

Diplomarbeit

„Cloth Simulation“

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Dipl.-Ing. (FH) für Telekommunikation und Medien
am Fachhochschul-Diplomstudiengang Telekommunikation und Medien
St. Pölten

unter der Leitung von
Mag. Franz Schubert

Zweitbetreuer:
Dr. Alois Frotschnig

ausgeführt von

Günther Stadler
tm0110038109

St. Pölten, am 6. Juni 2005

Unterschrift:

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass

- ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit überein.

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

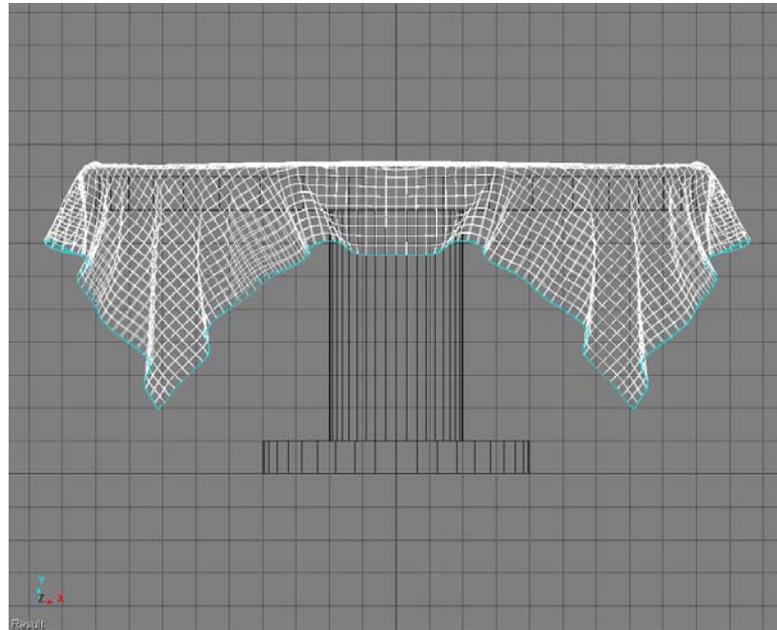
Diese Arbeit über das Gebiet der Stoffsimulation in 3D-Software-Modulen befasst sich im Wesentlichen mit zwei Fragestellungen: Im ersten Abschnitt wird durch eine Inhaltsanalyse die Frage nach den verschiedenen möglichen Herangehensweisen an das Problem beantwortet: Es gab tatsächlich seit den Anfängen der Simulation textiler Gewebe in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts verschiedenste Ansätze, beginnend mit einfachen mathematischen oder geometrischen Modellen, über Elastizitätsmodelle bis hin zu Partikelmodellen. Diese ganze Reihe von Möglichkeiten und Denkansätzen, unterscheiden sich auch nicht zuletzt bezüglich ihrer Komplexität sehr stark voneinander. Da das Modell bestehend aus Partikeln und Federn einen sehr hohen Stellenwert besitzt, wird es in einem eigenen Kapitel näher beschrieben.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit wird ein Effizienz-Vergleich zwischen den Simulationsmodulen von Cinema4D 9.0, SoftImage|XSI 4.0 (enthält zwei Komponenten) sowie Maya 6.0 anhand einer einfachen Szene durchgeführt und die für einen Simulationsdurchlauf benötigten Zeiten bei verschiedenen Punktzahlen des Stoffobjektes verglichen: Alle 4 Komponenten verwenden ein Modell aus Partikeln und Federn - trotzdem liegen die Ergebnisse sehr weit auseinander: „Syflex Cloth“ aus SoftImage kann die anderen Software-Lösungen leicht hinter sich lassen.

Abstract

This piece of work on the field of simulating cloth in 3d-software-modules tries to give answer to two questions: The first part consists of a survey of the range of possibilities for addressing the problem of cloth simulation: Quite many different approaches have been developed since the beginning of cloth simulation in the mid-30ies of the 20th century, all of them varying in complexity and the way they try to do the task. We find mathematical and geometrical approaches, models that apply the theory of elasticity, as well as particle models using mass points and springs that connect them. The particle model is being described in greater detail.

The second part of this document compares the 4 simulation modules of Cinema4D 9.0, SoftImage|XSI (two components), and Maya 6.0 to each other regarding the time they need to compute a simple set-up of a piece of cloth falling down on a table. We see that although they all use the same theoretical approach - particles being joint by a net of springs - the simulation results are surprisingly wide spread. SoftImage's Cyflex Cloth easily outpaces the other three modules and seems to be the best module within this experiment.



1	Erkenntnisgegenstand	8
1.1	Gegenstandsbenennung	8
2	Problembenennung	9
2.1	Stoffsimulation als zeitkritisches Element	9
2.2	Theoretische Reflexion	9
3	Abschnitt 1: Theoretische Möglichkeiten	10
3.1	Forschungsleitende Fragestellung	10
	3.1.1 Forschungsleitende Fragen	10
	3.1.2 Hypothesen	10
3.2	Forschungsstrategie	10
	3.2.1 Methodenbenennung	10
3.3	Auswertung der Daten	11
	3.3.1 Theoretische Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation	11
	3.3.2 Das Partikelmodell gewebter Stoffe - eine genauere Betrachtung	21
3.4	Interpretation der Daten	31
	3.4.1 Überprüfen der zu Beginn aufgestellten Hypothesen	31
	3.4.2 Beantwortung der Forschungsfragen	32
4	Abschnitt 2: Effizienztest	34
4.1	Forschungsleitende Fragestellung	34

4.1.1	Forschungsleitende Fragen	34
4.1.2	Hypothesen	34
4.1.3	Operationalisierung von Variablen	34
4.2	Forschungsstrategie	37
4.2.1	Methodenbenennung	37
4.2.2	Arbeitsablauf des Experimentes	37
4.3	Auswertung der Daten	46
4.3.1	Verwendete Techniken	46
4.3.2	Simulationsergebnisse	48
4.4	Interpretation der Daten	55
4.4.1	Überprüfen der Hypothesen	55
4.4.2	Beantwortung der Forschungsfragen	55
5	Glossar	58
6.	Abbildungsverzeichnis	62
7.	Formelverzeichnis	65
8.	Quellenverzeichnis	67
9.	Index	68

1 Erkenntnisgegenstand

1.1 Gegenstandsbenennung

Seit der Mitte der 30er-Jahre des 20. Jahrhunderts ist die Simulation von Stoffen, Bekleidung und Ähnlichem in Hinsicht auf die steigende Verwendung in Animationsfilmen zu einem fixen Bestandteil vieler 3D-Programme geworden. Viele der größeren Software-Lösungen im 3D-Bereich stellen dem Anwender inzwischen Komponenten zum Erstellen und Berechnen derartiger Vorgänge in ihrem Funktionsumfang zur Verfügung, bei manchen Lösungen (z. B. SoftImage|XSI seit der Version 4.0) sind sogar gleich mehrere von einander unabhängige Module inkludiert.

Es soll nun in dieser Diplomarbeit in einem ersten Abschnitt zunächst einmal die Vielfalt der theoretischen Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation erörtert, die jeweiligen Stärken oder Schwächen analysiert sowie eine sinnvolle Gliederung versucht werden.

In einem zweiten Schritt sollen einige Software-Lösungen einander in Hinblick auf die Effizienz bei der Berechnung derartiger Simulationen gegenübergestellt werden.

Für mich selbst ist das Thema zum einen deshalb interessant, weil mich das Fachgebiet der 3D-Animation prinzipiell sehr interessiert, zum anderen hatte sich im Laufe des Studiums ein konkreter Anlassfall ergeben, der mir zu denken gab: Während der Arbeit an einem Gruppenprojekt spielten wir mit dem Gedanken, dem Hauptcharakter einen Umhang zu geben, damit er als Zentralfigur besser herausstechen würde. Nach den ersten missglückten Versuchen entschlossen wir uns kurzerhand, die Idee bleiben zu lassen, was bei unserem Projekt auch kein Problem darstellte. Bei einer Auftragsarbeit einer noch recht jungen Agentur, die sich vielleicht zum ersten Mal an das Gebiet heranwagt, kann hier ein wesentliches Konfliktpotential entstehen, mit dem man vielleicht nicht rechnet.

2 Problembenennung

2.1 Stoffsimulation als zeitkritisches Element

In großen 3D-Produktionen (angefangen von Kurzfilmen, über die Verwendung von einzelnen am Computer generierten Szenen für „normale“ Filme, bis hin zu durchgehend animierten Filmen in Kinolänge) ist der Einsatz simulierter Stoffe nicht mehr wegzudenken. Auch kleinere Animationssequenzen wie etwa Werbespots oder Firmenpräsentationen setzen immer häufiger auf die Verwendung computergenerierter Sequenzen, in denen Charaktere mit virtuellen Textilien eingekleidet werden müssen.

Die hierbei für die Durchführung der Simulation nötige Zeit kann sehr schnell zu einem kritischen Faktor werden, wenn man sich nicht dessen bewusst ist, dass derartige Rechenvorgänge schon bei nach außen hin eher einfach wirkenden Szenarien unter Umständen sehr lange dauern können. Gerade bei kleineren Aufträgen, die sehr häufig sowohl durch eine sehr straffe Produktions-Timeline als auch durch ein oft genau begrenztes Budget gekennzeichnet sind, kann eine Fehleinschätzung in diesem Bereich schwerwiegende Folgen nach sich ziehen, was das Einhalten von vorgegebenen Zeitplänen und somit auch vorhandenen Geldmitteln betrifft.

2.2 Theoretische Reflexion

Die Wahl der richtigen Softwarelösung kann hier möglicherweise schon den Schritt in die richtige Richtung bedeuten. Es gilt herauszufinden, in wie weit sich einige der momentan angebotenen Lösungen hinsichtlich ihrer Effizienz bei der Berechnung von Simulationen von nicht all zu hoher Komplexität unterscheiden, um daraus Anhaltspunkte oder Hilfen bei der Entscheidungsfindung gewinnen zu können.

3 Abschnitt 1: Theoretische Möglichkeiten

3.1 Forschungsleitende Fragestellung

3.1.1 Forschungsleitende Fragen

Welche theoretischen Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation gibt bzw. gab es bisher überhaupt? Worin unterscheiden sie sich, was haben sie gemeinsam?

Welche Voraussage lässt sich aus der Beantwortung der Frage 1 für den 2. Abschnitt der Diplomarbeit (Effizienzvergleich einiger Software-Lösungen) treffen?

3.1.2 Hypothesen

Es gibt mehrere verschiedene Ansätze, die sich sowohl in ihrer grundsätzlichen Herangehensweise als auch in ihrer Komplexität unterscheiden. Es wird davon ausgegangen, dass es einen Unterschied macht, ob jemand Stoffe simulieren will, um tatsächliche, reale Stoffe nachzubilden, oder um Computerbilder z. B. für Filmsequenzen zu generieren.

Es hat sich im Laufe der Zeit ein einziger Ansatz als der günstigste für den Bereich der Computeranimation herausgestellt, der in den meisten Softwarepaketen (vermutlich mit geringen Abweichungen) verwendet wird. Er bietet den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit der Simulationsergebnisse und dafür aufzuwendender Zeit oder Rechenkraft.

3.2 Forschungsstrategie

3.2.1 Methodenbenennung

Als Forschungsstrategie zur Beantwortung der forschungsleitenden Fragen soll eine Inhaltsanalyse dienen. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Simulation von Stoff sollen einander gegenübergestellt werden.

3.3 Auswertung der Daten

3.3.1 Theoretische Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation

In den 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts begann die Forschung auf dem Gebiet der Simulation von Stoffen. Der Fortschritt im Textilwesen hatte es mit sich gebracht, dass die Erforschung von Stoffen und Stoffeigenschaften zu einem sehr wesentlichen Forschungsgebiet geworden war.

Die Ingenieure, die (hauptsächlich bisher gewobene) Textilien als reine Werkstoffe sahen, versuchten, Modelle zu finden, die das leider sehr nichtlineare Verhalten von Materialeigenschaften erklären und möglichst genau vorhersagen sollten.

Auch die mikromechanischen Verhältnisse von Stoffen auf der Ebene von Fadenkreuzungen und -berührungen war und ist hier noch immer sehr von Interesse.¹

Erst in den 80er-Jahren wurde die Stoffsimulation auch für die Computer-Grafik-Gemeinschaft interessant.

Im Unterschied zu den bis zu diesem Zeitpunkt erfolgten Forschungen wird versucht, aufbauend auf die bisherigen Ergebnisse Modelle zu schaffen, die zwar nicht unbedingt das wirklich exakte Verhalten realer Stoffe nachbilden, aber dafür mehr darauf abzielen, die besten visuellen Ergebnisse zu liefern und dabei gleichzeitig auch noch die benötigte Computerrechenzeit möglichst gering zu halten².

3.3.1.1 Beiträge aus dem Bereich der Textil-Erzeuger

3.3.1.1.1 Das Peirce-Modell

Eines der ersten Modelle, das sich auf Mikro-Ebene mit Stoffen auseinandersetzt, war das „Peirce-Modell“, entstanden in der Mitte der 30er Jahre und benannt nach

¹) vgl. House/Breen, 2000, S.19

²) vgl. House/Breen, 2000, S.19, 20

seinem Erfinder, F. T. Peirce³.

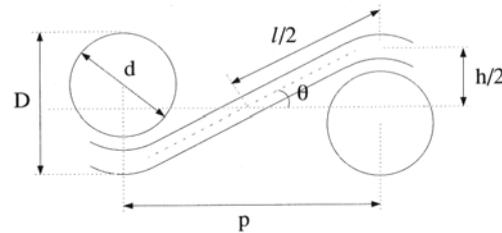


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Peirce-Modells

Es befasste sich mit den Verhältnissen bei einer Fadenkreuzung. Dabei stellte er - unter Annahme einiger Vereinfachungen - mathematisch-geometrische Zusammenhänge zwischen einzelnen Größen wie der Dicke der Fäden, dem Winkel, unter dem die Fäden einander umweben, oder der Entfernung der parallelen Fäden auf. Die Vereinfachungen bestanden dabei z. B. daraus, dass der Querschnitt der Fäden als kreisförmig angenommen oder dass deren Biege­widerstand völlig vernachlässigt wurde.

Dadurch, dass es ein rein geometrisches Modell war, hielt sich seine Anwendbarkeit natürlich in sehr engen Grenzen: Das Abschätzen von theoretisch möglichen Fadendichten bei gegebenen Fadenstärken oder das Überprüfen der Möglichkeit gewünschter Faden­zahlen war das Haupteinsatzgebiet dieses Modells, das aufgrund der schweren mathematischen Lösbarkeit der nicht-linearen Formeln eher selten angewandt wurde.

Um einen Ansatz für Vergleiche zwischen errechneten Ergebnissen und realen Verhältnissen zu haben, entwickelten Hearle, Grossberg und Backer um 1969 eine eigene Vorrichtung, das „Drapemeter“⁴:

³⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.20f

⁴⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.23f

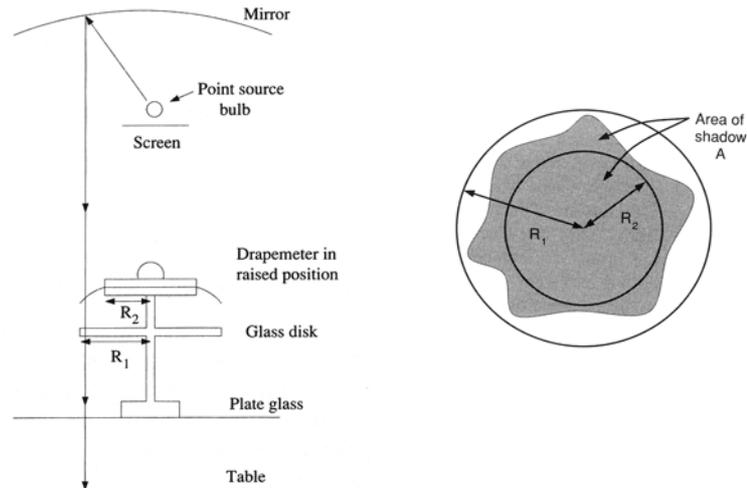


Abbildung 3: Querschnitt durch das Drapemeter (links);
Ergebnisgraph mit Schattenwurf des Stoffes (rechts)

Es besteht aus zwei kreisrunden Platten mit einem Durchmesser von je 18 cm, zwischen die ein ebenfalls rundes Stück Stoff mit einem Durchmesser von 30 cm eingespannt wurde. Über ein Spiegelsystem wird ein Lichtstrahl so umgeleitet, dass er genau senkrecht von oben auf das sich nach unten faltende Stoffstück fällt, welches auf einer etwas tiefer liegenden Platte einen Schatten wirft. Aus den Versuchen mit diesem Gerät konnten dabei mehrere Informationen gezogen werden: Zum einen die Anzahl an entstandenen Falten und Wellen, sowie ein möglicherweise erkennbares Verhältnis zwischen großen und kleinen Falten. Zum anderen eine Größe namens „Drape Coefficient D “, die den Prozentsatz der abgeschatteten Fläche zwischen äußerem Kreis und den haltenden Platten angibt:

$$D = \frac{A - \pi R_2^2}{\pi R_1^2 - \pi R_2^2} \cdot 100\% \quad \text{Formel 1}$$

A stellt hierbei die gesamte abgeschattete Fläche dar.

