahren ableiten. Für die Einteilung der Bauteile sind verschiedene Gesichtspunkte denkbar. Sie kann anhand der folgenden Ausprägungen erfolgen :

- **Material** : Hier können Eigenschaften, wie z.B. verwendete Materialien, Aufbau der Leitung und Verbund der verschiedenen Materialien benutzt

¹Zur Definition des „Leitungs“ Begriffes sei hier auf eine Definition aus [39] verwiesen.

Definition 1 *Anlagenelement zum Fortleiten von Signalen ... und von Energie ..., oder von Stoffströmen, z.B. von Gasen und Dämpfen ... sowie Flüssigkeiten durch Rohre aus Metall, Kunststoff oder Beton.*

Auf Grund der Beschränkung auf flexible Bauteile entfallen Leitungen aus starrem Metall oder Beton.

werden.

- **Form** : Unterscheidungsmerkmale können hier Länge, Querschnitt, Durchmesser, Wandstärke, plastische Verformbarkeit² oder Formstabilität³ sein.
- **Funktion** : Sie wird durch das durchzuleitende Material (Gas oder Flüssigkeit) oder dem durchzuleitenden Signal und den dabei entstehenden Beanspruchungen⁴ festgelegt.
- **physikalische Eigenschaften** : Hier lassen sich viele Parameter, wie z.B. Farbe, Gewicht oder Verformbarkeit, angeben.

Die einzelnen Punkte der vorgestellten Liste sollen nun auf ihre Eignung für die simulationsgerechte Klassifizierung überprüft werden.

Da es sich bei den hier untersuchten Bauteilen um Leitungsobjekte mit einem ähnlichen Querschnitt handelt, bezieht sich der Faktor **Form** auf die Parameter Durchmesser, Länge und der vorgeprägten Leitungsknicke. Diese beeinflusst zwar das Biegeverhalten des Bauteils, die Verwendung dieser Einteilungsklasse erscheint jedoch nicht sehr sinnvoll. So würde man auf Grund der unterschiedlichen Lage der Leitungsknicke schnell zu einer unvertretbar großen Anzahl verschiedener Klassen kommen. Des weiteren sollten vorwiegend die physikalischen Eigenschaften des verwendeten Materials die Verformbarkeit der Leitung beeinflussen. Das Simulationsmodell muß somit in der Lage sein, vorgeprägte Leitungsknicke ausreichend genau zu simulieren.

Die Einteilungsklasse **Funktion** erscheint eine sinnvolle Schnittstelle zu dem Menschen zu sein. Er ist damit in der Lage, seine Leitung der Klasse *Klimaleitung* oder *Luftleitung* zuzuordnen. Die gewünschte Funktion impliziert jedoch automatisch die Verwendung bestimmter Materialien und Formen.

Die verwendeten **Materialien** stellen schließlich durch ihre **physikalischen Eigenschaften** eine Einteilungsmöglichkeit dar.

Das Simulationsverfahren soll somit physikalische Materialparameter erhalten, die unabhängig von gegebenen Leitungsformen ermittelt werden. Das Verfahren selbst sollte in der Lage sein, auf Grund dieser Eingangsdaten die Leitung hinreichend zu simulieren.

²Siehe auch [39]: Unter plastisch-verformbaren Leitungen werden Objekte verstanden, die nicht vorgeformt sind. Ihre Form wird durch die auf sie einwirkenden physikalischen Kräfte bestimmt. Dazu gehören die Arretierkräfte an den Endbefestigungen, wie auch Clipse und Befestigungsschellen zwischen diesen Punkten. Die endgültige Form ergibt sich aus der Summe aller auf sie einwirkenden Kräfte inklusive des Materialverhaltens der Leitung selbst.

³Siehe auch [39]: Unter formstabilen Leitungen werden Objekte verstanden, die durch einen speziellen Fertigungsprozeß vorgeformt sind. Hierdurch stehen sie im eingebauten Zustand unter einer minimalen Krafteinwirkung, d.h. unter minimaler Spannung.

⁴Hierbei kann es sich um den notwendigen Innendruck, die Temperatur des durchzuleitenden Stoffes oder die Temperatur der Umgebung handeln.

Um geeignete physikalische Parameter für die Simulation der Deformationseigenschaften der Leitungen anzugeben, soll hier auf die Erkenntnisse der Mechanik zurückgegriffen werden.

Definition 2 (elastische Verformbarkeit) Die Verformbarkeit eines Materials innerhalb des linear-elastischen Bereichs kann durch die Parameter **Elastizitätsmodul** und **Querkontraktionszahl** beschrieben werden.

Innerhalb des linear-elastischen Bereichs eines Materials besteht ein linearer Zusammenhang zwischen einer Spannungs- und einer Dehnungserhöhung. Wird die dabei wirkende Kraft entfernt, so kehrt das Material in seine Ursprungsform zurück. Das Bild 3.1 soll diesen Zusammenhang nochmals veranschaulichen. Diese

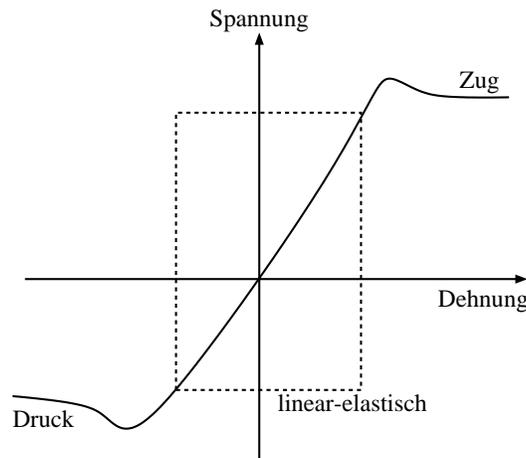


Abbildung 3.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Voraussetzung kann für das Anwendungsfeld der manuellen Montagetätigkeit mit Sicherheit erfüllt werden, da bei den meisten Montagevorgängen von dem Monteur erwartet wird, eine Leitung ohne plastische Verformung⁵ zu verbauen. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit immer der linear-elastische Bereich eines Materials vorausgesetzt.

Die Bedeutung der Parameter **Elastizitätsmodul** und **Querkontraktionszahl** ergibt sich dabei aus den folgenden Definitionen.

Definition 3 (Elastizitätsmodul) Unter dem Elastizitäts- oder E-Modul ist das Verhältnis zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε eines Materials zu verstehen.

Es gilt:
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{[\text{N}]}{[\text{mm}^2]}$$

⁵Unter einer plastischen Verformung wird eine dauerhafte Veränderung der Objektgeometrie durch Einwirkung von Kräften oder Temperaturen verstanden.

Definition 4 (Spannung) Unter der Spannung σ eines Materials versteht man das Verhältnis zwischen einer Kraft F [N] und der Querschnittsfläche A [mm²] des Materials.

Es gilt: $\sigma = \frac{F}{A} \frac{[\text{N}]}{[\text{mm}^2]}$

Definition 5 (Dehnung) Unter der Dehnung ε eines Materials versteht man das Verhältnis zwischen Streckung oder Stauchung $l - l_0$ und der Ursprungslänge oder -dicke l_0 während der Deformation.

Es gilt: $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$

Definition 6 (Querkontraktionszahl) Unter dem Begriff Querkontraktionszahl $\mu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$ oder Poissonsche Konstante $\rho = \frac{1}{\mu}$ versteht man das Verhältnis zwischen einer Dehnung in Längsrichtung $\varepsilon_l = \frac{l-l_0}{l_0}$ und einer Dehnung in Querrichtung $\varepsilon_q = \frac{d-d_0}{d_0}$.

Hierbei gilt: $\varepsilon_q = -\mu\varepsilon_l$,
wobei $\varepsilon_l > 0$ und $\varepsilon_q < 0$ ist.

Um die physikalischen Eigenschaften eines Bauteils beschreiben zu können, ist neben den Parametern des Materials auch seine verwendete Masse, die sich aus der gegebenen Geometrie der Leitung ergibt, von Interesse. Somit gelangt man zu folgender Definition : Die physikalischen Eigenschaften für den linear elastischen Bereich eines Bauteils können durch folgende Parameter eindeutig beschrieben werden.

- Elastizitätsmodul
- Querkontraktionszahl
- Dichte
- Geometrie : Querschnitt, Länge und Wandstärke

3.2 Vermessung flexibler Bauteile

Es wird nun nach Wegen gesucht, die notwendigen Materialparameter der Klassen, wie z.B. *Bremseleitung* oder *Klimaleitung* zu ermitteln. Hierbei wird davon ausgegangen, daß der Parameter **Geometrie** durch einfaches Vermessen der Leitungslänge l und der Wandstärke (Außendurchmesser d_a - Innendurchmesser d_i) ermittelt werden kann. Das Volumen der Wandung kann dann nach Formel 3.1 bestimmt werden.

$$V = l \cdot \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d_i^2) [\text{m}^3] \tag{3.1}$$

Die Bestimmung der **Materialdichte** kann in Anlehnung an DIN 53479 [42] erfolgen. Nach Bestimmung der Objektmasse m durch einfaches Wiegen ergibt sich die Materialdichte aus:

$$\rho = \frac{m \text{ [kg]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \quad (3.2)$$

Die Parameter **Elastizitätsmodul** und **Querkontraktion** müssen jedoch versuchstechnisch ermittelt werden, da es sich, wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, oft um Materialverbünde, wie z.B. bei einem Kühlwasserschlauch aus Bild 3.2, handelt, muß untersucht werden, ob trotzdem der Rückgriff auf ein Tabellenwerk zulässig ist, oder ob, die eingesetzten Materialien vermessen werden müssen.



Abbildung 3.2: Beispiel eines Kühlwasserschlauches

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls soll in dieser Arbeit mit Hilfe von *statischen Kurzzeitprüfverfahren*⁶ erfolgen. Hierbei handelt es sich um **Zug-** und

⁶Bei statischen Prüfverfahren wird der Werkstoff einer konstanten Belastung ausgesetzt. Sie variiert nicht wie bei einem Schwingungsversuch mit einer gewissen Amplitude oder Frequenz. Im Gegensatz zu Langzeit- oder Dauerprüfverfahren wird hier nicht die Langlebigkeit bei anhaltenden oder periodisch wiederkehrenden Belastungen untersucht. Man ist vielmehr an dem Materialverhalten bei einer kurzzeitigen Belastung interessiert.

Druckversuche. Für beide Versuche wird eine Auswahl aus möglichen Schlauchtypen getroffen. Es soll damit, wie bereits erwähnt, untersucht werden, inwieweit ein Rückgriff auf vorhandene Tabellenwerke zulässig ist. Die verwendeten Schläuche mit ihren Eigenschaften sind dabei Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Nummer	Schlauchtyp	Material		Maße	
		Aussenschicht	Festigkeitsträger	Innen- durchmesser	Aussen- durchmesser
1	Rücklaufschlauch zum Ölbehälter	Chlorbutadien Elastomer	Acrylnitril-Butadien Elastomer	10mm	16mm
2	Kältemittelschlauch	Butyl	Polyesterfaser	12,7mm	24,6mm
3	Kühlwasserschlauch	P-Ethylen-Propylen Terpolymer	Aramid	27mm	35mm
4	Kühlwasserschlauch	P-Ethylen-Propylen Terpolymer	Aramid	8mm	15mm
5	Schlauch AKF Kühlsystem	Epichlorhydrin Ethylenoxid-Elastomer		7,3mm	14,3mm

Tabelle 3.2: Auswahl der vermessenen Schläuche

3.2.1 Der Druckversuch

Der Druckversuch dient zur Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften unter homogenen, einachsigen Druckspannungen. Dabei wird ein Probekörper parallel zu seiner Hauptachse mit konstanter Geschwindigkeit gestaucht, bis eine Kraftschwelle erreicht wird. Während dieses Vorgangs wird die Kraft, die von dem Probekörper getragen wird, gemessen. Man erhält somit eine Kraft-Weg Kennlinie (siehe Bild 3.3). Hieraus kann man die Spannungen σ und die Deh-

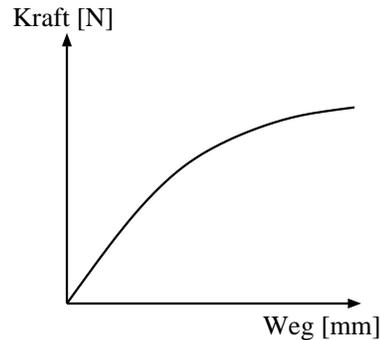


Abbildung 3.3: Kraft-Weg Kennlinie

nungen ε bestimmen. Der Quotient dieser beiden Werte liefert schließlich den gesuchten Elastizitätsmodul.

Versuchsaufbau

Zwischen zwei parallelen Metallplatten wird ein Probenstück plaziert. Die obere Metallplatte wird so mit dem Probenstück in Kontakt gebracht, daß noch keinerlei Spannung innerhalb des Probenstücks auftritt.

Vorbereitung der Proben

Um ein Abknicken oder Gleiten der Proben zwischen den Metallplatten zu vermeiden, sind an die Proben gewisse Anforderungen zu stellen. In Anlehnung an die DIN-Norm 604 [44] sollte ein Probenstück glatte und parallele Schnittflächen besitzen. Diese sollten orthogonal zur Hauptachse des Probekörpers verlaufen. Diese Voraussetzung wird durch die Verwendung von Drehmaschinen erreicht. Der Schlauch wird hierfür zunächst, wie in Bild 3.5 dargestellt, auf einen geeigneten Metallstab geschoben. Dieser Stab wird in die Drehmaschine eingespannt. Während der Rotation dieses Metallstabes wird ein Messer an den Schlauch geführt. Durch diese Operation wird eine glatte Schnittfläche erreicht. Innerhalb des gewünschten Abstandes wird diese Prozedur wiederholt, um so zwei parallele Schnittflächen zu erhalten. Die Maße des Probekörpers müssen der Bedingung

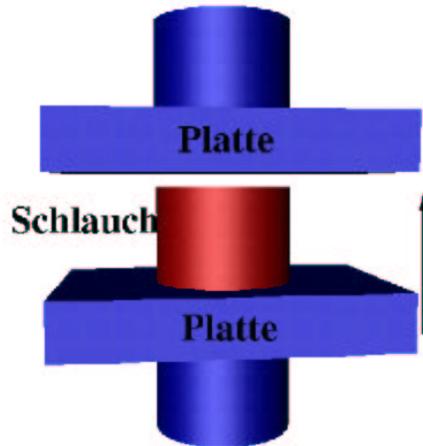


Abbildung 3.4: Aufbau eines Druckversuchs

aus Gleichung 3.3 genügen.

$$\varepsilon_c^* \leq 0.4 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \quad (3.3)$$

Hierin bedeutet, ε_c^* die maximale Stauchung, die während des Versuches auftritt, l die Länge des Probekörpers parallel zur Richtung der Druckkraft und x der äußere Durchmesser des Schlauches. In der Praxis wird ein Längen-Breiten Verhältnis von 1.5 verwendet.

Versuchsdurchführung

Der Druckversuch wird bei Zimmertemperatur durchgeführt. In Anlehnung an die DIN Norm 53504 [52] wird während des Versuchs eine konstante Dehngeschwindigkeit von $0.2 \frac{mm}{s}$ angestrebt. Die aktuelle Dehnung des Probekörpers wird anhand des Maschinenweges gemessen. Während der Bewegung wird kontinuierlich die wirkende Kraft ermittelt. Unter Berücksichtigung der speziellen Anwendung innerhalb einer Montageuntersuchung erfolgt eine Beschränkung auf eine Maximalkraft von 200 N. Diese Schranke wurde anhand von Aufsteckversuchen (siehe hierzu Kapitel 3.3.3) ermittelt. Die Druckversuche werden mit allen Schläuchen der Tabelle 3.2 dreimal durchgeführt. Bei jeder Wiederholung wird dabei ein neues Probestück verwendet. Hierdurch soll die Verlässlichkeit der Untersuchungen erhöht werden.

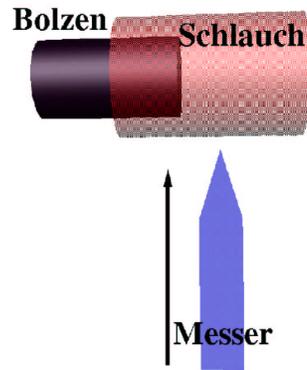


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Schneidevorganges mit Hilfe einer Drehmaschine

Bestimmung des Elastizitätsmoduls

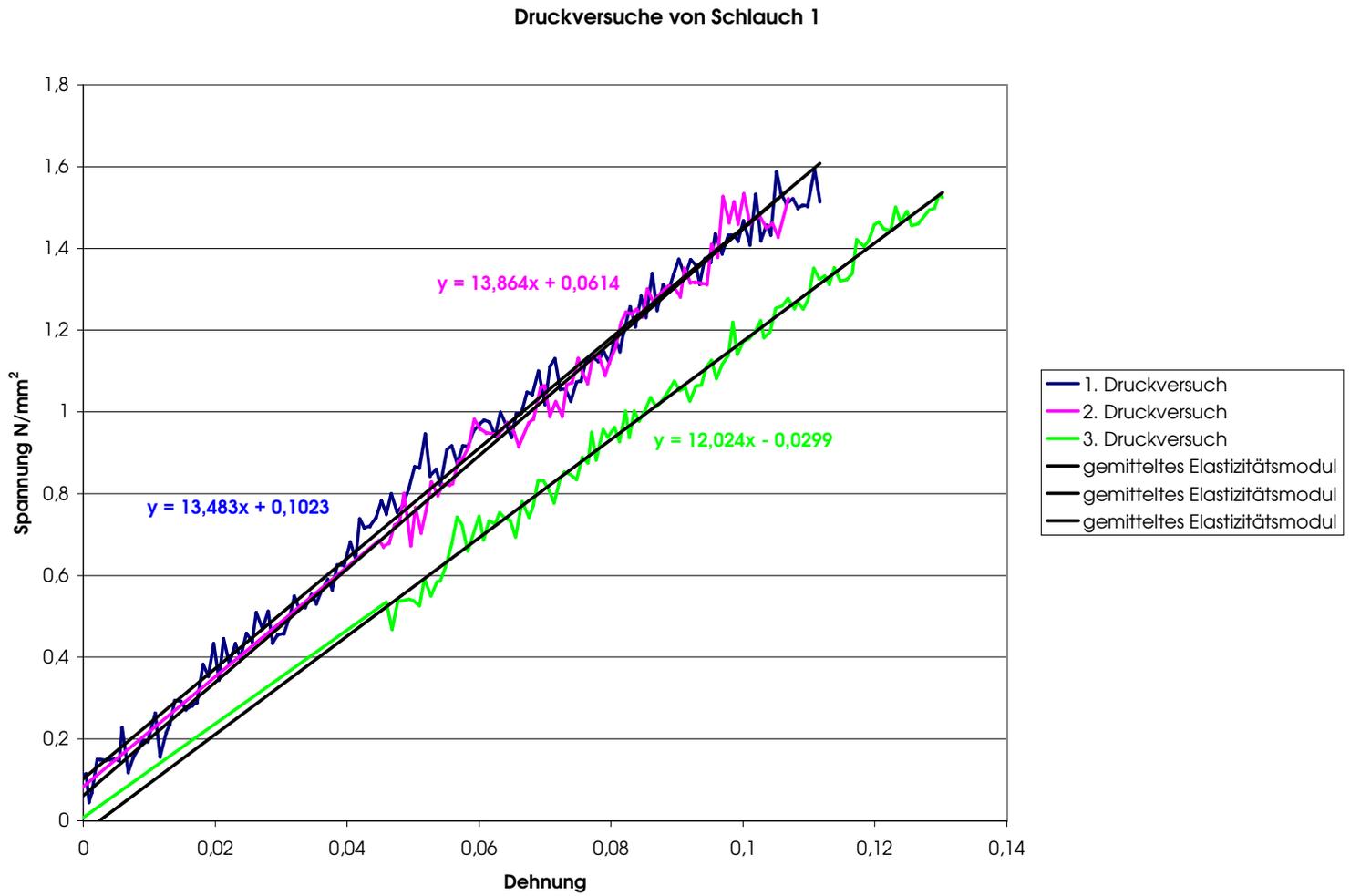
Aus den durchgeführten Versuchen, sollen nun für jedes Bauteil die entsprechenden Elastizitätsmodule bestimmt werden. Bei der Ausführung der Versuche wurde festgestellt, daß auf Grund der geringen Maximalkraft die Prüfmaschinen zu Beginn an der Grenze ihres Auflösungsgebietes arbeiten, deshalb kommt es zu einem Meßwertrauschen.

Wenden wir uns zunächst dem Schlauch Nummer 1 zu. Es handelt sich hier um einen Rücklaufschlauch bei dem sich folgende Spannungsdehnungskurven bestimmen ließen (siehe Bilder 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 und 3.10). Die Kurven weisen innerhalb des gemessenen Kraftbereiches einen linearen Anstieg auf. Somit kann von einer linear-elastischen Deformation ausgegangen werden. Die verschiedenen Druckversuche der einzelnen Schläuche weisen eine hohe Wiederholgenauigkeit auf. Dies läßt auf die Verlässlichkeit der ermittelten Werte schließen. Die gesuchten Elastizitätsmodule ergeben sich schließlich aus den Steigungen der einzelnen Kurven. Für die einzelnen Versuche ergeben sich folgende Elastizitätsmodule.

Schlauch	1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch	Durchschnitt
1	13.521	13.864	12.024	13.1363
2	7.2244	7.1277	7.1635	7.1719
3	8.548	8.8345	-	8.6913
4	7.0901	6.795	6.5364	6.8072
5	9.2664	9.0687	9.6772	9.3374

Tabelle 3.3: Tabelle der Druckelastizitätsmodule

Abbildung 3.6: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 1



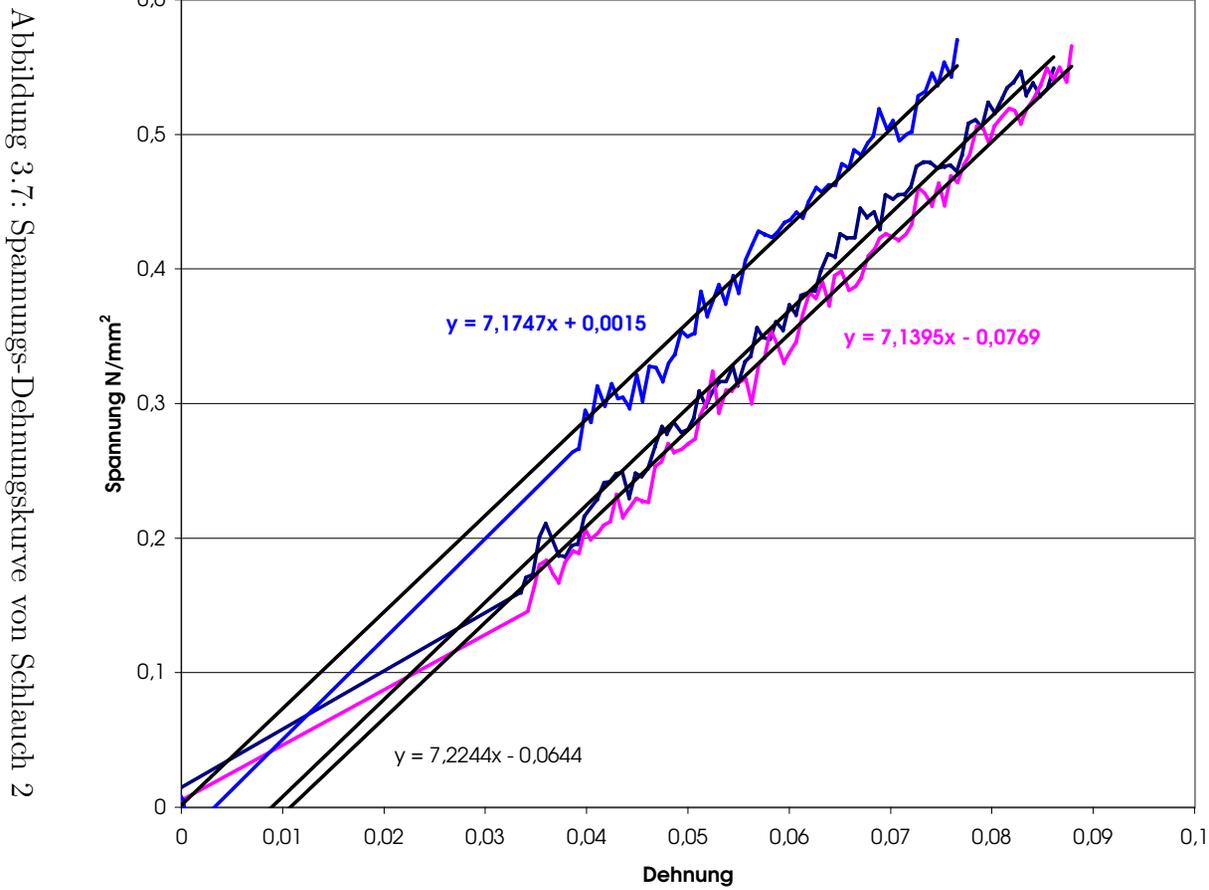
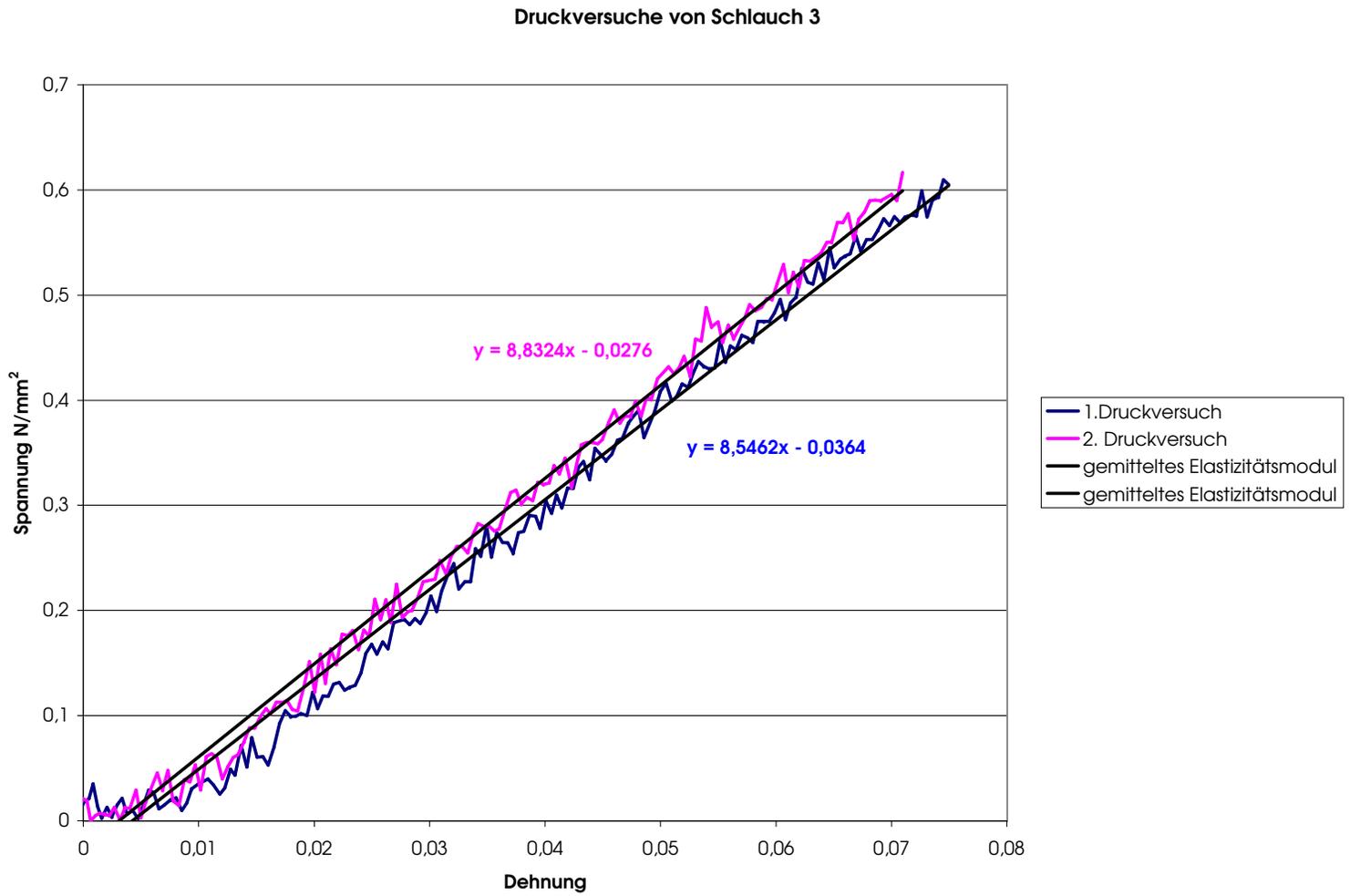


Abbildung 3.7: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 2

Abbildung 3.8: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 3



Druckversuche von Schlauch 4

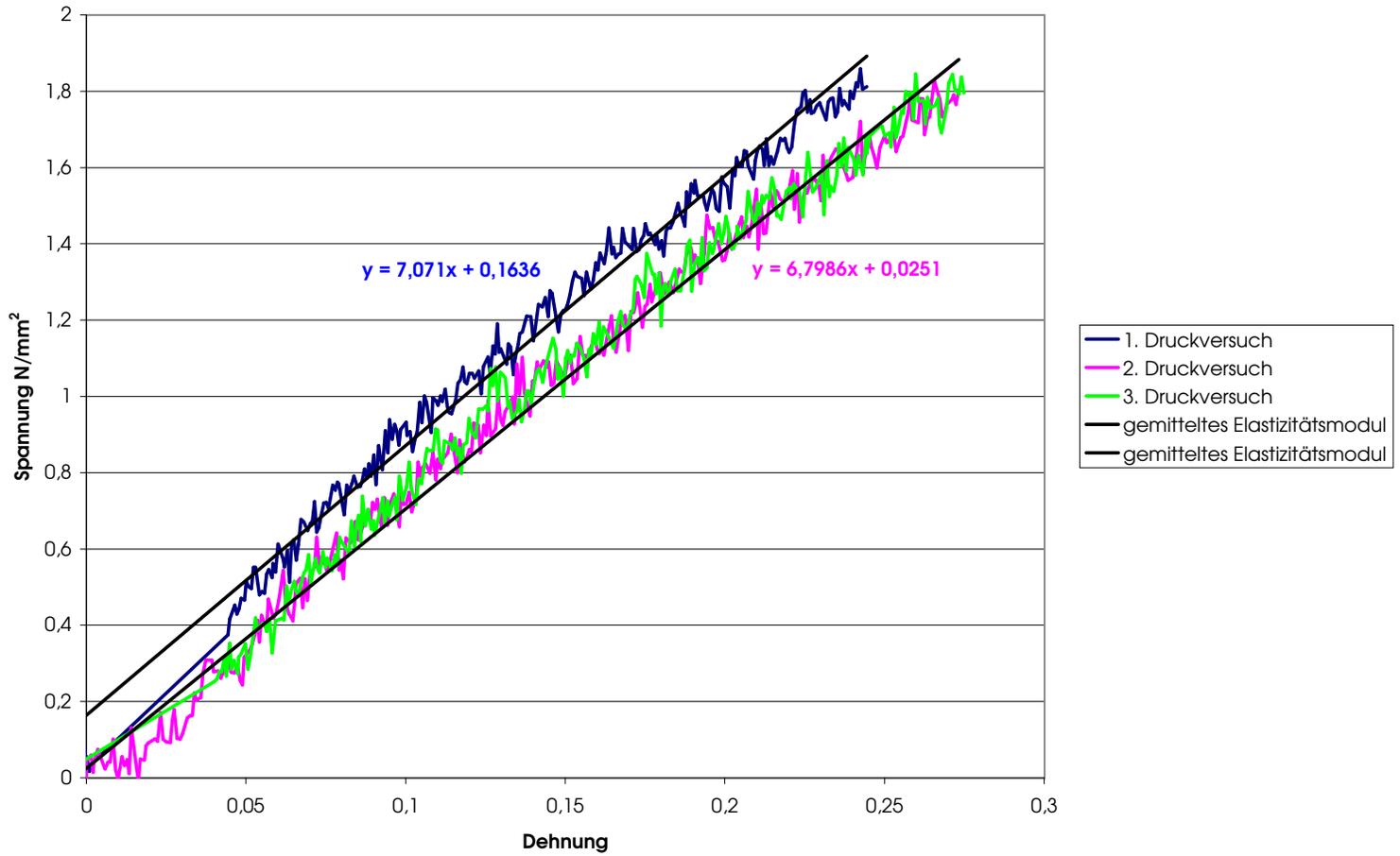
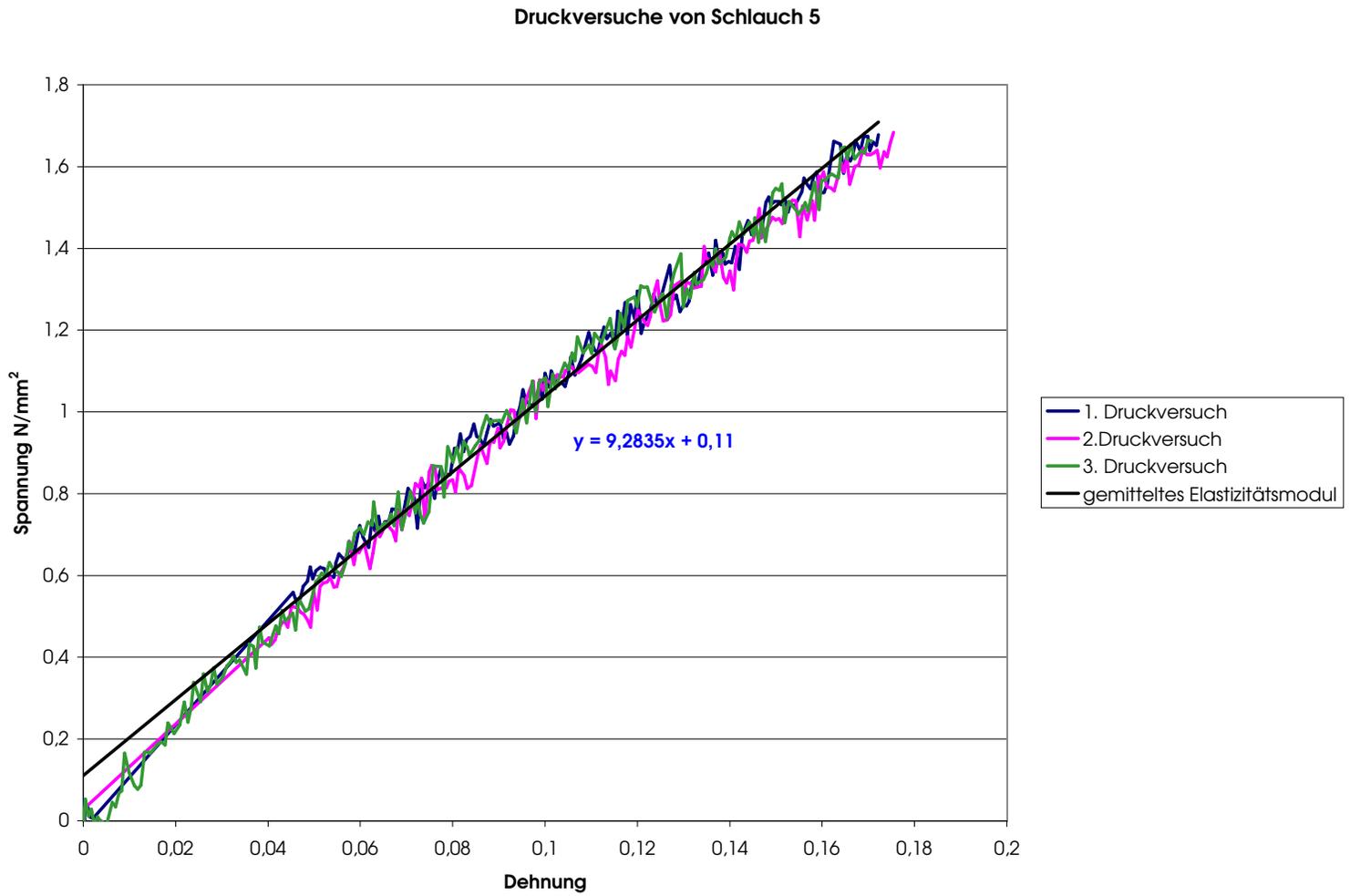


Abbildung 3.9: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4

Abbildung 3.10: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5



3.2.2 Der Zugversuch

Der Zugversuch dient der Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften unter homogenen, einachsigen Zugspannungen. Der Probekörper wird dabei mit konstanter Geschwindigkeit parallel zu seiner Hauptachse gedehnt. Hat sich eine maximale Kraft eingestellt, so wird der Versuch beendet.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt in Anlehnung an die DIN 53504 [52]. Die Metallstäbe, auf die der Schlauch an den Enden aufgezogen worden ist, werden in die Prüfmaschine eingespannt. Die Mittellinie des Schlauches fällt hierdurch, wie in Abbildung 3.11 gezeigt, mit der Zugrichtung zusammen.

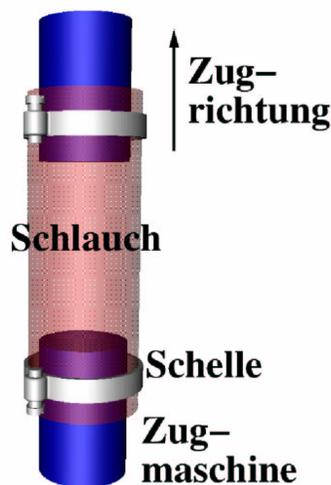


Abbildung 3.11: Versuchsaufbau des Zugversuchs

Vorbereitung der Proben

Die Proben müssen in die Prüfmaschine eingespannt werden, ohne daß eine Knickung oder entscheidende Deformation des Schlauches auftritt. Aus diesem Grund wird der Schlauch zunächst auf einen Metallstift geschoben, der später in die Zugmaschine eingespannt wird. Um ein Abrutschen des Schlauches von dem Metallstift zu verhindern, wird der Schlauch mit einer Schlauchschelle auf dem Metallstift arretiert. Die Längen der Proben werden in Anlehnung an Dubbel [41] mit dem Verhältnis $l_0 = 5 \cdot d_0$ gewählt. Hierbei entspricht l_0 der initialen Länge der Probe und d_0 dem initialen Außendurchmesser der Probe. Während des Versuches wird die Dehnung des Schlauches mit Hilfe eines Tastdehnungsaufnehmers ermittelt.

Versuchsdurchführung

Der Schlauch wird parallel zu seiner Mittellinie mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit von $0.2 \frac{mm}{s}$ gedehnt. Während dieses Vorgangs wird die notwendige Kraft vom Meßsystem ermittelt. Die Maximalkraft wird in Abhängigkeit des Schlauchdurchmesser auf 100 N bzw. 200 N festgelegt. Bei Erreichen dieser Kraft wird der Versuch beendet.

Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Aus den durchgeführten Versuchen erhält man wieder die bereits aus den Druckversuchen bekannten Spannungs-Dehnungskurven Bild 3.12. Die Diagramme des Schlauches mit der Nummer 1 zeigen im untersten Dehnungsbereich einen exponentiellen Anstieg. Dieser wandelt sich im Laufe des Versuchs zu einem linearen. Betrachtet man das Verhältnis zwischen exponentiellen und linearem Kurvenverlaufes innerhalb des gesamten Versuches, so kann man von der vereinfachenden Annahme eines linearen Anstieges ausgehen. Das nicht lineare Segment im unteren Bereich der Meßwertkurve ist ggfs. auf eine nicht ausreichende Vorspannung oder auf Meßungenauigkeiten zurückzuführen. Dieses Verhalten läßt sich auch bei den Versuchen der Schläuche 2 bis 5 erkennen. Es läßt somit auf einen systematischen Fehler schließen. Die ersten beiden Messungen dieses Schlauches werden bei einer Maximalkraft von 100 N beendet. Der dritte Versuch wird bis zu einer Maximalkraft von 200 N fortgesetzt, um zu untersuchen, inwieweit sich der lineare Trend fortsetzt (siehe Bild 3.13). Bei den Kurven des Schlauches Nummer 2 läßt sich im untersten Meßbereich ebenfalls ein exponentieller Anstieg erkennen, dennoch kann auch hier von einer linear-elastischen Deformation ausgegangen werden. Auf Grund des größeren Schlauchdurchmessers werden diese Versuche bis zu einer Maximalkraft von 200 N durchgeführt (siehe Bild 3.14). Auch bei dem Schlauch Nummer 3 werden die Versuche auf Grund des großen Durchmessers bis zu einer Maximalkraft von 150 N bzw. 200 N durchgeführt. Wie bei allen vorherigen Schläuchen auch erkennt man im unteren Meßbereich einen exponentiellen Anstieg. Dieser wandelt sich aber schließlich in einen linearen (siehe Bild 3.15). Bei dem Schlauch Nummer 4 werden die Versuche bis zu einer Maximalkraft von 100 N durchgeführt. Dieser Schlauch weist im Gegensatz zu den vorherigen Schläuchen in keinem Meßbereich einen linearen Anstieg auf. Die Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens stellt somit eine Vereinfachung dar (siehe Bild 3.16). Bei dem Schlauch Nummer 5 läßt sich das gleiche Verhalten wie bei den ersten drei Schläuchen erkennen. Somit kann auch hier von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgegangen werden. Die ersten beiden Messungen dieses Schlauches werden mit einer Maximalkraft von 100 N durchgeführt. Im dritten Versuch wird diese auf 200 N erhöht, um zu überprüfen, ob ein weiterer linearer Anstieg erkennbar ist.

Wie bei den Druckversuchen ergeben sich auch hier die Elastizitätsmodule aus

den Steigungen der einzelnen Spannungs-Dehnungskurven. Man erhält somit folgende Tabelle 3.4 :

Schlauch	1. Versuch	2. Versuch	3. Versuch	4. Versuch	Durchschnitt
1	10.856	11.945	11.948	-	11.583
2	6.0318	6.0729	5.9992	-	6.0346
3	6.8774	7.2563	7.057	6.5862	6.9442
4	7.4627	8.2256	7.739	-	7.5928
5	11.868	13.058	13.062	-	12.6627

Tabelle 3.4: Tabelle der Zugelastizitätsmodule

Abbildung 3.12: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 1

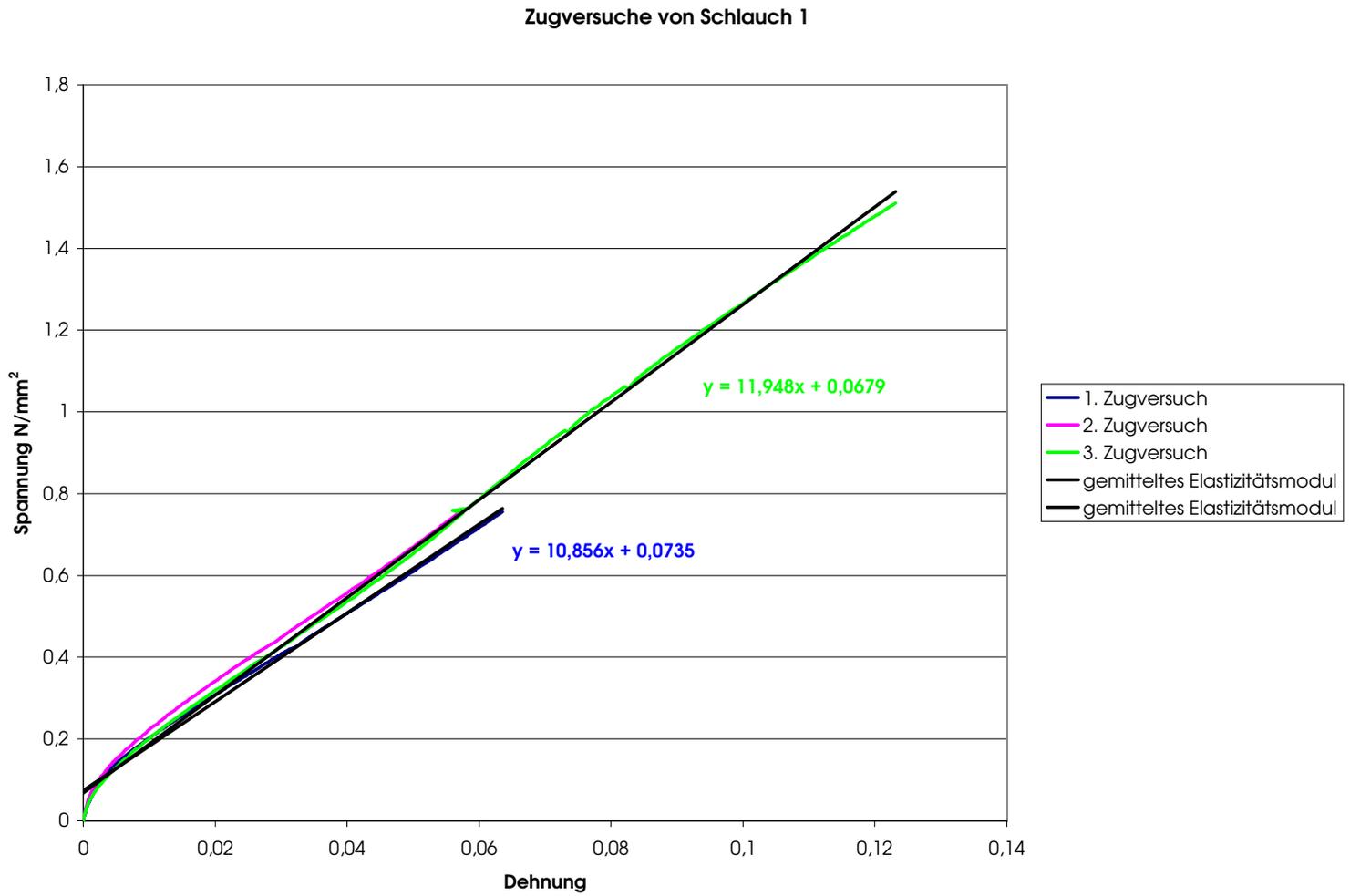


Abbildung 3.13: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 2

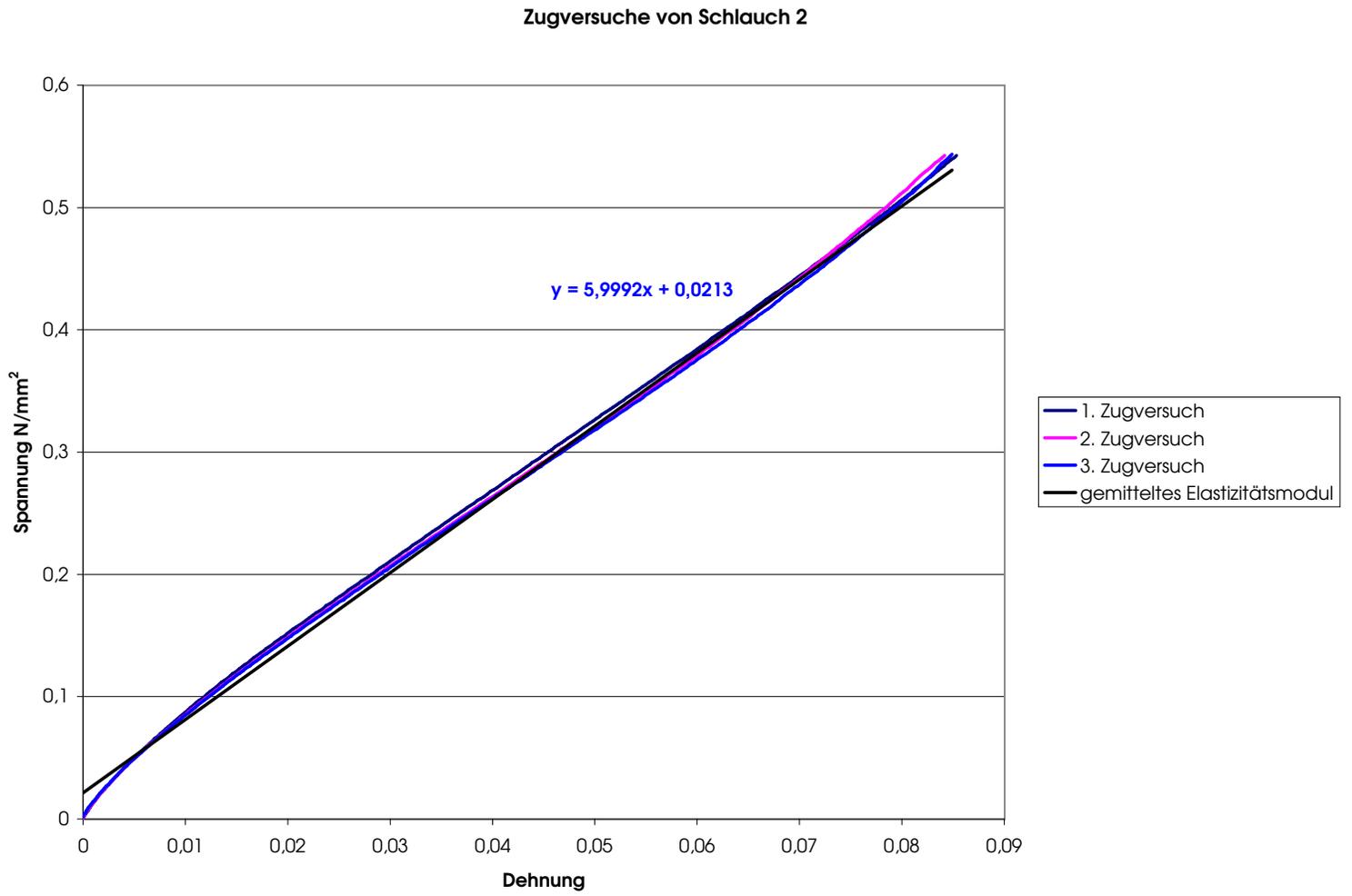


Abbildung 3.14: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 3

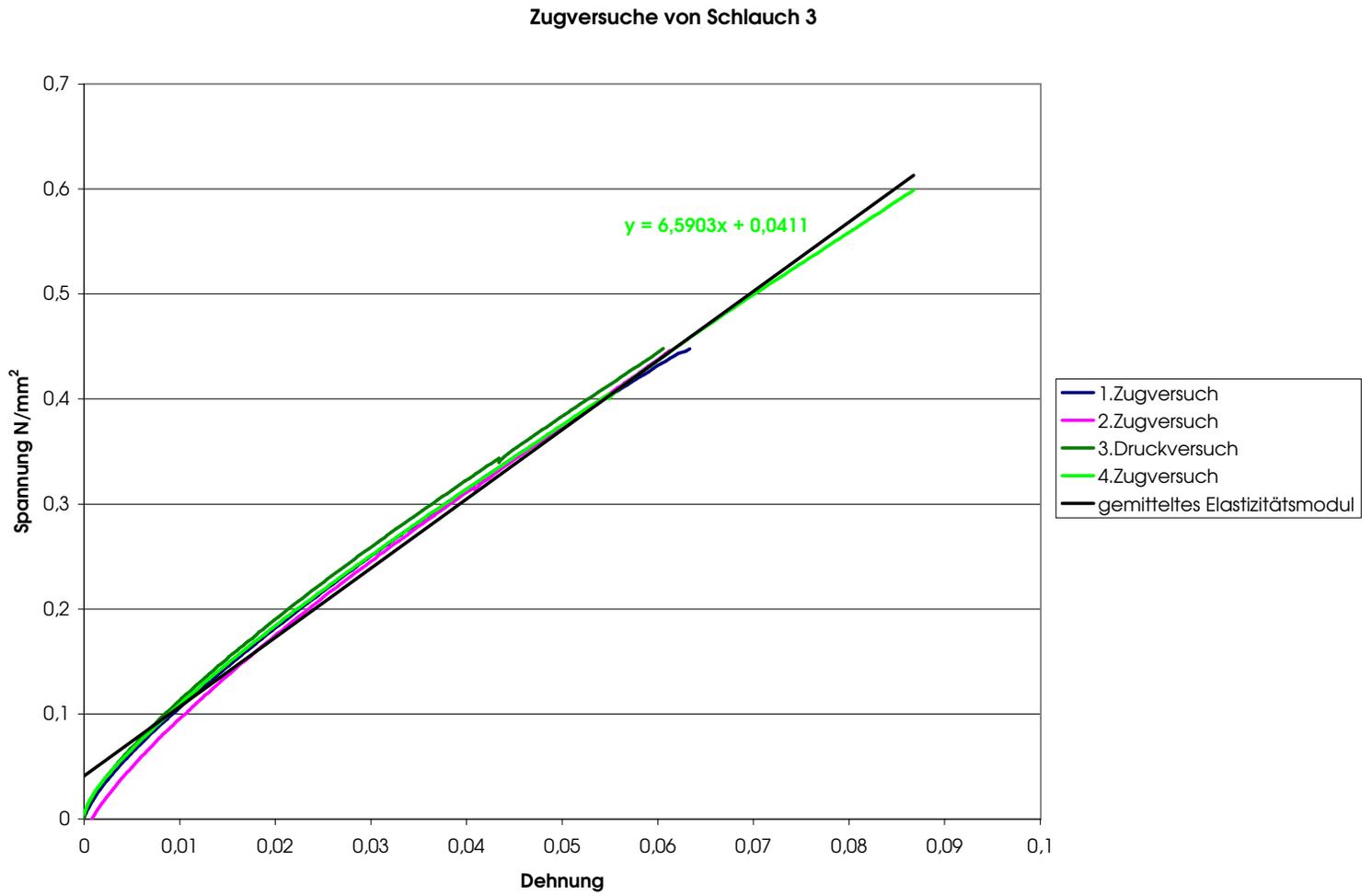


Abbildung 3.15: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4

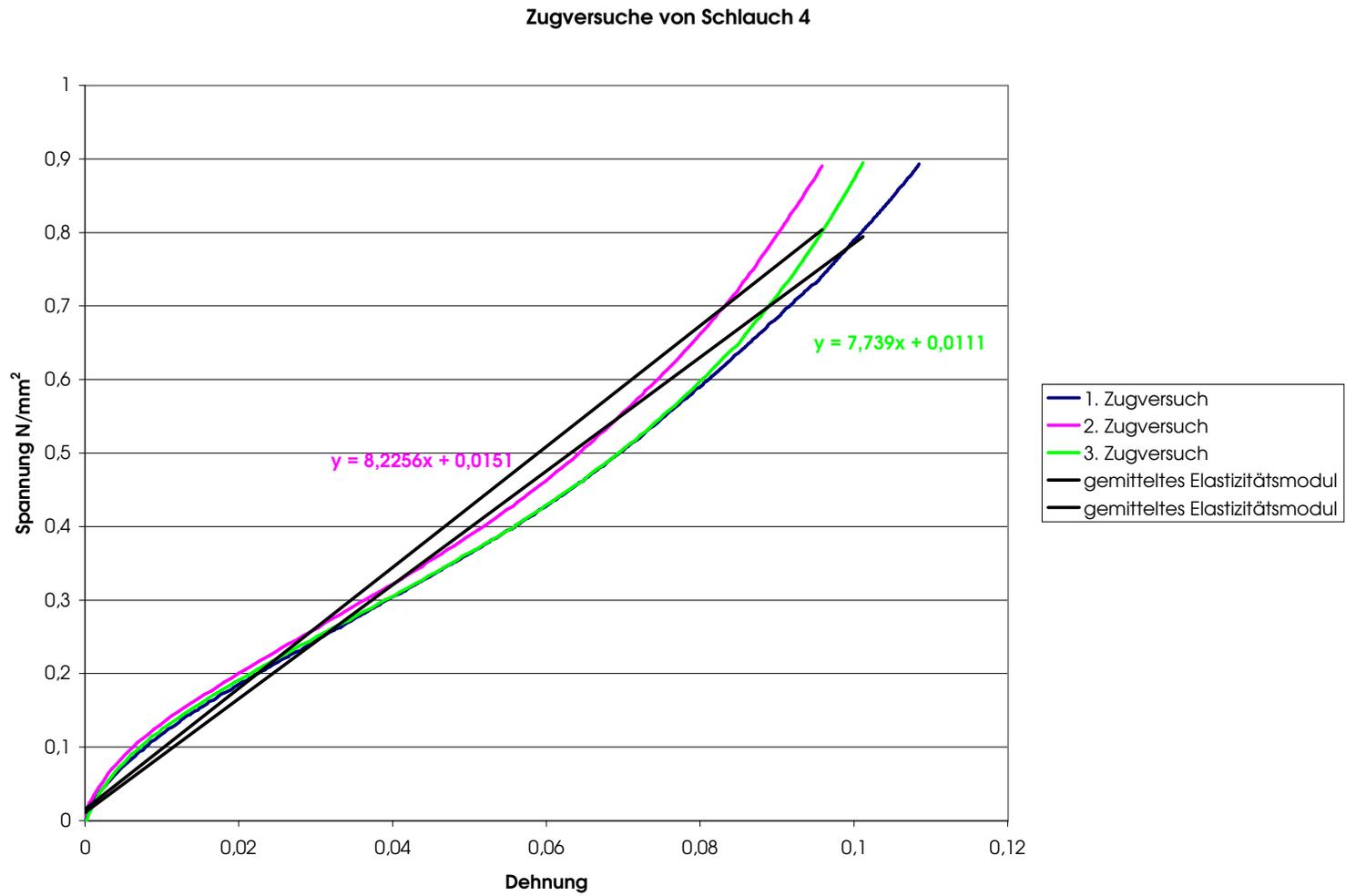
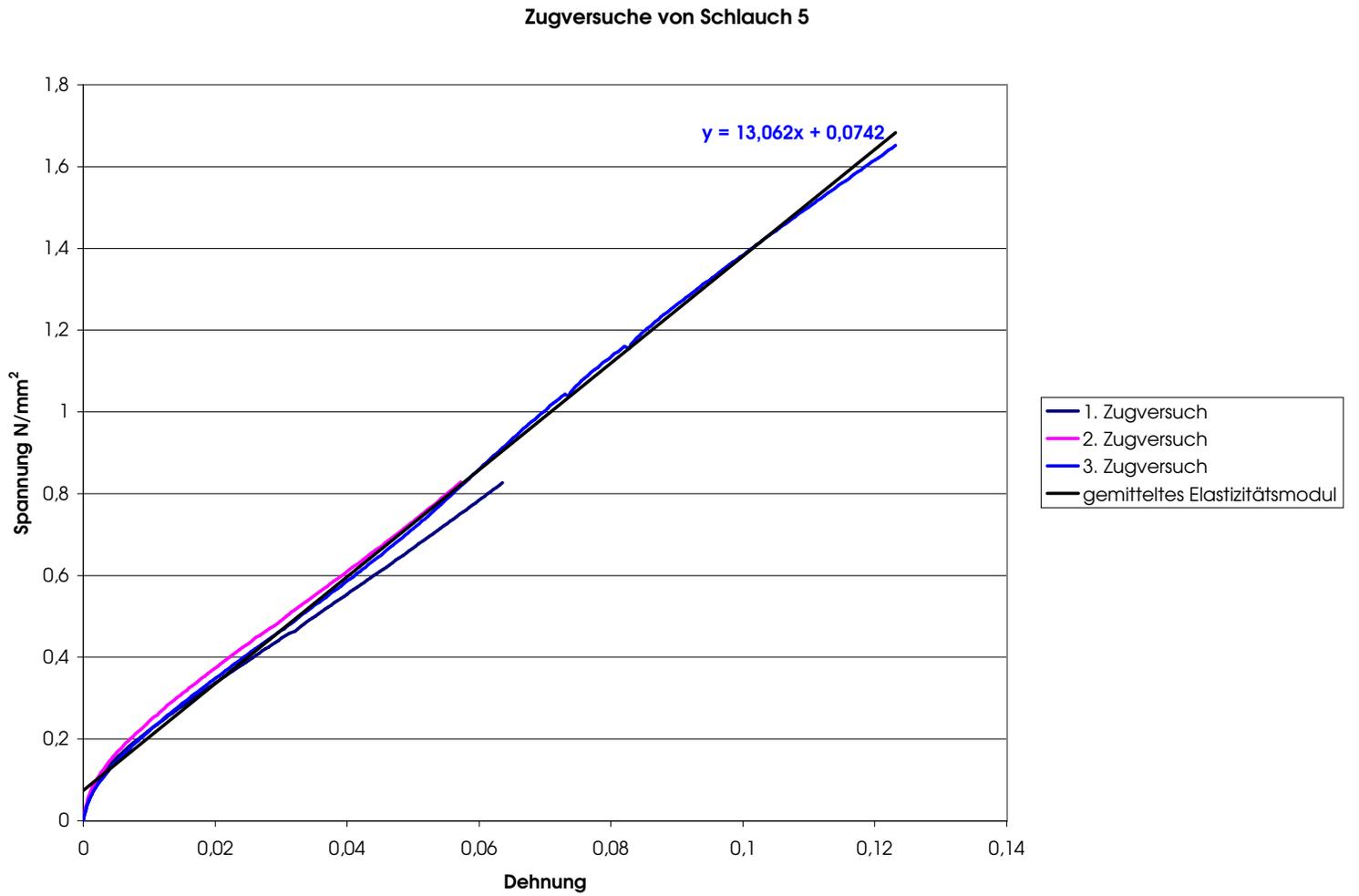


Abbildung 3.16: Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5



3.2.3 Bewertung der Versuche

Es soll im folgenden geklärt werden, inwieweit auf Standardtabellenwerke für die Elastizitätsmodule der einzelnen Materialien zurückgegriffen werden kann. Des weiteren soll untersucht werden, ob ein Elastizitätsmodul für die Lastfälle *Zug* und *Druck* verwendet werden kann. Letzten Endes soll entschieden werden, ob ein Rückschluß von der Bauteilkategorie, z.B. Kühlwasserschlauch zum Elastizitätsmodul erlaubt ist.

