

Von computergraphischen zu haptischen  
Texturen  
Virtual Reality für den Entwicklungsbereich  
Design/Styling in der Automobilindustrie

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften  
Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.–Inform. Malte Schulze  
geboren am 30.04.1967 in Wolfsburg

2005

Referent: Prof. Dr. Franz-Erich Wolter  
Koreferent: Prof. Dr. Dietrich Peter Pretschner  
Tag der Promotion: 10.08.2005

## Kurzfassung

Virtual Reality ist das rahmengebende Forschungsgebiet der Informatik, das die hier vorliegende Arbeit adressiert. Motiviert durch eine anwendungsbezogene Aufgabenstellung des Computer Aided Styling wird die Oberflächen-simulation durch Texturen untersucht.

Computergraphische Texturen und deren Applizierung sind bekannte und akzeptierte Techniken bei der Erstellung von interaktiven Virtual Reality Simulationen. Ziel dieser Arbeit ist es, diese vorhandenen computergraphischen Texturen zur Wiedergabe eines haptischen Feedbacks nutzbar zu machen.

Die bildhaften Inhalte der computergraphischen Oberflächentexturen werden hierzu auf geometrischem Weg analysiert, um deren haptische Information zu gewinnen. Für die theoretische Modellbildung wird zunächst die fraktale Dimension als Maß für die visuelle und haptische Rauheit untersucht. Rauheit und fraktale Dimension korrespondieren, dennoch ist eine auf Basis der fraktalen Dimension implementierte haptische Simulation nicht hinreichend, um realistische Oberflächenstrukturen darzustellen.

Als für die haptische Simulation relevant erweisen sich vielmehr Symmetrieanteile der Oberflächentexturen, die auf die Symmetrien der Euklidischen Ebene zurückzuführen sind. Es wird entwickelt, wie translatorische Symmetrien detektiert werden und daß sich auf diesem Weg ein erzeugendes Primitiv des Symmetrieanteils finden läßt. Anhand dreier Experimente wird an Probanden überprüft, inwieweit die haptische Simulation von Oberflächenstrukturen auf Grundlage gefundener Primitiva akzeptiert wird. Die Experimente zeigen, daß das aus den Primitiva gewonnene haptische Feedback als Ergänzung zur visuellen Simulation als gültig erkannt werden kann.

Schlagwörter: Haptik, Texturen, Virtual Reality



## **Abstract**

Virtual Reality is the research framework of computer science, which is addressed by this thesis. Motivated by an application related goal of Computer Aided Styling, the simulation of surfaces by computer graphic textures is evaluated.

Computer graphic textures and their placement are well known and accepted techniques to implement interactive Virtual Reality simulations. This thesis aims at the use of computer graphic textures for the generation of haptic feedback. The visual content of the computer graphic surface textures is analysed in a geometric manner in order to get their haptic information. For the theoretical model a fractal dimension as a measure for visual and haptic roughness is examined first. Roughness and fractal dimension are corresponding, but a haptic simulation based only on fractal dimension and roughness is not sufficient to generate surface structure.

More relevant for the haptic simulation are the symmetrical contents of the computer graphic surface textures, which correspond with the euclidian symmetries of the plane. It is developed, how translationary symmetry is detected. If a symmetry is found a generating primitive can be obtained, which belongs to the appropriate symmetry. With means of three experiments it is examined, how the generated haptic feedback based on the primitive is accepted by probationers. The experiments show that such a haptic feedback is taken as valid, if it is given as an addition to the visual simulation.

Keywords: Haptics, Textures, Virtual Reality



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Ziele der Arbeit . . . . .	5
1.2	Struktur der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Virtual Reality und Automobilindustrie</b>	<b>9</b>
2.1	Virtual Reality: Begriff und Entwicklung . . . . .	9
2.2	VR in der Automobilindustrie . . . . .	12
2.3	Zusammenfassung . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Virtual Reality Computer Aided Styling</b>	<b>17</b>
3.1	Prozeßkette Fahrzeugentwicklung . . . . .	17
3.2	Entwicklungsbereich Design/Styling . . . . .	18
3.3	VR-CAS für konzeptuelles Styling . . . . .	21
3.4	Zusammenfassung . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Oberflächensimulation durch Texturen</b>	<b>23</b>
4.1	Texturen als gestalterisches Element im CAS . . . . .	23
4.2	Detailrepräsentation mittels Texturen . . . . .	27
4.3	Bemerkungen zur Texturgewinnung . . . . .	45
4.4	Zusammenfassung . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Haptik und Textur</b>	<b>49</b>
5.1	Allgemeine Sinnesphysiologie . . . . .	49
5.2	Psychophysik . . . . .	51
5.3	Physiologie der Haptik . . . . .	53
5.4	Haptische Simulation von Oberflächen . . . . .	56
5.5	Definitionen: Taktil, kinesthetisch, haptisch . . . . .	60
5.6	Haptisches und graphisches Rendering . . . . .	60
5.7	Vom Material zum haptischen Signal . . . . .	64
5.8	Verfeinerung des Texturbegriffs . . . . .	65
5.9	Zusammenfassung . . . . .	68

<b>6</b>	<b>Rauheit haptischer Texturen</b>	<b>69</b>
6.1	Fraktale Dimension als Maß der Rauheit . . . . .	69
6.2	Dimensionsanalyse . . . . .	76
6.3	Synthesemodell . . . . .	79
6.4	Experimente und Ergebnisse . . . . .	86
6.5	Zusammenfassung . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Symmetrieannteile haptischer Texturen</b>	<b>93</b>
7.1	Symmetriegruppen . . . . .	94
7.2	Symmetriedetektion . . . . .	98
7.3	Zusammenfassung . . . . .	104
<b>8</b>	<b>Haptische Simulation</b>	<b>107</b>
8.1	Formgebung des Symmetrieannteils . . . . .	107
8.2	Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau . . . . .	111
8.3	Experiment: Unterscheidbarkeit . . . . .	114
8.4	Experiment: Kunststoffoberflächen . . . . .	121
8.5	Experiment: Textiloberflächen . . . . .	126
8.6	Ergebnisse . . . . .	130
8.7	Zusammenfassung . . . . .	131
<b>9</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>133</b>
9.1	Diskussion . . . . .	133
9.2	Ausblick . . . . .	140
<b>A</b>	<b>Stochastische Grundbegriffe</b>	<b>143</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Virtual Reality (VR) als Möglichkeit zur Erzeugung einer künstlichen Realität ist eine faszinierende und fesselnde Vorstellung. Schon bald nachdem die Erfindung „Computer“ vor mehr als fünfzig Jahren in ein öffentliches Bewußtsein rückte, entwickelten Science Fiction Autoren Szenarien zukünftiger Welten, in denen es Computern möglich ist, dreidimensionale Universen zu erschaffen, die glaubhaft als eine reale Welt aufzufassen sind.

Besonders reizvoll für uns an solch einer Vorstellung ist sicherlich die Möglichkeit, sich in Szenarien zu bewegen, die in der Realität nicht erreichbar sind oder deren Erleben in der Realität ein zu hohes Risiko nach sich zöge. Nicht ohne Grund sind heutzutage gerade solche Computerspiele besonders beliebt, die aufwendig kreierte dreidimensionale Welten erleben lassen, wobei die Spielfigur zusätzlich eine Heldenrolle mit sich bringt.

Virtuelle Realität scheint also nicht nur künstliche Umgebungen schaffen zu können, sie liefert auch die Möglichkeit, sich in eine neue Identität zu begeben.

Solche Aspekte lassen den aufregenden und populären Charakter von Virtual Reality verständlich werden.

Ebenso offensichtlich erschließen sich aber auch die pragmatischen und seriösen Aspekte der VR: Immer perfektere Simulatoren<sup>1</sup> ermöglichen gefahrloses Training oder die Umsetzung in der Realität nicht durchführbarer Versuche.

Rasche wissenschaftliche und technologische Fortschritte bezüglich Rechner-systemen und Computergraphik gestatten seit ca. 1970 immer komplexere Simulatoren, die sich stetig an die Realität annähern. 1989 bekommt schließlich das hier adressierte Forschungsgebiet Virtual Reality seinen Namen und

---

<sup>1</sup>Man kennt hier ein breites Spektrum. Beispiele seien Simulatoren von Raum- und Luftfahrzeugen, Personen- und Lastkraftwagen, Schiffen und Schienenfahrzeugen.

erweitert den Simulationsgedanken. Es sollen nicht mehr spezielle Simulationsaufgaben sein, beliebige Realitäten sollen synthetisierbar sein.

Es sind nun nicht mehr vorrangig Militär und große Forschungseinrichtungen, die sich für VR interessieren. Auch konventionelle Industrieunternehmen beginnen zu prüfen, ob und wie VR-Technologie nutzbringend eingesetzt werden kann. Es ergibt sich hierbei nicht nur Potential in den Entwicklungsbereichen, sondern in allen Unternehmensbereichen.

Die vorliegende Arbeit „**Von computergraphischen zu haptischen Texturen — Virtual Reality für den Entwicklungsbereich Design/Styling in der Automobilindustrie**“ entstand eingebettet in ein Forschungsprojekt der Volkswagen AG zur Implementierung von VR-Methoden in den Produktentwicklungsprozeß.

Hierdurch war einerseits die Option eingelöst, eng mit dem Entwicklungsbereich Design selbst zu arbeiten, andererseits war auch die Betrachtung des gesamten Produktentwicklungsprozesses gegeben.

Schlüsseltechnologie für VR-Systeme ist die Echtzeit-Computergraphik. Sie generiert realitätsnahe Bilder bei gleichzeitiger Beibehaltung von Interaktivität. Ebenso ist realitätsnahe Visualisierung eine Minimalforderung bei designrelevanten Visualisierungsaufgaben.

Grundlage realitätsnaher Computergraphik sind wiederum Techniken der computergraphischen Texturierung. Aus technischen oder analytischen Repräsentationen werden so hochwertige Darstellungen sichtbar. Abbildung 1.1 stellt CAD- und VR-Darstellung gegenüber.

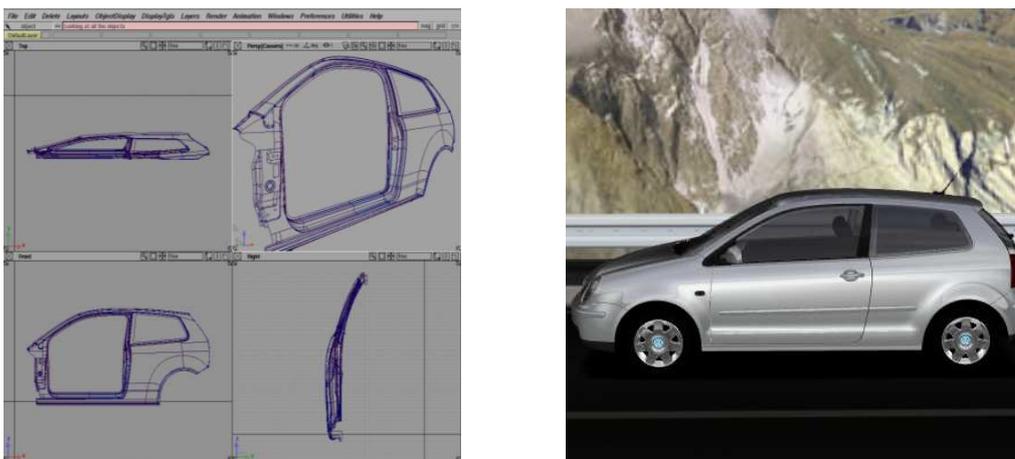


Abbildung 1.1: CAD- und VR-Darstellung

Gutes Design spricht aber nicht nur einen einzelnen menschlichen Sinn an, sondern möglichst viele. Nach dem Gesichtssinn ist für die Wahrnehmung von

Gegenständen der Tastsinn von Bedeutung. Abbildung 1.2 zeigt hierzu beispielsweise ein Detail einer Instrumententafel eines Fahrzeuginnenraums. Das Sehen **und** Erfühlen solch einer Oberflächenstruktur ermöglicht einen weitaus ganzheitlicheren Zugang zum Objekt, als die reine Betrachtung. Wenn es der Simulation gelingt, gleichzeitig realistische visuelle und haptische „Bilder“ zu erzeugen, dann ist sie glaubhafter, als wenn sie nur einzelne Sinne anspricht.



Abbildung 1.2: Oberflächenstruktur in einem Fahrzeuginnenraum

## 1.1 Ziele der Arbeit

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist es, vorhandene computergraphische Texturen zur Wiedergabe eines haptischen Feedbacks nutzbar zu machen. Es soll ein Verfahren entwickelt und verifiziert werden, das erlaubt, die in entsprechenden computergraphischen Texturen bildhaft vorhandene Information haptisch umzusetzen.

Computergraphische Texturen sind sowohl theoretisch als auch praktisch ein sehr umfangreiches Themengebiet der Computergraphik [41], [88]. Es gilt daher herauszustellen, welche Klassen und Applikationstechniken computergraphischer Texturen für Echtzeit-Computergraphik und somit für Virtual Reality Simulationen relevant sind. Die Bedeutung dieser dem Echtzeitkriterium genügenden Texturen ist grundlegend [64], [25], [40]. Ohne deren Verwendung sind keine realistischen visuellen VR-Simulationen umsetzbar, erst die entsprechenden computergraphischen Texturen machen die visuelle Simulation realitätsnah.

Jede visuell realistische VR-Simulation enthält somit immer eine Datenbasis an computergraphischen Texturen, die einen entscheidenden Informationsgehalt (zunächst nur rein visuell) in sich bergen. Festzustellen und zu über-

prüfen, wie dieser Informationsgehalt haptisch interpretiert und zur haptischen Simulation von Oberflächen dienen kann, ist Ziel dieser Arbeit. Der bildhafte Inhalt der Texturen soll fühlbar gemacht werden.

Dieser direkte Zusammenhang, ausgehend von gegebener, bzw. vorliegender graphischer Textur, zu einer abgeleiteten haptischen Textur zu gelangen, birgt mehrere anwendungsbezogene Vorteile. Bisher werden die Datenquellen für haptische Oberflächensimulation proprietär für die Erstellung des haptischen Signals erstellt [97], [14]. Diese haptischen Eingabedaten sind zusätzlich zu den visuellen Daten zu erstellen, wobei ein großes Maß an Expertenwissen notwendig ist. Als anwendungsbezogenes Ziel ist daher die Reduzierung der zur gleichzeitigen haptischen und visuellen Simulation notwendigen Eingangsdaten gesetzt. Gleichzeitig soll die Ableitung der haptischen Datenquelle aus der graphischen eine direkte Aussagefähigkeit der so mit Virtual Reality Simulationen untersuchten Fragestellungen ermöglichen<sup>2</sup>. Visuelle und haptische Simulation sollen reproduzierbar miteinander korrespondieren.

Um die zu simulierenden graphischen Texturen bezüglich ihrer haptischen Informationen zu analysieren, wird ein völlig neuer Weg beschritten: Die haptischen Eigenschaften der gegebenen bildhaften Darstellung sollen mit geometrischen Methoden analysiert und ausgedrückt werden, im Gegensatz zur klassischen Bildanalyse, die hier signaltheoretische Ansätze verfolgt [45]. Ziel ist zu entwickeln, wie und inwieweit geometrische Eigenschaften des Bildinhalts von Texturen haptische Charakteristika beschreiben können. Mit Hilfe der auf geometrischem Weg gefundenen Analyseergebnisse soll dann die entsprechende haptische Simulation erfolgen.

Unter Berücksichtigung der ins Auge gefaßten Anwendungen sollen die entwickelten geometrischen Verfahren experimentell überprüft werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Problemstellungen sollen die Informatik um Erkenntnisse und Methoden bereichern, die sich im Forschungsgebiet Virtual Reality durch dessen interdisziplinären Charakter angemessen wiederfinden. Besonderes Gewicht wird dabei problemgemäß auf die Teilgebiete Computergraphik und Mensch-Computer-Interaktion gelegt werden.

Zusammenfassend läßt sich die allgemeine Fragestellung, mit der sich diese Arbeit beschäftigt, wie folgt formulieren: „Wie kann die visuell realistische computergraphische Echtzeit-Simulation von Oberflächenstrukturen als Grundlage für die haptische Simulation verwendet werden?“

---

<sup>2</sup>Im Entwicklungsbereich Design/Styling wäre es denkbar, Designentscheidungen nicht an aufwendigen und teuren physikalischen Prototypen zu treffen, sondern mit Hilfe adäquater VR-Simulation. Sollen hier Entscheidungen getroffen werden, muß die Simulation deterministisch erstellt werden

## 1.2 Struktur der Arbeit

Im Anschluß an diese Einleitung widmet sich Kapitel 2 „**Virtual Reality und Automobilindustrie**“ einer Betrachtung zum Forschungsgebiet VR und dessen speziellem Potential im Kontext der Automobilindustrie.

Kapitel 3 „**Virtual Reality Computer Aided Styling**“ analysiert nun im Detail die Anforderungen und Möglichkeiten des uns hier interessierenden Entwicklungsbereichs Design. Es werden für Virtual Reality Computer Aided Styling unabdingbare Anforderungen herausgearbeitet. Als Schlüsselanforderung erweist sich die realistische aber zugleich auch interaktive Darstellung. Computergraphische Verfahren, die sowohl realistisch als auch interaktiv sind, garantieren diese häufig widersprüchlichen Eigenschaften durch die Technik der computergraphischen Texturierung.

„**Oberflächensimulation durch Texturen**“ als gestalterisches Element im Computer Aided Styling (CAS) ist der Untersuchungsgegenstand in Kapitel 4. Es werden die im Fahrzeug-Design vorhandenen textur-relevanten gestalterischen Elemente ermittelt. Diese führen zu drei Klassen von computergraphischen Texturen im VR-CAS: Objekttexturen, um modellierte Geometrie zu ersetzen, Environmenttexturen, um Lackierungseffekte zu visualisieren und schließlich die Oberflächentexturen, die nicht modellierte Strukturen von Oberflächen bildhaft darstellen.

Die Brücke zwischen computergraphischer und haptischer Textur wird in Kapitel 5 „**Haptik und Textur**“ geschlagen. Hierbei steht zunächst der Wahrnehmungsapparat des Menschen im Mittelpunkt des Interesses. Was sind die physiologischen und psychologischen Aspekte von Wahrnehmung? Es wird dargelegt, wie der menschliche haptische Wahrnehmungsapparat aufgebaut ist und auf welche Arten Haptik wahrgenommen wird. Die weiterführenden Abschnitte des Kapitel 5 widmen sich der Wiedergabe von haptischem Feedback im Allgemeinen, worauf im Anschluß gezeigt wird, wie graphisches und haptisches Rendering miteinander korrespondieren.

In der Analyse von Oberflächentexturen unterscheidet diese Arbeit zwischen den Merkmalen „Rauheit“ und „Symmetrieanteile“. Kapitel 6 „**Rauheit haptischer Texturen**“ zeigt, wie eine geometrische fraktale Dimension als Maß für die Rauheit einer gegebenen Oberflächentextur aufgefasst werden kann. Die Synthese von Rauheit über die stochastischen Prozesse Brownscher Graph und Brownsche Fläche, deren Eingangsparameter eine fraktale Dimension ist, wird implementiert und bewertet.

Die „**Symmetrieanteile haptischer Texturen**“ werden in Kapitel 7 auf die Symmetrien der Euklidischen Ebene zurückgeführt. Ebenso wie das Merkmal Rauheit mit geometrischer fraktaler Dimension korrespondiert, gibt es Abhängigkeiten der Symmetrien innerhalb graphischer Texturen von den

Symmetrien der Euklidischen Ebene. Es wird entwickelt, wie translatorische Symmetrien detektiert werden und daß sich auf diesem Weg ein erzeugendes Primitiv des Symmetrieanteils finden läßt.

Der gefundene Symmetrieanteil einer Oberflächentextur ist nun die Grundlage für den formgebenden Prozeß der „**haptischen Simulation**“ in Kapitel 8. Mittels Shape from Shading gelingt die Transformation der zweidimensionalen computergraphischen Textur in die dreidimensionale haptische Repräsentation.

Die an synthetischen Texturen durchgeführten Experimente zur Unterscheidbarkeit des Fühleindrucks von Texturen dienen der Kalibrierung der entwickelten Methode. Experimente mit realistischen Kunststoff- und Textiloberflächentexturen bewerten schließlich qualitativ.

Schließlich werden in Kapitel 9 die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert. Im Anschluß daran werden denkbare Perspektiven für nachfolgende Forschung, Entwicklung und Anwendung formuliert.

# Kapitel 2

## Virtual Reality und Automobilindustrie

Ziel dieses Kapitels ist es, den sinngebenden Rahmen der vorliegenden Arbeit vorzustellen. Der Begriff *Virtual Reality* (Abk. VR) wird eingegrenzt und es wird verdeutlicht, welche Problemstellungen die Suche nach den präsentierten Ergebnissen inspiriert haben.

### 2.1 Virtual Reality: Begriff und Entwicklung

Die Definition eines Oxymorons sollte sich bedeutungsimmanent verbieten, dennoch werden im folgenden Bedingungen formuliert, die festschreiben, was im Rahmen dieser Schrift unter *Virtual Reality* zu verstehen ist. Dieser Definitionsversuch ist nicht willkürlich. Vielmehr legt er Wert auf eine besonders enge Festschreibung und betont die Komponente „Realität“.

#### **Definition 2.1 (Virtual Reality)**

*Virtual Reality ist eine Mensch–Maschine–Schnittstelle für einen oder mehrere Benutzer, deren Ziel es ist, rechnererzeugte, künstliche Umgebungen wirklichkeitsgetreu erscheinen zu lassen, indem multi–modale Interaktionskanäle bereitgestellt sind.*

Spezifische Merkmale sind hierbei:

- Echtzeit Computergraphik
- Stereoskopische Displays
- Dreidimensionale Interaktion

- Akustisches Feedback
- Taktiler Feedback
- Physikalisch korrekte Simulation

Um VR-Systeme zu klassifizieren sind die dargebotenen Grade an Präsenz, Interaktion und Simulationsgenauigkeit geeignete Bewertungskriterien. Abbildung 2.1 illustriert deren Zusammenspiel (nach [95],[80]).

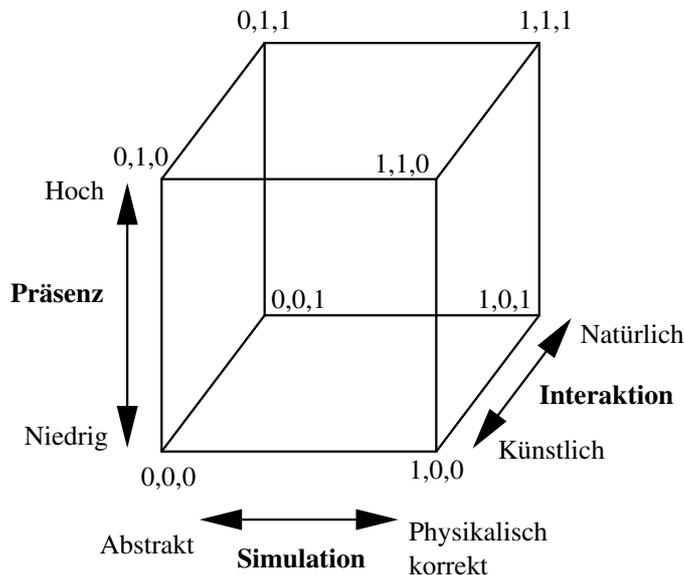


Abbildung 2.1: Klassifizierung VR-Systeme

Der Punkt (0,0,0) entspricht hierbei einer *Virtuellen Umgebung* (*Virtual Environment*, VE), die mit Papier und Bleistift erzeugt wird, Punkt (1,1,1) entspricht beispielsweise einem „High-End“ Flugsimulator.

Der Würfel ist aufzufassen als technologie-unabhängig. Koordinate (1,1,1) beschreibt also ein VE mit höchster Benutzer-Präsenz, physikalischer Korrektheit und Interaktion, wie sie durch momentan verfügbare Technologie zu erreichen sind.

Nicht jede mögliche VR-Anwendung verlangt in allen drei Kriterien hohe Werte. So ist eine virtuelle Montagesimulation sicherlich auf physikalische Korrektheit und Präsenz angewiesen, muß aber nicht zwangsläufig ein natürliches Interaktions-Interface bereitstellen. Andererseits muß eine gestalterisch motivierte VR-Lösung nicht vollständig physikalisch korrekt sein, um sinnvoll die angestrebten Ziele zu erreichen.

Der Ausdruck *Virtual Reality* wurde 1989 von Jaron Lanier<sup>1</sup> geprägt, um eine Idee zu transportieren und dieser einen prägnanten Namen zu geben. Diese Idee meint „die perfekte“ Erschaffung künstlicher Welten durch Computer. Inspiriert sicherlich auch durch den 1984 erschienenen Roman *Neuromancer* von William Gibson, der hierin den *cyberspace* zur Handlungsgrundlage seiner Erzählung machte.

Betrachtet man rückblickend die Entwicklung von VR, so wird deutlich, daß diese besonders eng verknüpft ist mit der Entwicklung der Computergraphik. Ohne die Ergebnisse der Forschungsarbeiten von Gouraud und Phong in den 70er Jahren wäre Virtual Reality in der Form, wie sie heute möglich ist, nicht denkbar. Weitere Arbeiten dieser Dekade zu den Themen „Modelling“, „Datenstrukturen“ und „Hidden-Surface Removal“ bereiteten den Weg zu Echtzeit-Computergraphik.

Parallel dazu wurde ebenfalls zu neuen Interaktionsgeräten publiziert. Beispielsweise veröffentlichte P. J. Kilpatrick 1976 seine Dissertationschrift „The use of a kinematic supplement in an interactive graphics system“ [48] und F. H. Raab et. al. stellten 1979 das Polhemus Tracking System vor [72].

In den 80er Jahren wurde die Entwicklung von entsprechender VR-Peripherie weiter vorangetrieben. Die Computergraphik lieferte beeindruckend realistische Ergebnisse, Rechenanlagen wurden schnell, billig und klein. Allein das Fehlen „brauchbarer“ VR-Interaktions-Geräte schien den Durchbruch dieser neuen Technologie aufzuhalten.

Schließlich standen in den beginnenden 90er Jahren sowohl erste Hardware als auch erste kommerzielle VR-Software zur Verfügung, die als Virtual Reality Lösungen vermarktet wurden. Obwohl in vielen Punkten hart an der Grenze der Benutzbarkeit, machten diese deutlich, daß VR ein ernstzunehmendes Anwendungspotential inne hat.

In ihrem 1995 veröffentlichten Bericht für die US-amerikanische Regierung bewerten Durlach und Mavor [24] VR-Technologie als besonders innovations-trächtig und geben Empfehlungen für zukünftige Forschungsschwerpunkte. Als mögliche Anwendungsfelder sehen sie, ebenso wie Kalawsky in [47], die Bereiche Entertainment, Militär, Medizin und bezüglich industrieller Nutzung die Felder Produktion und Marketing.

Der Unterhaltungssektor ist sicherlich die erste Branche, die mit VR „Geld verdienen“ konnte. Erlebnisparks und Spiel-Arcaden nutzten frühzeitig immersive VR-Systeme, aber auch für Marketingzwecke wurden Installationen vorgenommen.

---

<sup>1</sup>(Mit -)Erfinder von VR-Helm und Datenhandschuh und Entwickler erster kommerzieller VR-Software; Fortune Magazine, März 1998.

Erste „seriöse“ Anwendungen etablierten sich zunächst für planerische Aufgaben. Architektur und Stadtplanung sind besonders darauf angewiesen frühzeitig innerhalb einer Entwurfskette Bewertungen der jeweiligen Planungsdaten vorzunehmen. Sowohl durch die besondere Eignung der zu verarbeitenden Daten, als auch durch die Möglichkeit erstmals Modelle zu beurteilen, die realistische Ausdehnungen zeigen, empfiehlt sich hier VR-Technik.

Heute steht Virtual Reality kurz davor, ein akzeptiertes CAX-Werkzeug im Produktenstehungsprozeß zu werden [4]. Der folgende Abschnitt erläutert Motivation und Erwartungen für, bzw. an VR vor dem Kontext Automobilindustrie. Die getroffenen Aussagen lassen sich jedoch auf beliebige Produktentwicklung verallgemeinern.

## 2.2 VR in der Automobilindustrie

Der moderne Produktentwicklungsprozeß ist besonders bestimmt durch die Vorgabe, noch bessere Produkte in noch kürzerer Zeit auf den Markt zu bringen. Dieses beinahe als Paradigma aufzufassende Ziel initiiert in sämtlichen Bereichen industrieller Entwicklung und Fertigung die Einführung neuer Konzepte, Methoden und Technologien, die es ermöglichen, Entwicklungszeiten zu verkürzen und Qualitätsstandards zu erhöhen.

Der Verwendung von Virtual Reality Technologie wird hierbei eine große Bedeutung beigemessen. Gerade die Bereitstellung von neuen Wegen der Mensch-Maschine-Interaktion bietet Möglichkeiten rechnergestützter Produktentwicklung in Bereichen, die bisher keinen sinnvollen Rechnereinsatz erlaubten.

Ellis stellt in [26] fest, daß der gesamte Bereich des „human engineering“ durch Virtual Reality eine Erweiterung seiner Möglichkeiten erfahren kann.

Die industriellen Rahmenbedingungen, die den Bedarf an neuartigen Technologien bestimmen, werden u. a. in [8] durch Bauer et. al. entwickelt. Internationaler Wettbewerb und „novelty-oriented buyers“ bedeuten kürzere Produktlebensspannen und kürzere Innovationszyklen. VR-Planen und VR-Design sehen die Autoren als Hilfsmittel, obigen Vorgaben zu entsprechen.