3.3.1.1.2 Modelle basierend auf der Energie der Formveränderung

Es scheint so, als wären Modelle, die auf Energien zur Veränderung der Form

basieren, schon allein aus dem Grund entstanden, dass frühere Modelle sehr komplex und unhandlich waren.

Nachdem klar wurde, dass genauere Varianten des Peirce-Modells, die auch wirkende Kräfte beinhalteten, zu unpraktisch waren, präsentierten in den späten 70ern De Jong und Postle eine Theorie über das elastische Verhalten von Stoffen, die auf der Darstellung von sich verformenden Fäden beruhte. Unter den Annahmen, dass Fäden sich nach einfachen elastischen Gesichtspunkten verhalten würden und dass jeder Stoff nach einem Zustand strebt, in dem ein Minimum an formverändernden Kräften wirkt, schufen sie ein Modell, das im wesentlichen aus vier Komponenten besteht:

- Biegung (Bending)
- Verdrehung (Torsion)
- Dehnungskräfte in der Stoffebene (Lateral Tension)
- Dehnungskräfte aus der Stoffebene heraus (Longitudinal Tension)

Aus diesen wird eine Einheitszelle geschaffen, die neben den angegebenen Kräften auch noch zusätzliche Randbedingungen (Constraints) und Potentiale (z. B. Schwerkraft) enthalten kann⁵.

Bei der Vorhersage von Ausdehnungen unter Belastung oder der Biegesteifigkeit konnten hier durchaus angemessene Ergebnisse im Vergleich zu realen Messungen erzielt werden.

Nachdem bis zu dem Zeitpunkt nur Modelle von sehr kleinen Stoffausschnitten erstellt worden waren, stellten Amirbayat und Hearle in den späten 80er-Jahren ein Modell vor, das auf höherer Ebene die Deformationen eines dünnen, biegsamen Stoffes darstellte. Ihr Modell inkludierte (neben einigen Einschränkungen) fünf Komponenten:

- Energie auf Grund von externen Normal- oder Reibungskräften
- Biegeenergie, integriert über Zonen von einfacher und doppelter

⁵) vgl. House/Breen, 2000, S.26f

Krümmung

- Energie, die im Stoff aufgrund seiner Verkrümmung gespeichert ist
- Potenzielle Energie (Gravitation)
- Zusätzliche Energie hervorgerufen durch Aerodynamik, Elektrostatik oder andere Kräfte

Angewandt wurde dieses Modell auf einen so genannten „Krähenfuß“ - ein Stoffausschnitt, der drei Falten aufweist, die von einem zentralen Punkt ausgehen. Diesem System, das ihnen einzigartig für das Medium „Textiles Gewebe“ zu sein schien, war in den Augen von Amirbayat und Hearle selbst ein grundlegendes Element für die weitere Erforschung von Stoffen. Es teilt sich dabei in zwei Gebiete: Im Zentrum befindet sich eine Zone doppelter Krümmung, außen hingegen drei Zonen einfacher Krümmung. Ihre Messungen bestätigten das zu Grunde liegende Prinzip der Methode⁶.

1985 untersuchte Ly das erste wirkliche 3D-Modell von sich verformendem Stoff. Um die Aufgabe etwas einzugrenzen, stellte er spezielle Bedingungen auf, deren wichtigste die war, dass die Stoffränder in der Ausgangsebene bleiben müssen, während sich der Stoff dazwischen aus dieser Ebene heraus auftürmen durfte. Obwohl die erhaltenen Ergebnisse zwar mit realen Versuchen weitgehend übereinstimmten, war durch die Eingrenzungen nur eine sehr geringe Anwendbarkeit gegeben, da Stoffbewegungen, bei der die Ränder in einer vorgegebenen, fixierten Ebene bleiben, in der Realität kaum vorkommen⁷.

1991 stellten die Herren Postle und Norton ein Modell auf, um mittels differentieller Geometrie komplexe dreidimensionale Faltendeformationen und Hüllen zu berechnen. Ihr Modell besteht aus zweidimensionalem Stoff, der in dreidimensionalem Kartesischen Raum eingebettet ist. Dabei dienen ihnen vier *Tensorfelder* zur Darstellung der stoffinternen Energie aufgrund Dehnung, der

⁶) vgl. House/Breen, 2000, S.28

⁷) vgl. House/Breen, 2000, S.28

Krümmung normal zur Oberfläche, sowie der Biegung und Verdrehung der Fäden innerhalb des Stoffes. Daraus berechneten sie die Deformationsenergie an jedem Punkte des Stoffes sowie alle Interaktionen mit der Umgebung⁸.

3.3.1.1.3 Modelle basierend auf Elastizität

Eines der frühesten Modelle in dieser Richtung stammt von Kilby und wurde im Jahr 1963 veröffentlicht. Er entwickelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für ein einfaches ebenes Gitter, wobei er einfache, auf den Regeln der Elastizität basierte Analysen verwendete. Seine grundlegende Annahme: Stoff kann durch ein einfaches, geradliniges Gitter modelliert werden, bei dem die Einzelteile an ihren Berührungspunkten beweglich zusammengehängt sind, sich aber nicht über einander bewegen können. Für sehr kleine Kräfte zeigte er, dass das Verhalten dem von *anisotropischen*, elastischen Platten entspricht, die keinen *Poisson-Effekt* aufweisen. Auch das Verhalten des *Young's Modulus* als Funktion des Winkels über der Oberfläche eines gewobenen Stoffes konnte durch das Modell dargestellt werden. Obwohl das theoretische Modell auch experimentell bestätigt wurde, musste er eingestehen, dass das mechanische Verhalten von Stoff weitgehend nicht-linear und hysteretisch ist. Nur für sehr kleine Kräfte und Deformationen lässt es sich durch lineare und elastische Beziehungen approximieren⁹.

Ein weiteres Modell, diesmal von Lloyd, Shanahan und Konopasek, beschäftigte sich mit einem sehr speziellen Problem, nämlich der Analyse des Verhaltens, wie sich Stoff unter seinem eigenen Gewicht faltet. Durch die vereinfachende Annahme, dass der Stoff von einem horizontal liegenden Zylinder abgerollt wird, wurde das 3D-Problem auf ein zweidimensionales Problem reduziert, bei dem sich eine Kurve als Querschnitt des sich faltenden Stoffes in einer Ebene biegt.

⁸⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.29

⁹⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.29

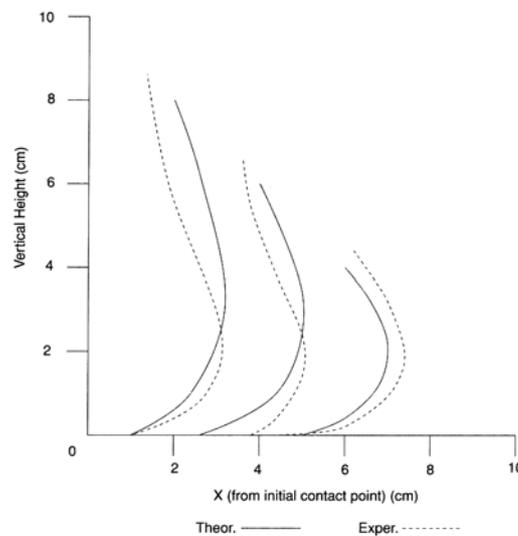


Abbildung 4 - Querschnitt: Stoff faltet sich unter seinem eigenen Gewicht

Genauere Analysen des Modells zeigten, dass der erreichte Deformationszustand jeweils nur von der Biegelänge der Kurve sowie von dem Abstand der Rolle zum Boden abhängt. Erst viel später (1990) wurde durch Experimente nachgewiesen, dass das Modell nur bis zu einer maximalen Stofflänge von 10 cm tatsächlich brauchbar war¹⁰.

Collier, Collier, O'Toole und Sargand stellten mit der Finite-Elemente-Methode einen gänzlich anderen Zugang dar, um den Einhüll-Vorgang von Stoff zu beschreiben. Das Problem charakterisierten sie als nichtlinearen Zusammenhang zwischen kleinen Kräften und großen Verformungen. Sie beschrieben in ihrem Modell eine viereckige Komponente bestehend aus vier Knoten, die mathematisch eine Kombination aus Membran- und Platten-Biegungs-Elementen darstellt, wobei jeder Knoten fünf *Freiheitsgrade* (3x Verschieben, 2x Drehen) hat. Durch Anwendung dieser Komponente konnte das Drapemeter aus früheren Versuchen nun simuliert werden, wobei die Abweichungen von den real gefundenen Werten nicht einmal zwei Prozentpunkte betrogen¹¹.

¹⁰⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.30f

¹¹⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.32-34

3.3.1.2 Simulationsmethoden aus dem Bereich der Computer-Grafik

3.3.1.2.1 Geometrische Zugänge

Weil gibt 1986 einen geometrischen Zugang an, der die Falten eines Stückes rechteckigen Stoffes berechnet, dessen Eckpunkte im Raum fixiert sind. Der Stoff wird dabei durch ein zweidimensionales Gitter dargestellt. Als erster Schritt erfolgt ein *rekursives* Verbinden der fixierten Punkte durch Kettenkurven der Form

$$y = a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad \text{Formel 2}$$

als erste Annäherung. Wenn sich dabei zwei Kurven kreuzen, jedoch diese Kreuzung nicht exakt im selben Punkt sondern übereinander stattfindet, so wird die höhere der beiden genommen. Dabei werden solange neue Fixpunkte und Kettenkurven eingefügt, bis alle Punkte des Gitters in der *konvexen* Hülle der fixierten Punkte liegen¹². Der zweite Schritt besteht darin, die Entfernungsbeschränkungen zwischen Gitterpunkten zu erzwingen, sodass die Falten wieder stoffähnlicher werden und auch die Form des Gitters erhalten bleibt. Die Steifigkeit des Stoffes wird dabei durch eine Funktion zweiter Ordnung bezüglich der Entfernungsbeschränkung in das Modell eingebracht¹³.

Rudomin brachte eine Mischung aus geometrischem und physikalischem Ansatz ein, wobei er sich einer rein geometrischen Methode bediente, um vorerst einmal eine sehr grobe Form des Stoffes, der über einige Fixpunkte geworfen ist, zu bekommen. Dies ergab eine Polygonstruktur, die er als „Cloth Hull“ bezeichnete und von der er meinte, dass sie ein guter Ansatz wäre, um als Startkonfiguration für fortführende physikalische Methoden zu dienen¹⁴.

¹²⁾ vgl. Babik, 1999

¹³⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.35f

¹⁴⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.36

3.3.1.2.2 Physikbasierte Herangehensweisen

Massen und Federn

1988 erforschten Haumann und Parent, wie sich sehr allgemeine Erscheinungen aus einfachen lokalen Interaktionsregeln ableiten lassen würden. Dazu entwickelten sie ein sehr einfaches Modell mit den Komponenten

- Punktmassen
- äußere Kräfte (Gravitation etc.)
- Federn¹⁵ zwischen zwei Punktmassen
- Scharniergelenken zwischen zwei von vier Punktmassen aufgespannten Dreiecken
- Luftwiderstand und Wind.

Ein entscheidender Vorteil war, dass jegliche bestehende Polygon-Modelle aus Dreiecken sehr leicht für eine derartige Stoff-Simulation umgewandelt werden können: Punkte werden zu Punktmassen, Kanten zu Federn, an einander stoßende Dreiecke zu Scharniergelenken. Haumann und Parent räumten jedoch ein, dass dieses Modell weniger für Stoff im Speziellen als eher für eine sehr allgemeine verformbare Oberfläche geeignet wäre, da keinerlei stoffspezifische Faktoren darin eine Rolle spielen¹⁶.

In einer Erweiterung durch Thingvold und Cohen wurde das Modell statt auf Punkte von Polygon-Modellen auf Kontrollpunkte von *B-Splines* angewandt. Zusätzlich fügten sie einen Algorithmus hinzu, um bei hohen Krümmungen die Flächen zwischen den betrachteten Punktmassen unterteilen und damit die Krümmungen genauer berechnen zu können¹⁷.

¹⁵⁾ Der Begriff „Feder“ in diesem Zusammenhang meint jeweils jenes elastische Element, welches durch die Formel $F(x) = -k \cdot x$ beschrieben wird und die Kraft beschreibt, die der Auslenkung aus der Ruhelage entgegenwirkt.

¹⁶⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.38

¹⁷⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.39

1995 brachte eine Abwandlung das allgemeine Modell dem tatsächlich Verwendungszweck, nämlich der Simulation von Stoff, näher: Mehrere Federn wurden dazu statt in einem dreieckigen in einem rechteckigem Gitter angeordnet, und zwar

- entlang der Kanten der Rechtecke (zur Darstellung der Dehnungskräfte),
- entlang der Diagonalen innerhalb der Rechtecke (zur Darstellung der Verschiebekräfte),
- entlang der Kante - jedoch zum übernächsten Knoten (zur Darstellung der Kräfte bezüglich Krümmung aus der Stoffebene heraus).

Im ersten Schritt wurde dazu die Dynamik des Systems berechnet und im zweiten Schritt die Positionen jener Punkte, die Constraints verletzt haben, korrigiert¹⁸.

Partikelmodelle

Durch das Modell der Massen und Federn war die Annahme, Stoff sei nicht durch eine kontinuierliche Oberfläche, sondern durch in Kontakt stehende mechanische Einzelteile besser zu modellieren, schon sehr bestätigt. Laut ihr sollten sich die Eigenschaften des gesamten Stoffes durch Aktivitäten und Vorgänge im Mikrobereich zwischen einzelnen Fäden ergeben.

Aus dieser Denkweise leiteten Breen und House 1992 ihr Modell ab, das die mikromechanische Struktur von Stoff durch ein interagierendes Partikelsystem darstellt. Fadenkreuzungen werden dabei durch einzelne Partikel repräsentiert, jegliche Interaktion zwischen ihnen und der Umgebung als mechanische Verbindungen, welche durch Energie-Funktionen Eingang in das Modell finden. Durch Berechnung der Gradienten-Abnahme wird die endgültige Gleichgewichtslage der Partikel gesucht; ein stochastisches Element stellt sicher, dass keine exakt symmetrischen Stellen entstehen und Faltenbildung forciert wird. 1994 wurde eine Anpassung des Modells durchgeführt, so dass nun verschiedene

¹⁸⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.39

Materialien akkurat nachgebildet werden konnten. Das Modell produzierte jedoch weiterhin nur die Endkonfiguration des Partikelsystems, ließ aber keine Simulation von Stoffbewegung zu; zudem war es langsam und ineffizient.

Erst eine sehr starke Umformulierung des Modells durch Eberhardt, Weber und Strasser im Jahr 1996, die als Ergebnis ein einfaches System aus Differentialgleichungen hatte, aus welchen die Kräfteverhältnisse berechnet werden konnten, ließ Bewegung des Stoffes an sich zu. Erst mit diesem Modell konnten Bewegungssimulationen wie zum Beispiel von Stoff, der auf eine Tischplatte, eine Kugel und sogar eine Burg fällt, erstellt werden - und zudem in erheblich kürzerer Rechenzeit als alle bisherigen Modelle¹⁹.