Verwendung von Standardtabellenwerken

Der Einsatz von Tabellenwerken für Elastomere gestaltet sich sehr schwierig. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist in den meisten Tabellenwerken ein Shore Härtegrad⁷ für die eingesetzten Elastomere angegeben. Dieser ist aber recht ungenau und eignet sich lediglich für Vergleichsmessungen (vgl. [54]). Abweichungen von zwei bis drei Härtegraden eines Materials sind nicht ungewöhnlich. Elastizitätsmodule sind hingegen präziser und eignen sich aus diesem Grund besser für den Einsatz in bekannten Berechnungsverfahren. Eine Umrechnung beider Materialparameter ist derzeit nicht bekannt, so daß man sich für die Verwendung des Shore Härtegrades oder des Elastizitätsmoduls entscheiden muß. Manche Tabellenwerke z.B. [55] geben für Elastomerfamilien zwar Elastizitätsmodule an. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um genaue Elastizitätsmodule, sondern vielmehr um Parameterbereiche, innerhalb denen der gesuchte Wert liegen sollte. Geeignete Elastizitätsmodule für die gesuchten Elastomere sind nicht zu finden. Aus diesem Grund erscheint die Durchführung der obigen Versuche zur Bestimmung der genauen Elastizitätsmodule als unumgänglich.

Vergleich der Elastizitätsmodule

Vergleicht man die ermittelten Elastizitätsmodule und bestimmt die absolute und relative Abweichung in Bezug zum Druck Elastizitätsmodul, so erhält man folgende Tabelle 3.5 und folgende Schaubilder 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 und 3.21. Würde man auf Grund der Gewebeeinlage der meisten Schläuche ein höheres Elastizitätsmodul im Zugversuch erwarten, so wird diese Annahme nicht bestätigt. Diese Eigenschaft läßt sich durch die Verwendung der Schläuche erklären. Für die Funktion der Schläuche ist ein hoher Berstdruck entscheidend. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Gewebeeinlagen so eingebracht, daß ein Aufweiten der Leitung verhindert wird. Hierdurch wird das Material gegenüber Belastungen des

⁷Dieses Härteprüfverfahren nach DIN 53505 wurde für Elastomere entwickelt. Unterschieden wird zwischen Shore A und Shore D. In beiden Fällen wird ein Prüfkörper planparallel zu dem Probekörper aufgesetzt und in ihn hinein gedrückt. Nach 3 Sekunden wird mit Hilfe des entsprechenden Prüfgerätes der ganzzahlige Härtegrad abgelesen. Der Unterschied beider Prüfverfahren liegt in der verschiedenen Anpresskräften. So wird bei Shore A eine Kraft von 12.5 N und bei Shore D von 50 N verwendet. (vgl. [54])

Schlauch	Druckversuch	Zugversuch	Differenz (abs)	Differenz (%)
1	13.1363	11.583	1.5533	11.8245
2	7.1719	6.0346	1.1373	15.8577
3	8.6913	6.9442	1.7471	20.1017
4	6.8072	7.5928	0.7856	11.5407
5	9.3374	12.6627	3.3253	35.6127

Tabelle 3.5: Tabelle aller Elastizitätsmodule

Innendruck verstärkt. Die relative Abweichung der beiden Elastizitätsmodule weist eine große Streuung auf. Hier muß berücksichtigt werden, welche Ziele man mit der späteren Anwendung erreichen will. Die Verwendung der Technik der virtuellen Realität und der damit verbundenen Echtzeitbedingung, erfordert die Vereinfachung von Rechenmodellen. Dies bevorzugt die Ermittlung von qualitativen Ergebnissen. Quantitative Aussagen werden selten angestrebt. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die obigen Werte, so können die Elastizitätsmodule der Schläuche 1 und 4 zusammengefaßt werden. Bei den übrigen Schläuchen sollte jedoch eine Unterscheidung zwischen einer Druck- und einer Zugbelastung erfolgen, da zu vermuten ist, daß es sonst zu verfälschten qualitativen Aussagen kommen kann.

Vergleich der Bauteilklassen

Vergleicht man die beiden gemessenen Kühlwasserschläuche miteinander, so lassen die ermittelten Werte keinen Rückschluß von der Bauteilkategorie und dem verwendeten Material auf die zu erwartenden Elastizitätsmodule zu. Man ist somit gezwungen, die zu simulierenden Leitungen selbst zu vermessen, oder diese Werte aus einer erstellten Bauteildatenbank zu übernehmen.

Vergleich der Zug- und Druckversuche von Schlauch 1

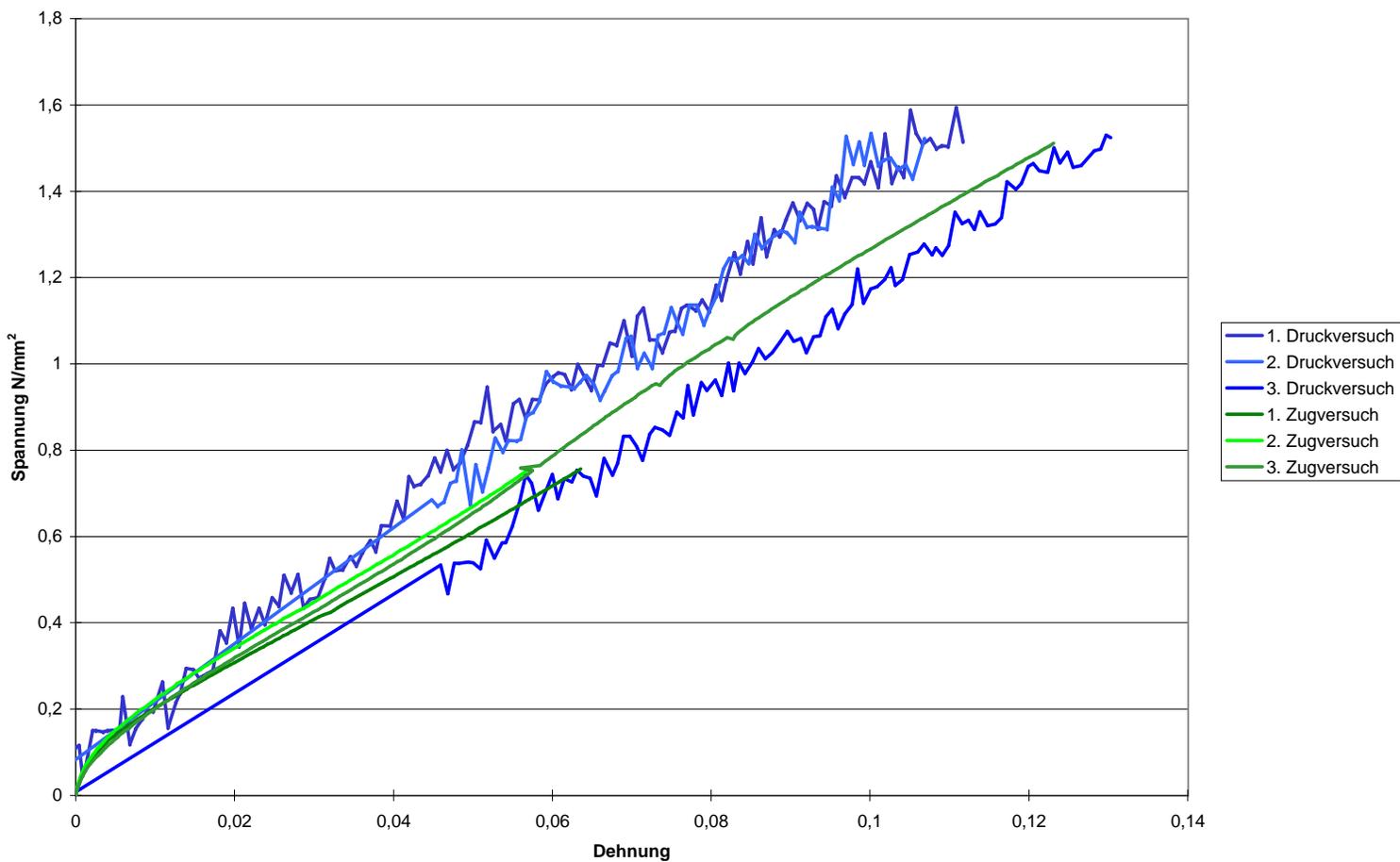


Abbildung 3.17: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 1

Vergleich der Zug- und Druckversuche von Schlauch 2

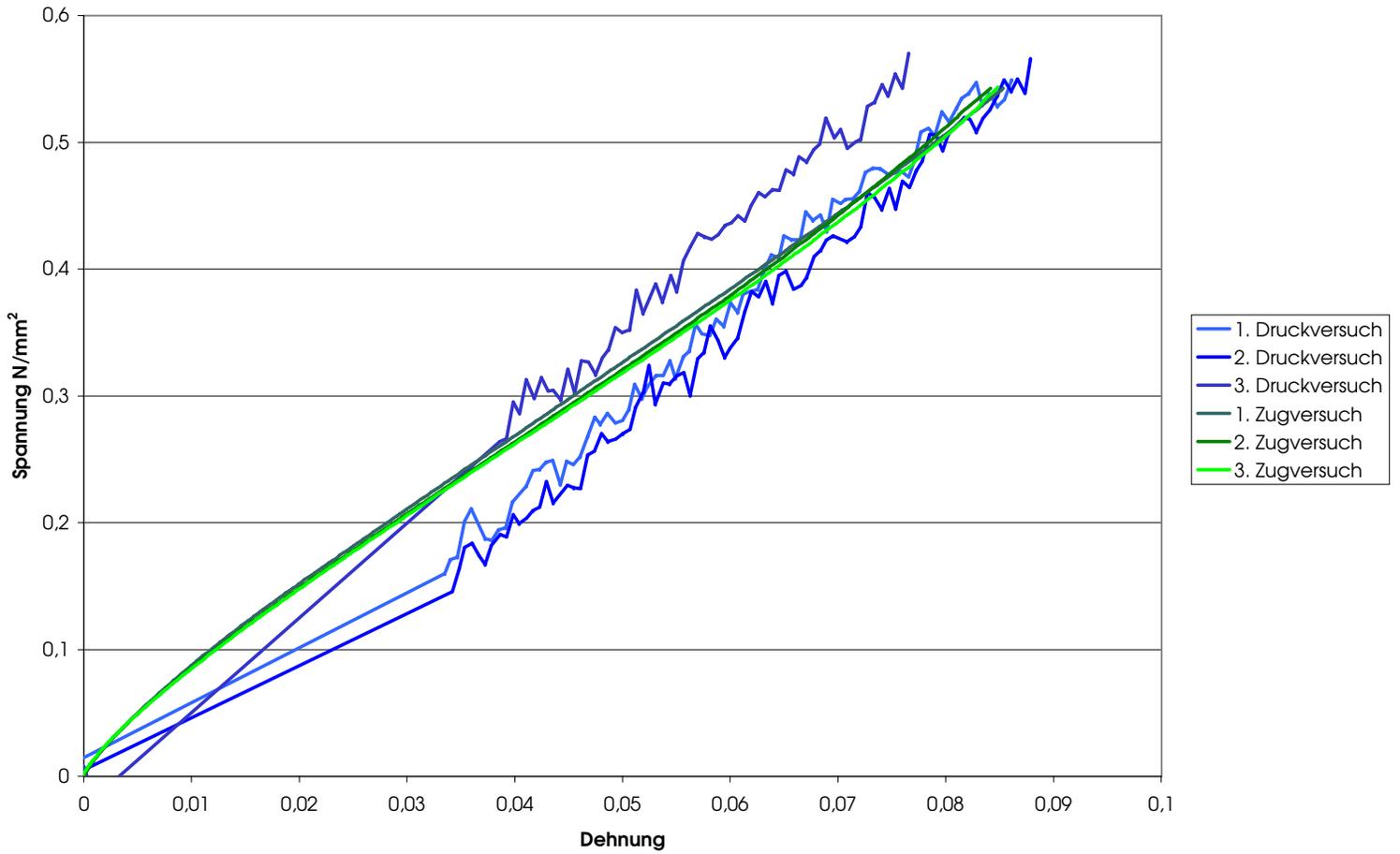
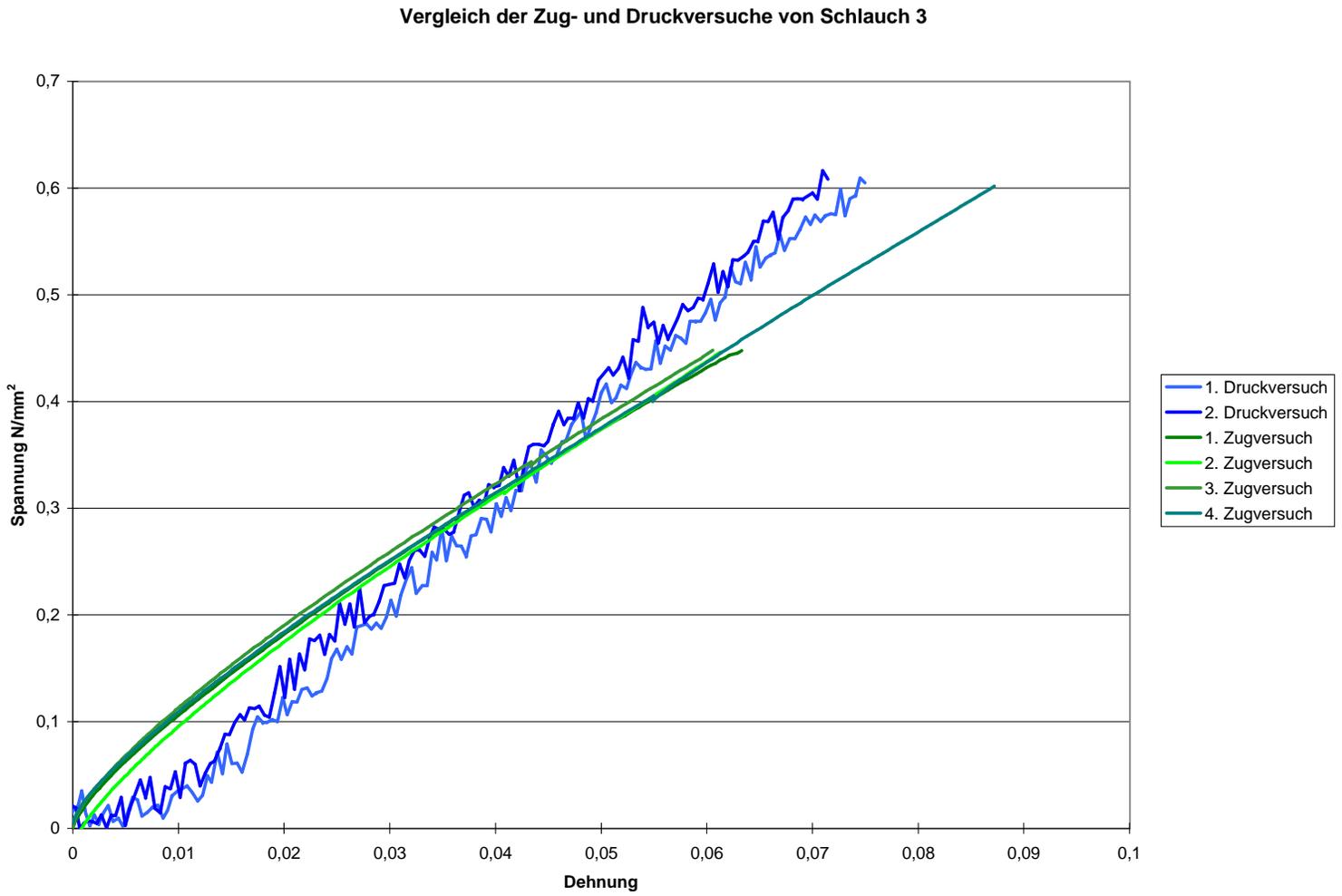


Abbildung 3.18: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 2

Abbildung 3.19: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven von Schlauch 3



Vergleich der Zug- und Druckversuche von Schlauch 4

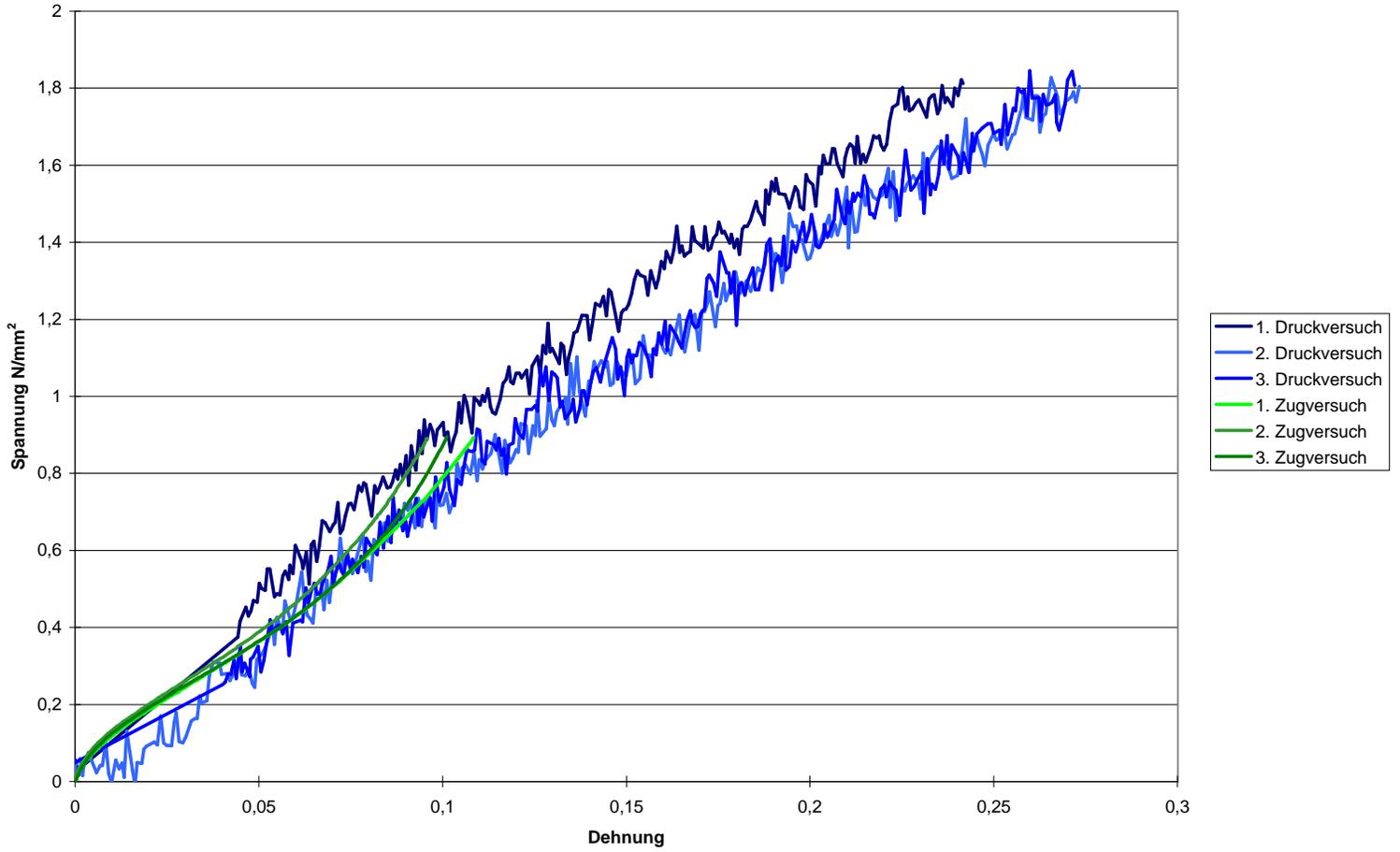
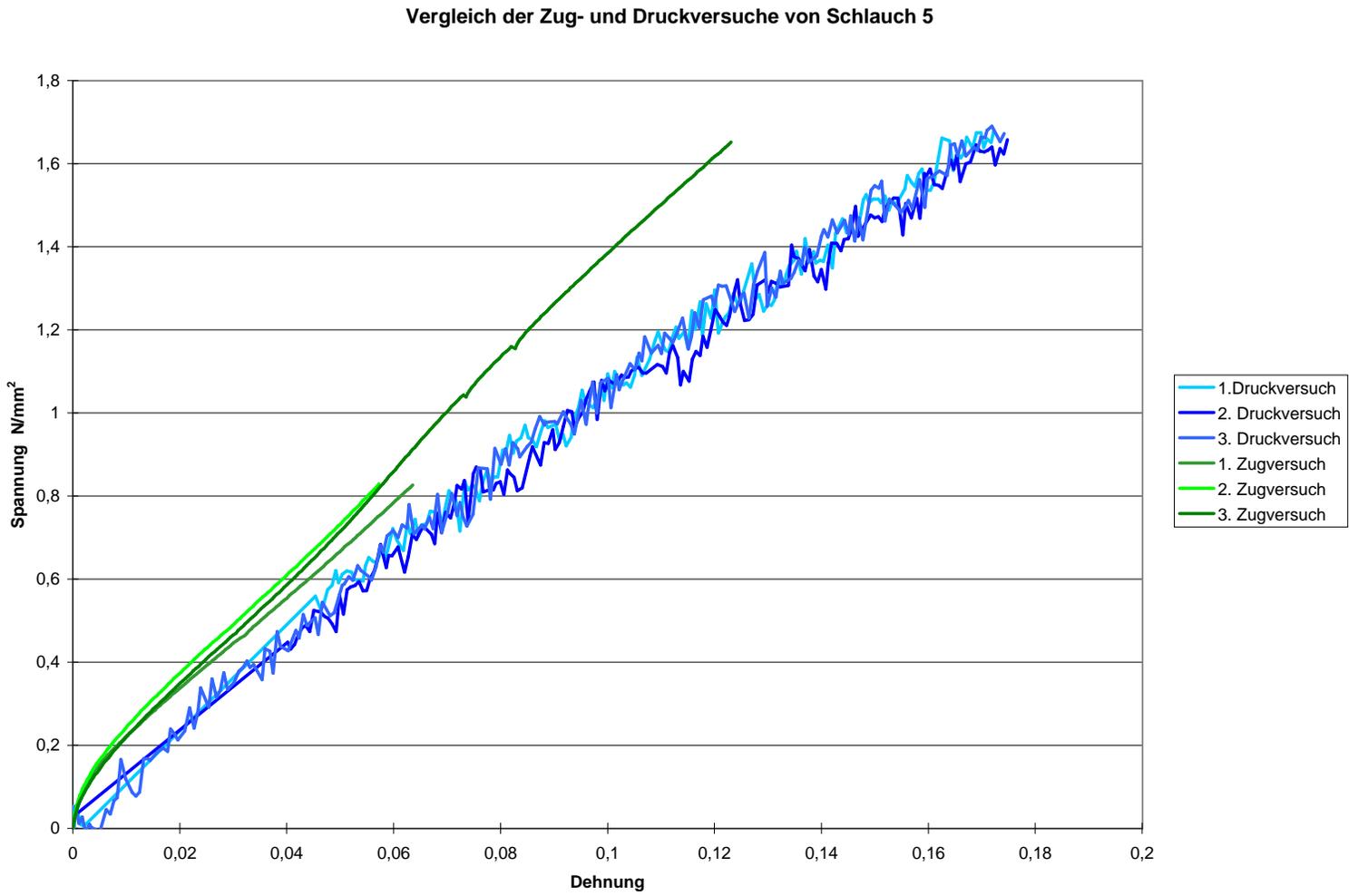


Abbildung 3.20: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 4

Abbildung 3.21: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurve von Schlauch 5



3.3 Analyse der Montagetätigkeiten

Im folgenden werden die Montagetätigkeiten bei Leitungsobjekten analysiert. Dabei sollen folgende Ziele verfolgt werden:

- Ermittlung der notwendigen manuellen Tätigkeiten
- Klassifizierung dieser Tätigkeiten
- Festlegung geeigneter Belastungsgrenzen für die einzelnen Klassen

Diese dienen dazu, die Interaktionen mit dem zu schaffenden Simulationsmodell zu bestimmen. Daneben wird ermittelt, in welchem Bereich die zu simulierenden Kräfte zu erwarten sind.

3.3.1 Ermittlung notwendiger manueller Tätigkeiten

Zunächst soll mit der Ermittlung der notwendigen manuellen Tätigkeiten begonnen werden. Grundlage dieser Ermittlung stellen Mitarbeiterbefragungen und die Arbeit von Herrn Symietz [39] dar. Dort wird die Eigenart von Leitungsmontagen wie folgt definiert :

„Bei der Montage von Leitungsobjekten am realen Fahrzeug macht man sich intuitiv die Verformung dieser Objekte zunutze. Um einen Kühlwasserschlauch zwischen Motor und Kühler zu montieren, werden weder der Motor noch der Kühler gelockert. Der Schlauch wird vielmehr durch direkte Krafteinwirkung so verformt, daß er zunächst an dem einen und danach an dem anderen Aggregat befestigt wird. Dazu wird er gestaucht und gekrümmt, so daß er sich über den entsprechenden Anschlußstutzen ziehen läßt.“

Betrachten wir zum Beispiel den Wechsel eines Kühlwasserschlauches etwas genauer. Zu Beginn muß der alte Schlauch entfernt werden. Hierbei müssen in einem ersten Arbeitsschritt die Befestigungsschellen, unter Verwendung eines Schraubendrehers, an den Schlauchenden gelöst werden. Anschließend können die Schlauchenden von den Anschlußstutzen gezogen werden. Sollte der Schlauch in seinem Verlauf mit Befestigungsclipsen arretiert sein, so muß er aus diesen Clipsen gezogen werden. Der Schlauch sollte nun frei im Motorraum liegen. Er kann somit durch Biegung, Druck oder Zug an den übrigen Bauteilen vorbeigeführt werden. Die Montage des neuen Schlauches ergibt sich schließlich in umgekehrter Reihenfolge.

Das vorgestellte Beispiel läßt sich dabei auf beliebige Leitungsobjekte übertragen.

3.3.2 Klassifikation der manuellen Tätigkeiten

Die notwendigen Tätigkeiten zur Montage einer Leitung sollen nun geeignet klassifiziert werden. Dabei wird die durchgeführte Tätigkeit und die sich daraus ergebende Deformation der Leitung betrachtet. Gesucht sind Primäroperationen, für die Belastungsgrenzen des Menschen bestimmt werden können.

Betrachten wir also die Tätigkeiten Schritt für Schritt.

1. **Lösen der Schlauchschellen** : Der Mensch greift einen Schraubendreher, führt ihn an die Befestigungsschrauben heran und übt durch Drehen seines Unterarmes ein gewisses Drehmoment aus. Der Mensch führt anschließend den Dreher aus dem Einbaubereich heraus und legt ihn an geeigneter Stelle ab. Durch das Lösen der Schlauchschellen, verschwindet eine Stauchung des Leitungsumfanges an der früheren Position der Schelle. Die Deformation der Leitung führt dabei zu keiner Belastung des Menschen. Dieser Tätigkeitsschritt soll aus diesem Grund bei weiteren Betrachtungen unberücksichtigt bleiben.
2. **Abziehen der Leitungsenden** : Der Mensch umgreift mit einer Hand den Schlauch. Wurde eine feste Griffkraft erreicht, so zieht er den Schlauch entlang seiner Längsachse. Hierbei überlagern sich drei Aspekte. Zum einen wird die Leitung entlang seiner Längsachse minimal gedehnt. Zum anderen macht sich während des Abziehvorganges die Reibung zwischen dem Material der Leitung und dem Material des Anschlußstutzens bemerkbar. Als dritte Komponente tritt die Minderung der Dehnung des Leitungsinnehdurchmessers in Erscheinung. Alle drei Komponenten stellen eine spürbare Belastung für den Menschen dar.
3. **Entfernen der Leitungsclipse** : Der Mensch umgreift mit einer Hand den Schlauch in der Nähe des Befestigungsclipses. Mit zwei Fingern der zweiten Hand dehnt er den Clips. Die erste Hand zieht den Schlauch orthogonal zur Längsachse des Schlauches in Öffnungsrichtung des Clipses. Die Deformation der Leitung kann während dieser Operation vernachlässigt werden. Lediglich die Verschlusskraft des Clipses und die Reibung beim Entfernen spielen eine Rolle.
4. **Entfernen der Leitung** : Sind alle Befestigungen des Schlauches gelöst, so umfaßt der Monteur den Schlauch mit einer Hand. Durch ziehen, drücken oder drehen seiner Hand wird die gegriffene Leitung gestaucht, gedehnt oder gebogen. Hierdurch kann der Schlauch entfernt werden. Die Dehnung, Stauchung und Biegung erfolgt in Bezug zur Längsachse der Leitung. Eine Deformation des Leitungsdurchmessers ist vernachlässigbar, da dieser Faktor nicht dazu führt, daß eine Montage undurchführbar ist. Als Einflußfaktoren für die Belastung des Menschen ist das Schlauchgewicht, die Reibung

an befestigten Bereichen des Motors und die Deformation des Schlauches zu sehen.

5. **Einbringen der neuen Leitung** : Hierbei gilt das gleiche wie bei Punkt 4.
6. **Befestigen mit Hilfe von Leitungsclipsen** : Es gilt auch hier das selbe wie bei Punkt 3.
7. **Aufschieben der Leitungsenden** : Ein mit einer Hand umgriffener Schlauch wird in Richtung seiner Längsachse auf einen Anschlußstutzen geschoben. Dabei entsteht eine minimale Stauchung der Leitung an dem entsprechenden Ende. Darüber hinaus spielt die Reibung zwischen dem Material der Leitung und dem Material des Anschlußstutzens und die Dehnung des Leitungsinwendurchmessers eine Rolle.
8. **Befestigen der Schlauchschellen** : Es gilt das Gleiche wie bei Punkt 1.

Irrelevante Tätigkeiten wie das Abziehen der Schlauchschellen von der Leitung werden in der obigen Auflistung nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, daß sich die Schlauchschellen durch Lösen der Arretierschraube soweit öffnen lassen, um ein Abziehen vom Schlauch ohne Kraftaufwendung garantieren zu können.

Aus der obigen Tätigkeitsbeschreibung lassen sich folgende manuelle Handlungen für die unmittelbare Interaktion mit der gegriffenen Leitung festhalten :

- Drücken
- Ziehen
- Drehen

3.3.3 Festlegung geeigneter Belastungsgrenzen

Nachdem die Materialparameter der Schläuche ermittelt worden sind, soll nun der Mensch Ziel der Betrachtungen sein. Um entscheiden zu können, ob eine Montage durchführbar ist oder nicht, müssen die Kräfte ermittelt werden, die der Mensch ausüben kann. In Kapitel 3.3.2 wurden generelle Grundtätigkeiten für den Monteur bei der Handhabung von Leitungen bestimmt. Für diese sollen im folgenden geeignete Belastungsgrenzen angegeben werden. Grundlage für diese Festlegung ist zum einen das Handbuch der Ergonomie von Herrn Schmidtke und Grone [51] und zum anderen durchgeführte Versuche.

Handbuch der Ergonomie

In dieser Quelle werden aus Reihenversuchen Maximalkräfte für verschiedene Tätigkeiten und Perzentile⁸ ermittelt. Bei diesen Versuchen wird den Probanden auf einem Bildschirm eine steigende Rampe und ihre aktuelle Kraft in einem Diagramm dargestellt. Die Testpersonen sollten nun versuchen, durch kontinuierliche Steigerung ihrer Kraft dem Verlauf der Rampe bis zu einem „nicht mehr können“ oder maximal fünf Sekunden zu folgen. Die maximal gemessene Kraft entspricht dabei der gesuchten Maximalkraft. Diese kann nur über eine sehr kurze Zeitspanne von einem Menschen gehalten werden. Soll eine Kraft über einen längeren Zeitraum gehalten oder wiederholt werden, so gelten mehrere Einschränkungen. Um eine Ermüdung des Arbeiters zu vermeiden, sind Richtwerte angegeben, die weit unterhalb der Maximalkraft liegen. In [51] wird zwischen *Dauerbetätigung*⁹ und *gelegentliche Betätigung* unterschieden. Für jede Tätigkeiten werden dabei zwei Wertepaare angegeben. *Richtwerte* geben allgemeingültige Optimalwerte an. Liegt eine Dauerbetätigung vor, so liegen die Richtwerte innerhalb des Bereichs von 1 % - 6 % der Maximalkraft der Perzentilgruppe 1. Handelt es sich um eine gelegentliche Betätigung, so sollten die Werte zwischen 2 % und 30 % der Maximalkraft der Perzentilgruppe 1 liegen. *Grenzwerte* geben Werte an, die nicht überschritten werden sollten, um eine übermäßige Belastung des Arbeiters auszuschließen. Für eine Dauertätigkeit wird in [51] die Schranke von 15 % der Perzentilgruppe 5 angegeben. Bei einer gelegentlichen Betätigung gilt die Grenze von 80 % der Perzentilgruppe 5.

Alle in [51] aufgeführten Tätigkeiten entsprechen keiner genauen Montagetätigkeit. Somit ist eine einfache Übertragung auf dem Fall der Leitungsmontage nicht zulässig. Die Werte erlauben dennoch eine grobe Richtschnur, um qualitative Aussagen treffen zu können.

Druck

Betrachtet man zunächst die Ausübung eines *Druckes*, so liefert das Handbuch der Ergonomie drei Fälle. Bei dem ersten Fall handelt es sich um den Druck der flachen Hand gegen eine senkrechte Ebene im Stehen. Bei dem zweiten Fall hockt der Proband und drückt seine flache Hand gegen eine senkrechte Ebene. Im dritten Fall sitzt der Proband auf einem Stuhl und drückt mit seiner Hand auf eine horizontale Ebene. Die Tabellen 3.6 und 3.7 geben dabei die Richt- und Grenzwerte für eine einhändige Ausübung an.

⁸Unter dem Begriff Perzentil versteht man eine Einteilung von Frauen und Männern. Ist eine Frau ein Mitglied der Perzentilgruppe 50, so bedeutet es, daß 50 % aller Frauen kleiner oder gleichgroß sind wie sie. Gehört ein Mann der Perzentilgruppe 95 an, so sind 95 % aller Männer kleiner oder gleichgroß.

⁹Eine Dauerbetätigung liegt vor, wenn die Kraft über eine Zeitspanne größer als eine Minute ununterbrochen aufgewendet werden muß.

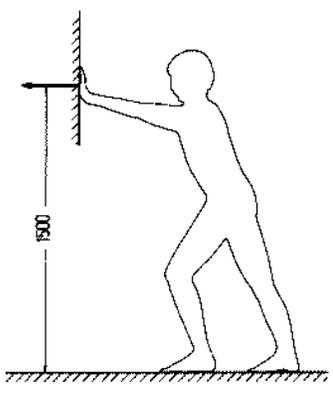


Abbildung 3.22: Druck gegen eine vertikale Wand (stehend)

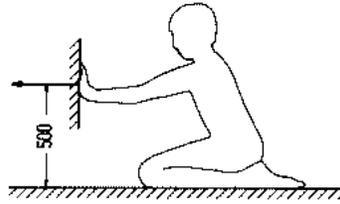


Abbildung 3.23: Druck gegen eine vertikale Wand (hockend)

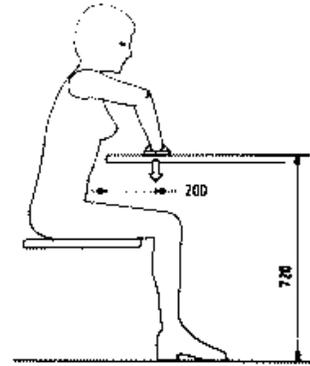


Abbildung 3.24: Druck gegen eine horizontale Wand (sitzend)

Art	Dauerbetätigung [N]		gelegentliche Betätigung [N]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
stehend	1 - 6	2 - 11	2 - 29	4 - 54
hockend	0.3 - 1.7	0.4 - 2.2	0.66 - 8.5	0.7 - 11
sitzend	0.6 - 3.6	1.4 - 8.3	1.2 - 18	2.8 - 41

Tabelle 3.6: Kräfte des Menschen für den Druck gegen eine Ebene (Richtwerte)

Art	Dauerbetätigung [N]		gelegentliche Betätigung [N]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
stehend	18	32	94	169
hockend	15	25	81	131
sitzend	16	32	85	170

Tabelle 3.7: Kräfte des Menschen für den Druck gegen eine Ebene (Grenzwerte)

Um die obigen Werte zu den zu erwartenden Belastungen einer Montagetätigkeit zu setzen, müssen zwei Fälle unterschieden werden. Bewegt der Monteur die Leitung zum Einbauort und führt sie an befestigten Bauteile vorbei, so treten Belastungen innerhalb der Richtwerte auf. Hat der Monteur die befestigte Leitung maximal gestreckt oder schiebt er die Leitung auf den entsprechenden Anschlußstutzen, so sind Belastungen innerhalb des Grenzwertbereiches zu erwarten. Da diese Tätigkeiten im Vergleich zur Bewegung der Leitung über einen wesentlichen

kürzeren Zeitraum ausgeübt werden, dürften die Werte im Bereich der gelegentlichen Betätigung liegen. Die obigen Werte wurden jedoch durch Druck mit einer flachen Hand ausgeführt. Wird eine Leitung manipuliert, so muß sie umfaßt werden. Hierdurch kann die Hand von der Leitung abrutschen. Somit ist zu erwarten, daß die Maximalkräfte der obigen Tabellen nicht erreicht werden.

Zug

Betrachten wir nun die Zugkräfte, die ein Mensch ausüben kann. Hierzu werden im Handbuch für Ergonomie drei Versuche angegeben. Im ersten Fall zieht der

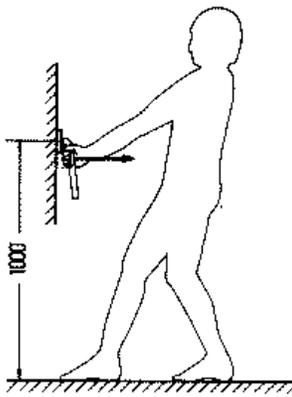


Abbildung 3.25: Zug an einem Hebel (stehend)

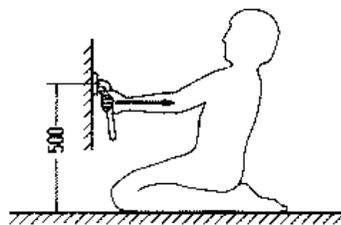


Abbildung 3.26: Zug an einem Hebel (hockend)

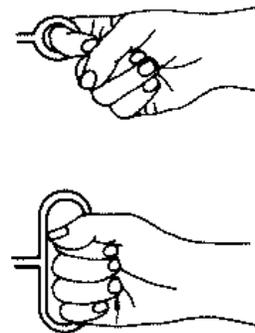


Abbildung 3.27: Zug an einem Handgriff

Mensch an einem Hebel, der orthogonal zur Zugrichtung verläuft. Der Mensch steht bei dieser Tätigkeit. Im zweiten Fall hockt der Mensch, während er an einem Hebel zieht, der ebenfalls orthogonal zur Zugrichtung verläuft. Im dritten Fall zieht der Mensch an einem Griff.

Art	Dauerbetätigung [N]		gelegentliche Betätigung [N]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
stehend	1 - 6.2	2.4 - 14	2 - 31	4.7 - 71
hockend	0.9 - 5.3	1.5 - 8.9	1.8 - 27	3 - 45
Griff	1 - 6	2 - 12	4 - 20	9 - 45

Tabelle 3.8: Kräfte des Menschen für Zug (Richtwerte)

Art	Dauerbetätigung [N]		gelegentliche Betätigung [N]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
stehend	21	41	112	218
hockend	18	22	53	89
Griff	12.5	27	67.5	143

Tabelle 3.9: Kräfte des Menschen für Zug (Grenzwerte)

Auch hier wird keine konkrete Montagesituation wiedergegeben, dennoch können diese Werte als Richtschnur verwendet werden. Da sich die zu erwartenden Kräfte für normale Tätigkeiten im Bereich der Richtwerte befinden werden. Lediglich beim Abziehen eines Schlauches von einem Anschlußstutzen sind Kräfte zu erwarten, die in die Nähe der Grenzwerte gelangen. Diese Werte dürften aber auch wie beim Druck nicht erreicht werden. Zum einen ist die Zugrichtung nicht orthogonal zum Handgriff, so daß ein Abrutschen der Hand wahrscheinlicher ist. Des weiteren ist es dem Probanden in den obigen Fällen möglich, sein ganzes Körpergewicht einzusetzen. Dies ist bei der Handhabung in einem Motorraum nicht möglich.

Drehung

Bei der letzten Tätigkeitsart handelt es sich um die Biegung und Torsion der Leitung. Bei dieser Tätigkeit überträgt der Mensch ein Drehmoment auf eine Leitung. Für den Fall einer Drehmomentübertragung sind im Handbuch der Ergonomie, zwei Fälle zu finden. Im ersten Fall überträgt der Mensch die Kraft mit Hilfe eines Schraubendrehers. Im zweiten Fall erfolgt die Kraftausübung an einem T-Griff in der Vertikalebene. Wie bei den vorherigen Tätigkeiten sollen auch hier die Richt- und Grenzwerte in Tabellen 3.10 und 3.11 angegeben werden.

Art	Dauerbetätigung [Nm]		gelegentliche Betätigung [Nm]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
Schraubendreher	0.01 - 0.07	0.02 - 0.12	0.02 - 0.35	0.04 - 0.59
T-Griff	0.05 - 0.3	0.1 - 0.6	0.15 - 1.0	0.3 - 1.9

Tabelle 3.10: Kräfte des Menschen für Drehung (Richtwerte)

Der Anwendungsfall der Kraftübertragung mit Hilfe eines Schraubendrehers entspricht der Torsion des Schlauches, da in beiden Fällen das Drehmoment in der Längsachse des gegriffenen Objektes ausgeübt wird. Die Drehung des T-Griffes

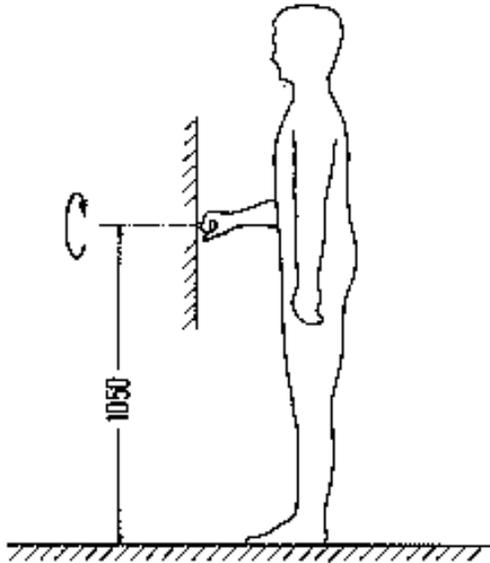


Abbildung 3.28: Drehung an einem T-Griff



Abbildung 3.29: Drehung eines Schraubendrehers

Art	Dauerbetätigung [Nm]		gelegentliche Betätigung [Nm]	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer
Schraubendreher	0.22	0.35	1.2	1.8
T-Griff	0.6	1.2	3.2	6.4

Tabelle 3.11: Kräfte des Menschen für Drehung (Grenzwerte)

entspricht der reinen Biegung der Leitung orthogonal zu ihrer Hauptachse. Die Tätigkeiten der Leitungstorsion und Biegung sind jedoch nie Gründe für das Scheitern eines Einbaus. Kritische Fälle sind das Auf- und Abschieben einer Leitung auf den entsprechenden Anschlußstutzen. Aus diesem Grund können die obigen Werte als grobe Richtschnur für die zu erwartenden Drehmomente verwendet werden. Ihre Verwendung für qualitative Aussagen ist jedoch nicht notwendig.

Aufschiebversuche

Neben der Auswertung von Quelle [51] sind, wie bereits erwähnt, Aufschiebversuche durchgeführt worden. Diese werden durch folgende Überlegungen motiviert. Gesucht sind maximale Belastungen, anhand derer entschieden wird, ob eine Montage durchführbar ist oder nicht. Die reine Bewegung eines Schlauches sollte keine Belastungen liefern, die eine Montage undurchführbar werden lassen.

Ist eine Leitung hingegen an einem Ende befestigt und wird am anderen Ende gedehnt, so muß bei einer bestimmten Kraft entschieden werden, ob diese Kraft durch den Menschen aufbringbar ist. In dem vorherigen Unterkapitel wurde versucht, hierfür grobe Grenzen zu ermitteln. Ein weiterer kritischer Punkt ist das Befestigen der Leitungen an den entsprechenden Anschlußstutzen. Aus diesem Grund wird anhand von Versuchen Belastungen für diese Montagetätigkeiten ermittelt. Hierzu wird ein Anschlußstutzen in eine Zugmaschine eingespannt. Ein Proband muß nun mit einer Hand versuchen, stehend den Schlauch vertikal auf den Stutzen zu schieben. Um ein Abknicken der Leitung zu verhindern, greift der Proband den Schlauch an dem aufzuschiebenden Ende. Mit Hilfe der Zugmaschine wird die Kraft ermittelt, die der Mensch benötigt, die Leitung aufzuschieben. Bei allen Versuchen wird versucht, die maximale Belastung zu ermitteln. Aus diesem Grund wird keine Schmierung eingesetzt, die das Reibungsverhalten der beiden Werkstoffe beeinflußt. Des weiteren bestehen alle Anschlußstutzen aus Kunststoff, so daß eine Werkstoffpaarung Elastomer - Kunststoff vorliegt. Die wirkenden Kräfte resultieren dabei aus einer Addition zwischen Reibungskomponenten und der Aufweitung der Leitung. Da sich die Leitung nur minimal aufweiten muß, wird davon ausgegangen, daß die Kraft nahezu ausschließlich aus der Reibung resultiert.

Der erste Versuch wird mit Schlauch 3 durchgeführt. Hierbei wird, wie in Bild 3.31 dargestellt, eine maximale Belastung von 300 N erreicht. Diese Werte treten jedoch nur während des Abziehens des Schlauches auf. Dies ist in der besonderen Form des Anschlußstutzens begründet. Wie in Bild 3.30 zu sehen ist, verdickt sich der Stutzen und setzt somit dem Schlauch einen größeren Widerstand entgegen, wenn er abgezogen wird. Dieses Verhalten ist gewollt, da hierdurch die Festigkeit der Verbindung erhöht wird. Ein weiteren Versuch wird mit Schlauch

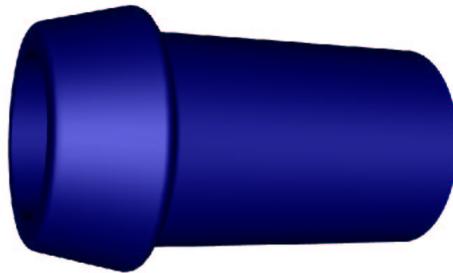


Abbildung 3.30: Beispiel eines Anschlußstutzens

5 durchgeführt. Hier soll untersucht werden, inwieweit sich eine unterschiedliche Aufschiebgeschwindigkeit, auf die zu erwartende Kraft auswirkt. Bild 3.32 zeigt, daß bei einer größeren Aufschiebgeschwindigkeit bis zu 30 % höhere Belastungen entstehen. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt besteht in einer

Überlagerung zweier Phänomene. Zum einen existiert, wie bei dem langsamen Aufschieben, ein Reibungseinfluß. Schiebt man die Leitung jedoch sehr schnell auf den Stützen, so kann sich die eingeleitete Beschleunigung auf Grund der großen Reibung nicht so schnell innerhalb der Leitung verteilen. Somit überlagert sich der Reibungseinfluß mit einer Stauchung und einem damit verbundenen höheren Widerstand. Eine andere Erklärung wäre ein nichtlineares Reibverhalten der vorliegenden Werkstoffpaarung, bei dem der Reibungskoeffizient bei steigender Geschwindigkeit erhöht wird. Dieses Phänomen wird im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter untersucht, da die Erscheinung über die Zielsetzung der Arbeit, eine Simulation flexibler Bauteile für eine Konzeptüberprüfung durchzuführen, hinausgeht.

Abbildung 3.31: Aufschiebversuche mit Schlauch 3

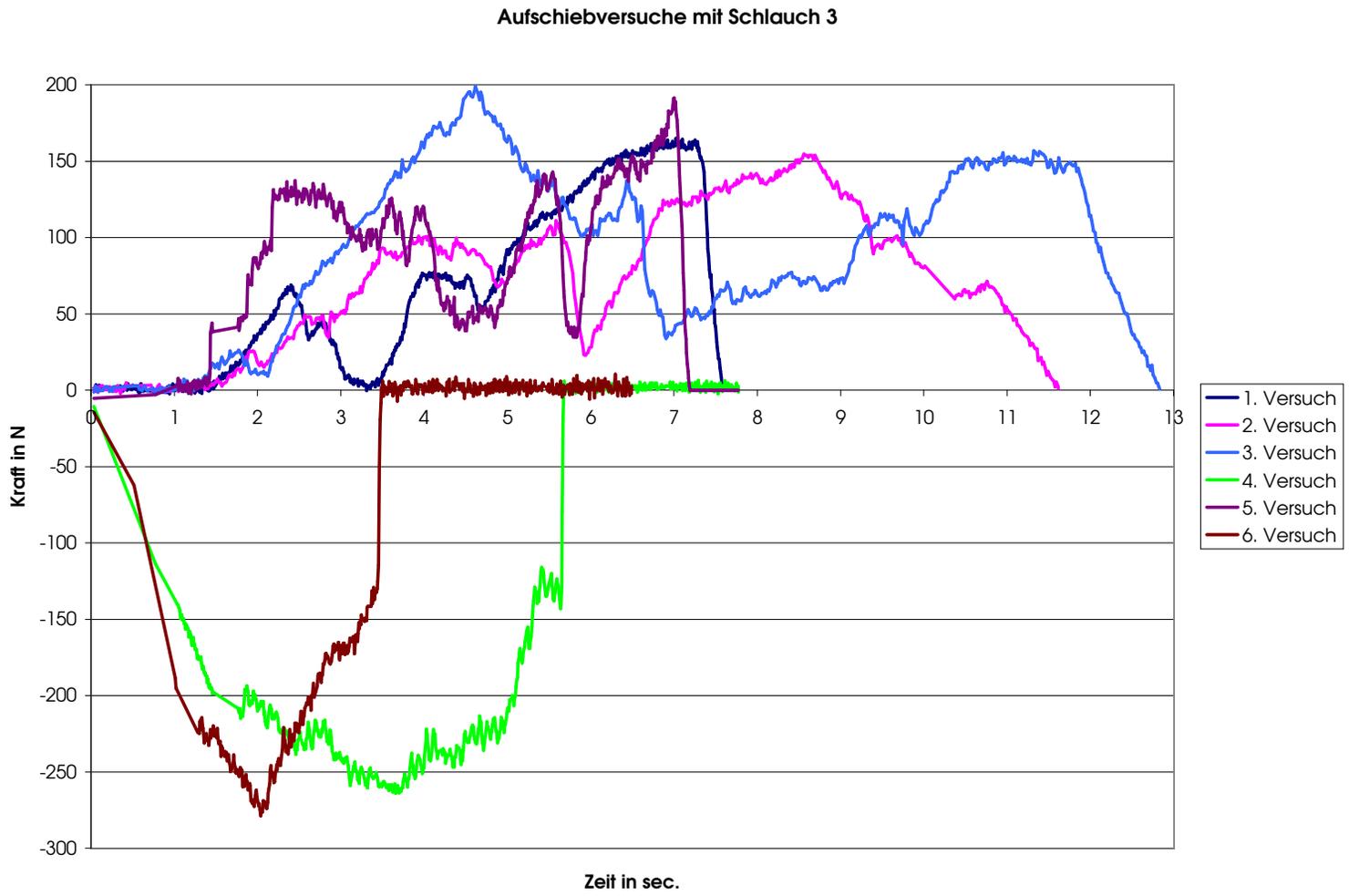
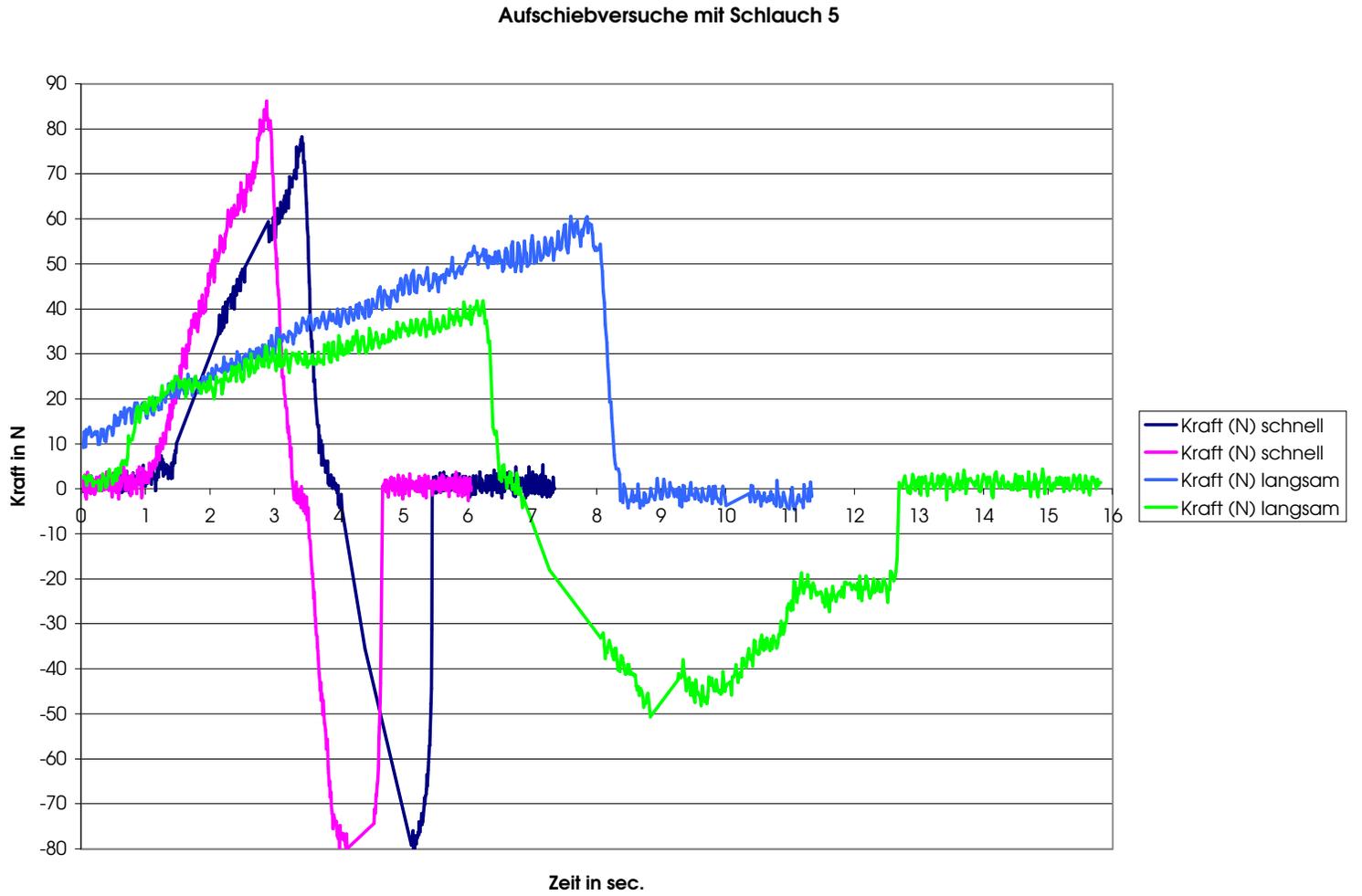


Abbildung 3.32: Aufschiebversuche mit Schlauch 5



3.4 Bestimmung des Anforderungsprofils

Im folgenden Unterkapitel sollen die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zusammengefaßt und daraus Kriterien an das Simulationsmodell erstellt werden. Die Bedingungen richten sich dabei nach Randbedingungen, die sich aus dem Einsatz der VR ergeben. Des weiteren werden die erzielten Ergebnisse der Materialvermessung und der daraus resultierenden Leitungsdeformationen ausgewertet. Als letzte Bedingung ergeben sich die ermittelten Kräfte und Handlungen der Montagetätigkeiten.