Verkürzung der Produktentwicklungszeit bei gleichzeitiger Kostenersparnis erwarten ebenfalls Dai et. al.. In [18] präsentieren sie Beispielprojekte für virtuelles Prototyping im Automobilbau, wobei besonders die Verwendung originärer CAD-Daten in der VR-Umgebung betont ist. Weitere Beispiele für existierende Virtual Reality-Lösungen findet man in [36]. Besonders interessant ist eine durch die Daimler-Benz AG durchgeführte Untersuchung

zur räumlichen Wahrnehmung eines Fahrzeuginnenraumes. Es wurden hierin Vergleiche angestellt, wie potentielle Kunden einen virtuellen Innenraum beurteilen und welche Faktoren bei der Wahrnehmung relevant sind.

Schließlich präsentieren die Arbeiten [13] und [70] weitere Anwendungen, die zum Teil schon der reinen Konzeptphase, bzw. dem Stadium des „Softwareprototypen“ entwachsen sind. [13] stellt hierbei Ergebnisse des Daimler-Benz Forschungszentrums in Ulm vor, in [70] werden Lösungen des VR-Projekts der Volkswagen Fahrzeugforschung beschrieben. Zwei Anwendungen aus [70] sind z. B. „Virtuelle Datenkontrolle“ und „Virtuelle Produkt Klinik“.

Mittels „Virtueller Datenkontrolle“ kann die Anzahl physikalischer Datenkontrollmodelle vermindert werden. Solche physikalischen Modelle werden aufgebaut, um die vorliegenden CAD-Daten zu überprüfen. Die CAD-Konstruktionsdaten werden hierzu<sup>2</sup> gefräst und es wird aus den einzelnen Konstruktionsdatensätzen ein Gesamtmodell aufgebaut. Untersucht werden nun physikalische und visuelle Korrektheit und besonders auch visuelle Qualität. Werden Unstimmigkeiten oder Fehler festgestellt, müssen diese in den CAD-Daten behoben werden und es wird erneut ein physikalisches Modell erstellt. Das gefräste Datenkontrollmodell eines kompletten Fahrzeugs erzeugt einen Aufwand zwischen 3 bis 4 Tausend Arbeitsstunden und kostet somit ca. eine halbe Million DM. Durch „Virtuelle Datenkontrolle“ gelingt es nun einige physikalische Modelle zu ersetzen, da Unstimmigkeiten und Fehler schon vor dem Fräsen der Daten entdeckt werden können.

Das zweite Beispiel „Virtuelle Produkt Klinik“ ist eine Anwendung aus dem Marketing. Die Produkt Klinik ist ein etabliertes Marketinginstrument, um die Wirkung und Akzeptanz eines zukünftigen Produkts auf potentielle Kunden zu ermitteln. Zunächst wird eine entsprechend große Gruppe potentieller Kunden über Befragungen ermittelt und für die Teilnahme an der Klinik-Studie gewonnen. Den Probanden werden nun unterschiedliche Prototypen gezeigt<sup>3</sup> und sie werden dazu entsprechend befragt. Da hierbei mit Prototypen gearbeitet wird, ist ein sehr hoher Sicherheits- und Logistikaufwand zu betreiben. Vorteil der „Virtuellen Produkt Klinik“ ist auch hier wieder das Ersetzen physikalischer Modelle. Das erleichtert sowohl den Transport und es vermindert Sicherheitsrisiken. Die (stereoskopische) 1:1 Präsentation der virtuellen Modelle gestattet zudem zusätzlich die Verwendung von Varianten als Untersuchungsgegenstand.

Abgesehen von einigen Meta-Anwendungen (z.B. „Datamining“) ist die notwendige Voraussetzung für einsetzbare VR-Systeme die Verwendung von originären CAD-Daten. Es werden also keine proprietären VR-Daten erzeugt oder konstruiert, wie dies z. B. bei computergraphischen Animationen und

---

<sup>2</sup>Meist im Maßstab 1:1.

<sup>3</sup>Häufig auch im Vergleich mit aktuellen Mitbewerberprodukten.

Trickfilmen üblich ist. Nur wenn die VR-Daten den in der Produktentwicklung verwendeten CAD-Systemen entstammen, können damit verlässliche Aussagen in den verschiedenen VR-Anwendungen getroffen werden. Hierbei sind Verfügbarkeit und Komplexität die herausragenden Problemfelder.

- Verfügbarkeit  
CAD-Daten sollen ohne wesentlichen Informationsverlust und Konvertierungsaufwand in VR-Systeme importiert werden und auch wieder zurückgeführt werden können. Erschwert wird dies durch proprietäre Datenschreibungen der erzeugenden Systeme, unterschiedliche Datenarten (Flächen-, bzw. Volumenmodelle) und möglichen Informationsverlust bei Austauschformaten.
- Komplexität  
Im Vergleich zu den Daten, die beispielsweise ein Architektur-Modell beschreiben, ist die geforderte Präzision bei Konstruktionsdaten im Fahrzeugbau weitaus höher. Genauigkeiten im zehntel-Millimeterbereich sind einzuhalten und bestimmen so direkt die Komplexität der Virtual Reality Daten.

Wegbereitend für den Einsatz von VR in vorhandene Prozeßketten sind die Konzepte *Virtual Prototyping* (VP) und *Concurrent Engineering* (CE). *Virtual Prototyping* zielt darauf ab, die Anzahl der notwendigen Prototypen bei der Produktentwicklung zu reduzieren oder sogar die Anfertigung physikalischer Prototypen überflüssig zu machen. Virtuelle Prototypen können schnell reproduziert, einfach modifiziert und transportiert werden [17]. *Concurrent Engineering* erweitert die Idee VP nochmals wesentlich. Das Konzept CE beinhaltet sowohl organisatorische, als auch technische Aspekte um Produktentwicklungszeiten zu verkürzen und die Produktqualität zu verbessern. Es sollen alle an der Entwicklung eines Produkts beteiligten Gruppen Zugriff und Interaktionsmöglichkeiten auf ein und dasselbe digitale/virtuelle Modell haben können. Dieser sogenannte „Digital Mock-Up“ (DMU) steht durchgängig zur Verfügung und gestattet allgemeine Entscheidungsfindung wie auch detaillierte Modifikation. (Siehe Abbildung 2.2)

Gegenwärtig sind mehrere kommerzielle VR-Systeme zur Erzeugung Virtueller Umgebungen (VU) verfügbar. Deren Funktionalität beschränkt sich jedoch im wesentlichen auf die Erzeugung von „walkthroughs“, also zur Visualisierung. Die Benutzer manövrieren durch die virtuellen Modelle, als würden sie hindurchgehen und die Modelle anschauen. Komplexe Interaktion und erweiterte Funktionalitäten wie Simulation, Analyse und Datenrückführung sind zur Zeit noch Forschungs- und Spezialsystemen vorbehalten.

Basierend auf solch einem System [3] des Fraunhofer IGD in Darmstadt wird bei der Volkswagen AG Virtual Reality Technik bereits produktiv eingesetzt.

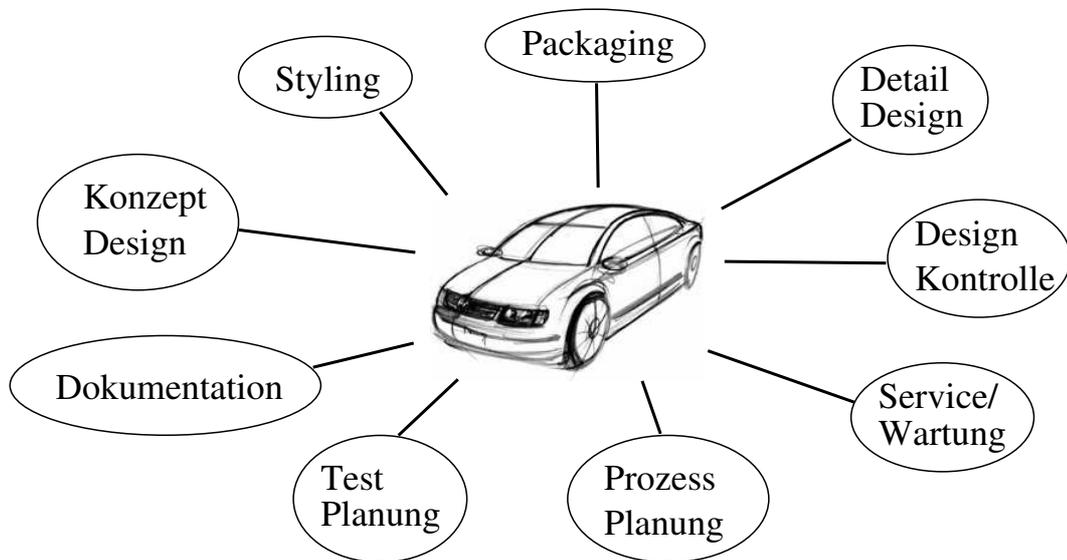


Abbildung 2.2: Die Vision von DMU (nach [19])

Beispiele hierfür sind Untersuchungen von Konstruktionsqualität, Virtuelle Marketingerhebungen und ein FEM<sup>4</sup> Analyse-Werkzeug.

Auch das in Kapitel 3 konzeptionierte System, in das einige der in dieser Schrift vorgestellten Ergebnisse eingearbeitet und untersucht wurden, basiert auf [3].

## 2.3 Zusammenfassung

Virtual Reality bietet als Mensch-Maschine-Schnittstelle besondere Möglichkeiten in der Nutzung und Interaktion mit Rechnersystemen. Durch qualitativ hochwertige Visualisierung und einfache („menschliche“) Interaktion mit den dargestellten Objekten werden diese mehr und mehr realistisch.

In kostenintensiven Entwicklungsprozessen wie denen der Automobilindustrie gestatten Virtual Reality Techniken die Optimierung und Erweiterung existierender Arbeitsweisen.

---

<sup>4</sup>Finite Elemente Modell, Methode zur Crash-Berechnung.



# Kapitel 3

## Virtual Reality Computer Aided Styling

Der Entwicklungsbereich Styling ist ein entscheidendes Glied einer Prozeßkette. Während CAX-Technologie in Konstruktion und Entwicklung als akzeptiertes „Standardwerkzeug“ angesehen werden kann, ist ihr Einsatz im Styling nicht sehr weit verbreitet. Einer der wesentlichen Gründe hierfür ist sicherlich die bestehende Diskrepanz zwischen den intuitiven und inspirativen Arbeitsweisen im Styling und dem durch Rechensysteme geforderten Arbeiten. Nach der Analyse einer exemplarischen Prozeßkette „Fahrzeugentwicklung“ werden an dieser Stelle die speziellen Anforderungen im Styling erläutert und es wird das System skizziert, in dem einige Ergebnisse dieser Arbeit umgesetzt wurden.

### 3.1 Prozeßkette Fahrzeugentwicklung

Für das Bestehen im Wettbewerb sind produzierende Unternehmen ständig gefordert Produktentwicklungskosten zu senken, Innovationszyklen zu verkürzen und dabei hoch- und höherwertige Produkte zu entwickeln [5]. Es existiert also jederzeit die Notwendigkeit, den Produktentstehungsprozeß zu optimieren. Dererlei Optimierungen werden und wurden fortwährend durchgeführt, so daß an vielen Stellen die Grenzen der Optimierungsmöglichkeiten erreicht sind. Zumindest in Bereichen serieller Prozeßabläufe ist oftmals wenig Spielraum für weitere Verbesserungen geblieben. Die Methoden des „simultaneous“ und „concurrent engineering“ geben dieser Tatsache Ausdruck. Um bei deren Umsetzung jedoch erfolgreich zu sein, ist die Existenz einer durchgängigen vollständig CAX-unterstützten Prozeßkette durch alle Stufen der Produktentwicklung unerlässlich [35]. Es wird festgestellt, daß in nahezu

jedem Bereich in Forschung und Entwicklung CAD-Techniken integraler Bestandteil sind, mit Ausnahme des Bereichs Styling/Design. In Abbildung 3.1 sind hierzu die üblichen Entwicklungsschleifen anhand einer allgemeinen Prozeßkette dargestellt. Die Abbildung zeigt die zur Zeit vorhandene durchgängi-

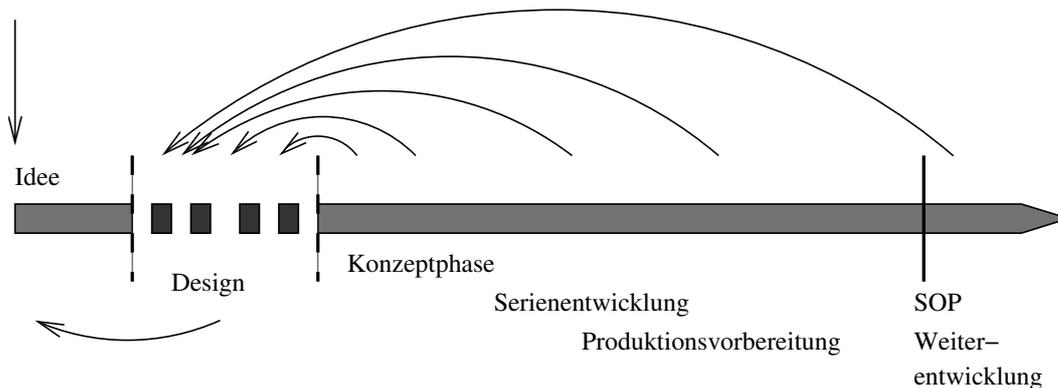


Abbildung 3.1: Allgemeine Prozeßkette: CAD Einsatz

ge CAD-Unterstützung im Verlauf der Produktentwicklung von der Idee über den SOP (Start of Production, d.h. Serienfertigung) und darüberhinaus. Im Bereich Styling/Design zeigen sich die entsprechenden Lücken. Da eine Produktentstehung nicht linear von der Idee zum fertigen „Resultat“ verläuft, sondern vielmehr die angedeuteten Schleifen nimmt, sind die vorliegenden Medienbrüche vom Styling in die vor- bzw. nachgelagerten Entwicklungsphasen besonders störend.

Ziel muß es also sein, eine komplett durchgängige Rechnerintegration zu erreichen. Daß dies bisher nicht möglich war, liegt daran, daß keine hinreichend geeigneten CAX-Lösungen für die speziellen Anforderung im Styling/Design umgesetzt werden konnten.

## 3.2 Anforderungen des Entwicklungsbereichs Design/Styling

Als grundlegendes Hindernis für den CAX-Einsatz im Styling ist die mangelhafte Mensch-Maschine-Schnittstelle identifiziert worden. Dekker entwirft hierzu in [22] ein Szenario, in dem mittels Sprachein- und Ausgabe, Gestenerkennung, angebundener Produktdatenbank und künstlicher Intelligenz im gestalterischen Bereich gearbeitet werden kann. Herkömmliche Benutzerschnittstellen entsprechen Dekkers Ansicht nach nicht den designtypischen Arbeitsweisen.

In seiner Analyse zu klassischen CAD-Techniken im gestalterischen Prozeß kommt Tovey in [81] und [82] zu ähnlichen Ergebnissen. Rechnerbasierte Systeme unterstützen nicht die Ausdrucksformen eines kreativen, intuitiven Arbeitsstils und bieten nicht die Möglichkeit, die gewohnte „form language“ und „graphics language“ ausdrücken zu können.

Abgeleitet aus ähnlichen Untersuchungen wie denen von Tovey formulieren di Giusto und Robinson in [35] und Boulanger in [11] Anforderungen für potentielle Computer Aided Styling (CAS) Systeme:

### **Kreativ/künstlerische Anforderungen**

- Intuitive,  
d. h. schnelle, unkomplizierte Umsetzung der kreativen Energie
- Geschwindigkeit  
Es ist inakzeptabel im kreativen Prozeß auf Reaktionen des Rechensystems zu warten
- Qualitativ beste Visualisierung
- Flexibilität  
Anwendbar sowohl für Interior/Exterior, Neue Projekte/Facelifts, . . .
- Individualität  
Individuelle Arbeitsweisen müssen ausdrückbar sein („Handschrift“)

### **CAD basierte, industrielle Anforderungen**

- Datentransparenz (Software)  
Sämtliche in der Prozeßkette integrierte Systeme sollten die erzeugten Daten handhaben können
- Einbindung in heterogene Systeme (Hardware)
- Mathematische Genauigkeit
- Schnelle Gewinnung von physikalischen Modellen aus den erzeugten Daten

Neben den offensichtlichen allgemeinen Vorteilen einer durchgängigen Prozeßintegration nennt [35] nochmals explizit Vorteile einer CAS Implementation, bzw. Integration bezüglich kommunikativer Schnittstellen:

**Design ↔ Engineering**

- Durchgängige, einheitliche Beschreibung der Produktdaten von Anfang an
- Früher Zugang zu den Daten für alle Beteiligten, auch über Entwicklungsabteilungen hinaus (z. B. Marketing)
- Möglichkeit zur Durchführung von feasibility Untersuchungen zu frühem Zeitpunkt

**Design ↔ Top Management**

- Frühe Präsentation von Ideen ermöglicht frühe Entscheidungsfindung
- Hochwertige Visualisierung erleichtert die Kommunikation der Ideen
- Plausibilität
  - a) Realistische Präsentation erlaubt einfache Erfassbarkeit der Entwürfe
  - b) Dank des Abgleichs mit den anderen Entwicklungsdaten ist sichergestellt, daß die präsentierten Entwürfe kompatibel zu den anderen Gruppen im Projekt sind
- Präsentation von Modellen in unterschiedlichen Umgebungen
- Exakte Wiederholbarkeit der Präsentationsumgebungen

Vergleicht man die Anforderungen, die einerseits an CAS gestellt werden und bedenkt man andererseits die Potentiale, die Virtual Reality Technik liefert, so liegt es nahe, CAS mit Hilfe von VR zu unterstützen. Mannigfaltige Parallelen lassen sich ausmachen. So bietet VR systemimmanent eine sehr hohe Visualisierungsqualität, einen hohen Grad an Immersion<sup>1</sup> und erweiterte Möglichkeiten der Interaktion. Gerade die letzteren beiden lassen erwarten, daß der kreative Zugang zu den zu bearbeitenden Objekten leichter ist [15]. Wie in Kapitel 4 dargestellt wird, erlaubt die Verwendung von computergraphischen Texturen eine adäquate Umsetzung von gestalterischen Ideen mittels VR-Methoden. Ohne deren effektive Detailrepräsentation sind realistische Stylingkonzepte nicht darstellbar.

---

<sup>1</sup>„Eintauchung“; Ein hoher Grad an Immersion läßt die Benutzer stark in die Visualisierung (oder Simulation) „eintauchen“. Man entfernt sich mehr von der echten Realität und kann „sich einlassen“ auf die virtuelle Realität.

Wesentliche Stylingelemente sind jedoch nicht allein durch ihren visuellen Ausdruck bestimmt. So verlangt der Entwurf eines Produkts, mit dem Menschen interagieren, sicherlich die Berücksichtigung von ergonomischen Aspekten. Die Entscheidung, ob ein Prototyp ergonomischen Ansprüchen genügt, ist letztlich jedoch nur zu fällen, wenn der Prototyp auch angefaßt werden kann. Weniger funktional, aber in bestimmten Bereichen ebenso wichtig ist der Fühleindruck. Am Beispiel des Entwurfs eines Fahrzeuginnenraums zeigt sich dieser Zusammenhang in einer besonders wichtigen Ausprägung. Neben der Art der verwendeten Materialien bestimmt der Fühleindruck die Einschätzung der Qualität des Produkts. Da diese Einschätzung direkte Auswirkung auf den Erfolg eines zukünftigen Produkts haben wird, ist der Entwurf eines Fahrzeuginnenraums ohne die Bewertung des haptischen Eindrucks der verwendeten Materialien nicht mehr durchführbar. Aus diesem Grund muß auch die virtuelle Modellierung in der Lage sein, entsprechende haptische Eindrücke zu vermitteln.

### 3.3 VR-CAS für konzeptuelles Styling

Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau des CAS-Systems. Es ist als Modul in einem VR-Basissystem integriert, welches Grundfunktionalitäten bereitstellt, wie graphisches Rendering und die Kontrolle über die meisten IO-Schnittstellen.

Neben dem obligatorischen graphischen Rendering unterstützt das CAS-Modul auch die Gabe von haptischem Feedback.

Sämtliche Funktionalitäten sind dahingehend konzeptioniert, daß sie in kollaborativen Arbeitssitzungen verwendet werden können. In Abbildung 3.2 verdeutlichen die Blöcke „Session Server“ und „Session Kommunikation“ einmal das Modul, welches die einzelnen Sitzungen synchronisiert und zum Anderen das Modul, welches für die einzelnen Sitzungen die notwendigen Kommunikationsaufgaben übernimmt.

Schließlich basiert die Arbeit mit dem System auf einer zentralen Produktdatenbank (PDM) und auf einer (gegenwärtig) proprietären Datenbank, die materialbezogene Informationen bereithält. Sind solche VR-spezifischen Daten in ein allgemeines Produktdatenmodell einbezogen, ist der Zugriff auf eben dieses ausreichend.

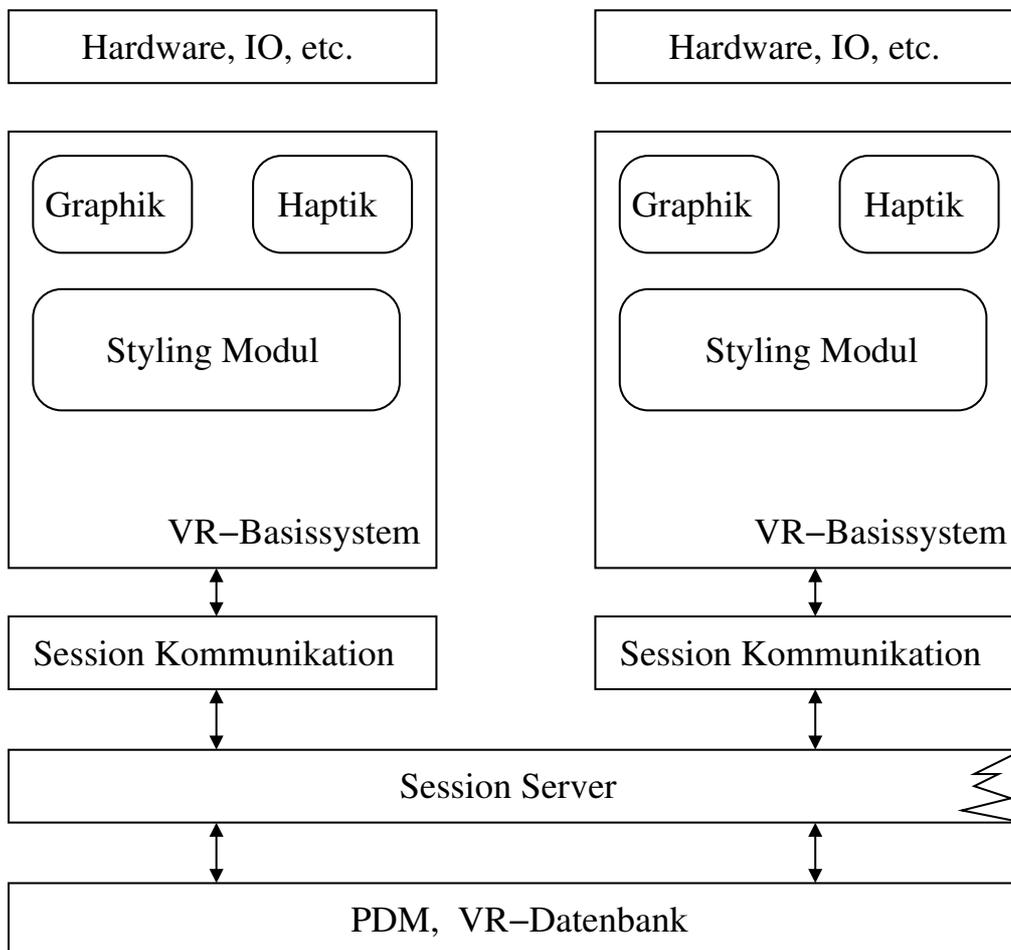


Abbildung 3.2: VR-CAS Komponenten

### 3.4 Zusammenfassung

Eine durchgängige Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses durch rechnergestützte Werkzeuge (CAX) birgt ein großes Potential an Effektivitätssteigerung und Kostenersparnis. Wenn CA-Daten von Prozeßschritt zu Prozeßschritt weitergereicht werden können, bzw. durch frühzeitige Verfügbarkeit allen am Prozeß Beteiligten zur Verfügung stehen, entstehen keine „Brüche“ an den Prozeßschnittstellen und Informationen sind sofort zum Zeitpunkt ihrer Erstellung abrufbar.

Virtual Reality Computer Aided Styling kann die herkömmliche Verwendung von Rechnersystemen interaktiver und immersiver machen und kommt so den kreativen Arbeitsweisen im Design/Styling näher. Auch im Designprozeß können nun vermehrt CA-Methoden verwendet werden, was die Umsetzung einer durchgängigen CAX-Prozeßkette erleichtert.

# Kapitel 4

## Oberflächensimulation durch computergraphische Texturen

Zentrale Technik zur Erzeugung von realistischen virtuellen Fahrzeugmodellen ist die Methode der computergraphischen Texturierung. Ohne diese Technik ist es nicht möglich und wird es auch die nächsten Jahre nicht möglich sein, virtuelle Stylingmodelle zu kreieren, die den für VR-CAS notwendigen Kriterien genügen.

Dieses Kapitel erläutert zunächst die im Fahrzeug-Design vorhandenen „texturrelevanten“ gestalterischen Elemente und die hierbei eingesetzte Art der Texturierung.

Der darauffolgende Abschnitt resümiert allgemeine Strategien der Texturapplikation, worauf Abschnitt 4.2.3 die Verfahren vorstellt, die im Rahmen dieser Schrift als Möglichkeiten zur effizienten „nicht-manuellen“ Texturapplikation untersucht wurden.

Das Kapitel schließt mit Bemerkungen zur Texturgewinnung, die vorausgesetzt wird, aber nicht immer problemlos möglich ist.

### 4.1 Texturen als gestalterisches Element im CAS

Bei der Erstellung virtueller echtzeitfähiger Modelle allgemein, aber eben auch im besonderen Fall des Fahrzeug-Designs gilt es das geeignete Gleichgewicht zu finden zwischen bestmöglichem visuellen Ausdruck und effizienter Darstellbarkeit. Die Modelle müssen realitätsnah aussehen, dürfen aber keine zu große Anzahl an darzustellenden Polygonen aufweisen.

Bezüglich der Simplifikationstoleranzen von CAD-Modellen sind im Produktdesign enge Rahmenbedingungen vorgegeben. Die bei jeder computergraphischen Visualisierung zu erfolgende Diskretisierung durch Triangulation der parametrischen Flächenbeschreibungen basiert auf Toleranzen zwischen 0,5mm und 0,01mm Sekanten-Abweichung von der ursprünglichen Fläche. Ein durchschnittlich großer virtueller Fahrzeuginnenraum kann bei feinsten Triangulierung (0,01mm) leicht eine Polygonanzahl  $> 2.000.000$  erfordern. Würde gemäß dieser Vorgaben ein virtuelles Modell allein aus der Diskretisierung der CAD-Datenbeschreibungen erstellt, so wäre eine effiziente Echtzeit-Darstellung nicht durchführbar.

Diese Abschätzung gilt darüberhinaus nur für die Darstellung der reinen Flächenbeschreibung. Eine Repräsentation von Oberflächenstrukturen wie Stoffasern, Ledernarbungen oder Noppen-Strukturen ist hierbei nicht berücksichtigt. Sollten solche Oberflächenbeschaffenheiten mittels geometrischer Beschreibung modelliert werden, würde die Anzahl der darzustellenden Polygone „explodieren“.

Um nun das Gleichgewicht zwischen visueller Erscheinung und Datenaufkommen eines virtuellen Modells zu gewährleisten, werden computergraphische Texturen verwendet. Diese haben einen hohen Anteil an visueller Detailinformation, der nicht durch geometrische Detailinformation in die Modelle eingebracht werden muß.

Die für VR-CAS eingesetzten Texturen werden nach Art Ihrer Verwendung in drei Gruppen eingeteilt:

1. **Objekttexturen**

Texturen, die eine Geometrie ersetzen. Vornehmlich solche, die eine große Anzahl kleiner Radian aufweisen. (Abbildung 4.1)

2. **Oberflächentexturen**

Texturen, die eine Oberflächenstruktur wie z. B. Narbung, Stoff, Leder oder Noppen darstellen. (Abbildung 4.2)

3. **Environmenttexturen**

Texturen, die die Einspiegelung der Umgebung auf einem virtuellen Objekt simulieren. (Abbildung 4.4)

### 4.1.1 Objekttexturen

Objekttexturen werden eingesetzt, wenn komplette Teile eines Modells ersetzt werden sollen, die bei rein polygonaler Repräsentation ein hohes Polygonaufkommen bedeuten würden und somit aufgrund ihrer Gewichtung

innerhalb der VR-Szene eine unverhältnismäßig große Polygonanzahl einbringen. Beispiele solcher Texturen zeigt Abbildung 4.1



Abbildung 4.1: Beispiele einiger Objekttexturen

Darüberhinaus eignen sich Objekttexturen ebenfalls zur Substitution von Objekten, für die noch keine Geometriedaten vorliegen. Besonders in einer frühen Phase der Modellentwicklung können so Styling-„Themen“ gezeigt werden, die noch nicht CAD-konstruiert vorliegen.

Für beide Anwendungsfälle wird die Objekttextur auf eine Hilfsgeometrie (Trägergeometrie) aufgebracht, die der räumlichen Lage des zu ersetzenden Teils entspricht.

Es ist anzumerken, daß sich die Verwendung einfacher planarer Hilfsgeometrien nicht für sämtliche Betrachtungssituationen eignet. Konkave bzw. konvexe Objekte mit planarer Begrenzung zur umliegenden Oberfläche (z.B. Griffe) eignen sich nur bedingt [51]. Betrachtungssituationen, die nicht weitgehend senkrecht zum Objekt stattfinden, machen schnell deutlich, daß die Textur nur zweidimensional definiert ist und den dreidimensionalen Gesamteindruck der Szene stören kann.