Das Modell scheint momentan sehr verbreitet zu sein (siehe dazu auch Abschnitt 2 dieser Arbeit): „At present the most efficient and commonly used approach is particle-based cloth simulation.“²⁰

3.3.2 Das Partikelmodell gewebter Stoffe - eine genauere Betrachtung

Da, wie im zweiten Abschnitt dieser Arbeit auch zu sehen sein wird, die Partikelrepräsentation von Stoff eine große Rolle spielt, soll hier die Entstehung des Modells näher beschrieben werden. Die Autoren House und Breen widmen dieser Herangehensweise in ihrem Buch „Cloth Modeling and Animation“ ein ganzes Kapitel. Die Ergebnisse werden hier aufgrund der Wichtigkeit des Modells zusammengefasst; für eine Beschreibung der konkreten computertechnischen Umsetzung oder der tiefergehenden physikalischen Formeln und Gleichungen sei auf das Buch verwiesen.

Als Grundannahme dieses Modells dienen die bisherigen Erfahrungen, dass das

¹⁹⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.45f

²⁰⁾ Oshita/Makinouchi, 2001, S.1

Verhalten von Stoff eher durch mechanische Vorgänge und Interaktionen kleiner Elemente bestimmt ist und daher auch als solches zu simulieren wäre²¹.

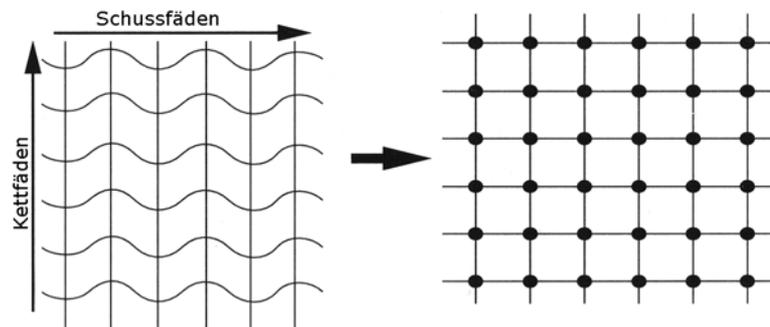


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Stoffstückes (links); dem entsprechendes Partikel-Modell (rechts)

In der schematischen Ansicht links sieht man senkrecht die *Kettfäden*, waagrecht die gewobenen *Schussfäden*. Bei Stoffbewegung kollidieren die Fäden jeweils miteinander, sie können sich übereinander biegen oder sich sogar zueinander verschieben²².

Bei der Partikel-Repräsentation (rechts) wird jede Fadenkreuzung durch ein Partikel repräsentiert, wobei die Annahme zugrunde gelegt wird, dass die vorhandene Verwebung so eng und die Belastung des Stoffes so gering ist, dass sich die Fäden zueinander (so gut wie) nicht bewegen können. Diese Annahme trifft sowohl auf die meisten Stoffe zu, aus denen Kleidung gemacht wird, als auch auf die Situationen, denen Stoff unter diesen Bedingungen ausgesetzt wird. Selbst bei Stoffen, die sehr viele Falten werfen, sind die tatsächlich entstehenden Belastungen in den einzelnen Abschnitten sehr klein²³.

Als mögliche Interaktionen zwischen den Partikeln können in diesem Modell Stauchung und Dehnung, Biegung aus der Stoffebene heraus, Verschiebung innerhalb des Stoffes, sowie Verdrehung auftreten.

²¹⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.55

²²⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.56

²³⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.56f

Da das Umsetzen von Fadenkreuzungen 1:1 auf Partikel eine viel zu hohe Anzahl Partikel ergeben würde, lässt man ein Partikel das Zentrum eines Ausschnittes des Fadengitters repräsentieren. Die Masse des Partikels wird einfach der Masse dieser Fläche gleich gesetzt; die auftretende Verformungsenergie wird als Summe der Energien dieser Fläche angesehen²⁴.

3.3.2.1 Energie pro Partikel

Die gesamte Verformungsenergie U_i , die an der Position eines Partikels auftritt, kann als eine Summe von Einzelenergien dargestellt werden²⁵:

$$U_i = U_{\text{repel}} + U_{\text{stretch}} + U_{\text{bend}} + U_{\text{trellis}} \quad \text{Formel 3}$$

- U_{repel} : Eine künstliche Abstoßungsenergie, die alle anderen Partikel einen gewissen Mindestabstand entfernt hält. Verhindert Selbstdurchdringung des Stoffes und bietet auch eine gewisse Kollisionskontrolle.
- U_{stretch} : Energie der Verformung innerhalb der Stoffebene zwischen einem Partikel und seinen vier Nachbarn.
- U_{bend} : Energie durch Stoffkrümmung aus der Ebene heraus.
- U_{trellis} : S-förmige Verbiegung entlang einer Fadenkreuzung (wird, von außen betrachtet, als Verschiebungseffekt erkannt).

Während die ersten beiden jeweils ausschließlich rein vom Abstand zwischen einzelnen Partikeln abhängen, beruhen die letzten beiden auf Änderungen der Winkelverhältnisse zwischen angrenzenden Segmenten.

Um das Modell fürs erste einmal überhaupt grundsätzlich verifizieren und testen zu können, wird nach Funktionen gesucht, die in etwa das vermutete Verhalten repräsentieren sollen²⁶.

²⁴⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.57

²⁵⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.58f

²⁶⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.60

Die aus Dehnung und Abstoßung kombinierte Energiefunktion $R + S$ soll eine sehr starre Kurve bilden, um benachbarte Partikel sehr eng an die Anfangsdistanz s zu binden. (Es wird wiederum davon ausgegangen, dass sich der betrachtete Stoff, solange nur sein eigenes Gewicht auf ihn wirkt, nicht signifikant ausdehnt.) Hierzu werden folgende beiden Funktionen angesetzt, wobei C_0 ein skalierbarer Parameter ist:

$$R(r_{ij}) = \begin{cases} C_0 \left[(\sigma - r_{ij})^5 / r_{ij} \right] & r_{ij} \leq \sigma \\ 0 & r_{ij} > \sigma \end{cases} \quad \text{Formel 4}$$

$$S(r_{ij}) = \begin{cases} 0 & r_{ij} \leq \sigma \\ C_0 \left[((r_{ij} - \sigma) / \sigma)^5 \right] & r_{ij} > \sigma \end{cases} \quad \text{Formel 5}$$

Die Energiefunktion für die Biegeenergie bei Biegungen aus der Stoffebene heraus wird so gewählt, dass sie bei flachem Stoff minimal ist, während sie bei komplett zurückgefaltetem Stoff beliebig groß wird:

$$B(\theta_{ij}) = C_1 \tan(\pi - \theta_{ij}) / 2 \quad \text{Formel 6}$$

Ähnlich verhält sich die Energie bei Verschiebungen innerhalb der Ebene: Sie soll minimal sein, solange die kreuzenden Fäden normal aufeinander stehen, und beliebig groß, sobald die Fäden parallel werden:

$$T(\phi_{ij}) = C_2 \tan(\phi_{ij}) \quad \text{Formel 7}$$

3.3.2.2 Aufbau der Simulation

Die Simulation zum Erhalt der Endkonfiguration aller Partikel ist nun ein dreistufiger Prozess²⁷:

- Als erster Schritt wird die Dynamik für jedes Partikel so berechnet, als würde es in einem viskosen Medium frei fallen. Dabei wird auch das

²⁷⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.60

Auftreten von Kollisionen innerhalb des Stoffes sowie zwischen Partikeln und der Umwelt beachtet.

- Danach erfolgt die Energieminimierung des gesamten Systems, um Constraints zwischen den Partikeln einzuhalten. Zufallselemente verhindern lokale Minima in den Energiefunktionen (was sich als vollkommen glatte Stoffbereiche bemerkbar machen würde) und helfen, einen natürlicher aussehenden (asymmetrischen) Endzustand zu erreichen.
- Bezug nehmen auf die Bewegungsvorgänge aus Schritt 2 werden nun die Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Partikel für den nächsten Durchlauf angepasst.

Als nächste Ausbaustufe des Modells wird versucht, es dem Verhalten von tatsächlichen Stoffen anzunähern. Dazu werden empirische Versuchsdaten aus dem Kawabata-Auswertungssystem herangezogen und in das Modell eingeflochten²⁸.

3.3.2.3 Exkurs: Das Kawabata-Auswertungssystem

Der Japaner Suelo Kawabata entwickelte ein Analyseverfahren, um mechanische Materialeigenschaften von Textilien objektiv messbar zu machen. Es besteht aus einer Sammlung von 4 Apparaturen, mit denen insgesamt 16 Stoffeigenschaften, darunter Biegsbarkeit, Verschiebbarkeit, Dehnfestigkeit oder Dicke, gemessen werden können.

3.3.2.3.1 *Biegung*

Ein rechteckiges Stoffteil wird entlang der längeren Kanten in eine Halterung eingespannt, die es erlaubt, entlang dieser Kanten ein Drehmoment auf das Stoffstück auszuüben (siehe Abbildung). Dann wird das Drehmoment gemessen,

²⁸⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.62

mit dem der Stoff entlang der Kanten gedreht werden muss, um eine gewisse Krümmung entlang der kürzeren Kante zu erzeugen²⁹.

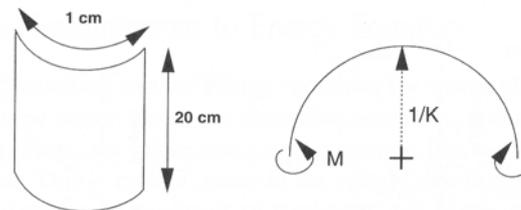


Abbildung 6: Messung der Biegeeigenschaften bei der Kawabata-Analyse

Das resultierende Diagramm bildet das benötigte Drehmoment in Bezug auf die dadurch verursachte Krümmung ab.

3.3.2.3.2 Verschiebung

Eine der längeren Kanten eines rechteckigen Stoffstückes wird eingespannt, die gegenüber liegende Kante wird parallel dazu verschoben. Gemessen wird die dafür benötigte Kraft.

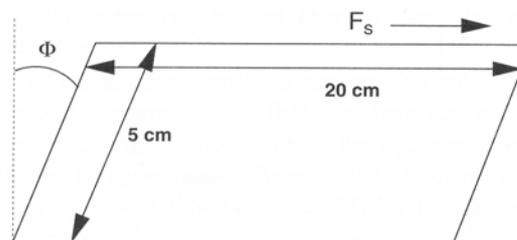


Abbildung 7: Messung der Verschiebeeigenschaften bei der Kawabata-Analyse

Im Diagramm aufgezeichnet wird die aufgewendete Kraft gegenüber dem von ihr verursachten Verschiebewinkel.

Bei der Analyse der Eigenschaften wird jeweils ein ganzer Deformationszyklus durchgeführt, und zwar entlang beider Webrichtungen. Die daraus entstehenden Graphen zeigen - abhängig vom Material - oft *hystereseartiges* wie auch

²⁹⁾ vgl. Pandurangan/Eischen/Kenkari/May-Plumlee, 2004, S.2

*anisotropisches Verhalten*³⁰.

Als abschließendes Beispiel seien hier die Biege- und Verschiebungsgraphen eines Baumwollstoffes angeführt. Man erkennt deutlich, dass die (hier vor allem Biege-) Eigenschaften bezüglich der Richtung sehr unterschiedlich sind³¹:

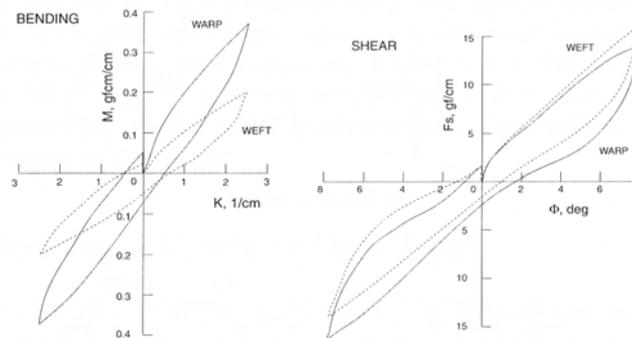


Abbildung 8: Ergebnisgraphen der Kawabata-Analyse eines Stückes Baumwollstoff. Links die Biegekurven, rechts die Verschiebekurven.

3.3.2.4 Annäherung des bisher unspezifischen Modells an reale Stoffe

Um von den Auswertungsergebnissen zu im Partikelmodell verwendbaren Energiefunktionen zu gelangen, ist wiederum ein dreistufiger Prozess nötig³²:

- Zuerst werden Funktionen gesucht, die sich möglichst gut den erhaltenen Kawabata-Graphen annähern.
- Als nächstes werden möglichst direkte Verbindungen zwischen diesen Funktionen und den schon vorhandenen Energiefunktionen des Modells hergestellt.
- Die resultierenden Gleichungen werden zuletzt noch so skaliert, dass sie Werte in den standardisierten physikalischen Einheiten liefern.

³⁰⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.62f

³¹⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.64

³²⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.65

In der Annahme, dass für die Berechnung des Endzustandes der beobachtete Hysterese-Effekt nicht zum Tragen kommt, wird nur die obere Hälfte der durch die Kawabata-Auswertung erhaltenen Kurven durch eine Polynomfunktion $M(K)$ für das benötigte Drehmoment bzw. $F(M)$ für die benötigte Verschiebekraft angenähert.

3.3.2.4.1 *Dehnungsenergie*

Unter der Voraussetzung von nur geringen Belastungen auf jeden einzelnen Faden kann die Theorie von sich elastisch biegender Fäden angewendet werden³³. Jener Teil dU der Dehnungsenergie, der in einem Fadenstück dS auftritt, beträgt dabei

$$dU = \frac{MdS}{2\rho} \quad \text{Formel 8}$$

wobei M das Drehmoment ist, das auf das Segment mit der Seitenlänge D wirkt.

3.3.2.4.2 *Biegeenergie*

Die Biegeenergie eines einzelnen Fadens kann im Bereich zwischen zwei Partikeln als

$$U = \int_0^\sigma \frac{MK}{2} dS \quad \text{Formel 9}$$

angegeben werden, wobei K die Krümmung entlang des Fadenstückes dS ist. Da die Krümmung über einem einzelnen Segment als konstant angenommen wird, folgt als gesamte Biegeenergie für ein durch ein Partikel repräsentiertes Stoffsegment:

$$B = \frac{MK}{2} \sigma^2 \quad \text{Formel 10}$$

³³⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.65f

Um die Krümmung K zu bekommen, wird auf eine geteilte Funktion zurückgegriffen, um notwendigerweise andere Eigenschaften für kleine und große Krümmungswinkel vorgeben zu können:

$$K(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\sigma} \cos(\theta/2) & \frac{\pi}{4} < \theta \leq \pi \\ -\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \beta / \theta + \alpha + \frac{\pi}{4} \beta & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad \text{Formel 11}$$

3.3.2.4.3 Verschiebeenergie

Ausgehend von der Arbeit

$$W = \int F dS \quad \text{Formel 12}$$

die eine Kraft F zum Verschieben um ein Stück dS verrichtet, kommt man unter der Annahme, dass sich die Länge der Fäden bei einer derartigen Verschiebung nicht ändert, zu

$$T = \int F \cos(\phi) l d\phi \quad \text{Formel 13}$$

3.3.2.5 Stofffedern

Um nun nicht nur Endpositionen des Stoffes errechnen zu können, sondern auch dynamische Effekte simulieren zu können, wird das bisherige Partikelmodell so umgebaut, dass nicht die Gesamtenergie sondern jeweils einzelne wirkende Kräfte dargestellt und berechnet werden. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, während der Simulation zusätzliche Kräfte hinzuzufügen oder die Parameter schon bestehender Kräfte zu ändern (als Beispiel sei hier eine Windkraft angeführt, die ihre Eigenschaften wie Richtung, Stärke oder Verwirbelung über die Zeit hin ändert)³⁴.