3.4.1 Bedingungen aus dem Einsatz von VR

Unter dem Begriff der virtuellen Realität versteht man, wie bereits erwähnt, eine Mensch-Maschine Schnittstelle, bei der der Mensch Operationen ähnlich seinem natürlichen Umfeld ausführen kann. Dies bedeutet, daß das System innerhalb von wenigen Millisekunden dem Menschen eine Antwort geben muß. Diese als Echtzeitbedingung bekannte Forderung muß nach der Integration mehrerer Simulationsbestandteile garantiert werden. Hierdurch muß das gesuchte Berechnungsmodell in der Lage sein, innerhalb von maximal 100 Millisekunden eine Berechnung abzuschließen. Durch eine geeignete Integration in das VR System können so Updateraten von 10 Bildern pro Sekunde erreicht werden.

Die Echtzeitbedingung erfordert einen polygonalen Aufbau der dargestellten Simulationsdaten, da heutige Rechner lediglich Polygone in ausreichender Geschwindigkeit berechnen und darstellen können.

Damit ein Mensch mit den dargestellten Daten interagieren kann, z. B. einen Schlauch greifen und ihn an einen Anschlußstutzen zu befesten, muß in dem VR System eine Kollisionserkennung integriert sein. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden verwendet, um zu entscheiden, ob eine Leitung gegriffen wird oder nicht. Kollisionsberechnungen können erheblich beschleunigt werden, falls sich die Form des polygonalen Netzes der Objekte nicht verändert (vgl. [56] und [57]). In diesem Fall werden im Vorfeld der Anwendung Vorberechnungen durchgeführt, die die Daten für die eingesetzte Kollisionserkennung optimieren. Da wir es in der angestrebten Anwendung mit deformierbaren Objekten zu tun haben, sollte zumindest angestrebt werden, die Objekte aus starren Grundkörpern aufzubauen. Dies ermöglicht die Optimierung der einzelnen Grundkörper und die Berücksichtigung einer gewissen Objektdeformation.

Zusammenfassend lassen sich folgende Randbedingungen formulieren :

- Echtzeitfähigkeit des Berechnungsmodells
- Polygonaler Aufbau der dargestellten Daten
- Aufbau des deformierbaren Objektes aus mehreren starren Primitiven

3.4.2 Auswertung der Materialvermessung

Aus der Vermessung der Leitungen lassen sich folgende Punkte festhalten. Die in Kapitel 3.1.2 festgehaltenen Daten für die Beschreibung des Deformationsverhaltens eines Objektes **Elastizitätsmodul**, **Querkontraktionszahl**, **Dichte** und **Materialvolumen** sollten als Eingabedaten verarbeitet werden können. Die durchgeführten Versuche ergaben, daß eine Unterscheidung zwischen dem Druck- und Zuglastfall notwendig ist. In Kapitel 3.3.2 wurde festgestellt, daß Veränderungen des Leitungsdurchmessers bei der Analyse der Montagen eine sehr untergeordnete Rolle spielen. Wichtige Kriterien sind die globale Lage der Leitung und die wirkenden Kräfte an den manipulierten Stellen.

Zusammenfassend ergeben sich somit folgende Punkte :

- Eingabedaten sind : Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Dichte und Materialvolumen, gegeben durch Innen- und Außendurchmesser und der Länge der Leitung
- Unterscheidung zwischen Druck- und Zugelastizitätsmodul
- Veränderung des Leitungsdurchmessers spielen keine Rolle
- Die globale Lage der Leitung muß berechnet werden können
- Kräfte an den manipulierten Stellen müssen ausgegeben werden

3.4.3 Die menschlichen Tätigkeiten und Belastungsgrenzen

Als zu simulierende Tätigkeiten sind die Bewegung der Leitung durch Drücken, Ziehen und Biegen, das Befestigen der Leitung mit Hilfe von Leitungsclipsen und das Aufschieben oder Abziehen der Leitung von dem entsprechenden Anschlußstutzen festzuhalten. Die Manipulation der Leitung erfolgt durch die menschliche Hand, d.h. die direkte Manipulation der Leitung erfolgt ohne Hilfsmittel. Bei der Montage kann es zu Kollisionen mit starren Objekten der Umgebung und anderen Leitungen kommen. Die ermittelten Belastungsgrenzen müssen verarbeitet werden, um zu entscheiden, ob eine Montage durchführbar ist oder nicht.

Zusammenfassend ergeben sich somit folgende Punkte :

- Bewegen der Leitung durch Drücken, Ziehen oder Biegen
- Befestigung der Leitung mit Hilfe von Leitungsclipsen
- Aufschieben oder Abziehen der Leitung auf einen zylindrischen Anschlußstutzen
- direkte Manipulation der Leitung ohne Hilfsmittel

- Verarbeitung von Kollisionen mit starren und deformierbaren Objekten der Umgebung
- Berücksichtigung von Belastungsgrenzen
- Durch die, im Aufschiebeversuch ermittelten, Belastungsgrenzen zeigte sich in den Zug- und Druckversuchen, daß sich die Leitungsverformung innerhalb des linear-elastischen Bereiches bewegt.

Nachdem die zu simulierenden Montagesituationen ausreichend definiert sind, werden im nächsten Kapitel die hierzu notwendigen mathematischen Grundlagen beschrieben.

Kapitel 4

Mathematische Grundlagen zur Simulation einer Leitung

Innerhalb dieses Kapitels wird der gewählte Lösungsansatz zur Simulation einer Leitung vorgestellt. Aus der Menge der Finite-Element-Typen wird ein geeignetes Element ausgewählt und seine Möglichkeiten zur Simulation einer Leitung beschrieben.

4.1 Auswahl des Simulationsverfahrens

Rekapitulieren wir am Anfang dieses Kapitels nochmals die Ergebnisse des dritten Kapitels. Dabei läßt sich folgendes festhalten :

- Bei den zu simulierenden Objekten handelt es sich um Leitungen.
- Diese besitzen einen kreisförmigen Querschnitt und einen meist gekrümmten zylindrischen Verlauf.
- Entscheidend ist die globale Lage der Leitung. Lokale Eindrückungen können vernachlässigt werden.
- Die wirkenden Deformationskräfte müssen bestimmt werden.

Um das Verhalten und die Eigenschaften eines kontinuierlichen Objektes effizient zu beschreiben, wird es meist an spezifischen Stellen diskretisiert. Diese Idee bestimmt die meisten Ansätze aus Kapitel 2.1. Der Nachteil der dort beschriebenen Ansätze besteht entweder in ihrer unzureichenden Genauigkeit, die realen physikalischen Eigenschaften des Objektes wiederzugeben, oder in ihrer mangelnden Echtzeitfähigkeit. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel nach einem anderen Ansatz gesucht werden.

Eine verbreitete Methode zur Berechnung von physikalischem Objektverhalten ist das Finite Elementverfahren. Hierbei wird das komplexe, zu simulierende,

Objekt durch kleinere Objekte diskretisiert. Diese lassen sich durch einfachere Methoden berechnen. Jedes Element gibt dabei die physikalischen Eigenschaften eines Objektbereiches wieder. Auf Grund der Diskretisierung werden die Elemente auch als finite Elemente bezeichnet. Diese Technik findet heutzutage z.B. in der Berechnung von Fahrzeugcrashversuchen, der Temperaturverteilung, der Strömungsberechnung oder der Stabilitätsberechnung von Gegenständen und Gebäuden ihren Einsatz. Die weite Verbreitung ist dabei auf die recht große Sicherheit zurückzuführen, mit der die gewonnenen Ergebnisse auf die Realität übertragen werden können. Diese Eigenschaft soll auch im Rahmen dieser Arbeit ausgenutzt werden.

Entsprechend der unzähligen Anwendungsfelder sind im Laufe der Zeit verschiedene Finite Elementtypen entwickelt worden. So gibt es eindimensionale Objekte, wie Balken oder Stäbe, zweidimensionale Objekte, wie Platten oder Schalen und dreidimensionale Objekte, wie Tetraheder oder Quader.

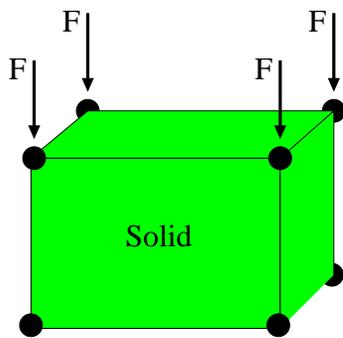


Abbildung 4.1: Beispiel eines 3D Objektes

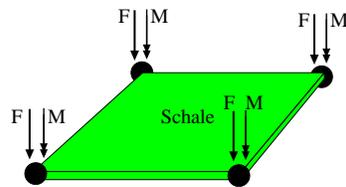


Abbildung 4.2: Beispiel eines 2D Objektes

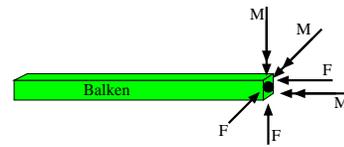


Abbildung 4.3: Beispiel eines 1D Objektes

Aus diesen soll im folgenden der geeignete Elementtyp ausgewählt und für die speziellen Bedingungen der Leitungssimulation erweitert werden. Zunächst werden die verschiedenen Finite Elemente vorgestellt.

- **3D Elemente** : Hierbei handelt es sich, wie in Bild 4.1 dargestellt, um Solids. An den Eckpunkten der Elemente sind Knoten platziert. Diese nehmen die Kräfte auf, um so die physikalischen Eigenschaften zu simulieren. Der Vorteil dieser Elemente ist die Eigenschaft, ihr Volumen zu erhalten. Dieser Elementtyp wird häufig bei der Simulation von dickwandigen Objekten wie z.B. einem Motorblock verwendet. Für die Verwendung dieses Typs muß beachtet werden, daß die längste Seite höchstens 10 mal so lang sein darf wie die kürzeste. Bei sehr langen Objekten bringt dies den Nachteil einer enormen Anzahl an Elementen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß

sie nicht in der Lage sind, Momente aufzunehmen. Um dennoch das Biegeverhalten eines Objektes abbilden zu können, muß man laut [63] und [64] in der Biegerichtung 3 mal so viele Elemente verwenden. Bei einem Beispiel Schlauch der Länge 20 cm und einer Wandstärke von 0.6 cm müßten bei einer Querschnittsdiskretisierung von 6 Elementen mindestens 180 Elemente verwendet werden. Diese Anzahl läßt in Verbindung mit einer recht komplexen Berechnung den Einsatz in einer Echtzeitumgebung in weite Ferne rücken.

- **2D Elemente** : Hierbei handelt es sich um Elemente bei denen, wie in Bild 4.2 dargestellt, eine Dimension sehr viel kleiner ist als die verbleibenden. So ist bei einem Schalenelement die Dicke sehr viel kleiner als ihre Kantenlängen. Ihre Dicke wird dabei im Materialmodell abgebildet. Sie sind im Gegensatz zu den 3D Elementen in der Lage, sowohl Kräfte als auch Momente aufzunehmen. Dies verringert für das obige Beispiel die Anzahl der notwendigen Elemente auf 60. Man ist dabei in der Lage, sowohl globale Deformationen als auch lokale Eindrückungen zu simulieren. Wie jedoch im vorherigen Kapitel festgehalten, ist dieses Verhalten bei einer manuellen Montage nicht von Bedeutung.
- **1D Elemente** : Bei diesen Elementen sind, wie in Bild 4.3 dargestellt, zwei Ausdehnungen klein gegenüber der dritten. So ist zum Beispiel bei einem Balken der Querschnitt klein gegenüber der Länge. Die Form des Querschnitts geht lediglich über die Flächenträgheitsmomente in die Berechnungen ein. Elemente dieses Typs sind in der Lage, sowohl Kräfte als auch Momente aufzunehmen. Somit kann man auch das Biegeverhalten eines Objektes simulieren.

Betrachten wir eine Leitung, so kann festgestellt werden, daß die Ausmaße des Querschnitts klein gegenüber der Länge ist. Da bei der Simulation von manuellen Montagevorgängen lediglich die globale Objektdeformation interessant ist, erscheint die Verwendung eines eindimensionalen Elementes als ausreichend. Hierbei können wenige Elemente entlang des Leitungsverlaufes verteilt werden. Man erhält somit eine Diskretisierung der Leitung aus zunächst geraden Teilstücken. Da mit VR eine konzeptionelle Entscheidung getroffen werden soll, ist diese Form der Diskretisierung ausreichend. Durch die geringe Anzahl der zuberechnenden Elemente erscheint der Einsatz in einer Echtzeitumgebung am geeignetsten.

Neben den reinen Elementtypen spielen nicht-lineare Einflüsse bei der Auswahl eine wichtige Rolle. Bei der Simulation mit Hilfe von finite Elementen können die folgenden Nicht-Linearitäten berücksichtigt werden :

- Material
- Geometrie

- große Spannungen

Bereits in Kapitel 3.4.3 wurde erwähnt, daß die Simulation eines linear-elastischen Materials ausreichend ist. Geometrische Nicht-Linearitäten treten lediglich in Form großer Rotationen auf, da innerhalb einer flexiblen Leitung nur ein einziges Material verwendet wird und die Leitungen keine starken Knicke aufweisen, da sonst eine Durchleitung des gewünschten Stoffes nicht gewährleistet ist. Die Berücksichtigung großer Spannungen erscheint nicht notwendig, da die Leitung durch ausreichend viele Elemente diskretisiert werden muß, um einen visuell realistischen Eindruck zu erhalten, und die Belastungsgrenze des Monteurs eine starke Verformung der Leitung ausschließt.

4.1.1 Der allgemeine Balken

Zunächst soll der Aufbau und die mechanischen Eigenschaften eines allgemeinen Balkens beschrieben werden. Zur besseren Verdeutlichung eines Balkens soll Bild 4.4 und die an Dubbel [41] angelehnte Definition dienen.

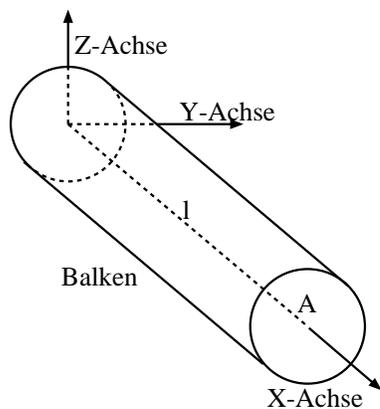


Abbildung 4.4: Ein Balkenelement

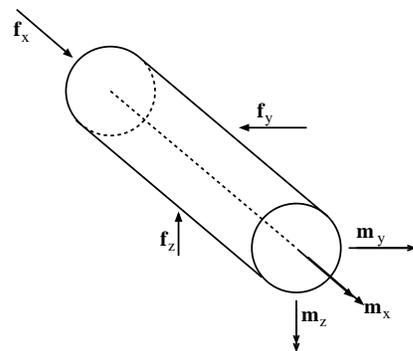


Abbildung 4.5: Die Kräfte und Momente am Balken

Definition 7 (Allgemeiner Balken) Bei einem Balken handelt es sich um ein eindimensionales Element mit beliebigem Querschnitt A und fester Länge l . Die X -Achse ist sowohl im undeformierten als auch im deformierten Zustand durch die kürzeste Verbindung beider Endpunkte gegeben. Die Y - und Z -Achse stehen orthogonal zur X -Achse.

Die Deformation eines Balkens ergibt sich, entsprechend Bild 4.5, aus Längskräften \mathbf{f}_x , Querkräften \mathbf{f}_y und \mathbf{f}_z , Biegemomenten \mathbf{m}_y und \mathbf{m}_z und Torsionsmomenten \mathbf{m}_x . Bei Biegungen des Balkens um die Y - oder Z -Achse wird davon ausgegangen, daß der Querschnitt des Balkens auch im deformierten Zustand eben bleibt, d.h. es existiert ein Bereich innerhalb des Balkens bei dem sich keine

Dehnung einstellt (s. Bild 4.6). Dieser Bereich wird im allgemeinen als **neutrale Faser** bezeichnet. Es handelt sich hierbei um die so genannte „Bernoulli-Hypothese“. Die Durchbiegung des Balkens wird als Biegelinie bezeichnet. Sie ist durch die Lage der Schwerpunkte aller zur Längsachse des Balkens orthogonalen Schnittflächen gegeben.

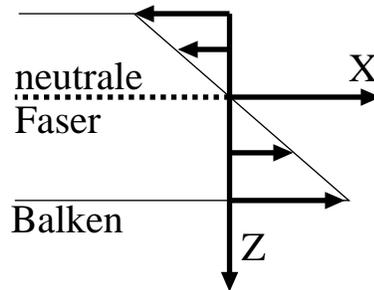


Abbildung 4.6: Die neutrale Faser eines Balkens

Für die Berechnung eines allgemeinen Balkens werden folgende Belastungen unterschieden :

- Längskraft
- Querkraft
- Biegemoment
- Torsionsmoment

Treten mehrere Belastungen (z.B. Biegemomente und Querkräfte) gleichzeitig am Balken auf, so gilt das Superpositionsprinzip, d.h. die einzelnen Wirkungen der Belastungen können überlagert werden.

Es soll nun auf die einzelnen Fälle etwas genauer eingegangen werden. Diese werden in Anlehnung an [47] wiedergegeben.

Längskraft

Die Längskraft f_x eines Balkens wird auch als Normalkraft bezeichnet. Sie verläuft parallel zur X-Achse des Balkens und führt zu einer Dehnung oder Stauchung des Balkens. Unter Einbeziehung des linearen Materialgesetzes ergibt sich die Kraft aus der Spannung und Dehnung durch :

$$f_x = \frac{\Delta l \cdot A_0 \cdot E}{l_0} \quad (4.1)$$

Querkraft

Unter dem Begriff der Querkraft versteht man eine Kräfteinleitung \mathbf{f}_y oder \mathbf{f}_z orthogonal zur Längsachse des Balkens (s. Bild 4.5). Hierdurch wird innerhalb eines an einem Ende eingespannten Balkens ein Biegemomentverlauf der Art :

$$\mathbf{m}_y(x) = -(l - x)\mathbf{f}_y \quad (4.2)$$

erzeugt. Nimmt man, wie in Bild 4.7 gezeigt, ein kurzes Balkenstück der Länge

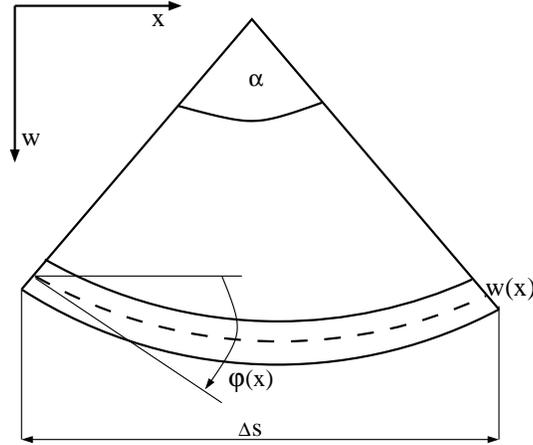


Abbildung 4.7: Die Biegung \mathbf{m} am Balken

Δs heraus, so ergibt sich die Biegelinie als Kreisbogen mit dem Zentriwinkel α . In diesem Fall ist das Biegemoment \mathbf{m}_y und die Biegesteifigkeit EI_{yy} in etwa konstant, und es gilt für den Biegeradius ρ :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\mathbf{m}_y}{EI_{yy}} \quad (4.3)$$

Sei nun φ der Biegegrad und w die Biegelinie, so gilt bei einem kleinen Biegegrad $|\varphi| \ll 1$ die Beziehung $\varphi = w'$. Weiterhin gilt hierbei :

$$\varphi = -\frac{1}{\rho} \quad (4.4)$$

Insgesamt ergibt sich die Biegelinie somit zu :

$$w''(x) = -\frac{\mathbf{m}_y(x)}{EI_{yy}} \quad (4.5)$$

Setzt man eine Durchbiegung und einen Biegegrad am eingespannten Ende von 0 voraus, so ergibt sich φ zu :

$$\varphi(x) = -\int_0^x \frac{\mathbf{m}_y(\xi)}{EI_{yy}} d\xi \quad (4.6)$$

Die Biegelinie ergibt sich schließlich durch Integration von $\varphi(x)$ zu :

$$w(x) = \int_0^x \varphi(\xi) d\xi \quad (4.7)$$

Die Durchbiegung am freien Ende des Balkens ergibt sich somit zu :

$$w(l) = \frac{\mathbf{f}_y l^3}{3EI_{yy}} \quad (4.8)$$

Biegemoment

Durch die Einleitung eines Biegemomentes, senkrecht zur Längsachse des Balkens, wird eine Biegung, wie in Bild 4.7 gezeigt, generiert. Die Biegelinie $w(x)$ ist, wie oben bereits erwähnt, direkt von dem Biegemoment abhängig. Unter der Annahme eines konstanten Momentes entlang der X-Achse, ergibt sich die Durchbiegung somit zu :

$$w(l) = \frac{\mathbf{m}_y l^2}{2EI_{yy}} \quad (4.9)$$

Torsion

Unter der Torsion versteht man die Drehung um die X-Achse des Balkens. Dadurch treten innerhalb des Balkens Spannungen entlang der Längsachse auf. Setzt man einen kreisförmigen Querschnitt des Balkens voraus, so kommt es bei einem rechteckigen Ausschnitt in Richtung der X-Achse zu Verzerrungen. Diese ergeben sich aus :

$$\tau = Gr\varphi' \quad (4.10)$$

Hierbei ist r der Abstand zur Drehachse des Balkens, φ' der Drehwinkel. Unter Verwendung des polaren Flächenmomentes zweiten Grades

$$I_p = \int_A r^2 dA \quad (4.11)$$

ergibt sich die Schubspannung aus dem Torsionmoment \mathbf{m}_x zu :

$$\tau = \frac{\mathbf{m}_x}{I_p} r \quad (4.12)$$

4.1.2 Verallgemeinerungen für dreidimensionale Balken

Nachdem die allgemeinen mechanischen Grundlagen für Balken dargelegt sind, werden im folgenden verschiedene dreidimensionale Balken vorgestellt. Die Ausführungen lehnen sich dabei an Crisfield [66] an. Die dortigen dreidimensionalen nicht-linearen Balkenmodelle werden kurz mit ihren Eigenschaften vorgestellt. Anschließend werden gegebene Zusammenhänge und Beziehungen zur gesuchten Anwendung dargestellt.

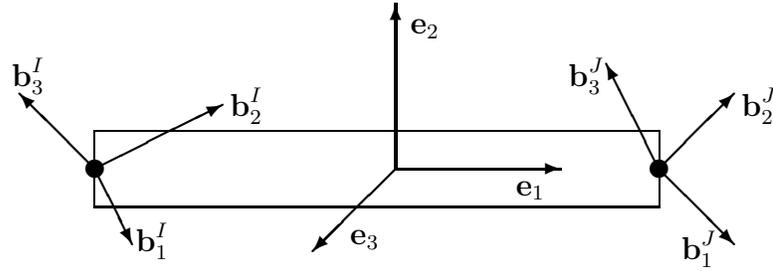


Abbildung 4.8: Beispiel eines dreidimensionalen Balkens

Allgemeine dreidimensionale Balkenelemente

Alle folgenden Balkenelemente haben die Eigenschaft, daß sie aus mindestens zwei Knoten zusammengesetzt sind. Jeder Knoten besitzt dabei 6 Freiheitsgrade, so daß er sowohl einer Translation als auch einer Rotation erfahren kann. Die ersten beiden Balkenelemente gehen von der Bernoulli-Hypothese aus und beschränken sich auf kleine Dehnungen. Das letzte Balkenelement ermöglicht die Einbeziehung von großen Deformationen. Entscheidend bei allen ist jedoch die Behandlung großer Rotationen, worauf im folgenden ein besonderes Augenmerk gelegt werden wird.

Um den einzelnen Knoten eine Rotation zu ermöglichen, ist die Definition von Knotenkoordinatensystemen notwendig. Zusätzlich wird in den folgenden Formulierungen noch ein Elementkoordinatensystem eingeführt. Das Balkenelement ergibt sich somit gemäß Bild 4.8.

Balkenelement nach Crisfield Dieses Balkenmodell beruht auf Arbeiten von Crisfield und Cole ([75], [76] und [77]). Zunächst soll die Berechnung der einzelnen Koordinatensysteme beschrieben werden, die wie in Bild 4.8 angeordnet sind. Da sich in den Endknoten die Masse des Balkens vereint, ergeben sich die Koordinatensysteme der Endknoten aus den Eigenvektoren der Trägheitstensoren. Ihre Koordinatensysteme werden mit Hilfe der folgenden Gleichung erneuert :

$$\mathbf{B}_{I,n} = \Delta \mathbf{T}(\Delta \boldsymbol{\alpha}_I) \mathbf{B}_{I,n-1} \quad (4.13)$$

Hierbei ist $\Delta \mathbf{T}$ eine Rotationsmatrix in Form einer Rodrigues Formel wie in Gleichung A.14 angegeben. Hierdurch ist es möglich, auch große Rotationen korrekt zu behandeln. $\Delta \boldsymbol{\alpha}$ ist dabei der Rotationsvektor des jeweiligen Knotens I oder J . Was nun das Elementkoordinatensystem angeht, so ist die X-Achse \mathbf{e}_1 die kürzeste Verbindung zwischen den beiden Balkenendpunkten. Die Achsen \mathbf{e}_2 und \mathbf{e}_3 ergeben sich aus der Orientierung der beiden Knotenkoordinatensysteme \mathbf{B}_I

und \mathbf{B}_J . Hierzu verwendet man eine Matrix $\Delta\mathbf{R}$, die sich als Transformationsmatrix zwischen beiden Knotenkoordinatensystemen ergibt, es gilt :

$$\Delta\mathbf{R}(\gamma) = \mathbf{B}_J\mathbf{B}_I^T \quad (4.14)$$

Um das Elementkoordinatensystem bei jedem Schritt anzupassen wird das arithmetische Mittel der beiden Balkenkoordinatensysteme gebildet. Dieses ergibt sich zu :

$$\bar{\mathbf{R}} = \Delta\mathbf{R} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \mathbf{B}_I = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3] \quad (4.15)$$

Um die Achsen \mathbf{e}_2 und \mathbf{e}_3 anzupassen, muss $\bar{\mathbf{R}}$ erst auf \mathbf{e}_1 gedreht werden. Die neuen Lagen von \mathbf{e}_2 und \mathbf{e}_3 ergeben sich schließlich aus :

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{r}_2 - \frac{\mathbf{r}_2^T \mathbf{e}_1}{1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{r}_1} (\mathbf{e}_1 + \mathbf{r}_1) \quad (4.16)$$

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{r}_3 - \frac{\mathbf{r}_3^T \mathbf{e}_1}{1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{r}_1} (\mathbf{e}_1 + \mathbf{r}_1) \quad (4.17)$$

Hierbei wird angenommen, daß die Rotationen moderate Größe aufweisen. Sind alle Koordinatensysteme bekannt, so können die Knotenrotationen Θ_1 bis Θ_6 im Elementkoordinatensystem durch folgende Formeln angegeben werden :

$$\sin(\Theta_1) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{I,2}^T \mathbf{e}_3 - \mathbf{b}_{I,3}^T \mathbf{e}_2] \quad (4.18)$$

$$\sin(\Theta_2) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{I,1}^T \mathbf{e}_2 - \mathbf{b}_{I,2}^T \mathbf{e}_1] \quad (4.19)$$

$$\sin(\Theta_3) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{I,1}^T \mathbf{e}_3 - \mathbf{b}_{I,3}^T \mathbf{e}_1] \quad (4.20)$$

$$\sin(\Theta_4) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{J,2}^T \mathbf{e}_3 - \mathbf{b}_{J,3}^T \mathbf{e}_2] \quad (4.21)$$

$$\sin(\Theta_5) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{J,1}^T \mathbf{e}_2 - \mathbf{b}_{J,2}^T \mathbf{e}_1] \quad (4.22)$$

$$\sin(\Theta_6) = \frac{1}{2} [\mathbf{b}_{J,1}^T \mathbf{e}_3 - \mathbf{b}_{J,3}^T \mathbf{e}_1] \quad (4.23)$$

Es ist möglich, die obigen Gleichungen auf folgende Weisen zu vereinfachen :

- Bei der Berechnung der lokalen Rotationswinkel kann unter Annahme kleiner Rotationen der Sinus entfallen.
- Die Gleichung 4.16 zur Bestimmung der Balkenkoordinatenachse \mathbf{e}_2 kann bei Annahme kleiner Rotationen auf folgende Weise vereinfacht werden :

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{r}_2 - (\mathbf{r}_2^T \mathbf{e}_1) \mathbf{e}_1 \quad (4.24)$$

Hierbei muß der Vektor \mathbf{e}_3 aus dem Kreuzprodukt der beiden Vektoren \mathbf{e}_1 und \mathbf{e}_2 gebildet werden, um ein orthogonales Koordinatensystem zu erhalten.

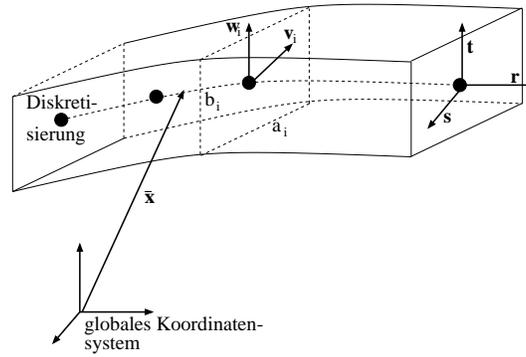


Abbildung 4.9: Aufbau des Timoshenko Balkens.

Balkenmodell nach Simo und Vu-Quoc Dieses Balkenmodell, aus [74], besitzt die gleichen Freiheitsgrade wie das vorherige Balkenmodell. Es ist jedoch in der Lage, moderate Dehnungen zu behandeln. Ein weiterer Unterscheid liegt in der Definition des Elementkoordinatensystems. Bei den Rotationen werden nicht mehr die Knoten- und Elementkoordinatensysteme angepaßt, sondern lediglich ein zentrales Koordinatensystem \mathbf{E} in der Mitte des Elementes. Geht man davon aus, daß die Knotenrotationen $\delta\alpha_I$ und $\delta\alpha_J$ bekannt sind, so ergibt sich die Rotation von \mathbf{E} als arithmetisches Mittel der beiden Knotenrotationen zu :

$$\mathbf{E}_n = \Delta \mathbf{T} \left(\frac{\alpha_I + \alpha_J}{2} \right) \mathbf{E}_{n-1} \quad (4.25)$$

Balkenmodell nach Timoshenko Dieses Balkenmodell nach [66] und [78] eignet sich sehr gut für dicke Balken. Die Beschreibung des Balkens erfolgt hier im Gegensatz zu den vorherigen als Kontinuum. Man besitzt somit nicht mehr Aussagen, an den beiden Endpunkten des Balkens, sondern kann beliebig viele Diskretisierungen festlegen. Für diese wird im Vorfeld die Höhe und Breite des Balkens festgelegt. Der Balken ergibt sich somit wie in Bild 4.9 angegeben. Die Koordinaten eines bestimmten Punktes werden im globalen Koordinatensystem durch $\bar{\mathbf{x}}$ angegeben. Da der Balken als Kontinuum aufgefaßt wird, ergibt sich \mathbf{x} entlang des Balkens zu :

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \Delta \mathbf{r} = \sum h(r)_i \bar{\mathbf{x}}_i + \frac{\mathbf{s}}{2} \sum h(r)_i a_i \mathbf{v}_{i0} + \frac{\mathbf{t}}{2} \sum h(r)_i b_i \mathbf{w}_{i0} \quad (4.26)$$

Die einzelnen Summen laufen dabei über die einzelnen Diskretisierungsstellen i , deren feste Höhe b_i und Breite a_i gegeben ist. Jeder Knoten besitzt ferner einen eindeutigen Parameter r entlang der Mittellinie des Balkens. Mit Hilfe dieses Parameters wird die Geometriefunktion h ausgewertet, um die gesuchten Werte zu erlangen. \mathbf{v}_i und \mathbf{w}_i geben schließlich die lokalen Achsen innerhalb der Schnittfläche wieder. Der Zusatz 0 bezeichnet hier die initiale Lage der beiden Achsen

\mathbf{v}_i und \mathbf{w}_i .

Entsprechend wird die Verschiebung des Balkens \mathbf{d} angegeben :

$$\mathbf{d} = \bar{\mathbf{d}} + \Delta\mathbf{d} = \sum h(r)_i \bar{\mathbf{d}}_i + \frac{\mathbf{s}}{2} \sum h(r)_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i0}) + \frac{\mathbf{t}}{2} \sum h(r)_i (\mathbf{w}_i - \mathbf{w}_{i0}) \quad (4.27)$$

Da es sich bei \mathbf{v} und \mathbf{w} um lokale Achsen handelt, die den selben Ursprung und die gleiche Länge besitzen, ergibt sich \mathbf{v}_i durch reine Rotation mit \mathbf{R} in Form von Gleichung A.14 aus \mathbf{v}_{i0} . Die Verschiebung \mathbf{d} kann somit folgender Maßen umformuliert werden :

$$\mathbf{d} = \sum h(r)_i \bar{\mathbf{d}}_i + \frac{\mathbf{s}}{2} \sum h(r)_i a_i (\mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha}_i) - \mathbf{I}) \mathbf{v}_{i0} + \frac{\mathbf{t}}{2} \sum h(r)_i b_i (\mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha}_i) - \mathbf{I}) \mathbf{w}_{i0} \quad (4.28)$$

Um aus den Spannungs-Dehnungs Beziehungen die wirkenden Kräfte zu ermitteln, ist es erforderlich, auf Grund des Kontinuums und der notwendigen Rotationsinvarianz, Greensche Dehnungen und zweite Piola-Kirchhoffschen Spannungen zu verwenden. Für die genauere Berechnung dieses Balkenelementes sei hier auf Crisfield [66] verwiesen.

Verbindungen zur gesuchten Lösung Grundlegend bei jeder VR-Anwendung ist die Notwendigkeit der Echtzeit. Auf Grund einer begrenzten Rechengeschwindigkeit heutiger Computer muß die Anzahl der Rechenoperationen minimiert werden, um dem Benutzer einen Immersionseindruck zu vermitteln. Dies bedeutet, daß die zu simulierenden Leitungen durch so wenig Balken wie möglich diskretisiert werden. Somit handelt es sich um schlanke Balken, bei denen die Länge wesentlich größer als der Durchmesser ist. Dies läßt die Anwendung eines Timoshenko Balkens als nicht notwendig erscheinen.

Auf Grund der erforderlichen hohen Bildrate wird davon ausgegangen, daß es sich um kleine inkrementelle Rotationen handelt. Hierdurch lassen sich einige der oben angegebenen Beziehungen vereinfachen. Hier erscheint bei der Verwendung von Knoten- und Elementkoordinatensystemen ein größeres Vereinfachungspotential zu bestehen. Aus diesem Grund wird im folgenden ein Element in Anlehnung an [76] verwendet.

4.2 Berechnungsgrundlagen für die Bewegungen einer Leitung

Nachdem im vorherigen Abschnitt auf die mechanischen Grundlagen zur Berechnung einer Balkendeformation und auf dreidimensionale Balkenmodelle eingegangen wurde, soll im folgenden der verwendete lineare Balkentyp beschrieben werden. Wichtig ist hierbei die Möglichkeit des Balkens, entlang beliebiger Achsen zu translizieren und um beliebige Achsen zu rotieren. Um dies zu erreichen, ist

die Einführung eines geeigneten Balkenkoordinatensystems erforderlich. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt zunächst das Koordinatensystem und darauf aufbauend die mathematischen Grundlagen für die verschiedenen Bewegungen des Balkens beschrieben. Bei diesen handelt es sich zunächst lediglich um Translationen und Rotationen des Balkens, ohne daß sie durch äußere Einflüsse behindert werden. Zu Beginn wird der statische Lastfall des Balkens beschrieben. Hierbei wird das Ziel verfolgt, die Deformation und die wirkenden Kräfte bei der Verschiebung eines Balkenendpunktes zu berechnen. Dieses Ergebnis wird anschließend um die zeitliche Integration erweitert. Die folgenden Berechnungen werden hier in Anlehnung an Belytschko [50] wiedergegeben.

4.2.1 Der Aufbau des verwendeten Balkens

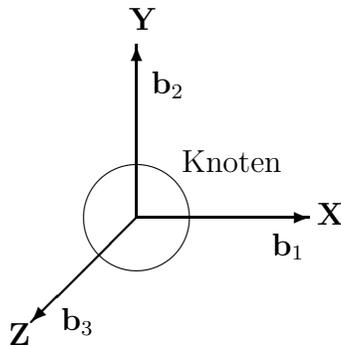


Abbildung 4.10: Der Knoten eines Belytschko Balkens

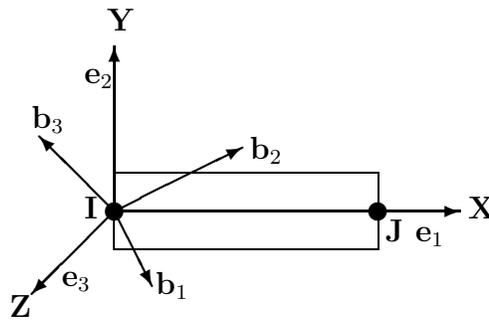


Abbildung 4.11: Der verwendete Balken

Bei dem verwendeten Balkentyp handelt es sich um einen corotatorischen Euler- Bernoulli Balken, der durch Belytschko in [50] beschrieben wird. Der Balken wird dabei durch zwei Massepunkte an den Enden des Balkens erweitert. Diese Massepunkte werden als Starrkörper betrachtet und vereinen die Masse des Körpers. Der Balken ist somit als masselos anzusehen. Aus der Konzentration der Masse innerhalb der Knoten ergibt sich, daß sie die Trägheitseigenschaften des Körpers widerspiegeln. Die genaue Lage der Knoten ist entsprechend Bild 4.10 durch eine Position im Raum und ein lokales Koordinatensystem gegeben. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dabei im Massenschwerpunkt des Knoten. Die Orientierung \mathbf{b}_1 , \mathbf{b}_2 und \mathbf{b}_3 ergibt sich aus der Lage der Flächenträgheitsmomente zweiten Grades. Aus der Lage und Orientierung der beiden Endpunkte **I** und **J** wird schließlich das Koordinatensystem des Balkens bestimmt. So entspricht, wie in Bild 4.11 dargestellt, die X-Achse \mathbf{e}_1 des Balkens der kürzesten Verbindung der beiden Endpunkte. Dieser Zusammenhang gilt sowohl im undeformierten als auch im deformierten Zustand des Balkens. Die Y-Achse \mathbf{e}_2 des

Balkens wird aus dem arithmetischen Mittel der beiden Y-Achsen \mathbf{b}_2 der Endpunkte gebildet. Die Z-Achse \mathbf{e}_3 wird daraufhin aus dem Kreuzprodukt der beiden Achsen gebildet. Um sicherzustellen, daß ein orthogonales Elementkoordinatensystem vorliegt, wird \mathbf{e}_2 erneut durch Kreuzprodukt von \mathbf{e}_1 und \mathbf{e}_3 gebildet. Da die Leitung, wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt, einen kreisförmigen Querschnitt besitzt, gilt $I_{yy} = I_{zz}$, wodurch sich in einigen Formeln der folgenden Abschnitte Vereinfachungen ergeben. Sie werden dennoch der Vollständigkeit halber in voller Länge angegeben.

4.2.2 Die Bewegungsgrundlagen des Balkens

Wir beginnen mit der Formulierung der Grundgleichungen zur Bestimmung der Balkendeformation im statischen Fall.

Durch die Definition des Balkenkoordinatensystems entsprechend Kapitel 4.2 ist es möglich, die Verschiebung \mathbf{u} des Balkens in einen Deformationsanteil \mathbf{d} und eine Festkörperbewegung \mathbf{r} zu zerlegen ($\mathbf{u} = \mathbf{r} + \mathbf{d}$). Betrachtet wird hier nur der Deformationsanteil. Dieser kann durch das folgende Zahlentupel beschrieben werden.

$$\mathbf{d}^T = (\delta_{IJ}, \Theta_{xIJ}, \Theta_{yI}, \Theta_{zI}, \Theta_{yJ}, \Theta_{zJ}) \quad (4.29)$$

Mit

$$\begin{aligned} \delta_{IJ} &= \text{Dehnung des Balkens} \\ \Theta_{xIJ} &= \text{Torsion um die X-Achse des Balkens} \\ \Theta_{yI}, \Theta_{zI}, \Theta_{yJ}, \Theta_{zJ} &= \text{Die Biegung um die einzelnen Achsen} \\ &\quad \text{an den Knoten } \mathbf{I} \text{ und } \mathbf{J} \end{aligned}$$

Die Dehnung des Balkens beschreibt die Längenänderung bei der Deformation. Unter Verwendung des resultierenden Verschiebungsvektors \mathbf{u} und dem Vektor zwischen den Endpunkten des undeformierten Balkens \mathbf{X} ergibt sich :

$$\delta_{IJ} = l - l_0 = \sqrt{(\mathbf{X} + \mathbf{u})^T(\mathbf{X} + \mathbf{u})} - \sqrt{\mathbf{X}^T \mathbf{X}} \quad (4.30)$$

Es verbleibt nun die Berechnung der Torsions- und Biegewinkel. Die Stärke der Balkenbiegung kann durch das Kreuzprodukt zwischen der undeformierten X-Achse \mathbf{e}_1^0 und der X-Achse des deformierten Balkens \mathbf{e}_1 bestimmt werden. Hierfür gilt :

$$\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_1^0 = \mathbf{v} = a\mathbf{e}_2 + b\mathbf{e}_3 \quad (4.31)$$

Die Koordinaten des Vektors \mathbf{v} ergeben sich in der $\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3$ Ebene zu : $\sin(\Theta_{yI})$ und $\sin(\Theta_{zI})$. Für kleine Winkel Θ_{yI} und Θ_{zI} gilt :

$$\sin(\Theta_{yI}) = \Theta_{yI} \quad \text{und} \quad \sin(\Theta_{zI}) = \Theta_{zI} \quad (4.32)$$

Somit ergibt sich Gleichung 4.31 zu :

$$\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_1^0 = \Theta_{yI} \mathbf{e}_2 + \Theta_{zI} \mathbf{e}_3 \quad (4.33)$$

Unter Verwendung von :

$$\Theta_{yI} \mathbf{e}_2 + \Theta_{zI} \mathbf{e}_3 = \det \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ e_{1x}^0 & e_{1y}^0 & e_{1z}^0 \end{bmatrix} = -e_{1z}^0 \mathbf{e}_2 + e_{1y}^0 \mathbf{e}_3 \quad (4.34)$$

ergibt sich schließlich :

$$\Theta_{yI} = -e_{1z}^0 \quad \text{und} \quad \Theta_{zI} = e_{1y}^0 \quad (4.35)$$

Die Berechnung der Balkentorsion gestaltet sich etwas schwieriger. Hierzu muß das Kreuzprodukt der Y-Achsen der Endpunkte \mathbf{e}_{2I}^0 und \mathbf{e}_{2J}^0 im undeformierten Zustand gebildet und anschließend auf die aktuelle X-Achse des Balkens projiziert werden. Man erhält somit :

$$\Theta_{xIJ} = \mathbf{e}_1 \cdot (\mathbf{e}_{2I}^0 \times \mathbf{e}_{2J}^0) = \mathbf{e}_1 \det \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ e_{x2I}^0 & e_{y2I}^0 & e_{z2I}^0 \\ e_{x2J}^0 & e_{y2J}^0 & e_{z2J}^0 \end{bmatrix} = e_{y2I}^0 e_{z2J}^0 - e_{z2I}^0 e_{y2J}^0 \quad (4.36)$$

Diese Beziehungen gelten, solange der Balken einer kleinen Deformation unterliegt. Es wird vorausgesetzt, daß dies bei VR erfüllt ist, da auf Grund der erforderlichen Bildrate die inkrementellen Knotenbewegungen und somit auch die inkrementellen Deformationen gering sind.

Aus diesen berechneten Werten soll zunächst die Form der deformierten neutralen Faser des Balkens bestimmt werden. Unter Verwendung der Bernoulli Hypothese wird anschließend auf die Form des gesamten Balkens geschlossen. Die Deformation der Balkenmittellinie \mathbf{d}^m ergibt sich dabei aus den Formeln :

$$d_x^m = (1 - \xi) d_{xI} + \xi d_{xJ} \quad (4.37)$$

$$d_y^m = (\xi - 2\xi^2 + \xi^3) l \Theta_{zI} + (-\xi^2 + \xi^3) l \Theta_{zJ} \quad (4.38)$$

$$d_z^m = (-\xi + 2\xi^2 - \xi^3) l \Theta_{yI} + (\xi^2 - \xi^3) l \Theta_{yJ} \quad (4.39)$$

$$\Theta_x = \xi \Theta_{xJI} \quad (4.40)$$

Mit

$$\xi = \frac{x}{l} \quad (4.41)$$

Wir sind jetzt in der Lage, die Deformation des gesamten Balkens anzugeben :

$$d_x = d_x^m - y \frac{\partial d_y^m}{\partial x} - z \frac{\partial d_z^m}{\partial x} + H(y, z) \frac{\partial \Theta_x}{\partial x} \quad (4.42)$$

$$d_y = d_y^m - z \Theta_x \quad (4.43)$$

$$d_z = d_z^m + y \Theta_x \quad (4.44)$$

$H(y, z)$ gibt hierbei eine Verwölbungsfunktion für die Torsion des Balkens an. Diese ergibt sich jedoch für den verwendeten kreisförmigen Querschnitt zu 0 und wird im folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Das Ziel muß es sein, über Dehnungs- und Spannungsbeziehungen zu den wirkenden Kräften innerhalb des Balkens zu kommen. Zunächst wird die Dehnung innerhalb des Balkens berechnet. Sie ergibt sich zu :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_x}{\partial x} \quad (4.45)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_x}{\partial y} + \frac{\partial d_y}{\partial x} \right) \quad (4.46)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial d_x}{\partial z} + \frac{\partial d_z}{\partial x} \right) \quad (4.47)$$

Für den kompletten Balken ergibt sich somit folgende Beziehung :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A} \mathbf{d} \quad (4.48)$$

Unter Einbeziehung des verwendeten E-Moduls und eines linearen Materialgesetzes ergibt sich die Spannung innerhalb des Balkens zu :

$$\boldsymbol{\sigma} = E \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.49)$$

Die Deformationskräfte und Momente $\mathbf{f}_d^T = (f_{xJ}, m_{xJ}, m_{yI}, m_{zI}, m_{yJ}, m_{zJ})$ innerhalb des Balkens ergeben sich durch Integration der Spannungen entlang des Balkens zu :

$$\mathbf{f}_d = \int_V \mathbf{A}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (4.50)$$

Somit ist man in der Lage, sowohl die Deformation eines Balkens als auch die wirkenden Kräfte zu berechnen.

4.2.3 Die zeitliche Integration der Balkenbewegung

Zunächst soll die Auswahl der Integrationsmethode motiviert werden, bevor die zeitliche Integration der in Abschnitt 4.2.2 aufgestellten Beziehungen erfolgt.

Auswahl der Integrationsmethode

Zur Berechnung dynamischer Bewegungen von gegebenen Bewegungsgleichungen mit Beschleunigungen $\ddot{\mathbf{p}}$ und Geschwindigkeiten $\dot{\mathbf{p}}$ existieren zwei grundlegende Verfahren. Zum einen das implizite Integrationsverfahren bei dem man gezwungen ist, ein System linearer Gleichungen mehrmals pro Zeitschritt zu lösen, bis die Integration zu einem stabilen Zustand konvergiert. Zum anderen existiert das explizite Verfahren, bei der, bei Verwendung einer diagonalen Massenmatrix,

lediglich Vektoroperationen durchgeführt werden müssen. Des weiteren werden hier im Gegensatz zur impliziten Methode lediglich Informationen der zurückliegenden Zeitschritte verwendet, um die Zustände im aktuellen Zeitschritt zu berechnen.

Ein wesentliches Auswahlkriterium liegt in der Stabilität und der Berechnungsgenauigkeit der Verfahren. Wie in [79] erwähnt, besitzen implizite Berechnungsverfahren eine höhere Stabilität, wodurch eine größere Integrationsschrittweite verwendet werden kann. Dieser Vorteil wird jedoch durch die Notwendigkeit der Iteration zum Teil zerstört. Im Gegensatz hierzu besitzen explizite Verfahren eine begrenzte Stabilität. Wichtig ist die Wahl der Integrationsschrittweite. Hier hilft eine Abschätzung von Courant [80], die besagt, daß die Integrationsschrittweite Δt in einem linearen ungedämpften System durch die maximale Eigenfrequenz ω auf folgende Weise beschränkt ist :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega} \quad (4.51)$$

Für ein lineares Balkenelement mit zwei Knoten gilt :

$$\Delta t \leq \frac{l}{c} \quad (4.52)$$

Wobei c die Schallgeschwindigkeit innerhalb des Materials, gegeben als $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ist. Bei einer Dichte von $\rho = 9.4E^{-7} \left[\frac{g}{mm^3} \right]$ und einem Elastizitätsmodul von $E = 12.36 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ ergibt sich bei einer Balkenlänge von 100mm eine Integrationsschrittweite von : $\Delta t = 0.028 [sec]$. Um auch bei Kollisionen eine stabile Simulation zu gewährleisten, wird diese Schrittweite in der vorliegenden Arbeit nochmals um 50% reduziert.

Anwendung der Integrationsmethode

Es soll nun die dynamische Bewegung des Balkens berechnet werden. Hierzu wird zunächst die reine Translation und anschließend die Rotation des Balkens betrachtet.

Die Grundidee der dynamischen Berechnung besteht in der Diskretisierung der Objektbewegung in spezifische Stati zu festgelegten Zeitpunkten n . In jedem festgelegten Zeitpunkt liegt ein statischer Fall vor. Gesucht ist der Übergang zwischen zwei Zeitpunkten. Im Rahmen der Berechnung geht man davon aus, daß die Deformation und die wirkenden Kräfte im aktuellen Zeitschritt bekannt sein. Durch externe Ereignisse, z.B. durch die Bewegung eines Leitungspunktes durch den Benutzer, werden zusätzliche externe Kräfte in das bestehende System eingebracht. Mit Hilfe der vorliegenden internen und externen Kraft ist man unter Verwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes in der Lage, die Beschleunigung eines Knotens \mathbf{I} zu berechnen.

$$m_I \ddot{\mathbf{u}}_I^{n+1} = \mathbf{f}_I^e - \mathbf{f}_I^i \quad (4.53)$$

Unter Zuhilfenahme der Newmark β Methode¹ mit $\beta = 0$ wird die Geschwindigkeit des Balkenknotens durch numerische Integration bestimmt. Es ergibt sich somit folgende Beziehung :

$$\dot{\mathbf{u}}_I^{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_I^n + \frac{1}{2}\Delta t (\ddot{\mathbf{u}}_I^n + \ddot{\mathbf{u}}_I^{n+1}) \quad (4.54)$$

$$\mathbf{u}_I^{n+1} = \mathbf{u}_I^n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_I^n + \frac{1}{2}\Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_I^n \quad (4.55)$$

Somit kann die Position und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt n bestimmt werden.

Für die Berechnung der Knotenorientierung wird die Eulergleichung für Starrkörperdynamik herangezogen. Hierbei gilt :

$$I_{xxI}\alpha_{xI} + (I_{zzI} - I_{yyI})\omega_{yI}\omega_{zI} = m_{xI}^e - m_{xI}^i \quad (4.56)$$

$$I_{yyI}\alpha_{yI} + (I_{xxI} - I_{zzI})\omega_{xI}\omega_{zI} = m_{yI}^e - m_{yI}^i \quad (4.57)$$

$$I_{zzI}\alpha_{zI} + (I_{yyI} - I_{xxI})\omega_{xI}\omega_{yI} = m_{zI}^e - m_{zI}^i \quad (4.58)$$

Überträgt man die Formel zur Berechnung der Knotenposition auf die Knotenorientierung, so ergibt sich :

$$\mathbf{b}_i^{n+1} = \mathbf{b}_i^n + \Delta t \frac{d\mathbf{b}_i^n}{dt} + \frac{1}{2}\Delta t^2 \frac{d^2\mathbf{b}_i^n}{dt^2} \quad (4.59)$$

Unter Zuhilfenahme folgender Beziehungen aus der Vektoranalysis

$$\frac{d\mathbf{b}_i}{dt} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{b}_i \quad (4.60)$$

$$\frac{d^2\mathbf{b}_i}{dt^2} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i) + (\boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{b}_i) \quad (4.61)$$

erhält man für die Bestimmung der Knotenorientierung folgenden Ausdruck :

$$\mathbf{b}_i^{n+1} = \mathbf{b}_i^n + \Delta t (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{b}_i^n) + \frac{1}{2}\Delta t^2 [\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i^n) + (\boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{b}_i^n)] \quad (4.62)$$

Um orthogonale Knotenkoordinatensysteme sicherzustellen, werden die Vektoren \mathbf{b}_1 bis \mathbf{b}_3 am Ende jedes Schrittes orthogonalisiert.

Man besitzt somit ein Wissen über die Deformation der Leitung. Dies allein genügt jedoch noch nicht den Anforderungen einer Montagesimulation. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt der bisherige Ansatz erweitert.

¹Die Newmark β Methode ergibt sich mit $\beta = 0$ zu einer zentralen Differenzenmethode. Für weitere Informationen sei hier auf [53] verwiesen.

4.3 Erweiterungen für den Einsatz in einer Montagesimulation

Neben der reinen Bewegung einer Leitung, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, spielen bei einer Montagesimulation weitere Ereignisse eine wichtige Rolle, so können zum Beispiel Kollisionen mit der starren Umgebung oder mit anderen Leitungen auftreten. Des weiteren bestehen manche Leitungen aus flexiblen Bereichen, die über ein starres Rohr verbunden sind. Daneben spielen die relevanten Montage-tätigkeiten wie z.B. das Aufschieben einer Leitung auf den entsprechenden Anschlußstutzen oder das Befestigen der Leitung mit Hilfe von Leitungsclipsen eine wichtige Rolle. In den folgenden Abschnitten soll versucht werden, das verwendete Balkenelement zu erweitern, um die montagerelevanten Belange simulieren zu können. Die Erweiterungen der Kapitel 4.3.1 bis 4.3.4 gehen dabei auf Dr. Barry Trippit [70] zurück.