#### 4.1.2 Oberflächentexturen

Nahezu alle realen Oberflächen besitzen eine Mikrostruktur, die bei Betrachtung durch das Auge aufgelöst wird. Oberflächentexturen sind daher Bilder von repräsentativen Ausschnitten solcher sich durch hochfrequente Farbänderungen charakterisierten Materialien. Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen hierzu Beispiele.

Es lassen sich zunächst zwei Arten von Oberflächentexturen bestimmen:

- **Regelmäßige** Oberflächentextur

- **Statistische** Oberflächentextur

„Eine **regelmäßige** Oberflächentextur besteht aus aneinandergereihten Elementarmustern (engl. primitives), welche die kleinste sich regelmäßig wiederholende Textureinheit darstellen. Die Elementarmuster stehen in einer regelmäßigen sich wiederholenden Anordnung.“ [94].

Im Fahrzeugdesign finden sich regelmäßige Texturen bei der Darstellung von Stoffen, Kunststoff- und Metallnarbungen wieder. (Abbildung 4.2)



Abbildung 4.2: Regelmäßige Oberflächentexturen

**Statistische** Oberflächentexturen sind durch ihre unregelmäßige Farbverteilung gekennzeichnet. Bei der Zerlegung einer „statistischen Struktur“ erhält man Teilstücke, die sich zwar in ihrer Feinstruktur ähneln, jedoch keine exakten Wiederholungen untereinander aufweisen. Eine statistische Textur ist lokal ähnlich, wiederholt sich global aber nicht [51].

Statistische Oberflächentexturen finden sich z. B. zur Simulation von Holz oder Leder. (Abbildung 4.3)

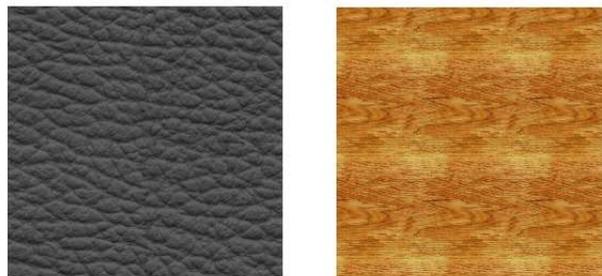


Abbildung 4.3: Statistische Oberflächentexturen

### 4.1.3 Environmenttexturen

Um Spiegelungen auf Lacken, Glas und Metalloberflächen zu simulieren, werden im VR-CAS sogenannte Environmenttexturen verwendet. Diese Texturen sind nicht „fest“ auf ein Objekt aufgebracht. Es werden vielmehr für jede Betrachtungsposition neue Texturkoordinaten berechnet. Hierdurch gleitet die Textur bei Bewegung über die Oberfläche des texturierten Objekts, was den Spiegelungseffekt bedingt. (Abbildung 4.4)

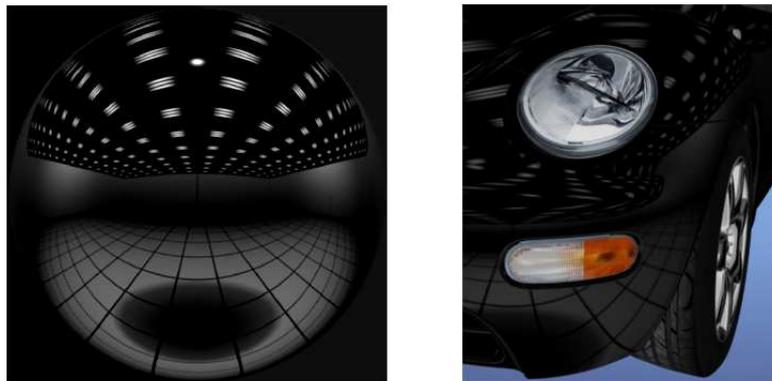


Abbildung 4.4: Environmenttextur als Bitmap und appliziert

## 4.2 Detailrepräsentation mittels Texturen

### 4.2.1 Definitionen

An dieser Stellen seien die notwendigen Definitionen für zweidimensionale Texturen gegeben. Wie Abschnitt 4.2.2.5 zeigen wird existieren noch andere Texturformen. Diese sind jedoch für den weiteren Verlauf dieser Schrift irrelevant.

#### Definition 4.1 (Farbwert)

Ein Farbwert ist ein 4-Tupel  $(r, g, b, \alpha)$ . Die  $r, g, b$  bestimmen die einzelnen Komponenten des RGB-Farbraums, wobei  $0 \leq r, g, b \leq 255$  die Anzahl der ausdrückbaren Farben bestimmt.  $\alpha$  gibt den Transparenzgrad der Farbe an.

#### Definition 4.2 (Textur)

Eine Textur  $\mathcal{T}$  ist eine zweidimensionale, quadratische Matrix von Farbwerten.

#### Definition 4.3 (Texel)

Ein Texel  $\mathbf{t}$  ist ein Element der Matrix  $\mathcal{T}$

Um unabhängig von der Größe der Textur  $\mathcal{T}$  eine Zuordnungsvorschrift formulieren zu können dienen die nächsten beiden Definitionen.

**Definition 4.4 (Texturparameterraum)**

Der Texturparameterraum  $T$  ist eine Teilmenge des  $R^2$

**Definition 4.5 (Texturkoordinate)**

Eine Texturkoordinate  $t = (u, v)$  ist ein Punkt aus dem Texturparameterraum  $T$ .

Die diskrete Textur  $\mathcal{T}$  wird injektiv in das kontinuierliche Einheitsquadrat  $[0, 1]^2$  des Texturparameterraums  $T$  eingebettet.

Um beliebig große Objekte texturieren zu können, ist es oftmals sinnvoll, eine Textur periodisch zu applizieren. Die Textur  $\mathcal{T}$  wird dazu in die Intervalle  $[n, n + 1] \times [m, m + 1] : m, n \subseteq Z$  eingebettet.

Die Texturierungsfunktion  $\varphi$  ist nun folgendermaßen definiert:

**Definition 4.6 (Texturierungsfunktion  $\varphi$ )**

Sei  $S \subseteq R^2$  eine beliebige reguläre Freiformfläche.

Die Texturierungsfunktion  $\varphi : S \rightarrow T$  ordnet jedem Punkt  $t = (u, v)$  aus  $T$  bijektiv einen Punkt  $p = (x, y, z)$  von  $S$  zu.

Es ist also:

$$\varphi = \begin{cases} T & \rightarrow R^2 \\ (u, v) & \mapsto (x, y, z) \end{cases} \quad (4.1)$$

Definition 4.6 spezifiziert den allgemeinen Fall der Freiformflächen. Computergraphische Darstellungen und besonders VR-Darstellungsprozesse verwenden Diskretisierungen der parametrischen Freiformflächen. Die Freiformflächen werden trianguliert, d. h. es werden unter Berücksichtigung entsprechender Genauigkeiten Dreiecksnetze erzeugt, die die parametrische Fläche annähern.

Es sei somit:

**Definition 4.7 (Diskrete Texturierungsfunktion  $\varphi_D$ )**

Die diskrete Texturierungsfunktion  $\varphi_D : S_D \rightarrow T$  ordnet jedem Punkt  $t = (u, v)$  aus  $T$  bijektiv einen Punkt  $p = (x, y, z)$  zu. Die Punkte  $p$  sind die Dreieckseckpunkte der Diskretisierung  $S_D$  der Freiformfläche  $S$ .

$$\varphi_D = \begin{cases} T & \rightarrow R^2 \\ (u, v) & \mapsto (x, y, z) \end{cases} \quad (4.2)$$

Es werden hierbei nur den Dreieckseckpunkten Texturkoordinaten zugewiesen. Die Texturierung der Fläche ergibt sich durch Interpolation im Scanlineverfahren, wenn das texturierte Objekt auf die Bildebene zur Darstellung auf dem Ausgabemedium projiziert wird.<sup>1</sup> (Abbildung 4.5)

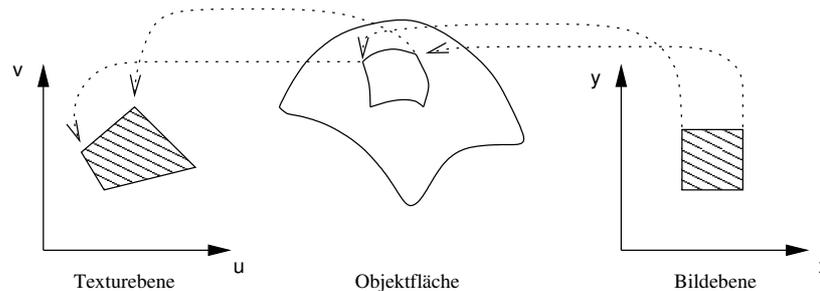


Abbildung 4.5: Texturabbildungen

Die folgenden Definitionen spezifizieren nun formal die Repräsentation von diskretisierten Flächen.

**Definition 4.8 (Graph)**

Ein **Graph**  $\mathcal{G}$  ist eine Menge von Knoten  $\mathcal{V} = \{i : i = 1, \dots, N\}$  und einer Menge von Kanten  $\mathcal{E}$ , einer Teilmenge der ungeordneten Paare  $(i, j), i \neq j$  von  $\mathcal{V}$

**Definition 4.9 (Nachbar)**

Ein Knoten  $j$  ist ein **Nachbar** des Knotens  $i$ , falls  $(i, j) \in \mathcal{E}$ . Die Menge der Nachbarn eines Knotens  $k$  wird mit  $N(k)$  bezeichnet.

**Definition 4.10 (ebener Graph)**

Ein Graph  $\mathcal{G}$  heißt **eben**, wenn er wie folgt in den  $\mathbb{R}^2$  eingebettet werden kann.

1. Jeder Knoten  $i$  wird auf den Punkt  $p_i \in \mathbb{R}^2$  abgebildet.
2. Jede Kante  $(i, j) \in \mathcal{E}$  wird auf eine Kurve mit den Endpunkten  $p_i$  und  $p_j$  abgebildet.
3. Die Kurven schneiden sich nur in den Eckpunkten

**Definition 4.11 (triangulierter Graph)**

Ein ebener Graph heißt **trianguliert**, wenn alle umrandeten Flächenstücke Dreiecke sind.

<sup>1</sup>Dieses Vorgehen ist besonders effektiv, da die zur Berechnung der Interpolation notwendigen Schritte in der Rechnerhardware ausgeführt werden können.

**Definition 4.12 (ebene Triangulierung)**

Eine ebene Triangulierung  $\mathcal{P}$  ist ein einfach verbundener, ebener Graph dessen Kanten Geraden sind.

Sei weiterhin  $\mathcal{T}$  die Menge der berandeten dreieckigen Flächenstücke von  $\mathcal{G}$ . Dann kann man  $\mathcal{G}$  in der Form  $\mathcal{G} = \mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{T})$

**Definition 4.13 (Flächen-Triangulierung)**

Eine Flächen-Triangulierung  $S = s(\mathcal{G})$  ist eine Einbettung des Graphen  $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{T})$  in den  $\mathbb{R}^3$ , wobei jedem Knoten  $i \in \mathcal{V}$  ein Punkt  $M_i \in \mathbb{R}^3$  zugeordnet ist.

**Definition 4.14 (isomorphe Graphen)**

Zwei Graphen  $\mathcal{G}_\infty$  und  $\mathcal{G}_\epsilon$  sind **isomorph**, wenn es eine bijektive Korrespondenz ihrer Kanten, Ecken und Flächenstücke derart gibt, daß:

1. zwei korrespondierende Kanten korrespondierende Knoten enthalten und
2. zwei korrespondierende Flächenstücke sowohl korrespondierende Kanten und Knoten enthalten.

**Definition 4.15 (parametrisierte Triangulierung)**

Eine parametrisierte Triangulierung einer Flächen-Triangulierung  $S(\mathcal{G})$  ist jede ebene Triangulierung  $\mathcal{P}$ , die zu  $\mathcal{G}$  isomorph ist.

## 4.2.2 Texturierungsstrategien

Bei der Texturierung von Geometrien ist das grundlegende Problem, eine geeignete Vorschrift zu finden, wie die einzelnen Texturkoordinaten den entsprechenden Punkten der Geometrie zugeordnet werden können. Es existieren hierzu zahlreiche Verfahren, die für unterschiedliche Geometrien auch unterschiedlich gut geeignet sind.

Hinsichtlich der Virtual Reality Tauglichkeit kommt eine weitere Einschränkung hinzu. Nur solche Texturierungstechniken sind akzeptabel, die es gestatten, die Interpolation der einzelnen Texel auf den Polygonen in der Rechnerhardware durchführen zu lassen.

Schließlich ist zu fordern, daß keine bzw. nur minimale manuelle Eingriffe bei der initialen Texturapplikation notwendig sind. Zwar ist es denkbar, auch komplexe Geometrien durch manuelles Zuweisen der Texturkoordinaten ansprechend zu texturieren. Solch ein Vorgehen ist im praktischen CAS-Einsatz jedoch zu zeitintensiv und scheidet daher aus.

An dieser Stelle seien nun allgemeine Prinzipien der Generation von Texturkoordinaten erläutert, um darauf im folgenden Abschnitt die Verfahren

vorzustellen, die für das entstandene VR-CAS-System implementiert wurden.

#### 4.2.2.1 Natürliche Koordinaten

Ist für die Texturierung einer polygonalen Fläche die parametrische Flächeninformation noch verfügbar, so können die Isoparameterlinien als Quelle für die Texturkoordinaten dienen.

Der Parameterraum  $(s, t)$  mit  $0 \leq s \leq 1$ ,  $0 \leq t \leq 1$  liefert eine natürliche Texturierung, indem die Parameterwerte  $(s, t)$  als Texturkoordinaten  $(u, v) \in T$  aufgefaßt werden. (Abbildung 4.6)

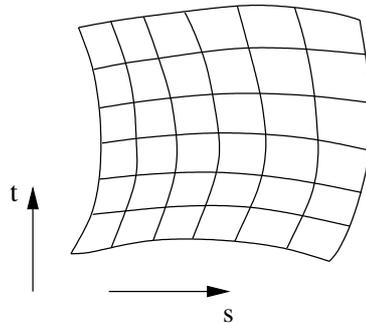


Abbildung 4.6: Parameterlinien einer Fläche

Dieses Verfahren ist jedoch nur für die Texturierung einzelner Flächen gut geeignet. Aus mehreren Flächen zusammengesetzte Objekte sowie Flächen mit getrimmten Parameterintervallen weisen hierbei Unstetigkeiten auf. Es ergeben sich vom menschlichen Auge sofort wahrnehmbare Sprünge, die störend wahrgenommen werden. [43]

#### 4.2.2.2 Intermediate Surface Mapping

Das *Intermediate Surface Mapping* (ISM) von Bier [9] ist ein zweistufiges Verfahren zur Texturierung.

Es wird zunächst auf eine Zwischenfläche  $Z$  mit bekannten Eigenschaften projiziert. Erst danach werden dem zu texturierende Objekt Texturkoordinaten zugeordnet, die von der Zwischenfläche „abgenommen“ werden. Es sind hierbei verschieden Arten der Projektion möglich und zwar in Richtung eines von der Oberfläche reflektierten Strahls, in Richtung der Objekt-Normalen, in Richtung des Objekt-Schwerpunktes und in die Richtung der Flächen-Normale der Zwischenflächen.

Als Zwischenflächen werden sinnvollerweise einfache Flächen verwendet, für die einfache Texturierungsfunktionen bekannt sind. Üblich sind Kugel, Kegel, Zylinder und Quader.

Sei z.B.

$$\begin{aligned}x &= r \sin \theta \cos \phi \\y &= r \sin \theta \sin \phi \\z &= r \cos \theta\end{aligned}$$

die Winkel-Parametrisierung einer Kugel, wobei  $r$  der Radius,  $\theta : (0 \leq \theta \leq \pi)$  der Winkel von der  $z$ -Achse und  $\phi : (0 \leq \phi \leq 2\pi)$  der Winkel von der  $x$ -Achse sind. Mit Texturkoordinaten  $(u, v) : 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$  läßt sich obige Gleichung schreiben als:

$$\begin{aligned}x &= r \sin(v\pi) \cos(u2\pi) \\y &= r \sin(v\pi) \sin(u2\pi) \\z &= r \cos(v\pi)\end{aligned}$$

Aufgelöst für  $u$  und  $v$  ist also:

$$\begin{aligned}u &= \frac{\arccos(\frac{z}{r})}{\pi} \\v &= \frac{\arccos(\frac{x}{r \sin(v\pi)})}{2\pi}\end{aligned}$$

Auch dieses Verfahren ist nur für spezielle Geometrien sinnvoll nutzbar. Zwar lassen sich Unstetigkeiten an Naht- oder Polstellen durch geeignete Texturwahl kompensieren. Dennoch treten schnell große Verzerrungen in der Texturierung auf, wenn die zu texturierenden Flächen keine großen topologischen Ähnlichkeiten zur Zwischenfläche aufweisen. [43]

#### 4.2.2.3 Planare Projektion

Bei planarer Projektion ist die Textur in eine Ebene eingebettet. Die Textur wird mittels paralleler Projektion auf die zu texturierenden Objekte projiziert. (Abbildung 4.7)

Sei  $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$  ein Punkt auf dem zu texturierenden Objekt und seien weiterhin  $\mathbf{d}_u = \begin{bmatrix} d_{u1} \\ d_{u2} \\ d_{u3} \end{bmatrix}$  und  $\mathbf{d}_v = \begin{bmatrix} d_{v1} \\ d_{v2} \\ d_{v3} \end{bmatrix}$  die beiden die Ebene aufspannenden Vektoren.

Die entsprechende Texturkoordinaten erhält man durch:

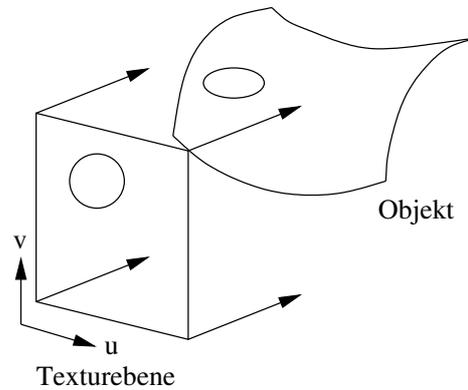


Abbildung 4.7: Planare Texturprojektion

$$u = \frac{1}{\mathbf{d}_u} \mathbf{p}$$

$$v = \frac{1}{\mathbf{d}_v} \mathbf{p}$$

Das Verfahren bietet eine einfache Skalierung der Textur über die Skalierung der Vektoren  $\mathbf{d}_u$  und  $\mathbf{d}_v$ . Darüberhinaus sichert die Parallelprojektion eine gleichmäßige Skalierung der Textur auf unterschiedlichen Objekten, unabhängig von der Entfernung der Objekte zur Projektionsebene.

Bei stark gekrümmten Geometrien treten aber auch hier unerwünschte Verzerrungen auf.

#### 4.2.2.4 Environment Mapping

Environment Mapping simuliert die Reflektion der Umgebung in einem innerhalb dieser Umgebung liegenden Objekts. Das Verfahren unterscheidet sich von den anderen Verfahren des Texture Mappings dadurch, daß das durch Environment Mapping auf dem Objekt erzeugte Bild eine Funktion des Sichtvektors  $\mathbf{V}$  ist. Ändert sich der Sichtvektor  $\mathbf{V}$ , so ändern sich auch die Texturkoordinaten auf dem Objekt.

Abbildung 4.8 zeigt hierzu das Prinzip des sphärischen Environment Mappings. Es basiert auf der Annahme, die zu reflektierende Umgebung befinde sich auf der Oberfläche (der Innenseite) einer Kugel. Der vom Objekt im Punkt  $\mathbf{O}$  reflektierte Sichtstrahl  $\mathbf{V}_r$  trifft auf der Kugel den Punkt  $\mathbf{E}$  und indiziert so die Texturkoordinaten für den Punkt  $\mathbf{O}$ .

Um das Abbildungsproblem zu vereinfachen, werden die dreidimensionalen Environment Maps in zweidimensionale Bilder transformiert, bzw. als zwei-

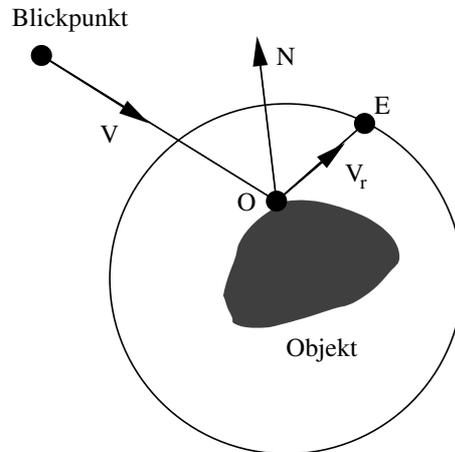


Abbildung 4.8: Environment Mapping (nach Watt [88])

dimensionale Bilder erzeugt<sup>2</sup>.

Liegen die entsprechenden Texturen vor (siehe Abbildung 4.4), so kann folgendermaßen indiziert werden:

Seien  $E(u, v)$  ein Punkt der dreidimensionalen Environment Map mit  $(0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1)$  und  $\mathbf{V}_r = (V_{rx}, V_{ry}, V_{rz})$  der Sichtvektor. Dann erhält man die Texturkoordinaten für  $\mathbf{V}_r$ :

$$u = \frac{1}{2}[1 + 1/\pi \tan^{-1}(V_{rx}, V_{rz})] \quad \text{und} \quad v = \frac{V_{ry} + 1}{2}$$

#### 4.2.2.5 Weitere Verfahren

**Bump-Mapping** Bei der Texturierung durch Bump-Mapping wird eine dreidimensionale Oberflächenstruktur simuliert, indem der im Shadingprozeß verwendete Normalenvektor der einzelnen Punkte eines Polygons durch eine Graustufentextur modifiziert wird.

Eine Änderung an den Geometriedaten wird hierbei nicht vorgenommen. Der plastische Eindruck der Oberfläche entsteht allein durch die (De-)Justierung der Normalen der darzustellenden Punkte des Polygons. (Abbildung 4.9)

Der Zugriff auf die Normalen der darzustellenden Punkte des Polygons verlangt nach dem Phong-Shading Verfahren. Da dieses Shading-Verfahren nicht echtzeitfähig ist, kann Bump-Mapping nicht für VR-CAS in Betracht kommen.

<sup>2</sup>Die Photographische Aufnahme mit einem 180° Objektiv (Fisheye) ist hierzu eine Analogie.

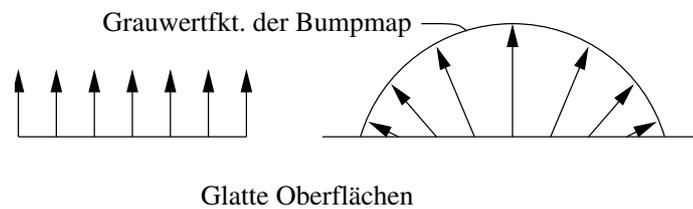


Abbildung 4.9: Prinzip des Bump-Mappings

**Solid-Texturing** Beim Solid-Texturing ist in einem begrenzten Volumen eine dreidimensionale Textur definiert. Die Oberflächentexturkoordinaten werden gefunden, indem die Geometrie mit der Solid-Textur im Raum geschnitten wird.

Jeder Oberflächen- bzw. Dreieckspunkt des Objekts bekommt den Farbwert der Textur, der der räumlichen Lage des Objekts im Volumen der Solid-Textur entspricht.

Vorteil des Verfahrens ist die verzerrungsfreie Applikation. Besonders Materialien wie Holz oder Stein lassen sich hierdurch ideal simulieren.

Praxisrelevanter VR-Einsatz dieser Technik ist jedoch durch den extrem hohen Speicherbedarf der Solid-Texturen nicht gegeben.

### 4.2.3 Verwendete Verfahren

Die Auswahl der Verfahren für das parallel zu dieser Schrift entstandene Virtual Reality Styling-System war immer bestimmt durch das Kriterium der Echtzeit-Fähigkeit. Nur wenn sichergestellt war, daß sich die Texturierungstechniken auch hardware-beschleunigt umsetzen ließen, waren sie relevant.

Texturierte Flächen zur Geometriesubstitution (Objekttexturen) werden daher mittels **planarer Projektion** erzeugt. Die Darstellung von reflektierenden Oberflächen wird durch **Environment Mapping** durchgeführt.

Für die visuelle Simulation von Oberflächentexturen wurden die drei im folgenden vorgestellten Verfahren **Planare Mehrfachprojektion**, **Energieoptimierung** und **Glatte Interpolation** umgesetzt.

Planare Mehrfachprojektion ist hierbei ein Ansatz, der Unstetigkeiten bei der Texturapplikation durch eine geeignete Zerteilung der Geometrie erreicht. Die beiden anderen Verfahren ermitteln eine Texturierung durch jeweils iterative Prozesse, wobei versucht wird, ein bestimmtes Gütemaß zu erreichen. Beide Verfahren wurden in [43] untersucht und für das VR-CAS implementiert.

#### 4.2.3.1 Planare Mehrfachprojektion

Bei planarer Mehrfachprojektion wird die mit der Oberflächentextur zu belegende Geometrie in drei Teilgeometrien unterteilt. Ausgehend von der Flächennormalen der einzelnen Dreiecke werden die Dreiecke so sortiert, daß all die Dreiecke in einer Teilgeometrie zusammengefaßt sind, bei denen die Richtung der Flächennormalen nicht mehr als  $45^\circ$  von einer der Projektionsrichtungen abweicht. Die drei Projektionsebenen sind hierbei die  $XY$ -Ebene, die  $YZ$ -Ebene und die  $XZ$ -Ebene. Es werden also all die Dreiecke, deren vorzeichenfreie Flächennormalen-Richtung nicht mehr als  $45^\circ$  von  $Z$  abweicht der Projektionsebene  $XY$  zugeordnet. (Abbildung 4.10)

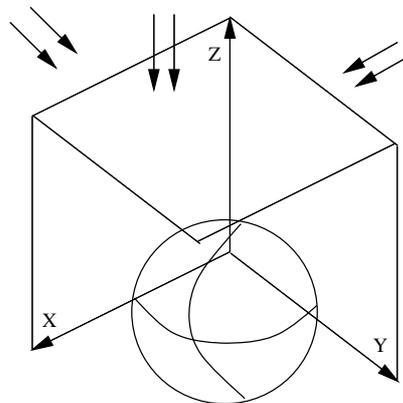


Abbildung 4.10: Planare Mehrfachprojektion

Es hat sich gezeigt, daß planare Mehrfachprojektion ein effektives und pragmatisches Verfahren darstellt, wenn komplexe Geometrien mit Oberflächentexturen zu belegen sind. Es ergeben sich jedoch stets Unstetigkeiten an den Übergängen zwischen den drei Teilgeometrien. Diese sind bei feinen Oberflächenstrukturen zu vernachlässigen. Je größer die einzelnen Strukturelemente jedoch werden, desto deutlicher werden auch die Unstetigkeiten sichtbar. Abbildung 4.11 zeigt hierzu zwei Beispiele.

#### 4.2.3.2 Energieoptimierung

Dieses Verfahren wurde in [54] vorgestellt. Es basiert auf der Idee, die Abweichung der tatsächlichen Texturierung von der idealen Texturierung zu messen und zu optimieren. Die zu applizierende Textur wird als elastische Membran aufgefaßt, die über das zu texturierende Objekt gezogen werden soll. Hierbei wird Verformungsenergie aufgewendet, die meßbar ist. Die Güte der Texturierung wird durch die aufzuwendende Verzerrungsenergie gegeben. Je geringer diese Verzerrungsenergie ist, desto besser ist auch die Texturierung. Es



Abbildung 4.11: Beispiele für planare Mehrfachprojektion

wird eine Optimierung über ein Gradientenabstiegsverfahren durchgeführt, d. h. es wird versucht, die Gradienten der entsprechend definierten Energie zu minimieren.

Die Verzerrung durch die Texturierungsfunktion  $\varphi$  lässt sich durch folgende Überlegung bewerten:

Sei  $U$  eine offene Teilmenge des  $\mathbb{R}^2$  und  $S$  eine durch  $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^3$  gegebene Oberfläche. Jedem Punkt  $(u, v)$  von  $U$  weist  $\varphi(u, v)$  einen Punkt auf der Oberfläche  $S$  zu und definiert dadurch eine triviale Abbildung auf die Oberfläche.

Die metrischen Eigenschaften solch einer Oberfläche  $S$  lassen sich durch ihre erste Fundamentalform bestimmen ([12],[16]). Das Differential der Bogenlänge  $ds^2$  einer Kurve auf einer Oberfläche  $S$

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (4.3)$$

wird *erste Fundamentalform* genannt.  $E, F, G$  sind die Koeffizienten der ersten Fundamentalform mit:

$$\begin{aligned} E &= E(u, v) = \frac{\partial \varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial u} \\ F &= F(u, v) = \frac{\partial \varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial v} \\ G &= G(u, v) = \frac{\partial \varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial v} \end{aligned} \quad (4.4)$$

In Matrixdarstellung nimmt das Bogenlängenelement folgende Form an ([10]):

$$ds^2 = d\mathbf{u}^t C d\mathbf{u}, \quad C = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial u} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial u} & \frac{\partial \varphi}{\partial v} \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$I_\varphi(u, v)$  sei die erste Fundamentalform von  $\varphi$  in Matrixdarstellung.

$$I_\varphi(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial u} & \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} & \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Die innerhalb einer gegebenen Texturierung vorliegende Verzerrungsenergie läßt sich nun über die „Abweichung“ der Matrix  $I_\varphi$  von der Einheitsmatrix  $I_d$  formulieren:

Wird  $I_d$  als Matrixform der ersten Fundamentalform aufgefasst, so ergibt sich für die Koeffizienten  $E, F, G$ :

$$E = 1, \quad F = 0, \quad G = 1. \quad (4.7)$$

$I_d$  ist somit aufzufassen als die Matrixdarstellung der ersten Fundamentalform einer Ebene ([16]).