³⁴⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.70f

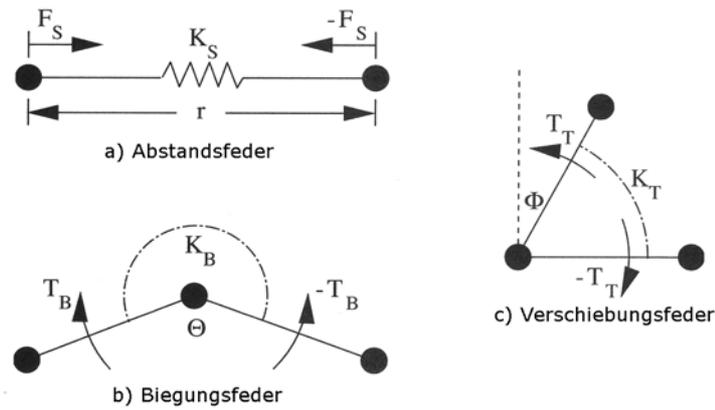


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Federtypen zwischen Partikeln

Dafür werden, wie in obiger Abbildung dargestellt, mehrere Federarten definiert, die jeweils formverändernde Kräfte repräsentieren (vgl. die Energiefunktionen weiter oben):

Die Abstandsfeder K_S übt eine Kraft F_S aus, die zwei Partikel bezüglich ihres Grundabstandes F auseinander drückt oder zusammenzieht (a).

$$F_S(r) = \frac{\partial(R+S)}{\partial r} = \begin{cases} -C_0(4r+\sigma)(r-\sigma)^4/\sigma^2 & r \leq \sigma \\ 5C_0(r-\sigma)^4/\sigma^5 & r > \sigma \end{cases} \quad \text{Formel 14}$$

Die Biegunsfeder K_B übt Biegekraft auf die beiden Nachbarn eines Partikels aus, sobald sich der Winkel θ zwischen den aufgespannten Vektoren von 180° wegbewegt (b).

$$T_B(\theta) = -\frac{978.8\sigma}{2} \left(\frac{\partial M}{\partial K} + M \right) \sin(\theta/2) \quad \text{Formel 15}$$

Und die Drehfeder K_T wiederum übt Verschiebekraft zwischen drei Partikeln aus, sobald sich die Partikel aus der rechtwinkeligen Anordnung um den Winkel ϕ herausbewegen (c).

$$T_T(\phi) = \frac{195.76\sigma^3}{4} F \cos(\phi) \quad \text{Formel 16}$$

Als Masse des Partikels wird für die Berechnung einfach die Masse der $F \times F$ großen Fläche, die das Partikel umgibt, zusammengefasst. Für spezielle Partikel

wird die Masse noch zusätzlich gewichtet: Die Masse eines Partikels auf der Außenkante mit $\frac{1}{2}$, die auf den Eckpunkten mit $\frac{1}{4}$ ³⁵.

3.3.2.6 Luftwiderstand

Für jedes Partikel wird einzeln der jeweilige Luftwiderstand analysiert. Die auftretende Kraft ist dabei proportional zu der projizierten Fläche des betrachteten Ausschnittes in Richtung der relativen Bewegung zwischen Luft und Fläche, und zum Quadrat der relativen Geschwindigkeit:

$$F_A = C_3 \sigma^2 (n \cdot U) U \quad \text{Formel 17}$$

Die Konstante C_3 dient hierbei dazu, Eigenschaften wie Luftdichte oder Oberflächenegebenheiten des Stoffes in die Formel einfließen lassen zu können³⁶.

3.4 Interpretation der Daten

3.4.1 Überprüfen der zu Beginn aufgestellten Hypothesen

Die Hypothese, es habe im Lauf der Zeit viele Ansätze gegeben, die sich in ihren grundsätzlichen Herangehensweisen sowie hinsichtlich ihrer Komplexität stark unterscheiden, hat sich gänzlich bestätigt.

Die Hypothese, es mache einen Unterschied, ob man sich prinzipiell für die Nachbildung real existierender Stoffe interessiere, oder Stoffsimulation eher zum Zweck der computerbasierten Generierung von Bildern verwende, hat sich im Laufe des ersten Teiles dieser Arbeit völlig bestätigt.

Der Hypothese, es habe sich eine einzige Vorgehensweise herauskristallisiert, die den besten Kompromiss zwischen Qualität der Simulation und benötigter Rechenzeit darstellt, kann ebenfalls zugestimmt werden.

³⁵⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.74

³⁶⁾ vgl. House/Breen, 2000, S.75

3.4.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Welche theoretischen Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation gibt bzw. gab es bisher überhaupt? Worin unterscheiden sie sich, was haben sie gemeinsam?

Unterscheidung 1: Zu erreichenden Ziele

Während die Gemeinschaft der aus der Textilindustrie kommenden Ingenieure in den 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts begann, erste theoretische Betrachtungen über die Vorgänge im Inneren von Stoffen anzustellen und nach und nach immer feinere Modelle zu entwickeln, war die Unterstützung durch Computer natürlich noch nicht gegeben. Erst mit der fortschreitenden Entwicklung der Computertechnik wurde es im Laufe der Zeit möglich, komplexere Berechnungen anzustellen und so die einzelnen Modelle je nach Interessensgebiet zu spezialisieren: Während die Gruppe der Textilingenieure darauf aus war, möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, um die gewonnenen Erkenntnisse in der Industrie zu nutzen, gingen die Computergraphiker einen anderen Weg: Hier waren es eher die Kriterien „optische Korrektheit“ und „kurze Simulationsdauer“, welche die Forschungen hauptsächlich bestimmten.

Unterscheidung 2: Zu Grunde liegender theoretischer Ansatz

Eine Einteilung der Modelle nach der verwendeten Herangehensweise lässt hauptsächlich vier Gruppen erkennen:

Modelle basierend auf mathematischen oder geometrischen Modellen bilden die erste Gruppe. Hier finden sich sowohl die ersten anfänglichen Modelle überhaupt (z. B. das Peirce-Modell), als auch spätere, welche einen geometrischen Ansatz als gute Hilfe sahen, um schnell zu einer brauchbaren Ausgangskonfiguration für folgende aufwändigere Simulationen zu gelangen.

Als nächstes folgen jene Modelle, welche auf formverändernden Energien beruhen.

Zu der Gruppe der Elastizitätsmodelle gehören auch die Modelle, die sich mit der Methode der Finiten Elemente befassen. Hier werden Stoffe als aus kleinen

elastischen Elementen aufgebaute Flächen betrachtet.

Der vierte und letzte Ansatz ist jener der Massen und Federn. Stoff wird hierbei aus einer Vielzahl von miteinander durch unterschiedliche Federn verbundenen Massepunkten modelliert; auch die zahlreichen Variationen der Partikelmodelle zählt hier dazu.

Unterscheidung 3: Komplexität des Modells

Ganz allgemein kann man hier festhalten, dass sich in jedem vorhin genannten Segment durch ständige Verbesserung und Überarbeitung eine Entwicklung von einfachen theoretischen Ansätzen hin zu komplexeren Modellen vollzogen hat. Oft entstanden aus der Tatsache, dass ein Modell plötzlich zu unhandlich oder in der Berechnung zu aufwändig geworden war, neue Denkansätze und neue, bessere Modelle.

Welche Voraussage lässt sich aus der Beantwortung der Frage 1 („Welche theoretischen Herangehensweisen an das Problem der Stoffsimulation gibt bzw. gab es bisher überhaupt?“) für den 2. Abschnitt der Diplomarbeit treffen?

Da das zuletzt detaillierter dargestellte Modell bestehend aus Partikeln und Stofffedern als der beste Kompromiss zwischen erreichter Simulationsgenauigkeit und benötigtem Rechenaufwand dargestellt wird, ist zu erwarten, dass dieses Modell auch in den meisten Software-Lösungen anzutreffen ist.

4 Abschnitt 2: Effizienztest

4.1 Forschungsleitende Fragestellung

4.1.1 Forschungsleitende Fragen

Welche der in Abschnitt 1 behandelten Techniken werden in 3D-Software-Lösungen nun tatsächlich eingesetzt?

In wiefern unterscheiden sich die verwendeten Module hinsichtlich ihrer Effizienz bei der Berechnung von einfachen³⁷ Simulationen?

Können Gründe für etwaige Unterschiede gefunden werden?

Falls gravierende Unterschiede auftreten: Können daraus Empfehlungen abgeleitet werden, welches Modul für welchen Einsatz besser geeignet ist?

4.1.2 Hypothesen

Eine einzige Methode hat sich im Laufe der Zeit als der beste Kompromiss zwischen Qualität der Simulation und aufzuwendende Rechenkraft herausgestellt und wird von allen Programmen - jedoch mit Abweichungen - implementiert. Es wird vermutet, dass bei wenigen zu berechnenden Punkten die Performance der Module annähernd gleich ist, während die Unterschiede bei steigender Punktanzahl immer größer werden.

Weiters wird angenommen, dass sich aus den Unterschieden (falls sie nun tatsächlich auftreten) keine klaren Hinweise auf geeignete Einsatzgebiete ergeben werden.

4.1.3 Operationalisierung von Variablen

4.1.3.1 *Abhängige Variablen*

4.1.3.1.1 *Zeit*

Zur Messung der Effizienz wird die Zeit für die Berechnung einer gegebenen

³⁷⁾ die Definition von „einfach“ soll hierbei aus den Ergebnissen aus Teil 1 abgeleitet werden

Simulation mit einer Länge von 100 *Frames* gemessen. Um Messfehler auszugleichen, wird jeder Durchlauf mehrmals simuliert und die Ergebnisse gemittelt.

4.1.3.2 *Unabhängige Variable*

4.1.3.2.1 *Verwendete Software*

Es sollen die Produkte Cinema4D von Maxon³⁸ in der Version 9.0, SoftImage|XSI 4.2³⁹ von Avid⁴⁰ sowie Maya 6.0 von Alias analysiert werden.

Alle vorgestellten Lösungen sind für diese Arbeit deshalb interessant, weil sie zum einen eine gewisse Relevanz am 3D-Markt haben und zum anderen weil sie in der letzten Zeit deutlich billiger und dadurch auch für kleinere Produktionen erreichbar geworden sind. Weiters wurden die Programme Cinema4D und SoftImage|XSI im Computeranimations-Unterricht an der FH St. Pölten durchgenommen.

Cinema4D erhielt erst in seiner letzten Version 9 das Stoff-Simulationsobjekt „Clothilde“, davor war eine derartige Simulation mit dem Programm gar nicht machbar.

SoftImage bietet dem gegenüber gleich 2 getrennte Simulationsmodule: Während eines schon länger in das Produkt integriert ist, wurde das Modul „Syflex Cloth“ erst vor kurzem in der Version 4.0 hinzugefügt.

4.1.3.2.2 *Aufbau der Szene*

Als Szene soll ein quadratisches Tischtuch über einen kreisrunden Tisch gelegt werden. Es treten dabei nur Kollisionen zwischen dem Tuch und der horizontalen Oberfläche des Tisches auf, die stoffinterne Kollisionserkennung wird dafür nicht

³⁸⁾ Maxon-Website: <http://www.maxon.de>

³⁹⁾ Softimage-Website: <http://www.softimage.com>

⁴⁰⁾ Avid: <http://www.avid.com>

benötigt.

4.1.3.3 *Intervenierende Variablen*

4.1.3.3.1 *Computersystem*

Da die für die Berechnung benötigte Zeit natürlich direkt von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Computers abhängt, seien hier die wichtigsten Eckdaten des für die Simulation verwendeten Systems angegeben:

Merkmal	Quantität
CPU	AMD Athlon, 1,3 GHz
Systemspeicher	640 MB
Betriebssystem	Windows XP
Grafikkarte	NVIDIA GeForce2 MX 400
Bildschirmauflösung	1280x1024 Pixel

4.1.3.3.2 *Im Hintergrund laufende Anwendungen*

Auch Anwendungen, die nur im Hintergrund laufen, können natürlich CPU-Leistung abziehen und die Ergebnisse verfälschen. Daher werden alle nicht benötigten Programme für die Zeit des Experimentes beendet bzw. deaktiviert, soweit dies möglich ist.

4.1.3.3.3 *Darstellung in der 3D-Software*

Für zeitkritische Abläufe dieser Art macht es durchaus einen Unterschied, ob während der Simulation gleichzeitig mehrere Ansichten des Simulationsobjektes aktualisiert werden müssen, oder ob nur eine einzige Ansicht zu zeichnen ist. Aus diesem Grund bieten einige Programme die Möglichkeit, einzelne Ansichten zeitweise abzuschalten, um die verfügbare Rechenleistung auf wenige zu berechnende Fenster zu konzentrieren. Um für alle Programme die selben Rahmenbedingungen zu schaffen, wird jeweils eine Seitenansicht des Tisches auf

die volle Größe aufgezoogen und so gezoomt, dass das Stoffobjekt die gesamte Breite des Fensters einnimmt. Die Programme laufen jeweils im Vollbildmodus, sie erstrecken sich also über den gesamten Bildschirm.

4.2 Forschungsstrategie

4.2.1 Methodenbenennung

Zur Beantwortung der Frage, welche Techniken tatsächlich eingesetzt werden, soll eine Inhaltsanalyse der Dokumentation zu den Produkten durchgeführt werden. Als Forschungsmethode bezüglich des Effizienzvergleiches zwischen einigen ausgewählten Programmen soll ein Experiment dienen.

4.2.2 Arbeitsablauf des Experimentes

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden in den einzelnen 3D-Modulen jeweils vergleichbare Szenen erstellt. Diese werden den selben Veränderungen (Anzahl der Punkte des Stoffobjektes) unterzogen und die benötigte Dauer eines Simulationsdurchlaufes über 100 *Frames* gemessen.

Insgesamt ist darauf zu achten, dass mögliche durch die verwendete Software begründete Unterschiede so wenig wie möglich das Ergebnis der Simulation beeinflussen können.

Die im Zuge dieses Experiments entstandenen Dateien finden sich auf der beiliegenden CD im Ordner „3d-Szenen“, in dem die Dateien nach verwendeter Software gruppiert sind.

4.2.2.1 Cinema4D

4.2.2.1.1 Aufbau der Szene

Es werden nacheinander drei Zylinder in die Szene eingefügt, welche den Tisch bestehend aus Tischfläche, Säule und Fuß bilden. Die Unterteilung der Höhe sowie entlang des Radius der Deckfläche wird jeweils auf 1 reduziert, die

Unterteilung des Umfanges wird auf 40 erhöht, sodass in weiterer Folge eine genaue Kollisionserkennung zwischen Tisch und Stoff möglich ist. Der Fuß bekommt einen Radius von 40 sowie eine Höhe von 10 Einheiten. Die Säule erhält einen Radius von 20 und eine Höhe von 70, die Tischfläche einen Radius von 90 und eine Höhe von 10 Einheiten. Danach wird alles so übereinander angeordnet, dass der Tisch auf der Ebene $y=0$ zu stehen kommt. Als Stoff wird ein waagrecht liegendes quadratisches Gitter mit einer Seitenlänge von 24 auf einer Höhe von 110 Einheiten positioniert, so dass es sich etwas über dem Tisch befindet. Für den ersten Simulationsdurchgang wird das Gitter mit 20 Unterteilungen in jeder Richtung angelegt, spätere Durchgänge werden mit 40 und 80 Unterteilungen erfolgen.

Nachdem die einzelnen Objekte von ihrem anfänglichen *parametrischen Zustand* durch einen Klick auf „Funktionen“ - „Grundobjekt konvertieren“ in ein Polygonobjekt umgewandelt wurden, ist der Aufbau der Szene abgeschlossen. Die Szene sieht nun folgendermaßen aus und bildet in dieser Form die Grundlage für alle Simulationen:

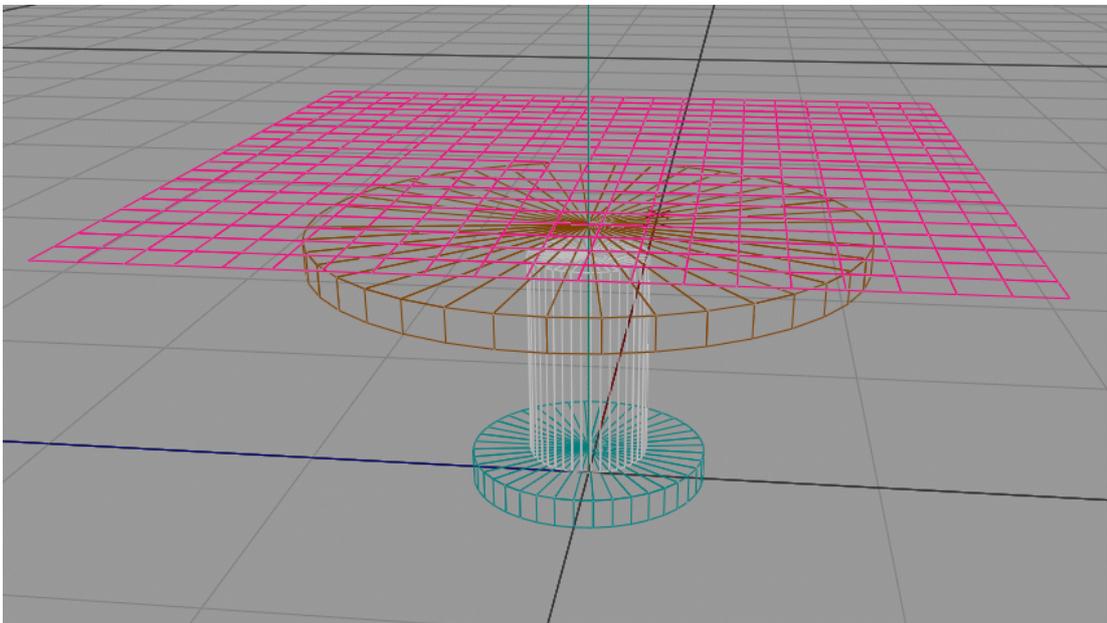


Abbildung 10 - Aufbau der Szene

4.2.2.1.2 Zuweisung der Simulationseigenschaften

Das Stoffobjekt bekommt nun das Tag „Clothilde Tags“ - „Kleidung“ zugewiesen, welches die Eigenschaften der Stoffsimulation beinhaltet; die Tischplatte bekommt ihrerseits das Tag „Clothilde Tags“ - „Kollision“, welches das Objekt als Kollisionsobjekt für die Simulation ausweist, sodass der Stoff die Platte nicht durchdringen kann.