4.3.1 Einbeziehung von Schlauchversteifungen

Die im Fahrzeugbau verwendeten Leitungen weisen oftmals lokale Versteifungen auf. Diese bestehen aus gebogenen Metallrohren oder speziell vulkanisierten Gewebestrukturen, die der Leitung eine definierte Form verleihen (vgl. „formstabile Leitung“ Kap 3.1.2). Um diesen Einfluß berücksichtigen zu können, wird der bisherige Ansatz um Leitungsversteifungen erweitert. Eine vollständige physikalische Simulation der Versteifung wird nicht durchgeführt, da zum einen die Verwendung des Elastizitätsmodulus von Metallen die notwendige Integrationsschrittweite soweit verringern würde, daß eine Simulation in Echtzeit nicht erzielt werden kann. Zum anderen wird davon ausgegangen, daß bei einer manuellen Montage keine Deformation der Leitungsversteifungen berücksichtigt werden muß.

Generierung einer Leitungsversteifung



Abbildung 4.12: Beispiel einer Leitungsversteifung

Beinhaltet eine Leitung wie in Bild 4.12 flexible und starre Bereiche, so handelt es sich bei dem starren Teilstücken meist um Metallrohre, die als Verbin-

derung zweier flexibler Leitungen dienen. Da die Form der Metallrohre oftmals denen der flexiblen Schläuche entspricht, wird eine Leitungsversteifung erstellt, indem ein ursprünglich flexibler Schlauch in einen Starrkörper transformiert wird. Der gesamte Starrkörper wird dabei entsprechend Bild 4.13 durch einen einzigen Zentralknoten abgebildet. Dieser Zentralknoten beinhaltet die Masse aller Ein-

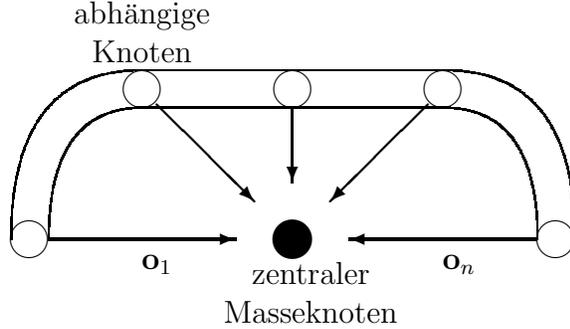


Abbildung 4.13: Der Zentralknoten einer Leitungsversteifung

zelknoten. Die Masse des Zentralknotens ergibt sich somit aus :

$$m = \sum m_I \quad (4.63)$$

Die Position des Zentralknotens läßt sich aus dem Schwerpunkt des ehemals flexiblen Schlauches bestimmen. Die Position berechnet sich folglich aus :

$$\mathbf{p} = \frac{\sum m_I \cdot \mathbf{p}_I}{m} \quad (4.64)$$

Die Orientierung dieses Punktes ergibt sich wie bei den Knoten eines flexiblen Schlauches aus der Orientierung der Flächenträgheitsmomente zweiten Grades. Um diese berechnen zu können, ist es erforderlich, zunächst die Translation \mathbf{o} jedes Punktes zu diesem Zentralknoten im globalen Koordinatensystem zu wissen. Dieser wird wie in Bild 4.13 ersichtlich aus der Differenz der Position der Einzelknoten und des Zentralknotens bestimmt. Die Flächenträgheitsmomente der einzelnen Leitungspunkte werden anschließend in das globale Koordinatensystem transformiert.

$$f_{xx}^{global} = b_{1x}^2 \cdot I_{xx} + b_{2x}^2 \cdot I_{yy} + b_{3x}^2 \cdot I_{zz} \quad (4.65)$$

$$f_{yy}^{global} = b_{1y}^2 \cdot I_{xx} + b_{2y}^2 \cdot I_{yy} + b_{3y}^2 \cdot I_{zz} \quad (4.66)$$

$$f_{zz}^{global} = b_{1z}^2 \cdot I_{xx} + b_{2z}^2 \cdot I_{yy} + b_{3z}^2 \cdot I_{zz} \quad (4.67)$$

$$f_{xy}^{global} = -(b_{1x} \cdot b_{1y} \cdot I_{xx} + b_{2x} \cdot b_{2y} \cdot I_{yy} + b_{3x} \cdot b_{3y} \cdot I_{zz}) \quad (4.68)$$

$$f_{yz}^{global} = -(b_{1y} \cdot b_{1z} \cdot I_{xx} + b_{2y} \cdot b_{2z} \cdot I_{yy} + b_{3y} \cdot b_{3z} \cdot I_{zz}) \quad (4.69)$$

$$f_{zx}^{global} = -(b_{1z} \cdot b_{1x} \cdot I_{xx} + b_{2z} \cdot b_{2x} \cdot I_{yy} + b_{3z} \cdot b_{3x} \cdot I_{zz}) \quad (4.70)$$

Mit Hilfe der berechneten Translation werden diese Werte in Bezug zum Zentralknoten des Starrkörpers gesetzt.

$$f_{xx}^{lokal} = f_{xx}^{global} + m_I (o_y^2 + o_z^2) \quad (4.71)$$

$$f_{yy}^{lokal} = f_{yy}^{global} + m_I (o_z^2 + o_x^2) \quad (4.72)$$

$$f_{zz}^{lokal} = f_{zz}^{global} + m_I (o_x^2 + o_y^2) \quad (4.73)$$

$$f_{xy}^{lokal} = f_{xy}^{global} + m_I (o_x \cdot o_y) \quad (4.74)$$

$$f_{yz}^{lokal} = f_{yz}^{global} + m_I (o_y \cdot o_z) \quad (4.75)$$

$$f_{zx}^{lokal} = f_{zx}^{global} + m_I (o_z \cdot o_x) \quad (4.76)$$

Die Summierung dieser Momente für alle Knoten liefert schließlich folgenden Tensor :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} f_{xx} & -f_{xy} & -f_{zx} \\ -f_{xy} & f_{yy} & -f_{yz} \\ -f_{zx} & -f_{yz} & f_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.77)$$

Die Eigenvektoren dieses Tensors liefern dabei die gesuchte Orientierung und die Eigenwerte die Flächenträgheitsmomente zweiten Grades des Starrkörpers. Um die Kräfte der Leitungspunkte und der mit dem Starrkörper verbundenen Punkte auf den Zentralknoten zu übertragen, werden abschließend die Translation der einzelnen Punkte im lokalen Koordinatensystem des Starrkörpers berechnet. Diese Operationen müssen lediglich einmal für die Erstellung einer Leitungsversteifung durchgeführt werden. Sie beeinflussen somit die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens in keinsten Weise.

Die Bewegung des Starrkörpers

Dem Anwender soll eine möglichst einheitliche Schnittstelle zu den Simulationsobjekten gegeben werden. Aus diesem Grund interagiert der Benutzer nicht mit dem zentralen Masseknoten, sondern mit den ursprünglichen Knoten des versteiften Bereiches. Dies erfordert eine Transformation der Bewegungen und Kräfte auf den Zentralknoten. Hierbei kann man auf den *Schwerpunktsatz* zurückgreifen. Er besagt, daß sich der Schwerpunkt eines Punkthaufens so bewegt, als wäre die gesamte Masse in ihm vereint und die Resultierende (Summe) aller Kräfte würde an ihm angreifen. Aus diesem Grund wird zunächst die Kraft an den mit dem Zentralknoten verbundenen Punkten² bestimmt. Bei der Bewegung einer Leitungsversteifung gibt der Benutzer für den zu bewegenden Punkt den Zielpunkt vor. Um die Bewegung der gesamten Leitungsversteifung zu ermitteln, ist es, wie bereits erwähnt, erforderlich, alle am Zentralknoten wirkenden Kräfte zu bestimmen. Aus diesem Grund muß eine Beziehung zwischen der Bewegung des

²In der folgenden Arbeit werden die mit dem Zentralknoten verbundenen Punkte einer Leitungsversteifung als abhängige Punkte und der Zentralknoten als unabhängiger Knoten bezeichnet.

einzelnen Knotens und der daraus resultierenden Kraft berechnet werden. Dies kann erreicht werden, wenn man zwischen der aktuellen Position und der Zielposition des zu bewegenden Punktes eine virtuelle Feder einfügt (s. Bild 4.14). Die

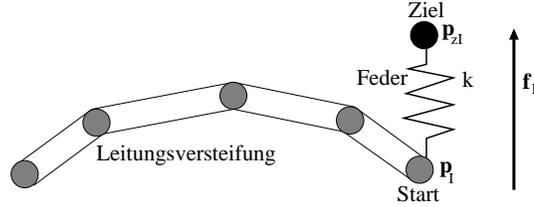


Abbildung 4.14: Die virtuelle Feder zwischen Start- und Zielpunkt

Feder liefert eine Kraft, die proportional zur Distanz der beiden Punkte ist. Die Kraft \mathbf{f}_I an dem abhängigen Knoten I ergibt sich dabei aus :

$$\mathbf{f}_I = (\mathbf{p}_{zI} - \mathbf{p}_I) \cdot k \quad (4.78)$$

Hierbei gibt k die Federsteifigkeit der virtuellen Feder, \mathbf{p}_I die aktuelle und \mathbf{p}_{zI} die Zielposition des Knotens I wieder. Bewegt sich die gesamte Leitungsversteifung bereits in die gewünschte Richtung, so muß diese Kraft um einen Geschwindigkeitsanteil des Körpers verringert werden. Die gesuchte Geschwindigkeit \mathbf{v}_I am abhängigen Knoten I ergibt sich zum einen aus der Geschwindigkeit der gesamten Leitungsversteifung \mathbf{v}_s und aus dem Kreuzprodukt zwischen der Translation des abhängigen Knotens \mathbf{o}_I und der aktuellen Winkelgeschwindigkeit des Zentralknotens $\boldsymbol{\omega}_s$.

$$\mathbf{v}_I = \mathbf{v}_s + \boldsymbol{\omega}_s \times \mathbf{o}_I \quad (4.79)$$

Die bereits berechnete Kraft \mathbf{f}_I wird dabei um eine gedämpfte Impulskraft verringert, falls sich die Leitung bereits in die gewünschte Richtung bewegt. Man gelangt, somit zu folgendem Gesamtausdruck :

$$\mathbf{f}_I = \mathbf{f}_I - \frac{\mathbf{v}_I \cdot m_I \cdot D_I}{\Delta t} \quad (4.80)$$

Hierbei gibt D_I die Dämpfung der Geschwindigkeit im Knoten I wieder. Die am Zentralknoten wirkenden Kräfte und Momente ergeben sich nach dem *Schwerpunktsatz* aus der Summe der Kräfte \mathbf{f}_I und Momente \mathbf{m}_I aller abhängigen Knoten. Man gelangt somit zu :

$$\mathbf{f}_s = \sum \mathbf{f}_I \quad \text{und} \quad \mathbf{m}_s = \sum \mathbf{m}_I \quad (4.81)$$

Entsprechend Bild 4.15 wird die Drehung des Zentralknotens nicht ausschließlich aus den einzelnen Momenten der abhängigen Knoten erzeugt. Durch die Translation des abhängigen Knotens erzeugt eine dort wirkende Kraft ein Drehmoment

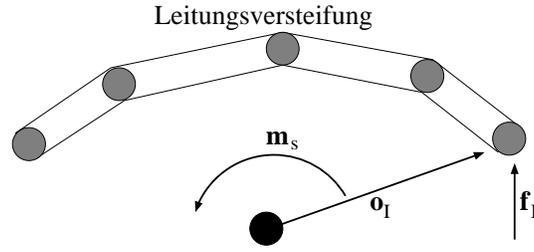


Abbildung 4.15: Rotation des Starrkörpers durch Translation eines Knotens

am Zentralknoten. Aus diesem Grund muß zu den bereits berechneten Momenten noch das Kreuzprodukt aus der Translation \mathbf{o}_I des abhängigen Knotens und seiner Kraft \mathbf{f}_I addiert werden. Man erhält somit für die Momente des Zentralknotens folgenden Ausdruck :

$$\mathbf{m}_s = \sum (\mathbf{m}_I + \mathbf{o}_I \times \mathbf{f}_I) \quad (4.82)$$

Das Ziel ist es dabei, den Starrkörper in die gewünschte Lage zu bringen, bewegt er sich bereits in die richtige Richtung, so müssen die wirkenden Kräfte und Momente unter Berücksichtigung der aktuellen Geschwindigkeit verringert werden. Die Kräfte und Momente ergeben sich schließlich aus :

$$\mathbf{f}_s = \mathbf{f}_s - \mathbf{v}_s \cdot m_s \cdot D_s \quad \text{und} \quad \mathbf{m}_s = \mathbf{m}_s - \boldsymbol{\omega}_s \cdot \begin{bmatrix} I_{xx} \\ I_{yy} \\ I_{zz} \end{bmatrix} \cdot D_s \quad (4.83)$$

Unter Verwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes ergeben sich schließlich die Beschleunigung und die Winkelbeschleunigung aus :

$$\mathbf{a}_s = \frac{\mathbf{f}_s}{m_s} \quad (4.84)$$

und

$$\alpha_x = \frac{m_x - (I_{zz} - I_{yy}) \cdot \omega_y \cdot \omega_z}{I_{xx}} \quad (4.85)$$

$$\alpha_y = \frac{m_y - (I_{xx} - I_{zz}) \cdot \omega_x \cdot \omega_z}{I_{yy}} \quad (4.86)$$

$$\alpha_z = \frac{m_z - (I_{yy} - I_{xx}) \cdot \omega_y \cdot \omega_x}{I_{zz}} \quad (4.87)$$

Durch numerische Integration erhält man hieraus, in Anlehnung an das vorherige Kapitel, die Geschwindigkeiten :

$$\mathbf{v}_{s,n+1} = \mathbf{v}_{s,n} + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{a}_{s,n+1} + \mathbf{a}_{s,n}) \quad (4.88)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{s,n+1} = \boldsymbol{\omega}_{s,n} + \frac{\Delta t}{2} (\boldsymbol{\alpha}_{s,n+1} + \boldsymbol{\alpha}_{s,n}) \quad (4.89)$$

und Positionen

$$\mathbf{p}_{s,n+1} = \mathbf{p}_{s,n} + \Delta t \mathbf{v}_{s,n} + \frac{\Delta t^2}{2} \mathbf{a}_{s,n} \quad (4.90)$$

Die Lage der mit dem Zentralknoten verbundenen Punkte ergibt sich schließlich aus der Addition der Position des Zentralknotens und ihrer jeweiligen Translation.

Da sich die Bewegung der Leitungsversteifung aus der Summe der Kräfte und Momente aller abhängigen Knoten ergibt, ist nur bei einem einzelnen bewegten Knoten sichergestellt, daß die Zielposition erreicht wird. Sollte die Leitungsversteifung an einer beliebigen Stelle befestigt sein und versucht der Benutzer sie am anderen Ende zu bewegen, so ergibt sich die resultierende Lage aus beiden Kräften. Es handelt sich hierbei um einen Kompromiß zwischen Echtzeitfähigkeit und uneingeschränktem realen Verhalten. Die Notwendigkeit Leitungsversteifungen in die Simulation zu integrieren, überwiegt jedoch den Nachteil dieses Objektverhaltens.

4.3.2 Grundlagen zur Berechnung von Kontaktproblemen

Unter dem Kontaktproblem versteht man die Bestimmung einer Objektkonfiguration, bei der sich zwei oder mehrere Objekte berühren. Liegt eine Kollision vor, so muß mindestens ein Objekt auf die Oberfläche des anderen Objektes verschoben werden. Des Weiteren ist die hierzu notwendige Kraft interessant. Stehen beide Objekte in Kontakt, so wird davon ausgegangen, daß keine Kraft in Richtung der Kontakttrichtung vorliegt. Bei weiterer Krafteinwirkung, die nicht parallel zur Kontakttrichtung ist, gleiten beide Objekte entlang ihrer Oberflächen. Wird bei der Kontaktberechnung Reibung integriert, so muß zunächst der Haftreibungskoeffizient überwunden werden, um ein Gleiten der beiden Objekte zu ermöglichen. In den folgenden Ausführungen wird jegliche Reibung vernachlässigt, da angenommen wird, daß die Reibung bei normalen Bewegungen der Leitungen nie so groß werden, daß sie eine Montage undurchführbar werden lassen. Für die verschiedenen Kontaktarten lassen sich in der Literatur [66], [67] [68] und [69] folgende Ansätze finden :

1. kinematischer Kontakt
2. Penalty Methode
3. Lagrangesche Multiplikatorenmethode
4. Barriere- und Augmented Lagrange Verfahren

Kinematischer Kontakt

Die Kontaktart des kinematischen Kontaktes wird in Anlehnung an [68] wiedergegeben. Diese Kontaktart ist für Kontakte zwischen einem starren Objekt und

einer unendlich ausgedehnten fixen Wand gültig. Es wird dabei davon ausgegangen, daß der Kontakt zwischen beiden Objekten nur einen infinitesimal kurzen Zeitraum vorliegt und beide Objekte kaum einer Deformation unterliegen. Auf das bewegte Objekt wird dabei ein Kraftstoß oder Impuls ausgeübt. Das Verfahren greift dabei auf die Anwendung des Impulssatzes für starre Körper zurück. Dieser lautet :

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{f} dt = \mathbf{f} \Delta t \quad (4.91)$$

Ersetzt man \mathbf{f} in der obigen Gleichung durch das zweite Newtonsche Gesetz, so gelangt man zu :

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{f} dt = \int_{t_1}^{t_2} m \dot{\mathbf{v}} dt = m \Delta \mathbf{v} \quad (4.92)$$

Somit gilt für die Kraft :

$$\mathbf{f} = \frac{m \Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (4.93)$$

Der Kontakt zwischen beiden Objekten wird aufgelöst, indem das Objekt aus der Kollisionsebene herausbewegt wird. Der Kollisionspunkt wird dabei auf die Ebene projiziert. Er kann danach entlang der Objektoberfläche gleiten, was durch die Anpassung der Objektgeschwindigkeit erfolgt. Das folgende Schaubild 4.16, soll dabei die Anpassung der Objektgeschwindigkeit verdeutlichen. Wendet man

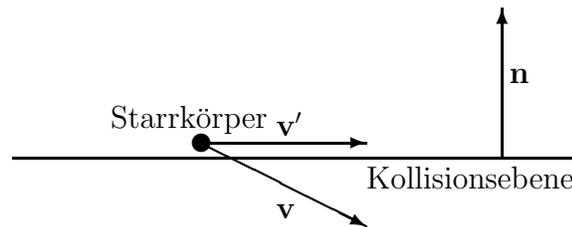


Abbildung 4.16: Anpassung der Geschwindigkeit bei kinematischem Kontakt.

das Schema des Schaubildes an, so ergibt sich die neue Geschwindigkeit \mathbf{v}' aus folgender Beziehung :

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - (\mathbf{v}\mathbf{n})\mathbf{n} \quad (4.94)$$

Die notwendige Kraft, ein weiteres Eindringen des Körper zu verhindern, ergibt sich somit zu :

$$\mathbf{f} = -\frac{m(\mathbf{v}\mathbf{n})\mathbf{n}}{\Delta t} \quad (4.95)$$

Penalty Methode

Dieses Verfahren wird in Anlehnung an [31] wiedergegeben. Diese Methode setzt voraus, daß während des Kontaktes zweier Objekte eine Deformation auftritt. Mindestens ein Objekt wird in seiner Struktur verändert. Es wird angenommen, daß die Deformationskraft dabei proportional zur Durchdringung beider Objekte ist. Die Kraft läßt sich somit durch folgende Beziehung angeben :

$$\mathbf{f} = k \cdot \mathbf{x} \quad (4.96)$$

\mathbf{x} gibt dabei die Eindringtiefe beider Objekte wieder. k stellt den Proportionalitätsfaktor dar. Dieser muß aus den Materialeigenschaften beider Objekte bestimmt werden. Das Objekt selbst wird lediglich durch Anwendung der wirkenden Kollisionskraft in seiner Bewegung beeinflußt. Es erfolgt kein Zurücksetzen auf die Kollisionsebene.

Lagrangesche Multiplikatorenmethode

Das Verfahren wird in Anlehnung an [66], [68] und [69] angegeben. Im Gegensatz zu den obigen Verfahren erfordert die Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren die Lösung eines linearen Gleichungssystems. Wird ein explizites Integrationsverfahren verwendet, so erfordert das lineare Gleichungssystem einen zusätzlichen Berechnungsaufwand. Verwendet man hingegen ein implizites Integrationsverfahren, so erfolgt die Lösung der Bewegungsgleichung bereits mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems, wodurch sich der Einsatz der Lagrangeschen Multiplikatoren in diesem Fall eher anbietet. Vollständigkeitshalber soll dieser Ansatz dennoch hier vorgestellt werden. Liegt kein Kontakt zwischen zwei Objekten vor, so können die wirkenden Kräfte mit Hilfe der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} und den Knotenverschiebungen \mathbf{u} berechnet werden. Es gilt :

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (4.97)$$

Liegt ein Kontakt oder eine Durchdringung zweier Objekte vor, so müssen einige Knoten in ihrer Bewegung eingeschränkt werden. Man erhält eine Gleichung der Form :

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{q} \quad (4.98)$$

Der Kontakt wird in die Gleichung 4.97 mit Hilfe der Lagrangeschen Multiplikatoren integriert. Man erhält somit folgende Gleichung :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

\mathbf{B} ist dabei ein Vektor, der eine 1 für alle Knoten enthält, die mit der Ebene in Kontakt stehen und 0 sonst. Anhand des folgenden Beispiels mit zwei Knoten soll die Funktionsweise dargelegt werden.

Gegeben seien zwei Knoten, wobei der zweite mit der Ebene in Kontakt steht. Die obige Gleichung ergibt sich somit zu :

$$\begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k & 1 \\ 0 & 1 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

Da der zweite Punkt mit der Ebene in Kontakt steht gilt : $u_2 = 0$. Man erhält somit folgende Gleichungen :

$$ku_1 = f_1 \quad (4.101)$$

$$-ku_1 + \lambda = 0 \quad (4.102)$$

$$u_2 = 0 \quad (4.103)$$

$$\lambda = f_1 \quad (4.104)$$

λ gibt dabei die am Knoten 2 wirkende Kraft wieder.

Barriere- und Augmented Lagrange Verfahren

Über die oben erwähnten Verfahren hinaus gibt es zum einen noch das so genannte Augmented Lagrange Verfahren. Hierbei handelt es sich um eine Kombination der Penalty Methode und des Verfahrens der Lagrangeschen Multiplikatoren. Innerhalb der Penalty Methode besteht das Problem zur Bestimmung der Kontaktsteifigkeit, was bei ungeschickter Wahl zu einer Divergenz der Integration führen kann. Bei Verwendung der Lagrangeschen Multiplikatoren besteht die Schwierigkeit, daß die Gleichungen 4.99 bei jedem Schritt geordnet werden müssen. Durch Kombination beider Verfahren ist man zum einen in der Lage, die Kontaktsteifigkeit recht niedrig zu wählen, da durch die Lagrangeschen Multiplikatoren eine Auflösung der Durchdringung sichergestellt ist. Des weiteren erlaubt die Verwendung der Penalty Methode, auf das Ordnen der Gleichung zu verzichten.

Daneben existiert das sogenannte Barriere Verfahren. Auch hier handelt es sich um eine Erweiterung der Penalty Methode. Das Problem bei der letzteren Methode ist ein plötzlicher Abfall der Kontaktkraft, wenn sich ein Knoten aus der Kollisionsebene herausbewegt. Durch Verwendung des Barriere Verfahrens wird dies verhindert. Je tiefer der Knoten in die Ebene eindringt, desto größer wird die Kontaktsteifigkeit. Wird der Knoten aus der Ebene heraus bewegt, so nimmt sie stark ab, verschwindet jedoch nicht, wenn der Knoten nur ein wenig aus der Ebene ausgetreten ist. Hierdurch kann eine stabilere Behandlung von Objektdurchdringungen erzielt werden.

Für weitere Details zu diesen Verfahren sei hier auf [66] verwiesen.

4.3.3 Kollisionen mit der starren Umgebung

In diesem Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, mit deren Hilfe sich die Kollision einer flexiblen Leitung oder einer Leitungsversteifung mit einem starren

Objekt der Montageumgebung berechnen läßt. Die genaue Erkennung einer Objektdurchdringung soll hier nicht behandelt werden, da diese ein Bestandteil des VR-Systems ist. Allen folgenden Überlegungen liegt die Annahme zugrunde, daß bei Kollision der Objekte eine Ebene wie in Bild 4.17 existiert, mit deren Hilfe ein weiteres Eindringen der Leitung verhindert werden kann. Für die Ermittlung

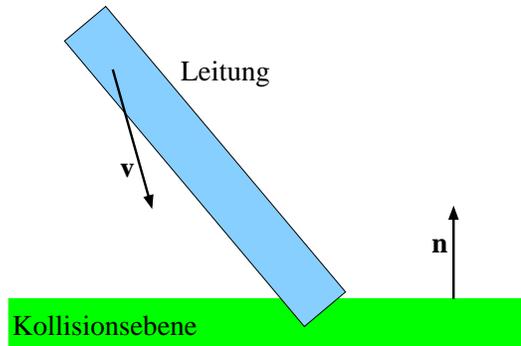


Abbildung 4.17: Durchdringung einer Leitung mit einer starren Ebene der Montageumgebung

der Ebene sei hier auf Kapitel 5.3.3 verwiesen. Die weitere Betrachtung der Kollisionen erfordert eine Unterscheidung zwischen flexiblen und starren Leitungen. Zunächst soll die Berechnung für flexible Leitungen dargestellt werden.

Kollisionen mit flexiblen Leitungen

Um ein weiteres Eindringen einer flexiblen Leitung in die ermittelte Kollisionsfläche zu verhindern, wird von folgenden Annahmen ausgegangen :

- Die Kollision eines Balkens mit der Ebene kann durch Verschieben eines oder beider Endpunkte verhindert werden.
- Die Punkte können unter Anwendung einer beliebig großen Kraft immer aus der Kollisionsfläche bewegt werden.

Mit diesen Annahmen wird ein Punkt \mathbf{p} , der in die Kollisionsfläche eingedrungen ist, zu Beginn auf der Fläche positioniert. Dabei erhält man den Punkt \mathbf{p}_e . Der Punkt wird gestoppt, indem man eine Kraft berechnet, die eine weitere Bewegung in Richtung der Kollisionsebene verhindert. Dies erreicht man durch Anwendung des kinematischen Kontaktverfahrens, indem ein Impuls am Kollisionspunkt angewendet wird. Hierzu wird die aktuelle Geschwindigkeit des Punktes mit Gleichung 4.94 angepaßt. Diese Kraft ergibt sich unter Verwendung des Impulssatzes aus Gleichung 4.95 und wird zur aktuellen Kraft des Knotens addiert, wodurch der Kontakt sich auf die Bewegung der angrenzenden Knoten auswirkt. Das Verfahren ist sehr stabil, da es innerhalb eines Zeitschrittes eine bestehende

Kollision aufhebt. Der Nachteil dieses Verfahren besteht jedoch in der Plazierung des Kollisionsknotens auf die Ebene. Hierdurch wird ein Abspringen des Knotens verhindert. Es handelt sich somit um einen voll plastischen Stoß, bei dem die eingeleitete Kollisionsenergie verloren geht. Unter der Annahme, daß die Masse des Kollisionspunktes nur ein geringer Bruchteil der Gesamtmasse der Leitung ist, wird von einem vernachlässigbaren Fehler ausgegangen.

Kollisionen mit starren Leitungen

Kollidiert eine starre Leitung mit einem Objekt der Umgebung, so kann die Leitung nicht ohne weiteres an eine kollisionsfreie Position gesetzt werden. Die Kollision zwischen der Leitungsversteifung und der Umgebung wird an den abhängigen Knoten bestimmt. Aus der Bewegung des Kollisionsknotens kann nicht auf die Bewegung des Zentralknotens geschlossen werden, da sich seine Bewegung aus der Summe aller angreifenden Kräfte ergibt. Eine Anwendung des kinematischen Kontaktes ist somit nicht möglich. Aus diesem Grund muß wie bei der geführten Bewegung der starren Leitung eine Kraft ermittelt werden, um den Körper an die gewünschte Position zu bewegen. Dies wird durch Verwendung der Penalty Methode erreicht, wobei sich die Eindringtiefe \mathbf{x} durch $(\mathbf{p} - \mathbf{p}_e)\mathbf{n}$ ergibt. Die so berechnete Kraft wird anschließend zur bereits vorhandenen Kraft des Punktes addiert. Leider ist es durch dieses Verfahren nicht möglich, ein weiteres Eindringen des Starrkörpers in die Kollisionsfläche zu verhindern, da der Anwender eine beliebig große Bewegungskraft aufbringen kann, die der Kollisionskraft entgegenwirkt. Auf Grund der in Kapitel 3.3.3 ermittelten Maximalkräfte einer manuellen Montage kann das System bei Überschreitung einer Schranke, den Benutzer warnen oder automatisch ein weiteres Eindringen verhindern. Somit erweist sich auch dieser Ansatz für den Einsatz in einer Montagesimulation als hinreichend genau.

4.3.4 Kollision zweier Leitungen

Bei der Bewegung einer Leitung ist es möglich, daß diese gegen eine weitere Leitung stößt. Es wird im folgenden Abschnitt ein Verfahren beschrieben, das eine Durchdringung zweier Leitungen verhindert. Stellt das VR-System eine Kollision zwischen zwei Leitungsobjekten entsprechend Bild 4.18 fest, so können folgende Fälle vorliegen :

- zwei flexible Leitungen kollidieren
- eine flexible und eine starre Leitung kollidieren
- zwei starre Leitungen kollidieren

Um all diese Möglichkeiten mit einem geschlossenen Ansatz berechnen zu können, wird bei der Kollision zweier Leitungen auf die Penalty Methode zurückgegriffen.

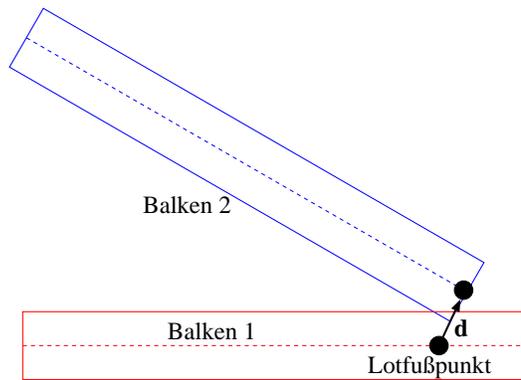


Abbildung 4.18: Kollision zweier Balken

Die Deformationskraft ist somit proportional zur Durchdringung der beiden Leitungen. Aus diesem Grund muß also die Leitungsdurchdringung berechnet werden. Da beide Leitungen aus geraden Elementen zusammengesetzt sind, ergibt sich der Algorithmus zur Berechnung der Leitungskollisionen wie folgt :

1. Stelle für beide Balken eine Geradengleichung auf.
2. Berechne Lotfußpunkte der beiden Balken zueinander.
3. Stelle sicher, daß die Lotfußpunkte innerhalb der Balken liegen.
4. Berechne den Vektor \mathbf{d} zwischen beiden Lotfußpunkten.
5. Bestimme die Länge von \mathbf{d} .
6. Falls die Länge kleiner als die Summe der beiden Radien ist, so liegt eine Kollision vor. Die Differenz zur Summe der beiden Radien ergibt die Eindringtiefe.
7. Die Federsteifigkeit der virtuellen Feder ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel k der beiden Leitungskontaktsteifigkeiten.
8. Die wirkende Kraft ergibt sich zu : $\mathbf{f} = k \cdot \mathbf{d}$
9. Verteile die Kraft auf die einzelnen Knoten der Balken.

Hiermit bewegen sich beide Balken von einander weg, wodurch ein weiteres Eindringen verhindert wird.

4.3.5 Aufschieben einer Leitung auf einen Anschlußstutzen

Bisher wurden lediglich Verfahren vorgestellt, mit deren Hilfe die Bewegung einer Leitung simuliert werden kann. Bei der Montage von Leitungen spielt die Befestigung dieser auf starre Anschlußstutzen eine große Rolle. Hierbei ist interessant, welche Kraft der Monteur aufwenden muß, um den Schlauch auf den Stutzen zu schieben oder ihn abzuziehen. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt ein Verfahren beschrieben, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Kraft für den obigen Anwendungsfall zu bestimmen.

Die Berechnung der wirkenden Kraft erfolgt in Analogie zu der Berechnung eines *Preßverbandes* nach [41]. Bei dieser Verbindungsart wird ein Hohlzylinder auf eine Achse geschraubt oder durch mechanische Vorrichtungen gepreßt. Beide Objekte gehen dabei über Haftreibung eine feste Verbindung ein, die bis zum Erreichen einer Maximalkraft erhalten bleibt. Wird diese Maximalkraft überschritten, so kommt es zum Gleiten beider Objekte. Bild 4.19 zeigt ein Beispiel für einen

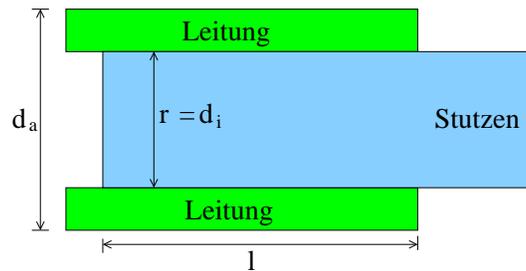


Abbildung 4.19: Skizze eines Preßverbandes

Preßverband.

Im vorliegenden Fall soll eine flexible Leitung mit Innenradius d_i und Aussenradius d_a auf einen starren Anschlußstutzen mit Aussenradius r_a geschoben werden. Unter der Annahme, daß am Anschlußstutzen keine Deformation erkennbar ist, wird sein E-Modul E_s mit dem Wert ∞ belegt. Für das Verhältnis zwischen der Aufweitung Δd der Leitung und dem Aussenradius des Stutzens r_a gilt nach [41] folgende Beziehung :

$$\frac{\Delta d}{r_a} = \frac{p}{E} \left[\frac{E}{E_s} \left(\frac{1 + Q_s^2}{1 - Q_s^2} - \frac{1}{\mu_s} \right) + \frac{1 + Q^2}{1 - Q^2} + \frac{1}{\mu} \right] \quad (4.105)$$

Hierbei gibt p den Innendruck der Leitung, $Q = \frac{d_i}{d_a}$ das Verhältnis zwischen Innen- und Aussenradius der flexiblen Leitung, E das E-Modul des entsprechenden Materials und μ seine Querkontraktionszahl wieder. Mit $E_s = \infty$ ergibt sich der wirkende Innendruck der Leitung zu :

$$p = \frac{E \Delta d}{r_a} \left[\frac{(1 - Q^2) \mu}{(1 + Q^2) \mu + (1 - Q^2)} \right] \quad (4.106)$$

Unter Verwendung des Innendrucks und einem Haftreibungskoeffizienten γ_H , der auf der Kontaktfläche A zwischen beiden Körpern wirkt, ergibt sich die Axialkraft zu :

$$f = p\gamma_H A = p \cdot \gamma_G \cdot l \cdot 2\pi \cdot r_a \quad (4.107)$$

Diese Kraft ist wirksam, wenn die flexible Leitung, die sich bereits auf einer Länge l auf den starren Stützen befindet, gezogen oder weiter geschoben wird. Der Anwender muß somit diese Haftreibung überwinden, um die Leitung zu bewegen.

4.3.6 Befestigung mit Hilfe von Leitungsclipsen

Leitungsclipsen sind, wie in Bild 4.20 dargestellt, Objekte aus Kunststoff, mit deren Hilfe eine Leitung an einem bestimmten Punkt arretiert werden kann. Da die

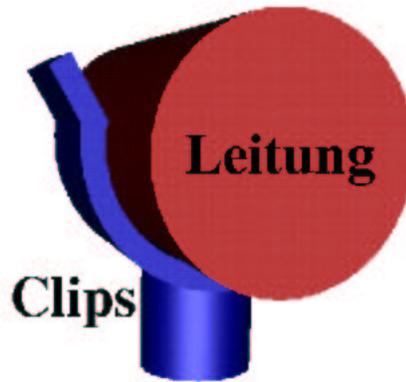


Abbildung 4.20: Befestigungsclips einer Leitung

Clipse mehr als 50 % des Leitungsumfanges umschließen, ist der Schlauch an dieser Position befestigt. Möchte man die Leitung lösen, so muß die Verschlusskraft des Clipses überschritten werden. Hierzu ist es erforderlich, die Leitung in Richtung der Öffnung nach oben zu ziehen. Um diesen Sachverhalt in dem Simulationsmodell abzubilden, sind die in Bild 4.21 abgebildeten Informationen erforderlich.

Die Leitung wird dabei durch ihren Mittelpunkt \mathbf{m} und ihren Radius r beschrieben. Die Lage des Clips wird durch den Ursprung \mathbf{p} , die Öffnungsrichtung \mathbf{n} und den Vektor \mathbf{l} , der die Orientierung des Clips um die Öffnungsachse \mathbf{n} festlegt, definiert. Um den Clips vollständig zu beschreiben, ist die Angabe des Öffnungsdurchmessers d_1 und des Gesamtdurchmessers d_2 erforderlich. Die Länge des Vektors \mathbf{n} wird dabei durch folgende Formel so angepaßt, daß er an der Clipsöffnung endet.

$$|\mathbf{n}| = \sqrt{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{d_2^2 - d_1^2}}{2} \quad (4.108)$$

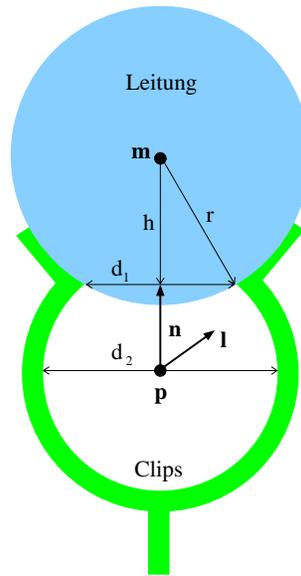


Abbildung 4.21: Simulation eines Leitungsclipslastfalles

Bewegt der Monteur die Leitung zur Clipsöffnung, so schließt der Schlauch zu einem gewissen Zeitpunkt an den Clips an. In dieser Konfiguration ergibt sich h durch folgende Beziehung :

$$h = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \quad (4.109)$$

Um die Kraft zu berechnen, ist die Kenntnis von \mathbf{m} erforderlich. Da die Leitung aus mehreren Balken besteht, ist es notwendig den Schnittpunkt des Balkens und der Clipsebene zu berechnen. Dieser wird anschließend für die weiteren Berechnungen verwendet. Schiebt der Benutzer die Leitung in den Clips hinein, so weitet sich zunächst die Clipsöffnung, womit ein Anstieg der Kraft verbunden ist. Nachdem die Leitung bis zu ihrem Durchmesser hineingeschoben wurde, schließt sich die Öffnung wieder, womit ein Abfall der Kraft einhergeht. Dieser Sachverhalt wird durch folgende Gleichung in dem Simulationsmodell abgebildet :

$$f = \begin{cases} 0 & : \text{ falls } |\mathbf{p} - \mathbf{m}| \geq |\mathbf{n}| + h \\ k \frac{h - |\mathbf{m} - \mathbf{p} - \mathbf{n}|}{|\mathbf{p} - \mathbf{m}|} & : \text{ falls } |\mathbf{n}| + h > |\mathbf{p} - \mathbf{m}| > |\mathbf{n}| \\ -k \frac{|\mathbf{p} - \mathbf{m}|}{|\mathbf{n}|} & : \text{ falls } |\mathbf{n}| \geq |\mathbf{m} - \mathbf{p}| \geq 0 \end{cases} \quad (4.110)$$

Sollte der Durchmesser der Leitung jedoch kleiner als die Clipsöffnung d_1 sein, so ergibt sich die resultierende Kraft zu jedem Zeitpunkt zu Null.

4.4 Zusammenfassung

Im vorherigen Kapitel sind die grundlegenden Verfahren vorgestellt worden, um eine Leitung zu simulieren. Aus der Vielzahl der möglichen FEM Elementtypen wurde ein Balken als ein eindimensionales Element ausgewählt. Dies wurde durch folgende Punkte motiviert :

- Der Durchmesser der Leitung ist klein gegenüber der Länge.
- Eine Veränderung des Durchmessers ist nicht von Belang.

Ausgehend von einem Artikel von Belytschko [50] wird eine Leitung durch mehrere Balken diskretisiert. Diese können transliert oder rotiert werden. Man ist somit in der Lage, die Bewegungen einer Leitung zu beschreiben. Dies allein ermöglicht jedoch noch nicht den Einsatz in einer Montagesimulation. Hierzu müssen spezifische Ereignisse, Tätigkeiten oder Schlauchkonfigurationen berücksichtigt werden.

Betrachtet man reale Leitungen innerhalb eines Motorraumes, so kann festgestellt werden, daß eine Leitung nicht ausschließlich aus flexiblen Bestandteilen aufgebaut ist. Viel mehr werden flexible Leitungen durch starre Rohre kombiniert. Diese müssen als Starrkörper in die Simulation integriert werden, da die physikalische Simulation der starren Objekte nicht in Echtzeit durchführbar ist. Aus diesem Grund werden die Leitungsversteifungen durch einen Zentralknoten und mehrere abhängige Knoten repräsentiert. Seine Bewegung ergibt sich aus der Summe aller an den abhängigen Knoten angreifenden Kräfte. Durch diese Vorgehensweise ist man in der Lage, die Simulationsmöglichkeiten auf beliebige Kombinationen zwischen flexiblen und starren Leitungen zu erweitern.

Bei einer Montage innerhalb eines Motorraumes besitzt der Monteur nur einen eingeschränkten Freiraum. Hierdurch kommt es häufig zu Kollisionen zwischen der Umgebung und dem zu montierenden Teil. Aus diesem Grund sind Wege vorgestellt worden, sowohl Kollisionen zwischen flexiblen und starren Leitungen und ihrer starren Umgebung, als auch Kollisionen zwischen verschiedenen Leitungen zu berücksichtigen. Bei Kollisionen zwischen den Leitungen und der starren Umgebung muß eine Fallunterscheidung erfolgen. Flexible Leitungen werden dabei mit Hilfe des kinematischen Kontaktes berechnet. Hierdurch wird sichergestellt, daß zu keinem Zeitpunkt eine sichtbare Durchdringung zwischen einer flexiblen Leitung und der starren Umgebung vorliegt. Bei starren Leitungen wird mit Hilfe der Penalty Methode versucht die Kollision aufzulösen. Da der Benutzer eine beliebig hohe Gegenkraft erzeugen kann, ist hierbei nicht sicher gestellt, daß die Kollision erfolgreich aufgelöst ist. Handelt es sich um die Kollision zweier Leitungen, so wird ebenfalls die Penalty Methode verwendet. Mit ihr ist man in der Lage, unabhängig von flexiblen oder starren Leitungen eine Kraft zu ermitteln, die auf beide Leitungen wirkt. Diese verhindert schließlich ein weiteres Eindringen der beiden Bauteile.

Neben diesen Ereignissen müssen kritische Montagetätigkeiten untersucht werden. Hierbei können Belastungen für den Operateur auftreten, die eine Montage im industriellen Einsatz ausschließen oder nicht wünschenswert erscheinen. Aus diesem Grund wurden in Kapitel 3 die notwendigen Belastungsgrenzen des Menschen ermittelt. Diese können bei der Befestigung der Leitung auftreten. Eine Leitung kann zum einen an ihren Enden befestigt werden. Dies erfolgt im allgemeinen durch Aufschieben auf einen Anschlußstutzen. Dies wird in die Simulation durch die Berechnung eines Preßverbandes zwischen dem starren Stutzen und der flexiblen Leitung einbezogen. Hierdurch können sowohl die Deformationskräfte des Schlauches und die Reibungskräfte zwischen beiden Objekten berücksichtigt werden. Als weitere Befestigungsart ist das Einsetzen der Leitung in spezielle Leitungsclips zu erwähnen. Die Belastungen dieser Tätigkeit wird durch die Integration einer speziellen stückweise linearen Funktion berechnet. Die Kraft richtet sich dabei nach der Einschiebtiefe der Leitung. Bis zu einer Schiebtiefe des Leitungsradius steigt die Kraft an, danach kommt es zu einem Abfall der Kraft, da sich die Clipsöffnung wieder langsam schließen kann.

Alle Komponenten zusammen erlauben den Einsatz in einer Montagesimulation. Es fehlt jedoch die Kommunikation mit dem Benutzer. Hierzu soll das eingesetzte VR-System dienen. Die Kommunikation zwischen dem Berechnungsmodell und der Benutzerschnittstelle ist deshalb Thema des nächsten Kapitels.

Kapitel 5

Integration des Simulationsverfahrens in ein VR-System

Ausgehend von einer Beschreibung des eingesetzten VR-Systems sollen die notwendigen Maßnahmen erläutert werden, die eine Integration des in Kapitel 4 beschriebenen Verfahrens in das VR-System ermöglichen. Eingegangen wird dabei auf spezielle graphische Repräsentationen der Leitung, auf die Kommunikation zwischen beiden Systemen und die Berechnung von notwendigen Informationen, wie z.B. die Ermittlung der Kollisionsebenen.

5.1 Einführung in das VR-System

Neben einigen grundlegenden Worten zu VR-Systemen soll zunächst das eingesetzte VR-System der Fraunhofer Gesellschaft in Darmstadt beschrieben werden, aus dem sich entscheidende Randbedingungen für die Integration ergeben.

5.1.1 Beschreibung des VR-Systems

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, versteht man unter dem Begriff „Virtuelle Realität“ eine neuartige Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der Mensch ist dabei Bestandteil einer im Rechner generierten Welt. Er befindet sich direkt im dreidimensionalen Datenraum und interagiert mit diesem, d.h. der Mensch ist ein aktives Glied des Simulationsregelkreises. Um dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, immersiv mit den Daten zu arbeiten, muß ein Durchlauf des Regelkreises innerhalb weniger Millisekunden¹ beendet sein. Dieser beinhaltet jedoch zum Teil komplexe Operationen, wie zum Beispiel die Ermittlung der Eingaben des Benutzers, die eventuelle Auslösung zeitbasierter Ereignisse, die Erkennung von

¹Für eine genauere Angabe der zur Verfügung stehenden Zeit siehe Kapitel 1.

Kollisionen und die Generierung der visuellen, akustischen oder haptischen Rückkopplungen.

Die einzelnen Operationen des Regelkreises sollen im folgenden für das verwendete VR-System angegeben werden. Bei diesem handelt es sich um das „Virtual Design II“ (Abk. VD-II) des Fraunhofer Institutes für graphische Datenverarbeitung in Darmstadt [59]. Um den Benutzer in die künstliche Welt eintauchen zu lassen, werden alle erforderlichen Operationen innerhalb des Regelkreises, einer sogenannten „Rendering“-Schleife², bearbeitet. Diese beinhaltet dabei folgende Aufgaben :

1. Abfrage der Eingabegeräte
2. Zeitbasierende Events
3. Kollisionserkennung
4. Bearbeitung gefundener Kollisionen
5. Bearbeitung der Benutzerfunktionen
6. Generierung eines akustischen Feedbacks
7. Rendern des Bildes

Zu Beginn werden die Eingabegeräte, wie Trackingsysteme³, Spracherkennung oder Spacemouse⁴, abgefragt. Hieraus ergeben sich neue Positionen des Benutzers oder anderer Objekte. Anschließend werden zeitbasierende Events gesteuert. Beispiele hierfür sind die Animation eines Objektes oder die kinematische Bewegung eines Roboters. Aus den ermittelten Bewegungen der Objekte können sich Kollisionen mit anderen Objekten der Szene ergeben. Um dem Anwender einen möglichst realen Eindruck der virtuellen Szene zu vermitteln, sollten die Objektdurchdringungen erkannt und aufgelöst werden. Dies erfordert den Einsatz einer Kollisionserkennung und entsprechender Routinen sie anschließend geeignet zu bearbeiten. Da dies sehr anwendungsspezifisch ist, sind die Funktionen kein Standardbestandteil des VR-Systems. Sie müssen vorher für die spezielle Anwendung programmiert und in das VR-System mit Hilfe einer gegebenen

²Unter dem Begriff des Renderns wird das Schattieren und Darstellen eines Bildes verstanden. Eine meist polygonale Datenbasis wird unter Auswahl eines Beleuchtungsmodells in Punktfarben umgewandelt, um sie so auf einem Ausgabemedium dem Benutzer darzustellen.

³Bei Trackingsystemen handelt es sich um Geräte, die in der Lage sind, mit Hilfe von akustischen, magnetischen, mechanischen, inertialen oder optischen Signalen die Bewegungen eines Objektes zu ermitteln.

⁴Bei der Spacemouse handelt es sich um ein Navigationsinterface mit sechs Freiheitsgraden. Der Benutzer hält in seiner Hand eine zylindrische Scheibe, die mit einem festen Fuß verbunden ist. Diese kann verschoben und gedreht werden, woraus sich die Eingabedaten für die Bewegung der virtuellen Objekte ergeben.

funktionalen Programmierschnittstelle integriert werden. Hierdurch ist die Anpassung an bestimmte Anwendungen oder Benutzer möglich. Dies wird in der vorliegenden Arbeit ausgenutzt, um die physikalische Simulation der Kabel und Schläuche in den bestehenden VR-Regelkreis zu integrieren. Damit der Benutzer mit der internen Datenbasis interagieren kann, muß ihm eine Rückkopplung des Systems gegeben werden. Dies erfolgt zum einen durch akustische Signale, zum anderen durch das Rendern als gezeichnete Repräsentation der internen Datenbasis.

Die „Rendering“-Schleife steuert somit die beiden Hauptkomponenten des VR-Systems, die **Kollisionserkennung** und das **Rendering**. Beide Komponenten werden in den folgenden Abschnitten etwas genauer beleuchtet, da sich hieraus Anforderungen an den Aufbau der VR-Repräsentation der flexiblen Bauteile ergeben.

5.1.2 Die Kollisionserkennung

Die Aufgabe der Kollisionserkennung besteht in der Auffindung von Objektdurchdringungen. Das verwendete Verfahren basiert dabei auf eine Arbeit von Zachmann [56].

Ausgehend von einer polygonalen Datenbasis werden zunächst Objektumhüllende gebildet. Dabei handelt es sich um achsenparallele Quader, die das Objekt vollkommen enthalten. Diese stellen somit eine Vereinfachung des ursprünglichen Objektes dar. Im folgenden werden diese mit dem Begriff *Boundingbox* bezeichnet.

Eine Kollision zweier Objekte kann nur vorliegen, wenn sich beide Boundingboxen durchdringen. Aus diesem Grund werden zunächst alle Boundingboxen auf Überschneidungen untersucht. Somit ist man in der Lage, die Anzahl der zu untersuchenden Polygone einzuschränken. Konnte eine Durchdringung zweier Boundingboxen festgestellt werden, so müssen beide Polygonmengen gegeneinander getestet werden.

Eine Durchdringung zweier Polygone liegt genau dann vor, wenn eine Kante des einen Polygons die Ebene des anderen Polygons schneidet. Zusätzlich muß festgestellt werden, ob der ermittelte Schnittpunkt innerhalb des Polygons liegt. Konnte dieser innerhalb eines Polygons ermittelt werden, so wird ein Ereignis ausgelöst und eine vorher definierte Kollisionsroutine⁵ durchlaufen. Diese erhält die in Bild 5.1 dargestellten Informationen über den Schnittpunkt der Kante und des Polygons, sowie die Flächennormalen der beiden beteiligten Polygone. Die Kollisionsroutine ist daraufhin selbst dafür verantwortlich, die erkannte Kollision geeignet aufzulösen.

Da der polygonale Kollisionstest um ein vielfaches aufwendiger als der Boundingboxtest ist, werden innerhalb dieses Bereiches gewisse Vereinfachungen und

⁵Im folgenden wird auch der Begriff Kollisionscallback verwendet.

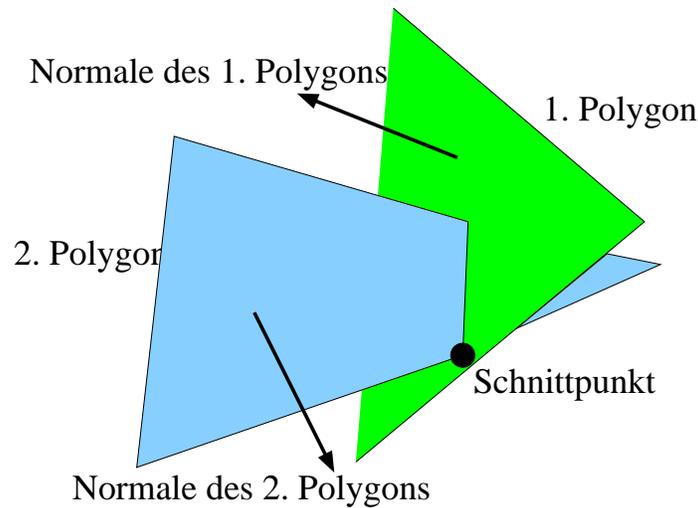


Abbildung 5.1: Die ermittelten Informationen der Kollisionserkennung.

Verfahren eingesetzt, um den Echtzeitanspruch dennoch zu erfüllen. Ein verwendetes Verfahren zur Beschleunigung der Antwortzeit ist der Einsatz mehrerer Prozessoren. Werden mehrere Boundingboxdurchdringungen festgestellt, so verteilt das System die einzelnen Objektpaare auf verschiedene Prozessoren. Hierdurch ist in der Regel ein Geschwindigkeitsvorteil zu erzielen. Als weitere Maßnahme wird die Anzahl der ermittelten Kollisionspunkte auf einen einzigen beschränkt. Durchdringen sich zwei Objekte, so ist es recht unwahrscheinlich, daß lediglich ein Kollisionspunkt vorliegt. Die Ermittlung aller vorliegenden Kollisionspunkte verlangsamt jedoch die Kollisionserkennung erheblich, da ständig die gesamte Menge der Polygone durchsucht werden muß. Um dennoch eine Antwortzeit in Echtzeit zu erzielen, ist es erforderlich, daß Ansprüche an die Genauigkeit gesenkt werden.

5.1.3 Das Rendering

Wie bereits erwähnt, versteht man unter dem *Rendern* das Umwandeln einer polygonalen Datenbasis unter Auswahl eines Beleuchtungsmodells in Punktfarben zur Ausgabe auf einem angeschlossenen Ausgabemedium.

Innerhalb des VR-Systems VD-II wird das Gouraud Shading eingesetzt. Dabei erhält jeder Polygoneckpunkt eine Punktnormale, welche sich aus dem arithmetischen Mittel aller angrenzenden Flächennormalen ergibt. Aus der gegebenen Punktnormalen und der Position der Lichtquellen erhält man eine Helligkeitsverteilung entlang der Polygonkanten. Die Schattierung des gesamten Polygons ergibt sich dabei als lineare Interpolation der Kantenschattierungen. Für eine genauere Beschreibung dieses Schattierungsverfahrens sei hier auf [62] verwiesen.

Sollen die Daten auf ihre visuelle Wirkung hin beurteilt werden, so ist die Darstellung in den korrekten Proportionen notwendig. Um dies zu erzielen, wird innerhalb der virtuellen Szene eine unsichtbare virtuelle Leinwand eingeführt. Diese befindet sich in einem festen Abstand vor dem virtuellen Benutzer und bewegt sich entsprechend seiner Bewegungen. Unter Zuhilfenahme der Größe der Leinwand und des Höhen-Seiten-Verhältnisses wird der Öffnungswinkel einer Sichtpyramide berechnet. Neben dem Öffnungswinkel wird der sichtbare Bereich durch zwei Ebenen eingeschränkt. Die Near-Clipping-Ebene gibt dabei eine Distanz zum Auge des Betrachters an, ab dem die Objekte als sichtbar gelten. Kommt ein Objekt dem virtuellen Auge zu nahe, so wird es unsichtbar. Als weiteres existiert eine Far-Clipping-Ebene. Alle Objekte, die weiter entfernt sind als diese, werden nicht dargestellt. Objekte, die diese Ebenen schneiden, werden geclipt, d.h. alle Polygone des Objektes werden mit der Ebene geschnitten und lediglich bis zur Schnittkante dargestellt. Für ein Beispiel solch einer Sichtpyramide soll hier auf Bild 5.2 verwiesen werden. Alle Objekte, deren Boundingbox nicht in die Sichtpy-

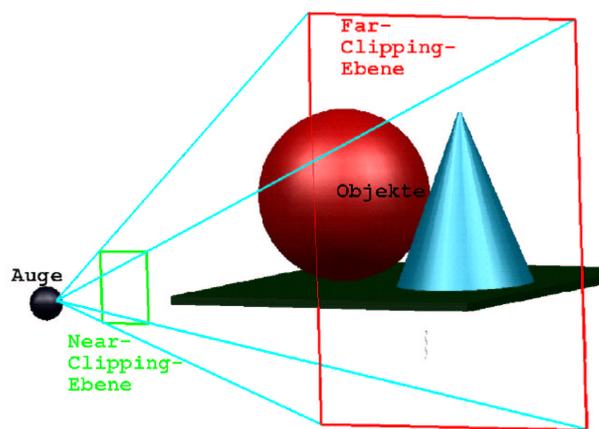


Abbildung 5.2: Beispiel Sichtpyramide

ramide hineinragt, werden als unsichtbar angenommen und nicht berechnet. Bei einer teilweisen Durchdringung muß der Schnitt mit einer der Clipping-Ebenen berechnet werden. Für die notwendige Berechnungsdauer gilt hierfür ähnliches wie bei der Kollisionserkennung, da dieser Prozeß langsamer als der Boundingboxvergleich ist. Somit ergibt sich eine Beziehung zwischen sichtbarer Datenbasis und erreichbarer Bildwiederholfrequenz.