Sei  $I_d$  die Einheitsmatrix des  $\mathbb{R}^2$  und  $\|\cdot\|$  eine beliebige Matrixnorm. Dann ist  $e = \|I_\varphi(u, v) - I_d\|^2$  ein Maß für die Verformungsenergie im Punkt  $(u, v)$ .  $e$  ist in der Mechanik als Green–Lagrange–Deformationstensor bekannt ([57]). Anschaulich wird hier bezüglich der zu findenden Texturierung mittels  $e$  bestimmt, inwieweit  $I_\varphi$  von einer isometrischen Abbildung auf eine Ebene abweicht.

Die Verformungsenergie über dem gesamten Parameterraum  $U$  ergibt sich damit zu:

$$\begin{aligned} E(U) &= \iint_U \|e\|^2 du dv \\ &= \iint_U \|I_\varphi(u, v) - I_d\|^2 du dv \\ &= \iint_U \left\| \begin{pmatrix} \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial u} - 1 & \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} & \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} - 1 \end{pmatrix} \right\|^2 du dv \quad (4.8) \end{aligned}$$

Mit der algebraischen Identität  $\|A\| = \text{spur}(A^t A)^{1/2}$  folgt aus Gleichung 4.8:

$$\begin{aligned} E(U) &= \iint_U \text{spur}((I_\varphi - I_d)^t (I_\varphi - I_d)) du dv \\ &= \iint_U \left( \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial u} - 1 \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial\varphi}{\partial u} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} \right)^2 + \left( \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial v} - 1 \right)^2 du dv \quad (4.9) \end{aligned}$$

Ist eine Fläche über paarweise disjunkte Regionen  $U_i$  definiert, dann ist die Gesamtenergie als Summe über die einzelnen Teilflächen:

$$E(U) = \sum_i E(U_i) \quad (4.10)$$

Da die durchzuführende Texturierungsaufgabe ausschließlich auf triangulierten Flächen erfolgt, läßt sich obige allgemeine Energie (Gleichung 4.10) vereinfacht diskretisieren. Abbildung 4.12 zeigt anschaulich, wie das Dreieck  $M_1 M_2 M_3$  im  $\mathbb{R}^3$  dem Dreieck  $m_1 m_2 m_3$  in der Texturebene durch  $\varphi^{-1}$  zugeordnet wird.

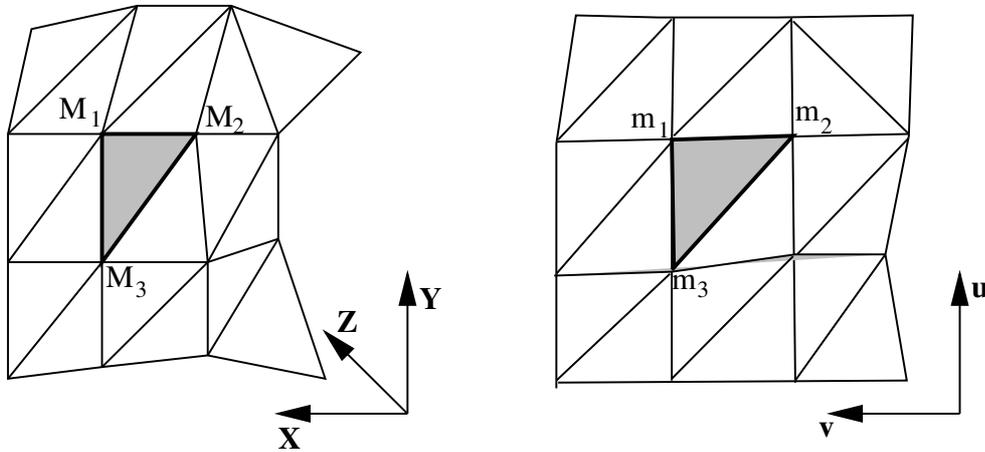


Abbildung 4.12: Texturkoordinaten einer Triangulierung

Die Länge einer Dreiecksseite im  $\mathbb{R}^3$  ergibt sich also zu:

$$D_{ij} = \|M_i - M_j\| \quad (i, j) \in \text{Kanten} \quad (4.11)$$

Entsprechend für die Länge einer Dreiecksseite in der Texturebene:

$$d_{ij} = \|m_i - m_j\| \quad (i, j) \in \text{Kanten} \quad (4.12)$$

Die Längenergie  $E_l$  der Dreiecksseiten läßt sich also definieren als:

$$\begin{aligned} E_l &= \sum_{(i,j) \in \varepsilon} \frac{(d_{ij}^2 - D_{ij}^2)^2}{D_{ij}^2} \\ &= \sum_{(i,j) \in \varepsilon} \frac{(\|m_i - m_j\|^2 - \|M_i - M_j\|^2)^2}{\|M_i - M_j\|^2} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$\varepsilon$  ist hier die „Menge der Dreiecksseiten“. Wie man sieht, wurde das Quadrat der Norm verwendet, um eine einfache Form des Gradienten zu erhalten.

Außerdem wurde die Energie mit dem Term  $\|M_i - M_j\|^2$  normiert, um die resultierende Energie nicht durch mögliche Unterteilungen von Dreiecken zu beeinflussen.

Für einen einzelnen Eckpunkt  $i$  ist nun die Längenenergie:

$$E_l(i) = 2 \sum_{m_k \text{ adjazent zu } m_i} \frac{(\|m_i - m_k\|^2 - \|M_i - M_k\|^2)^2}{\|M_i - M_k\|^2} \quad (4.14)$$

Der Gradient der Längenenergie entlang  $u$ - und  $v$ -Achse im Eckpunkt  $i$  ist also:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_l}{\partial u_i} &= 8 \sum_k \frac{(\|m_i - m_k\|^2 - \|M_i - M_k\|^2)}{\|M_i - M_k\|^2} (u_i - u_k) \\ \frac{\partial E_l}{\partial v_i} &= 8 \sum_k \frac{(\|m_i - m_k\|^2 - \|M_i - M_k\|^2)}{\|M_i - M_k\|^2} (v_i - v_k) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Die Gleichungen in 4.15 sind ausreichend, wenn Flächen mit geringer Gesamtkrümmung zu texturieren sind [54]. Bei stark gekrümmten Flächen kann jedoch der Fall eintreten, daß Dreiecksseiten durch den Optimierungsprozeß in der Texturebene überlappen, d. h. die Dreiecke ändern ihre Orientierung. Es liegt daher nahe, die Orientierung der Dreiecksflächen mit in die Ermittlung der Energie einzubeziehen.

Seien  $\det(a, b)$  die Determinante der  $2 \times 2$ -Matrix  $(a, b)$  und  $v_{ij} = m_i - m_j$  der Vektor von  $m_i$  nach  $m_j$ . Die Fläche  $f$  eines Dreiecks in der Texturebene ist dann:

$$f = \frac{1}{2} \cdot \det(v_{ij}, v_{ik}) \quad (4.16)$$

Sei weiterhin  $V_{ij} = M_i - M_j$  der Vektor von  $M_i$  nach  $M_j$ . Dann ist die Fläche  $F$  des entsprechenden Dreiecks im  $\mathbb{R}^3$ :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \|V_{ij} \times V_{ik}\| \quad (4.17)$$

Als Flächenenergie läßt sich unter Verzicht auf den konstanten Faktor definieren:

$$E_f = \sum_{i,j,k \in \mathcal{T}} \frac{(\det(v_{ij}, v_{ik}) - \|V_{ij} \times V_{ik}\|)^2}{\|V_{ij} \times V_{ik}\|} \quad (4.18)$$

$\mathcal{T}$  ist hierbei ein Dreieck im  $\mathbb{R}^3$ .

Der Gradient von  $E_f$  ergibt sich somit zu:

$$\frac{\partial E_f}{\partial u}(i) = 2 \cdot \sum_{(i,j) \in \text{Kanten}} \frac{\det(v_{ij}, v_{ik}) - \|V_{ij} \times V_{ik}\|}{\|V_{ij} \times V_{ik}\|} \cdot (v_k - v_j) \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial E_f}{\partial v}(i) = 2 \cdot \sum_{(i,j) \in \text{Kanten}} \frac{\det(v_{ij}, v_{ik}) - \|V_{ij} \times V_{ik}\|}{\|V_{ij} \times V_{ik}\|} \cdot (u_k - u_j) \quad (4.20)$$

Die letztendlich verwendete Gesamtenergie läßt sich als Linearkombination über ein entsprechendes Gewicht  $\phi$  steuern:

$$E = \phi E_l + (1 - \phi) E_f \quad (4.21)$$

Der Gesamtgradient ist somit:

$$\frac{\partial E}{\partial \nu}(i) = \phi \cdot \frac{\partial E_l}{\partial \nu}(i) + (1 - \phi) \cdot \frac{\partial E_f}{\partial \nu}(i) \quad , \nu \in u, v \quad (4.22)$$

### 4.2.3.3 Glatte Interpolation

Das Verfahren **Glatte Interpolation** wurde in [52] vorgestellt und ebenfalls in [43] umgesetzt und untersucht. In [43] sind über die folgende Darstellung des Verfahrens noch weitere Details zum effektiven Berechnungsverfahren zu finden.

Im Gegensatz zum Energieansatz werden bei diesem Texturierungsverfahren die Eigenschaften der Texturierungsfunktion  $\varphi$  direkt überprüft. Als Gütefunktion ist hierbei die Rauheit  $R^*$  definiert. Sie besteht aus zwei Teilfunktionen  $R, R_T$  und ist ein Maß für die „Glätte“ der Texturierung. Auch hier wird wieder ein Gradientenabstiegsverfahren herangezogen, um eine ausreichende Güte zu gewährleisten.

Die Teilfunktion  $R$  stellt sicher, daß eine parametrisierte Triangulierung gemäß Definition 4.15 erzeugt wird. Die Teilfunktion  $R_T$  bestimmt den Grad der Abweichung der Texturierungsfunktion  $\varphi$  bezüglich Winkel- und Längentreue.

$R$  wird in [52] folgendermaßen entwickelt:

Für Isomorphie der Flächen-Triangulierung  $S(\mathcal{G})$  und der parametrisierten Triangulierung  $\mathcal{P}$  müssen zwei Bedingungen erfüllt sein.

1. Das Bild des Randes der Oberfläche unter  $\varphi^{-1}$  im  $(u, v)$ -Parameter-raum ist ein konvexes Polygon.
2. Jeder innere Knoten ist eine Konvexkombination seiner Nachbarn.

Bedingung 1 ist anschaulich erfüllt, wenn zunächst der Rand der zu texturierenden Fläche in die Texturebene projiziert wird. Für die Überprüfung von Bedingung 2 werde die Koeffizienten  $c(i, k)$  definiert.

$$\begin{aligned} c(i, k) &> 0 && \wedge i \in N(k) \\ c(k, k) &= \sum_{i \in N(k)} c(i, k) \neq 0 && \wedge k \in \mathcal{V} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Bedingung 2 ist jetzt zu formulieren:

$$\sum_{i \in N(k) \cup k} c(i, k) \cdot m_i = 0 \quad \wedge k \in \mathcal{V} \quad (4.24)$$

Die Rauheit  $R$  wird mit Gleichung 4.24 definiert als:

$$R = \sum_{k \in \mathcal{V}} \sum_{\nu \in (u, v)} \left\{ \sum_{i \in N(k)} c(i, k) \cdot \nu_k \right\}^2 \quad (4.25)$$

Minimale Rauheit liegt vor, wenn der Gradient  $\frac{\partial R}{\partial \nu}(i) = 0$  für alle  $i \in \mathcal{E}$  und alle  $\nu \in u, v$ . Der Gradient ergibt sich zu:

$$\frac{\partial R}{\partial \nu}(i) = \frac{\sum_{k \in N(i) \cup \{i\}} \left\{ c(i, k) \sum_{\substack{j \in N(k) \cup \{k\} \\ j \neq i}} c(j, k) \cdot \nu_j \right\}}{\sum_{k \in N(i) \cup \{i\}} c(i, k)^2} \quad (4.26)$$

Um nun eine erste Näherungslösung der  $(u, v)$ -Texturkoordinaten berechnen zu können, müssen entsprechende Koeffizienten  $c(i, k)$  gewählt werden. In [52] werden hierzu harmonische Gewichte vorgeschlagen.

$$c(i, k) = \begin{cases} 1 & \text{falls } i \in N(k) \\ -\text{grad}(k) & \text{falls } i = k \end{cases} \quad (4.27)$$

Mittels Gleichung 4.26 läßt sich nun die isomorphe Abbildung von  $S(\mathcal{G})$  in die Texturebene berechnen. Da auch hier die geometrischen Eigenschaften der zugrundeliegenden Geometrie unberücksichtigt bleiben, werden diese mit Hilfe der Funktion  $R_T$  gefaßt.

Es wird zunächst die auf den einzelnen Teildreiecken der Triangulierung  $\mathcal{G}$  definierte Funktion  $\varphi_T$  eingeführt.

$$\varphi_T = \begin{cases} \mathbb{R}^3 & \rightarrow \mathbb{T} \\ (x, y, z) & \mapsto (u, v) \end{cases} \quad (4.28)$$

Es gilt  $\varphi_T = \varphi^{-1}$ .  $\varphi_T$  setzt sich komponentenweise aus den Funktionen  $\varphi_T^u$  und  $\varphi_T^v$  zusammen:

$$\begin{aligned}\varphi_T^u(x, y, z) &= u \\ \varphi_T^v(x, y, z) &= v\end{aligned}\quad (4.29)$$

Um die aufwendige Berechnung des (räumlichen) Gradienten zu umgehen, werden zweidimensionale Gradienten des lokalen Koordinatensystems der einzelnen Dreiecke herangezogen. (Abbildung 4.13)

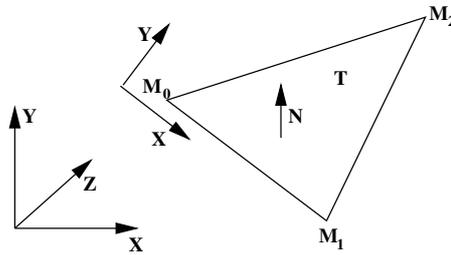


Abbildung 4.13: Lokales Koordinatensystem des Dreiecks T

Das Dreieck  $T = \alpha_0\alpha_1\alpha_2$  von  $G$  wird in einer lokalen Orthonormalbasis dargestellt. Es wird nun eine Projektion auf die durch die Basisvektoren festgelegte  $X, Y$ -Ebene durchgeführt. In diesem zweidimensionalen Koordinatensystem lassen sich die Punkte innerhalb des Dreiecks  $\alpha_0\alpha_1\alpha_2$  durch baryzentrische Koordinaten  $(D_X, D_Y)$  ausdrücken. Die zweidimensionalen Gradienten in  $X$ - und  $Y$ -Richtung zeigt Gleichung 4.30

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} &= \sum_{j=0}^2 D_X(\alpha_j) \cdot \nu \\ \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} &= \sum_{j=0}^2 D_Y(\alpha_j) \cdot \nu\end{aligned}\quad (4.30)$$

Es gilt nun noch zu prüfen, ob die Gradienten senkrecht aufeinander stehen (Orthogonalität), bzw. über die gesamte Fläche konstant sind (Längentreue). Bezüglich Orthogonalität muß für jeden Eckpunkt des Dreiecks gelten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} \cdot \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} &= 0 \\ \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} \cdot \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} &= 0\end{aligned}\quad (4.31)$$

Zusammengefaßt:

$$\frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} \cdot \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} + \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} \cdot \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} = 0\quad (4.32)$$

Gleichung 4.32 läßt sich schreiben als:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} & \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} \\ \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.33)$$

Gleichung 4.30 in Gleichung 4.33 eingesetzt ergibt dann die Bedingung für die Orthogonalität von  $\varphi_T$  an den Ecken  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  von  $T$ :

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \{0,1,2\}} \left[ v_j \cdot \left( \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} D_X(\alpha_j) + \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} D_Y(\alpha_j) \right) \right] &= 0 \\ \sum_{j \in \{0,1,2\}} \left[ u_j \cdot \left( \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} D_X(\alpha_j) + \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} D_Y(\alpha_j) \right) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Bezüglich der Längentreue ist es ausreichend zu überprüfen, ob  $\varphi_T$  jeweils für zwei benachbarte Dreiecke  $T$  und  $\tilde{T}$  konstant ist. Dazu wird eine gemeinsame Basis für die beiden benachbarten Dreiecke  $T = \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2$  und  $\tilde{T} = \alpha_0 \alpha_1 \tilde{\alpha}_2$  benötigt. Abbildung 4.14 zeigt zwei solcher Dreiecke und deren Koordinatensysteme anschaulich. Die gemeinsame Kante des Dreiecks ist der Basisvektor

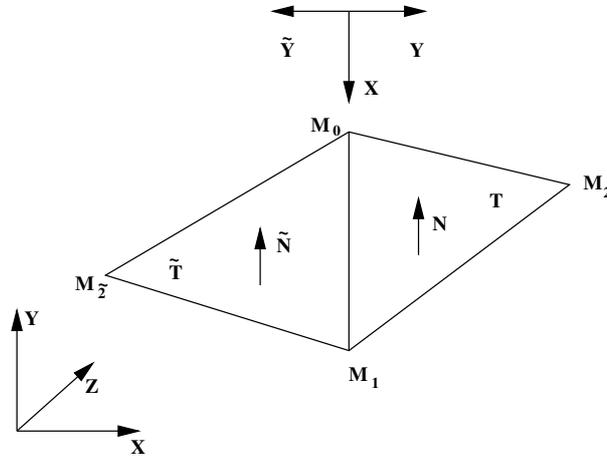


Abbildung 4.14: Gemeinsame Basis zweier Dreiecke (nach [43])

$X$  des lokalen Koordinatensystems. Dies bedingt eine Normierung der Kanten, insbesondere unterscheiden sich  $Y$  und  $\tilde{Y}$  lediglich durch das Vorzeichen. Die Bedingungen für die Identität der Gradienten zeigt Gleichung 4.35. Diese müssen an allen vier Eckpunkten der beiden Dreiecke erfüllt sein.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} &= \frac{\partial \varphi_{\tilde{T}}^u}{\partial X} & \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} &= -\frac{\partial \varphi_{\tilde{T}}^u}{\partial Y} \\ \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} &= \frac{\partial \varphi_{\tilde{T}}^v}{\partial X} & \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} &= -\frac{\partial \varphi_{\tilde{T}}^v}{\partial Y} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Umformen ergibt nun:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} - \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial X} &= 0 & \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} + \frac{\partial \varphi_T^u}{\partial Y} &= 0 \\ \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} - \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial X} &= 0 & \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} + \frac{\partial \varphi_T^v}{\partial Y} &= 0 \end{aligned} \quad (4.36)$$

Mittels der Vorzeichenfunktion  $\delta_W$

$$\delta_W = \begin{cases} -1 & \text{falls } W = X \\ +1 & \text{falls } W = Y \end{cases} \quad (4.37)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 4.30 in Gleichung 4.36 erhält man schließlich Bedingung für Längentreue zweier benachbarter Dreiecke:

$$\bigwedge_{\nu \in \{u, v\}, \bigwedge_{W \in \{X, Y\}} \left\{ \begin{array}{l} \nu_0 \cdot [D_W(\alpha_0) + \delta_W D_{\tilde{W}}(\alpha_0)] \\ + \nu_1 \cdot [D_W(\alpha_1) + \delta_W D_{\tilde{W}}(\alpha_1)] \\ + \nu_2 \cdot [D_W(\alpha_2)] \\ + \tilde{\nu}_2 \cdot [\delta_W D_{\tilde{W}}(\alpha_2)] = 0 \end{array} \right. \quad (4.38)$$

## 4.3 Bemerkungen zur Texturgewinnung

### 4.3.1 Objekttexturen

Objekttexturen werden üblicherweise auf fotografischem Weg gewonnen oder sie basieren auf statischen Renderings im qualitativ hochwertigen Ray-Tracing Verfahren.

Es ist darauf zu achten, daß sich die Objekttexturen visuell unauffällig in die dreidimensionale Geometrie mit ihren partiell unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften eingliedern. Eine gleichmäßige diffuse Ausleuchtung über die gesamte Objektfläche ist zu empfehlen. Zwar erhöhen Schlagschatten den plastischen Eindruck der Objekttextur, sie wirken jedoch in einer VR-Szene unrealistisch, da Licht- und Schattenmodulation nicht den Bewegungen des Betrachters entsprechen.

Meist ist es notwendig, die Rohvorlage mittels digitaler Bildbearbeitung zu optimieren. Die häufigsten Arbeitsschritte sind [51]:

1. Freistellen (Ausschneiden)
2. Retusche
3. Skalierung
4. Anpassung von Farbe und Kontrast

### 4.3.2 Oberflächentexturen

Bei der Erstellung einer Oberflächentextur ist darauf zu achten, daß das Ergebnis kachelbar ist. Kachelbar heißt, daß die Textur übergangslos in  $u$  und  $v$  Richtung periodisch aneinandergereiht werden kann.

Ein Licht-, Kontrast- oder Sättigungsverlauf auf einer gekachelten Oberflächentextur führt zu einem übergeordneten Muster, dessen Intensität in einer Abhängigkeit zur Beobachtungsentfernung steht. Wenn die Oberflächentextur auf fotografischen Weg gewonnen wird ist daher zu gewährleisten, daß eine gleichmäßige reflexfreie Ausleuchtung vorliegt.

Besser geeignet zur Texturgewinnung aus Materialmustern ist die Verwendung eines Scanners. Gleichmäßige Ausleuchtung ist garantiert und der Material- und Zeitaufwand sind im Vergleich zur fotografischen Aufnahme minimal [51]. Verluste an Plastizität durch den Scan-Vorgang lassen sich nachträglich leicht durch Methoden der Bildbearbeitung korrigieren.

Größere Schwierigkeiten macht die Aufbereitung von statistischen Oberflächentexturen. Es ist darauf zu achten, daß sich keine partiell auffälligen Strukturschwankungen (z. B. Astlöcher bei Holz) auf der Vorlage befinden, welche ebenfalls zu einem übergeordneten Muster führen würden.

Der Arbeitsablauf für die digitale Bildbearbeitung einer fugenlos kachelbaren Oberflächentextur ist somit [51]:

1. Retusche
2. Evtl. Erhöhen der Plastizität
3. Ränder angleichen (z. B. durch Spiegelungen)
4. Entfernen von Fugen, unerwünschten Mustern
5. Skalieren
6. Anpassung von Farbe und Kontrast

Oberflächentexturen mit regelmäßiger Struktur können darüberhinaus auch direkt synthetisch erzeugt werden. Vor allem dann, wenn technische Strukturen simuliert werden sollen.

## 4.4 Zusammenfassung

Die visuell realistische Darstellung von komplexen VR-Modellen basiert auf der Verwendung von computergraphischen Texturen. Reine Beleuchtungs-

und Schattierungsalgorithmen<sup>3</sup> lassen die dargestellten Modelle künstlich erscheinen.

Erst die zusätzliche Farb- bzw. Bildinformation aus computergraphischen Texturen liefert den gewünschten Grad an Realismus.

Um die notwendige Interaktivität einer Virtual Reality Anwendung zu gewährleisten, ist das Echtzeitkriterium einzuhalten. Das Echtzeitkriterium, also die Möglichkeit mindestens 10 Einzelbilder pro Sekunde aus einem vorliegenden VR-Modell berechnen zu können, schränkt die Art der geeigneten Texturierungstechniken ein.

Geeignet sind zweidimensionale Bitmap-Texturen, die zur Laufzeit auf die darzustellende Geometrie aufgebracht werden können, weil sie keine Berechnungs- und Generierungsvorschriften verlangen.

Abgesehen von Environmenttexturen, die den visuellen Effekt der Einspiegelung simulieren, erhöhen Objekttexturen und Oberflächentexturen den Detailgehalt der dargestellten Szene, ohne deren geometrische Komplexität zu erhöhen. Der Spezialfall Objekttextur vermindert sogar die geometrische Komplexität, da hier aufwendige geometrische Modelle durch ein „Photo“ auf einer einfachen Trägergeometrie ersetzt werden.

Oberflächentexturen simulieren die visuelle Beschaffenheit von Oberflächenstrukturen und erlauben so die realistische Darstellung von strukturierten Materialien. Da zweidimensionale Bitmap-Texturen endlich sind, ist bei Texturgewinnung, -Aufbereitung und durch geschickte Plazierungsregeln sichergestellt, daß mit „kleinen“ Texturen „große“ Flächen texturiert werden können.

---

<sup>3</sup>Gouraud-Shading, Phong-Shading.



# Kapitel 5

## Haptik und Textur

### 5.1 Allgemeine Sinnesphysiologie

Das Aufgabengebiet der allgemeinen Sinnesphysiologie ist es, die Zusammenhänge zu analysieren und zu beschreiben, die zwischen der Erregung von Sinnessystemen und den dadurch ausgelösten Empfindungen bestehen. Da Sinneseindrücke immer durch aktive Leistungen des Gehirns zustande kommen, teilt sich die Sinnesphysiologie in die Teilgebiete:

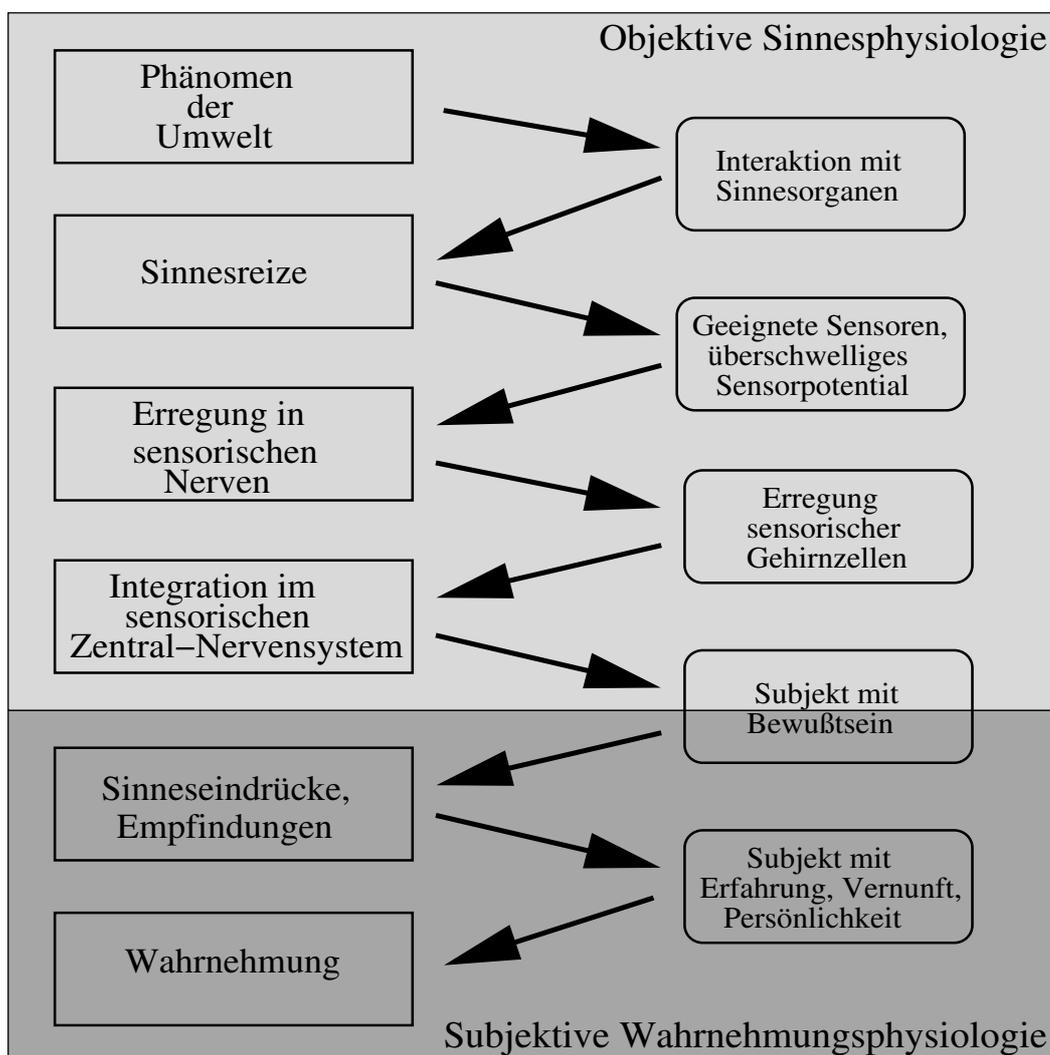
**Objektive Sinnesphysiologie:** Betrachtungsgegenstand sind hier die physikochemischen Vorgänge und deren Verarbeitung im Nervensystem.

**Wahrnehmungspsychologie** oder auch *subjektive Sinnesphysiologie* befaßt sich mit den (subjektiven) Empfindungen, die durch Sinnesreize ausgelöst werden.

Bestimmte Phänomene der Umwelt führen durch Interaktion mit den Sinnesorganen zu einem entsprechenden Sinnesreiz. Dieser Sinnesreiz wird über geeignete Sensoren und Nerven dem sensorischen Zentralnervensystem verfügbar gemacht. Unter Einwirkung des (menschlichen) Bewußtseins entsteht der Sinneseindruck, die Empfindung, die schließlich durch Erfahrung, Vernunft und Persönlichkeit die eigentliche Wahrnehmung bestimmt. Abbildung 5.1.

Von einem Sinnesorgan vermittelte Empfindungen wie Sehen, Hören, Riechen oder Schmecken werden als Sinnesmodalitäten bezeichnet. Diese Modalitäten kennen nun wiederum unterschiedliche Qualitäten. Die Farbe Rot ist z. B. eine Qualität der Modalität Sehen.

H. O. Handwerker faßt in [76] menschliches Wahrnehmen durch Sinnesorgane folgendermaßen zusammen:



Abbildungung 5.1: Abbildungsverhältnisse in der Sinnesphysiologie (nach [76])

Sinneswahrnehmungen werden in ihrer Modalität durch das aktivierte Sinnesorgan bestimmt (Gesetz der spezifischen Sinnesenergien<sup>1</sup>); die Qualitäten der Wahrnehmung spiegeln dabei die Eigenschaften des Reizes wieder. Sinnesorgane wurden in der Evolution entwickelt, um bestimmte (...) Reize (...) aufzunehmen; dies sind die adäquaten Reize (z. B. Licht beim Auge, Schall beim Ohr etc.). Diese biophysikalische oder biochemische Selektivität ist aber nicht absolut, Erregung durch inadäquate Reize ist möglich.