Beim Kleidungs-Tag werden die Werte für Dehnfestigkeit, Biegefestigkeit und Gummi (die Bezeichnung für jenen Wert, der die Verschiebefestigkeit angibt) mit 10%, 20% bzw. 0% festgelegt, Federung und Reibung werden mit 0% bzw. 80% angegeben. Diese Werte stellen dabei keine bestimmten Vorgaben dar, sondern wurden ganz einfach durch empirische Versuche derart ermittelt, dass die entstehende Stoff-Faltung einem Tischtuch ähnelt.



Abbildung 11 - Eigenschaften
des Stoffobjektes in Cinema4D

Die Selbstkollisionserkennung wird abgeschaltet, da in diesem einfachen Setup keine Durchdringung des Stoffes mit sich selbst zu erwarten ist.

Auf der Registerkarte „Kräfte“ wird die Gravitation, die mit -9,81 voreingestellt ist, so belassen, die Windkräfte werden jedoch allesamt auf 0 reduziert, da das Tuch einfach nur senkrecht auf den Tisch herunterfallen soll.

Die restlichen Einstellungen des Stoffobjektes werden auf ihren Defaults gelassen.

Beim Kollisions-Tag der Tischfläche wird die Federung auf 0% und die Reibung

auf 80% gesetzt, sodass das Tischtuch einerseits nicht vom Tisch zurückprallt und andererseits nicht von selbst vom Tisch rutscht.

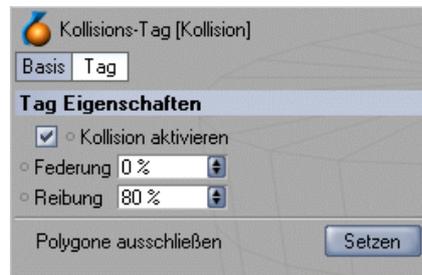


Abbildung 12 - Eigenschaften des Kollisionsobjektes in Cinema4D

4.2.2.2 *SoftImage|XSI*

4.2.2.2.1 *Aufbau der Szene*

Es wird ein neues Projekt angelegt und darin eine neue, leere Szene erstellt. Hierin werden über „Get“ - „Primitive“ - „Polygon Mesh“ - „Cylinder“ drei Polygonzylinder eingefügt, die Subdivisions⁴¹ werden in U-Richtung auf 40 gestellt, für V und Base wird jeweils 1 festgelegt. Als Radius und Höhe werden für den Tischfuß 4 und 1, für die Säule 2 und 7, und für die Tischfläche 9 und 1 festgelegt. Im Unterschied zu den vorhin in Cinema4D verwendeten Werten fällt auf, dass hier die Werte jeweils um eine Zehnerpotenz geringer sind. Diese Gegebenheit beruht auf dem Umstand, dass in SoftImage beim Versionsprung auf 4.0 aufgrund der Einführung der Rigid Body Dynamics⁴² eine Neudefinition einer SoftImage-Einheit notwendig wurde. Seither entspricht eine Einheit nicht mehr einem Meter, sondern zehn Zentimetern, der Standardwert für die

⁴¹⁾ Anzahl Unterteilungen in der jeweiligen Richtung

⁴²⁾ Ein Simulationsmodul zum Erstellen von auf Kräften basierenden Effekten zwischen Festkörpern. Analog dazu existiert auch die Komponente „Soft Body Dynamics“, die sich um das Simulieren ähnlicher Effekte zwischen Elastischen Körpern kümmert.

Gravitation wurde dementsprechend auf 98,1 erhöht⁴³.

Die drei Zylinder werden nun so übereinander arrangiert, dass der Tisch wiederum auf der x/z-Ebene zu stehen kommt.

Ein Grid wird über „Get“ - „Primitive“ - „Polygon Mesh“ - „Grid“ eingefügt, auf die Dimensionen U=V=24 vergrößert sowie in jede Richtung 20 Mal unterteilt.

4.2.2.2.2 *Zuweisung der Simulationseigenschaften - integriertes Cloth-System*

Es wird eine Gravitationskraft in die Szene über „Get“ - „Force“ - „Gravity“ eingefügt und auf ihrem Standardwert von 98,1 belassen.

Das Grid, welches das Stofftuch werden soll, wird ausgewählt und bekommt durch „Create“ - „Cloth“ - „From Selection“ seine Simulationseigenschaften.

Über die Befehle „Modify“ - „Environment“ - „Apply force“ bzw. „Set Obstacle“ wird der Stoffsimulation das vorher erstellte Kraftobjekt als Gravitation bzw. der oberste Zylinder als Kollisionsobjekt zugewiesen.

Für die Einstellungen wurden hier folgende Werte gewählt: Für den Widerstand gegen Verschiebung (Shear) 400 (entspricht 80% des Maximalwertes 500), gegen Biegung 270 (90% von 300) und gegen Dehnung 1000 (entspricht 100%). Die Reibung wurde auf 0,8 gesetzt.

⁴³) vgl. Sporer, „XSI 4.0: Features im Detail getestet“, in DigitalProductions, Ausgabe 5, 2004, Seite 53/54

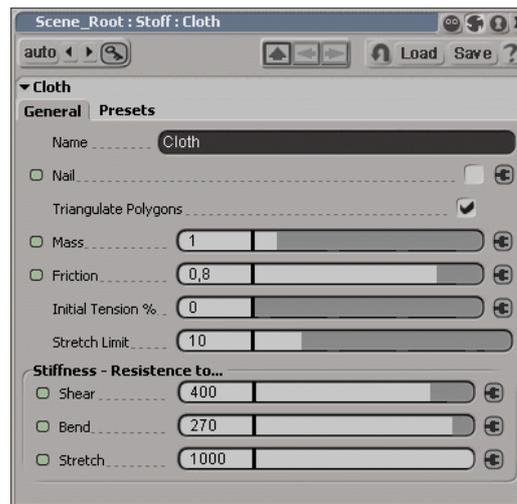


Abbildung 13 - Eigenschaften des Cloth-Objektes in Softimage (integriertes Tool)

Das Kollisionsobjekt wurde mit einer Elastizität von 0 und einer Reibung von ebenfalls 0,8 versehen. Zusätzlich wurde die Push Length⁴⁴ auf 0,5 erhöht, um Durchdringungen zwischen den Außenkanten der Tischfläche und dem Stoff zu unterbinden.

⁴⁴⁾ Die Push Length gibt einen Mindestabstand zwischen den Punkten des simulierten Stoffes und den Punkten des Kollisionsobjektes an. Für Kanten gilt dieser Mindestabstand nicht, sodass an starken Krümmungen z. B. die Gefahr besteht, dass Ecken des Kollisionsobjektes durch den Stoff dringen. Dieser Mindestabstand bietet eine einfache und performante Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen. (Die Alternative wäre, die zu berechnenden Punkte des Stoff- bzw. Kollisionsobjektes zu erhöhen, was zum einen in einer erhöhten Simulationszeit resultieren würde, andererseits aber dafür den Stoff näher an das Kollisionsobjekt herankommen lassen könnte.)

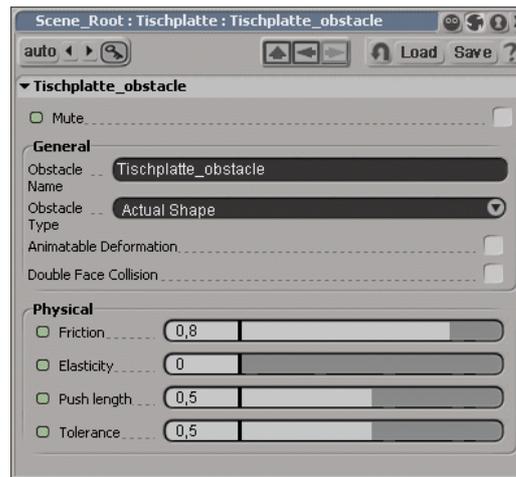


Abbildung 14 - Eigenschaften des Kollisionsobjektes in Softimage (integriertes Tool)

4.2.2.2.3 Zuweisung der Simulationseigenschaften - Syflex Cloth

Durch „Application“ - „Toolbars“ - „Syflex [add-on]“ wird vorerst einmal das der Komponente zugehörige Menüfenster eingeblendet. Das Grid wird ausgewählt und bekommt über „Syflex“ - „Cloth“ - „Create Cloth“ seine Simulationseigenschaften, die Gravitation wird mittels „Syflex“ - „Forces“ - „Add Gravity“ hinzugefügt. Durch Markieren von Grid und Tischoberfläche und anschließendem Auswählen von „Syflex“ - „Collide“ - „Collide Mesh“ wird der Zylinder als Kollisionsobjekt für das Tischtuch festgelegt.

Als Eigenschaftswerte für die Syflex-Simulation wurden für die Federn folgende Steifigkeiten angegeben: gegen Verschiebung 0,2, gegen Verbiegung 0,1 und gegen Dehnung 0,02⁴⁵. Während die Werte für die jeweiligen Dämpfungsparameter

⁴⁵⁾ Dieser Wert von 0,02 anstelle des erwarteten Wertes 0 bei der Dehnungssteifigkeit ist dadurch begründet, dass schon bei ersten Testläufen mit dem Wert 0 sehr ungewöhnliche Vorgänge bei der Simulation zu beobachten waren: Die normalerweise (= bei höheren Werten) sehr glatt wirkende Oberfläche des Stoffes während der Simulation wurde bei Werten unterhalb von 0,01 von sehr starken Zerklüftungen übersät. Erst zwischen 0,01 und 0,02 verschwanden diese interessanten Ecken.

jeweils auf 0,002 erhöht wurden⁴⁶, um die Simulation in den angestrebten 100 *Frames* halbwegs zu einem Ruhezustand bringen zu können, wurden die anderen Einstellung auf ihren Anfangswerten belassen.

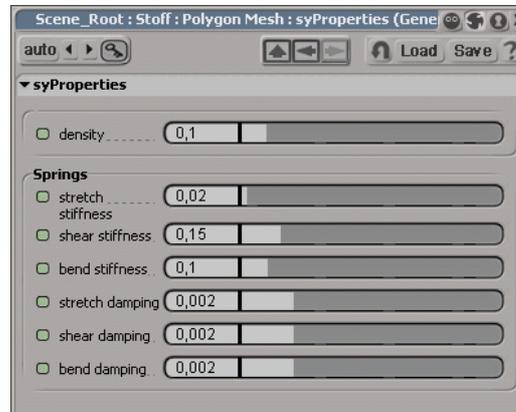


Abbildung 15 - Federeinstellungen von Syflex Cloth

Für das Kollisionsobjekt wurde die Reibung auf 0,8 erhöht und der „External Envelope“⁴⁷ auf 0,7 gesetzt.

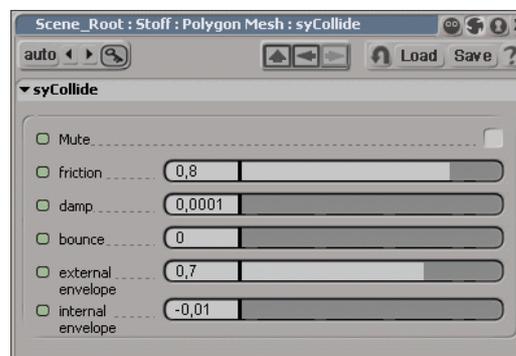


Abbildung 16 - Eigenschaften des Kollisionsobjektes bei Syflex Cloth

⁴⁶⁾ Die Erhöhung der Dämpfungswerte verhindert nur, dass die Stoffenden endlos herumpendeln. Es hat laut dem zugehörigen Kapitel des Syflex-Manuals keinen Einfluss auf die benötigte Simulationsdauer.

⁴⁷⁾ Syflex's Analogon zur „Push Length“ des XSI-internen Moduls.

4.2.2.3 *Maya*

4.2.2.3.1 *Aufbau der Szene*

Über „Create“ - „Polygon Primitives“ - „Cylinder“ werden die drei Zylinder eingefügt und mit den schon bekannten geometrischen Eigenschaften von 40 Unterteilungen entlang des Umfanges und keiner Unterteilung entlang der Höhe und des Radius erzeugt. Dann werden sie entlang der y-Achse übereinander angeordnet.

Durch „Create“ - „Polygon Primitives“ - „Plane“ wird das Gitterobjekt mit einer Seitenlänge von 24 und 20 Unterteilungen in jeder Richtung erzeugt und danach auf die Höhe $y=11$ verschoben.

4.2.2.3.2 *Zuweisung der Simulationseigenschaften*

Die Ebene wird markiert und durch den Befehl „Cloth“ - „Create Cloth Object“ zu einem Stoff umgewandelt, wobei das Gitter automatisch in Dreiecke unterteilt wird. Um die Größenverhältnisse zwischen Geometrie und physikalischen Eigenschaften zu korrigieren, wird beim Stoffobjekt die Skalierung („Solver Scale“) auf 10 erhöht. Um die Simulationseigenschaften genauer festlegen zu können, wird durch Anwählen von „Simulation“ - „Properties“ - „Create Cloth Property“ dem Simulationsobjekt ein neues Eigenschaftsfenster zugewiesen, in dem die Werte für Biege­widerstand, Reibung etc. zugänglich sind.

Der oberste Zylinder wird ausgewählt und über „Cloth“ - „Create Collision Object“ zu einem Kollisionsobjekt gemacht.

Als Wert für den Verschiebewiderstand wurde 20 angegeben (der Maximalwert beträgt jeweils 100), als Biege­widerstand wurden in beide Stoffrichtungen die voreingestellten 10 belassen, und für den Widerstand gegen Dehnung wurde ein Wert von 100 gewählt.

cpProperty1	
U Bend Resistance	10
V Bend Resistance	10
U Bend Rate	0
V Bend Rate	0
U Stretch Resistance	100
V Stretch Resistance	100
Shear Resistance	20
U Scale	1
V Scale	1
Density	0.01
Thickness	0.2
Thickness Force	1
Cloth Friction	0.8
Cloth Damping	0.2
Air Damping	0.1
Static Friction	0.8
Dynamic Friction	0.8

Abbildung 17 - Simulations-
Eigenschaften in Maya

Nachdem für die Reibung ein Wert von 0,8 eingegeben wurde, konnten die restlichen Einstellungen bei ihren Defaults bleiben.

pCylinderShape3	
Collision Offset	0.5
Collision Depth	1
Collision Priority	1

Abbildung 18 - Kollisions-
Eigenschaften in Maya

4.3 Auswertung der Daten

4.3.1 Verwendete Techniken

4.3.1.1 Cinema4D

Das Simulationsobjekt „Clothilde“, welches in das Programm Cinema4D seit der Version 9.0 integriert ist, arbeitet mit einem System aus Massepunkten und Federn. Dies wird deutlich im Abschnitt 15.2.2 des Online-Manuals⁴⁸, in dem die einzelnen Federarten vorgestellt werden:

⁴⁸⁾ Der Abschnitt des Manual steht zum Zeitpunkt dieser Diplomarbeit auch als freier Download unter der Adresse ftp://ftp3.maxon.net/pub/r9/docs/manual_mocca_9.0_de.pdf bereit und findet sich auch auf der dieser Arbeit beiliegenden CD im Ordner „Quellen“.