5.1.4 Anforderungen auf Grund der Echtzeitbedingung

Um die Fülle der in 5.1.1 beschriebenen Berechnungen in Echtzeit auf heutigen Rechnern bearbeiten zu können, muß eine **Beschränkung der Datenkomplexität**, eine **Optimierung der Daten** und die **Parallelisierung** einzelner

Aufgaben erfolgen. Auf diese Punkte soll im folgenden Abschnitt etwas genauer eingegangen werden.

Beschränkung der Datenkomplexität

Unter dem Begriff der Beschränkung der Datenkomplexität ist folgender Sachverhalt zu verstehen :

Computer sind derzeit lediglich in der Lage, Polygone effizient darzustellen. Aus diesem Grund müssen alle Objekte durch Dreiecke oder andere Polygone diskretisiert werden. Die Menge aller gleichzeitig sichtbaren Dreiecke bestimmt die erreichbare Bildwiederholfrequenz. Diese beeinflusst in einem entscheidenden Maße die Echtzeitanforderung und den damit verbundenen Immersionsgrad. Der Benutzer muß vor Beginn der Anwendung bestimmen, welcher Detaillierungsgrad für seine spezifische Anwendung notwendig ist. Die Darstellung eines Fahrzeugmodells, zum Beispiel zur visuellen Beurteilung, erfordert einen hohen Detaillierungsgrad. Die damit verbundene erreichbare Bildwiederholfrequenz liegt somit deutlich unter 10 Bildern pro Sekunde. Hoch interaktive Anwendungen wie die manuelle Montagesimulation hingegen erfordern diese Wiederholrate. Somit müssen die darzustellenden Objekte teilweise stark vereinfacht werden. Für ein Beispiel dieser Komplexitäts- und Echtzeithyperbel sei hier auf [60] verwiesen.

Optimierung der Daten

Nicht allein die Anzahl der verwendeten Dreiecke bestimmt die erreichbare Bildwiederholfrequenz, sondern auch die Speicherung der Daten. Hier konkurrieren die beiden Simulationskomponenten **Kollisionserkennung** und **Berechnung des Bildes** miteinander.

Die **Berechnung des Bildes** erfordert die Zusammenfassung mehrerer Dreiecke oder Polygone zu sogenannten „Stripes“. Dabei werden wie in Bild 5.3 Punktli-

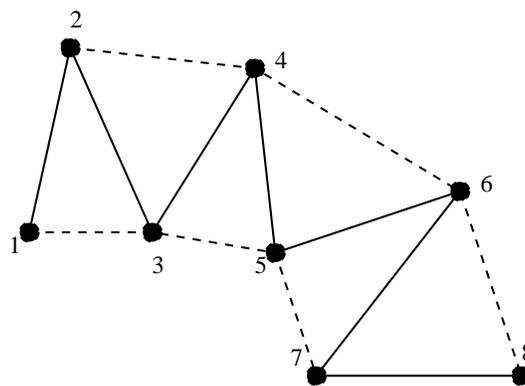


Abbildung 5.3: Beispiel von Dreieckstripes

sten erstellt, aus denen sich automatisch die Kantenfolge des Dreieckszuges ergibt⁶. Hierdurch wird die Anzahl der zur Beschreibung der Dreiecke notwendigen Punkte optimiert. Benötigt man beispielsweise für die Beschreibung von 20 Dreiecken 60 Punkte, so können diese durch einen Stripe mit 22 Punkten ausgedrückt werden. Somit wird der Berechnungsaufwand zur Darstellung der Dreiecke mit einem Schattierungsverfahren wie dem Gouraud-Shading minimiert. Als weitere Optimierung erfolgt eine Unterteilung der Objekte in einem Octree. Dies wird durch folgende Überlegung motiviert :

Das Zeichnen der internen Datenbasis gliedert sich in zwei Schritte. Zunächst wird ermittelt, welche Objekte sichtbar sind. Anschließend werden alle sichtbaren Objekte beleuchtet und auf dem angeschlossenen Ausgabemedium dargestellt. Der sichtbare Bereich für den Betrachter ergibt sich dabei, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben aus einer vorderen und hinteren Clippingebene und einem Öffnungswinkel, der die Größe der Sichtpyramide bestimmt. Dargestellt werden müssen somit nur die Objekte, deren Boundingbox in diesen Bereich hineinragt. Besteht ein Objekt aus sehr vielen Dreiecken und ragt nur ein sehr geringer Teil in die Sichtpyramide, so müssen trotzdem alle Polygone dieses Objektes berechnet werden. Um nun möglichst viele Objekte durch einfache Boundingboxvergleiche von der späteren Darstellung auszuschließen, werden die ursprünglichen Objekte in mehrere Teile zerlegt. Hierdurch erzielt man in der Regel eine höhere Bildrate.

Die **Kollisionserkennung** gliedert sich wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben in zwei Schritte. Zunächst wird anhand von Boundingboxen die Überschneidung von Objektpaaren gesucht. Konnte eine Durchdringung gefunden werden, so muß in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob sich die einzelnen Polygone der beiden Objekte schneiden. Je mehr Polygone das Objekt beinhaltet, umso größer ist die notwendige Rechenzeit. Vergleicht man beide Schritte, so stellt man fest, daß der zweite um ein vielfaches langsamer als der erste ist. Indem das Ziel verfolgt wird, die Objekte, wie in [57] beschrieben, unter der Prämisse einer enganliegenden Boundingbox zu unterteilen, wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, daß bei Durchdringung der beiden Boundingboxen auch wirklich eine Kollision vorliegt. Hierdurch wird die Antwortzeit der Kollisionserkennung erheblich beschleunigt. Des weiteren sollte sich die Topologie⁷ der Einzelobjekte nicht verändern, d.h. die Objekte sollten lediglich transliert, rotiert oder skaliert werden. Jede Lageänderung der Polygone zueinander bewirkt einen erhöhten Aufwand zur Neuberechnung der Boundingboxen.

In Verbindung mit der graphischen Darstellung der Objekte ergeben sich einige Schwierigkeiten. Zum einen können die Stripes nicht für die Kollisionserkennung verwendet werden, da diese die Entscheidung, ob sich der Kollisionspunkt innerhalb oder außerhalb des Polygons befindet, erschwert. Zum anderen differieren

⁶Für eine genauere Beschreibung der Stripes sei hier auf [61] verwiesen.

⁷Unter dem Begriff *Topologie* versteht man die Lehre von der Lage und Anordnung geometrischer Gebilde im Raum.

die beiden Objektunterteilungen. Um trotzdem in beiden Systemen eine optimale Performance zu erzielen, muß man beide Optimierungen kombinieren. Dies geschieht, indem sowohl die graphischen als auch die Kollisionsobjekte unter einem gemeinsamen Knoten innerhalb einer hierarchischen Baumstruktur gruppiert werden. Den Systemen wird dabei lediglich der für sie relevante Teilbaum bekannt gegeben.

Die Parallelisierung

Als letzter Optimierungsschritt verbleibt die Parallelisierung der Kollisionserkennung und der Darstellung des Bildes. Hierdurch wird die Berechnungszeit der Simulationsschleife wesentlich verringert. Um die Kollisionserkennung in einem entscheidenden Maße zu beschleunigen, müssen die Operationen des zweiten Schrittes parallelisiert werden. Innerhalb der Kollisionserkennung werden nach Erkennung einer Boundingboxdurchdringung die polygonalen Berechnungen für die einzelnen Objektpaare auf verschiedene Prozessoren verteilt. Hierdurch kann für mehrere Objekte gleichzeitig entschieden werden, ob eine Kollision vorliegt oder nicht.

Bei komplexen Szenen ist es sinnvoll, die Berechnung des Bildes von den übrigen Operationen der Rendering-Schleife zu entkoppeln. Während die einzelnen Polygone berechnet, gezeichnet und ausgegeben werden, ist das System in der Lage, die nächsten Daten des Benutzers entgegenzunehmen und zu verarbeiten. Indem die Berechnung des Bildes parallel bearbeitet wird, ergeben sich in Verbindung mit der Kollisionserkennung enorme Verbesserungen der Antwortzeiten. Die zeitliche Differenz zwischen der Eingabe und ihrer graphischen Rückkopplung, auch als Lagtime bezeichnet, wird minimiert. Hierdurch werden bei Verwendung gleicher Ausgabemedien höhere Bildraten und somit eine verbesserte Immersion erzielt.

5.1.5 Ermittlung der Randbedingungen

Um die Echtzeitbedingung auch unter Einbindung der Simulation der flexiblen Bauteile zu erreichen, ergeben sich, in Anlehnung an die vorherigen Abschnitte, folgende Bedingungen an die zu generierende Eingliederung des Simulationsverfahrens :

- Die Leitungen werden in polygonaler Form im VR-System abgebildet, um sie sowohl für die graphische Darstellung als auch für die Kollisionserkennung zu verwenden.
- Eine Leitung besteht aus einem optimierten graphischen und einem Kollisionsobjekt. Hierdurch lassen sich in beiden Systemen optimale Antwortzeiten erzielen.

- Das Kollisionsobjekt besteht aus mehreren Objektprimitiven. Das Objekt bleibt somit in seiner Struktur erhalten. Lediglich die Primitive werden transliert, rotiert oder skaliert. Somit wird die Berechnung der Objektboundingbox vereinfacht.
- Beide Objekte werden innerhalb einer hierarchischen Struktur verbunden. Auf diese Weise können zum Beispiel beide Repräsentationen einfach verschoben werden, ohne dass eine Divergenz zwischen beiden Darstellungen entsteht.
- Das Simulationsverfahren läuft parallel zur Rendering-Schleife des VR-Systems, wodurch die Bildrate unabhängig von der physikalischen Simulation erhalten bleibt.

5.2 Eingliederung in den VR-Regelkreis

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Grundlagen dargelegt worden sind, soll im folgenden die Verbindung zwischen dem VR-System und dem Simulationsmodell hergestellt werden.

Dies erfolgt in Bezug auf die verwendete Repräsentation der Daten und den verwendeten Datenaustausch zwischen beiden Systemen. Die Darstellung untergliedert sich dabei in die in Abschnitt 5.1.5 aufgestellten Bedingungen.

5.2.1 Optimierung der Daten

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, erfordern die beiden Operationen *Rendering* und *Kollisionserkennung* eine unterschiedliche Speicherung der Daten, um in beiden Systemen eine optimale Antwortzeit zu erzielen. In den folgenden Sektionen wird deshalb der erzeugte Aufbau der einzelnen Daten dargelegt.

Hierarchischer Aufbau

Für die getrennten Aufgaben werden verschiedene Ausprägungen der Simulationsdaten erstellt. Damit man beide Versionen auf einfache Weise global verschieben, rotieren oder skalieren kann, werden diese in einer hierarchischen Struktur innerhalb des VR-Systems abgebildet. Hierzu nutzt man die vorhandenen Möglichkeiten der VR-Umgebung.

Im VR-System VD-II existiert ein Objektbaum, der aus verschiedenen Knotentypen zusammengesetzt ist. Die beiden wichtigsten Typen sind der **Assembly-** und der **Polyhedronknoten**. Jeder **Assemblyknoten** besitzt zwar genau einen Vaterknoten, mehrere Kinderknoten und mehrere Transformationsmatrizen, jedoch keinerlei Geometriebeschreibung. Mit Hilfe dieses Knotens lässt sich somit ein Objektbaum aufbauen. Der **Polyhedronknoten** besitzt ebenfalls genau einen

Vater und mehrere Transformationsmatrizen, zusätzlich jedoch die polygonale Beschreibung eines Objektes. Aus diesen beiden Knotentypen wird die Repräsentation des Schlauches im VR-System erstellt.

Unterhalb eines zentralen Leitungsassemblies existieren die Ausprägungen für die graphische Darstellung und die Kollisionserkennung. Diese sind zunächst wiederum durch je einen Assemblyknoten beschrieben. Unter diesen befinden sich die eigentlichen geometrischen Beschreibungen. Somit ist sowohl eine eindeutige Trennung zwischen beiden Objektarten, als auch eine gemeinsame Manipulation der Daten möglich.

Aufbau des graphischen Objektes

Ziel von VR ist es, die Realität möglichst genau abzubilden. Aus diesem Grund werden nicht die Simulationsdaten als einzelne Balken, die aus zwei Masseknoten und einer masselosen Verbindung bestehen, visualisiert. Vielmehr wird versucht, die Leitung wie in der Realität als Ganzes darzustellen. Hierdurch wird es dem Benutzer ermöglicht, über die äußere Form mit den Simulationsdaten zu interagieren. Die Umwandlung der einzelnen Balken in eine zusammenhängende Leitung erfolgt durch Angabe eines Aussenradius für jeden Masseknoten. Indem ein Kreis entlang des Verlaufes sämtlicher Balken geführt wird, entsteht eine geschlossene Hülle der gesamten Leitung. Um, wie bereits erwähnt, eine schnelle graphische Darstellung dieses Objektes zu erzielen, ist es, wie in Bild 5.4 gezeigt, aus Stripes zusammengesetzt. Für diese gilt, je länger sie sind, desto günstiger

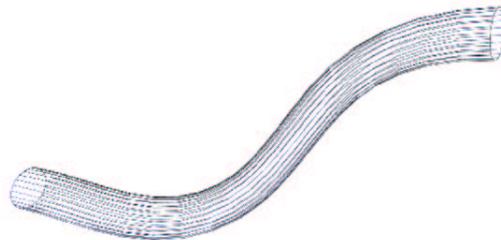


Abbildung 5.4: Die Stripes der Leitungshülle

ist das Verhältnis zwischen Dreiecks- und Punktzahl. Aus diesem Grund wird die Hülle aus möglichst wenigen aber dafür langen Stripes aufgebaut. Dieses Ziel wird erreicht, indem die Stripes in Längsrichtung der Leitung verlaufen. Eine weitere Unterteilung des Objektes findet nicht statt, da davon ausgegangen wird, daß sich der Anwender bei der Montage auf die Leitung konzentriert. Somit ist zu jedem Zeitpunkt ein überwiegender Teil der Leitung innerhalb des Sichtfeldes. Eine Unterteilung würde deshalb lediglich die Länge der Stripes ungünstig beeinflussen.

Aufbau des Kollisionsobjektes

Die Verwendung eines geometrischen Gebildes zur Abbildung der gesamten Leitung, wie es für das graphische Objekt eingesetzt wird, ist für das Kollisionsobjekt nicht ratsam. Ein solch flexibles Objekt würde die ständige Neuberechnung der Boundingbox nach sich ziehen. Aus diesem Grund wird die Leitung aus mehreren Primitivkörpern aufgebaut, wobei bei dieser Aufteilung die interne Struktur des Simulationsmodells entgegenkommend ist. Dabei ist die Leitung aus mehreren Balken, die einen kreisförmigen Querschnitt besitzen, zusammengesetzt. Dies wird in dem VR-System, wie in Bild 5.5 gezeigt, durch mehrere Zylinder abgebildet. Zwischen zwei Masseknoten wird ein Zylinder gelegt, der transliert, rotiert



Abbildung 5.5: Die Zylinder der Kollisionsleitung

und in seiner Längsachse skaliert werden kann. Um während der Simulation von den Kollisionsobjekten auf die betroffenen Leitungen und Knoten zu folgern, erhält jeder Primitivkörper einen eindeutigen Namen. Dieser hat die Form : „Leitung Nr Knoten Nr“. Somit besitzt man bei einer Kollision die Identifikation der Leitung und des betroffenen Masseknotens. Die Zuordnung zwischen Kollisionszylinder und Simulationsdaten kann auch über ein Array erfolgen. Hierbei muß jedoch bei jeder Kollision das Array durchsucht werden, wodurch bei einer großen Datenbasis schlechtere Antwortzeiten erzielt werden.

Da mit einem Zylinder immer zwei Masseknoten verbunden sind, wird lediglich derjenige mit der niedrigeren Identifikation innerhalb des Namens abgebildet. Der zweite Knoten kann aus diesem durch einfache Inkrementation gefolgert werden. Um alle Einzelobjekte der Leitung gemeinsam zu bewegen, sind sie mit Hilfe eines Assemblies zu einem Gesamtkollisionsobjekt zusammengefaßt. Der komplette Aufbau eines VR-Leitungsobjektes gestaltet sich somit wie in Bild 5.6 dargestellt. Hiermit lassen sich die Randbedingungen des vorherigen Kapitels erfüllen und es kann eine optimale Antwortzeit aller Systeme erzielt werden.

5.2.2 Kommunikationsverfahren beider Systeme

Im folgenden Abschnitt soll die Kommunikation zwischen der physikalischen Simulation der Leitung und dem VR-System beschrieben werden. Dabei wird, wie

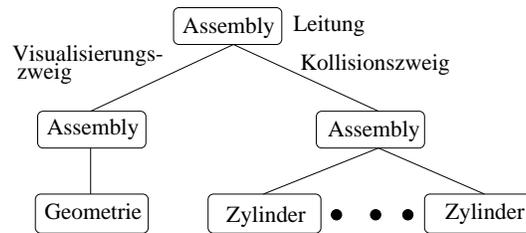


Abbildung 5.6: Der Aufbau des VR-Leitungsobjektes

in allen vorhergehenden Bereichen auch, ein besonderes Augenmerk auf die Geschwindigkeit gelegt.

Zunächst wird grundlegend festgelegt, daß sowohl das VR-System als auch das Simulationsmodell auf demselben Computer operieren. Eine Verteilung beider Aufgaben auf verschiedene Ressourcen innerhalb eines Netzwerkes ist denkbar, jedoch erzeugen hier die eingeschränkte Netzbandbreite und die Laufzeit innerhalb des Netzes eine unnötige Latenzzeit, wobei es zu einer Diskrepanz zwischen der realen Tätigkeit des Anwenders und dem ihm dargebotenen Systemzustand kommen kann. Übersteigt die zeitliche Verzögerung einen gewissen Schwellwert, so ist keinerlei Arbeiten in einer immersiven Umgebung möglich. Aus diesem Grund operieren beide Systeme innerhalb desselben Computers und greifen auf einen gemeinsamen Speicherbereich zu. Somit werden die notwendigen Daten über gemeinsame Arrays ausgetauscht. Entscheidend ist jetzt, welche Daten ausgetauscht werden müssen und in welchem Umfang.

Das VR-System dient als Schnittstelle zwischen dem Anwender und dem Simulationsmodell. Somit muß innerhalb der virtuellen Umgebung der aktuelle Systemzustand der Simulation dargestellt werden. Die hierzu relevanten Informationen sind zum einen die Positionen der einzelnen Masseknoten und zum anderen die wirkenden Kräfte an den manipulierten Punkten. Mit Hilfe der Positionen wird das visuelle Abbild der Leitung, mit dem der Monteur interagiert, generiert. Ein wichtiges Kriterium, ob eine Montage durchführbar ist oder nicht, sind die wirkenden Deformationskräfte. Überschreiten diese die in Kapitel 3.3.3 ermittelten Belastungsgrenzen für manuelle Tätigkeiten, so muß diese Information dem Benutzer in geeigneter Weise dargestellt werden. Trotz Überschreitung einer Belastungsgrenze muß dennoch ein physikalisch korrekter Zustand vom Simulationsmodell geliefert werden. Aus diesem Grund werden die Belastungsgrenzen nicht innerhalb des Simulationsmodells, sondern innerhalb des VR-Systems gespeichert. Die wirkenden Kräfte an den manipulierten Punkten werden deshalb an das VR-System übergeben, um dort auf eine Überschreitung der Belastungsgrenze reagieren zu können.

Innerhalb des Simulationsmodells besteht lediglich das Wissen über die verschiedenen Masseknoten. Aus diesem Grund interagiert der Anwender nicht mit dem gesamten Schlauch, sondern lediglich mit einzelnen Knoten. Diese können durch den Benutzer verschoben oder rotiert werden. Da innerhalb des VR-Systems keinerlei Wissen über notwendige Kräfte oder Geschwindigkeiten vorliegt, werden

die Verschiebungen oder Rotationen der entsprechenden Punkte an das Simulationsmodell geliefert. Dort werden sie anschließend in Kräfte oder Geschwindigkeiten umgewandelt. Wird innerhalb des VR-Systems eine Kollision oder das Aufschieben einer Leitung auf einen Anschlußstutzen festgestellt, so müssen diese notwendigen Information ebenfalls an das Simulationsmodell geliefert werden.

Die Informationen, wie Verschiebungen oder Punkte einer Kollisionsebene, sind jedoch nicht ausreichend, um die Leitung geeignet zu simulieren. Es muß zusätzlich festgelegt werden, auf welchen Punkt sich diese Informationen beziehen. Aus diesem Grund existiert für jede Leitung eine eindeutige Nummer, mit deren Hilfe eine Untermenge aller Punkte angegeben wird. Innerhalb dieser Untermenge liegt eine eindeutige Punktidentifikation vor, mit deren Hilfe ein einziger Punkt angesprochen werden kann. Diese Informationen werden zusammen mit den bereits erwähnten Informationen an das Simulationsmodell geliefert.

Da die Daten, wie Verschiebungsvektoren etc., innerhalb eines gemeinsamen Arrays abgebildet sind, muß für jeden Punkt spezifiziert werden, welche Operation mit diesem Punkt erfolgen soll. Dabei können auf einem Punkt mehrere Operationen gleichzeitig angewendet werden. So kann zum Beispiel ein Punkt gleichzeitig verschoben und rotiert werden. Für jede Operation⁸ existiert eine eindeutige Nummer. Die verschiedenen Lastfälle, ihre Identifikationsnummer und die hierzu notwendigen Informationen sind in der folgenden Tabelle 5.1 angegeben. Da in jedem Fall die Nummer der aktuellen Leitung und die Identifikation des aktuellen Punktes übergeben werden muß, sind diese Informationen nicht in der Tabelle aufgeführt.

⁸Die verschiedenen Operationen werden im folgenden als Lastfälle bezeichnet.

Lastfall	Identifikation	Notwendige Informationen	Beschreibung
Fixieren der Leitung	1	keine	Die Leitung wird an der aktuellen Position fixiert. Die Leitung kann weder translieren noch rotieren.
Translation	2	X,Y,Z-Koordinaten der Zielposition	Der Punkt wird an die angegebene Position transliert.
Rotation	3	Die Rotation wird als 3x3 Transformationsmatrix definiert. Um die auszutauschenden Daten zu minimieren, werden lediglich die X- und Y-Achse übergeben.	Der Punkt rotiert um die aktuelle Position.
Kontakt zwischen der Leitung und einer starren Ebene	4	Definition der Ebene durch einen Punkt und eine Normale	Der Kollisionspunkt wird auf die Ebene plaziert und die notwendige Kraft wird ermittelt.
Kontakt zwischen zwei Leitungen	5	Nummer der Kollisionsleitung und des entsprechenden Punktes	Beide Leitungen nehmen eine kollisionsfreie Position ein.
Aufschieben auf einen Stutzen	6	Da die stutzenbeschreibenden Informationen innerhalb des Simulationsmodells gespeichert sind, genügt die Angabe der Stutzenidentifikation.	Die Leitung wird auf einen Anschlußstutzen geschoben. Die hierfür notwendige Kraft wird ermittelt.
Befestigen an einem Clips	7	Es gilt das Gleiche, wie bei den Anschlußstutzen, somit ist auch hier die Angabe der Clipsidentifikation ausreichend.	Die Leitung wird mit einem Clips befestigt. Die hierzu notwendige Kraft wird ermittelt.

Tabelle 5.1: Tabelle der verschiedenen Lastfälle.

Betrachtet man den Vorderwagen eines Fahrzeuges, so stellt man fest, daß dort eine Vielzahl an Leitungen existieren. Falls bei jedem Bild alle Schläuche simuliert werden müssen, stößt man schnell an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Computer. Bei einer Montage konzentriert sich der Operateur in der Regel auf einen kleinen Ausschnitt des Vorderwagens. Werden Bauteile oder Leitungen ein- oder ausgebaut, so sind in der Regel immer nur einige wenige Leitungen gleichzeitig betroffen. Aus diesem Grund kann die Menge der zu berechnenden Leitungen eingeschränkt werden. Das VR-System ermittelt dabei die notwendige Menge der zu berechnenden Leitungen und liefert ein Array der betroffenen Schlauchidentifikationen an das Simulationsmodell. Hierdurch kann auch bei einer großen Datenbasis eine Simulation in Echtzeit erzielt werden. Der gesamte Datenaustausch zwischen dem VR-System und dem Simulationsmodell stellt sich somit entsprechend Bild 5.7 dar.

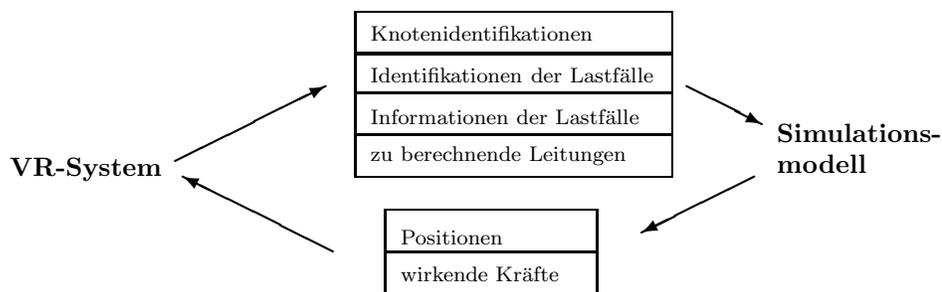


Abbildung 5.7: Der Datenaustausch zwischen dem VR-System und dem Simulationsmodell.

5.2.3 Parallelisierung des Simulationsverfahrens

Im folgenden Abschnitt soll erläutert werden, auf welche Weise die physikalische Simulation der Leitungen an das VR-System gekoppelt ist.

Wird das Simulationsmodell komplett in die Berechnungsschleife des VR-Systems integriert, so addiert sich zu der bisherigen Berechnungsdauer der Rendering-Schleife die notwendige Rechenzeit zur Simulation der ausgewählten Leitungen. Bei einer großen Datenmenge oder einer sehr hohen Materialsteifigkeit und einer damit verbundenen geringen Integrationsschrittweite, gelangt man schnell an die Grenze der Echtzeitfähigkeit. Aus diesem Grund wird in die Rendering-Schleife lediglich der Datenaustausch zwischen beiden Systemen und die Darstellung der Leitung integriert. Die eigentliche Berechnung der neuen Leitungsform findet auf einem anderen Prozessor parallel zur Rendering-Schleife statt.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, erfolgt der Datenaustausch

zwischen beiden Systemen mit Hilfe von Arrays. In der vorliegenden Arbeit werden alle notwendigen Arrays im globalen Speicher gepuffert. Der Zugriff auf diese globalen Arrays erfolgt von beiden Seiten, wobei ein exklusiver Zugriff auf jedes Array sichergestellt wird. Somit enthält jedes Array konsistente Daten eines Berechnungsschrittes.

Das VR-System beginnt zunächst damit, die notwendigen Eingabedaten zu ermitteln. Diese werden in das globale Array geschrieben. Sobald der Speicherzugriff beendet ist, werden die Daten durch das Simulationsmodell ausgelesen und die neue Lage der Leitung berechnet. Während dieser Zeit wird bereits das aktuelle Bild dargestellt. Ist die Berechnung abgeschlossen, so werden die erhaltenen Daten wiederum in ein globales Array gestellt. Das VR-System liest diese Daten anschließend aus und stellt die neue Form der Leitung dar. Liegen der Berechnungsschleife keinerlei neuen Eingabedaten vor, so werden die Leitungen mit den vorhandenen Eingabedaten simuliert. Wie in Bild 5.8 ersichtlich, vergeht bei die-

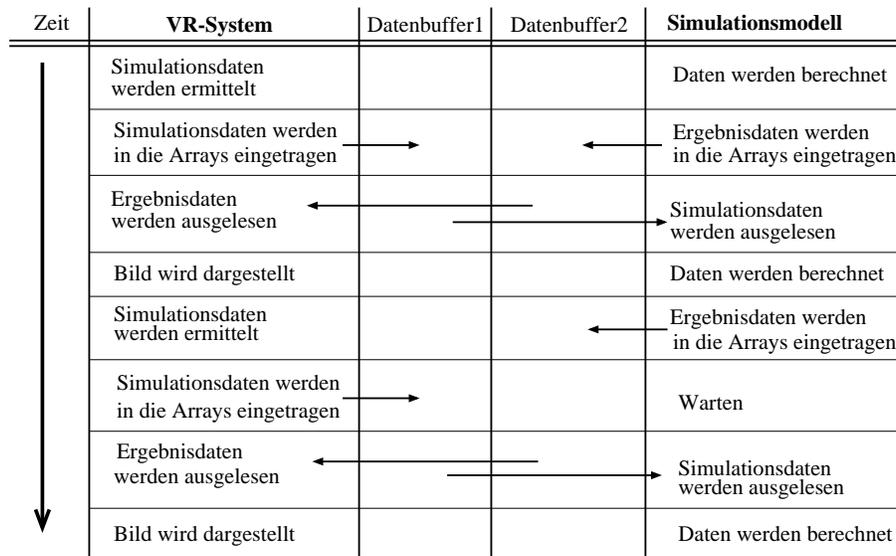


Abbildung 5.8: Die Parallelisierung zwischen beiden Systemen.

ser Vorgehensweise mindestens ein Bild, bis die Daten dem Anwender präsentiert werden. Somit besitzt auch hier die Geschwindigkeit eine höhere Priorität als die Genauigkeit.

Für die parallele Kopplung der beiden Systeme müssen folgende Fälle unterschieden werden :

- Sollte die Bilddarstellung wesentlich schneller als die Berechnung der Leitung sein, so werden die gleichen Leitungsdaten mehrere Bilder hintereinander ausgegeben. Dies führt schon nach kurzer Zeit zu einer Diskrepanz zwischen der Position der manipulierenden virtuellen Hand und der manipulierten Leitung. Dies kann dazu führen, daß eine Montage nicht simulierbar

wird.

Das folgende Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. Die Bewegung einer Leitung wird an das Simulationsverfahren gegeben. Die Berechnung der daraus resultierenden Leitungsform dauert 10 Bilder. Innerhalb dieses Zeitraumes wird die Position der virtuellen Hand ermittelt und dargestellt. Stellt das VR System schließlich die neue Form der Leitung dar, so befindet sich die Hand bereits an einem völlig anderen Ort. Diese neue Position wird nun an das Berechnungsmodell geliefert, wodurch eine neue Berechnungsschleife gestartet wird. Es kommt daher zu großen Sprüngen der Leitung. Eine exakte Positionierung durch den Benutzer ist hierdurch nicht möglich.

- Ist hingegen die Berechnungsschleife wesentlich schneller als die Rendering-Schleife des VR-Systems, so werden manche Berechnungsschritte nicht dargestellt. Manche Schwingungen der Leitungen werden somit unterdrückt. Es kann dabei vorkommen, daß sich bereits der Ruhezustand der Leitungsdeformation eingestellt hat und dieser dem Anwender präsentiert wird. Die Leitung erscheint somit visuell steifer. Prinzipiell ist damit aber eine Montage durchaus möglich.

Auch hier soll ein kurzes Beispiel der Verdeutlichung dienen. Die Leitung wird bewegt und erfährt dadurch eine Anregung. Das Simulationsverfahren kann die Leitung 10 mal berechnen bevor sie durch das VR System dargestellt wird. Schon nach der ersten Berechnung befindet sich der gegriffene Balken an seiner Zielposition. In den folgenden Schleifen werden die Bewegungen der angrenzenden Balken berechnet. Haben alle Balken eine Position gefunden, die einem Energieminimum der Leitung entspricht, kommt es zu keiner weiteren Bewegung der Leitung, sie hat sich ausgeschwungen. Wird die Leitung auf diese Weise dargestellt, so werden manche Leitungsschwingungen nicht gezeigt, die Leitung befindet sich jedoch an der angegebenen Zielposition und folgt immer den Bewegungen der Hand. Es kommt somit zu keinem Zeitpunkt zu einer Diskrepanz zwischen Hand- und Leitungsposition.

Bewertet man die Wahrscheinlichkeit, mit der beide Fälle eintreten können, so kann man bei einer realen Montage den ersten Fall ausschließen. Zum einen lassen sich die notwendigen Leitungen geeignet einschränken, so daß selten eine Vielzahl an Leitungen gleichzeitig berechnet werden muß, zum anderen befindet sich im visuellen Feld des Monteurs, speziell im Vorderwagen, eine große Anzahl verschiedener Objekte. Diese sind zum Teil recht komplex, so daß eine Vielzahl von Polygonen dargestellt werden muß. Dadurch benötigt die Darstellung des Bildes wesentlich mehr Zeit. Durch die verwendete Anbindung beider Systeme ist somit eine Montagesimulation von Leitungen in Echtzeit möglich, da beide Systeme unabhängig von einander arbeiten und lediglich die notwendigen Daten austauschen müssen.

5.3 Berechnung der Simulationseingabedaten

Da das VR-System die Schnittstelle zwischen dem Benutzer und den Simulationsdaten darstellt, müssen innerhalb dieses Systems die notwendigen Operationen aus den Tätigkeiten des Anwenders berechnet werden. Deshalb soll innerhalb dieses Unterkapitels beschrieben werden, wie die Informationen für die einzelnen, in Tabelle 5.1 beschriebenen, Lastfälle berechnet und dem System zur Verfügung gestellt werden.

5.3.1 Erstellung der Simulationsdatenbasis

Bevor mit der konkreten Simulation begonnen werden kann, müssen die notwendigen Daten dem Simulationsverfahren bekannt gegeben werden. Dies erfordert einen Vorbereitungsschritt zur Aufbereitung aller Daten. Zum einen müssen alle Visualisierungsdaten aus CAD-Daten in tesselierte Daten gewandelt werden, was ggfs. Vereinfachungen der CAD-Daten erfordert, indem zum Beispiel nur die äußere Hülle der Objekte verwendet wird. Zum anderen müssen die Daten der physikalischen Simulation erstellt werden. Zu Beginn werden die Materialdaten der Leitungen festgelegt. Hierzu werden die in Kapitel 3.1.2 angegebenen Parameter *Elastizitätsmodul*, *Dichte* und *Querkontraktionszahl* in der internen Datenbasis abgelegt.

Als weiteres müssen alle Leitungen generiert werden. Hierzu wird der Verlauf der Leitung definiert. Dabei ist es notwendig, daß die Mittellinie der Leitung aus Splinekurven, Linien oder Kreisbögen aufgebaut ist. Hierzu können z.B. die Ergebnisse der Arbeit von Herrn Symietz [39] verwendet werden. Die Masseknoten ergeben sich aus der Diskretisierung des Leitungsverlaufes. Um den Schlauch physikalisch simulieren zu können, muß er mit einem Material der internen Datenbasis verknüpft werden. Durch Angabe eines Innen- und eines Außenradius, für jeden Knoten, können mit Hilfe der Materialdichte das Gewicht und die Trägheitstensenoren der Leitung berechnet werden. Somit ist der Schlauch vollständig beschrieben. Nachdem alle flexiblen Leitungen definiert sind, können einige in Leitungsversteifungen umgewandelt werden. Hierfür genügt die einfache Selektion der entsprechenden Leitung. Innerhalb des Simulationsverfahrens werden daraufhin mit den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Operationen die notwendigen Informationen berechnet.

Da bei einer Montage nicht nur die verschiedenen Leitungen, sondern auch Leitungsclipline und Anschlußstutzen beteiligt sind, müssen diese ebenfalls dem System bekannt gegeben werden.

Die Leitungsclipline werden dabei, wie in Bild 5.9 dargestellt, durch die Parameter \mathbf{p} , \mathbf{n} , \mathbf{l} , d_1 und d_2 beschrieben. \mathbf{p} , \mathbf{n} und \mathbf{l} bestimmen die Lage und Orientierung des Clips. Der Ursprung \mathbf{p} befindet sich im Mittelpunkt der Klammer. Hierdurch liegt \mathbf{p} auf der Mittellinie der arritierten Leitung. \mathbf{n} gibt die Öffnungsrichtung und \mathbf{l} die Lage des Clipses um die Achse \mathbf{n} an. Aus der Länge des Öffnungsspaltens d_1

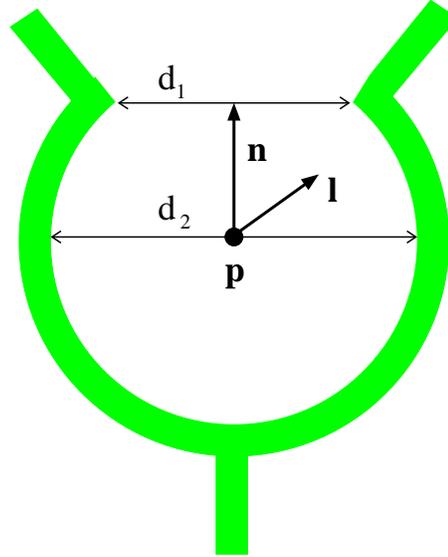


Abbildung 5.9: Die Parameter eines Leitungsclipses.

und dem Durchmesser des Clipses d_2 wird die Länge des Vektors \mathbf{n} berechnet. Dieser gibt somit die Distanz bis zur völligen Lösung der Leitung bekannt. Seine Länge ergibt sich dabei aus :

$$|\mathbf{n}| = \sqrt{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{d_2^2 - d_1^2}}{2} \quad (5.1)$$

Es ist nicht notwendig, diese Berechnung im Clipslastfall erneut durchzuführen, da sich die Länge von \mathbf{n} nicht mehr ändert. Der Parameter k aus der in Kapitel 4.3.6 angegebenen Formel 4.110 gibt schließlich die Kraft an, die notwendig ist, die Leitung auf den Durchmesser d_2 zu dehnen. Sie wird durch den Anwender vorgegeben.

Die Definition eines Anschlußstutzens ergibt sich ähnlich wie bei dem Leitungsclips. Da es sich hier um einen Zylinder handelt, genügen in diesem Fall die Angaben des Ursprunges \mathbf{p} und der Aufschieberichtung \mathbf{n} um seine Lage vollständig zu beschreiben. Die Länge von \mathbf{n} gibt hierbei zusätzlich die axiale Ausdehnung des Stutzens wieder. Die Leitung kann somit maximal $|\mathbf{n}|$ Einheiten auf den Stutzen geschoben werden.

Um das Aufschieben der Leitung mit Hilfe eines Preßverbandes simulieren zu können, muß dem System noch der äußere Durchmesser des Stutzens d_1 und ein Gleitreibungskoeffizient γ_G bekannt gegeben werden. Der Anschlußstutzen ergibt sich somit, wie in Bild 5.10 dargestellt.

Sind alle notwendigen Simulationsdaten definiert, so werden diese in einer Datei



Abbildung 5.10: Die Parameter eines Anschlußstutzens.

abgespeichert. Zu Beginn der Montagesimulation wird diese durch das Simulationsmodul eingelesen.

Für die Simulationsobjekte, wie Leitungsclipse und Anschlußstutzen, werden zusätzliche Dateien gespeichert und zu Beginn durch das VR-System eingelesen. Das VR-System generiert daraufhin die entsprechenden Geometrien zur Visualisierung und Kollisionserkennung. Ein Anschlußstutzen wird dabei als einfacher Zylinder innerhalb des VR-Systems dargestellt. Um bei einer Kollision auf die gespeicherten Daten des Stutzens zugreifen zu können, erhält die VR-Geometrie einen eindeutigen Namen in der Form „Anschlusstutzen Nr “. Mit Hilfe der Nummer kann somit auf die Position und die Aufschieberichtung zugegriffen werden. Ein Leitungsclips wird durch eine Standardgeometrie, wie in Bild 5.9 dargestellt, im VR-System visualisiert. Diese wird entsprechend transliert und rotiert, um an die angegebene Position zu gelangen. Verschiedene Clipsdurchmesser werden durch verschiedene Skalierungsfaktoren realisiert. Möchte man die Breite der Clipsöffnung beeinflussen, so ist man gezwungen, die Punktkoordinaten der Geometrie zu verändern. Die Clipsöffnung spielt jedoch lediglich bei der Befestigung der Leitung eine Rolle. In der Realität federt der Clips auseinander und ermöglicht so das Durchgleiten der Leitung. Dieser Sachverhalt wird aber in dem VR-System nicht dargestellt, so daß auch die graphische Anpassung der Clipsöffnung zwecklos erscheint. Der Clips soll dem Monteur lediglich als Hilfestellung dienen. Es wird ihm durch den bestehenden Ansatz ermöglicht, Clipse innerhalb des Motorraumes zu finden und an diesen Stellen die Leitung zu befestigen. Um bei einer Kollision wie bei den Anschlußstutzen auf die internen Daten des Clips zugreifen zu können, erhält diese Geometrie ebenfalls einen eindeutigen Namen der Form : „Clips Nr “.

5.3.2 Translation und Rotation der Leitungen

Während einer Montageuntersuchung ist der Benutzer der aktive Bestandteil des VR-Systems. Er greift Objekte und manipuliert hierdurch ihre Lage. Dies trifft auch für die integrierten Leitungen zu. Zunächst muß der Anwender mit Hilfe eines speziellen Befehls seine Absicht, Objekte greifen zu wollen, mitteilen. Dieser Befehl kann z.B. durch die Sprache oder durch eine bestimmte Geste eingegeben

werden. Kollidiert danach das Abbild der menschlichen Hand, dargestellt in Bild 5.11, mit der Kollisionsgeometrie der Leitung, wird entschieden, daß der Schlauch gegriffen ist. Daraufhin kann dieser durch den Benutzer bewegt werden. Die Be-

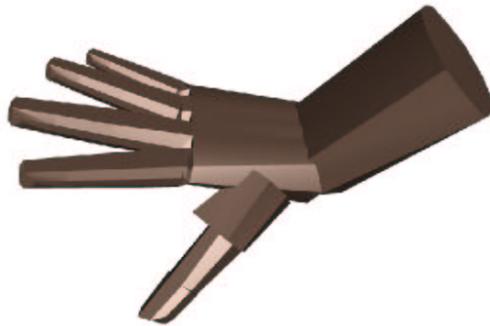


Abbildung 5.11: Das Abbild der menschlichen Hand im VR-System

wegung der Leitung setzt sich dabei aus einer Translation und einer Rotation zusammen. Da innerhalb des VR-Systems mindestens ein Balken gegriffen wird, erfolgt die Verschiebung immer mit zwei Punkten gleichzeitig. Aus dem Namen der Kollisionsgeometrie wird zunächst die Nummer der Leitung und der beiden Punkte ermittelt. Da der Anwender nicht die Punkte selbst greift, muß ihre Lage innerhalb der Hand ermittelt werden. Dies geschieht durch Berechnung eines Vektors zwischen dem Ursprung der virtuellen Hand und der aktuellen Lage der Punkte. Indem die Position des Handursprungs aus dem vorherigen Bild gespeichert wird, ist man in der Lage, eine Transformationsmatrix zu berechnen, die die Lage der Hand aus dem vorherigen Bild in die aktuelle Plazierung überführt. Die Transformationsmatrix ergibt sich dabei anhand der folgenden Gleichung :

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{H}_{t-1}^{-1} \quad (5.2)$$

Hierbei geben \mathbf{H}_i die Positionen und Orientierungen der Hand in den verschiedenen Bildern an. Indem die Translationsvektoren der beiden gegriffenen Punkte mit der Transformationsmatrix \mathbf{T} multipliziert werden, erhält man die neue Lage der Punkte innerhalb der Hand. Die Verschiebung eines Leitungsbalkens ergibt sich somit entsprechend Bild 5.12.

Da das Simulationsmodell verschiedene Eingabedaten für die Verschiebung und die Rotation erfordert, werden beide Fälle getrennt behandelt.

Für die Verschiebung der Leitung müssen die Zielpositionen der Masseknotten bekannt sein. Dies wird erreicht, indem zu der aktuellen Position des Handursprungs die berechneten Translationsvektoren addiert werden. Hierdurch erhält man die Zielposition der beiden Punkte innerhalb des Weltkoordinatensystems. Aus der aktuellen Position und der Zielposition kann mit Hilfe der Anzahl der Integrationschritte n die notwendige Bewegung pro Integrationschritt durch folgende

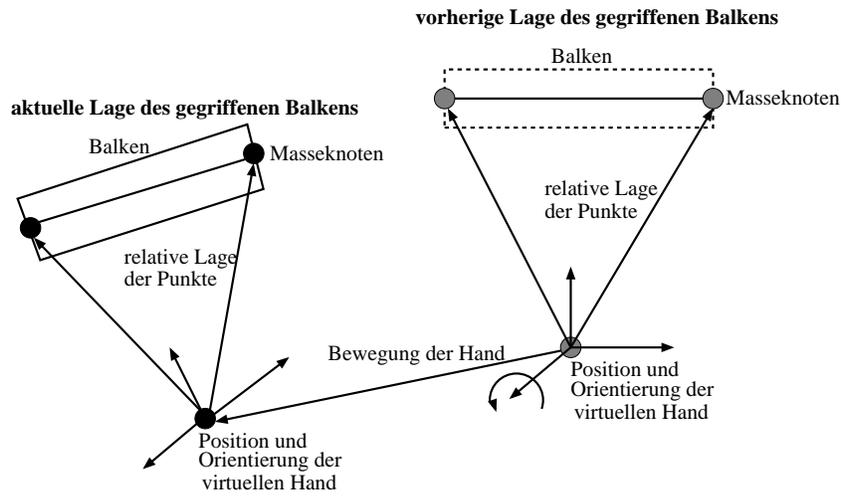


Abbildung 5.12: Die Bewegung der Leitung

Formel berechnet werden :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{P}_{ziel} - \mathbf{P}_{akt}}{n} \quad (5.3)$$

Mit Hilfe der Dehnung innerhalb des Balkens wird hieraus die wirkende Kraft und somit die Beschleunigung bestimmt.

Die Angabe der Rotation erfolgt durch Verwendung der X- und Y-Achse der Transformationsmatrix \mathbf{T} . Innerhalb des Simulationsmodells werden hieraus Winkelgeschwindigkeiten für die einzelnen Rotationen ermittelt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, daß innerhalb des VR-Systems keinerlei Wissen über die aktuelle Orientierung der Masseknoten vorhanden sein muß. Diese wird innerhalb des Simulationsmodells, wie bereits erwähnt, aus den Trägheitstensoren der Masseknoten berechnet. Hierdurch wird ein erhöhter Aufwand bei einer Rotation derselben verhindert.

Gegeben sind die Einheitsvektoren der Transformationsmatrix \mathbf{T} . Unter der Annahme kleiner Rotationen ergeben sich die Rotationen um die einzelnen Achsen aus den Kreuzprodukten der bisherigen Lage und der durch die Transformationsmatrix gegebenen Orientierung. Die einzelnen Rotationen werden mit Hilfe der

folgenden Formeln berechnet :

$$\mathbf{x} \times \mathbf{T}_x = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{T}_{x1} & \mathbf{T}_{x2} & \mathbf{T}_{x3} \end{vmatrix} = \mathbf{T}_{x2}\mathbf{k} - \mathbf{T}_{x3}\mathbf{j} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{y} \times \mathbf{T}_y = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{T}_{y1} & \mathbf{T}_{y2} & \mathbf{T}_{y3} \end{vmatrix} = \mathbf{T}_{y3}\mathbf{i} - \mathbf{T}_{y1}\mathbf{k} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{z} \times \mathbf{T}_z = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{T}_{z1} & \mathbf{T}_{z2} & \mathbf{T}_{z3} \end{vmatrix} = \mathbf{T}_{z1}\mathbf{j} - \mathbf{T}_{z2}\mathbf{i} \quad (5.6)$$

Die gesamte Rotation entsteht aus der Addition aller Rotationen. Man erhält somit :

$$\mathbf{r} = (\mathbf{x} \times \mathbf{T}_x) + (\mathbf{y} \times \mathbf{T}_y) + (\mathbf{z} \times \mathbf{T}_z) \quad (5.7)$$

$$= (\mathbf{T}_{y3} - \mathbf{T}_{z2})\mathbf{i} + (\mathbf{T}_{z1} - \mathbf{T}_{x3})\mathbf{j} + (\mathbf{T}_{x2} - \mathbf{T}_{y1})\mathbf{k} \quad (5.8)$$

Rotiert man um die X- und um die Y-Achse, so wird die Z-Achse zweimal bewegt. Aus diesem Grund muß die obige Gleichung durch zwei geteilt werden, um den korrekten Betrag zu erhalten. Die Winkelgeschwindigkeit pro Integrations-schritt wird wie bei der Translation durch Teilung der obigen Gleichung durch die Anzahl der Integrationsschritte und die Integrationsschrittweite Δt erreicht. Die Winkelgeschwindigkeit um die lokalen Achsen \mathbf{i} , \mathbf{j} und \mathbf{k} des Knotens ergeben sich somit zu :

$$\omega_i = \frac{\mathbf{T}_{y3} - \mathbf{T}_{z2}}{2n\Delta t} \quad (5.9)$$

$$\omega_j = \frac{\mathbf{T}_{z1} - \mathbf{T}_{x3}}{2n\Delta t} \quad (5.10)$$

$$\omega_k = \frac{\mathbf{T}_{x2} - \mathbf{T}_{y1}}{2n\Delta t} \quad (5.11)$$

Diese Geschwindigkeiten werden anschließend direkt verwendet, um die Bewegung des Balkens zu berechnen.

5.3.3 Kollisionen mit starren Bauteilen

In diesem Unterkapitel wird gezeigt, welche Informationen die Kollisionserkennung des VR-Systems zur Verfügung stellt und inwieweit diese Informationen geeignet erweitert werden müssen, um dem Anwender einen realistischen Eindruck der Montage zu vermitteln. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, erfolgt die Kollisionserkennung innerhalb des VR-Systems in zwei Schritten. Mit Hilfe eines Boundingboxtests liefert der erste eine Information, ob generell eine Kollision

vorliegt oder nicht. Wird im zweiten Schritt eine Durchdringung der Polygone festgestellt, so erhält der Kollisionscallback den Schnittpunkt der beiden betroffenen Polygone, die entsprechenden Polygone selbst und ihre Flächennormalen. Um die Antwortzeiten zu minimieren, wird lediglich der erste Kollisionspunkt berechnet. Der Anwender besitzt somit keinerlei Wissen, über die Anzahl der Durchdringungen, sowie über die Eindringtiefe, da, wie in Bild 5.13 dargestellt, Polygone des einen Objektes im Inneren des zweiten Objektes liegen können, ohne daß eine Durchdringung der Polygone vorliegt. Die Auflösung der Kollision ausschließlich auf Grund der Eindringtiefe und der Kollisionsnormalen stellt somit nicht sicher, daß nach Verschiebung eines Objektes keine Durchdringung vorliegt. Besteht eine Kollision über mehrere Bilder hinweg, ist ferner nicht sichergestellt,

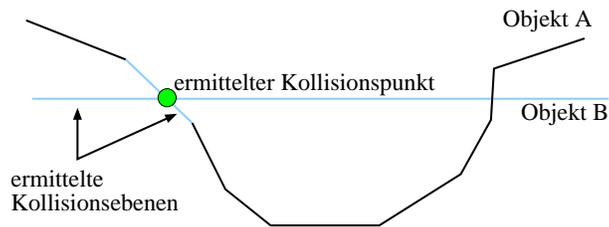


Abbildung 5.13: Beispiel einer VR-Objektdurchdringung

ob das VR-System die selben Polygone des vorherigen Bildes liefert. So können in dem obigen Beispiel auch der Punkt und die beiden Polygone auf der rechten Seite ermittelt werden. Als weiteres Hindernis kommen die CAD-Daten ins Spiel.

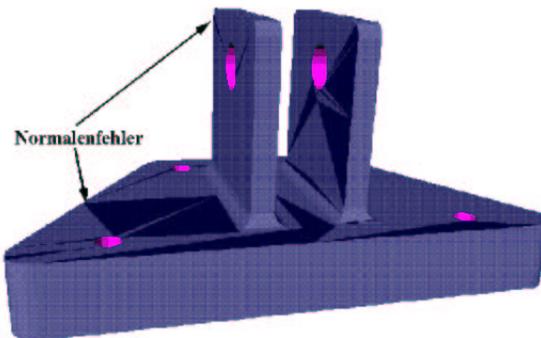


Abbildung 5.14: Beispiel für fehlerhafte Normalen eines Konstruktionsteiles

Ein Konstrukteur ist primär an der äußeren Form des Objektes interessiert. Mit heutigen CAD Programmen besitzt er oft kein Wissen über die Ausrichtung der erstellten Flächen. Diese Ausrichtung bestimmt aber die Flächennormalen des polygonalen Modells und somit die Innen- oder Außenseite des Objektes. Ohne

dieses Wissen entstehen, wie in Bild 5.14 dargestellt, falsche Normalenausrichtungen. Wird nun die Information der Flächennormalen verwendet, so kann es in solch einem Fall vorkommen, daß durch die Verschiebung in Normalenrichtung die Durchdringung sogar noch vergrößert wird.

Doch selbst eine korrekte Ausrichtung der Normalen erlaubt keine realistische Kollisionsbehandlung, falls der Kollisionscallback ausschließlich diese verwendet, um die Bewegung des Kollisionsobjektes zu beeinflussen. Als Beispiel soll hier eine Tischplatte dienen. Fällt ein Objekt von oben, d.h. in entgegengesetzter Richtung zur Flächennormalen, auf den Tisch, so wirkt die Normale des Tisches der Bewegung entgegen und das Objekt springt hoch. Kommt das Objekt jedoch von unten, so kann es den Tisch ohne Widerstand durchdringen. Dies zeigt, daß die Normalenausrichtung der Polygone nicht dazu geeignet ist, ein realistisches Objektverhalten zu erzielen. Aus der Bewegung des Objektes selbst muß eine Normale der Kollisionsebene berechnet werden, so daß es unerheblich ist, ob sich das Objekt von Innen oder Außen der starren Umgebung nähert.

Wird ein Bauteil bewegt, so besitzt man bei jedem Bild die Information, ob eine Kollision vorliegt oder nicht. Speichert man die letzte kollisionsfreie Lage des Objektes, so ist es möglich, bei einer Durchdringung die Bewegungsrichtung des Objektes zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Richtung wird die Flächennormale der Kollisionsebene geeignet angepaßt, so daß sie immer der Bewegung des Objektes entgegenwirkt. Ein Beispiel für diesen Sachverhalt wird in Bild 5.15 dargestellt. Um die Normale der Kollisionsebene richtig auszurichten, wird angenommen, daß

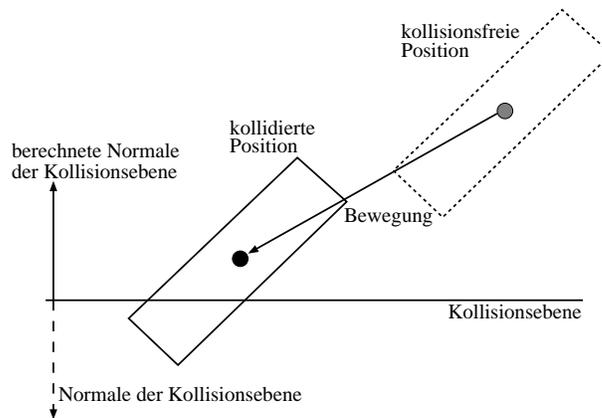


Abbildung 5.15: Beispiel für die Anpassung der Kollisionsebenennormale

der Winkel zwischen der negativen Objektbewegung und der Normalen kleiner als 90 Grad sein muß. Um dieses Kriterium effizient zu überprüfen, wird das Skalarprodukt zwischen beiden Vektoren gebildet. Hierdurch erhält man den Cosinus des eingeschlossenen Winkels. Sollte dieser kleiner als 0 sein, muß die Normale der Kollisionsebene ihre Orientierung wechseln.

Falls der Balken in der letzten kollisionsfreien Position so orientiert ist, daß :

- Einer der Endpunkte unterhalb und der andere oberhalb der Kollisionsebene liegt.
- Die Projektion eines Endpunktes auf der Kollisionsebene befindet sich außerhalb des Polygons.