Neben den klassischen 5 Sinnen (Gesicht, Gehör, Geschmack, Ge-

<sup>1</sup>Sinnesmodalitäten werden nicht durch den Reiz bestimmt, sondern durch das gereizte Organ.

ruch, Gefühl) gibt es noch eine Vielzahl anderer Sinnesorgane.(...)  
Es besteht noch keine Einigung über deren Anzahl.

## 5.2 Psychophysik

In Abschnitt 5.1 wird erläutert, daß menschliche Wahrnehmung zu einem gewissen Grad subjektiv sein muss. Die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Zuordnung von (subjektiven) Empfindungsintensitäten zu physikalischen Reizen befaßt, heißt Psychophysik.

Zur objektiven Bewertung von Reizen ist der Begriff der *sensorischen (Intensitäts-) Schwelle* von zentraler Bedeutung. Hierbei werden zwei besondere Reizschwellen herausgestellt:

- **Reizschwelle** (RL, Reizlimen)  
ist die Intensität, die bei einer bestimmten Reizkonfiguration gerade noch eine Empfindung hervorruft.
- **Unterschiedschwelle** (DL, Differenzlimen; jnd, just noticeable difference)  
legt den Betrag fest, um den ein gegebener Reiz größer sein muß, um von einem vorhergehenden Reiz unterschieden werden zu können.

Millman unterscheidet in [61] vier klassische psychophysische Wahrnehmungs-Fragestellungen:

- Wahrnehmung (engl.: detection):  
Bezieht sich auf die absolute Wahrnehmungsfähigkeit. Wird ein Reiz noch als solcher erkannt?
- Unterscheidbarkeit (engl.: discrimination):  
Können zwei verschiedene Stimuli noch voneinander unterschieden werden?
- Erkennen (engl.: recognition):  
Wird eine bestimmte Anzahl von Reizen bei zufälliger Gabe immer wieder korrekt wiedererkannt?
- Einteilung (engl.: scaling):  
Wie werden empfundene Reize abgegrenzt? In konstanten Skalen, proportional oder nominal.

Als Ergebnis aus seinen Experimenten zum Kraftsinn hat E. H. Weber (1834) mit der Formulierung der Formel 5.1

$$\Delta\varphi/\varphi = c \quad \text{oder} \quad \Delta\varphi = c * \varphi \quad (\text{Webers Gesetz}) \quad (5.1)$$

die Grundlage für weitere psychophysische Beziehungen gelegt.

Webers Gesetz besagt, daß die gerade noch wahrnehmbare Änderung der Reizintensität ( $\Delta\varphi$ ) ein konstanter Bruchteil der Ausgangsintensität ( $\varphi$ ) ist. Mit Hilfe des dimensionslosen Weber Quotienten ( $\Delta\varphi/\varphi$ ) läßt sich die relative Empfindlichkeit von Sinnessystemen vergleichen, deren Sinnesmodalitäten ebenfalls dimensionslos sind.

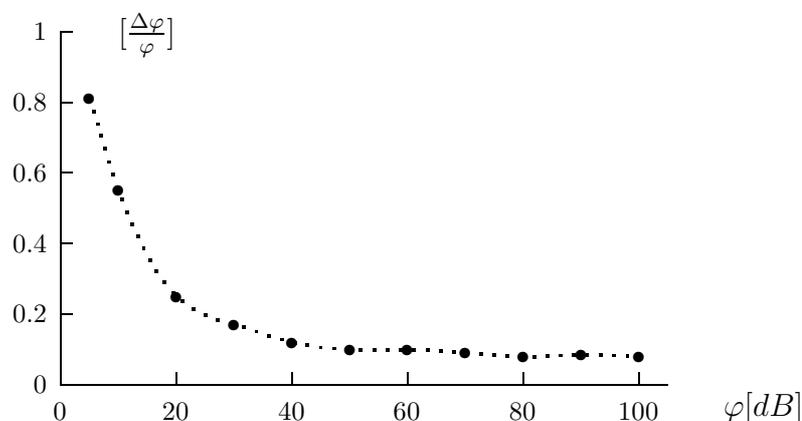


Abbildung 5.2: Weber Quotient

Betrachtet man Abbildung 5.2, so sieht man am Beispiel der Lautstärke von Tönen sofort, daß der Weber Quotient hier nicht mehr konstant ist. Es wird vermutet, daß bei Annäherung an die Reizschwelle ein „Rauschen“ den entsprechenden Sinneskanal beeinflußt. Diese Überlegung führt zur Einführung eines Korrekturfaktors  $a$  in Webers Gesetz. (Formel 5.2).

$$\Delta\varphi/(\varphi + a) = c \quad \text{oder} \quad \Delta\varphi = c * (\varphi + a) \quad (5.2)$$

Ausgehend von Webers Gesetz formulierte G. T. Fechner die sogenannte Fechnersche psychophysikalische Beziehung (Formel 5.3). Eine logarithmische Zunahme an Reizstärke ( $\varphi$ ) führt zu einem linearen Zuwachs an Empfindungsstärke ( $\psi$ ).

$$\psi = k \cdot \log(\varphi/\varphi_0) \quad \text{Fechners Gesetz} \quad (5.3)$$

Fechner wollte durch sein Gesetz eine *Skala der Empfindungsstärke* definieren und nahm dabei an, daß eine nächst höhere Empfindung genau eine Unterschiedsschwelle (DL) von der schwächeren Empfindung getrennt ist. Eine

Unterschiedsschwelle bei schwachen Reizen bedeutet danach denselben Empfindungszuwachs wie eine entsprechende bei starken Reizen. Fechners Gesetz stellt daher eher eine Skala der Unterscheidbarkeit dar.

Im Gegensatz zu Fechners indirekter Skala aus Unterschiedsschwellen versucht S. S. Stevens auf einer Rationalskala die Empfindungsstärke abzuschätzen. „Rationalskala“ bezeichnet eine Skala, in der als Operationen Verhältnisse, Brüche und Vielfache angetragen werden dürfen<sup>2</sup>. Nach Messungen mit solchen Skalen kam Stevens zu der Annahme, daß das Verhältnis von Empfindungsstärke ( $\psi$ ) und Reizintensität ( $\varphi$ ) eine Potenzfunktion darstellt. (Formel 5.4)

$$\psi = k \cdot (\varphi - \varphi_0)^a \quad \text{Stevens Gesetz} \quad (5.4)$$

Die Konstante  $k$  hängt von der Skalierung des Reizes ab,  $\varphi_0$  ist die Reizintensität an der Absolutschwelle und der Exponent  $a$  ist abhängig von Sinnesmodalität und Reizbedingungen.

### 5.3 Physiologie der Haptik

Auch wenn ein Sinneseindruck nicht immer von einem adäquaten Reiz hervorgerufen werden muß, existieren doch für jede Sinnesmodalität die entsprechenden Rezeptoren. Thermosensoren geben Kälte- und Wärmeempfindungen, Nozizeptoren erzeugen Schmerzsignale und Propriozeptoren erfassen Lage und Orientierung des Körpers. Der Tastsinn wiederum wird durch sogenannte Mechanosensoren unter der Haut vermittelt.

Unabhängig von der Sinnesmodalität sind sämtliche Sensoren entweder Zellen oder Membranabschnitte von Zellen, die auf spezifische physikalische oder chemische Reize durch Änderung des Membranpotentials reagieren. Diese lokalen Membranpotentialänderungen nennt man *Sensorpotentiale*, deren Größe innerhalb des Empfindlichkeitsbereichs des jeweiligen Sensors die Reizstärke kodiert.

Es ist festzustellen, daß immer eine Reizschwelle überschritten sein muß, damit ein Reiz erkannt wird. Andererseits bedingen extrem starke Reize nicht zwangsläufig ein extrem starkes Sensorpotential. Jeder Sensor hat also einen Empfindlichkeits- und einen Arbeitsbereich.

Für die haptische Wahrnehmung ist das zeitliche Antwortverhalten unterschiedlicher Sensoren bedeutsam. Sensoren lassen sich hierin folgendermaßen charakterisieren:

---

<sup>2</sup>Es sind hier also Aussagen wie „doppelt so laut“ möglich.

- **Proportionales Antwortverhalten**  
Der Sensor kodiert den Reiz nur in Abhängigkeit von der Reizstärke. Die Antwort nimmt mit länger andauerndem gleichförmigem Reiz ab, es findet eine Adaption statt. Sensoren mit proportionalem Antwortverhalten sind vom Typ SAI oder SAII (slowly adapting type I / type II).
- **Differentielles Antwortverhalten erster Ordnung**  
Dieser Typ von Sensor kodiert die Geschwindigkeit der Reizänderung. Der Sensor ist vom Typ RAI (rapidly adapting type I).
- **Differentielles Antwortverhalten zweiter Ordnung**  
Der Sensor kodiert die Beschleunigung der Reizänderung und ist vom Typ RAI (rapidly adapting type II).

Die für den Tastsinn verantwortlichen Mechanosensoren der Haut sind bekannt als:

- Merkel Zellen, Tastscheibe (SAI)
- Ruffini-Körperchen (SAII)
- Haarfollikelsensoren (RAI, nur in behaarter Haut)
- Meissner-Körperchen (RAI, nur in unbehaarter Haut)
- Pacini-Körperchen (RAII)

Abbildung 5.3 zeigt hierzu die Mechanosensoren der Haut und deren Lage. Für die Aufgabe des Fühlens von Oberflächeneigenschaften sind üblicherweise nur die Sensoren in den Fingern von Interesse. Tabelle 5.1 zeigt deren Eigenschaften nochmals detailliert.

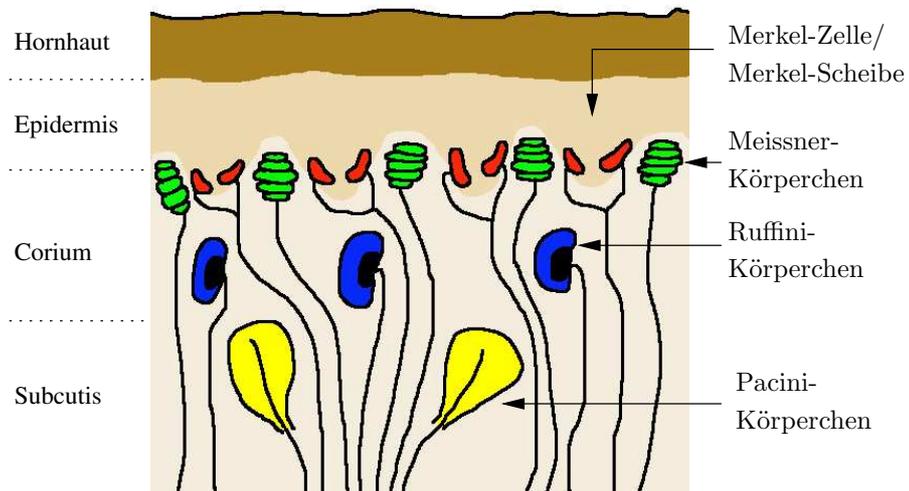


Abbildung 5.3: Mechanosensoren der unbehauerten Haut (nach [76])

Merkmale	SAI	SAII	RAI	RAII
Anpassungsrate	langsam	langsam	schnell	schnell
Funktion	Druck	Druck und Hautdehnung	Geschwindigkeit	Vibration und Beschleunigung
Mittlerer rezeptiver Bereich	11 mm <sup>2</sup>	59 mm <sup>2</sup>	13 mm <sup>2</sup>	101 mm <sup>2</sup>
Räumliche Auflösung	gut	schlecht	mittel	sehr schlecht
Verteilung	25%	19%	43%	13%
Reaktionsfrequenz	1–200Hz	1–200Hz	10–200Hz	70–1000Hz
minimale Wahrnehmungsgrenze	50Hz	50Hz	40Hz	200–250Hz

Tabelle 5.1: Vergleich der Mechanosensoren unbehaarter Haut (nach [97] und [14])

Das Experiment, um die Funktion der einzelnen Sensoren zu bestimmen, ist in [76] beschrieben: Es wird zunächst ein spezieller Reiz mittels eines Reizstempels erzeugt. Dieser Reiz hat den zeitlichen Verlauf:

1. Eine Phase konstanter Geschwindigkeit ( $\frac{dS}{dt} \neq 0$ )
2. Ein Dauerreiz mit konstanter Hautdeformation ( $S \neq 0$ )

Bei Beginn und Ende der Stempelbewegung treten Beschleunigungen auf. Wie Abbildung 5.4 zeigt, reagieren nur die SA Sensoren auf einen konstanten Reiz. Bei stillstehendem Reizstempel werden dennoch Reaktionen gezeigt. SAI Sensoren sprechen dabei auf Reize an, die senkrecht zur Hautoberfläche erfolgen, SAI Sensoren auf Hautdehnungen. Man erkennt weiterhin, daß RAI Sensoren nur auf die Geschwindigkeit der Hautdeformation ansprechen und daß RAI Sensoren durch Beschleunigung gereizt werden.

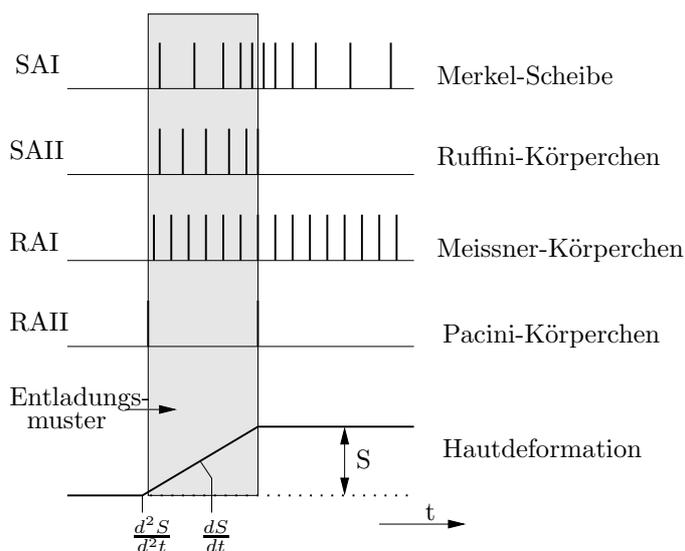


Abbildung 5.4: Reiz-Antwort-Verhalten

## 5.4 Haptische Simulation von Oberflächen

Der Stand der Forschung zur haptischen Simulation von Oberflächenstrukturen mit kraftgebenden Displays soll an dieser Stelle vorgestellt werden.

Als umfassende Einführung und Übersicht über die verschiedenen Arten von Kraft- und taktilem Feedback in Virtual Reality Umgebungen sei hier zunächst das Buch [14] von Burdea genannt. Ausgehend von frühen Geräten für Teleoperation und Telerobotik werden chronologisch nahezu sämtliche

Geräte und Techniken für die Gabe von haptischem Feedback vorgestellt. In [79] gibt Stone ebenfalls einen historischen Überblick zu haptischen Geräten, wenn auch in extrahierter Form. Beide sehen Aufgaben der Teleoperation und Telerobotik weiterhin als bedeutend für die Entwicklung haptischer Hardware an. Kennzeichnend ist hierbei der „große Maßstab“ der Geräte. Körpergebundene Exoskeletons oder stationäre roboterähnliche Manipulatoren sind hier beispielhaft. Das Forschungsgebiet Virtual Reality hat nun in den letzten Jahren gerade den „kleinen Maßstab“ haptischer Geräte betrachtet. Die Aufgabenstellungen sind dabei dominiert durch das Ziel, die Realität des Greifens oder des Fühlens zu simulieren [14], [49]. Haptisches Feedback wird darüberhinaus allgemein als erweiterte Interaktionsform zwischen Mensch und Computer untersucht [32], [93], [46], aber ebenfalls für explizite Aufgaben zur Simulation medizinischer Eingriffe [73], [38], [1].

Von grundlegender Bedeutung für die computerunterstützte Simulation von fühlbaren Texturen sind die Arbeiten von Minsky [62], [63]. Mittels eines Force-Feedback Joysticks werden die dafür synthetisch erzeugten Texturen fühlbar gemacht. Mit der Umsetzung des *Sandpaper System* ist es Minskys Probanden möglich, sich auf der generierten Textur zu bewegen und diese zu ertasten. Kern der Simulation ist der *Lateral Force Algorithm*: Texturen sind hierbei in Form von Höhenkarten dargestellt. Bewegt sich der Proband mit dem Force-Feedback Joystick über die simulierte Textur, so resultieren hieraus Höhenänderungen. Als Ergebnis der Höhenänderungen werden nun seitliche Kräfte über den Joystick zurückgegeben.

Als Ergebnis kann Minsky zeigen, daß die Probanden die simulierte Fläche als Textur einstufen. Darüberhinaus untersucht sie die (Reiz-) Differenzierungsmöglichkeiten bezüglich des Merkmals Rauheit.

Die Untersuchung des Merkmals Rauheit ist ebenfalls das Ziel der Arbeit von Siira und Pai [78]. Wie bei Minsky kommt auch hier die Berechnung einer seitlichen Rückgabe-Kraft zum Einsatz. Siiras und Pais Ansatz basiert auf der Beobachtung, daß bei Messungen von Oberflächenprofilen viele Ergebnisse nahezu normalverteilt sind. Es wird also keine synthetische Textur „erzeugt“. Eine Textur sind vielmehr zufällig generierte Höhenunterschiede mit Normalverteilung. Durch Verändern von Erwartungswert und Varianz der Verteilung ergeben sich unterschiedliche Rauheiten. Es wird zur Überprüfung des obigen Ansatzes ein eigenes Force-Feedback Gerät entwickelt, der *Pantograph*. Bei grob aufgelösten Texturen können die Probanden keine nachvollziehbaren Rauheitsempfindungen bestätigen.

Fritzs Arbeit [33],[34] baut auf dem Ansatz von Siira und Pai zur Darstellung von wahrnehmbaren Texturinformationen mittels Normalverteilung auf. Ziel ist es auch hier haptisch unterscheidbare Texturen zu erzeugen, nicht jedoch, reale Texturen zu simulieren. Als texturerzeugende Signale untersucht Fritz

multivariate Normalverteilung, Fourier-Reihen und stochastisches Rauschen. Umgesetzt werden die Versuche mit dem haptischen Display PHANToM.

Die Entwicklung des PHANToM ist eng verknüpft mit der Arbeit von Massie [59]. Hierin entwickelt er die Grundlagen eines Modells zur Gabe von haptischen Feedbacks und es entsteht parallel dazu der Prototyp der auf diesem Prinzip basierenden Hardware (PHANToM).

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren werden die Kräfte hier orthogonal zur Fläche zurückgegeben, die gerade ertastet wird. Die Ausgabe der erzeugten Kräfte erfolgt über drei Freiheitsgrade, wobei eine Beweglichkeit von sechs Freiheitsgraden vorhanden ist. Eine texturierte Fläche wird folgendermaßen simuliert: Zum einen ist hierbei die Fläche selbst darzustellen. Dies geschieht durch einen (konstanten) orthogonalen Kraftvektor. Die auf den Flächen befindlichen Texturen sind bei Massie beschrieben durch Funktionen der Form  $f(x, y) = a \cdot \sin(b \cdot x) \cdot \sin(c \cdot y)$  mit  $a, b, c \in \mathbb{R}$ . Abhängig von der Position auf der zu ertastenden Fläche wird der konstante Kraftvektor mit dem lokalen Funktionswert modifiziert. Einige periodische Texturen sind auf diesem Weg erzeugbar, sie werden oftmals jedoch nicht als Texturen, sondern als Geometrie wahrgenommen.

Auch Basdogan [6] verwendet zur Umsetzung seiner Arbeit das PHANToM. Sein Ansatz verändert zur haptischen Simulation nicht nur den orthogonalen Kraftvektor, sondern er verändert auch dessen Richtung, um 2D Texturen in Form von Höhenkarten haptisch darzustellen. Darüberhinaus untersucht Basdogan Texturen, die über Fourier-Reihen erzeugt werden sowie Rauschen modellierende Perlin-Texturen.

Bei seinen Untersuchungen zur haptischen Simulation von Texturen verwendet Green [37] das haptische Display (auch hier PHANToM) zunächst als dreidimensionalen Scanner. Eine Materialprobe wird entlang einer Geraden abgetastet. Als Ergebnis der Messungen ergeben sich näherungsweise Normalverteilungen. Die entsprechenden Erwartungswerte und Varianz werden von Green nun dazu verwendet, den haptischen Eindruck des Materials zu erzeugen. Die Methode ist jedoch nur bedingt geeignet. Zum Einen ist die Messung mit dem haptischen Display recht fehlerhaft, zum Anderen ist es durch die Meßmethode nicht möglich, auch die mögliche Richtungskomponente von Oberflächenstrukturen zu erfassen.

In [89] präsentieren West und Cutkosky Ergebnisse ihrer Untersuchungen zu feinen Oberflächeneigenschaften. Untersuchungsgegenstand sind sinusförmige Profile mit Amplituden zwischen 0,01–10mm und mit Frequenzen von 1–20 Zyklen über eine Länge von 85mm. Diese Profile werden den Probanden zum Einen rein virtuell vorgelegt, zum Anderen als abzutastendes reales Metallprofil. Zur Durchführung wird ein eigens konstruiertes Gerät verwendet, welches bei beiden Versuchsvarianten als Apparatur zur Interaktion verwen-

det wird. Ziel der Probanden ist es, die Wellenzahl der vorgelegten Proben zu bestimmen. Als Ergebnis zeigt sich eine erhöhte Fehlerrate bei der Erkennung, wenn die Proben virtuell gegeben werden. Darüberhinaus zeigt sich, daß hohe Frequenzen besser über eine Stylus (Stift) erkennbar sind, wohingegen niedrige Frequenzen besser mittels der Abtastung über die Fingerspitze wahrnehmbar sind. Diese Ergebnisse zur Art der Interaktionsmethode (Stylus/Fingerspitze) zeigt sich auch in [68].

Ebenfalls mittels proprietärer Hardware untersuchen Asamura, Yokoyama und Shinoda in [2] die taktilen Rezeptoren der Fingerspitze. Die Rezeptoren werden hier kombiniert angeregt über feine Metallstifte, Luftdruck und Vibration. Die Probanden stellen fest, daß bei den simulierten Fühleindrücken klar differenziert werden kann, mit welcher Methode stimuliert wird, die Stimulation fügt sich nicht zu einem Gesamteindruck zusammen. Dennoch werden virtuell feinere Strukturen erkannt, als die tatsächliche physikalische Auflösung der Apparatur generieren kann.

Auch Nara et. al. entwickeln in [65] ein Gerät zur Gabe von taktilem Feedback. Eine Fläche aus kleinen Stahlkugeln wird dabei über (Ultra-)Schallwellen angeregt. Probanden, die diese Fläche mit dem Finger hin und her bewegen, können unterschiedliche Effekte von Rauheit und Reibung wahrnehmen, abhängig von den anregenden Frequenzen.

McGee, Gray und Brewster [60] kombinieren Haptik und Akustik auf andere Weise. Bei ihren Experimenten mittels PHANTOM zur Wahrnehmung von Rauheit werden die Probanden durch akustisches Feedback bei der Erkennungsaufgabe unterstützt. Auch hier werden unterschiedliche Wellenformen als Repräsentation von Rauheit vorgelegt. Entsprechend des haptischen Kontaktes mit einem Wellenberg oder einem Wellental werden akustische Hilfen abgespielt. Es zeigt sich, daß diese Hilfen die Erkennungsleistung deutlich verbessern. „A percept composed of multiple modalities might combine to in fact give more than the sum of the individual parts“.

In [87] untersuchen Wall und Harwin ebenfalls das Merkmal Rauheit unter Zuhilfenahme zweier Sinneskanäle, dem haptischen und dem visuellen. Rauheit wird simuliert über unterschiedliche Sinuswellen, die in Amplitude und Frequenz variierten. Ausgehend von einer haptisch und visuell präsentierten Referenzfläche, sollen die Probanden die Abweichung einer zusätzlich vorgelegten Probe hinsichtlich der Rauheit bestimmen. Wall und Harwin entnehmen den Ergebnissen ihres Experiments, daß die Wahrnehmung von Rauheit bei visueller und haptischer Präsentation differieren kann. Es ist nicht eindeutig, wie die visuelle Probe von den Probanden als rauer oder weniger rau in Bezug zur Referenz beurteilt wird. Das zusätzliche haptische Signal hilft den Probanden in der Beurteilung der Rauheitsunterschiede.

Dillon et. al. widmen sich in [23] der Wahrnehmung von textilen Geweben.

Sie definieren 22 unterschiedliche Eigenschaften von Stoffen (z. B. Dicke, Steifheit, Rauheit, Eindringtiefe, Temperatur,...) und lassen Probanden die Eigenschaften bestimmen, indem computergraphische Repräsentationen der Stoffe gezeigt werden. Unterstützt wird die Bewertungsaufgabe durch haptisches Feedback mit einer 2D Computermaus. Als Ergebnis befinden sie, daß diese Art der haptischen Präsentation nicht ausreicht, die komplexe Beschaffenheit von Stoffe angemessen zu simulieren, allenfalls sind haptische „Hinweise“ möglich.

## 5.5 Definitionen: Taktile, kinesthetisch, haptisch

In der Literatur sind die Begriffe „haptisch“ und „taktile“ oftmals gleichbedeutend verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit werden obige Begriffe gemäß Loomis und Ledermann [53] verwendet:

### Definition 5.1 (Taktile)

*Ein Sinnesreiz ist **taktile**, wenn der physikalische Reiz ausschließlich über Rezeptoren der Haut erkannt wird.*

### Definition 5.2 (Kinesthetisch)

*Ein Sinnesreiz ist **kinesthetisch**, wenn der physikalische Reiz ausschließlich über Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken erkannt wird.*

### Definition 5.3 (Haptisch)

*Ein Sinnesreiz ist **haptisch**, wenn er aus einer Kombination von taktilem und kinesthetischen Reizen gegeben wird.*

### Definition 5.4 (Haptische Struktur)

*Als haptische Struktur werden diejenigen Oberflächenstrukturen und –eigenschaften bezeichnet, die nicht durch den Tastsinn räumlich getrennt werden können.*

## 5.6 Haptisches und graphisches Rendering

Obwohl die Notwendigkeit der Generierung von synthetischer Haptik bereits in den 50er Jahren im Bereich der Robotik festgestellt wurde, konnten umsetzbare Forschungsergebnisse erst Ende der 80er und Anfang der 90er Jahre in der wissenschaftlichen Literatur dokumentiert werden [97]. Schnell wurde auch der interdisziplinäre Charakter der Computerhaptik deutlich, da nicht

nur die Robotik von erweiterten Möglichkeiten der Telemanipulation profitiert, sondern eben auch die Erzeugung hoch immersiver Szenarien mittels Virtual Reality. Das Forschungsgebiet „haptische Displays“ wurde über die Rückgabe von reinen Kräften zur Vereinfachung von Tele-, bzw. virtuellen Manipulationen dahingehend erweitert, daß auch taktile und z.T. thermische Fühleindrücke untersucht werden.

Unterscheidungsmerkmale ergeben sich hierbei zunächst durch die Fähigkeit, welche Interaktionsformen mit realen Objekten nachgebildet werden können. Hierbei existieren die *freie Bewegung* ( $F = 0$ ), die Kollision mit einer Gesamtkraft, bei der die Summen der Teilkräfte nicht im Gleichgewicht liegen ( $\sum F \neq 0$ ) sowie die Kollision mit Kräftegleichgewicht ( $\sum F = 0$ ). Beispiele für die letzten beiden Interaktionsformen sind einmal das Auftreffen auf eine starre Form, bzw. das Zusammendrücken eines Tennisballes.

Die Interaktion mittels unterschiedlicher haptischer Displays ist weiterhin bestimmt durch die möglichen Freiheitsgrade<sup>3</sup>. Aktive Freiheitsgrade sind die Richtungen, in denen Kraft erzeugt werden kann, passive Freiheitsgrade bestimmen die Anzahl der zugelassenen Bewegungsrichtungen.

Die verwendeten *Aktoren*, d. h. die technische Kraftgenerierung, erlauben ebenfalls eine Differenzierung. Beispiele hierfür sind Gleichstrommotoren oder piezoelektrische Elemente.

Schließlich sind die eingesetzten *Endeffektoren* je nach Einsatzart des Displays unterschiedlich ausgelegt. Man kennt hier z.B einfache „Stifte“, Datenhandschuhe oder auch aufwendige Exoskeletons.

Nach Ziegler [97] und Burdea [14] lassen sich haptische Displays folgendermaßen Gruppieren:

**Kraftrückkopplungsgeräte** (force-feedback interfaces) erzeugen die entsprechende Wirkung, indem gerichtete Kräfte auf das zu manipulierende Körperteil (Finger, Hand, Arm, etc.) gegeben werden.

Sie sind entweder portabel (Handschuh, Exoskeleton) oder als Desktop Geräte ausgelegt. Portable Geräte bieten einen größeren Aktionsradius, haben jedoch oft ein hohes mitzuführendes Eigengewicht.

Das im Späteren verwendete PHANTOM<sup>4</sup> [59] gehört zu den Desktop Geräten. Die Rückkopplungskraft wird über einen Fingerhut oder Stift gegeben. Auf drei aktiven Freiheitsgraden können Kräfte bis zu 10 Newton erreicht werden. Die verwendeten Elektromotoren haben hierbei ausreichend hohe Drehdynamik, um auch Vibrationen erzeugen zu können.

---

<sup>3</sup>degrees of freedom, *DOF*.

<sup>4</sup>Personal Haptic Interface Mechanism.

**Taktile Rückkopplungsgeräte** (tactile feedback displays) sprechen ausschließlich taktile Rezeptoren an. Man unterscheidet vibro-taktile Stimuli, die meist mittels kleiner, stumpfer Stäbchen gegeben werden, pneumatische Stimuli über Luftpolster oder Düsen sowie elektro-taktile Stimuli über Elektroden.