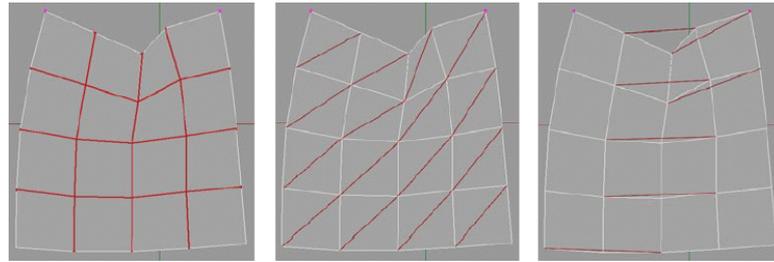


Abbildung 19: Verwendete Federn in Cinema4D: links Strukturfedern, in der Mitte Scherfedern, rechts Federn gegen Verbiegung

4.3.1.2 *SoftImage|XSI - integriertes Cloth-System*

Das XSI-eigene Cloth-System bedient sich eines Netzes aus verschiedenartigen Federn, um die Vorgänge innerhalb des Systems zu kontrollieren⁴⁹. Auch hier werden entlang der Kanten Dehnungsfedern, diagonal zwischen den Eckpunkten Scherfedern und über Partikel hinweg Biegefedern eingesetzt.

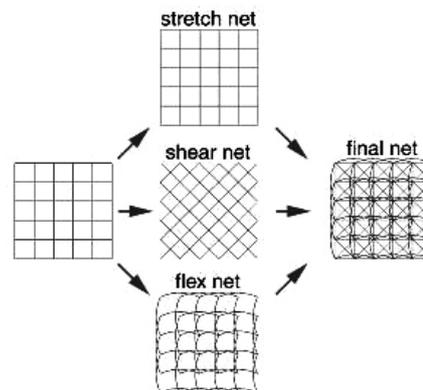


Abbildung 20: Die einzelnen Federtypen des Modells, das in XSI's Cloth-Tool Verwendung findet.

4.3.1.3 *SoftImage|XSI - Syflex Cloth*

Das seit der Version 4.0 hinzugekommene Modul „Syflex Cloth“ verwendet

⁴⁹⁾ Die Information stammt aus dem Online-Manual zu SoftImage|XSI 4.0, Kapitel „Cloth“. Unter dem Titel „Controlling the Stretch with Spring Nets“ wird dort das Modell schematisch dargestellt.

ebenfalls Partikel und Federn, um aus einem bestehenden Polygonobjekt Stoff zu erstellen. In der bei der Installation der Software auf die Festplatte kopierten Dokumentation ist im Kapitel „Clothes“ folgende Abbildung zu finden:

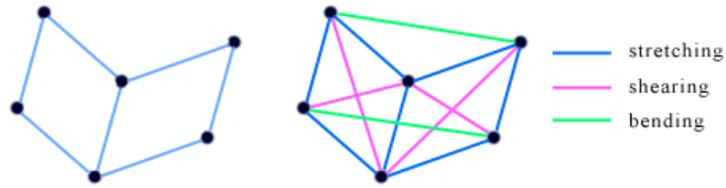


Abbildung 21: Links der Ausschnitt eines Polygonobjektes vor der Umwandlung in Stoff, rechts die hinzugefügten Federn: Blau die Dehnungsfedern entlang der Kanten, rosa die Scherfedern, grün die Federn betreffend die Verbiegung.

4.3.1.4 Maya

Zwar gibt das mitgelieferte Handbuch keinerlei direkte Erklärungen dazu ab, mit welchem theoretischen Modell Maya intern arbeitet, doch spricht David Breen in „Cloth Modeling and Animation“ am Ende des Kapitels über das weiter oben besprochene Modell aus Partikeln und Federn folgendermaßen: „It forms the basis for cloth representation in Alias/Wavefront’s Maya animation system.“⁵⁰

4.3.2 Simulationsergebnisse

4.3.2.1 Messung in den einzelnen Komponenten

4.3.2.1.1 Cinema4D

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Zeit pro Versuchsdurchgang (in Sekunden)				Durchschn. Zeit für alle 100 Frames	Durchschn. Zeit pro Frame
	1	2	3	4		
20	25,5	24,5	24,5	24,5	24,75	0,25
40	60	61,5	60,5	60,5	60,63	0,6
80	225	225	226	225	225,25	2,25

⁵⁰⁾ House/Breen, 2000, S76

4.3.2.1.2 *SoftImage|XSI - integriertes Cloth-System*

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Zeit pro Versuchsdurchgang (in Sekunden)				Durchschn. Zeit für alle 100 Frames	Durchschn. Zeit pro Frame
	1	2	3	4		
20	33,5	33	32,5	32,5	32,88	0,33
40	87	87	87,5	88	87,38	0,88
80	339	337	338	339	338,13	3,38

4.3.2.1.3 *SoftImage|XSI - Syflex Cloth*

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Zeit pro Versuchsdurchgang (in Sekunden)				Durchschn. Zeit für alle 100 Frames	Durchschn. Zeit pro Frame
	1	2	3	4		
20	10	10,5	10,5	10,5	10,38	0,1
40	13	13	13	12,5	12,88	0,13
80	17,5	18	18	18	17,88	0,18

4.3.2.1.4 *Maya*

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Zeit pro Versuchsdurchgang (in Sekunden)				Durchschn. Zeit für alle 100 Frames	Durchschn. Zeit pro Frame
	1	2	3	4		
20	19	19,5	19,5	19	19,25	0,19
40	64	63	63	63	63,25	0,93
80	321	322	322	322	321,63	3,22

4.3.2.2 Gegenüberstellung der einzelnen Ergebnisse

4.3.2.2.1 Benötigte Zeiten in Bezug auf die Anzahl der Unterteilungen

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Durchschnittliche Zeit für alle 100 Frames			
	Cinema4D	XSI-Cloth	Syflex Cloth	Maya
20	24,75	32,88	10,38	19,25
40	60,63	78,38	12,88	63,25
80	225,25	338,13	17,88	321,63

4.3.2.2.2 Prozentuelle Angaben in Bezug auf Syflex Cloth

Anzahl Unterteilungen des Stoffes	Durchschnittliche Zeit für alle 100 Frames			
	Cinema4D	XSI-Cloth	Syflex Cloth	Maya
20	238 %	316 %	100 %	185 %
40	470 %	608 %	100 %	491%
80	1259 %	1891 %	100 %	1798 %

4.3.2.3 Screenshots der einzelnen Simulationsergebnisse

4.3.2.3.1 Cinema4D

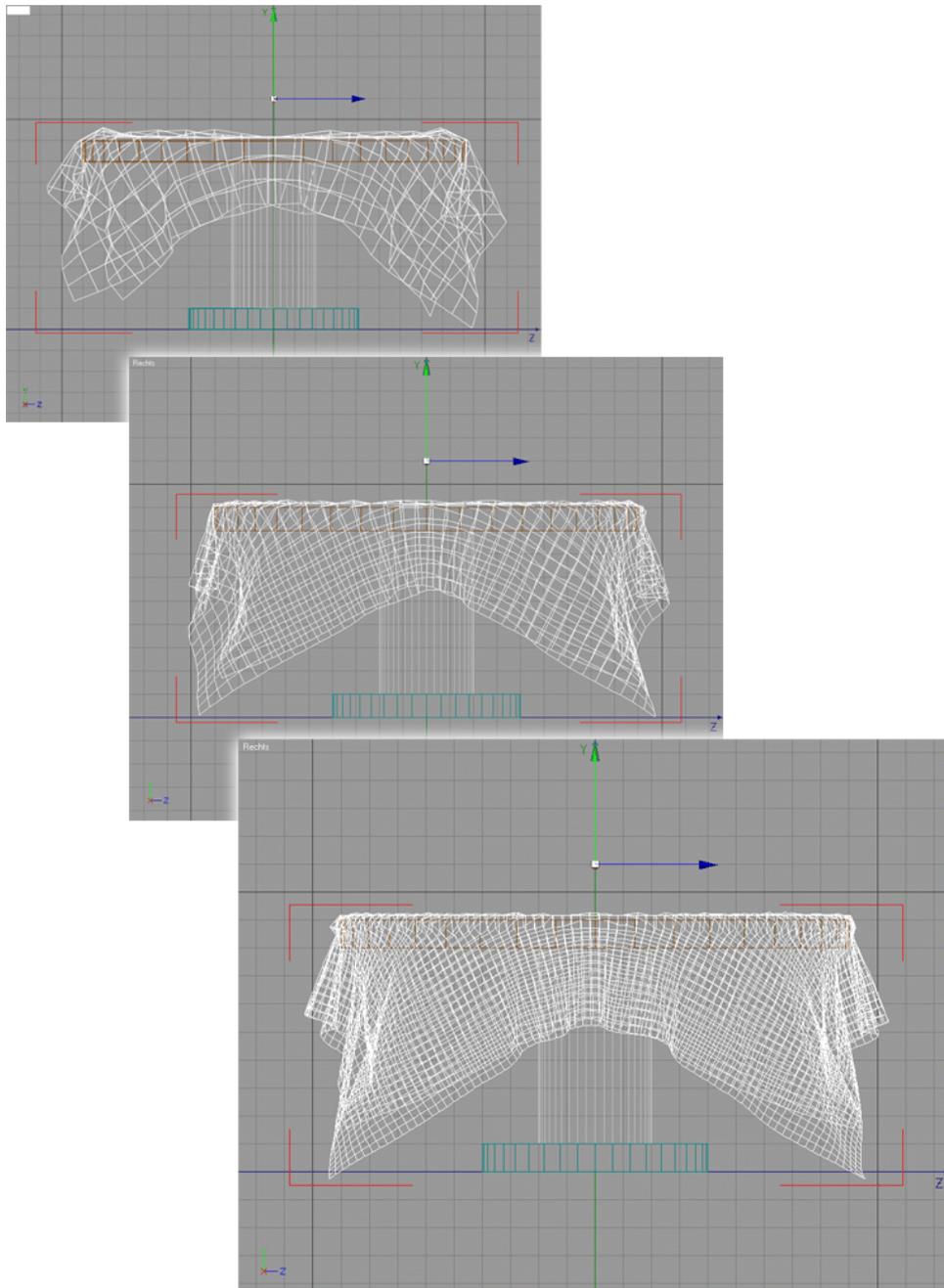


Abbildung 22 - Simulationsergebnisse aus Cinema4D bei 20, 40 und 80 Unterteilungen

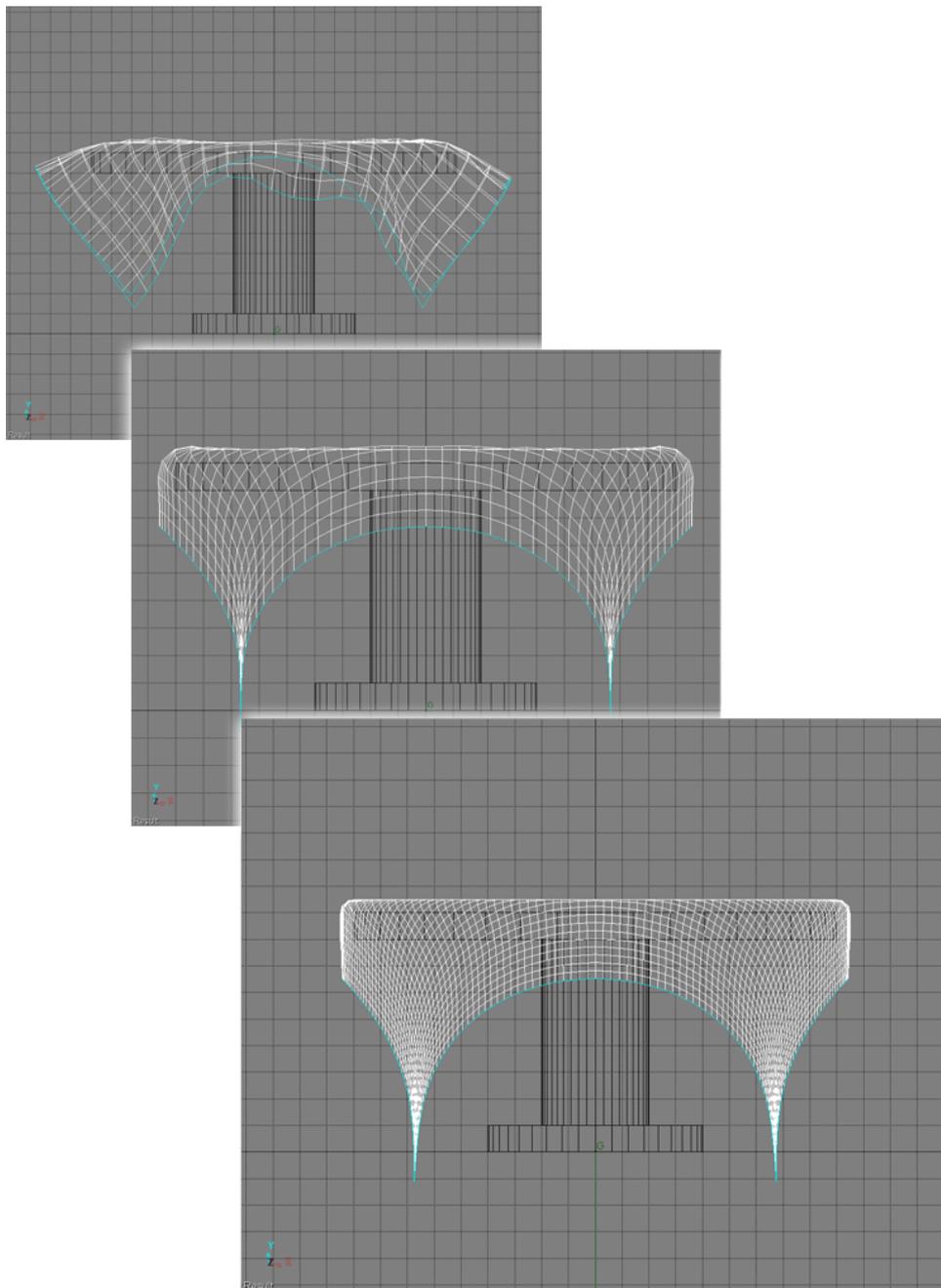
4.3.2.3.2 *SoftImage|XSI - integriertes Cloth-System*

Abbildung 23 - Simulationsergebnisse aus SoftImage (integriertes Stoffmodul) bei 20, 40 und 80 Unterteilungen

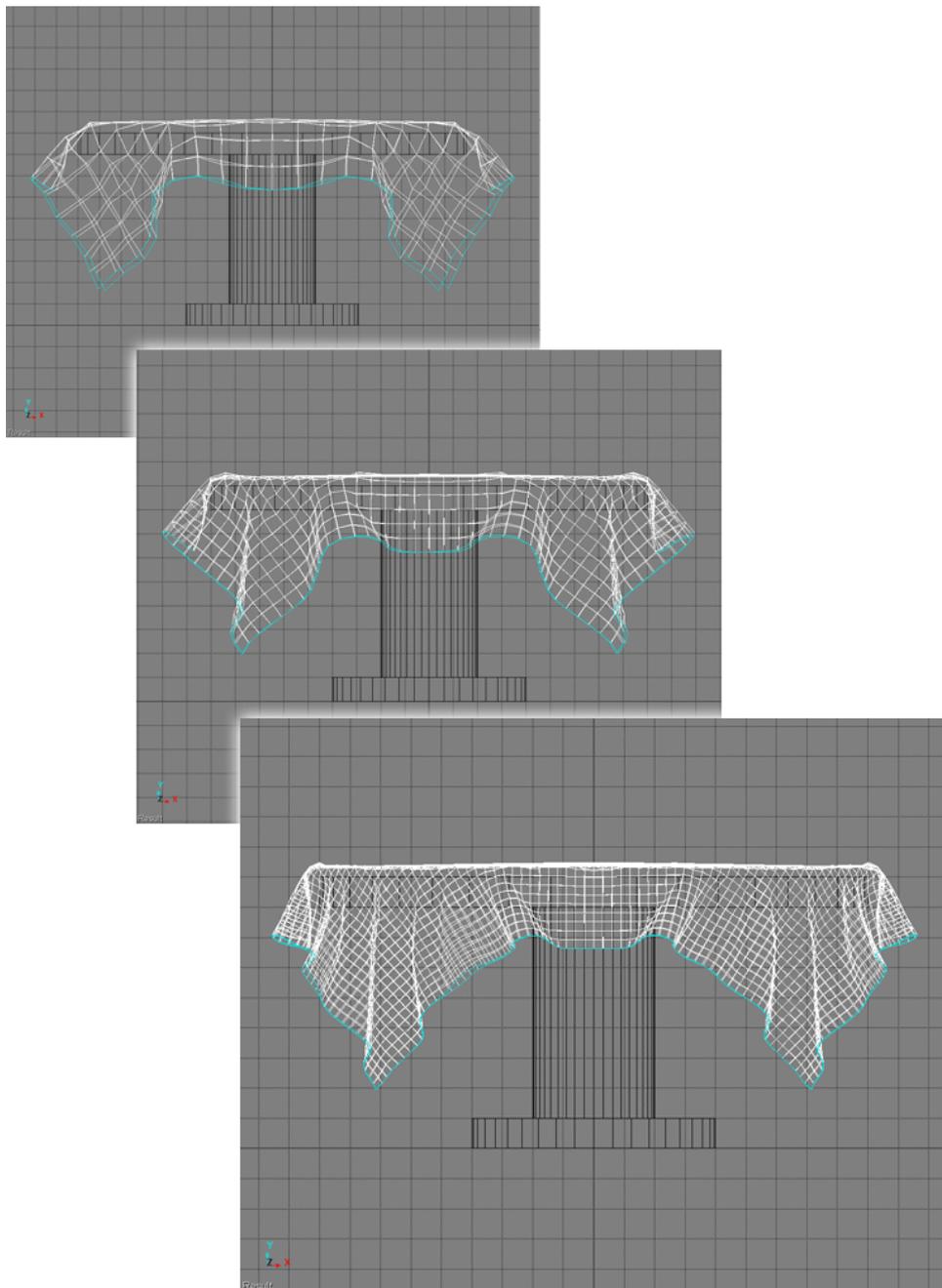
4.3.2.3.3 *SoftImage|XSI - Syflex Cloth*