Dann kann nicht eindeutig entschieden werden, in welche Richtung die Normale gedreht werden muß. Ein Beispiel für diese Konfiguration wird in Bild 5.16 dargestellt. Die linke Ebene wird durch die Kollisionsroutine zurückgeliefert. Legt

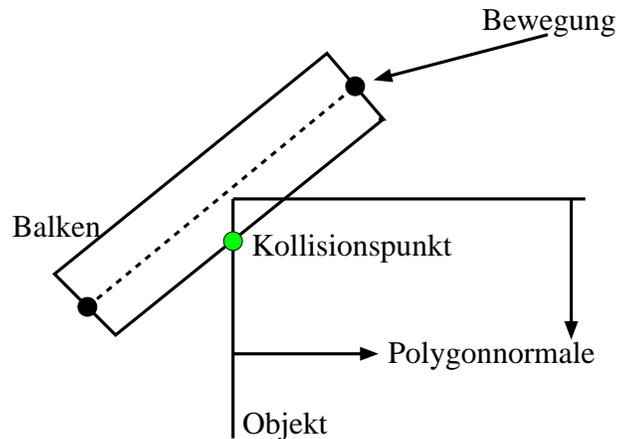


Abbildung 5.16: Beispiel für die falsche Anpassung der Kollisionsebenennormale

man lediglich die Bewegungsrichtung zu Grunde, so bleibt die bisherige Ausrichtung der Normalen erhalten und der Balken wird auf die Innenseite des Objektes befördert. Dies widerspricht jedoch dem visuellen Eindruck des Monteurs, der erwartet, daß die Leitung an der Kante vorbei geführt wird und der Balken auf der linken Seite der Kollisionsebene zum Liegen kommt. Um dies zu erreichen, werden, wie in Bild 5.17 dargestellt, die beiden Endpunkte des Balkens in die Ebene des Polygons projiziert. Anschließend wird, wie in Bild 5.18 dargestellt, der Schnittpunkt zwischen der Geraden der beiden projizierten Endpunkte und der Polygonkante gebildet. Mit Hilfe der Polygonnormalen und der Kante wird eine Normale bestimmt, die senkrecht zur Kante steht und aus dem Polygon herauszeigt. Somit kann sichergestellt werden, daß ein korrekter visueller Eindruck entsteht.

Da die Kollisionsebenen lediglich durch ihre Lage und ihre Orientierung angegeben sind, handelt es sich um unendlich ausgedehnte Flächen. Dies widerspricht jedoch der endlichen Abmessung des Kollisionspolygons. Indem der Lastfall der Kollisionsebene bei jedem Bild gelöscht wird, umgeht man das Problem. Hierdurch kommt es jedoch zu einer sichtbaren Vibration der Leitung, die in jedem Bild in die Kollisionsebene eintaucht und anschließend wieder herausbewegt wird.

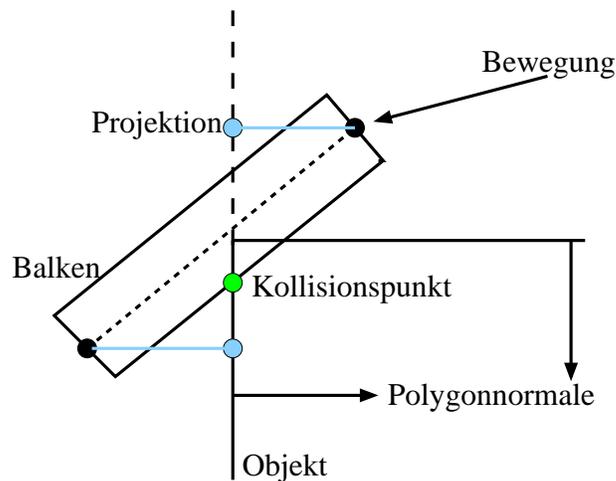


Abbildung 5.17: Projektion der Endpunkte und Anpassung der Kollisionsnormale

Dieser Nachteil wird behoben, wenn der Kollisionslastfall mehrere Bilder bestehen bleibt. Die Leitung beginnt in dem Fall auf der Ebene zu gleiten und behält bei jedem Bild eine ruhige Position auf der Kollisionsebene. Um der endlichen Ausdehnung des Kollisionspolygons gerecht zu werden, muß entschieden werden, wann dieser Lastfall zu entfernen ist. Hierzu projiziert man beide Balkenendpunkte auf die Kollisionsebene. Es wird nun getestet, ob beide Endpunkte außerhalb des Polygons liegen. Ist dies der Fall, wird angenommen, daß der Balken an dem betroffenen Polygon vorbei geführt worden ist und der entsprechende Lastfall gelöscht werden kann.

Da, wie bereits erwähnt, die wirkende Kraft proportional zur Eindringtiefe des Balkens ist, können in Fällen, wie dem in Bild 5.16 dargestellten, Kräfte auftreten, die die Leitung enorm beschleunigen und zu einer instabilen Simulation der Leitung führen. Um dieses Problem zu beheben, wird innerhalb des VR-Systems die Eindringtiefe des Endpunktes bestimmt. Liegt diese oberhalb einer festgelegten Schwelle, so wird kein Kollisionslastfall eingefügt. Ein Translationslastfall bewegt den Endpunkt innerhalb mehrerer Bilder in Richtung der Normalen der Kollisionsebene aus dem Objekt heraus. Ist der Schwellwert erreicht, so wird der Translationslastfall durch einen korrekten Kollisionslastfall ersetzt. Dies führt zwar zu einer unrealistischen Darstellung der Montageszene, jedoch zu Gunsten einer stabilen Simulation.

5.3.4 Kollisionen mit flexiblen Leitungen

Ähnlich wie bei der Kollision zwischen einer Leitung und einem starren Objekt der Umgebung, erfolgt die erste Kollisionserkennung auf polygonaler Basis in-

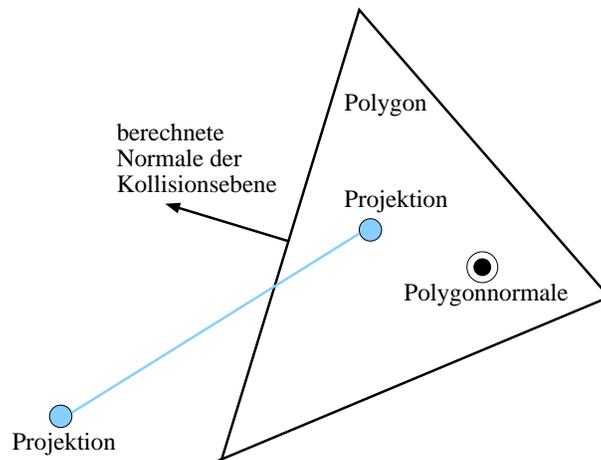


Abbildung 5.18: Der zweite Schritt zur Anpassung der Kollisionsnormalen

nerhalb des VR-Systems. Da das Kollisionsobjekt aus mehreren Primitivkörpern aufgebaut ist, kann man aus den Kollisionsobjekten auf die betroffenen Balken schließen. Aus den Namen der Zylinder erhält man die Nummer der Leitungen und die Identifikationen der zu manipulierenden Masseknoten. Diese Informationen werden anschließend an das Simulationsmodell geliefert. Wie bereits in Kapitel 4.3.4 beschrieben, wird dort die Kollision zwischen beiden Objekten aufgelöst, indem die Tiefe der Überlappung beider Leitungen berechnet wird. Die physikalische Simulation übernimmt im folgenden die Aufgabe der Kollisionserkennung zwischen beiden Balken. Innerhalb des VR-Systems wird nun nicht mehr auf Kollision, sondern auf Kollisionsfreiheit getestet. Konnte diese festgestellt werden, so ist ein realistischer, d.h. kollisionsfreier Systemzustand eingetreten, wodurch der entsprechende Lastfall aus der Menge der Leitungsoperationen entfernt wird.

5.3.5 Behandlung von Anschlußstutzen

Wie bereits in Kapitel 5.3.1 erwähnt, erfolgt die Definition eines Anschlußstutzens innerhalb des Vorbereitungsprozesses. Somit muß während der VR-Simulation lediglich auf den entsprechenden Stutzen referenziert werden. Dies erfolgt, indem eine Kollision zwischen einer Leitung und der graphischen Repräsentation eines Anschlußstutzens innerhalb des VR-Systems erkannt wird. Aus dem Namen des Anschlußstutzens kann man die Identifikation desselben ermitteln und dadurch auf die im Vorbereitungsprozeß definierten Daten, wie Aufschieberichtung, Länge und Position des Stutzens zugreifen. Um das visuelle Feedback während dieser Operation zu verbessern, wird die Leitung, wie in Bild 5.19 dargestellt, zunächst so gedreht und verschoben, daß die Mittellinie des letzten Leitungszyklinders mit der Aufschieberichtung identisch ist. Hierzu wird zunächst der gegriffene Endpunkt der Leitung auf die Mittellinie des Stutzens projiziert. Es ergibt sich dar-

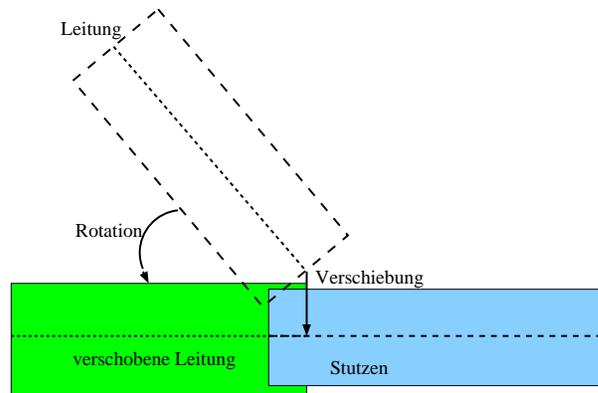


Abbildung 5.19: Beispiel für die automatische Ausrichtung der Leitung.

aus eine Verschiebungsrichtung der Leitung, die als Translationslastfall an das Berechnungsmodell gegeben wird. Des weiteren muß die Leitung geeignet um den verschobenen Punkt gedreht werden. Der Vektor \mathbf{b} zwischen beiden Balkenendpunkten beschreibt die aktuelle Lage des Balkens. Aus dem Kreuzprodukt zwischen den Vektoren \mathbf{b} und \mathbf{n} des Stutzens erhält man einen zu beiden senkrecht stehenden Vektor \mathbf{l} . Aus dem Kreuzprodukt von \mathbf{l} und der Aufschieberichtung des Stutzens \mathbf{n} erhält man einen dritten Vektor \mathbf{c} . Alle Vektoren zusammen definieren ein Koordinatensystem $\mathbf{T}_1 = [\mathbf{n} \ \mathbf{l} \ \mathbf{c}]$. Bildet man das Kreuzprodukt zwischen \mathbf{l} und \mathbf{b} , so erhält man wiederum einen Vektor \mathbf{h} , aus dem sich ein Koordinatensystem $\mathbf{T}_2 = [\mathbf{b} \ \mathbf{l} \ \mathbf{h}]$ bestimmen läßt. Die notwendige Rotationsmatrix \mathbf{T} zur Ausrichtung der Leitung ergibt sich schließlich aus :

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{T}_2 \quad (5.12)$$

Die X- und Y-Achse dieser Matrix kann schließlich als Rotationslastfall an das Berechnungsmodell geliefert werden.

Diese Ausrichtung wird solange durchgeführt, bis der Benutzer die Leitung entweder losläßt oder er sie von dem Anschlußstutzen abgezogen hat, und keine Kollision mehr zwischen beiden vorliegt.

Neben der Bewegung der Leitung ist bei dieser Operation die wirkende Reibungskraft zwischen dem Stutzen und der Leitung entscheidend. Sie wird schließlich durch einen dritten Lastfall, dem eigentlichen Stutzenlastfall, ermittelt.

Wird die maximale Länge des Stutzens erreicht, ohne daß eine Kraftschwelle überschritten wird, so bewirkt ein weiterer Translationslastfall den Stillstand der Leitung. Ist jedoch eine Kraftschwelle überschritten, wird die Leitung mit Hilfe eines Translationslastfalles an die letzten Position vor Erreichen der Schwelle plazierte.

Läßt der Benutzer die Leitung, während sie sich auf dem Stutzen befindet, los, so werden alle Translations-, Rotations- und Stutzenlastfälle gelöscht. An ihre Stelle

tritt ein neuer Lastfall zur Fixierung der Leitung. Die Leitung wird hierdurch innerhalb des Simulationsmodells mit dem Stutzen befestigt. Sie kann ohne direktes Eingreifen des Monteurs nicht mehr vom Stutzen rutschen. Greift der Benutzer nicht das befestigte Ende der Leitung und zieht diese vom Stutzen weg, so führt dies in der Realität zum Abrutschen der Leitung. Dieser Sachverhalt wird dem Benutzer jedoch nicht dargestellt, sondern lediglich durch Überschreiten einer Kraftschwelle an dem gegriffenen Bereich signalisiert. Greift der Anwender das befestigte Ende, so wird der Fixierungslastfall gelöscht und durch die oben bereits erwähnten Translations- und Rotationslastfälle ersetzt. Hierdurch kann der Benutzer die Leitung wieder vom Stutzen abziehen.

5.3.6 Behandlung von Leitungsclipsen

Die Behandlung von Leitungsclipsen erfolgt ähnlich wie die Berechnung der Anschlußstutzen. Auch hier wird nach einer Kollision der Leitung mit der graphischen Repräsentation des Clipses zunächst diese entsprechend ausgerichtet. Der Balken wird so gedreht, daß seine Lage parallel zu dem Vektor \mathbf{l} ist. Seine Endpunkte können damit lediglich entlang des Vektors \mathbf{n} translieren. Neben der Rotation wird der Balken so verschoben, daß seine Punkte auf der Ebene $\mathbf{n} - \mathbf{l}$ liegen. Wie bei dem Stutzenlastfall wird dies durch Einfügen eines Rotations- und eines Translationslastfalles erreicht.

Um die Verschlusskraft des Clipses simulieren zu können, ist ein dritter Lastfall erforderlich. Dieser Clipslastfall dient lediglich dazu, die wirkende Kraft an den Anwender zurück zu liefern.

Kommt die Mittellinie des Balkens auf dem Ursprung des Clipses zum Liegen und zeigt die Bewegungsrichtung des Balkens in entgegengesetzter Richtung zu \mathbf{n} , so wird die Leitung mit Hilfe eines Translationslastfalles an der eingerasteten Stelle fixiert. Zeigt die Bewegungsrichtung in die gleiche Richtung wie \mathbf{n} , wird der Balken an die entsprechende Stelle in der $\mathbf{n} - \mathbf{l}$ Ebene plaziert.

Wird die Leitung in der Einrastposition losgelassen, werden alle Rotations-, Translations- und Clipslastfälle gelöscht und durch einen einzigen Fixierungslastfall ersetzt. Die Leitung wird somit durch den Clips an ihrer aktuellen Position gehalten. Läßt der Benutzer sie los, während ihre Mittellinie einen geringeren Abstand zum Clipsursprung aufweist als die Länge des Vektors \mathbf{n} , so wird die Leitung zunächst durch einen Translationslastfall automatisch in die Einrastposition gebracht. Anschließend werden wiederum alle Rotations-, Translations- und Clipslastfälle durch einen einzigen Fixierungslastfall ersetzt.

Greift der Monteur eine befestigte Leitung, so wird zunächst der Fixierungslastfall gelöscht und die entsprechenden Translations-, Rotations- und Clipslastfälle eingefügt. Anschließend erfolgt die gleiche Berechnung wie beim Befestigen der Leitung. Liegen keine Kollisionen zwischen der Leitung und dem Clips mehr vor, so werden alle damit verbundenen Lastfälle automatisch gelöscht und die Leitung kann wieder beliebig bewegt werden.

Im Gegensatz zur Behandlung des Anschlußstutzens führt eine Überschreitung einer Kraftschwelle zu keiner Bewegungsänderung, da angenommen wird, daß die Überschreitung nur einen sehr geringen Zeitraum andauert. Die Leitung schnappt danach ein, wodurch eine Verringerung der Kraft verbunden ist. Die Überschreitung wird dem Benutzer somit lediglich visuell dargestellt.

5.3.7 Einbeziehung der Kraftschwellen

Wie bereits erwähnt, sind die Belastungsgrenzen für die manuellen Montagen nicht Bestandteil der physikalischen Simulation. Sie werden lediglich innerhalb des VR-Systems gespeichert und dort dem Anwender geeignet präsentiert.

Da es sich bei den Belastungsgrenzen um wirkende Kräfte handelt, könnte man diese mit Hilfe eines Kraftfeedbackgerätes dem Benutzer anzeigen. Manipuliert er die Leitung, spürt er zu jedem Zeitpunkt die wirkende Kraft und kann subjektiv entscheiden, ob die Montage durchführbar ist oder nicht. Die heutigen Kraftfeedbackgeräte eignen sich jedoch nicht für den Einsatz in einer Montage, da sie zum einen nur geringe Kräfte zurückliefern können und zum anderen einen sehr eingeschränkten Arbeitsbereich besitzen. Der Benutzer wird somit gezwungen, während der gesamten Montage an einer Position zu verharren. Hierdurch wird die Aussagekraft der Montage deutlich verringert, da gewisse montagetypische Haltungen nicht eingenommen werden können. Es sind somit andere Rückkopplungsarten gefragt, um eine Überschreitung geeignet darzustellen.

Ein geeignetes Mittel ist die visuelle Rückkopplung. Die wirkenden Kräfte werden dabei in Farben umgewandelt und so dem Monteur angezeigt. Es wird zunächst festgelegt, daß die Farbe Blau keiner Kraft, Grün dem halben Schwellwert und Rot einer Kraft größer oder gleich dem Schwellwert entspricht. Durch Normierung der aktuellen Kraft \mathbf{f} mit der Belastungsgrenze \mathbf{f}_{max} erhält man einen Farbwert c zwischen 0 und 1. Da die Kräfte sowohl negativ als auch größer als der Grenzwert sein können, erfolgt die Normierung auf folgende Weise :

$$c = \min \left\{ \frac{\|\mathbf{f}\|}{\mathbf{f}_{max}}, 1 \right\} \quad (5.13)$$

Da die graphische Repräsentation der Leitung ein einziges Polygon ist, wird mit Hilfe von c bei jedem Bild die Farbe der gesamten Leitung an die wirkende Kraft angepaßt. Der Benutzer erhält somit ohne Einsatz eines Kraftfeedbackgerätes eine Information über seine aktuelle Belastung und kann seine Handlungsweise entsprechend anpassen.

5.4 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels ist das eingesetzte VR System mit seinen Einschränkungen und Möglichkeiten beschrieben worden. Es wurde erwähnt, wie die Leitung

aufgebaut ist, um sowohl innerhalb der Kollisionserkennung als auch des Renderings optimale Antwortzeiten zu erzielen. Das Kollisionsobjekt besteht dabei aus mehreren Zylindern, die in einer hierarchischen Struktur gruppiert sind. Da Stripes einen wesentlichen Geschwindigkeitsvorteil bei der graphischen Darstellung eines Objektes bewirken, ist das visuelle Feedback der Leitung als ein einziges Objekt mit Stripes entlang der gesamten Schlauchlänge beschrieben. Beide Ausprägungen werden anschließend im hierarchischen Objektbaum zusammengefaßt. Um die Berechnung des Bildes in einem möglichst geringen Ausmaß durch die physikalische Simulation der Objekte zu belasten, erfolgt die Berechnung des Simulationsverfahrens parallel zum Rendering des Bildes.

Neben diesen grundlegenden Maßnahmen für den Einsatz des Simulationsverfahrens in einer VR-Umgebung sind innerhalb des VR-Systems montagerelevante Erweiterungen erforderlich, um einen realistischen Montageeindruck zu erzielen. So werden die Informationen für die Verschiebung oder die Kollision der Leitung berechnet und in Form von Lastfällen an das Simulationsmodell weitergeleitet. Des weiteren spielt die Befestigung der Leitung mit Hilfe von Anschlußstutzen oder Leitungsclipsen eine wesentliche Rolle. Auch hier werden die notwendigen Informationen innerhalb des VR-Systems ermittelt und an das Simulationsverfahren übergeben. Um dem Anwender einen konsistenten visuellen Eindruck der Montage zu liefern, muß in beiden Fällen eine besondere Anpassung der Leitungsorientierung erfolgen. So wird die Leitung in beiden Fällen geeignet verschoben und ausgerichtet.

Ein wichtiges Kriterium für die Entscheidung, ob eine Montage durchführbar ist oder nicht, stellt die Belastungsgrenze für den Monteur dar. Wird während der Montage einer Leitung eine Kraftschwelle überschritten, so erfolgt eine Farbpassung der gesamten Leitung, durch die der Monteur unmittelbar ein Feedback über seine Belastung erhält.

Kapitel 6

Evaluierung der Simulationslösungen

Innerhalb dieses Kapitels wird untersucht, ob das Simulationsmodell den Anforderungen für den Einsatz in einer Echtzeit-Montagesimulation gerecht wird. Der erste Schritt besteht in der Überprüfung der Echtzeitanforderung. In einem zweiten Schritt wird das Verfahren mit Standard FEM Programmen verglichen, wobei entschieden wird, inwieweit die erzielten Ergebnisse auf die Realität übertragbar sind.

6.1 Überprüfung der Echtzeitanforderung

Zunächst soll die Echtzeitanforderung beleuchtet werden. Hierzu werden die Berechnungszeiten für die verschiedenen Lastfälle, von der Datenübergabe bis zum Erhalt der neuen Leitungslage, bestimmt.

6.1.1 Ermittlung der Berechnungszeiten

Um das Simulationsverfahren innerhalb einer Echtzeitanwendung einsetzen zu können, muß es in der Lage sein, die Bewegung der Leitung in weniger als 100 Millisekunden zu berechnen. Diese Bedingung muß für alle Lastfälle erfüllt sein, was im folgenden in verschiedenen Versuchen überprüft wird.

Für sämtliche Berechnungen wird eine gerade Leitung modelliert, deren Längsachse entlang der X-Achse des globalen Koordinatensystems verläuft. Die Leitung weist ferner eine Länge von 500mm, einen Außendurchmesser von 50mm und einen Innendurchmesser von 40mm auf. Um den Einfluß verschiedener Materialien auf die Berechnungszeiten zu erkennen, werden alle Versuche mit den in Kapitel 3.2.3 bestimmten Materialien eins und vier durchgeführt, da diese die größte Differenz der Elastizitätsmodule aufweisen. Um abschätzen zu können, bei welcher Leitungsdiskretisierung die Echtzeitgrenze erreicht wird, erfolgt im

Laufe der Versuche eine kontinuierliche Erhöhung der Balkenanzahl von zwei auf 30. Für jede Diskretisierungsstufe wird aus allen ermittelten Werten ein Durchschnittswert berechnet, der in den folgenden Abschnitten verwendet wird. Alle Messungen werden auf einer SGI Octane Duo mit zwei R10000 Prozessoren durchgeführt. Einer der beiden Prozessoren wird dabei für den Graphik-, der andere für den Simulationsprozeß reserviert.

Die Bewegung der Leitung

Die Bewegung der Leitung besteht aus einer Translation und einer Rotation. Aus diesem Grund wird die Leitung bei diesem Versuch zum einen, wie in Bild

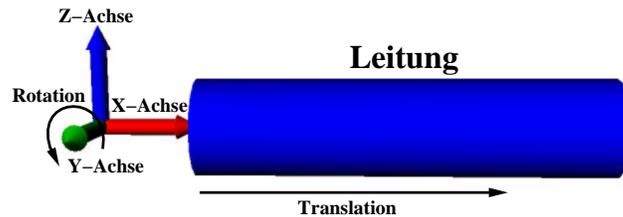


Abbildung 6.1: Die Bewegung der Leitung

6.1 dargestellt, entlang der X-Achse um 120mm gestaucht und zum anderen um 90 Grad um die Y-Achse gedreht. Um eine stabile Simulation sicher zu stellen, erfolgt die Bewegung in mehreren kleinen Schritten, wobei für jeden Schritt die notwendige Berechnungszeit bestimmt wird.

Die Kollision mit einer starren Ebene

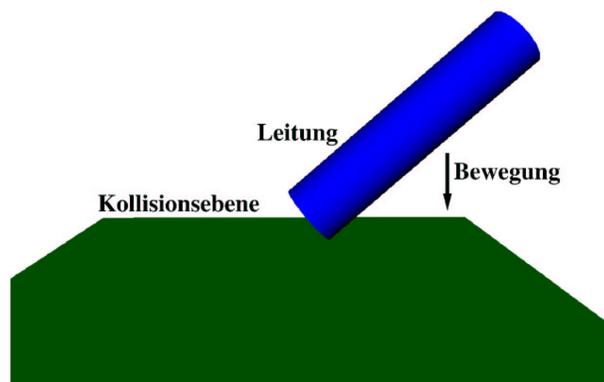


Abbildung 6.2: Die Kollision der Leitung mit einer starren Ebene

Innerhalb dieses Versuches soll die Berechnungszeit für den Lastfall der Leitungskollision mit einer starren Ebene bestimmt werden. Um die Leitung mit einer Ebene kollidieren zu lassen, muß diese, wie in Bild 6.2 gezeigt, bewegt werden. Ist der Kontakt hergestellt, beginnt die Messung. Um eine ständige Neuberechnung des Kollisionslastfalles zu erreichen, wird die Leitung entlang der Ebene permanent manuell bewegt.

Die Kollision mit einer anderen Leitung

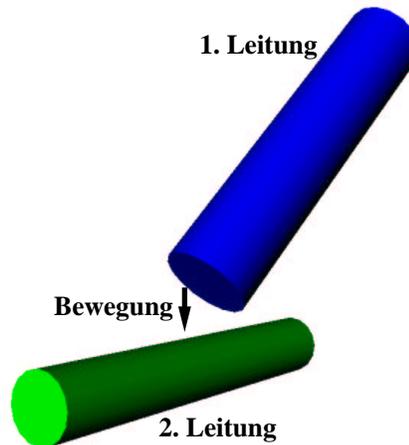


Abbildung 6.3: Der Lastfall der Leitungskollision

In diesem Versuch wird der Lastfall der Leitungskollision getestet. Dabei wird, wie in Bild 6.3 abgebildet, eine flexible Leitung mit einer weiteren in Kollision gebracht. Sobald eine Durchdringung der beiden Leitungen innerhalb des VR-Systems festgestellt wird, beginnt die Messung der Zeiten. Nach der Kollision der Leitungen wird nicht nur die erste, sondern werden beide bewegt. Um diesen Lastfall auch über einen längeren Zeitraum messen zu können, wird die erste Leitung ständig manuell nachgeführt, so daß immer eine Kollision zwischen beiden Leitungen vorliegt.

Die Behandlung von Leitungsclipsen

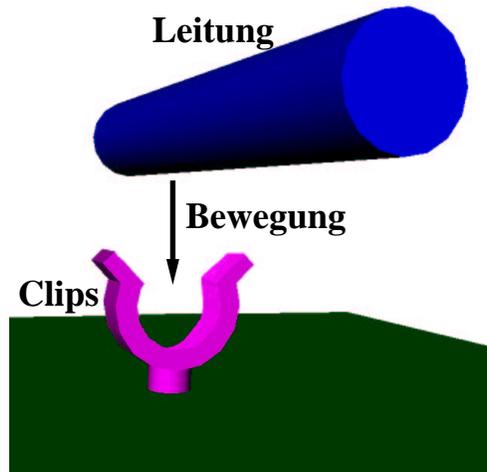


Abbildung 6.4: Der Lastfall der Leitungsclipe

In diesem Versuch werden die Zeiten für die Berechnung der Leitungsclipe gemessen. Hierbei wird die Leitung, wie in Bild 6.4 dargestellt, zunächst mit dem Clips in Kollision gebracht. Der Clipslastfall wird eingefügt und die Bestimmung der Zeiten beginnt. Um die Messung über mehrere Bilder hinweg durchführen zu können, wird die Leitung anschließend manuell an der aktuellen Position gehalten.

Die Behandlung von Anschlußstutzen

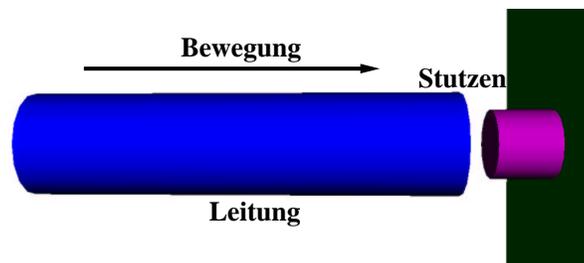


Abbildung 6.5: Der Lastfall der Anschlußstutzen

Um die Berechnungszeiten für die Behandlung der Anschlußstutzen bestimmen zu können, wird eine Leitung, wie in Bild 6.5 abgebildet, zunächst mit einem Anschlußstutzen in Kollision gebracht. Hierdurch wird, wie bei den vorherigen

Lastfällen auch, die Messung der Zeiten und die Behandlung des Stutzenlastfalles initiiert. Durch eine manuelle Bewegung der Leitung entlang des Stutzens wird anschließend eine ständige Neuberechnung dieses Lastfalles sichergestellt.

6.1.2 Bewertung der Daten

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Werte dargestellt und hinsichtlich der Echtzeitbedingung bewertet.

Die Berechnungszeiten der verschiedenen Lastfälle sind im folgenden Schaubild 6.6 zusammengefaßt. Man sieht, daß die Zeiten der unterschiedlichen Lastfälle recht dicht beieinander liegen. Lediglich die Behandlung der Leitungskollision unterscheidet sich stark von den übrigen Meßwerten. Betrachtet man die unterschiedlichen Versuche etwas genauer, so kann man festhalten, daß die Leitung bei allen Lastfällen bewegt wird. Hinzu kommen lastfallspezifische Aufgaben. Das Augenmerk muß deshalb auf den zusätzlichen Aufwand gelegt werden.

Bei dem Lastfall der Kollision mit einer starren Ebene handelt es sich bei dem zusätzlichen Aufwand um die Berechnung einer Feder. Diese kann durch wenige und einfache Operationen simuliert werden, wodurch nur eine geringe Abweichung zur Bewegung der Leitung festzustellen ist.

Betrachtet man den Lastfall der Anschlußstutzen, so handelt es sich bei dem zusätzlichen Aufwand um die Berechnung eines Preßverbandes. Die hierzu notwendigen Operationen können aus der in Kapitel 4.3.5 angegebenen Formel entnommen werden. Es handelt sich somit wiederum um wenige und einfache Operationen.

Betrachtet man den Lastfall der Leitungsclipse, so wird die notwendige Kraft durch eine sehr einfache Formel berechnet. Der hierzu notwendigen Aufwand ist ebenfalls recht gering, so daß nur eine kleine Abweichung zur Bewegung der Leitung festzustellen ist.

Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, wird die Kollision zweier Leitungen ebenfalls mit Hilfe einer Feder aufgelöst. Der Grund für die starke Abweichung der Berechnungszeiten liegt in der Bewegung der beiden Leitungen. Die Gesamtberechnungsdauer ergibt sich somit aus der Bewegung zweier Leitungen und der Behandlung der Kollisionsfeder. Subtrahiert man von allen Berechnungszeiten die Zeiten der Leitungsbewegung, so erhält man das in Bild 6.7 dargestellte Diagramm. Betrachtet man die Differenzen der Berechnungszeiten aller Lastfälle, so kann man zum einen feststellen, daß der Unterschied bei den Lastfällen konstant ist und zum anderen die Berechnungszeit für den Lastfall der Leitungskollision entsprechend der Berechnungsdauer einer Leitungsbewegung ansteigt.

Betrachtet man Bild 6.6 erneut, so kann man des weiteren feststellen, daß alle Berechnungszeiten linear ansteigen. Somit ist man in der Lage, aus der Steigung der Kurven die Anzahl der Balken zu bestimmen, bei der das Echtzeitkriterium nicht mehr erfüllt ist.

Die Berechnungszeiten des Stutzenlastfalles sind, abgesehen von dem Lastfall der

Leitungskollision, in allen Fällen die längsten. Legt man durch diese Kurve eine Ausgleichsgerade, so besitzt sie folgende Formel :

$$g(x) = 0.5805 \cdot x + 2.0629 \quad (6.1)$$

Die Grenze für eine Simulation in Echtzeit wird somit bei ca. 170 Balken erreicht. In der Praxis haben sich Leitungsdiskretisierungen von ca. 30 Balken bewährt. Es ließen sich somit ca. 5 Leitungen gleichzeitig berechnen. Geht man davon aus, daß in der Regel lediglich eine Leitung manipuliert und der Datenraum der Simulation eingeschränkt wird, kann die Leitung mit maximal vier flexiblen Leitungen kollidieren. Unter der angegebenen Prämisse kann somit davon ausgegangen werden, daß zu jedem Zeitpunkt der Echtzeitanspruch erfüllt ist.

Abbildung 6.6: Diagramm der Berechnungszeiten

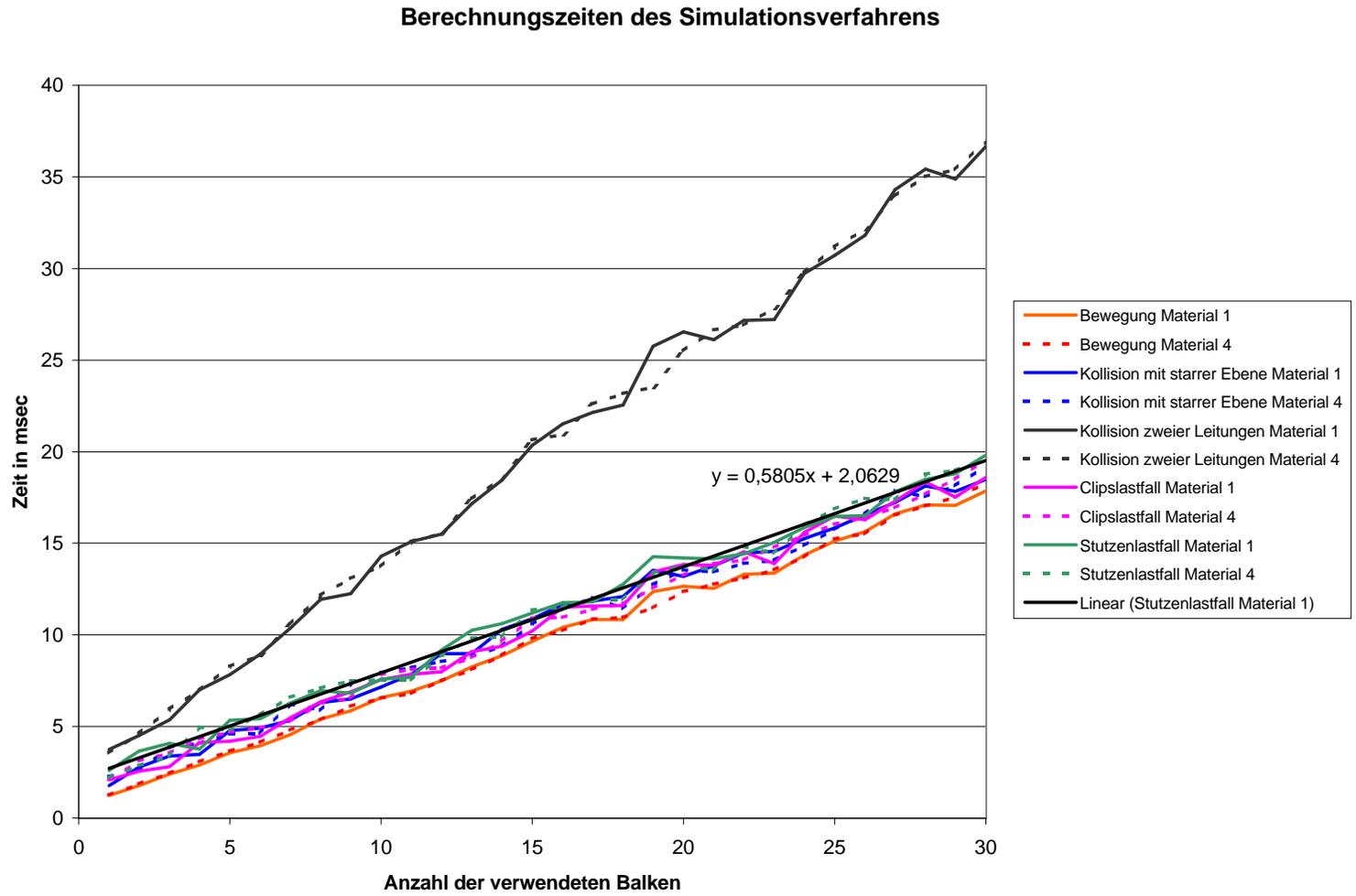
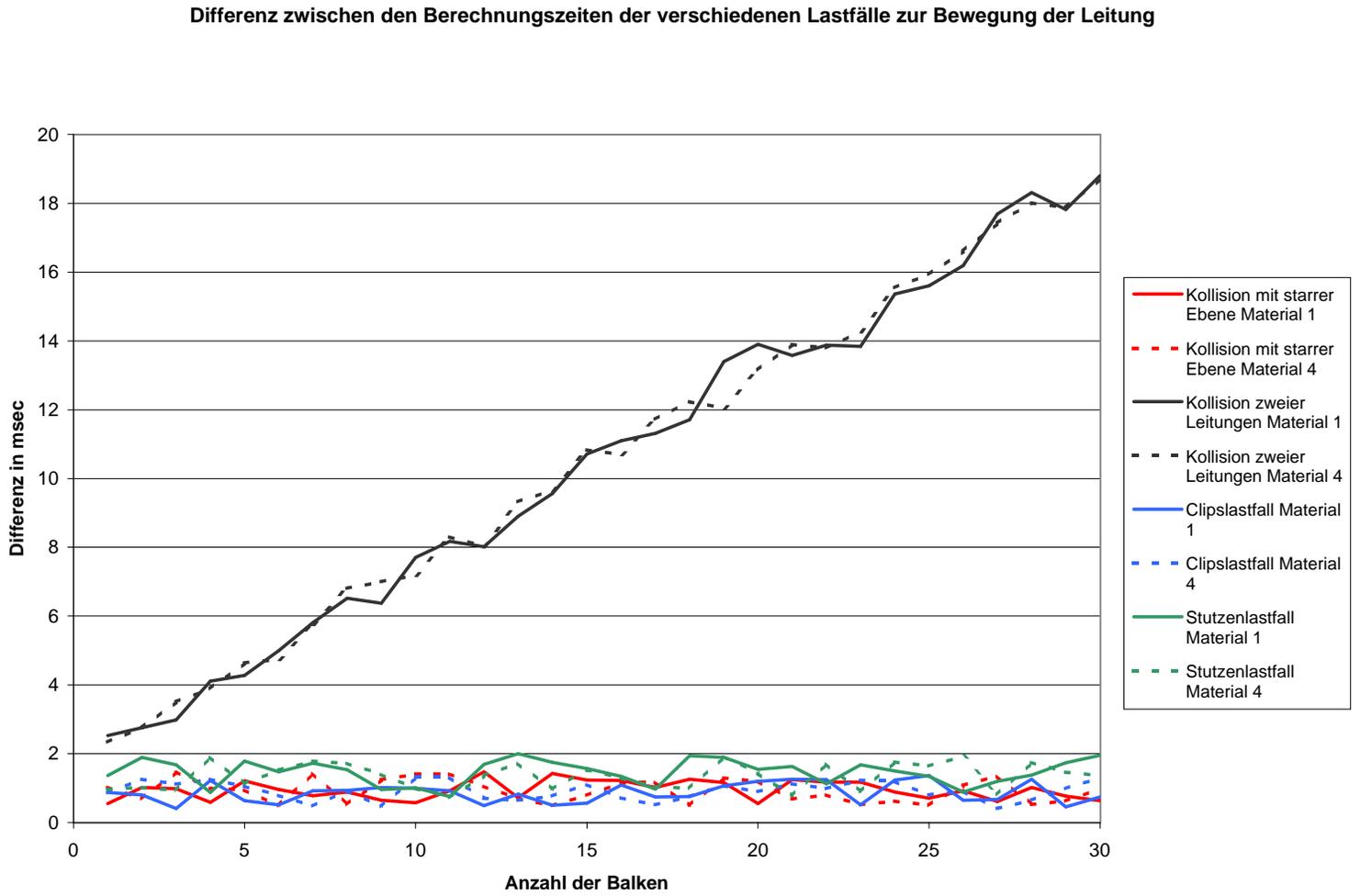


Abbildung 6.7: Darstellung der Differenzen der Berechnungszeiten



6.2 Vergleich mit bestehenden Simulationsverfahren

Innerhalb dieses Abschnittes wird das Berechnungsverfahren mit den Standard FEM Programmen PAMCRASH¹ und Madymo² verglichen. Hierbei wird eine Leitung verschiedenen Bewegungen ausgesetzt. Die dabei auftretenden Kräfte und Deformationen werden mit beiden Systemen verglichen. Das eingesetzte Balkenelement wird dabei im folgenden als Corotationselement bezeichnet.

Zunächst wird der Einsatz der beiden FEM Programme motiviert. Darauf aufbauend werden die darin enthaltenen Balkenmodelle beschrieben. Anschließend erfolgt der Vergleich der Kräfte und Leitungslagen aus beiden Systemen mit jenen des verwendeten Berechnungsverfahrens. Abschließend werden diese Ergebnisse bezüglich ihrer Güte beurteilt.

6.2.1 Auswahl der FEM Programme

Innerhalb dieser Sektion wird die Auswahl der FEM Programme motiviert und die verwendeten Balkentypen beschrieben.

Motivation der Auswahl

Für die Validierung des Berechnungsverfahrens bietet sich zum einen ein Vergleich mit der Realität und zum anderen ein Vergleich mit vorhandenen, bereits bewährten, Simulationsverfahren an. Möchte man das Balkenmodell mit der Realität vergleichen, so muß man ein Ende der Leitung in einen Kraftaufnehmer einspannen und das andere Ende der Leitung bewegen. Um einen exakten und reproduzierbaren Kraftverlauf zu erhalten, ist man gezwungen, die Bewegung der Leitung von einem Motor oder Roboter durchführen zu lassen. Damit man neben den Kräften auch die Deformation der Leitung bestimmen kann, ist es erforderlich, die gesamte Leitung kontaktlos, optimal optisch, zu vermessen. Aus den gemessenen Oberflächendaten kann anschließend auf die Mittellinie der Leitung geschlossen werden. Die für diese Operationen notwendigen Geräte und Verfahren standen im Laufe der Dissertation nicht zur Verfügung, so daß lediglich der Vergleich mit Standard FEM Paketen erfolgt.

Zur Validierung des Simulationsverfahrens werden die FEM Programme PAMCRASH und Madymo herangezogen. Diese Programme befinden sich in weitverbreitetem Einsatz in der Industrie. Dort haben sie ihre Aussagefähigkeit in vielen Versuchen bewiesen. Auf Grund ihrer guten Übereinstimmung mit der Realität kann auf etliche physikalische Versuche verzichtet werden. In der vorliegenden

¹PAMCRASH ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma PAM SYSTEM INTERNATIONAL.

²Madymo ist ein Produkt der Firma TNO in den Niederlanden.

Arbeit wird somit angenommen, daß bei einer hohen Kongruenz mit den Ergebnissen der Programme die erzielten Resultate der Montageuntersuchung ebenfalls auf die Realität übertragbar sind.

Beschreibung des PAMCRASH Balkenmodelles

Wie in [71] erläutert, basiert das PAMCRASH Balkenmodell, wie das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Modell, auf den in [50] beschriebenen Verfahren. Dieses Modell wird jedoch numerisch erweitert, so daß auch große Deformationen simuliert werden können. Des weiteren können Schereinflüsse im Balken berücksichtigt werden.

Die grundlegenden Formulierungen des Balkenmodelles stimmen mit denen aus [50] überein und können aus Kapitel 4.2 entnommen werden. Die genauen numerischen Verfahren zur Erweiterung des PAMCRASH Balkenmodelles sind nicht veröffentlicht und können somit nicht genauer spezifiziert werden. Im folgenden wird deshalb die Berechnung der Balkenscherung als Differenz zum Originalbalkenmodell wiedergegeben. Die Ausführungen sind dabei aus [71] entnommen.

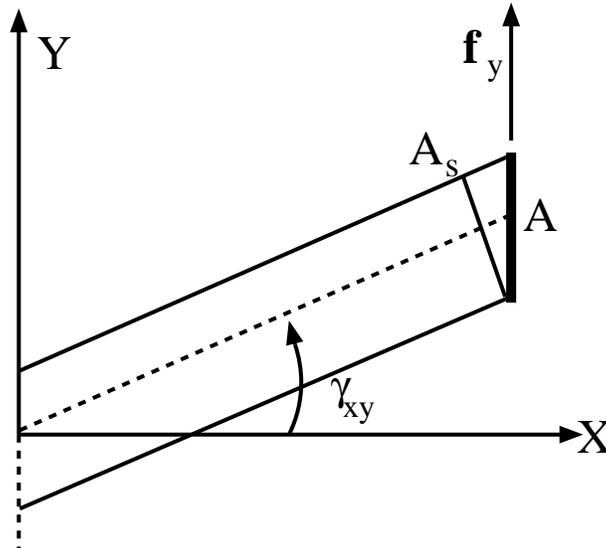


Abbildung 6.8: Skizze einer Balkenscherung.

Betrachtet man einen Balken unter Scherbeanspruchung, wie in Bild 6.8 dargestellt, so läßt sich der Scherwinkel γ_{xy} auf folgende Weise berechnen :

$$\gamma_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G} = \frac{\mathbf{f}_y}{GA_s} \quad (6.2)$$

Hierbei gibt A_s die Fläche orthogonal zur Mittellinie des gescherten Balkens wieder. Diese wird in der Regel zu $A_s = \frac{5}{6}A$ angenommen. $\mathbf{f}_y = A_s\sigma_{xy}$ ist somit die

wirkende Scherkraft. Die zusätzliche Verschiebung des Balkens durch Scherung läßt sich dabei durch folgende Gleichung berechnen :

$$\Delta \mathbf{v} = \gamma_{xy} l = \frac{\mathbf{f}_y l}{GA_s} \quad (6.3)$$

Die Gesamtverschiebung des Balkens aus Biegemoment und Scherung ergibt sich mit $\phi_z = \frac{12EI_{zz}}{GA_s l^2}$ zu :

$$\mathbf{v} = \frac{l^3}{3EI_{zz}} \left(1 + \frac{\phi_z}{4} \right) \mathbf{f}_y + \frac{l^2}{2EI_{zz}} \mathbf{m}_z \quad (6.4)$$

Die Biegemomente ergeben sich somit unter Einbeziehung der Balkenschерung und unter der Annahme, daß der Ursprung des Koordinatensystems des Masseknotens mit seinem Schwerpunkt zusammenfällt, zu :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{m}_{zI} \\ \mathbf{m}_{zJ} \end{Bmatrix} = \frac{EI_{zz}}{l(1 + \phi_z)} \begin{bmatrix} 4 + \phi_z & 2 - \phi_z \\ 2 - \phi_z & 4 + \phi_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Theta_{zI} \\ \Theta_{zJ} \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$

Für eine Biegung um die Y-Achse erhält man eine entsprechende Formel.

Beschreibung des Madymo Balkenmodells

Leider existiert für dieses Balkenmodell keine veröffentlichte mathematische Beschreibung. Lediglich eine prosaische Wiedergabe der Balkeneigenschaften kann aus [67] entnommen werden. Darin ist festgehalten, daß der Balken zwei Masseknoten verbindet und in Dehnung, Biegung und Torsion belastet werden kann. Die Biegung des Balken wird durch eine kubische Funktion beschrieben, die Dehnung und Torsion hingegen durch eine lineare. Diese Art von Deformationsfunktionen werden ebenfalls im eingesetzten Balkenelement verwendet. Die lokale X-Achse des Balken ist ebenfalls als die kürzeste Verbindung zwischen beiden Masseknoten definiert. Darüber hinaus besitzt jeder Knoten ein eigenes Koordinatensystem, daß sich aus den Trägheitstensoren ergibt.

Aus der hohen Übereinstimmung der Definition der Koordinatensysteme und der Deformationsfunktionen wird abgeleitet, daß sich dieses Balkenmodell ebenfalls an das verwendete Balkenelement anlehnt.

6.2.2 Versuchsbeschreibung

Sämtliche Versuche werden mit einem Leitungsmodell, bestehend aus 20 Balken, simuliert. Die Längsachse der Leitung verläuft entlang der X-Achse des globalen Koordinatensystems. Die Länge der Leitung beträgt 500mm, so daß jeder Balken eine Länge von 25mm besitzt. Um bei Verwendung eines elastischen Materialmodelles eine kontrollierte Deformation der Leitung zu erzielen, wird eine Imperfektion in der Mitte der Leitung modelliert. Dazu werden die Punkte in

Z-Richtung verschoben, wobei der mittlere Punkt um 1mm und die angrenzenden Punkte um 0.5mm transliert werden. Die bei den Versuchen verwendeten Materialien sind aus Kapitel 3.2.3 entnommen. Es handelt sich hierbei um die Materialien eins und vier, da diese die größte Differenz der Elastizitätsmodule aufweisen. Damit die Materialien in PAMCRASH und Madymo eingesetzt werden können, wird das arithmetische Mittel aus dem Druck- und Zugelastizitätsmodul gebildet. Um der Leitung eine Masse zu zuweisen, ist die Angabe eines Außen- und Innendurchmessers erforderlich. In den folgenden Versuchen wird ein Außendurchmesser von 40mm und ein Innendurchmesser von 30mm angenommen. Da die verschiedenen montagespezifischen Lastfälle nicht in PAMCRASH oder Madymo zur Verfügung stehen, beschränken sich die Versuche auf verschiedene Bewegungen der Leitungen. Gemessen werden die auftretenden Deformationskräfte und die resultierenden Leitungslagen.

Innerhalb aller Versuche werden folgende Randbedingungen verwendet :

- Ein Punkt ist in allen Freiheitsgraden fixiert. Dies entspricht z. B. einer Leitung, die auf einen Anschlußstutzen geschoben wurde.
- Ein weiterer Punkt wird bewegt, jedoch sind seine Rotationen um die Y- und die Z-Achse fixiert. Dies entspricht einer gegriffenen Leitung, die gezielt entlang bestimmter Achsen verschoben wird.

Da innerhalb der VR-Umgebung lediglich die Zielposition eines Leitungsabschnittes angegeben werden kann, erfolgt in allen Programmen die Vorgabe der Endposition. Diese Position wird dabei in mehreren kleinen Schritten angefahren. Alle Berechnungen in PAMCRASH sind von dem Berechnungsingenieur Robert Reilink in der Forschung der Volkswagen AG durchgeführt worden. Die Berechnungen mit Madymo sind durch den Autor selbst ausgeführt worden.

Beschreibung der Bewegungen

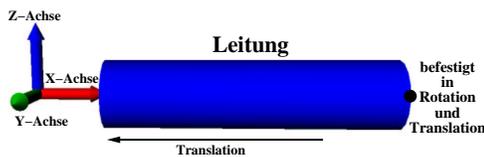


Abbildung 6.9: Darstellung des ersten Versuches

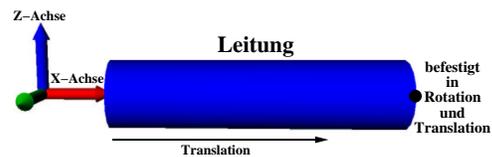


Abbildung 6.10: Darstellung des zweiten Versuches

Im ersten Versuch wird die Leitung, wie in Bild 6.9 abgebildet, entlang der Längsachse um 50mm gedehnt. Hierbei bleibt die Form der Leitung unverändert, man erhält lediglich die wirkenden Deformationskräfte.

Im zweiten Versuch wird die Leitung, wie in Bild 6.10 dargestellt, entlang ihrer

Längsachse um 120mm gestaucht. Somit ist man in der Lage, zusätzlich zu den Kräften auch die Bewegung der Leitung zu messen. Mit Hilfe dieses Versuches soll die Leitungsdeformation bei einer reinen Translation verglichen werden.

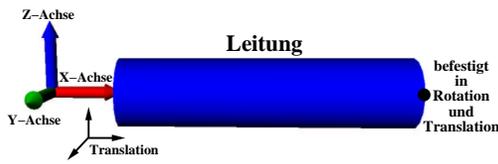


Abbildung 6.11: Darstellung des dritten Versuches

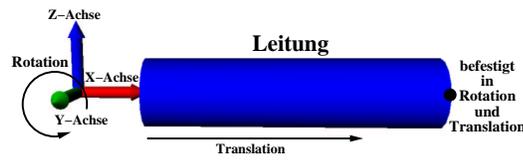


Abbildung 6.12: Darstellung des vierten Versuches

Im dritten Versuch erfolgt, wie in Abbildung 6.11 gezeigt, eine Translation der Leitung entlang der drei Koordinatenachsen. Die Leitung wird dabei entlang jeder Achse um 120mm bewegt. Hierdurch wird überprüft, wie sich die Deformationslage bei Translation entlang beliebiger Achsen ergibt.

Da sich in der Realität die Bewegung der Leitung aus einer Translation und einer Rotation zusammensetzt, soll diese Situation, wie in Bild 6.12 abgebildet, mit dem vierten Versuch getestet werden. Die Leitung wird dabei gleichzeitig entlang der Längsachse um 120mm gestaucht und um die Y-Achse um 90 Grad gedreht.

6.2.3 Auswertung der gemessenen Kräfte

Innerhalb dieses Abschnittes werden die Kräfte aus allen Berechnungen wiedergegeben und erläutert.

In Bild 6.13 sind die gemessenen Kräfte des ersten Versuches zusammengefaßt. In allen Elementen ist ein lineares Materialmodell zugrundegelegt. Hierbei ist die Kraft proportional zur Dehnung. Dies wird durch die gemessenen Werte unterstrichen. Die gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Elementen wird in Bild 6.14 näher dargestellt. Die maximale Differenz zwischen den Balkenelementen beträgt 18 N und besteht lediglich zum Madymo Balkenelement. Legt man den Bereich zu Grunde in dem keine Überschreitung einer Kraftschwelle auftritt, d.h. bei einer Kraft kleiner als 200 N, so liegt die Differenz innerhalb einer tollerierbaren Schranke von 5 N.

Abbildung 6.13: Die gemessenen Kräfte bei Dehnung entlang der Längsachse.

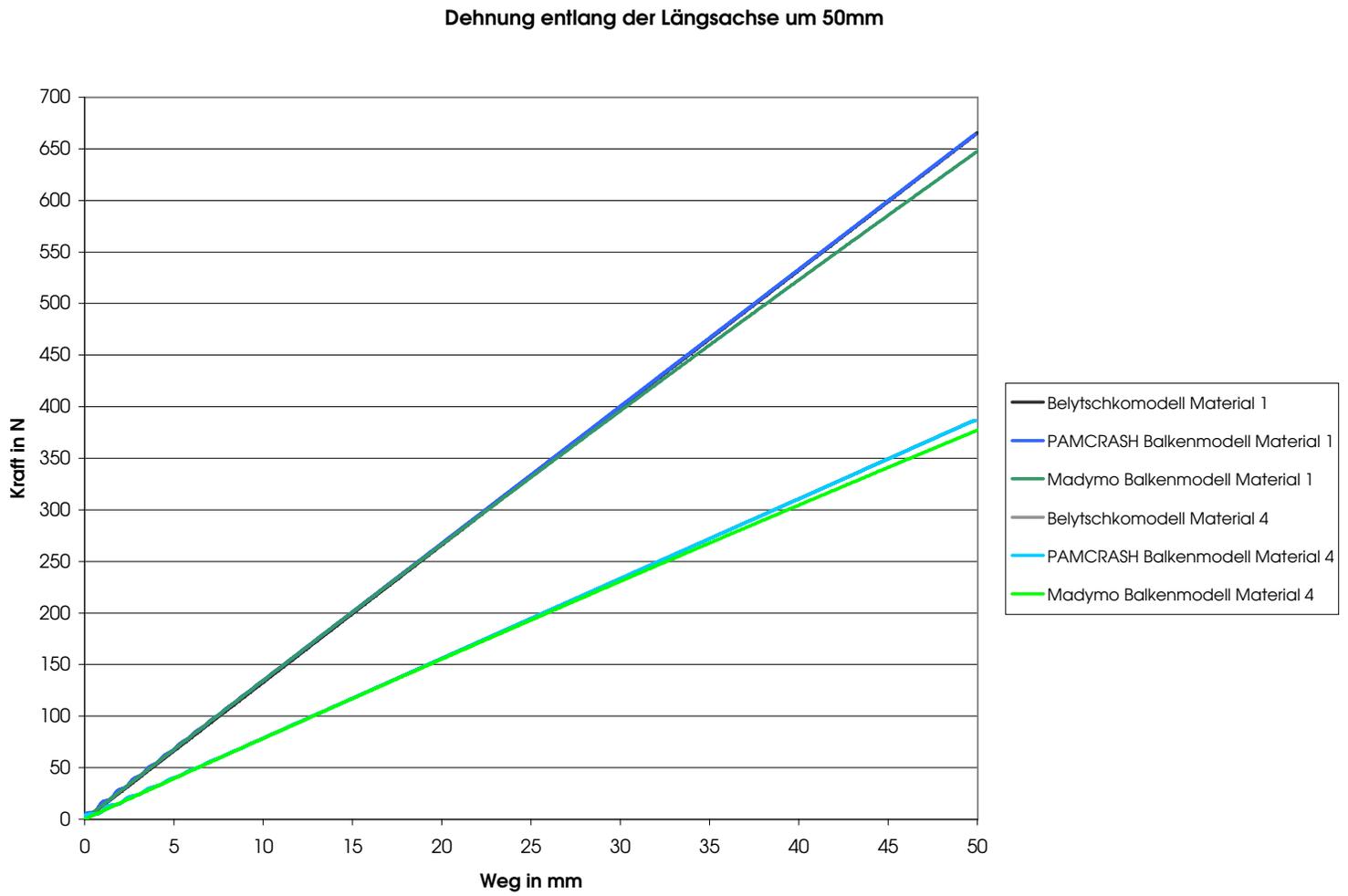
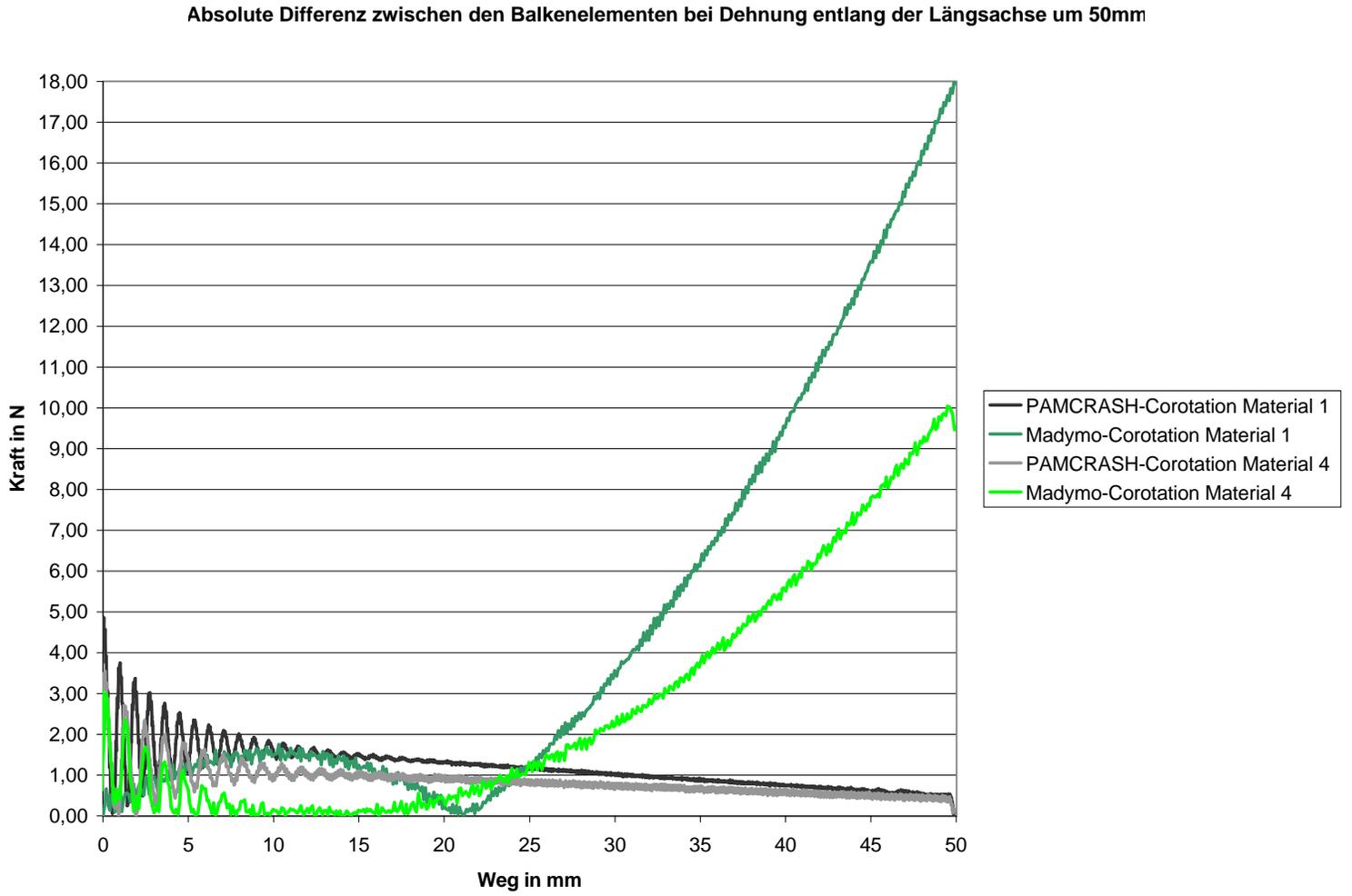


Abbildung 6.14: Die Differenz zwischen den Balkenelementen bei Dehnung entlang der Längsachse.