**Thermische Rückkopplungsgeräte** (thermal-feedback displays) wirken aktiv auf die Hauttemperatur mittels sogenannter Peltier-Hitzepumpen.

**Form-bildende Geräte** (surface displays) nehmen selbst die Form eines virtuellen Objektes an. Realisierte Prototypen arbeiteten hierbei entweder mit parallel ausgerichteten Stäbchen, deren vertikale Position veränderbar ist oder mittels elektro-rheologischer Flüssigkeit, deren Viskosität beeinflussbar ist.

Betrachtet man die schematische Darstellung einer typischen Software Render-Schleife wird sofort deutlich, daß der haptische Renderprozeß prinzipiell dem graphischen Renderprozeß entspricht. (Abbildung 5.5)

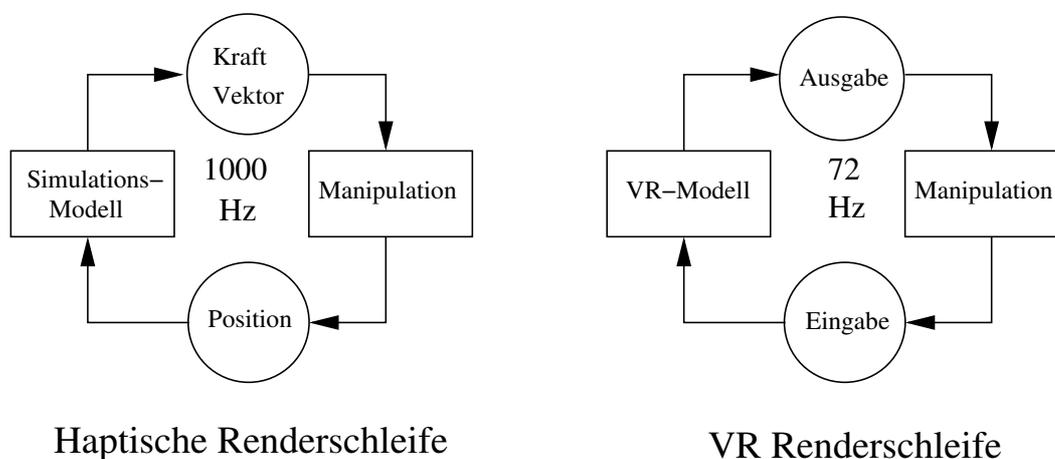


Abbildung 5.5: Haptische- und graphische Renderloop

Da in beiden Fällen auf Interaktion mit dem Menschen reagiert werden muß, sind beide Schemata als Regelkreis zu verstehen. Die Verwendung einer gemeinsamen Rendschleife ist jedoch nicht angezeigt, da eine adäquate haptische Simulation 1000 mal in der Sekunde durchlaufen werden muß. Kann diese Frequenz nicht sichergestellt werden, ist es nicht möglich, feste Oberflächen zu simulieren [59], [7]. Haptische- und graphische Simulationen sind daher entkoppelt zu realisieren. Selbst wenn es möglich wäre, die üblichen Datenmengen einer anspruchsvollen computergraphischen VR-Simulation mit

1000Hz darzustellen, wäre dies doch nicht sehr sinnvoll, da schon eine Bildwiederholrate von 72Hz den physiologischen Gegebenheiten des Sehens voll auf genügt und eine flüssige Bewegung darstellen kann.

Die Implementation einer Virtual Reality Lösung mit integriertem haptischen System wird auf die verschiedenen Renderer daher verteilt, bzw. nebenläufig realisiert. Ziel muß es sein, daß die haptische Simulation schnell genug arbeiten kann, ohne auf den graphischen Prozeß warten zu müssen. Abbildung 5.6 zeigt beispielhaft die von Ziegler [97] vorgeschlagene Umsetzung.

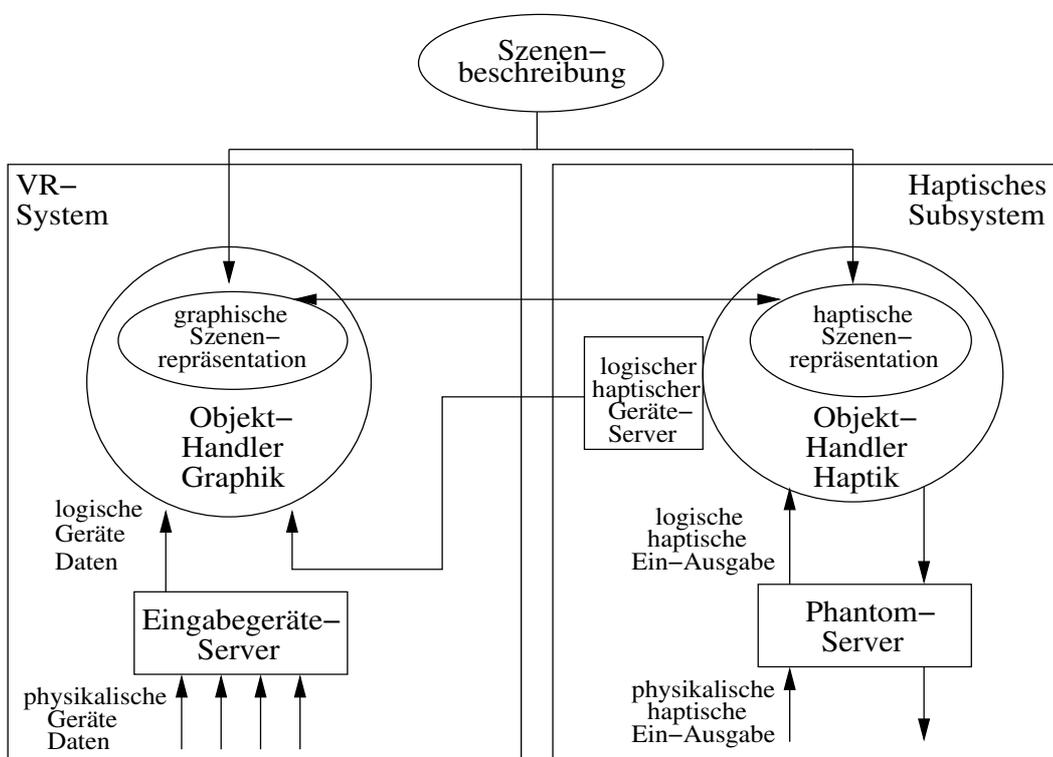


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung eines haptischen Subsystems

Man sieht, daß Haptik- und VR-System eine gemeinsame Szenen-Beschreibung als Grundlage zur Simulation verwenden. Um aus oben genannten Gründen jedoch unabhängig voneinander arbeiten zu können, verwenden graphischer und haptischer Objekt-Handler jeweils eine eigene lokale Szenenrepräsentation.

Wenn der haptische Prozeß lediglich Kollisionen und Bewegungen mit den darzustellenden Objekten nachbilden soll, ist die reine Geometriebeschreibung der involvierten Objekte ausreichend. Diese ist durch die graphische Szenenbeschreibung schon gegeben, d. h. es sind keine zusätzlichen Informationen für die Gabe von haptischem Feedback notwendig.

Anders verhält es sich jedoch im Fall der Simulation von Oberflächeneigenschaften der darzustellenden Objekte. Hier reicht die Information, die durch die graphische Szenenbeschreibung geliefert wird, nicht aus. Zur umfassenden haptischen Oberflächendarstellung gehören neben der Form des simulierten Objekts Federkraft, Reibungskraft und Rauheit, die sich wie folgt definieren:

- **Federkraft**  
Die dem Material der Oberfläche eigene Federkraft bestimmt die elastische Deformation. Diese wird physikalisch beschrieben gemäß Hook'schem Gesetz:  $F = D * x$ .  
Federkraft  $F$  ist proportional der Längenänderung  $x$  der Feder multipliziert mit einer materialabhängigen Federkonstante  $D$ .
- **Reibungskraft**  
Die dem Material zugehörige Reibungskraft  $F_R$  wirkt parallel zur Berührungsoberfläche und ergibt sich aus Druckkraft  $F_D$  und einer Reibungskonstante  $\mu$ . Es gilt:  $F_R = F_D * \mu$ .
- **Rauheit**  
Die Rauheit steht in direktem Zusammenhang mit der Oberflächenstruktur. Diese wird meist über eine Abwandlung des Gesetzes der Reibungskraft modelliert. (Abbildung 5.7). Hierbei ist der Interaktionspunkt solange an einer Feder befestigt, bis er durch die Bewegung abreißt und in den Wirkungsbereich einer neuen Feder gerät.  
Ein anderer Ansatz zur Modellierung der Rauheit kann die Ausmodellierung der Oberflächenstruktur mit ihren Erhebungen und Vertiefungen sein. Dies führt jedoch zu einem beträchtlichen Anwachsen des Datenvolumens und ist aus diesem Grund unpraktikabel.

Wie können nun die zusätzlich notwendigen Informationen für die haptische Simulation gewonnen werden? Betrachtet man die obige Aufzählung wird deutlich, daß das Finden geeigneter Materialkonstanten vielfach heuristisch erfolgen wird. Andererseits trägt die computergraphische Beschreibung der zu simulierenden Objekte mehr Informationsgehalt in sich, als die Beschreibung der reinen Form. Es stellt sich die Frage, wieviel haptische Information ist durch die visuelle Information in einer Virtual Reality Datenbasis vorhanden und wie kann diese haptische Information gewonnen werden? Die vorliegenden visuellen Texturen sollen auch haptische Texturen sein.

## 5.7 Vom Material zum haptischen Signal

Der Syntheseweg von einem realen Material zu einem Steuersignal eines haptischen Displays ist in Abbildung 5.8 veranschaulicht.

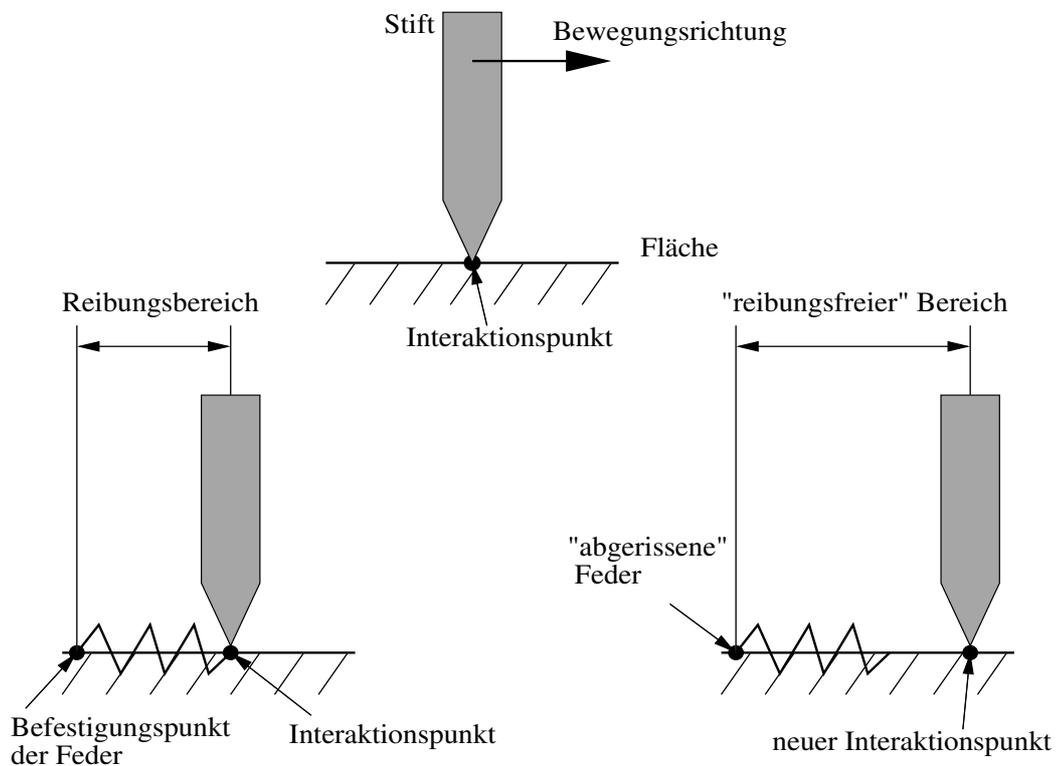


Abbildung 5.7: Abgewandelte Form des Gesetzes der Reibungskraft (nach [97])

1. **Elektronische Erfassung des Materials:** Die Probe des zu simulierenden Materials wird über einen Scanner erfaßt. Artefakte werden mittels Bildbearbeitung entfernt.
2. **Analyse und Klassifikation des Materials:** Aus einem Grauwertbild werden die notwendigen Parameter extrahiert, die die Eigenschaften des Materials beschreiben, die für die haptische Simulation erforderlich sind.
3. **Erzeugung eines haptischen Signals:** Aus den gewonnenen Parametern der Analyse wird das haptische Steuersignal erzeugt.

## 5.8 Verfeinerung des Texturbegriffs

Die bisher vorgenommene Unterscheidung verschiedener Texturarten ergab sich aus dem Verwendungszweck oder aber durch die Art der computergraphischen Texturapplikation. Definition 4.2 „Textur“ war daher auch sehr stark

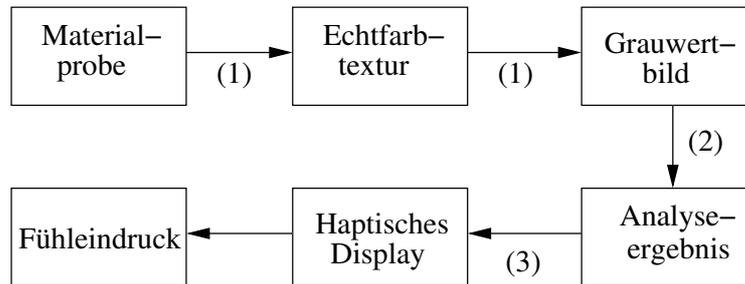


Abbildung 5.8: Syntheseweg vom Material zum haptischen Signal

auf die reine zweidimensionale computergraphische Textur zugeschnitten, d. h. sie definierte eine diskrete zweidimensionale Matrix von rgb-Farbwerten.

Auch der dargestellte Bildinhalt der computergraphischen Texturen war abhängig von der Art der Verwendung. Texturen zur geometrischen Komplexitätsreduktion sind oftmals aufzufassen als „Logos“, „Aufkleber“ oder „Schilder“. Sie ersetzen bildhaft Dinge, die sonst als Geometrie modelliert werden müßten.

Andere Texturen dienen der Erzeugung eines bestimmten visuellen Effekts, wie z. B. Environment-Texturen oder Bump-Map-Texturen.

Da solche Texturen jedoch nicht als haptische Texturen in Betracht kommen, sind sie von den weiteren Untersuchungen ausgenommen. In den folgenden Kapiteln werden daher nur noch solche Texturen behandelt, die als Oberflächenstruktur in Betracht kommen können<sup>5</sup>.

Solch eine „Ordnung“ von Texturen nach Bildinhalt ist nicht willkürlich. In [74] entwickelt Rao eine Klassifizierung (Taxonomie) auf Basis der visuellen Eigenschaften von Texturen. Eine Textur setzt sich danach aus einem stark geordnetem (repetitivem), einem schwach geordnetem (gerichtetem) und einem ungeordnetem (zufälligem) Anteil zusammen. (Abbildung 5.9)

Gerade die von Rao gewählte Klassifizierung auf visueller Basis ist zur Einbettung des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes naheliegend, da ja das Ziel ist zu untersuchen, inwieweit der visuelle Inhalt einer Textur haptisch zu interpretieren ist.

- Der *ungeordnete* Anteil zeichnet sich aus durch das Fehlen repetitiver Elemente und lokaler Orientierungen. In dem vorliegenden Modell erfaßt durch die Rauheitsanalyse mittels fraktaler Dimension.

<sup>5</sup>Dies entspricht übrigens auch am ehesten der umgangssprachlichen Bedeutung für „Textur“ als Oberflächenbeschaffenheit.

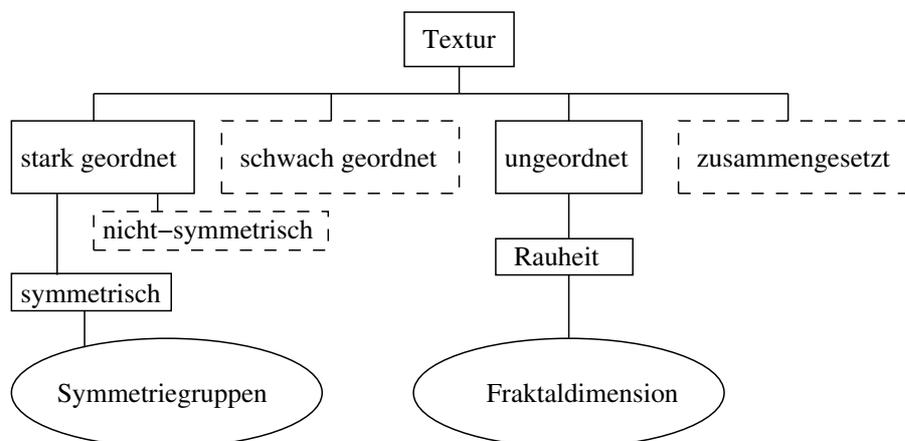


Abbildung 5.9: Textur-Taxonomie nach Rao

- Der *schwach geordnete* Anteil ist charakterisiert durch das Vorkommen von ausschließlich lokalen Vorzugsrichtungen. Das Bild einer Holzmaserung ist hierfür ein Beispiel.
- Der *stark geordnete* Anteil ist nochmals geteilt in nicht-symmetrische und symmetrische Texturelemente. Letztere lassen sich aus einem Grundelement und zugehörigen Platzierungsregeln der Symmetriegruppen erzeugen. Nicht-symmetrische Texturen besitzen auch ein charakteristisches Grundelement, folgen aber keinen symmetrischen Platzierungsregeln.
- *Zusammengesetzte* Texturen sind aus den anderen Klassen komponiert.

Sowohl der ungeordnete Anteil als auch der symmetrische Anteil läßt sich algorithmisch analysieren. Zum einen dargestellt in Kapitel 6 mit Hilfe einer Dimensionsanalyse der fraktalen Dimension und zum anderen in Kapitel 7 über eine Symmetriedetektion der Isometrien der Euklidischen Ebene.

Vereinfachende aber nicht einschränkende Annahme der in den Kapiteln 6 und 7 erläuterten Betrachtungen ist, daß bei den untersuchten Texturen Monochromie vorliegt, d. h. es werden Grauwertbilder betrachtet. Der weiter formale Texturbegriff ergibt sich nun nach:

#### Definition 5.5 (Textur)

Eine Menge  $\mathcal{T} = \{(\mathbf{p}, F(\mathbf{p})) \mid \mathbf{p} \in \mathcal{E}^2, F : \mathcal{E}^2 \rightarrow \mathbb{R}\}$  heißt **kontinuierliche Textur**. Die 2-Tupel  $t \in \mathcal{T}$  werden als **Texel** bezeichnet. Jedes Texel  $t$  ist zusammengesetzt aus einem Positionswert  $p$  und einem Grauwert  $F(\mathbf{p})$ .

Sei  $N \subset \mathbb{N}$  und  $f : \mathcal{E}^2 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{E}^2 \times N$ , wobei  $f$  die Positionswerte der Texel identisch abbildet. Dann ist  $\overline{\mathcal{T}} = \{f(t) \mid t \in \mathcal{T}\}$  die **ortskontinuierliche, grauwertdiskrete Textur** zu  $\mathcal{T}$ .

Ist  $K \subset \mathcal{E}^2$  konvex, so wird  $\overline{\mathcal{T}}_K = \{t | t \in \overline{\mathcal{T}}, t = f(\mathbf{p}, F(\mathbf{p})), \mathbf{p} \in K\}$  **kontinuierlicher Texturausschnitt** genannt.

Sei  $e : \mathcal{E}^2 \times N \rightarrow \mathbb{N}^2 \times N$ . Die Menge  $\mathfrak{t} = \{e(t) | t \in \overline{\mathcal{T}}\}$  heißt **orts- und grauwertdiskrete Textur** zu  $\mathcal{T}$ .

Sei  $D \subset \mathbb{N}^2$  konvex. Dann heißt  $\mathfrak{t}_D = \{(\mathbf{p}, c) \in \mathfrak{t} | \mathbf{p} \in D, c \in N\}$  **diskreter Texturausschnitt**. Bei  $D = \{(i, j) | i \in [0 : k], j \in [0 : l], k, l \in \mathbb{N}\}$  wird  $\mathfrak{t}_D$  **Grauwertbild** genannt.

## 5.9 Zusammenfassung

Mittels geeigneter Hardware ist es möglich, auch haptische Reize synthetisch fühlbar zu machen. Virtuelle Simulationen, und hier besonders VR Computer Aided Styling, werden so um einen wichtigen Interaktionskanal erweitert.

Haptisches Rendering ähnelt dem bekannten graphischen Rendering unter softwarearchitektonischen Gesichtspunkten. In einer Renderloop wird auf Eingaben reagiert und eine entsprechende Ausgabe erzeugt. Haptisches Rendering ist jedoch wesentlich zeitkritischer, da ein einzelner Schleifendurchlauf lediglich 1/1000 Sekunde dauern darf.

Oberflächentexturen als computergraphische Technik entsprechen durch ihre Bildinhalte und Verwendung wohl am meisten dem englisch-umgangssprachlichen Begriff *texture* (engl. texture: Struktur, Beschaffenheit), der für sämtliche computergraphischen Texturierungsarten den Namen lieferte. Durch Oberflächentexturen werden visuelle Material- und Struktureigenschaften simuliert.

Es wurde skizziert, wie sich aus graphischen Oberflächentexturen Informationen gewinnen lassen, die dann zur Synthetisierung eines haptischen Signals herangezogen werden. Die existierenden graphischen Texturen sind somit ebenfalls haptische Texturen.

Der bisherige allgemeine Texturbegriff wird hierzu verfeinert und es werden die Bildinhalte der Oberflächentexturen differenziert (geordnet, ungeordnet). Eine Oberflächentextur sei nun die Komposition aus der vorhandenen Rauheit und den vorhandenen symmetrischen Anteilen.

# Kapitel 6

## Rauheit haptischer Texturen

In diesem Kapitel wird vorgestellt, wie eine fraktale Dimension visueller Texturen als Maß ihrer Rauheit interpretiert werden kann. Die ermittelte fraktale Dimension einer Textur wird sodann Eingangsparameter der Synthese der haptischen Rauheit der Textur.

### 6.1 Fraktale Dimension als Maß der Rauheit

*Fraktale Geometrie* ist seit der Entdeckung von *Fraktalen* und deren Eigenschaften von Mandelbrot [55], [56] ein von der Computergraphik stark beachtetes und untersuchtes Gebiet. Fraktale Strukturen sind in der Natur sehr häufig anzutreffen. Umgekehrt haben synthetische Fraktale die Eigenschaft „natürlich“ auszusehen, was das Interesse der Computer Graphik an solchen Fraktalen erklärt.

Die Verwendung fraktaler Prozesse zur Simulation natürlicher Formen und Oberflächen, wie Berge, Wasser, Wolken und Pflanzen, war und ist Forschungsgebiet der Computer Graphik. Aber auch die Verwendung fraktaler Modelle zur Bildanalyse liegt nahe, wenn das Ziel ist, natürliche Eigenschaften von „Bildern“ zu analysieren.

Pentland wies in [69] nach, daß die visuell wahrnehmbare Zerklüftung synthetischer 3D-Oberflächen nahezu perfekt mit deren fraktaler Dimension korreliert (Korrelationskoeffizient  $\rho = 0,98$ ).

Die uns im Rahmen dieser Arbeit interessierenden Oberflächenstrukturen besitzen selbstverständlich ebenfalls eine „Zerklüftung“, die sich im Bildgehalt der entsprechenden Texturen wiederfindet. Die Idee ist also, die fraktale Dimension der Oberflächentexturen als Maß ihrer Rauheit zu interpretieren.

Bevor nun in Abschnitt 6.2 die Dimensionsanalyse beschrieben wird, sei der Begriff *fraktale Dimension* anschaulich und sodann theoretisch definiert.

### 6.1.1 Fraktale Dimension anschaulich

Eine der wesentlichen Eigenschaften von Fraktalen ist deren Invarianz bezüglich der Transformation Skalierung. Betrachtet man z. B. einen Bereich einer fraktalen Kurve, so findet man bei feiner werdender Skalierung immer wieder den ursprünglichen Verlauf der Kurve in den skalierten Abschnitten vor. Abbildung 6.1 zeigt solch ein Fraktal am Beispiel der Koch-Kurve. Ein natürli-

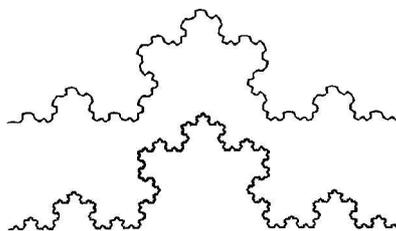


Abbildung 6.1: Koch-Kurve

ches Äquivalent solch einer Kurve ist die von Mandelbrot in [55] vorgestellte Küstenlinie. Auch hier zeigt die immer feiner werdende Betrachtung auch immer wieder feiner werdende Zerklüftungen des Küstenverlaufs.

Versucht man nun die Länge der Küstenlinie einer Insel und deren Fläche mit einem Maß der Länge  $l_1$  zu messen, so ergibt sich intuitiv als Länge der Küstenlinie:

$$u = a \cdot l \tag{6.1}$$

Zur Messung der Fläche verwendet man das Quadrat des Maßes, um zu bestimmen, wieviele dieser Quadrate in der Fläche der Insel Platz finden und man erhält als Fläche  $bl^2$ .

Eine weitere Messung mit dem veränderten Maß der Länge  $l_2$  mit  $l_1 \neq l_2$  liefert jedoch:

$$al \neq kl_2 \quad \text{und} \quad bl^2 \neq ml_2^2$$

Die Ergebnisse der Messungen variieren also mit der Länge des Maßes.

Bei einer Messung wird das Maß im allgemeinen in der Potenz verwendet, die der Dimension der zu messenden Ausprägung entspricht. Im obigen Beispiel sind dies bezüglich der Länge der Küstenlinie die (topologische) Dimension eins und bezüglich der Fläche die (topologische) Dimension zwei. Festzustellen ist jedoch, daß sich keine von der Länge des Maßes unabhängigen Meßergebnisse finden lassen.

Trägt man die Meßergebnisse einer Längenmessung einer Küstenlinie in Abhängigkeit zur jeweils veränderten Länge des Maßes in ein doppeltlogarithmisches Diagramm ein, so stellt man fest, daß die Ergebnisse (näherungsweise) auf einer Geraden liegen. Abbildung 6.2 zeigt schematisch solch ein Diagramm.  $u$  bezeichnet die gemessene Länge.  $s$  ist die Länge des Maßes, aufgetragen als  $1/s$ , was die Genauigkeit der Messung ausdrückt.

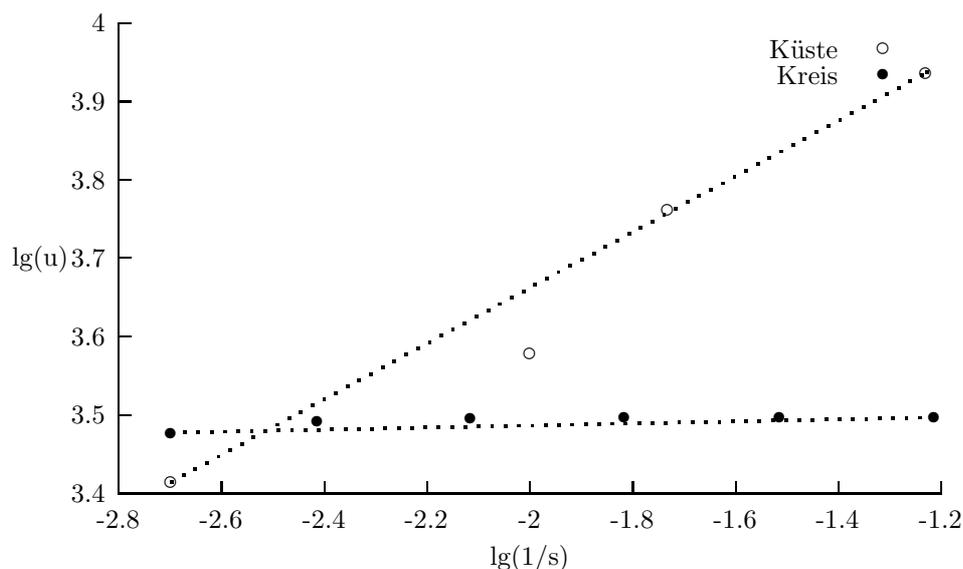


Abbildung 6.2: Doppeltlogarithmisches Diagramm

Es existiert also ein Zusammenhang zwischen Genauigkeit der Messung und dem Messergebnis in Form eines Potenzgesetzes.

$$\log u = m \log \frac{1}{s} + b$$

mit  $m$  als Steigung der Geraden und mit  $b$  als Vertikalachsenabschnitt. Gleichbedeutend ist:

$$u = c \cdot \left(\frac{1}{s}\right)^m \quad (6.2)$$

mit  $c = 10^b$ .

Die Steigung  $m$  der Geraden steht in engem Zusammenhang zur fraktalen Dimension. Peitgen et.al. entwickeln diesen Zusammenhang in [67] sehr transparent:

Sie betrachten zunächst selbstähnliche Strukturen wie die fraktale Koch-Kurve (Abbildung 6.1), aber auch Strecke, Quadrat und Würfel. Mit  $s$  als

Verkleinerungsfaktor und  $a$  als Anzahl der Teile, in welche eine Struktur zerlegt werden kann, gilt folgendes Potenzgesetz:

$$a = \frac{1}{s^D} \quad (6.3)$$

Hieraus ergibt sich die Definition der *Selbstähnlichkeits-Dimension*.