Abbildung 24 - Simulationsergebnisse aus SoftImage (Syflex Cloth) bei 20, 40 und 80 Unterteilungen

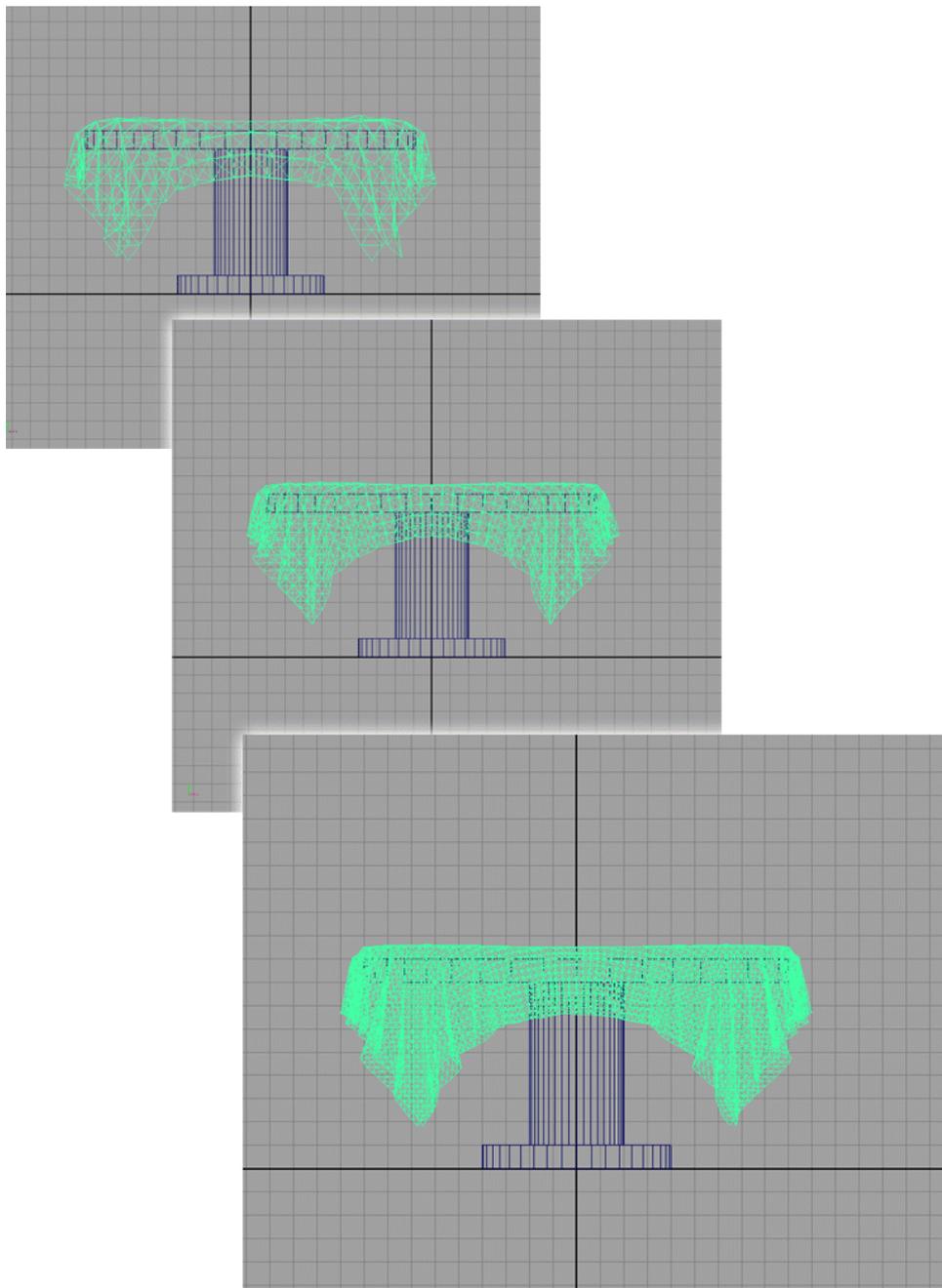
4.3.2.3.4 *Maya*

Abbildung 25 - Simulationsergebnisse aus Maya bei 20, 40 und 80 Unterteilungen

4.4 Interpretation der Daten

4.4.1 Überprüfen der Hypothesen

Die Hypothese, eine einzige Methode hab sich im Laufe der Zeit als der beste Kompromiss zwischen Qualität der Simulation und aufzuwendende Rechenkraft herausgestellt und würde von den meisten Programmen - jedoch mit Abweichungen - implementiert, wurde durchaus bestätigt.

Die Vermutung, bei wenigen zu berechnenden Punkten wäre die Performance der Module annähernd gleich, während die Unterschiede bei steigender Punktanzahl immer größer werden, konnte nicht ganz bestätigt werden: Obschon die Tatsache, dass mit steigender Punktzahl die Unterschiede größer werden, richtig ist, bestehen auch schon bei geringen Punktmengen auffallend große Performanceunterschiede.

Die Annahme, aus den auftretenden Unterschieden ließen sich keine klaren Hinweise auf geeignete Einsatzgebiete ergeben, wurde durch die Versuchsergebnisse widerlegt.

4.4.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Welche der in Abschnitt 1 behandelten Techniken werden in 3D-Software-Lösungen nun tatsächlich eingesetzt?

Die analysierten Programme Cinema4D 9.0, SoftImage|XSI 4.2 mit seinen beiden Cloth-Komponenten sowie Maya wurden ganz klar von einem Ansatz dominiert: Ein Netz aus Punktmassen und verschiedenen Federarten repräsentiert den zu simulierenden Stoff. Dabei wird die Dehnungssteifigkeit durch Federn bestimmt, die benachbarte Punktmassen oder Partikel verbinden, diagonal gegenüber liegende Punkte werden durch Federn verbunden, die gegen auftretende Scherkräfte wirken, und die Verbiegesteifigkeit wird durch Federn geregelt, welche etwas weiter entfernte Partikel verbinden. Durch diese Anordnung wird nie das Stoffobjekt als ganzes betrachtet, sondern lokal ablaufende Vorgänge bestimmen das Verhalten des Gesamten.

Können Gründe für etwaige Unterschiede gefunden werden?

Da alle drei Komponenten prinzipiell den gleichen theoretischen Ansatz implementieren, kann nur darüber spekuliert werden, warum die Unterschiede im Versuchsausgang derartig groß sind. Prinzipiell sind hier Abweichungen auf sehr vielen Gebieten denkbar, da das Modell ja nur den theoretischen Zugang angibt - die tatsächliche technische Umsetzung aber natürlich sehr stark abweichen kann. Angefangen von so grundlegenden Dingen wie die zur Repräsentation der Partikel und Federn im Speicher verwendete Struktur, über etwas interessantere Eckpunkte wie die jeweils verwendeten Integrationsalgorithmen, bis hin zu mitunter sehr komplexen Berechnungen wie der Kollisionserkennung zwischen den Partikeln und den Polygonen der Tischoberfläche lassen sich sehr viele Punkte finden, an denen mehr oder weniger viel Optimierungsarbeit die benötigte Zeit beeinflussen können.

In wiefern unterscheiden sich die verwendeten Module hinsichtlich ihrer Effizienz bei der Berechnung von einfachen Simulationen?

Falls gravierende Unterschiede auftreten: Können daraus Empfehlungen abgeleitet werden, welches Modul für welchen Einsatz besser geeignet ist?

Am effizientesten stellte sich ganz klar das Syflex-Modul dar. Für die meisten Szenarien wird es sicherlich die beste Wahl sein, wenn es um Stoffsimulation geht. Durch die wirklich extrem rasche Simulation ist es hier trotz des Zusammenspielens mehrerer Simulationsparameter kein großer Zeitaufwand, eine Simulation bis ins Detail so zu trimmen, dass sie auch wirklich genau so aussieht, wie der Benutzer es will.

Einziges Wermutstropfen: Dadurch, dass das Modul nicht vollständig in SoftImage integriert ist sondern als Add-In seinen Dienst tut, kann es nicht mit den standardmäßig vorhandenen dynamischen Objekten wie Gravitations- oder Windkräften zusammenarbeiten. Sollten also eine in einer Szene benötigte Stoffsimulation und andere dynamische Effekte (z. B. Festkörpersimulationen

oder Partikelsysteme) aufeinander abgestimmt werden müssen, so darf dieser Arbeitsschritt sicherlich nicht unterschätzt werden. In diesem Fall mag es vielleicht zeitlich ratsamer sein, das integrierte Cloth-Modul zu verwenden, um den Vorteil, nicht immer mehrere Kräfte justieren zu müssen, voll nutzen zu können.

Für sonstige eher einfach angelegte Szenarien kann von dieser SoftImage-Komponente eigentlich nur abgeraten werden. Außer dem Vorteil der direkten Zusammenarbeit mit anderen dynamischen Effekten sowie einer möglichen Zeitersparnis durch einige leicht zugängliche Presets sprechen eigentlich alle in dem Versuch ermittelten Werte gegen einen Einsatz dieses Werkzeuges.

Auch das Stoffobjekt von Maya kann hier nicht überzeugen sondern liefert Werte, die nur leicht besser sind als das SoftImage-Objekt.

Der Vergleich zwischen Maya und Cinema4D wiederum ist interessant: Während bei 20 Unterteilungen Maya die gestellte Aufgabe in kürzerer Zeit als „Clothilde“ bewältigt, dreht sich dieser Vorsprung bei steigenden Punktzahlen sehr rasch um: Bei 40 Unterteilungen Maya schon etwas hinter „Clothilde“ zurück, und bei 80 Unterteilungen ist die Differenz schon sehr groß.

„Clothilde“ von Cinema4D stellt aus jetziger Sicht hier einen zwar nicht idealen aber immerhin vorhandenen Kompromiss dar: Zwar kann es mit den Werten des Syflex Cloth in keiner Weise mithalten, aber in Bezug auf Maya und dem SoftImage-eigenen System scheint es auch bei größeren Stoffpunkten sehr performant zu sein.

5 Glossar

Anisotropie

Anisotropie bezeichnet die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft. In dieser Arbeit sind dies meist Stoffeigenschaften wie Biege- oder Dehnfähigkeit, die sich in Richtung der Kettfäden anders darstellen als in Richtung der Schussfäden.

B-Splines

B-Splines sind glatt verlaufende Kurven, die durch vorgegebene Stützpunkte definiert werden. Die Kurve läuft nicht unbedingt durch die Stützpunkte. Bei speziellen Splines können an den Stützpunkten auch Tangenten vorgegeben werden, um die Kurve besser an die Wünsche des Benutzers anzupassen.

Frame

Englische Bezeichnung für die Einzelbilder eines Filmes in der Videotechnik. Ein Film der z. B. mit 25 Bildern pro Sekunde abgespielt wird, hat „25 Frames per Second“ oder „25 fps“.

Freiheitsgrade

Bewegungsmöglichkeiten entlang festgelegter Achsen werden als „Freiheitsgrade“ bezeichnet. So hat ein Punkt, der sich - aus welchen Gründen auch immer - nur entlang der x- und y- Achse verschieben und um die z-Achse rotieren kann 3 Freiheitsgrade.

Grid/Plane

Die englischen Bezeichnungen für ein zweidimensionales Gitter.

Hysterese

Das Fortdauern einer Wirkung nach dem Wegfall der Ursache nennt man Hysterese. So bleibt ein Stück Stoff auch nach dem Aussetzen einer ihn

verkrümmenden Kraft noch weiterhin leicht gebogen oder bleibt ein Metall auch nach dem Einwirken einer elektrischen Kraft noch leicht magnetisch.

Kett-/Schussfäden

Dies sind Begriffe aus der Webtechnik: Die Fäden, die in den Webstuhl der Länge nach fix eingespannt sind, werden „Kettfäden“ genannt. Die quer dazu jeweils „durchgeschossenen“ Fäden sind „Schussfäden“.

Konvex

Nach außen gewölbt, von lateinisch „convexus“: gewölbt, gerundet.

Gegenteil: Konkav.

Parametrischer Zustand (Cinema4D)

Ein neu erstelltes Objekt befindet sich in Cinema4D vorerst in einem Zustand, in dem sehr leicht seine Parameter wie Größe, Unterteilungen, Radius etc. geändert werden können, jedoch noch keine Polygonkomponenten wie Punkte oder Kanten ansprechbar sind. Beim Konvertieren in ein „richtiges“ Polygonobjekt verschwinden diese direkten Einstellungsmöglichkeiten.

Partikel, Partikelsystem

Ein Partikel ist ein kleiner materieller Körper, der in 3D-Programmen meist als Teil von Partikelsystemen vorkommt, die mehrere dieser Partikel beinhalten und sie durch vorgegebene Regeln (Bewegungskräfte, Flugbahnen, ...) verbinden.

Durch das Zuweisen von Eigenschaften an die Partikel (z. B. Verwendung als Lichtquellen oder Platzhalter für geometrische Objekte) können mit

Partikelsystemen sehr differenzierte Effekte vom Wasserfall über Feuer und Rauch bis hin zu Vogelschwärmen erstellt werden.

Poisson-Effekt

Ein sich schnell bewegender Körper, z.B. ein Geschoss, mit Drall presst die Luft auf der einen Seite zusammen. Auf der anderen Seite verdünnt sich die Luft.

Wegen der höheren Reibung rollt das Geschoss auf der verdichteten Luft. Ein Rechtsdrall führt zu einer Rotation nach rechts.

Polygon, Polygonobjekt

„Polygon“ ist die Bezeichnung für eine geschlossene geometrische Form, bestehend aus drei oder mehr Liniensegmenten. „Polygonobjekte“ bestehen aus mehreren meist an einander grenzenden Polygonen.

Rekursiv

Rekursiv heißt „selbstaufrufend“ und ist eine besondere Programmiertechnik, bei der sich ein Stück Code, meist eine Funktion, selbst aufruft.

Tensorfeld

Für manche Anwendungen, zum Beispiel in der Elastizitätstheorie, ist es vollkommen ausreichend, sich Tensoren als eine Fortsetzung der Reihe Skalar, Vektor, Matrix vorzustellen. Dabei unterscheidet man Tensoren verschiedener Stufe (auch *Rang* genannt):

- Ein Tensor *nullter* Stufe ist einfach eine Zahl, auch Skalar genannt.
- Ein Tensor *erster* Stufe wird durch einen Spaltenvektor dargestellt. Im n -dimensionalen Raum hat ein solcher Tensor genau n Koeffizienten.
- Ein Tensor *zweiter* Stufe wird durch eine quadratische Matrix dargestellt, also ein Zahlenschema, in dem jeder der n^2 Koeffizienten des Tensors durch zwei Indizes bezeichnet ist.
- Ein Tensor *dritter* Stufe ließe sich durch eine würfelförmige Anordnung seiner n^3 Koeffizienten darstellen, die durch je drei Indizes "adressiert"

werden.