Im nächsten Versuch werden die Kräfte bei Druckbeanspruchung gemessen. Hierbei stellt sich der in Bild 6.19 dargestellte Verlauf dar. Sowohl das Balken-



Abbildung 6.15: Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 12.5mm.

Abbildung 6.16: Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 15mm.

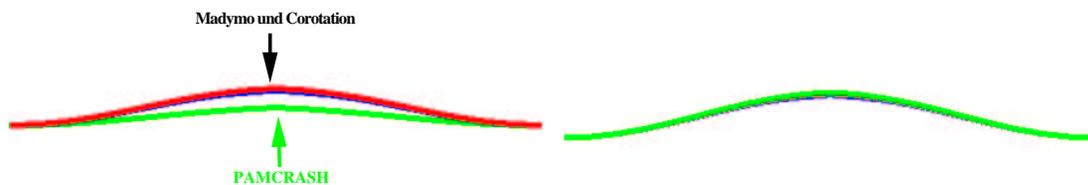


Abbildung 6.17: Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 17.5mm.

Abbildung 6.18: Die Deformation der Elemente bei einer Verschiebung von 20mm.

element aus Madymo als auch das verwendete Balkenelement weisen einen gleichen Verlauf auf. Lediglich das PAMCRASH Balkenelement besitzt zu Beginn der Kurve einen starken Sprung. Die Ursache liegt in einer plötzlichen Deformation der Leitung entlang der Z-Achse. Zunächst wird die Leitung entlang ihrer Längsachse gestaucht, was einer reinen Druckbeanspruchung entspricht. Im Laufe der Bewegung bricht die Leitung, wie in den Bildern 6.15 bis 6.18 dargestellt, in Richtung der Imperfektion aus. Hierdurch wird die gespeicherte Energie in Bewegung umgesetzt, woraus ein Abfall der gemessenen Kraft resultiert. Im Gegensatz dazu ist die Deformation des Madymo und des verwendeten Balkenelementes eine gleichförmigere Bewegung. Betrachtet man die in Bild 6.20 dargestellten Differenzen zwischen den Balkenelementen, so liegen die Differenzen zu dem Madymo Balkenelement innerhalb einer Schwelle von maximal 20 N. Lediglich der Anstieg der Kraft innerhalb des PAMCRASH Elementes erzeugt einen sehr hohen maximalen Fehler von ca. 55 N.

Kräfte bei Stauchung entlang der Längsachse um 120mm

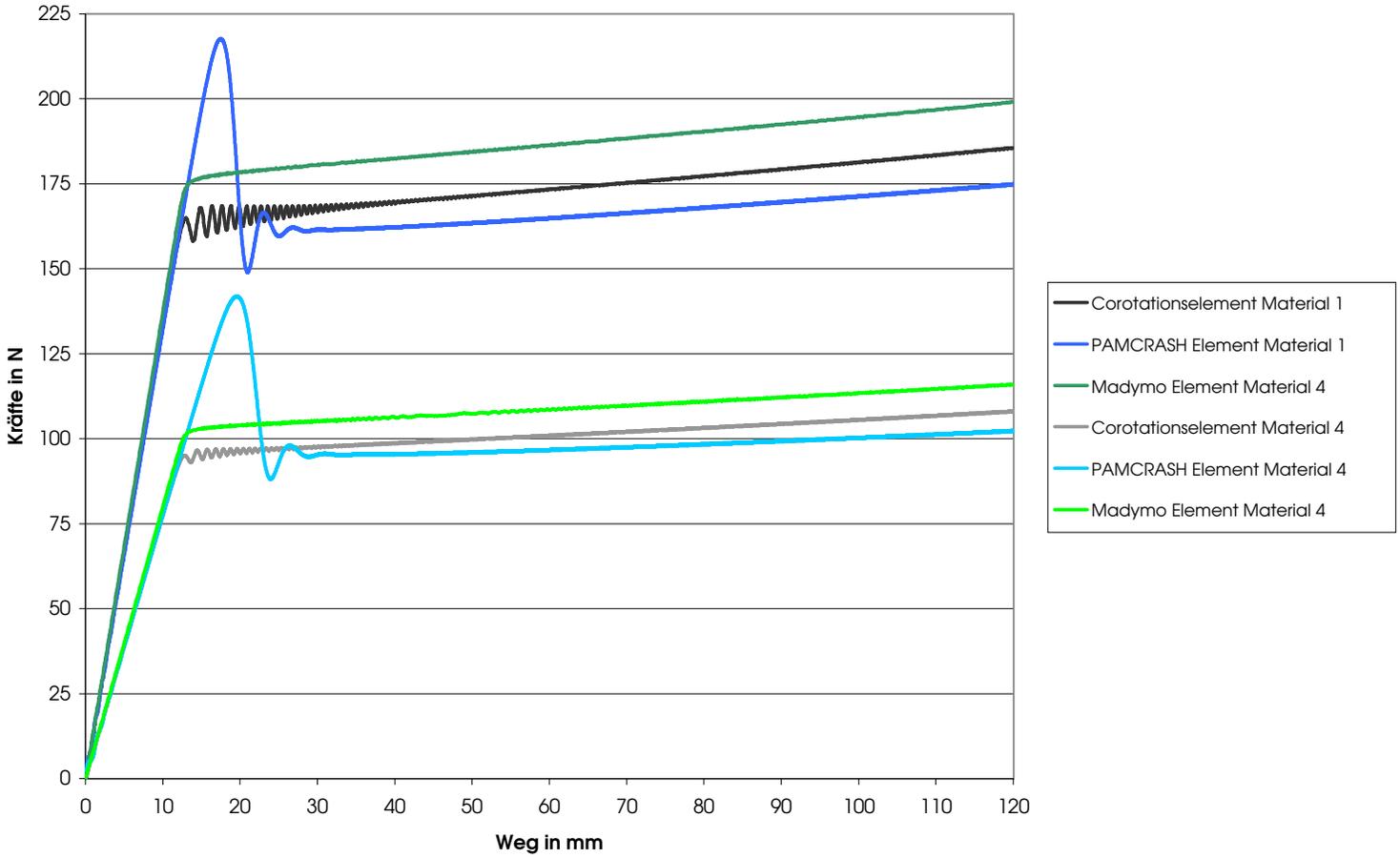


Abbildung 6.19: Die gemessenen Kräfte bei Stauchung der Leitung entlang der Längsachse.

Absolute Differenz zwischen den Balkenelementen bei Stauchung entlang der Längsachse um 120mm

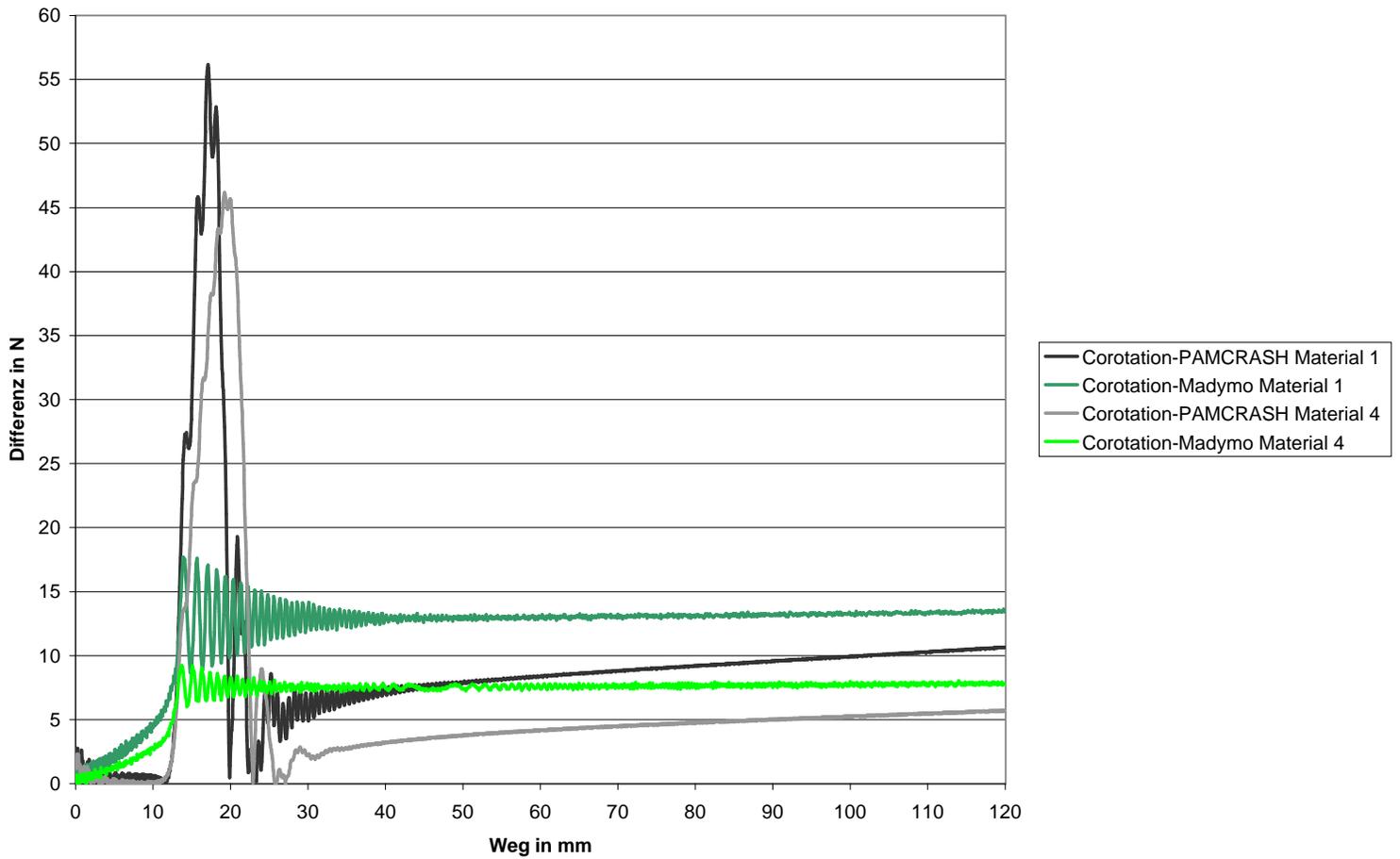


Abbildung 6.20: Die Differenz der Kräfte bei einer Stauchung entlang der Längsachse.

Bei der Stauchung der Leitung entlang der drei Hauptachsen zeigt sich, wie in Bild 6.24 abgebildet, ein ähnliches Verhalten wie im vorherigen Versuch. Die gemessenen Werte des eingesetzten und des Madymo- Elementes liegen recht dicht beieinander. Das PAMCRASH Element weist erneut einen Ansprung der Kraft bei einer Verschiebung zwischen 10 und 20mm auf. Auch hier liegt die Ursache, wie in Bild 6.21 abgebildet, in einer sprunghaften Deformation der Leitung. Im Gegensatz hierzu ist die Deformation der übrigen Balkenelemente, wie in Bild 6.22 und 6.23 gezeigt, gleichförmiger, wodurch ein gleichmäßigerer Verlauf der Kraft entsteht. Betrachtet man die, in Bild 6.25 dargestellte, Differenz zwischen

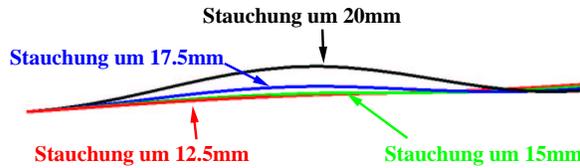


Abbildung 6.21: Darstellung der plötzlichen Deformation des PAMCRASH Balkenelementes.

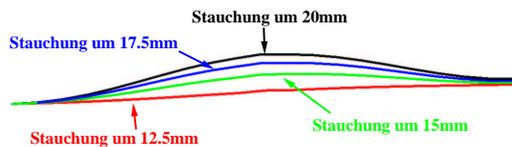


Abbildung 6.22: Darstellung der langsamen Deformation des Madymo Balkenelementes.

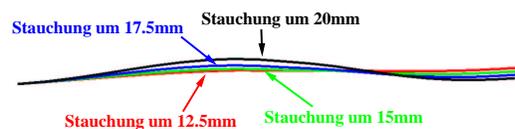
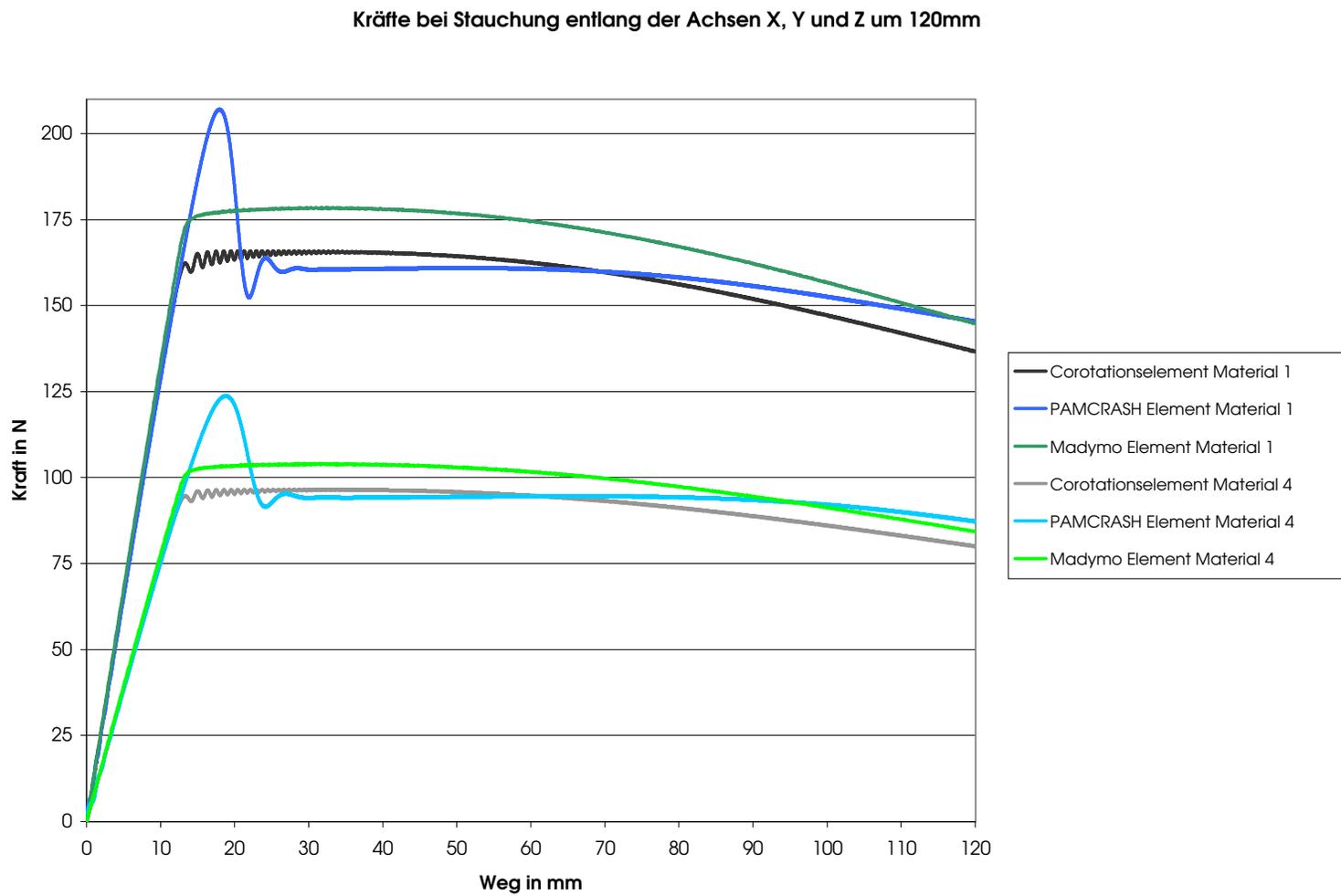


Abbildung 6.23: Darstellung der langsamen Deformation des verwendeten Balkenelementes.

den Balkenelementen, so liegt diese zum Madymo-Element zunächst unterhalb von 15N und sinkt im weiteren Verlauf der Bewegung. Der Unterschied zum PAMCRASH Element reduziert sich nach dem Ansprung auf Null. Da die Kraft des PAMCRASH Elementes im Gegensatz zu Madymo und dem eingesetzten Element konstant bleibt, steigt die Differenz erneut an, bleibt jedoch unterhalb von 10N.

Abbildung 6.24: Die Kräfte bei Stauchung der Leitung entlang aller Hauptachsen



Absolute Differenz zwischen den Balkenelementen bei Stauchung entlang der Achsen X, Y und Z um 120 mm

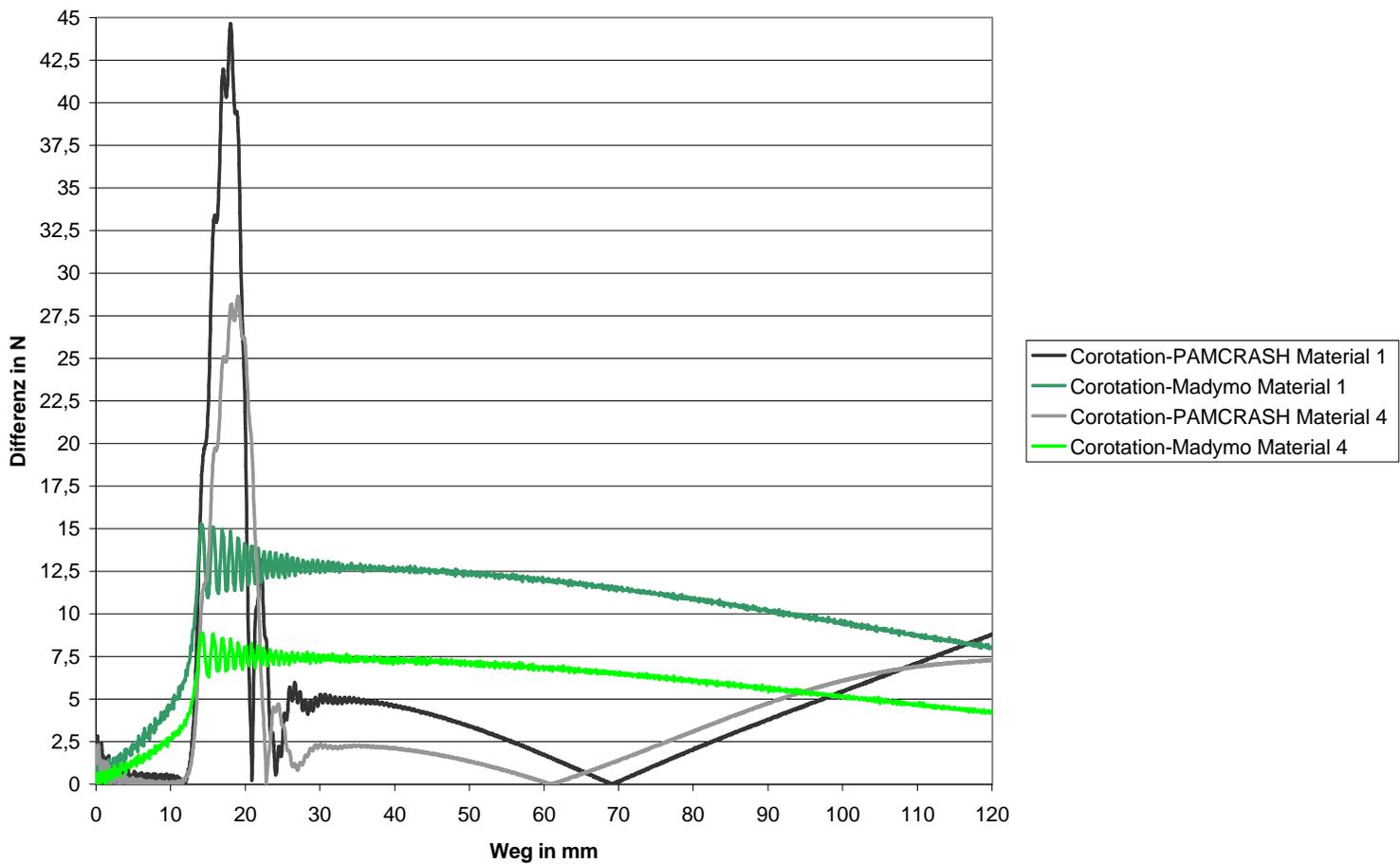


Abbildung 6.25: Die Differenz der gemessenen Kräfte bei Stauchung entlang aller Hauptachsen

Im vierten Versuch wird die Leitung gestaucht und gleichzeitig rotiert. Die dabei auftretenden Kräfte können aus dem Bild 6.26 entnommen werden. Durch die zusätzliche Rotation wird die Leitung nicht mehr ausschließlich auf Druck belastet. Hierdurch wird eine plötzliche Deformation des PAMCRASH Elementes verhindert. Es ergibt sich somit ein ähnliches Verhalten, wie bei dem verwendeten und dem Madymo-Element. Betrachtet man die Differenz der Kräfte, wie in Bild 6.27 dargestellt, so liegt das Madymo-Element wieder sehr dicht bei dem verwendeten Element. Das PAMCRASH Element weist einen maximalen Fehler von 30 N auf und besitzt während des ganzen Versuche eine recht grosse Differenz zum eingesetzten Verfahren. Dies liegt an dem Schereinfluß, der im PAMCRASH Element simuliert wird. Im Laufe der Rotation wird die Translation der Leitung von einer reinen Axialkraft in eine Scherkraft transformiert. Dabei wird, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, durch die Scherkraft eine zusätzliche Translation erzeugt. Betrachtet man nun die Situation bei Vorgabe einer Zielposition, so muß durch die höhere Flexibilität des Balkens weniger Kraft aufgewendet werden, um diese zu erreichen. Die starken Schwankungen innerhalb der gemessenen Kraftkurve lassen auf eine zu geringe Dämpfung schliessen. Die Leitung unterliegt im Laufe der Bewegung geringen Schwankungen, wodurch sich der dargestellte Verlauf ergibt.

Abbildung 6.26: Die Kräfte bei Stauchung und Rotation der Leitung

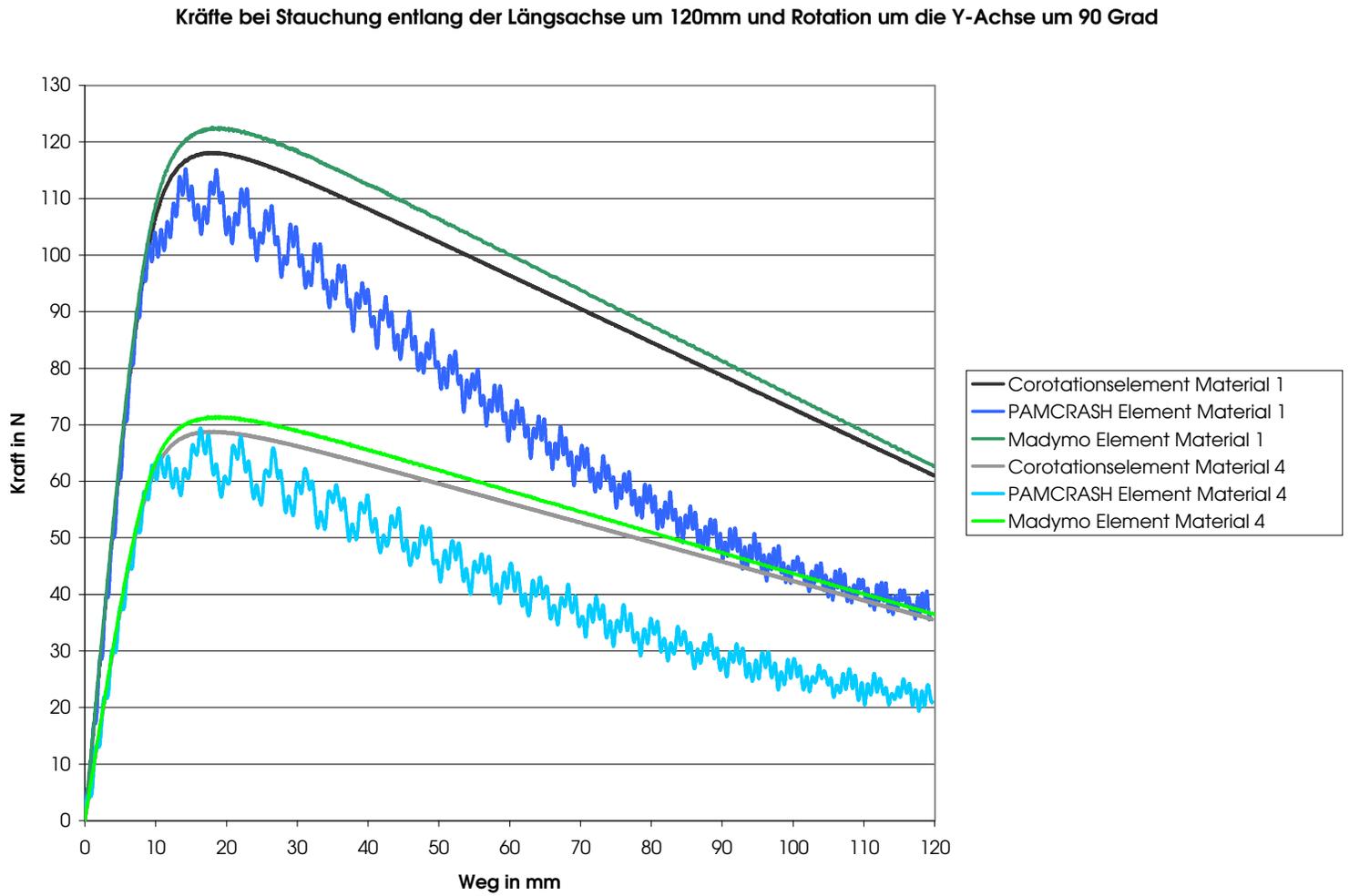
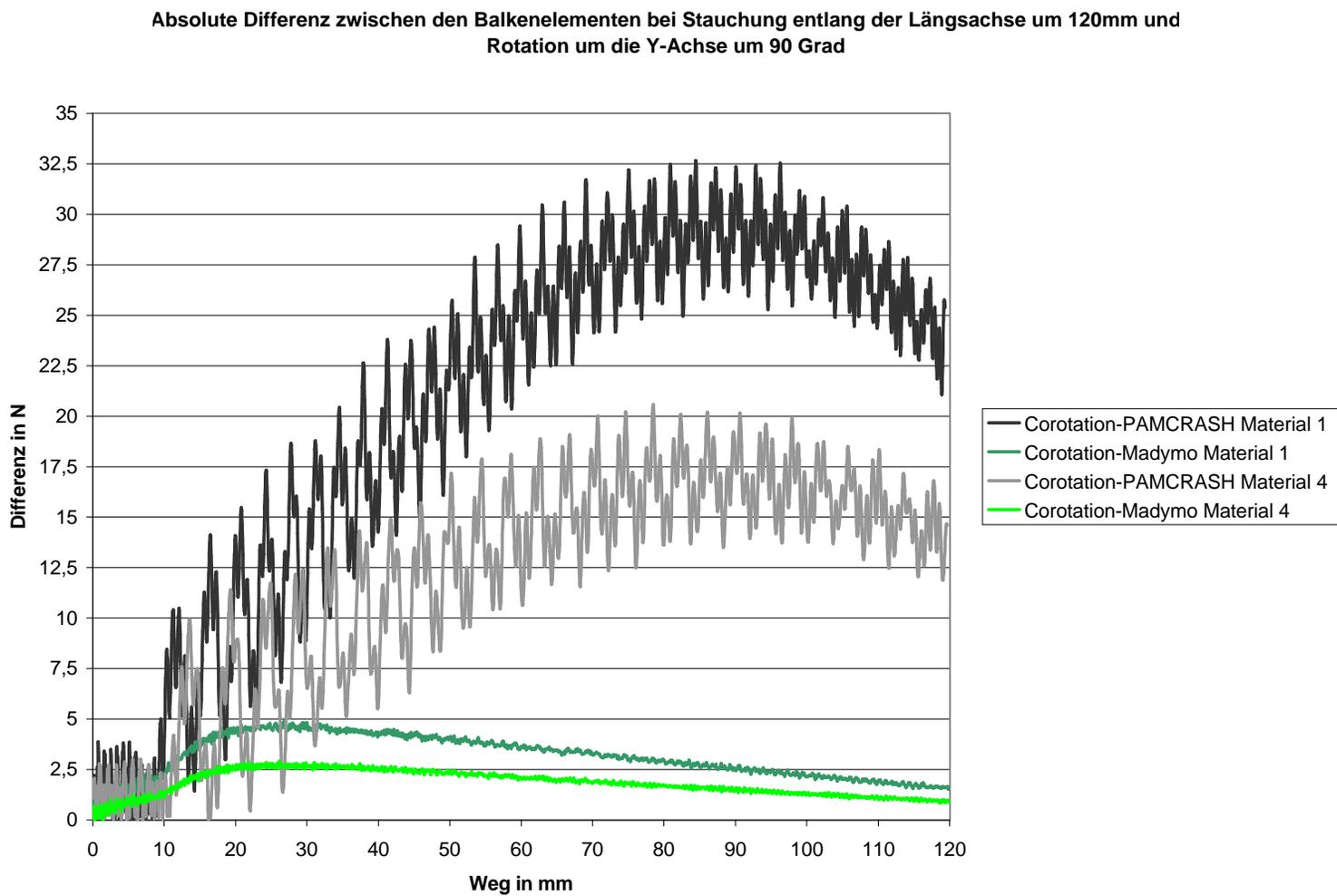


Abbildung 6.27: Die Differenz der Kräfte bei Stauchung und Rotation der Leitung



6.2.4 Vergleich der Deformationslagen

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Deformationskräfte verglichen wurden, erfolgt hier der Vergleich der resultierenden Leitungslagen bei den verschiedenen Bewegungen des Endpunktes. Da sich bei der Dehnung der Leitung keinerlei relevante Deformation der Leitung ergibt, werden lediglich die Versuche zwei bis vier verglichen. Bei den durchgeführten Berechnungen wird alle 2.5mm eine neue Beschreibung der Leitung ausgegeben. Die Differenz zwischen den Leitungsdeformationen der verschiedenen Systeme wird bestimmt, indem jeweils der euklidische Abstand zwischen den i -ten Punkten der verschiedenen Balkenelemente gebildet wird. Der maximale Abstand aller Punkte eines Berechnungsstandes wird anschließend als Differenz zwischen den verschiedenen Systemen verwendet. Bei einer maximalen Translation von 120mm handelt es sich somit um 49 verschiedene Lagen, die miteinander verglichen werden.

Zunächst soll die Stauchung der Leitung entlang der X-Achse betrachtet werden. In Bild 6.28 wird die Differenz zwischen den verschiedenen Systemen dargestellt. Markant ist der starke Anstieg und Abfall des Abstandes im Bereich von 10 bis maximal 25 mm. Dieser Fehler wird wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, durch die plötzliche Deformation des PAMCRASH Balkenelementes verursacht. Dieses beult, wie in den Bildern 6.15 bis 6.18 dargestellt zunächst langsamer aus, so daß innerhalb dieses Deformationsbereiches ein maximaler Fehler von ca. 23.5mm entsteht. Nachdem sich alle Balkenelemente angenähert haben, entsteht, bei einem maximalen Fehler von 3mm, eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Elementen.

Abstand zwischen den Balkenelementen bei Stauchung entlang der Längsachse

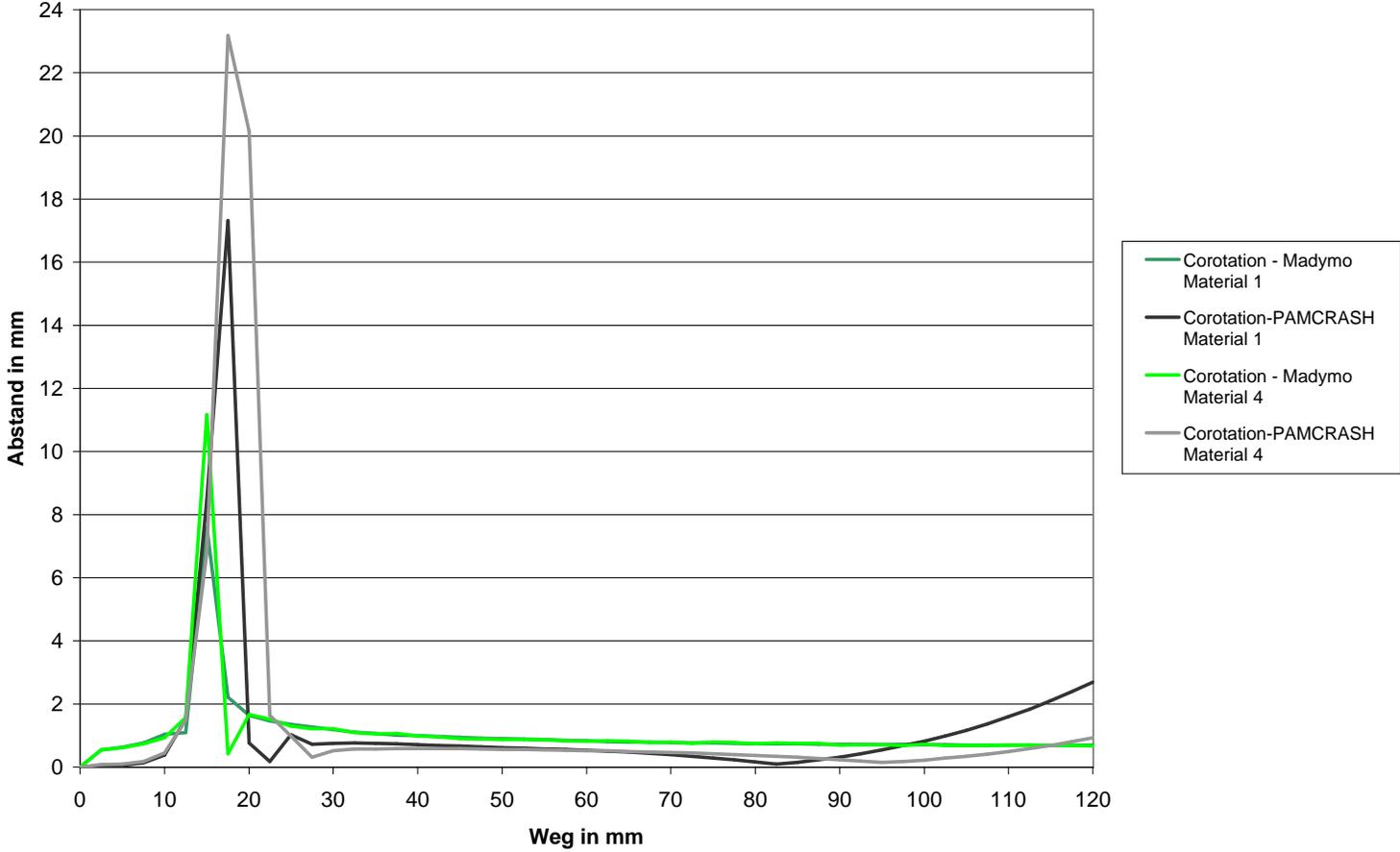


Abbildung 6.28: Die maximalen Abstände bei Stauchung der Leitung entlang der Längsachse.

Im nächsten Versuch wird die Leitung entlang aller Achsen um 120mm gestaucht. Wie in Bild 6.35 dargestellt, liegt der maximale Abstand im gesamten Versuch unterhalb von 13mm. Betrachtet man den Abstand zwischen dem eingesetzten und dem PAMCRASH Balkenelement, so steigt dieser zunächst stetig an, fällt dann wieder ab und konvergiert schließlich bei ca. 10mm. Betrachtet man den Deformationsverlauf im Bereich zwischen 10 und 60mm, wie in den Bildern 6.29 bis 6.33 gezeigt, so sieht man wie das PAMCRASH Balkenelement etwas

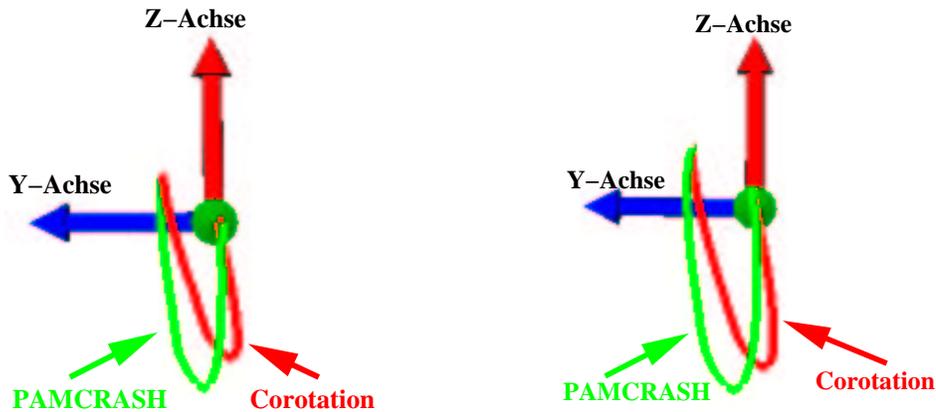


Abbildung 6.29: Deformation des eingesetzten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 10mm.

Abbildung 6.30: Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 22.5mm.

weiter in Richtung der Y-Achse ausbeult. Da das PAMCRASH Balkenelement in der Lage ist, Scherung zu simulieren, besitzt es eine höhere Flexibilität und kann somit eine größere Deformation darstellen.

Betrachtet man die Deformation des Madymo Balkenelementes, so steigt der Abstand zwischen beiden Elementen im Verlauf des Versuches langsam an. In Bild 6.34 sieht man, daß der Fehler in der befestigten Hälfte der Leitung entsteht. Im ersten Teil des Schlauches existiert eine gute Übereinstimmung.

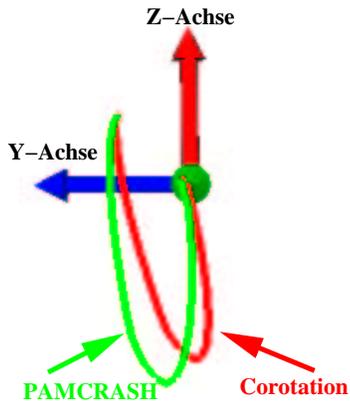


Abbildung 6.31: Deformation des eingesetzten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 35mm.

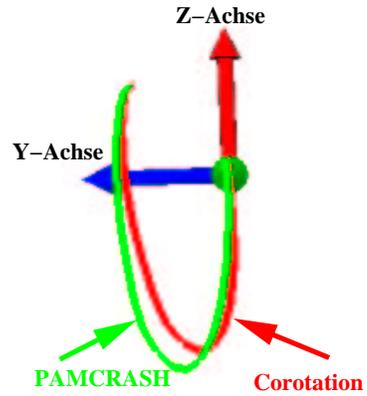


Abbildung 6.32: Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 47.5mm.

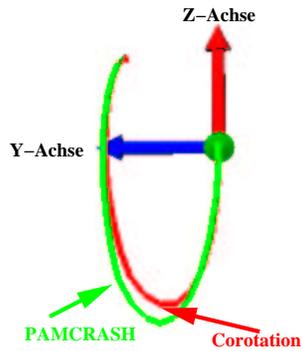


Abbildung 6.33: Deformation des verwendeten und PAMCRASH Balkenelementes bei einer Verschiebung von 60mm.

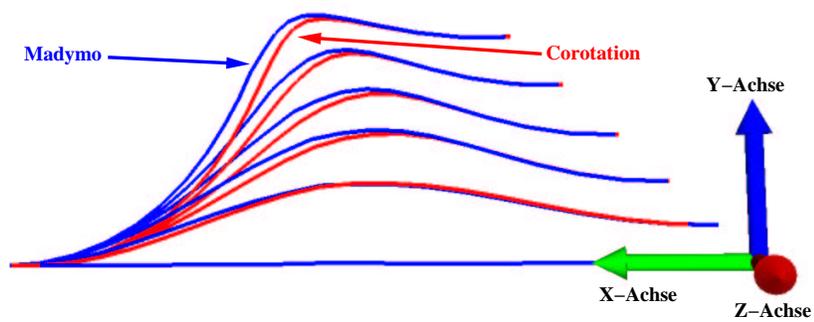


Abbildung 6.34: Die verschiedenen Deformationslagen des eingesetzten und des Madymo Balkenelementes.

Abstand zwischen den Balkenelementen bei Stauchung entlang aller Achsen

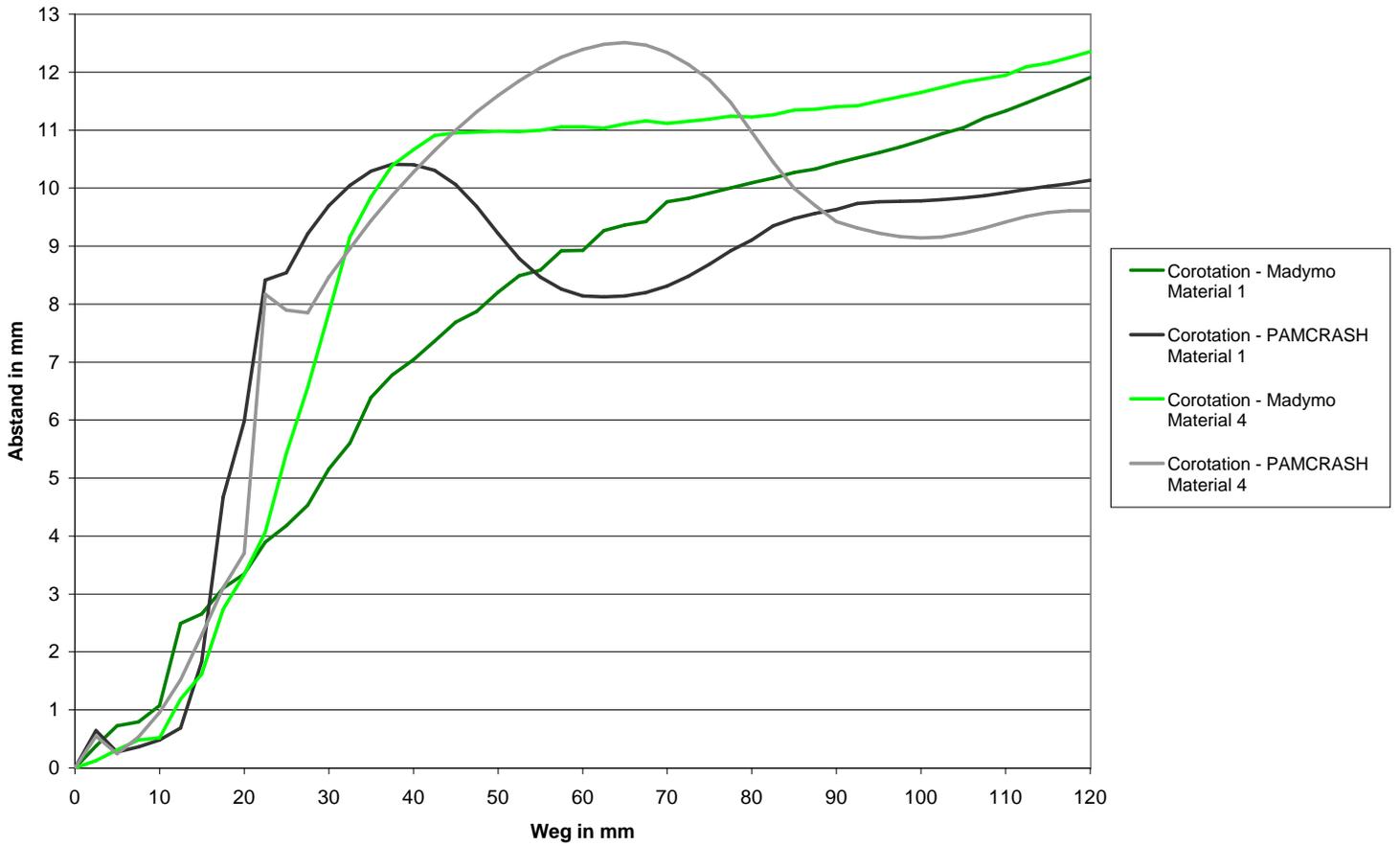
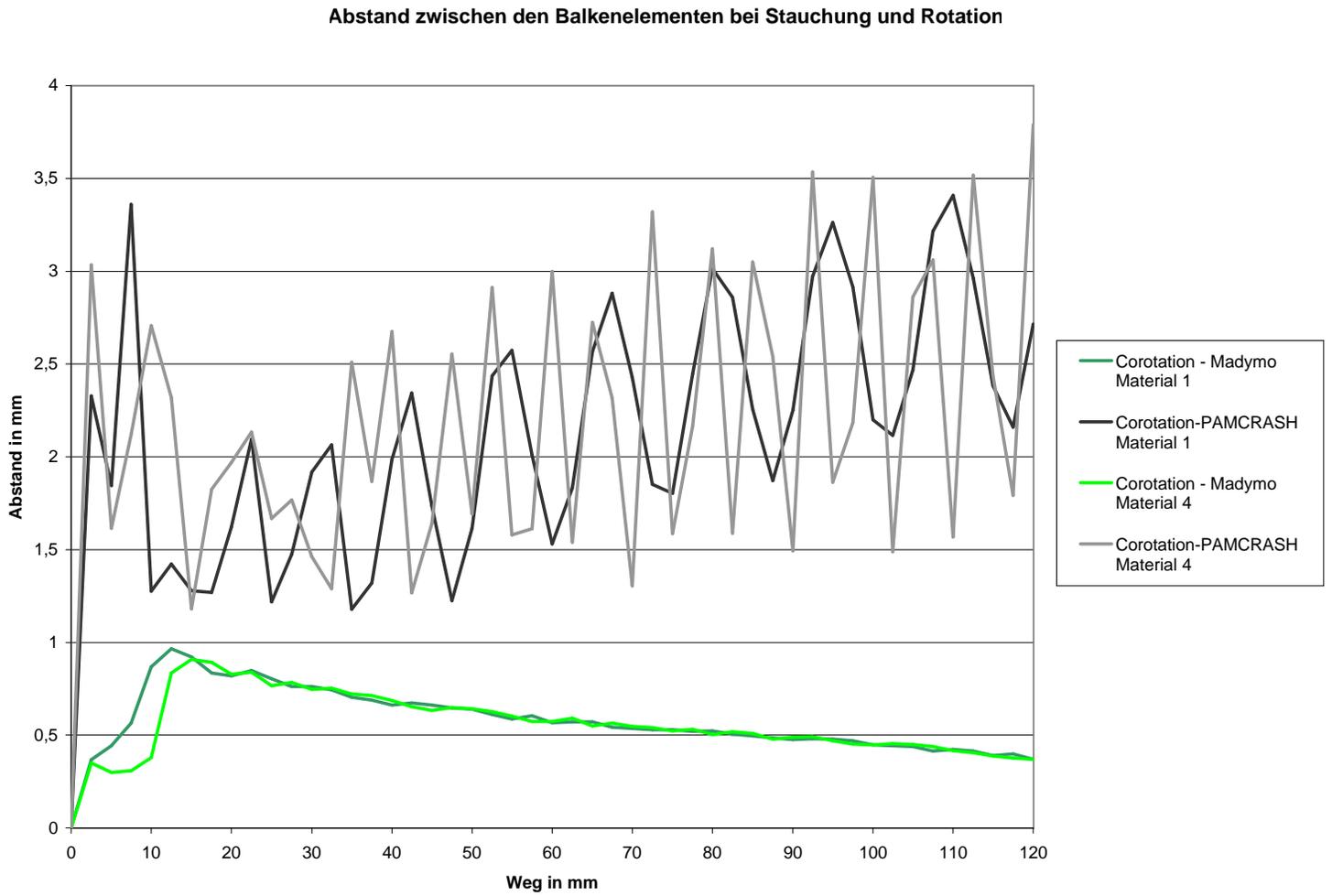


Abbildung 6.35: Die maximalen Abstände bei Stauchung der Leitung entlang aller Achsen.

Im letzten Versuch wird die Leitung entlang der X-Achse gestaucht und gleichzeitig um die Y-Achse um 90 Grad rotiert. Es konnte bereits festgestellt werden, daß die plötzliche Deformation des PAMCRASH Balkenelementes ausbleibt. Die Differenz zwischen den verschiedenen Elementen bleibt somit innerhalb des gesamten Versuches unterhalb von 4mm.

Abbildung 6.36: Die maximalen Abstände bei Stauchung und Rotation der Leitung.



6.2.5 Bewertung der Versuche

Innerhalb dieses Abschnittes werden alle Balkenelemente bezüglich der Unterschiede in den Deformationskräften und Deformationslagen bewertet.

Vergleicht man die Deformationskräfte, so existiert eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Balkenelemente bei Zugbeanspruchung. Der Grund liegt in der Vernachlässigung der Leitungsdeformation. In allen Balkenelementen wird ein lineares Materialmodell verwendet, bei dem die Kraft proportional zur Dehnung ist. Dieser Sachverhalt wird durch den Dehnungsversuch unterstrichen. Kommt eine Deformation der Leitung hinzu, so entstehen gewisse Unterschiede zwischen den Balkenelementen. Wird die Leitung entlang der Längsachse gestaucht und dabei nicht rotiert, so baut sich die Kraft innerhalb des PAMCRASH Balkenelementes auf und wird durch eine plötzliche Deformation der Leitung freigesetzt. Im Gegensatz dazu ist der Deformations- und Kraftverlauf im eingesetzten und Madymo Balkenelement wesentlich gleichmäßiger. Dieser Sachverhalt kommt dem linearen Materialmodell etwas näher. Die Differenzen der Deformationskräfte liegen unterhalb von 20N, was einer Abweichung von weniger als 10% der Maximalkraft entspricht. Da die VR-Montagesimulation für den Einsatz in einer frühen Entwicklungsphase konzipiert ist, ist dieser Unterschied tollerierbar, um Richtwerte angeben zu können. Wird die Leitung entlang aller Achsen gestaucht, so ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Kräfte. Auch hier liegen die Differenzen zwischen den verschiedenen Elementen unterhalb der Schwelle von 10% der Maximalkraft. Betrachtet man schließlich die Kräfte bei Stauchung und Rotation der Leitung, so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Madymo Balkenelement. Hier liegt der Fehler im gesamten Verlauf des Versuches unter 2.5% der Maximalkraft. Im Vergleich zum PAMCRASH Balkenelement ergibt sich jedoch eine größere Differenz. Diese kann wie bereits oben erwähnt durch die höhere Flexibilität des Balkenelementes durch Einbeziehung von Scheinflüssen erklärt werden. Der maximale Unterschied beträgt hier 16.25%. Im weiteren Verlauf des Versuches nimmt diese Differenz jedoch wieder ab, so daß auch hier von einer ausreichenden Genauigkeit ausgegangen werden kann.

Betrachtet man die Deformationslagen, so ergibt sich bei Stauchung der Leitungen kurzfristig eine Differenz zwischen den Balkenelementen von 23mm. Diese Differenz entsteht durch die plötzliche Deformation des PAMCRASH Balkenelementes. Nachdem sich die verschiedenen Elementen wieder angenähert haben, liegt der Abstand bis zum Ende des Versuches unterhalb von 3mm. Die grundlegende Deformation der Leitung ist in allen Balkenelementen gleich. Lediglich der Zeitpunkt der Deformation ist unterschiedlich. Durch die frühere Ausbeulung des Madymo und des verwendeten Balkenelementes kann es zu Kollisionen mit den umliegenden Objekten kommen. Dies kann dazu führen, daß eine Montage nicht durchgeführt werden kann, da die Leitung an kritische Objekte anstößt. Falls sich die Deformation zu früh einstellt, befindet man sich durch die Verwendung des Madymo oder des verwendeten Balkenelementes auf der sicheren Seite.

Wird auf dieser Basis eine Entscheidung getroffen, so werden mögliche Montagerisiken eher vermieden. Bei der allgemeineren Bewegung der Leitung entlang aller Achsen bleibt die Differenz im gesamten Verlauf des Versuches unterhalb von 13mm. Diese Differenz ist aus zwei Gründen ausreichend. Zum einen handelt es sich bei den Montagen um Prozesse, die häufig und schnell wiederholt werden müssen. Dies muß auch bei zum Teil recht großen Produktionsungenauigkeiten sichergestellt sein. Zum anderen ist die Montagesimulation für den Einsatz in einer Konzeptphase vorgesehen. Hierbei ist man eher an Richtlinien als an Ergebnissen in Grenzbereichen interessiert. Durch diese beiden Gesichtspunkte ist der Einsatz der vorgeschlagenen Lösung gerechtfertigt. Wird die Leitung verschoben und rotiert, so verringert sich der Abstand weiter, so daß dieser unterhalb von 5mm liegt. Bei einer realen Bewegung kommt die Verschiebung in verschiedenen Richtungen und eine Rotation der Leitung zusammen. In allen Versuchen bleibt der Fehler unterhalb von 23mm. Es wurde bereits erwähnt, daß angenommen wird, daß eine große Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Programmen auf eine hohe Wahrscheinlichkeit schließen läßt, daß die erzielten Ergebnisse auf die Realität übertragbar sind. Aus den oben genannten Gründen können gewisse Toleranzen akzeptiert werden. Der größte Fehler tritt bei Stauchung der Leitung in Richtung der Längsachse auf. Dieser Fehler führt eher zu einer konservativen Entscheidung bezüglich der Durchführbarkeit der Montage. Je allgemeiner die Bewegung ist, desto geringer ist der Abstand zwischen den verschiedenen Balkenelementen. Unter diesen Voraussetzungen können die Ergebnisse mit einiger Sicherheit auf die Realität übertragen werden.