**Definition 6.1 (Selbstähnlichkeits-Dimension)**

Die reelle Zahl  $D$  heißt *Selbstähnlichkeits-Dimension*, wenn gilt:

$$D_s = \frac{\log a}{\log(1/s)}$$

Nun werden Gleichung 6.1 und das Potenzgesetz der Teilanzahl (Gleichung 6.3) am Beispiel der Konstruktion der Koch-Kurve in Beziehung gesetzt.  $k$  bezeichnet die Stufe der Konstruktion und die beiden Gleichungen lauten nun:

$$u_k = c \cdot \frac{1}{s_k^m} \quad \text{und} \quad u_k = a_k \cdot l_k$$

Die Länge des Maßes sei für beide Gleichungen jeweils gleich, d. h.  $s_k = l_k$ . Weiterhin normiert man die Länge der Ausgangsstrecke der Konstruktion ( $k = 0$ ) zu  $u_0 = 1$ . Es folgt aus  $u_0 = a_0 \cdot l_0$  mit  $a_0 = 1$  sofort  $l_0 = s_0 = 1$ . Aus dem Potenzgesetz  $u_0 = c/s_0^m$  somit auch der Faktor  $c = 1$ . Für die Kurvenlänge gelten nun für beliebige Stufen  $k$  die Gleichungen

$$u_k = \frac{1}{s_k^m} \quad (6.4)$$

und

$$u_k = a_k \cdot s_k = \frac{1}{s_k^{D_s}} \cdot s_k = \frac{1}{s_k^{D_s-1}} \quad (6.5)$$

Es gilt also

$$\frac{1}{s_k^m} = \frac{1}{s_k^{D_s-1}}$$

Man sieht aus dem Vergleich der Exponenten sofort:

$$m = D_s - 1 \quad , \quad \text{also} \quad D_s = 1 + m$$

Die Selbstähnlichkeits-Dimension läßt sich also auf zwei Wegen bestimmen:

- Findet man ein Potenzgesetz, daß die Anzahl der Teile  $a$  in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors  $1/s$  ausdrückt, so ist die Selbstähnlichkeits-Dimension der Exponent im Potenzgesetz.
- Verknüpft man das Ergebnis einer Längenmessung mit dem Skalierungsfaktor, so ist der um 1 inkrementierte Exponent des Gesetzes die entsprechende Selbstähnlichkeits-Dimension.

## 6.1.2 Fraktale Dimension formal

Wie schon in Abschnitt 6.1.1 zu bemerken, existieren diverse Definitionen von „fraktalen Dimensionen“. Mandelbrot zog zur grundlegenden Definition von Fraktalen die *Hausdorff–Besicovitch*<sup>1</sup>–Dimension heran. Sie ist für beliebige Mengen definiert und mathematisch zweckmäßig, da sie auf Maßen aufbaut, die relativ einfach zu handhaben sind. Nachteilig ist jedoch, daß die Hausdorff–Dimension oftmals kaum zu berechnen ist<sup>2</sup>. Es wurden daher neben der Hausdorff–Dimension noch weitere „fraktale Dimensionen“ von Mandelbrot vorgeschlagen. Hierbei werden sich besonders die *Kästchen*– oder *Box–Dimension* und die *Wahrscheinlichkeits*– oder *Probability–Dimension* für unsere Rauheitsanalyse als zweckmäßig erweisen.

### 6.1.2.1 Hausdorff–Dimension

Bei der Definition der Hausdorff–Dimension betrachten wir Teilmengen  $F$ , die in den Euklidischen Raum

$$\mathbb{R}^n = \{x \mid x = (x_1, \dots, x_n), x_i \in \mathbb{R}\}$$

eingebettet sind mit  $n \in \mathbb{N}$ . Es sei weiterhin eine Abstandsfunktion  $d(x, y)$  als Euklidischer Abstand von  $x$  und  $y$  in  $\mathbb{R}^n$  definiert als

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2}$$

Sei  $F \subseteq \mathbb{R}^n, F \neq \emptyset$ . Dann ist

$$\text{diam}(F) := \sup\{d(x, y) : x, y \in F\}$$

der **Durchmesser** von  $F$  bezüglich der Abstandsfunktion  $d(x, y)$ .

Weiterhin seien  $\delta \in \mathbb{R}^+, F \subseteq \mathbb{R}^n$  und  $\{U_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine abzählbare (oder endliche) Auswahl von Teilmengen des  $\mathbb{R}^n$  mit  $\text{diam}(U_i) \leq \delta, \delta > 0$ . Dann heißt  $\{U_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  eine  $\delta$ –**Überdeckung** von  $F$ , falls  $F \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$  gilt.

#### Definition 6.2 (Hausdorff–Maß)

Seien  $F \subseteq \mathbb{R}^n$  und  $s \in \mathbb{R}^+$ . Für jedes  $\delta > 0$  sei

$$\mathcal{H}_\delta^s(F) := \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} (\text{diam}(U_i))^s : \{U_i\}_{i \in \mathbb{N}} \text{ ist } \delta\text{-Überdeckung von } F \right\}$$

<sup>1</sup>Im folgenden nur noch als Hausdorff–Dimension bezeichnet.

<sup>2</sup>Besonders die Abschätzung nach unten ist mittels Computermethoden schwer durchzuführen.

Dann ist das  $s$ -dimensionale Hausdorff-Maß definiert durch

$$\mathcal{H}^s := \lim_{\delta \rightarrow 0} \mathcal{H}_\delta^s(F)$$

Hausdorff [39] hat bewiesen, daß es eine Zahl  $D_H(F)$  derart gibt, daß:

$$\mathcal{H}^s(F) = \begin{cases} \infty & \text{für } s < D_H(F) \\ 0 & \text{für } s > D_H(F) \end{cases}$$

Mit Hilfe des Hausdorff-Maßes ist die Hausdorff-Dimension nun folgendermaßen definiert:

**Definition 6.3 (Hausdorff-Dimension)**

Sei  $F \subseteq \mathbb{R}^n$ . Die Hausdorff-Dimension  $D_H(F)$  ist definiert durch

$$D_H(F) = \inf\{s \mid \mathcal{H}^s(F) = 0\} = \sup\{s \mid \mathcal{H}^s(F) = \infty\}$$

$D_H(F)$  hat als grundlegenden Eigenschaften:

- (1) Wenn  $F \subset \mathbb{R}^n$ , dann ist  $D_H(F) \leq n$
- (2) Wenn  $F \subset G$ , dann ist  $D_H(F) \leq D_H(G)$
- (3) Wenn  $F$  abzählbar ist, dann ist  $D_H(F) = 0$

### 6.1.2.2 Box-Dimension

Die Box-Dimension<sup>3</sup> ist wie die Hausdorff-Dimension auf beliebigen (jedoch nichtleeren und beschränkten) Mengen definiert. Sie ist mit der Selbstähnlichkeits-Dimension verwandt, setzt jedoch nicht die Selbstähnlichkeit voraus, so daß auch unregelmäßige Strukturen faßbar sind.

Grundidee ist, daß man über die zu untersuchende Struktur ein regelmäßiges Netz von Gittermaschen legt und zählt, wieviele Gittermaschen von der Struktur geschnitten werden. (Abbildung 6.3) Bei unterschiedlich weiten Gittermaschen wird sich auch die Anzahl der geschnittenen Maschen verändern und man erhält wieder eine Beziehung in Form eines Potenzgesetzes:

$$N_\delta = \frac{k}{\delta^{D_B}}$$

$N_\delta$  bezeichnet die Anzahl an geschnittenen Maschen (Boxes) für eine bestimmte Maschenweite  $\delta$ ,  $k$  ist eine Konstante, in der sich die „Größe“ der Struktur niederschlägt. Löst man nach  $D_B$  auf so erhält man

$$D_B = \frac{\log k - \log N_\delta}{\log \delta}$$

Allgemeiner:

---

<sup>3</sup>auch Kästchen-Dimension oder Kapazitäts-Dimension.

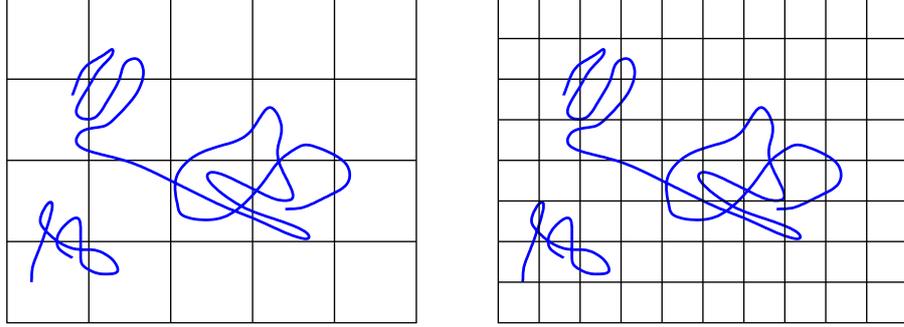


Abbildung 6.3: Unregelmäßige Struktur und Gittermaschen

**Definition 6.4 (Box–Dimension)**

Sei  $F \subseteq \mathbb{R}^n$  nichtleer und beschränkt und sei  $N_\delta(F)$  die Anzahl von  $\delta$ -Maschen, die  $F$  schneiden. Dann heißt

$$D_B(F) := \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log k - \log N_\delta(F)}{\log \delta} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{-\log N_\delta(F)}{\log \delta} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{\log 1/\delta}$$

**Box–Dimension** von  $F$ .

Die praktische Schwierigkeit bei der Berechnung der Hausdorff–Dimension sind vor allem die notwendigen Abschätzungen. Bei der Box–Dimension ist es ausreichend, die Grenzwertbetrachtung  $\delta \rightarrow 0$  für eine fallende Folge  $\delta_k$  zu betrachten. In [42] wurde das folgende Lemma bewiesen

**Lemma 6.1**

Sei  $\delta_k$  eine Folge mit  $\delta_{k+1} \leq c\delta_k$  für eine Konstante  $0 < c < 1$ , insbesondere  $\delta_k = c^k$ . Dann ist

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{N_\delta(F)}{-\log \delta} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{N_{\delta_k}(F)}{-\log \delta_k}$$

**Beweis**

Sei  $\delta_{k+1} \leq \delta \leq \delta_k$ . Dann ist

$$\frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \leq \frac{\log N_{\delta_{k+1}}(F)}{-\log \delta_k} = \frac{\log N_{\delta_{k+1}}(F)}{-\log \delta_{k+1} + \log(\frac{\delta_{k+1}}{\delta})} \leq \frac{\log N_{\delta_{k+1}}(F)}{-\log \delta_{k+1} + \log c}$$

und somit

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta} \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\log N_{\delta_{k+1}}(F)}{-\log \delta_{k+1}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\log N_{\delta_k}(F)}{-\log \delta_k}$$

Wegen  $\delta \leq \delta_k$  gilt umgekehrt unmittelbar

$$\frac{\log N_{\delta_k}(F)}{-\log \delta_k} \leq \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta}$$

und somit

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\log N_{\delta_k}(F)}{-\log \delta_k} \leq \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta(F)}{-\log \delta}$$

womit die Gleichheit folgt.  $\square$

Betrachtet man dreidimensionale Strukturen, wie die hier die mit möglichen Höhenunterschieden vorliegenden Texturen, so werden die zur Dimensionsbestimmung vorzunehmenden Überdeckungen nicht mit Gitter-Maschen sondern mit Gitter-Würfeln vorgenommen.

### 6.1.2.3 Probability-Dimension

Die von Voss [85] vorgestellte Probability-Dimension ist problemgemäß eng mit der Box-Dimension verwandt, unterscheidet sich jedoch bezüglich der Ermittlung der zur Überdeckung notwendigen „Maschen“.

#### Definition 6.5 (Probability-Dimension)

Sei  $P(m, \delta)$  die Wahrscheinlichkeit, daß  $m$  Pixel in einem Quadrat der Seitenlänge  $\delta$  liegen, wobei das Quadrat über einem beliebigen Pixel zentriert ist.

Für jedes  $\delta$  gilt  $\sum_{m=1}^{\delta^2} P(m, \delta) = 1$  mit  $\delta^2$  als maximaler Pixelanzahl in einem Quadrat.

Sei  $\|S\|$  die Anzahl aller untersuchten Pixel. Sei weiterhin  $\frac{\|S\|}{m} P(m, \delta)$  die Anzahl aller Quadrate, die  $m$  Pixel enthalten, wobei die Anzahl aller Quadrate über  $\frac{\|S\|}{m}$  angenähert ist.

Die wahrscheinliche benötigte Anzahl von Quadraten, um eine gegebene Pixelmenge zu überdecken ist dann

$$N_\delta = \sum_{m=1}^{\delta^2} \frac{\|S\|}{m} P(m, \delta) = \|S\| \sum_{m=1}^{\delta^2} \frac{P(m, \delta)}{m}$$

und die hieraus gegebene **Probability-Dimension**

$$D_P = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{-\log N_\delta}{\log \delta} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N_\delta}{\log 1/\delta}$$

## 6.2 Dimensionsanalyse

In [75] sind von Reuter Verfahren untersucht worden, die aus einer Grauwert-Textur die Fraktale Dimension bestimmen und es wurde die Güte dieser Verfahren bewertet.

Für die Analyse wurden folgende Anforderungen an die zu untersuchenden Texturen gestellt:

- Homogenität  
Es ist sicherzustellen, daß die Textur keine strukturellen Unterschiede aufweist. Das Merkmal Rauheit ist gleichmäßig über die gesamte Probe verteilt.
- Monochromie  
Sämtliche Verfahren deuten ein Grauwertbild als Höhenkarte. Es sollen also keine Farbinformationen vorhanden sein.
- Symmetrie–armut  
Die Textur enthält keine prägnanten Musterwiederholungen.
- Richtungslosigkeit  
Die Textur besitzt keine ausgeprägte Vorzugsrichtung.

Dies bedeutet zunächst eine Einschränkung der zur Analyse geeigneten Menge an möglichen Texturen. Für den praktischen Einsatz stellen sich diese Einschränkungen jedoch nicht gravierend dar, da die zur reinen Darstellung verwendeten strukturtragenden Texturen Monochromie gewährleisten. Farbinformation wird hier durch das graphische Rendering beigemischt. Homogenität ist oftmals nicht gegeben. Hierzu sei jedoch auf die folgenden Kapitel verwiesen, wo die weiterführende Parameterextraktion und –rekombination erläutert werden wird.

Geeignete Materialien sind zum Beispiel Schleifpapier, (feinfaserige) Gewebe, genarbte Kunststoffe oder kurzflorige Bodenbeläge. Nicht geeignet sind im Gegensatz dazu gleichmäßig genoppte Beläge, sehr grobe Gewebe oder Holzmaserungen.

Allen in [75] bewerteten Verfahren ist gemeinsam, daß die untersuchten Grauwert–Texturen als Höhenkarte aufgefaßt werden. Die Grauwert–Information der Pixel innerhalb der Textur wird als Höhe eines an der Position des Pixels befindlichen Quaders interpretiert. Somit ist eine Überdeckung zur Bestimmung der fraktalen Dimension nicht mit zweidimensionalen „Maschen“ durchgeführt, sondern mittels Würfeln ebenfalls räumlich umgesetzt.

Neben den in 6.1.2 definierten Dimensionen Box–Dimension ( $D_B$ ) und Probability–Dimension ( $D_P$ ) wurden noch zwei Varianten dieser Dimensionsdefinitionen verglichen: Information–Dimension ( $D_I$ ) und Correlation–Dimension ( $D_C$ ). Formale Definition hierzu finden sich ebenfalls in [75].

Die Güte der unterschiedlichen Dimensionsbegriffe wurde durch synthetische Grauwert–Bilder mit gegebener fraktaler Dimension verglichen. Abbildung

	$D_B$	$D_I$	$D_C$	$D_P$
dim22	2,22	2,21	2,20	2,20
dim25	2,36	2,36	2,36	2,51
dim28	2,44	2,44	2,44	2,78
dim27-130	2,39	2,38	2,37	2,68
dim27-185	2,42	2,42	2,43	2,68
dim27-235	2,42	2,42	2,43	2,69

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Dimensionsanalysen

6.4 zeigt drei Beispiele mit den Dimensionen  $D = 2,2$ ,  $D = 2,5$  und  $D = 2,8$ . Abbildung 6.5 zeigt weiterhin drei unterschiedliche Auflösungsstufen mit der Dimension  $D = 2,7$ .

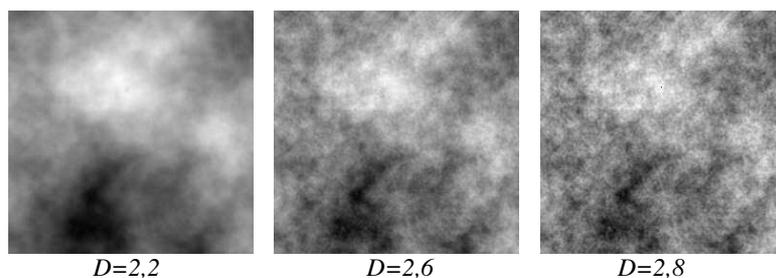


Abbildung 6.4: Grauwert-Bilder gegebener fraktaler Dimension

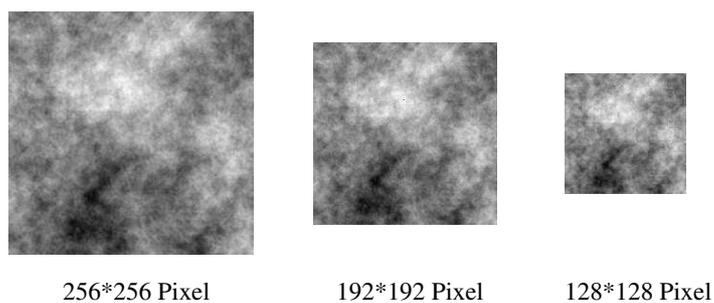
Abbildung 6.5: Drei Auflösungsstufen der Dimension  $D = 2,7$ 

Tabelle 6.1 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse der Verfahren zu den Grauwert-Bildern der Abbildungen 6.4 und 6.5:

Zusammenfassend stellt Reuter als Ergebnisse seiner Untersuchungen fest:

- Bei kleinen Dimensionen nahe  $D = 2,0$  liefern sämtliche Verfahren ähnliche Werte.

- Nur die Probability-Dimension liegt als einzige dicht an den vorgegebenen Dimensionen, auch bei großen Werten ( $D$  nahe 3, 0). Sie approximiert über den größten Bereich die vorgegebenen Dimensionen am besten.
- Die Verfahren sind bezüglich der Auflösung der Grauwert-Bilder invariant.

## 6.3 Synthesemodell

Ist die fraktale Dimension als Maß der Rauheit einer gegebenen Textur bestimmt, gilt es nun, diese Rauheit haptisch zu synthetisieren. Ziel ist also, die gegebene fraktale Dimension „fühlbar“ zu machen. Ein geeignetes theoretisches Modell hierfür sind *Brownsche Bewegungen* und deren Erweiterung auf *Brownsche Flächen*. Herbst hat im Rahmen dieses Projekts in [42] die Synthese eines haptischen Signals auf Basis Brownscher Bewegungen und Flächen entwickelt, umgesetzt und evaluiert.

### 6.3.1 Brownsche Bewegungen, Brownsche Flächen

#### Definition 6.6 (Brownsche Bewegung)

Eine **Brownsche Bewegung**  $X$  ist ein stochastischer Prozeß über dem Wahrscheinlichkeitsraum  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , so daß:

- (i) Mit Wahrscheinlichkeit 1 gilt  $X(0) = 0$ .
- (ii)  $X(t)$  ist stetig.
- (iii) Für jedes  $t \geq 0$  und  $\sigma \geq 0$  ist das Inkrement  $X(t + \sigma) - X(t)$  normalverteilt mit dem Mittelwert 0 und der Varianz  $\sigma$ . Es gilt also:

$$P(X(t + \sigma) - X(t) \leq x) = (2\pi\sigma)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-u^2}{2\sigma}\right) du.$$

- (iv) Für  $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{2m}$  sind die Inkremente  $X_\tau(t_2) - X_\tau(t_1), \dots, X_\tau(t_{2m}) - X_\tau(t_{2m-1})$  stochastisch unabhängig.

Aus (i)–(iii) folgt unmittelbar, daß  $X(t)$  für jedes  $t$  selbst normalverteilt ist mit dem Mittelwert 0 und der Varianz  $t$ .

Man kann zeigen, daß der Brownsche Prozeß die einzige Wahrscheinlichkeitsverteilung von Funktionen ist, die stochastisch unabhängige Inkremente besitzt, welche stationär sind und eine endliche Varianz haben (Falconer, [30]). Einschränkend für unseren Fall der Rauheitssynthese ist jedoch, daß

der Graph der Brownschen Bewegung nach Definition 6.6 fast immer die Dimension  $1\frac{1}{2}$  besitzt. Um also Stichprobenfunktionen mit unterschiedlichen Merkmalen zu erhalten, ist es nötig, obige Definition abzuschwächen.

**Definition 6.7 (gebrochene Brownsche Bewegung)**

Eine gebrochene Brownsche Bewegung  $X_H(t)$  vom Index  $H$  ( $0 \leq H \leq 1$ ) ist ein stochastischer Prozeß über dem Wahrscheinlichkeitsraum  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , der die folgenden Bedingungen erfüllt:

- (i)  $X_H(0) = 0$ .
- (ii)  $X(t)$  ist stetig.
- (iii) Für jedes  $t \geq 0$  und  $\sigma \geq 0$  ist das Inkrement  $X_H(t + \sigma) - X_H(t)$  normalverteilt mit Erwartungswert 0 und Varianz  $\sigma^{2H}$ , es gilt also:

$$P(X_H(t + \sigma) - X_H(t) \leq x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \sigma^{-H} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-u^2}{2\sigma^{2H}}\right) du.$$

Mit Bedingung (iii) gilt, daß  $E((X_H(t + \sigma) - X_H(t))^2) = \sigma^{2H}$ . Hieraus kann man zeigen [42], daß

$$\text{cov}(X_H(t) - X_H(0), X_H(t + \sigma) - X_H(t)) = \frac{1}{2}((t + \sigma)^{2H} - t^{2H} - \sigma^{2H})$$

Der Index  $H$  teilt die Brownschen Bewegungen  $X_H(t)$  also in drei Klassen ein: Das Vorzeichen der Kovarianz der Inkremente  $X_H(t) - X_H(0)$  und  $X_H(t + \sigma) - X_H(t)$ ; ( $t, \sigma \geq 0$ ) ist nach obiger Gleichung von  $H$  abhängig. Je nach Vorzeichen ist die Entwicklung einer solchen Brownschen Bewegung vorhersagbar, da die Inkremente nur für  $H = \frac{1}{2}$  stochastisch unabhängig sind.

- $H = \frac{1}{2}$ :  
Die Kovarianz der Inkremente ist gleich Null.  $X_{\frac{1}{2}}(t)$  ist die allgemeine Brownsche Bewegung.
- $H \geq \frac{1}{2}$ :  
Die Kovarianz der Inkremente ist positiv. Ein Zuwachs (eine Abnahme) in der Vergangenheit bedeutet einen Zuwachs (eine Abnahme) in der Zukunft. Dieses Verhalten wird als *Persistenz* bezeichnet.
- $H \leq \frac{1}{2}$ :  
Die Kovarianz der Inkremente ist negativ. Ein Zuwachs in der Vergangenheit führt zu einer Abnahme in der Zukunft und umgekehrt. Man spricht hier von *Antipersistenz*.

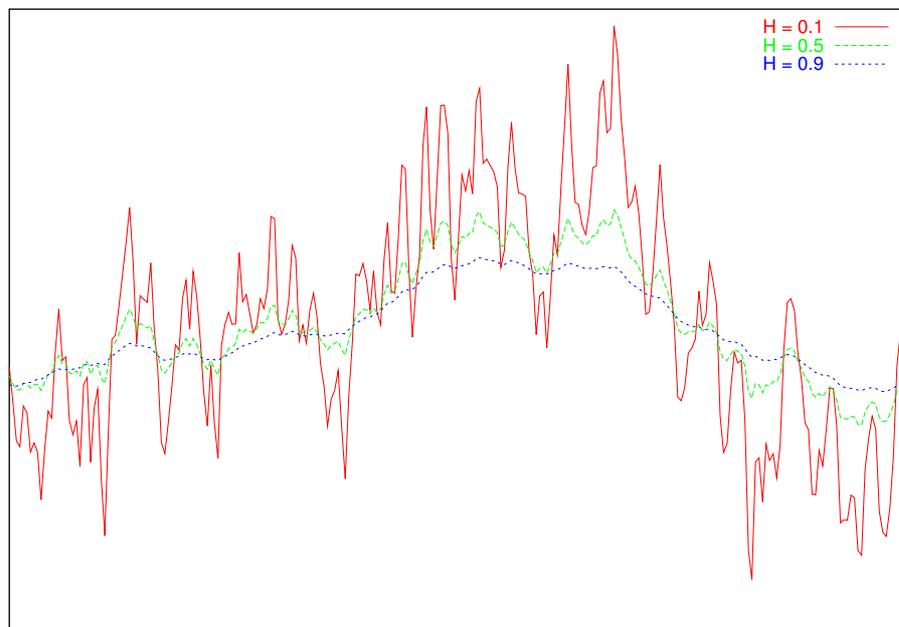


Abbildung 6.6: Graphen Brownscher Bewegungen

Abbildung 6.6 zeigt verschiedene Graphen Brownscher Bewegungen mit exemplarischen Indizes bezüglich Persistenz, Antipersistenz und stochastischer Unabhängigkeit der Inkremente.

Entscheidend für die Synthese von Rauheit über fraktale Dimension ist der folgende Satz:

**Satz 6.1**

Der Graph einer gebrochenen Brownschen Bewegung  $X_H(t)$  vom Index  $H$  besitzt die Hausdorff- und Kästchendimension

$$\dim_H \text{graph} X_H = \dim_B \text{graph} X_H = 2 - H$$

**Beweis:** Falconer in [30].  $\square$

Erweitert man die Definition von Brownschen Bewegungen, die nur von einem Parameter  $t$  abhängen auf zwei Parameter, so lassen sich mit ähnlichen Eigenschaften zweidimensionale Flächen modellieren:

**Definition 6.8 (Brownsche Fläche vom Index  $H$ )**

Eine **Brownsche Fläche**  $X_H(x, y)$  ( $X_H : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ) vom Index  $H$  ( $0 \leq H \leq 1$ ) ist ein stochastischer Prozeß mit:

- (i)  $X_H(0, 0) = 0$ .
- (ii)  $X_H(x, y)$  ist stetig.
- (iii) Seien  $\sigma, \tau \geq 0$ . Dann seien die Inkremente  $X_H(x + \sigma, y + \tau) - X_H(x, y)$  normalverteilt mit dem Erwartungswert 0 und Varianz  $(\sigma^2 + \tau^2)^H =: \rho^{2H}$ , daß heißt:

$$P(X_H(x + \sigma, y + \tau) - X_H(x, y) \leq z) = (2\pi)^{\frac{1}{2}}(\sigma^2 + \tau^2)^{-\frac{H}{2}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{r^2}{2(\sigma^2 + \tau^2)^H}\right) dr.$$

Auch hier folgt sofort aus Definition 6.8, daß  $X_H(x, y)$  normalverteilt ist mit Erwartungswert 0 und Varianz  $(x^2 + y^2)^H$ .

Die Abbildungen 6.7, 6.8 und 6.9 zeigen beispielhaft Brownsche Flächen unterschiedlicher Indizees.

Äquivalent zu Brownschen Bewegungen existiert ein Zusammenhang zwischen dem Index einer Brownschen Fläche und ihrer Hausdorff-Dimension:

**Satz 6.2**

Eine Brownsche Fläche  $X_H(x, y)$  vom Index  $H$  besitzt die Hausdorff- und Kästchendimension

$$\dim_H X_H(x, y) = \dim_B X_H(x, y) = 3 - H$$

**Beweis:** Falconer in [30].  $\square$

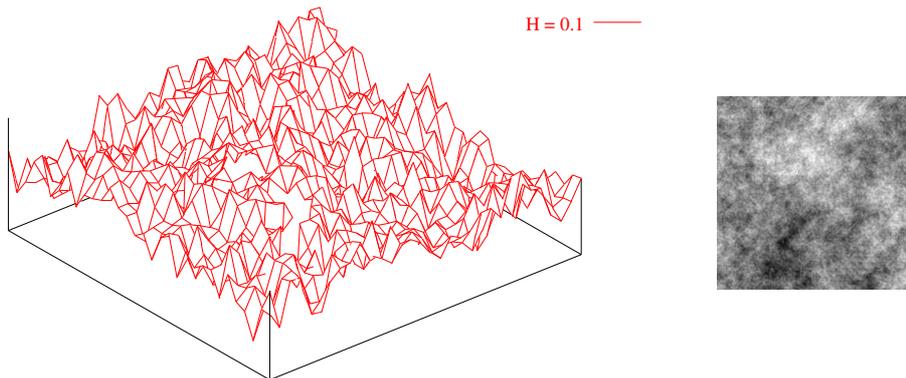


Abbildung 6.7: Brownsche Fläche mit Index  $H=0.1$

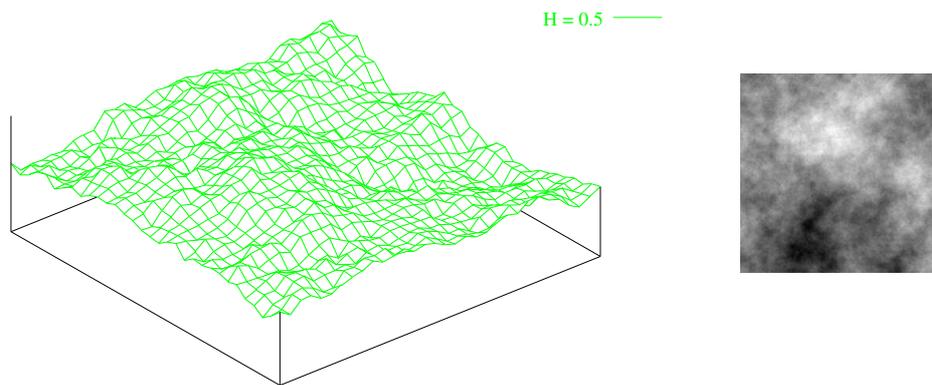


Abbildung 6.8: Brownsche Fläche mit Index  $H=0.5$

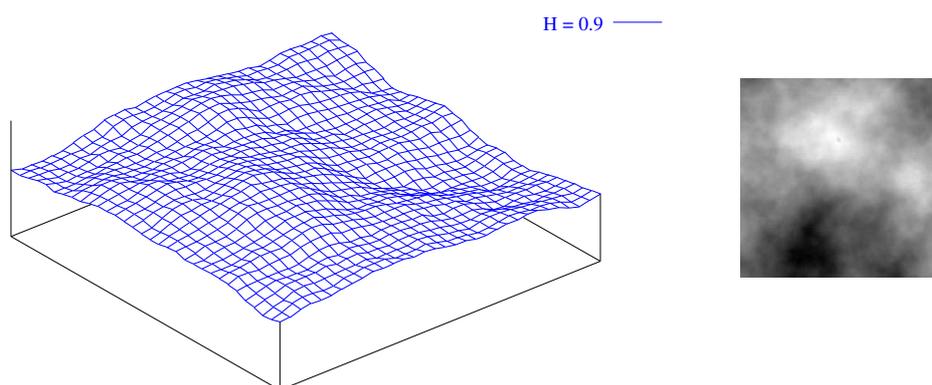


Abbildung 6.9: Brownsche Fläche mit Index  $H=0.9$

### 6.3.2 Konstruktion Brownscher Strukturen

Es ist sehr schwierig einen Existenzbeweis für Brownsche Bewegungen, bzw. Brownsche Flächen zu führen. Stattdessen seien hier Konstruktionsverfahren genannt, die als Grundlage für Existenzbeweise dienen können [30].