- Ein Tensor m -ter Stufe hat dementsprechend n^m Koeffizienten, die mit Hilfe von m Indizes auseinander gehalten werden.

(Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Tensorfeld#Tensorbegriff_der_Physik)

Young's-Modulus

Der Young's Modulus, ist eine Materialeigenschaft, die dessen Steifigkeit beschreibt und daher eine der wichtigsten Eigenschaften in der Simulation von Stoffen darstellt.

6. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2 **Schematische Darstellung des Peirce-Modells**
aus: House/Breen, 2000, S. 21
- Abbildung 3 **Querschnitt durch das Drapemeter (links); Ergebnisgraph mit Schattenwurf des Stoffes (rechts)**
aus: House/Breen, 2000, S. 25
- Abbildung 4 **Querschnitt: Stoff faltet sich unter seinem eigenen Gewicht**
aus: House/Breen, 2000, S. 31
- Abbildung 5 **Schematische Darstellung eines Stoffstückes (links); dem entsprechendes Partikel-Modell (rechts)**
aus: House/Breen, 2000, S. 57
- Abbildung 6 **Messung der Biegeeigenschaften bei der Kawabata-Analyse**
aus: House/Breen, 2000, S. 63
- Abbildung 7 **Messung der Verschiebeeigenschaften bei der Kawabata-Analyse**
aus: House/Breen, 2000, S. 63
- Abbildung 8 **Ergebnisgraphen der Kawabata-Analyse eines Stückes Baumwollstoff**
Ausschnitt aus: House/Breen, 2000, S. 64
- Abbildung 9 **Schematische Darstellung der Federtypen zwischen Partikeln**
aus: House/Breen, 2000, S. 70
- Abbildung 10 **Aufbau der Szene für die Simulationen**
Eigene Abbildung
- Abbildung 11 **Cinema4D: Eigenschaften des Simulationsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 12 **Cinema4D: Eigenschaften des Kollisionsobjektes**
Eigene Abbildung

- Abbildung 13 **SoftImage (integriertes Tool): Eigenschaften des Simulationsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 14 **SoftImage (integriertes Tool): Eigenschaften des Kollisionsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 15 **SoftImage (Syflex Cloth): Eigenschaften des Simulationsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 16 **SoftImage (Syflex Cloth): Eigenschaften des Kollisionsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 17 **Maya: Eigenschaften des Simulationsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 18 **Maya: Eigenschaften des Kollisionsobjektes**
Eigene Abbildung
- Abbildung 19 **Verwendete Federn in Cinema4D**
aus: Online-Dokumentation der Software
- Abbildung 20 **Anordnung der Federn in SoftImage (integriertes Tool)**
aus: Online-Dokumentation der Software
- Abbildung 21 **Anordnung der Federn in SoftImage (Syflex Cloth)**
aus: Online-Dokumentation der Software
- Abbildung 22 **Screenshots der Simulationsergebnisse in Cinema4D**
Eigene Abbildung
- Abbildung 23 **Screenshots der Simulationsergebnisse in SoftImage (integriertes Stoffmodul)**
Eigene Abbildung

Abbildung 24 **Screenshots der Simulationsergebnisse in SoftImage (Syflex Cloth)**

Eigene Abbildung

Abbildung 25 **Screenshots der Simulationsergebnisse in Maya**

Eigene Abbildung

7. Formelverzeichnis

- Formel 1 **Drape Coefficient D**
aus: House/Breen, 2000, S. 24
- Formel 2 **Kettenfunktion**
aus: House/Breen, 2000, S. 36
- Formel 3 **Energie eines Partikels als Summe von Einzelenergien**
aus: House/Breen, 2000, S. 58
- Formel 4 **Funktion beschreibend die rücktreibende Energie zwischen Partikeln**
aus: House/Breen, 2000, S. 60
- Formel 5 **Funktion beschreibend die Dehnungsenergie zwischen Partikeln**
aus: House/Breen, 2000, S. 60
- Formel 6 **Funktion beschreibend die Biegeenergie zwischen Partikeln**
aus: House/Breen, 2000, S. 60
- Formel 7 **Funktion beschreibend die Verschiebeenergie zwischen Partikeln**
aus: House/Breen, 2000, S. 60
- Formel 8 **Dehnungsenergie in einem Fadenstück dS**
aus: House/Breen, 2000, S. 65
- Formel 9 **Biegeenergie eines einzelnen Fadens**
aus: House/Breen, 2000, S. 65
- Formel 10 **Biegeenergie eines Stoffsegment, welches ein Partikel repräsentiert**
aus: House/Breen, 2000, S. 66
- Formel 11 **Berechnung der Krümmung**
aus: House/Breen, 2000, S. 66
- Formel 12 **Definition der Arbeit**
aus: House/Breen, 2000, S. 66

Formel 13 Verschiebeenergie

aus: House/Breen, 2000, S. 66

Formel 14 Stofffeder: Kraftfunktion der Abstandsfeder

aus: House/Breen, 2000, S. 70

Formel 15 Stofffeder: Kraftfunktion der Biegunsfeder

aus: House/Breen, 2000, S. 71

Formel 16 Stofffeder: Kraftfunktion der Drehfeder

aus: House/Breen, 2000, S. 71

Formel 17 Funktion des Luftwiderstands der durch einen Partikel repräsentierten Fläche

aus: House/Breen, 2000, S. 75

8. Quellenverzeichnis

- 1 House, Donald H./Breen, David E., Cloth Modeling and Animation, 2000
- 2 Oshita, Masaki/Makinouchi, Akifumi, Real-time Cloth Simulation with Sparse Particles and Curved Faces, 2001,
<http://www.db.is.kyushu-u.ac.jp/~moshita/paper/ca01.pdf>
- 3 Pandurangan, P./Eischen, J. W./Kenkari, H./May-Plumlee, T., Mechanics of Fabric Drape - Part I, 2004,
http://www.mae.ncsu.edu/directories/faculty/eischen/TRJ2004-Paper_1-Final.pdf
- 4 Babik, Kristopher, Cloth Modeling, 1999,
<http://davis.wpi.edu/~matt/courses/cloth/>

(Der Inhalt der unter 2 - 4 genannten Ressourcen aus dem Internet ist auf der beiliegenden CD im Ordner „Quellen“ zu finden.)

- 5 Online-Dokumentation Cinema4D 9.0
- 6 Online-Dokumentation SoftImage|XSI 4.0
- 7 Online-Dokumentation Maya

9. Index

3D-Software-Lösung	34
3D-Bereich	8
3D-Markt	35
3D-Modell	15
3D-Modul	37
3D-Problem	16
3D-Produktionen	9
3D-Programm	8
3D-Software	3, 36
3D-Software-Lösungen	55
Abstandsfeder	30
Abstoßung	24
Abstoßungsenergie	23
Add Gravity	43
Aerodynamik	15
Algorithmus	19
Alias	35, 48
AMD	36
Amirbayat	14, 15
Analyseverfahren	25
Animationsfilm	8
anisotropisch	16, 27
Apply force	41
Arbeit	29
asymmetrisch	25
Athlon	36
Aufbau	38
Ausdehnung	14

Auslenkung	19
Auswertung	11, 46
Avid	35
B-Splines	19
Backer	12
Bedingung	15
Bekleidung	8
Belastung	14, 22
Bending	14
Betriebssystem	36
Bewegung	21
Biegbarkeit	25
Biegeenergie	14, 24, 28
Biegefeder	47
Biegefestigkeit	39
Biegekraft	30
Biegesteifigkeit	14
Biegewiderstand	12, 45
Biegung	14, 16, 22, 24, 25, 41
Biegungsfeder	30
Bildschirmauflösung	36
Breen	20, 21, 48
Cinema4D	3, 35, 37, 40, 46, 48, 50, 51, 57
Cloth	21, 41, 45, 49, 55, 57
Cloth Hull	18
Clothes	48
Clothilde	35, 46, 57
Clothilde Tags	39
Cohen	19

Collide	43
Collier	17
Computeranimation	10
Computerrechenzeit	11
Computersystem	36
Constraint	14, 20
CPU	36
Create Cloth	43
Create Cloth Object	45
Create Cloth Property	45
Create Collision Object	45
Dämpfungsparameter	44
De Jong	14
Deckfläche	38
Deformation	14, 16, 17
Deformationsenergie	16
Deformationszyklus	26
Dehnfestigkeit	25, 39
Dehnung	15, 22, 24, 41, 43, 45
Dehnungsenergie	28
Dehnungsfeder	47
Dehnungskraft	14, 20
Dehnungssteifigkeit	55
Diagramm	26
Dicke	25
Differentialgleichung	21
Drape Coefficient	13
Drapemeter	17
Drehfeder	30

Drehmoment	26, 28
Durchdringung	42
Dynamik	20, 25
dynamisch	56, 57
Ebene	15, 16, 23, 24, 38, 41, 45
Eberhardt	21
Effizienz	3, 8, 9, 34, 56
Effizienzvergleich	37
Einheitszelle	14
Einschränkung	14
elastisch	14, 28, 33
Elastizität	16, 42
Elastizitätsmodell	3, 32
Elektrostatik	15
empirisch	25, 39
Energie	13-15, 20, 23, 32
Energiefunktion	24, 25, 27, 30
Energieminimierung	25
Entfernung	12
Envelope	44
Environment	41
Erkenntnisgegenstand	8
Exkurs	25
Experiment	17, 36, 37
External Envelope	44
Faden	16, 20, 22, 24, 28, 29
Fadendichte	12
Fadengitter	23
Fadenkreuzung	11, 12, 22, 23

Fadenstärke	12
Fadenzahl	12
Falte	13, 15, 18, 22
Faltenbildung	20
Feder	3, 19, 20, 33, 43, 46-48, 55
Federart	30, 46, 55
Federung	39
Festkörpersimulation	56
Film	9
Filmsequenz	10
Finite Elemente	33
Finite-Elemente-Methode	17
Firmenpräsentation	9
Force	41
Formel	21
formverändernd	32
Formveränderung	13
Forschungsfrage	32, 55
Forschungsstrategie	10, 37
Frame	37, 44, 48
Freiheitsgrad	17
GeForce2	36
Gegenstandsbenennung	8
Genauigkeit	10
Geometrie	15, 45
geometrisch	12, 18, 32, 45
Gewebe	15
Gewicht	24
Gitter	16, 18, 20, 38, 45

Gitterobjekt	45
Gleichung	21, 28
Gradient	20
Grafikkarte	36
Graph	27
Gravitation	15, 19, 39, 41, 43, 56
Gravitationskraft	41
Gravity	41
Grid	41, 43
Grossberg	12
Gummi	39
Haumann	19
Hearle	12, 14, 15
Herangehensweise	8, 11
House	20, 21
Hülle	15, 18
Hypothese	10, 31, 34, 55
Hysterese-Effekt	28
hystereseartig	27
hysteretisch	16
Inhaltsanalyse	3, 10, 37
Interaktion	16, 22
Interaktionsregeln	19
Interpretation	55
Kartesischer Raum	15
Kawabata	25, 27, 28
Kawabata-Auswertungssystem	25
Kettenkurve	18
Kettfaden	22

Kilby	16
Kollision	25, 35
Kollisions-Tag	39
Kollisionserkennung	35, 38
Kollisionskontrolle	23
Kollisionsobjekt	39, 41-44
komplex	14, 15, 32
Komplexität	9, 10, 31, 33
Kompromiss	31, 33, 34, 55, 57
Konopasek	16
konstant	28
Kraft	14-17, 19, 26, 29-31, 39, 57
Kräfteverhältnis	21
Kraftobjekt	41
Krähenfuß	15
Krümmung	15, 16, 19, 20, 26, 28, 29
Krümmungswinkel	29
Kurve	16-18, 24
Kurzfilm	9
Lichtstrahl	13
Lloyd	16
Luftdichte	31
Luftwiderstand	19, 31
Ly	15
Masse	19, 20, 23, 31, 33
Massepunkt	33, 46
mathematisch	12, 17, 32
Maxon	35
Maya	3, 35, 45, 48-50, 54, 55, 57

Medium	25
Mesh	40, 41, 43
Messfehler	35
Methodenbenennung	37
Mikrobereich	20
mikromechanisch	11, 20
Minimum, lokales	25
Modell	11, 13-22, 25, 27, 32, 33, 48
Modify	41
Norton	15
NVIDIA	36
O'Toole	17
Oberfläche	16, 19, 20, 35
Obstacle	41
Operationalisierung	34
Parameter	24, 29
parametrisch	38
Parent	19
Partikel	3, 20, 22-25, 28, 30, 31, 33, 47, 48, 55
Partikelmodell	3, 20, 21, 27, 29, 33
Partikelsystem	20, 21, 57
Peirce-Modell	11, 14, 32
Performance	34, 55
Performanceunterschied	55
physikalisch	18, 21, 28, 45
Plane	45
Poisson-Effekt	16
Polygon	19
Polygon Mesh	40, 41

Polygonobjekt	38, 47
Polygonstruktur	18
Polynomfunktion	28
Postle	14, 15
Potential	14
Potenzielle Energie	15
Preset	57
Primitive	45
Problembenennung	9
Punktmasse	19, 55
Push Length	42
Qualität	31, 34
Querschnitt	12, 16
Randbedingung	14
Rechenaufwand	33
Rechenkraft	34, 55
Rechenzeit	21, 31
Reibung	39, 41, 42, 44-46
Reibungskraft	14
rekursiv	18
Rigid Body Dynamics	40
Rudomin	18
Sargand	17
Scharniergelenk	19
Schatten	13
Scherfeder	47
Scherkraft	55
Schussfaden	22
Schwerkraft	14

Seitenansicht	36
Selbstdurchdringung	23
Selbstkollision	39
Set Obstacle	41
Shanahan	16
Shear	41
Simulation	8, 9, 11, 20, 21, 24, 29, 31, 32, 34-39, 43-45, 55, 56
Simulationsdauer	32
Simulationsdurchlauf	37
Simulationseigenschaft	39, 41, 43, 45
Simulationsergebnisse	48
Simulationsgenauigkeit	33
Simulationsmodul	3
Simulationsobjekt	36, 45, 46
Simulationsparameter	56
SoftImage	3, 8, 35, 40, 47, 49, 52, 55-57
Solver	45
Solver Scale	45
Spiegelsystem	13
Stauchung	22
Steifigkeit	18, 43
stochastisch	20
Stoff	8-11, 13-22, 24, 25, 27, 29, 31, 32, 38, 39, 42, 45, 47, 55
Stoffausschnitt	14, 15
Stoffbewegung	15, 21, 22
Stoffebene	14, 20, 22-24
Stoffeigenschaften	11
Stofffeder	29, 33
Stoffkrümmung	23

Stoffobjekt	3, 37, 39, 45, 55, 57
Stoffrand	15
Stoffsimulation	3, 8-11, 31-33, 39, 41, 56
Strasser	21
Subdivision	40
Syflex	43, 56
Syflex Cloth	3, 35, 43, 47, 49, 50, 53, 57
symmetrisch	20
Systemspeicher	36
Szene	3, 9, 35, 37, 38, 40, 41, 45, 56
Tension, Lateral	14
Tension, Longitudinal	14
Tensorfeld	15
Theoretische Reflexion	9
Theorie	14
Thingvold	19
Tisch	35-41
Tischfläche	37-40, 42
Tischoberfläche	43
Tischplatte	21
Tischtuch	35, 39, 40, 43
Toolbars	43
Torsion	14
Unterteilung	37, 38, 45, 48-50, 57
Variable	34-36
Vektor	30
Verbiegesteifigkeit	55
Verbiegung	23, 43
Verdrehung	14, 16, 23

Vereinfachung	12
Verformung	17, 23
Verformungsenergie	23
Verkrümmung	15
Verschiebbarkeit	25
Verschiebeenergie	29
Verschiebefestigkeit	39
Verschiebekraft	20, 28, 30
Verschiebewiderstand	45
Verschiebewinkel	26
Verschiebung	22, 24, 26, 41, 43
Verschiebungseffekt	23
Versuchsausgang	56
Versuchsergebnis	55
Verwebung	22
viskos	25
Vollbildmodus	37
Wavefront	48
Weber	21
Webrichtung	27
Weil	18
Welle	13
Werbepot	9
Widerstand	45
Wind	19, 29
Windkraft	39, 56
Windows	36
Winkel	12, 16, 23, 30
Young's Modulus	16

Zeit	3
Zone	14, 15
Zufallselement	25
Zylinder	16, 37