Bei allen Versuchen existiert eine Abhängigkeit zwischen den Fehlern und dem verwendeten Material. Je weicher das Material, desto größer ist die Differenz. In dem getesteten Materialbereich liegen die Differenzen innerhalb eines akzeptablen Bereiches. Wird das Material noch elastischer, so sollte erneut eine Genauigkeitsüberprüfung erfolgen. In der Realität ist es jedoch wahrscheinlicher, daß die Leitungen steifer sind. Oftmals handelt es sich um formstabile Leitungen, die durch ihre Vorverformung eine höhere Steifigkeit aufweisen. Insofern stellt die Materialabhängigkeit keine Tatsache dar, die die erzielten Ergebnisse vollkommen unrealistisch erscheinen lassen.

6.3 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurde überprüft, ob die Voraussetzungen für den Einsatz in einer Echtzeitumgebung erfüllt sind und welche Aussagekraft die erzielten Ergebnisse in Bezug zur Realität besitzen.

Um zu testen, ob das Simulationsverfahren echtzeitfähig ist, wurde eine gerade Leitung durch eine steigende Anzahl an Balken diskretisiert. Die so erzeugte Leitung wurde anschließend den verschiedenen Lastfällen ausgesetzt und die dabei anfallenden Berechnungszeiten ermittelt. Innerhalb der Versuche zeigte sich un-

abhängig vom verwendeten Material ein linearer Anstieg der notwendigen Berechnungszeit. Es konnte ferner gezeigt werden, daß sich zur Simulation der Grundbewegung der Leitung lediglich ein geringer Mehraufwand für die montagerelevanten Lastfälle addiert. Anhand des linearen Anstieges und der in der Praxis gemachten Erfahrung, daß eine Diskretisierung von 30 Balken pro Leitung für den Einsatz in einer Konzeptphase ausreichend ist, kann eine Grenze von maximal 5 gleichzeitig simulierbaren Leitungen ermittelt werden. Diese Grenze wird in der Regel jedoch nicht erreicht, da lediglich ein Schlauch Gegenstand der Montage ist und von dem Monteur bewegt wird. Sollte dieser mit anderen Leitungen kollidieren, so kommen weitere hinzu, so daß der manipulierte Schlauch mit maximal 4 Leitungen gleichzeitig kollidieren kann. Auf Grund der eingeschränkten Leistungsfähigkeit heutiger Grafikkrechner ist der Anwender ohnehin gezwungen den für ihn interessanten Montagebereich einzuschränken. Insofern wird davon ausgegangen, daß ausreichend wenige Leitungen im Bewegungsbereich des Schlauches liegen. Somit ist die Echtzeitfähigkeit des Simulationsverfahrens immer gegeben.

Indem eine gerade Leitung vier verschiedenen Bewegungen ausgesetzt wurde und die dabei gemessenen Kräfte und Deformationslagen mit Ergebnissen aus den Standard FEM Programmen PAMCRASH und Madymo verglichen wurden, konnte die Güte der Simulation ermittelt werden. Bei den Bewegungen handelt es sich um :

- Dehnung der Leitung um 50mm entlang der Längsachse
- Stauchung der Leitung um 120mm entlang der Längsachse
- Stauchung der Leitung um 120mm entlang aller Achsen
- Stauchung der Leitung um 120mm entlang der Längsachse bei gleichzeitiger Rotation um die Y-Achse um 90 Grad

Betrachtet man den Vergleich der Deformationskräfte, so kann festgestellt werden, daß eine sehr große Übereinstimmung mit dem Berechnungsprogramm Madymo besteht. Hier liegen die Fehler innerhalb einer tolerierbaren Grenze von 10% der Maximalkraft. Beim Vergleich mit dem Programm PAMCRASH entstehen auf Grund plötzlicher Deformationen der Leitungen Sprünge innerhalb der Deformationskräfte. Hier bauen sich Kräfte auf, die sich dann durch plötzliche Deformation entladen. Dieses Phänomen ist jedoch nur sehr kurzfristig und führt nicht zum Scheitern einer Montage.

Beim Vergleich der Deformationslagen muß zwischen den verschiedenen Bewegungen unterschieden werden. Bei einer Bewegung ausschließlich in Richtung der Längsachse der Leitung ergibt sich kurzfristig ein Abstand von maximal 23mm. Im weiteren Verlauf der Bewegung verringert sich dieser und bleibt unterhalb von 3mm. Bei einer Bewegung der Leitung entlang aller Achsen, liegt die Differenz im gesamten Bewegungsbereich unterhalb von 13mm. Bei einer weiteren Verallgemeinerung der Bewegung, bei der die Leitung entlang der Längsachse verschoben

und um die Y-Achse rotiert wird, verringert sich der Abstand weiter und bleibt unterhalb von 4mm. Bei allen Versuchen ergibt sich eine Materialabhängigkeit. Es kann festgehalten werden, daß die Differenz größer ist, je elastischer das Material ist. Da es sich in der Realität jedoch meist um formstabile Leitungen handelt und sie somit eine höhere Steifigkeit aufweisen, kann von einer guten Übereinstimmung der Balkenelemente und somit auf eine hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse ausgegangen werden.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Abschnittes soll die gesamte Arbeit noch einmal zusammengefaßt werden, bevor ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen und zukünftige Forschungen gegeben wird.

7.1 Zusammenfassung

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur physikalischen Simulation von Kabeln und Schläuchen beschrieben, das in einer Virtual Reality basierten Montagesimulation integriert wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit sind zu Beginn die bisherigen Forschungsarbeiten zu den Themengebieten flexible Bauteile und virtuelle Montageuntersuchungen vorgestellt worden. Dabei wurden verschiedene Anwendungsgebiete, wie Animation, Robotik, Modellierung und VR beleuchtet. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die meisten der dort eingesetzten Simulationsverfahren entweder nicht und oder nur bei einer sehr groben Objektdiskretisierung echtzeitfähig sind. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist das Feder-Masse Netz. Hierbei wird das Objekt durch mehrere Masseknoten beschrieben, die über Feder und Dämpfer miteinander verbunden sind. Diese erlauben zwar die Simulation beliebig geformter Objekte, doch auf einer kleinen Knotenanzahl. Betrachtet man die bisherigen VR basierten Montagesimulationen, so liegt das Augenmerk auf einer rein geometrischen Überprüfung des Montagevorganges. Das Deformationsverhalten der montierten Objekte wird in keinem derzeit bekannten System berücksichtigt.

Da die Dissertation in der Forschung der Volkswagen AG durchgeführt wurde, sind speziell die Montagetätigkeiten an einem Fahrzeug in den weiteren Ausführungen betrachtet worden. Ausgehend davon wurden zunächst flexible Bauteile innerhalb eines Fahrzeuges ermittelt. Es wurde festgestellt, daß die Gruppe mit größter Relevanz bei manuellen Montagen die Kabel und Schläuche sind. In dieser Untergruppe wurde versucht, auf Grund einer Einteilung nach der Bauteilfunktion eine Materialdatenbank zu erstellen. Die hierzu notwendigen Materialparameter wur-

den dabei mit Hilfe von Zug- und Druckversuchen ermittelt. Es zeigte sich, daß eine solche Einteilung nicht durchgeführt werden kann, da verschiedene Schläuche der gleichen Funktionsklasse sehr unterschiedliche Materialkennwerte aufweisen. Der Benutzer ist somit gezwungen, im Laufe der Zeit eine eigene Datenbank mit Materialparametern zu erstellen.

Das Ziel der VR-basierten Montagesimulation ist, wie in Kapitel 3.3.3 festgehalten, eine grundlegende Entscheidung, ob sich ein Bauteil montieren läßt oder nicht. Dies wird anhand von geometrischen Engstellen bei starren Objekten und einer Überschreitung der Belastungsgrenze für den Monteur festgestellt. Um den letzteren Punkt in die Montagesimulation zu integrieren, wurden manuelle Tätigkeiten für die Montage von Leitungen und Schläuchen ermittelt. Diese wurden klassifiziert und die hierfür notwendigen Belastungsgrenzen zum einen aus dem Handbuch für Ergonomie von Schmidtke und Grone [51] und zum anderen durch Versuche bei denen ein Monteur einen Schlauch auf einen Anschlußstutzen schieben mußte¹, ermittelt. Bei der Analyse der Montagetätigkeiten wurde weiterhin festgestellt, daß lokale Deformationen, wie Änderungen des Leitungsdurchmessers keinerlei Bedeutung besitzen. Wichtig ist, die globale Lage der Leitung und die dabei wirkenden Kräfte zu ermitteln.

Da sich die Technik der Finiten Elemente auf mehreren Gebieten in Bezug zu der Übertragbarkeit auf die Realität bewährt hat, werden die Leitungen mit Hilfe dieser Methode simuliert. Es kann festgehalten werden, daß es sich bei den zu simulierenden Objekten um Kabel und Schläuche handelt, die länglich sind und einen kreisförmigen Querschnitt besitzen, bei denen der Durchmesser sehr viel kleiner als ihre Länge ist. Des weiteren muß lediglich die globale Lage der Objekte simuliert werden. Beides führt zur Auswahl eines Simulationsverfahrens bei dem die Leitung mit Hilfe von Balken abgebildet wird. Um eine erfolgreiche Montagesimulation durchzuführen, ist es des weiteren notwendig, das eingesetzte Balkenelement um montagespezifische Tätigkeiten zu erweitern. So wurde die Behandlung von Kollisionen der Leitung mit starren Objekten der Umgebung und mit anderen Leitungen, die Bearbeitung von Befestigungsclipsen und die Berechnung von Anschlußstutzen integriert.

Um dem Anwender eine intuitive und realitätsnahe Montagesimulation anzubieten, erfolgt die Kommunikation des Benutzers mit dem Simulationsmodell unter Verwendung der Technik der virtuellen Realität. Der Benutzer ist dabei in der Lage, den Schlauch zu greifen und seine gewohnten manuellen Operationen wie in der Realität auszuführen. Um eine Echtzeitfähigkeit der gesamten Montagesimulation zu erreichen, wurden verschiedene Maßnahmen getroffen, optimale Berechnungszeiten zu erzielen. So erfolgt eine Trennung zwischen einer Kollisions- und einer Graphikausprägung der Leitungsdaten. Die Kollisionsdaten werden durch einfache Zylinder aufgebaut, die transliert, rotiert oder skaliert

¹Diese Tätigkeit wurde ausgewählt, da sie die größte Kraftanstrengung während einer Montage abverlangt und letztenendes zum Scheitern derselben führen kann.

werden. Um dem Benutzer einen realistischen Eindruck der gesamten Leitung zu geben, wird das graphische Echo der Leitung hingegen durch ein geschlossenes polygonales Objekt, bestehend aus Stripes, dargestellt. Um die Rendering-Schleife des VR-Systems nicht durch die Berechnung der physikalischen Simulation zu belasten, erfolgt die Simulation der Leitungen parallel zum VR-System. Beide Systeme laufen auf getrennten Prozessoren und kommunizieren mit Hilfe von globalen Variablen miteinander. Um dem Anwender einen visuell überzeugenden Eindruck der Montage zu geben, ist die spezielle Behandlung der Montagetätigkeiten wie Befestigung mit Leitungsclipsen oder Anschlußstutzen erforderlich. Da das Scheitern einer Montage mit den Belastungsgrenzen des Monteurs gekoppelt ist, werden dem Anwender zu jedem Zeitpunkt die wirkenden Kräfte in Form einer Leitungseinfärbung dargestellt. Er kann somit selbstständig entscheiden, wann eine zumutbare Kraftgrenze überschritten ist, oder ob eine kurzweilige Überschreitung hingenommen werden kann.

Abschließend wurde anhand eines Vergleiches mit den Standard FEM Programmen PAMCRASH und Madymo überprüft, inwieweit die mit dem Simulationsmodell erzielten Ergebnisse auf die Realität übertragbar sind. Daneben wurde getestet, ob das Simulationsverfahren in der Lage ist, die Leitungsdeformationen in Echtzeit zu berechnen. Es zeigte sich, daß die letzte Forderung erfüllt werden kann. Die Berechnungszeiten für alle Lastfälle lagen deutlich unterhalb der erforderlichen Echtzeitschwelle von 100ms. Die durch das eingesetzte Verfahren berechneten Kräfte und Deformationslagen waren mit den Ergebnissen aus PAMCRASH und Madymo vergleichbar, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Ergebnisse auf die Realität übertragbar sind. Für den Vergleich wurden zwei unterschiedlich elastische Leitungen verschiedenen Bewegungen ausgesetzt. Die maximale Differenz der Deformationskräfte lag bei den Versuchen, unterhalb einer Schwelle von 10% der Maximalkraft. Betrachtet man die verschiedenen Deformationslagen, so lagen die maximalen Abstände zwischen den verschiedenen Balkenelementen unterhalb von 23mm. Es konnte dabei festgestellt werden, daß der Fehler geringer wurde, je mehr Freiheitsgrade die Leitung besaß. Des Weiteren führt der Deformationsunterschied bei dem größten Abstand eher zu einer konservativen Entscheidung. Es wird somit eher angenommen, daß die Leitung in kritische Bereiche des Montageraumes eindringt, was zu einer Suche nach Alternativen führt. Bei einer Montagetätigkeit, die häufig wiederholt werden muß, ist dies wünschenswert, da so Fehler vermieden werden. Insofern ist die Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf die Realität zulässig.

Mit der vorliegenden Arbeit ist man somit zum ersten Mal in der Lage, flexible Bauteile in die Montagesimulation einzubeziehen und diese auf intuitive Weise mit Hilfe einer Virtual Reality Schnittstelle zu manipulieren. Dies erweitert zum einen die Bandbreite der zu simulierenden Tätigkeiten und erlaubt durch die realitätsnahe Handhabung zum anderen gute Rückschlüsse auf notwendige Haltungen und Belastungen für den Monteur. Somit können zu einem frühen Zeitpunkt verschiedene Montagealternativen untersucht und bewertet werden.

Ohne die Notwendigkeit physikalischer Prototypen ist somit eine Kosten- und Zeitersparnis möglich.

7.2 Ausblick

Innerhalb dieses Abschnittes soll ein Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten für die vorliegende Arbeit gegeben werden. Hierbei muß zwischen der Simulation der flexiblen Bauteile und der VR-basierten Montagesimulation unterschieden werden. Betrachten wir zunächst die **Simulation der flexiblen Bauteile**, so erscheint die weitere Untersuchung der folgenden Aspekte sinnvoll :

- **Materialdatenbank und Vermessung der Bauteile** : Hier sollten Mittel und Wege gefunden werden, um auf einfache Weise eine ausreichend große Materialdatenbank anzulegen. Dies ermöglicht dem Benutzer ein einfaches Testen neuer Materialien und erweitert so die Einsatzmöglichkeiten des System. Es müßte weiterhin untersucht werden, inwieweit die vorliegende Arbeit an andere Materialdatenbanken des Volkswagen Konzern angebunden werden kann.
- **Erstellung der Leitungen** : Auch hier ist eine Vernetzung zum Beispiel mit bestehenden CAD Systemen wünschenswert, um so die Arbeit des Anwenders zu erleichtern.
- **Nicht lineare Materialien** : Die meisten verwendeten Leitungen besitzen eine Gewebeeinlage, die ein unterschiedliches Zug- und Druckverhalten der Schläuche bewirkt. Zu untersuchen bleibt, inwieweit andere Nicht-Linearitäten der Materialien einbezogen werden können.
- **Austausch des Integrationsverfahrens** : Durch das Eingreifen des Benutzers und der Kollision mit starren Bauteilen der Umgebung kann es zu plötzlichen Geschwindigkeitssprüngen kommen. Diese führen zu einem nicht-linearen System, das den Einsatz anderer Integrationsverfahren, wie zum Beispiel das Hilbert-Hughes-Taylor Verfahren, sinnvoll erscheinen läßt.
- **Verwendung anderer Finite Elementtypen** : Es bleibt zu untersuchen, ob zum Beispiel Schalenelemente an die Echtzeitanforderung der virtuellen Realität angepaßt werden können, um so Objekte beliebiger Topologie zu untersuchen. Als weitere Schwierigkeit bleibt hier die automatische Erstellung des Simulationsmodells.

Um die Benutzerfreundlichkeit der gesamten **Montagesimulation** zu steigern, bieten sich innerhalb der VR Umgebung folgende Bereiche für eine weitere Forschung an :

- **Kraftrückkopplung** : Die im Modell wirkenden Kräfte werden derzeit mit Hilfe von Farben dem Benutzer angezeigt. Sie könnten jedoch auch mit Hilfe von Kraftrückkopplungsgeräten dargestellt werden. Zu untersuchen wäre, auf welche Weise man die heutigen Geräte erweitern muß, um den Anforderungen einer Montageuntersuchung gerecht zu werden.
- **Integration weiterer physikalischer Eigenschaften** : Die Simulation sollte so realistisch wie möglich sein. Es müßten Wege gefunden werden, zum Beispiel Reibeinflüsse oder das Gleiten eines Objektes auf einem starren Bauteil der Umgebung, in die Berechnung einfließen zu lassen.
- **Ergonomische Betrachtungen** : Bei vielen Untersuchungen ist es von besonderem Interesse, welche Haltungen der Monteur einnimmt und welchen Belastungen er ausgesetzt ist. Hier kann die Integration eines Menschmodells helfen, die genaue Körperhaltung des Menschen im System aufzuzeichnen und eventuelle Kollisionen zum Beispiel des Oberkörpers anzuzeigen.
- **Augmented Reality** : Bei diesem Themengebiet werden reale Daten der Umgebung mit computergenerierte Daten überlagert. Dem Anwender können somit zusätzliche Informationen gegeben werden. Es bleibt zu untersuchen, inwieweit die Ergebnisse dieser Arbeit zum Beispiel für Schulungszwecke oder bei einer realen Montage mit der Technik der Augmented Reality verwendet werden können.

Anhang A

Berechnung großer Rotationen

Innerhalb dieses Abschnittes werden Verfahren vorgestellt, mit deren Hilfe die Berechnung großer Rotationen möglich ist. Die Verfahren werden dabei in Anlehnung an [66] wiedergegeben.

A.1 Berechnung kleiner Rotationen

Wird ein Punkt \mathbf{p}_0 um eine, beliebig im Raum stehende, Achse Θ rotiert, so kann der resultierende Punkt \mathbf{p}_n aus folgender Addition berechnet werden :

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p} \quad (\text{A.1})$$

Dies wird auch im folgenden Bild dargestellt. Unter der Annahme kleiner Rota-

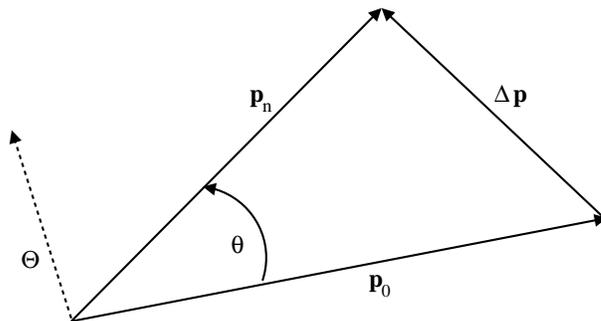


Abbildung A.1: Berechnung einer kleinen Rotation durch Addition

tionen kann der Vektor $\Delta\mathbf{p}$ durch Bildung des Kreuzproduktes von Θ und \mathbf{p}_0 gebildet werden. Die obige Gleichung ergibt sich somit zu :

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{p}_0 + \Theta \times \mathbf{p}_0 \quad (\text{A.2})$$

Wird Θ in seine Rotationswinkel θ_x bis θ_z zerlegt, so kann A.2 auf folgende Weise ausgedrückt werden :

$$\mathbf{p}_n = \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 0 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 0 \end{bmatrix} \right] \mathbf{p}_0 \quad (\text{A.3})$$

$$= [\mathbf{I} + \mathbf{S}(\Theta)] \mathbf{p}_0 \quad (\text{A.4})$$

Durch Verwendung des Kreuzproduktes $\Theta \times \mathbf{p}_0$ wird eine Bewegung tangential zum Rotationskreis vorgegeben. Hierdurch kommt es schon bei kleinen Winkeln zu Abweichungen, die jedoch auf Grund des geringeren Berechnungsaufwandes in bestimmten Anwendungsgebieten hingenommen werden können.

A.2 Rodrigues Formel zur Berechnung großer Rotationen

Betrachtet man die Rotationsebene, zu der die normierte Rotationsachse \mathbf{e} senkrecht steht, so zeigt Bild A.2 eine andere Möglichkeit den Vektor $\Delta \mathbf{p}$ zu berechnen. Der Vektor $\Delta \mathbf{p}$ läßt sich damit aus folgender Addition berechnen :

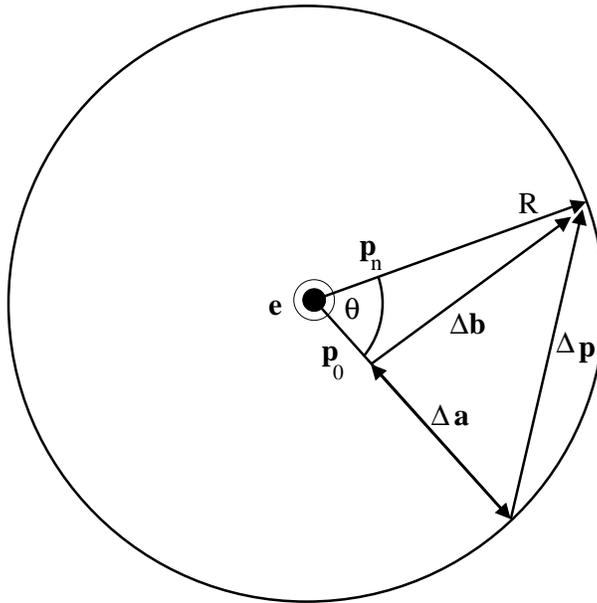


Abbildung A.2: Berechnung des Vektors $\Delta \mathbf{p}$ durch Addition zweier Vektoren

$$\Delta \mathbf{p} = \Delta \mathbf{a} + \Delta \mathbf{b} \quad (\text{A.5})$$

Die Länge des Vektors $\Delta\mathbf{b}$ wird durch folgende Beziehung berechnet :

$$\Delta b = \|\Delta\mathbf{b}\| = R\sin\|\Theta\| \quad (\text{A.6})$$

Hiermit läßt sich $\Delta\mathbf{b}$ auf folgende Weise berechnen :

$$\Delta\mathbf{b} = \frac{\Delta b}{\|\mathbf{p}_0 \times \mathbf{e}\|}(\mathbf{e} \times \mathbf{p}_0) = \frac{R\sin\theta}{\|\mathbf{p}_0 \times \mathbf{e}\|}(\mathbf{e} \times \mathbf{p}_0) \quad (\text{A.7})$$

Da \mathbf{e} ein Einheitsvektor ist ergibt sich :

$$\|\mathbf{p}_0 \times \mathbf{e}\| = R \quad (\text{A.8})$$

Die obige Gleichung vereinfacht sich somit zu :

$$\Delta\mathbf{b} = \sin\theta(\mathbf{e} \times \mathbf{p}_0) = \frac{\sin\theta}{\theta}(\Theta \times \mathbf{p}_0) \quad (\text{A.9})$$

Da $\Delta\mathbf{a}$ sowohl zu \mathbf{e} und $\Delta\mathbf{b}$ orthogonal ist, kann es auf folgende Weise berechnet werden :

$$\Delta\mathbf{a} = \frac{\Delta a}{R}(\mathbf{e} \times (\mathbf{e} \times \mathbf{p}_0)) \quad (\text{A.10})$$

Da sich Δa zu $R(1 - \cos\theta)$ ergibt, vereinfacht sich die obige Beziehung zu :

$$\Delta\mathbf{a} = (1 - \cos\theta)(\mathbf{e} \times (\mathbf{e} \times \mathbf{p}_0)) = \frac{1 - \cos\theta}{\theta^2}(\Theta \times (\Theta \times \mathbf{p}_0)) \quad (\text{A.11})$$

Zusammenfassend ergibt sich \mathbf{p}_n somit aus :

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{R}\mathbf{p}_0 \quad (\text{A.12})$$

Wobei sich \mathbf{R} aus folgender Gleichung ergibt :

$$\mathbf{R} = \left[\mathbf{I} + \frac{\sin\theta}{\theta}\mathbf{S}(\Theta) + \frac{1 - \cos\theta}{\theta^2}\mathbf{S}(\Theta)\mathbf{S}(\Theta) \right] \quad (\text{A.13})$$

$$= [\mathbf{I} + \sin\theta\mathbf{S}(\mathbf{e}) + (1 - \cos\theta)\mathbf{S}(\mathbf{e})\mathbf{S}(\mathbf{e})] \quad (\text{A.14})$$

A.3 Verwendung eines alternativen Rotationsvektors

Liegt eine zusammengesetzte Rotation vor, so kann das Ersetzen des Rotationsvektors sinnvoll sein. Dieser wird auf folgende Weise durch einen „Pseudovektor“ ersetzt :

$$\boldsymbol{\omega} = \omega\mathbf{e} = 2\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\mathbf{e} = \frac{2\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\theta}\Theta \quad (\text{A.15})$$

Ersetzt man den Rotationsvektor in der Rotationsmatrix des vorherigen Abschnittes durch den erstellten Pseudovektor, so erhält man :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\boldsymbol{\omega}^T\boldsymbol{\omega}} \left[\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega}) + \frac{1}{2}\mathbf{S}(\boldsymbol{\omega})^2 \right] \quad (\text{A.16})$$

Da in dieser Rotationsformel Cosinus und Sinus Ausdrücke enthalten sind. Kann eine Genauigkeit bis zu Winkeln zwischen -180 und 180 Grad gewährleistet werden.

A.4 Behandlung zusammengesetzter Rotationen

Wird ein Vektor \mathbf{p}_0 mehrmals rotiert, so daß sich eine Gleichung der Form $\mathbf{p}_n = \mathbf{R}_2(\boldsymbol{\omega}_2)\mathbf{R}_1(\boldsymbol{\omega}_1)\mathbf{p}_0$ ergibt, können die beiden Pseudovektoren nicht einfach addiert werden. Die Verwendung des Pseudovektors $\boldsymbol{\omega}$ erlaubt jedoch eine Kombination beider Vektoren auf folgende Weise :

$$\boldsymbol{\omega}_{12} = \frac{\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2 - \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{\omega}_2}{1 - \frac{1}{4}\boldsymbol{\omega}_1^T\boldsymbol{\omega}_2} \quad (\text{A.17})$$

A.5 Quaternionen und Eulerparameter

Falls die Rotationswinkel größer als 180 Grad werden, so bieten die obigen Gleichungen auf Grund der Skalierung mit Sinus keine eindeutige Abbildung. Hier kann man sich Quaternionen bedienen, die im folgenden Abschnitt zunächst definiert werden.

A.5.1 Definition von Quaternionen

Die folgende Definition ist dabei aus [72] entnommen.

Ein Quaternion ist durch $q = w + xi + yj + zk$ gegeben. Nimmt man zwei Quaternionen q_0 und q_1 , so lassen sich Addition und Subtraktion auf folgende Weise angeben :

$$q_0 \pm q_1 = (w_0 + x_0i + y_0j + z_0k) \pm (w_1 + x_1i + y_1j + z_1k) \quad (\text{A.18})$$

$$= (w_0 \pm w_1) + (x_0 \pm x_1)i + (y_0 \pm y_1)j + (z_0 \pm z_1)k \quad (\text{A.19})$$

Bei der Angabe der Multiplikation muß man folgende Gleichungen für die Multiplikation der Primitivelemente i , j und k berücksichtigen.

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad (\text{A.20})$$

$$ij = -ji = k \quad (\text{A.21})$$

$$ik = -ik = j \quad (\text{A.22})$$

$$kj = -jk = i \quad (\text{A.23})$$

$$(\text{A.24})$$

Somit ergibt sich die Multiplikation zweier Quaternionen zu :

$$q_0q_1 = (w_0 + x_0i + y_0j + z_0k)(w_1 + x_1i + y_1j + z_1k) \quad (\text{A.25})$$

$$= (w_0w_1 - x_0x_1 - y_0y_1 - z_0z_1) + \quad (\text{A.26})$$

$$(w_0x_1 + x_0w_1 + y_0z_1 - z_0y_1)i + \quad (\text{A.27})$$

$$(w_0y_1 - x_0z_1 + y_0w_1 + z_0x_1)j + \quad (\text{A.28})$$

$$(w_0z_1 + x_0y_1 - y_0x_1 - z_0w_1)k \quad (\text{A.29})$$

Die Konjugierte eines Quaternionen ist definiert als :

$$q^* = w - xi - yj - zk \quad (\text{A.30})$$

und die Norm als :

$$N(q) = w^2 + x^2 + y^2 + z^2 \quad (\text{A.31})$$

Die Inverse einer Multiplikation wird mit q^{-1} bezeichnet und ist durch folgende Gleichung definiert :

$$q^{-1} = \frac{q^*}{N(q)} \quad (\text{A.32})$$

Des weiteren wird eine Selektionsfunktion $W(q)$ angegeben, die den „Realteil“ eines Quaternionen liefert.

$$W(q) = W(w + xi + yj + zk) = w \quad (\text{A.33})$$

Ein Einheitsquaternion q besitzt eine Norm $N(q)=1$. Er kann auf folgende Weise beschrieben werden :

$$q = \cos\theta + \mathbf{u}\sin\theta \quad (\text{A.34})$$

Wobei der Vektor \mathbf{u} ebenfalls ein Einheitsvektor ist. Ein Einheitsquaternion repräsentiert die Rotation eines Vektors \mathbf{h} um 2θ um die Achse \mathbf{u} .

A.5.2 Bezug zu großen Rotationen

Beschreibt man eine Rotationsmatrix der Form :

$$\mathbf{R} = [\mathbf{I} + \sin\theta\mathbf{S}(\mathbf{e}) + (1 - \cos\theta)\mathbf{S}(\mathbf{e})\mathbf{S}(\mathbf{e})] \quad (\text{A.35})$$

durch Halbwinkel $\frac{\theta}{2}$ so gelangt man zu folgendem Ausdruck :

$$\mathbf{R} = (\cos^2(\frac{\theta}{2}) - \sin^2(\frac{\theta}{2}))\mathbf{I} + 2\cos(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{S}(\mathbf{e}) + 2\sin^2(\frac{\theta}{2})\mathbf{e}\mathbf{e}^T \quad (\text{A.36})$$

Verwendet man nun Einheitsquaternionen der Form $q = \cos(\frac{\theta}{2}) + \mathbf{e}\sin(\frac{\theta}{2})$ so kann \mathbf{R} folgender Maßen ausgedrückt werden :

$$\mathbf{R} = (\cos^2(\frac{\theta}{2}) - (\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{e})^T(\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{e}))\mathbf{I} + \quad (\text{A.37})$$

$$2(\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{e})(\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{e})^T + 2\cos^2(\frac{\theta}{2})\mathbf{S}(\sin(\frac{\theta}{2})\mathbf{e}) \quad (\text{A.38})$$

Die Verwendung von Halbwinkeln macht es in dieser Form möglich, Winkel im Bereich zwischen -360 und 360 Grad betrachten zu können.

Anhang B

Das Newmark Beta Verfahren

Innerhalb dieses Abschnittes soll die Newmark Beta Methode etwas ausführlicher vorgestellt werden und verschiedene Parameterpaare dieser Methode bzgl. der Integrationsgenauigkeit beleuchtet werden. Die vorgestellten Verfahren werden dabei in Anlehnung an [66] und [73] wiedergegeben.

B.1 Die Integrationsvorschrift

Bei dem Newmark Beta Verfahren handelt es sich um ein Einschrittverfahren. Kennzeichnend für diese Verfahren ist die Tatsache, daß der Status des nächsten Zeitschrittes t_{n+1} lediglich aus den Informationen des aktuellen Zeitschrittes t_n berechnet werden. Verfahren dieses Typs können durch folgende Gleichungen beschrieben werden.

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \frac{\alpha}{\Delta t} \ddot{\mathbf{p}}_{n+1} + l(\dot{\mathbf{p}}_n, \ddot{\mathbf{p}}_n) \quad (\text{B.1})$$

$$\mathbf{p}_{n+1} = \frac{\beta}{\Delta t^2} \ddot{\mathbf{p}}_{n+1} + m(\mathbf{p}_n, \dot{\mathbf{p}}_n, \ddot{\mathbf{p}}_n) \quad (\text{B.2})$$

Das Newmark Beta Verfahren benutzt eine Taylor-Reihe der Verschiebungen und Geschwindigkeiten, um eine lineare Beziehung entsprechend Gleichung B.1 zu erzielen. Man erhält schließlich folgende Gleichungen.

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \Delta t \dot{\mathbf{p}}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{p}}_n + \beta \Delta t^2 \ddot{\mathbf{p}}_{n+1} \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \dot{\mathbf{p}}_n + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\mathbf{p}}_n + \gamma \Delta t \ddot{\mathbf{p}}_{n+1} \quad (\text{B.4})$$

B.2 Stabilitätsbetrachtungen

Betrachtet man einen linearen Lastfall bei dem keine Dämpfung vorliegt, etwa eine Oszillation, so kann man nach Elimination der Beschleunigungsterme von

folgender Gleichung ausgehen :

$$\mathbf{B}\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{p}_n \quad (\text{B.5})$$

Wobei \mathbf{B} und \mathbf{A} auf folgende Weise gegeben sind :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 + \beta\Delta t^2\omega_0^2 & 0 \\ \gamma\Delta t\omega_0^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - (\frac{1}{2} - \beta)\Delta t^2\omega_0^2 & \Delta t \\ -(1 - \gamma)\Delta t\omega_0^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Es wird von folgender Lösung des Systems ausgegangen :

$$\mathbf{p}_n = \lambda^k \mathbf{p}_{n-k} \quad (\text{B.8})$$

Die charakteristische Gleichung des Systems $\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{B}) = 0$ ergibt sich als quadratisches Polynom in λ .

$$\lambda^2 - \lambda \left[2 - \left(\gamma + \frac{1}{2} \right) r^2 \right] + 1 - \left(\gamma - \frac{1}{2} \right) r^2 = 0 \quad (\text{B.9})$$

Wobei r^2 durch folgende Beziehung gegeben ist :

$$r^2 = \frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{1 + \beta\omega_0^2 \Delta t^2} \quad (\text{B.10})$$

Wenn $[(\gamma + \frac{1}{2})r^2] \leq 4$ oder $(\gamma + \frac{1}{2})^2 - 4\beta \leq \frac{4}{\omega_0^2 \Delta t^2}$ gilt, erlaubt Gleichung B.9 ein Paar konjugiert komplexer Eigenwerte, deren Wurzeln in exponentieller Form $\lambda = qe^{i\Theta}$ angegeben werden können. Hierbei ergeben sich q und Θ zu :

$$q = \sqrt{1 - \left(\gamma - \frac{1}{2} \right) r^2} \quad (\text{B.11})$$

$$\Theta = \arctan \left(\frac{r \sqrt{4 - (\gamma + \frac{1}{2})^2 r^2}}{2 - (\gamma + \frac{1}{2}) r^2} \right) \quad (\text{B.12})$$

Unabhängig von der Zeitschrittweite Δt erhält man eine numerisch stabile Lösung, wenn $q \leq 1$ ist. Dies bedeutet, daß der Newmark Algorithmus folgende Kondition erfüllen muß :

$$\gamma \geq \frac{1}{2} \quad (\text{B.13})$$

Um die oszillierende Natur der Bewegung abzubilden und eine unbedingte Stabilität des Algorithmus aufrecht zu erhalten, muß zusätzlich folgende Bedingung gelten :

$$\beta \geq \frac{1}{4} \left(\gamma + \frac{1}{2} \right)^2 \quad (\text{B.14})$$

Um gleichzeitig die Genauigkeit des Algorithmus zu vergleichen, wird der Amplitudenfehler durch folgende Gleichung

$$A = - \left(\gamma - \frac{1}{2} \right) \omega_0^2 \Delta t^2 + O(\Delta t^4) \quad (\text{B.15})$$

und der Periodizitätsfehler gegeben durch :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2} \left(\beta - \frac{1}{12} \right) \omega_0^2 \Delta t^2 + O(\Delta t^3) \quad (\text{B.16})$$

Verschiedene Wertepaare für β und γ führen zu unterschiedlichen Genauigkeiten und Stabilitäten des Newmark β Verfahrens. Tabelle B.1 zeigt verschiedene Verfahren, die Belegungen für β und γ und den sich daraus ergebenden Fehlern. Betrachtet man die einzelnen Verfahren etwas genauer, so kann folgendes

Algorithmus	β	γ	Stabilitäts- limit : $\omega_0 \Delta t$	Amplituden- fehler	Periodizitäts- fehler
Rein Explizit	0	0	0	$\frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{2}$	
Zentrale Differenzen	0	$\frac{1}{2}$	2	0	$-\frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{24}$
Fox und Goodwin	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{2}$	2.45	0	$O(\Delta t^3)$
Lineare Beschleunigung	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	3.46	0	$\frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{24}$
Trapez- regel	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	∞	0	$\frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{12}$

Tabelle B.1: Übersicht über die verschiedenen Newmark β Verfahren und ihre Genauigkeiten

festgehalten werden.

B.2.1 Explizites Newmark β Verfahren

Solange keine Dämpfung im System vorliegt, führt die explizite Vorhersage der Verschiebungen und Geschwindigkeiten zu einer numerisch instabilen Simulation. Zumindest eine implizite Korrektur der Geschwindigkeiten $\gamma \geq \frac{1}{2}$ ist notwendig, das System zu stabilisieren.

B.2.2 Zentrale Differenzenmethode

Es ist leicht nachzuvollziehen, daß das explizite Einschrittverfahren beschrieben als :

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \Delta t \dot{\mathbf{p}}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{p}}_n \quad (\text{B.17})$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1} = \dot{\mathbf{p}}_n + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{\mathbf{p}}_n + \ddot{\mathbf{p}}_{n+1}) \quad (\text{B.18})$$

in das Zentralen Differenzenverfahren

$$\ddot{\mathbf{p}}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{p}_{n+1} - 2\mathbf{p}_n + \mathbf{p}_{n-1}) \quad (\text{B.19})$$

transformiert werden kann. Dieses verwendet explizit keine Geschwindigkeiten zur Bestimmung der Verschiebungen. Die Schrittweite ist hier durch $\omega_0 \Delta t \leq 2$ limitiert. Wenn das wesentliche Bildungsgesetz Geschwindigkeits basiert ist, muß eine explizite Vorhersage der Geschwindigkeiten erfolgen, um so die internen Lasten zu berechnen. Um Rundungsfehler zu minimieren, wird oft eine Integrationsvorschrift gewählt, bei der die Geschwindigkeiten im halben Zeitschritt $n + \frac{1}{2}$ berechnet werden. Die Integrationsvorschrift ergibt sich dabei zu :

$$\ddot{\mathbf{p}}_n = \frac{1}{\Delta t} (\dot{\mathbf{p}}_{n+1/2} - \dot{\mathbf{p}}_{n-1/2}) \quad (\text{B.20})$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{p}_{n+1} - \mathbf{p}_n) \quad (\text{B.21})$$

B.2.3 Fox und Goodwin

Durch die Verwendung von $\beta = \frac{1}{12}$ und $\gamma = \frac{1}{2}$ besitzt das implizite Integrationsverfahren einen Amplitudenfehler von 0 und einen Periodizitätsfehler dritter Ordnung. Im Widerspruch zu der impliziten Form des Verfahrens besitzt es eine eingeschränkte Stabilität der Art $\omega_0^2 \Delta t^2 < 6$.

B.2.4 Lineares Beschleunigungsverfahren

Auch das lineare Beschleunigungsverfahren ist ein implizites Verfahren mit einer eingeschränkten Stabilität von $\omega_0^2 \Delta t^2 < 12$. Der Periodizitätsfehler liegt bei $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{24}$.

B.2.5 Trapezregel

Für lineare Anwendungen ist die Wahl dieses Verfahrens die beste Integrationsvorschrift mit einer unbedingten Stabilität bei keinem Amplitudenfehler und einem Periodizitätsfehler von $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\omega_0^2 \Delta t^2}{12}$.

B.2.6 Hilbert-Hughes-Taylor α Verfahren

Alle oben genannten Aussagen gelten für den linearen Fall. Handelt es sich jedoch um ein nicht-lineares System, bei dem sich zum Beispiel die Geschwindigkeit auf Grund einer Kollision stark verändert, so liefert das Hilbert-Hughes-Taylor α Verfahren bessere Ergebnisse.

Durch dieses Verfahren wird eine Dämpfung in das Newmark Verfahren integriert, ohne dass der Grad der Genauigkeit vermindert wird. Das Newmark Verfahren wird weiterhin zur numerischen Integration verwendet, jedoch wird die Gleichgewichtsbeziehung auf folgende Weise umformuliert :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}}_{n+1} + (1 - \alpha)(\mathbf{f}_{n+1}^e - \mathbf{f}_{n+1}^i + \mathbf{C}\dot{\mathbf{p}}_{n+1}) + \alpha(\mathbf{f}_n^e - \mathbf{f}_n^i + \mathbf{C}\dot{\mathbf{p}}_n) = 0 \quad (\text{B.22})$$

Wobei f die internen und g die externen Kräfte des Systems sind. Wenn die Parameter auf folgende Weise gewählt werden :

$$\alpha \in \left[0, \frac{1}{3}\right] \quad (\text{B.23})$$

$$\gamma = \frac{1}{2} + \alpha \quad (\text{B.24})$$

$$\beta = \frac{1}{4}(1 + \alpha)^2 \quad (\text{B.25})$$

Ist das System unconditionell stabil. Das Newmark Verfahren kann somit in nicht linearen Fällen durch das HHT α Verfahren ersetzt werden, wenn eine numerische Dämpfung im Integrationssystem notwendig ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Boothroyd, Geoffrey, Dewhurst, **Product Design for Assembly Handbook**, Wakefield RI, 1987
- [2] Spiess Jan, **Montagegerechte Produktgestaltung am Beispiel des komplexen Großserienproduktes Automobil**, Dissertation, ETH Zürich, 1997
- [3] Fan Dai (Editor), **Virtual Reality for Industrial Applications**, Springer, Berlin, 1997
- [4] Roy S. Kalawsky, **The Science of Virtual Reality and Virtual Environments**, Addison Wesley, 1994
- [5] Airey J., Rohlf J.,Frederick P., **Towards image realism with interactive update reates in complex virtual building environments**, Symposium on Interactive 3D Graphics, 1990, Seiten 41-50
- [6] Gomes de Sá A., Kress H., Müller St., **Digital Mock-Up in der Einbau- und Montagesimulation**, VDI Berichte, 1997, Seiten 337-356
- [7] Rosen D.W., Bras B., Mistree F., Goel A., **Virtual prototyping for Product Demanufacture and Service using a Virtual Design Studio Approach**, Proceedings of the Computes in Engineering Conference and the Engineering Database Symposium, ASME, 1995, Seiten 951-958
- [8] Bullinger H.-J., Heger R., **Interaktive Montageplanung in einer virtuellen Umgebung**, ZWF Volume 3, Carl Hansen Verlag, München, 1997, Seiten 92-95
- [9] Heger R., Rößler A., **Virtuelle Montageplanung**, Fertigung Nr. 6, Juni 1994, Seiten 30-32
- [10] Terzopoulos D., Witkin A., Kass M., **Constrains on Deformable Models: Recovering 3D Shape and Nonrigid Motion**, Artificial Intelligence Nr. 36, 1988, Seiten 91-123

- [11] Jürgensen M., **Einsatz von Virtual Reality in Montageprozessen**, TU Hamburg Harburg, FB Maschinenbau, Diplomarbeit, 1998
- [12] Qin H., Terzopoulos D., **Dynamic NURBS with Geometric Constrains for Interactive Sculpting**, ACM Transactions on Graphics, Vol. 2, April 1994, Seiten 103-136
- [13] Qin H., Terzopoulos D., **Dynamic Manipulation of Triangular B-Splines**, Solid Modeling 1995, Salt Lake City, Utah USA, Seiten 351-360
- [14] Qin H., Terzopoulos D., **D-NURBS: A Physics-Based Framework for Geometric Design**, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol. 2, No. 1, März 1996, Seiten 85-96
- [15] Coquillart S., **Extended Free-Form Deformation: A Sculpturing Tool for 3D Geometric Modeling**, SIGGRAPH 1990, Vol. 24, No. 4, August 1990, Seiten 187-196
- [16] MacCracken R., Joy K. I., **Free-Form Deformation with Lattices of Arbitrary Topology**, SIGGRAPH 1996, New Orleans, Louisiana, August 1996, Seiten 181-188
- [17] Metaxas D., Terzopoulos D., **Dynamic Deformation of Solid Primitives with Constrains**, SIGGRAPH 1992, ACM Computer Graphics, Vol. 26, No. 2, Juli 1992, Seiten 309-312
- [18] Gascuel M.P., **An Implicit Formulation for Precise Contact Modeling between Flexible Solids**, SIGGRAPH 1993, Anaheim, Kalifornien, August 1993, Seiten 313-320
- [19] Witkin A., Fleischer K., Barr A., **Energy Constraints On Parameterized Models**, Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 4, 1987, Seiten 225-232
- [20] Terzopoulos D., Fleischer K., **Deformable Models**, Visual Computer, Vol. 4, 1988, Seiten 306-331
- [21] Hergenröther E., **Integration deformierbarer Körper in VR**, Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich für Informatik, 1997
- [22] Grzeszczuk R., Terzopoulos D., Hinton G., **NeuroAnimator: Fast Neural Network Emulation and Control of Physics-Based Models**, SIGGRAPH 1998, Orlando, 1998, Seiten 9-22
- [23] Carignan M., Yang Y., Thalmann N. M., **Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes**, SIGGRAPH, Chicago, Juli 1992, Seiten 99-104

- [24] Volino P., Courchesne M., Thalmann N. M., **Versatile and Efficient Techniques for Simulation Cloth and Other Deformable Objects**, SIGGRAPH, Los Angeles, August 1995, Seiten 137-144
- [25] Volino P., Thalmann N. M., **Interactive Cloth Simulation: Problems and Solutions**, im Druck bei John Wiley & Sons
- [26] Volino P., Thalmann N. M., **Developing Simulation Techniques for an Interactive Clothing System**, Proc. VSMM 1997, IEEE Computer Society, 1997, Seiten 109-118
- [27] Baraff D., Witkin A., **Large Steps in Cloth Simulation**, SIGGRAPH, Orlando, 1998, Seiten 43-52
- [28] Baraff D., Witkin A., **Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies**, SIGGRAPH, Chicago, Juli 1992, Seiten 303-308
- [29] Reznik D., Laugier C., **Dynamic Simulation and Virtual Control of a Deformable Fingertip**, Proc. of the 1996 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Mineapolis, April 1996, Seiten 1669-1674
- [30] Joukhadar A., Laugier C., **Dynamic Simulation: Model, Basic algorithms, and optimization**, Algorithms For Robotic Motion and Manipulation, Seiten 419-434
- [31] Joukhadar A., Laugier C., **Towards Realistic Dynamic Simulation: Deformations and Collisions Models**, Proc. of the Workshop Dynamic Simulation: Methods and Applications, Grenoble, September 1997, Seiten 21-31
- [32] Radetzky A., Nürnberger A., Pretschner D.P., **A Neuro-Fuzzy Approach for the Description and Simulation of Elastic Tissues**, Proc. of the European Workshop on Multimedia Technology in Medical Training, Aachen, 1997
- [33] Kuhn C., Kühnapfel U., Deussen O., **Echtzeitsimulation deformierbarer Objekte zur Ausbildungsunterstützung in der Minimal-Invasiven Chirurgie**, Modeling Virtual Worlds - Distributed Graphics, Bad Honnef/Bonn, 1995, Seiten 169-177
- [34] Kuhn C., **Modellbildung und Echtzeitsimulation deformierbarer Objekte zur Entwicklung einer interaktiven Trainingsumgebung für die Minimal-Invasive Chirurgie**, Dissertation, Universität Karlsruhe, Fachbereich für Informatik, 1997

- [35] Räss P., Wetzler R., Schweiker W., **Optimierung der Montageplanung - virtuelle Realität und Montagesimulation**, VDI Berichte Nr. 1435, 1998, Seiten 31-41
- [36] Fröhlich B., Tramberend H., **Physikalische Simulation in einer virtuellen Umgebung**, VDI Berichte Nr. 1435, Seiten 165-168
- [37] Steffan R., Schull U., Kuhlen T., **Integration of Virtual Reality based Assembly Simulation into CAD/CAM environments**, 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'98), Aachen, 1998
- [38] Steffan R., Kuhlen T., Looock A., **A Virtual Workplace including a Multimodal Human Computer Interface for Interactive Assembly Planning**, IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES'98), Wien, 1998
- [39] Symietz M., **Echtzeitbasierte Generierung und Verlegung von Leitungsobjekten in einem digitalen Fahrzeugmodell mit einem Virtual-Reality-System**, Dissertation, Universität Bielefeld, Fachbereich für Informatik, 2000
- [40] Sabo D., **Meßmethoden für flexible Bauteile zum Einsatz in echtzeitfähigen Simulationsmodellen**, Diplomarbeit, FH Frankfurt/M, Fachbereich Maschinenbau, 1998
- [41] Beitz W., Grote K.-H. (Hrg.), **Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau**, Springer-Verlag, 19. Auflage, 1997
- [42] Deutsche Normen, **DIN 53479 Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren - Bestimmung der Dichte**, Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 1976
- [43] Boehm W., Prautzsch H., **Geometric Concepts for Geometric Design**, A K Peters, Wellesley, 1994
- [44] DIN EN ISO, **DIN EN ISO 604, Kunststoffe, Bestimmung von Druckeigenschaften**, Europäisches Komitee für Normung, 1996
- [45] DIN EN ISO, **DIN EN ISO 527 Teil 1, Kunststoffe, Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundsätze**, Europäisches Komitee für Normung, 1996
- [46] Kühnapfel U., Çakmak H. K., **Echtzeit-Elastodynamiksimulation von deformierbaren Bauelementen**, Abschlußbericht zur Machbarkeitsstudie, Karlsruhe, 1998

- [47] E. Brommundt, G. Sachs, **Technische Mechanik - Eine Einführung**, Springer-Lehrbuch, 2. Auflage, Berlin, 1991
- [48] H.R. Schwarz, **Methode der finiten Elemente**, Teubner, Stuttgart, 1991
- [49] K. Knothe, H. Wessels, **Finite Elemente**, Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin, 1992
- [50] T. Belytschko, L. Schwer, **Large Displacement, Transient Analysis of Space Frames**, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977, Seiten 65-84
- [51] H. Schmidtke, P. Groner, **Handbuch der Ergonomie, Band 3**, Hrsg. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Hanser, München, 1989
- [52] Deutsche Normen, **DIN 53504, Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch**, Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 1994
- [53] Klaus-Jürgen Bathe, **Finite-Elemente-Methoden**, Springer Verlag, Berlin, 1990
- [54] W. Hellerich, G. Harsch, S. Haenle, **Werkstoff-Führer Kunststoffe**, Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [55] A. Franck, K. Biederbick, **Kunststoff-Kompendium**, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1984
- [56] Gabriel Zachmann, **Exact and Fast Collision Detection**, Diplomarbeit, TH Darmstadt, Fachbereich für Informatik, 1994
- [57] Anastasios Papadopoulos, **Optimierte Kollisionserkennung für eine Virtual Reality (VR) Umgebung durch automatische und interaktive Verfahren zur Objektunterteilung**, Diplomarbeit, Braunschweig, 1997
- [58] Günter Walter, **Kunststoffe und Elastomere in Kraftfahrzeugen**, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1985
- [59] Astheimer P., Dai F., Felger W. Göbel M., Haase H. Müller St., Ziegler R., **Virtual Design II - an advanced VR system for industrial applications**, Proc. Virtual World 1995, Seiten 337 - 363, Februar 1995
- [60] Peter Zimmermann et al., **Virtual Reality (VR) - Research and Application at Volkswagen**, in "Plastics in Automotive Engineering,, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, Seiten 43 - 68

- [61] Richard S. Wright Jr., Michael Sweet, **OpenGL Superbible**, Waite Group Press, Corte Madera, 1996, Seite 148f
- [62] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, **Computer Graphics - Principles and Practice**, Addison-Wesley, New York, 1990
- [63] Tomas J., **Persönliche Gespräche**, Melbourne, November 1999
- [64] Trippit B., **Persönliche Gespräche**, Melbourne, November 1999
- [65] M.A. Crisfield, **Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol. 1**, John Wiley & Sons, Chichester, 1991
- [66] M.A. Crisfield, **Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol. 2**, John Wiley & Sons, Chichester, 1997
- [67] TNO Automotive, **Madymo Theory Manual, Version 5.3**, 1999
- [68] F. Arnaudeau, F. Perie, G. Winkel Müller, **29th Radioss Seminar, Volume I**, Sophia-Antipolis, 1996
- [69] Finite Element Analysis, **Lusas - Theory Manual, Version 10.0**, Kingston upon Thane, 1990
- [70] Trippit B., **Persönliche Gespräche und schriftliche Korrespondenz**, Melbourne, 1998-2000
- [71] PAM-SCL Code Family, **Theory Manual**, Version 1996, Level 15, PAM System International, Rungis Cedex
- [72] David Eberly, **Quaternion Algebra and Calculus**, www.magic-software.com/Documentation/quat.pdf
- [73] H. Kardestuncer, D.H. Norrie, **Finite Element Handbook**, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987
- [74] J.C. Simo, L. Vu-Quoc, **A three-dimensional finite-strain rot model.**, PartII: Computational aspects, *Comp. Meth in Appl. Mech. & Engng*, 58, Seiten 79-116, 1986
- [75] M.A. Crisfield, **A consistent co-rotational formulation for non-linear three-dimensional beam elements**, *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Engng*, 81, Seiten 131-150, 1990
- [76] M.A. Crisfield, G. Cole, **Co-rotational beam elements for two and three-dimensional non-linear analysis**, *Discretisation Methods in Structural mechanics*, ed. G. Kuhn & H. Mang, Springer, Seiten 115-124, 1989

- [77] G. Cole, **Co-rotational beam elements consistently formulated for geometrically non-linear problems involving large rotations.**, Ph.D. thesis, Kingston Polytechnic, 1990
- [78] E.N. Dvorkin, E. Onate, J. Oliver, **On a non-linear formulation for curved Timoshenko beam elements considering large displacement/rotation increments**, Int. J. for Num. Meth. in Engng., 26, Seiten 1597-1613, 1988
- [79] H. Matthies, J. Steindorf, **Skript zur Vorlesung : Simulation dynamischer Systeme**, Wintersemester 1997/98, Braunschweig, 1997
- [80] R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy, **On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics**, Math. Ann., 100, Seiten 32-74, 1928

Lebenslauf

Name : Ralf Rabätje

Wohnort : Kornblumenstr. 16
74613 Öhringen
Tel.: 07941-602028
E-Mail : kathrin.rabaetje@tesionmail.de

Geburtsdatum : 10.12.1970

Geburtsort : Wolfsburg

Staatsangehörigkeit : deutsch

Ausbildung : 1977-1981 Grundschule Heiligendorf
1981-1983 Erich-Kästner Orientierungsstufe
Wolfsburg
1983-1990 Albert-Schweitzer Gymnasium
Wolfsburg
18.05.1990 Abschluß mit der
allgemeinen Hochschulreife

Prüfungsfächer des Abiturs : Englisch, Mathematik, Geschichte und
Informatik

Universität : 15.10.1990 Beginn des Informatikstudiums an
der Technischen Universität in Braunschweig
05.06.1996 Erreichen des Diploms

Prüfungsfächer der Universität : Robotik, Fuzzy-Systeme, Digitale Bild- und
Sprachverarbeitung undBezier- und
Spline Methoden

Studienarbeit : „Automatische Extraktion von Kalibrier-
punkten aus Grauwertbildern“

Diplomarbeit : „Integration von CAD-Basisfunktionen in einer
Umgebung der Virtuellen Realität“
erstellt bei der Volkswagen AG in Wolfsburg

Berufliche Laufbahn : 1996-1999 Doktorand im VR-Labor der Volkswagen Forschung
01.03.1999-30.09.1999 Fester Mitarbeiter im VR-Labor
01.10.1999-30.09.2000 Mitarbeiter der Fa. ADVEA Pty Ltd in Melbourne, Australien, Forschungsaufgaben auf dem Gebiet der Geometrieerstellung für automatische Strukturoptimierung von Bauteilen
01.10.2000 - 31.12.2001 Mitarbeiter der Audi AG in Neckarsulm, Planung und Betreuung eines VR Centers in der Produktionsplanung
ab 01.01.2002 Mitarbeiter im VR-Labor der Volkswagen Forschung, Forschungsaufgaben auf dem Gebiet geometrischer Verfahren für die Anwendung in der Qualitätssicherung

Bisherige Veröffentlichungen : Juni 1998 Computer Graphics International '98 in Hannover
„Integration of basic CAD functions in a virtual reality environment“
Juni 1998 IWB München
„Virtuelle Montageuntersuchungen“
Sep. 1998 VDI Konferenz in Würzburg
„Neue Methoden der Montagesimulation durch den Einsatz der virtuellen Realität“

Betreute Diplomarbeiten : „Manipulation von getrimmten und ungetrimmten NURBS-Kurven und Flächen in einer VR-Umgebung“
„Integration eines Menschmodells in einer virtuellen Umgebung“
„Optimierte Kollisionsverfahren für eine virtuelle Umgebung durch den Einsatz von automatischen und interaktiven Objektunterteilungen“
„Eine Studie über den Nutzen von VR Montagesimulationen“
„Meßverfahren für flexible Bauteile für den Einsatz in einer Echtzeitumgebung“