Sowohl Konstruktion Brownscher Bewegungen als auch die Brownscher Flächen erfolgt über die **Methode der zufälligen Mittelpunktverschiebung**. Zu dieser Konstruktion Brownscher Bewegungen benötigen wir noch folgendes Lemma:

#### Lemma 6.2

Sei  $X_H(t)$  eine Brownsche Bewegung mit Index  $H$ . Dann haben die Inkremente von  $X_H(t)$  und die Inkremente der skalierten Brownschen Bewegung  $\frac{1}{r^H}X_H(rt)$  dieselbe statistische Verteilung.

**Beweis** aus [42]:

Die Inkremente von  $X_H(t)$  sind normalverteilt mit Erwartungswert 0 und Varianz  $\sigma^{2H}$ , d.h. sie haben die Verteilungsfunktion gemäß Definition 6.7. Die Inkremente der skalierten Brownschen Bewegung genügen damit der Verteilungsfunktion

$$\begin{aligned} & P\left(\frac{1}{r^H}(X_H(r(t + \sigma^2)) - X_H(rt)) \leq x\right) \\ &= P(X(r(t + \sigma^2)) - X(rt)) \leq r^H x \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^H r^H} \int_{-\infty}^{x r^H} \exp\left(\frac{-v^2}{2\sigma^{2H} r^{2H}}\right) dv \quad (*) \end{aligned}$$

Substituiert man in (\*)  $\frac{v}{r^H}$  durch  $u$ , so ist  $du = \frac{1}{r^H}dv$  und man erhält

$$P(X(r(t + \sigma^2)) - X(rt)) \leq r^H x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^H} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-u^2}{2\sigma^{2H}}\right) du.$$

Die Inkremente der skalierten Brownschen Bewegung  $\frac{1}{r^H}X_H(rt)$  haben also dieselbe statistische Verteilung wie  $X_H(t)$ .  $\square$

#### Konstruktion von Graphen Brownscher Bewegungen:

Sei  $t \in [0, 1]$ . Zur Initialisierung setze man  $X_H(0) = 0$  und ziehe  $X_H(1)$  zufällig aus einer Normalverteilung mit Erwartungswert 0 und Varianz 1. Iterativ werden nun  $X_H(k2^{-j})$  mit  $0 \leq k \leq 2^j$  ( $k, j \in \mathbb{N}, j \geq 1$  sowie  $k$  ungerade) definiert. Man zieht also im  $j$ -ten Schritt  $X_H(k2^{-j})$  zufällig aus einer Normalverteilung mit

Erwartungswert  $\frac{1}{2}(X_H((k-1)2^{-j}) + X_H((k+1)2^{-j}))$  und  
 Varianz  $2^{-jH}$

$X_H(t)$  ist somit an allen Punkten  $t = k2^{-j}$  definiert. Da  $X_H(t)$  stetig ist, ist die Brownsche Bewegung vollständig bestimmt. Es ist noch zu zeigen, daß die Inkremente der so definierten Brownschen Bewegung die Bedingung (iii) von Definition 6.6 erfüllen.

Der Erwartungswert von  $X_H((k+1)2^{-j}) - X_H((k-1)2^{-j})$  ist gleich

$$\begin{aligned} E(\underbrace{X_H((k+1)2^{-j})}_{\in j-1\text{-Stufe}} - \underbrace{X_H((k-1)2^{-j})}_{\in j-1\text{-Stufe}}) &\stackrel{E \text{ linear}}{=} \underbrace{E(X_H((k+1)2^{-j}))}_{EX_1} \\ &\quad - \underbrace{E(X_H((k-1)2^{-j}))}_{EX_2} \\ &\stackrel{EX_1=EX_2}{=} 0 \end{aligned}$$

Nach Lemma 6.2 haben die Inkremente der skalierten Brownschen Bewegung  $\frac{1}{2^{(-j+1)H}}X_H(k2^{-j})$  ( $0 \leq k \leq 2^{j-1}$ ) dieselbe statistische Verteilung wie  $X_H(k)$ , also

$$\begin{aligned} \frac{1}{2^{(-j+1)H}} \text{var}(X_H((k+1)2^{-j}) - X_H((k-1)2^{-j})) &= 1 \\ \Leftrightarrow \text{var}(X_H((k+1)2^{-j}) - X_H((k-1)2^{-j})) &= 2^{(-j+1)H} \end{aligned}$$

### Konstruktion Brownscher Flächen:

Im zweidimensionalen Fall der Konstruktion Brownscher Flächen sei o.B.d.A.  $(x, y) \in [0, 1] \times [0, 1]$ .

Zur Initialisierung setze man  $X_H(0, 0) = 0$  und ziehe  $X_H(0, 1)$ ,  $X_H(1, 0)$  und  $X_H(1, 1)$  aus einer Normalverteilung mit Erwartungswert 0 und Varianz 1.

Iterativ ziehe man nun im  $(i, j)$ -ten Schritt  $X_H(k2^{-i}, l2^{-j})$  aus einer Normalverteilung mit

Erwartungswert

$$\begin{aligned} \frac{1}{4}(X_H((k-1)2^{-i}, (l-1)2^{-j}) + X_H((k-1)2^{-i}, (l+1)2^{-j}) + \\ X_H((k+1)2^{-i}, (l-1)2^{-j}) + X_H((k+1)2^{-i}, (l+1)2^{-j})) \end{aligned}$$

und Varianz  $2^{(-i-j)H}$

Dabei ist

$$0 \leq k \leq 2^i, \quad i \geq 1, \quad k \text{ ungerade und analog}$$

$$0 \leq l \leq 2^j, \quad j \geq 1, \quad l \text{ ungerade.}$$

## 6.4 Experimente und Ergebnisse

### 6.4.1 Rahmenbedingungen der Experimente

Herbst hat die Umsetzung der hier dargelegten Rauheitsanalyse und –synthese in [42] mit einigen elementaren Experimenten abgeschlossen.

Verwendet wurde hierzu das schon in Abschnitt 5.6 vorgestellte haptische Gerät PHANToM. Als Endeffektor wurde ein Stab eingesetzt, der wie ein Stift von den Probanden gehalten wurde. Das Modell der Wahrnehmung entspricht also dem, als würde eine Oberfläche mit einem fest gehaltenem Stab abgetastet werden.

Ziel war es die prinzipielle Unterscheidbarkeit, der über Brownsche Flächen und Bewegungen erzeugten Rauheiten zu prüfen. Auf ein visuelles Äquivalent der zu fühlenden Rauheiten wurde daher bewußt verzichtet, um ausschließlich den zu untersuchenden Sinn anzusprechen.

Jedem Probanden wurde vor der Durchführung der Versuche die Funktionsweise des PHANToM erklärt. Die Versuchsteilnehmer hatten Gelegenheit, die Arbeitsumgebung beliebig lange zu erkunden, um sich mit dem Umgang des Versuchsaufbaus vertraut zu machen. Schließlich wurden noch einige Beispielt Texturen haptisch vorgelegt. Hierdurch sollte die Art des zu erwartenden Eindrucks präsentiert und das Spektrum der Krafterückkopplung eingegrenzt werden.

Die zur Signalgenerierung vorliegenden Brownschen Flächen und Bewegungen werden naheliegend als Höhenkarte interpretiert. Die Effektfläche liegt in der  $xz$ -Ebene<sup>4</sup>, Höhenänderungen auf der Effektfläche sind in  $y$ -Richtung zu messen.

Zur Bestimmung der resultierenden Rückkopplungskraft  $\mathbf{F}$  (in Newton) wurden zwei verschiedene Berechnungsvorschriften bei den Versuchen verwendet:

Die Berechnungsvorschrift für einen Kraftvektor  $\mathbf{F}_\perp$ , der orthogonal zu der Effektfläche ist, lautet:

$$\mathbf{F}_\perp = A(0, \Delta y, 0). \quad (6.6)$$

$A$  bezeichnet hier, wie auch im folgenden Fall eine Proportionalitätskonstante.

Eine Gradienten basierte laterale Kraft für obige  $xz$ -Ebene ergibt sich zu

$$\mathbf{F}_\parallel = A \left( \frac{\Delta y}{\Delta x}, 0, \frac{\Delta y}{\Delta z} \right). \quad (6.7)$$

---

<sup>4</sup>Diese  $xz$ -Ebene entspricht der waagerechten „Arbeitsfläche“.

Vorteilhafte Eigenschaft von sowohl Brownschen Flächen als auch Brownschen Bewegungen als Basis für zugrundeliegende Höhenkarten ist ihre Selbstaffinität:

$$\Delta y \sim (\Delta x^2 + \Delta z^2)^{\frac{H}{2}}$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis der Höhendifferenz zur zurückgelegten Strecke mit  $\Delta r^2 := \Delta x^2 + \Delta z^2$  zu

$$\frac{\Delta y}{\Delta r} \sim (\Delta r)^{H-1} = (\Delta x^2 + \Delta z^2)^{\frac{H-1}{2}}$$

Die Höhenänderung ist isotrop, was auch in der Homogenitätsbedingung des Materials Entsprechung findet. Es kann daher o.B.d.A. in Gleichung 6.7 die laterale Kraft zu

$$\mathbf{F}_{\parallel} = A(\Delta y, 0, \Delta y) \quad (6.8)$$

gesetzt werden.

Die Berechnung der Höhendifferenzen  $\Delta y$  zwischen zwei Auswertungen wird nach folgendem Algorithmus vorgenommen. Brownsche Flächen liegen hierbei als Grauwertbild der Größe  $N_{max} \times M_{max}$  vor. Für Brownsche Graphen ist die Dimension des Grauwertbildes  $N_{max} \times 1$ .

1. Bestimme die aktuelle Position des Endeffektors in der Arbeitsumgebung
- 2a. Brownsche Fläche: Ist der Effektor mit der Effektfläche in Kontakt, ermittle den zugehörigen Grauwert, der die Höhe an der ermittelten Position repräsentiert.
- 2b. Brownscher Graph: Bei weiter bestehendem Kontakt des Effektors mit der Effektfläche, berechne die zurückgelegte Distanz und übertrage diese Wegstrecke auf den Graphen, um die aktuelle Höhe (den Grauwert) zu erhalten.
3. Bilde die Differenz aus aktuellem Grauwert und dem Grauwert, der im vorhergehenden Schritt ermittelt wurde.
4. Berechne die Rückkopplungskraft aus Gleichung 6.7 oder 6.6.

### 6.4.2 Experimente

Herbst [42] untersuchte vier verschiedene Implementationen haptischer Rauheitssynthese mittels Brownscher Strukturen. Jeweils Brownsche Flächen und Brownsche Graphen mit orthogonaler und mit lateraler Kraftberechnung.

Die Reduktion auf Graphen von Brownschen Bewegungen liegt zum einen nahe, da solch ein Graph leicht als Schnitt einer Brownschen Fläche mit einer Ebene aufgefaßt werden kann und beiden Strukturen eine äquivalente Bedeutung des Indexes  $H$  zu eigen ist [30],[42]. Zum anderen ist haptische Wahrnehmung eindimensional, da für die Rauheitswahrnehmung eine Bewegung auf der Oberfläche Voraussetzung ist. Schließlich kann sich die schnellere Berechnung Brownscher Graphen im Gegensatz zu Flächen als Vorteil erweisen.

Die vier verschiedenen Berechnungsvorschriften wurden unabhängig voneinander bewertet, d.h. jedes Experiment beinhaltete eine eigene *Eingewöhnungsphase*. In der *Bewertungsphase* galt es dann, die vorgelegten Texturen in einer Rauheitsskala einzuordnen. Abschließend verbalisierten die Probanden ihre Empfindungen in der *Kommentarphase*.

Um die Vergleichbarkeit der Bewertungen zu ermöglichen, wurde am Anfang der Bewertungsphase die glatteste und die raueste Textur präsentiert und es wurde ein fester „Bewertungsbereich“ von 1 bis 20 vorgegeben. Die Probanden sollten innerhalb dieses Wertebereichs die empfundenen Rauheiten der nun zufällig vorgelegten Texturen einordnen.

Es war weiterhin gestattet, getroffene Einordnungen zu korrigieren und es wurden auf Wunsch schon bewertete Texturen nochmals vorgelegt.

Die Ergebnisse zeigen die Einordnung, die am Ende der Bewertungsphase vorlag. Auf der Abszisse ist der Index  $H$  der Brownschen Fläche, bzw. des Brownschen Graphen abgetragen, die Ordinatenachse stellt die Bewertungsskala von 1 bis 20 dar. Ferner ist zur Verdeutlichung jeweils die ideale, lineare Einordnung zum Vergleich eingezeichnet.

In der jeweils abschließenden Kommentarphase gruppieren die Probanden ihre Empfindungen in drei Materialklassen:

1. glatt und weich wie Gummi oder Teppich
2. hart und relativ rau wie starrer Kunststoff
3. hart und rau wie Rauhasertapete oder Waschbeton

Herbst [42] kommentiert die Ergebnisse so:

„Diese drei Klassen kommen durch die sprunghafte Höherbewertung der Rauheit zum Ausdruck; die Sprünge lassen sich auch in den Graphiken wiederfinden. Jedoch sind diese drei Klassen bezüglich des Index  $H$  für alle vier Berechnungsmethoden annähernd gleich eingeteilt. Insbesondere folgt aus einem kleineren

Index — was einer höheren fraktalen Dimension der Höhenkarte entspricht — eine als rauer empfundene Oberfläche.

Die Angabe des Parameters fraktale Dimension reicht für eine realistische Simulation verschiedener Materialien nicht aus. Es müßten weitere Kenntnisse über haptische Materialeigenschaften in die Kraftberechnung einfließen.“

### 6.4.2.1 Orthogonale Kraft mit Brownschen Flächen

Die Höhenkarten lagen als Grauwertbild der Größe  $N_{max} = M_{max} = 257$  vor. Der maximale Grauwert  $G_{max}$  war 256. Zur Anwendung kam Gleichung 6.6 mit  $A = 0.005$ .

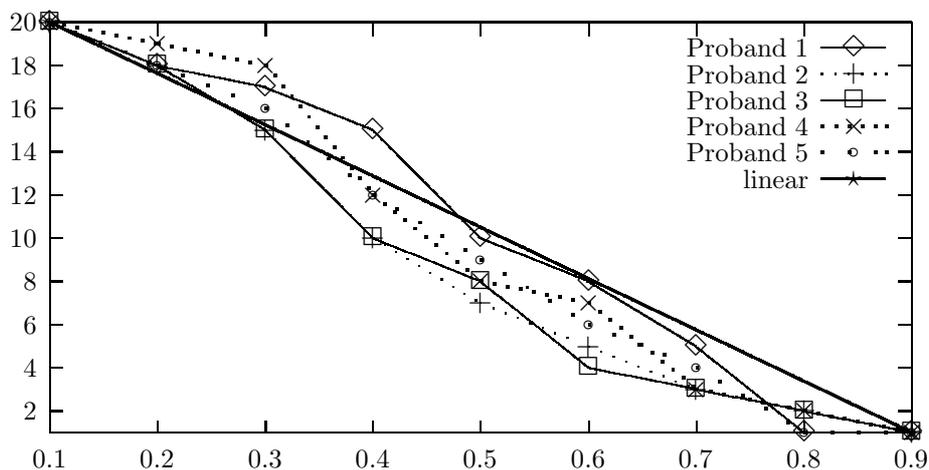


Abbildung 6.10: Brownsche Flächen, orthogonale Kraft

### 6.4.2.2 Orthogonale Kraft mit Brownschen Graphen

Die Höhenkarten lagen als Grauwertbild der Größe  $257 \times 1$  vor. Der maximale Grauwert  $G_{max}$  war 256. Zur Anwendung kam Gleichung 6.6 mit  $A = 0.01$ .

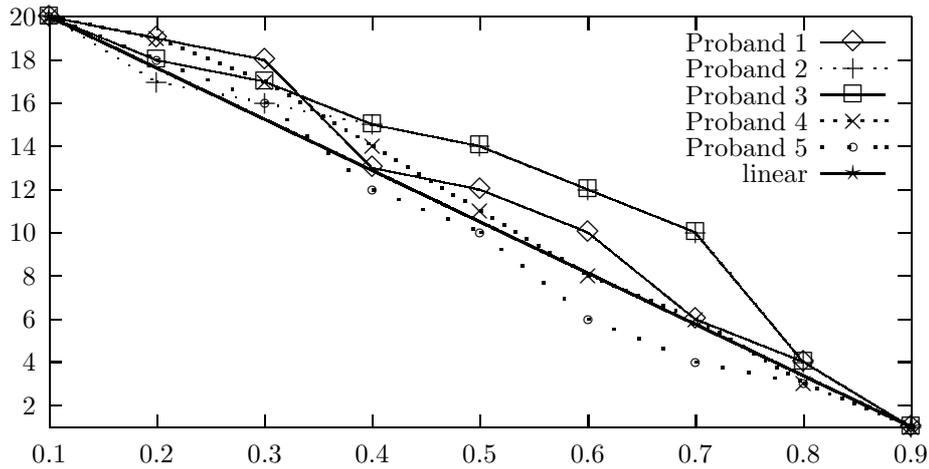


Abbildung 6.11: Brownsche Graphen, orthogonale Kraft

### 6.4.2.3 Laterale Kraft mit Brownschen Flächen

Die Höhenkarten lagen als Grauwertbild der Größe  $N_{max} = M_{max} = 257$  vor. Der maximale Grauwert  $G_{max}$  war 256. Zur Anwendung kam Gleichung 6.7 mit  $A = 0.01$ .

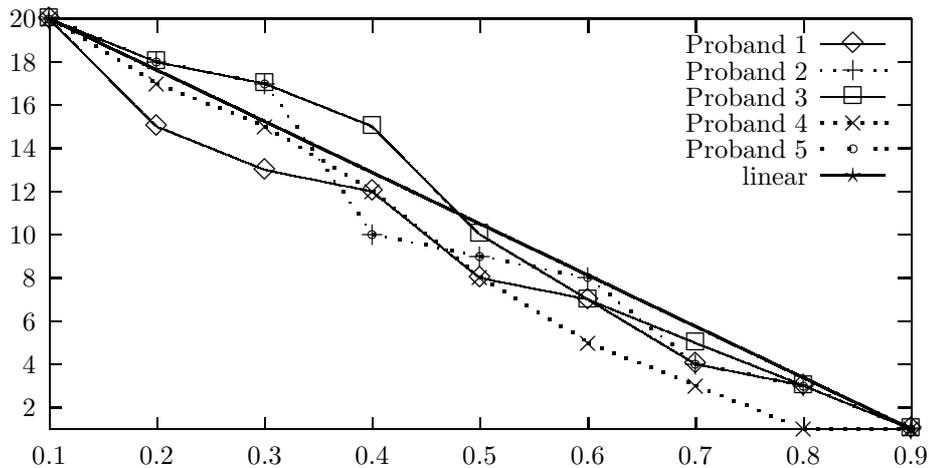


Abbildung 6.12: Brownsche Flächen, laterale Kraft

#### 6.4.2.4 Laterale Kraft mit Brownschen Graphen

Die Höhenkarten lagen als Grauwertbild der Größe  $257 \times 1$  vor. Der maximale Grauwert  $G_{max}$  war 256. Zur Anwendung kam Gleichung 6.7 mit  $A = 0.01$ .

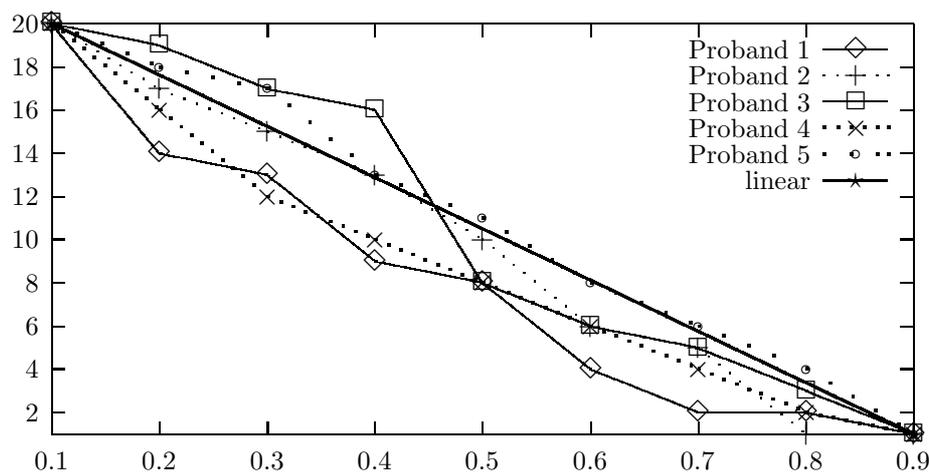


Abbildung 6.13: Brownsche Graphen, laterale Kraft

## 6.5 Zusammenfassung

Der geometrische Begriff der fraktalen Dimension kann als Maß für die Rauheit einer gegebenen Grauwerttextur aufgefaßt werden. Die fraktale Dimension läßt sich leicht algorithmisch bestimmen.

Umgekehrt wurde gezeigt, daß über die stochastischen Prozesse der Brownsche Bewegung/Brownsche Fläche, Strukturen mit gegebener fraktaler Dimension erzeugt werden können.

Anhand von Experimenten konnte weiterhin belegt werden, daß die haptische Synthese von Brownschen Strukturen mit ansteigender fraktaler Dimension auch zu einem Ansteigen des Rauheitseindrucks beim Erfühlen dieser Strukturen führt.



# Kapitel 7

## Symmetrieanteile haptischer Texturen

Wir haben gesehen: Die Rauheit einer Textur, vorliegend als Grauwertbild, läßt sich messen und synthetisieren. Eine computergraphische Textur enthält jedoch weitaus mehr Informationen als nur Rauheit. Maßgeblich prägend für den Eindruck einer Textur sind neben ihrer Rauheit ihre Symmetrieeigenschaften.

Eine (zweidimensionale) Figur wird als symmetrisch bezeichnet, wenn sie unter bestimmten Bewegungen ihrer Teile im Ganzen dennoch unverändert bleibt. Rotiert man beispielsweise ein Quadrat um  $90^\circ$  um sein Zentrum, so unterscheidet sich das Bild nach der Rotation nicht vom Original. Es handelt sich hierbei um eine *symmetrische Transformation*.

Zunächst wird in Abschnitt 7.1 die Verwandtschaft symmetrischer Texturen zu Flächenornamente-Gruppen dargelegt. Hierdurch sind sie zum einen mathematisch eingebettet, zum anderen eröffnen sich weitere Möglichkeiten der Abstraktion von haptischen Synthesemodellen.

„Thus, the description of a repetetive texture is mathematically complete as soon as the wallpaper group it belongs to is determined“[74]

Abschnitt 7.2 widmet sich sodann der Suche nach dem erzeugenden Primitiv einer symmetrischen Textur als Basis des symmetrischen Anteils bei der haptischen Synthese.

## 7.1 Symmetriegruppen

Die Untersuchung von Symmetrien computergraphischer Texturen läßt sich auf die Betrachtung der Isometrien der Euklidischen Ebene zurückführen. Die Bildinhalte der Texturen sind hierbei die zu betrachtenden Figuren.

### 7.1.1 Symmetrien der Euklidischen Ebene

Seien  $\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathcal{E}^2$  zwei Punkte.  $\overline{\mathbf{pq}}$  bezeichnet nun die Strecke von  $\mathbf{p}$  nach  $\mathbf{q}$ . Die Länge dieser Strecke ist durch  $|\overline{\mathbf{pq}}|$  bezeichnet.

#### Definition 7.1 (Isometrie, Symmetrie)

Sei  $\alpha : \mathcal{E}^2 \rightarrow \mathcal{E}^2$  eine bijektive Abbildung.

$\alpha$  heißt **Isometrie** genau dann, wenn für alle Punkte  $\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathcal{E}^2$  gilt:

$$|\overline{\mathbf{pq}}| = |\overline{\alpha(\mathbf{p})\alpha(\mathbf{q})}|.$$

$\alpha$  heißt **Symmetrie** bezüglich einer Menge  $\mathcal{P} \subseteq \mathcal{E}^2$  genau dann, wenn gilt:

$$\alpha(\mathcal{P}) = \mathcal{P}.$$

#### Definition 7.2 (Bewegungen der Euklidischen Ebene)

Seien  $\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r} \in \mathcal{E}^2, \phi \in [0, 2\pi)$  ein Winkel und  $m$  eine Gerade.

Eine **Translation**  $\tau_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}$  ist definiert durch  $\tau_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} + (\mathbf{q} - \mathbf{p})$ .

Eine **180°-Drehung**  $\sigma_{\mathbf{r}}$  um  $\mathbf{r}$  ist gegeben durch  $\sigma_{\mathbf{r}}(\mathbf{p}) = \mathbf{p} + 2(\mathbf{r} - \mathbf{p})$ .

Eine **Spiegelung**  $\sigma_m$  an  $m$  ist eine Abbildung, definiert durch:

$$\sigma_m(\mathbf{p}) = \begin{cases} \mathbf{p}, & \text{falls } \mathbf{p} \in m \\ \mathbf{q}, & \text{falls } \mathbf{q} \notin m \wedge m \perp \overline{\mathbf{pq}} \wedge \mathbf{r} = m \cap \overline{\mathbf{pq}} : |\overline{\mathbf{pr}}| = |\overline{\mathbf{rq}}| \end{cases}$$

Eine **Rotation**  $\rho_{\mathbf{r}, \phi}$  um  $\mathbf{r}$  mit Winkel  $\phi$  ist definiert durch:

$$\rho_{\mathbf{r}, \phi} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} (\mathbf{p} - \mathbf{r} + \mathbf{r})$$

Seien  $l, m$  zwei verschiedene Geraden orthogonal zu einer Geraden  $n$ . Dann heißt  $\gamma_n = \sigma_l \sigma_m \sigma_n$  **Gleitspiegelung** mit Achse  $n$ .

Die für eine formale Klassifikation grundlegende Eigenschaft der Symmetrien der Euklidischen Ebene zeigt sich in Lemma 7.1:

#### Lemma 7.1

1. Die Menge aller Symmetrien von  $\mathcal{P} \subseteq \mathcal{E}^2$  bilden eine Gruppe.

2. Die Menge aller Isometrien bilden eine Gruppe  $\mathcal{I}$ .

**Beweis:** Sei  $\mathcal{P}$  eine Menge von Punkten der Ebene und  $S(\mathcal{P})$  die Menge der Symmetrien von  $\mathcal{P}$ .

Abgeschlossenheit: Seien  $\alpha, \beta \in S(\mathcal{P})$  und  $\alpha \circ \beta = \gamma$ . Aus  $\gamma(\mathcal{P}) = \beta(\alpha(\mathcal{P})) = \beta(\mathcal{P}) = \mathcal{P}$  folgt:  $\gamma \in S(\mathcal{P})$ .

Identität:  $id(\mathcal{P}) = \mathcal{P} \Rightarrow id \in S(\mathcal{P})$ .

Inverses: Nach Definition existiert zu  $\alpha$  ein  $\alpha^{-1} \in S(\mathcal{P})$  mit  $\alpha^{-1}(\mathcal{P}) = \alpha^{-1}(\alpha(\mathcal{P})) = id(\mathcal{P}) = \mathcal{P}$ .

Assoziativität: Seien  $\alpha, \beta, \gamma \in S(\mathcal{P})$ :

$\gamma(\beta(\alpha(\mathcal{P}))) = \gamma(\beta(\mathcal{P})) = \gamma(\mathcal{P}) = \mathcal{P}$ .

$\alpha(\gamma(\beta(\mathcal{P}))) = \alpha(\gamma(\mathcal{P})) = \alpha(\mathcal{P}) = \mathcal{P}$

Die zweite Behauptung folgt dann mit  $\mathcal{P} = \mathcal{E}^2$ .  $\square$

Weiterhin gilt:

**Satz 7.1 (Klassifikationssatz für Isometrien des  $\mathcal{E}^2$ )**

*Jede Isometrie der Euklidischen Ebene ist eine Translation, eine Rotation, eine Spiegelung oder eine Gleitspiegelung.*

**Beweis** in [58].  $\square$

Jede Symmetrie des  $\mathcal{E}^2$  ist also nach Satz 7.1 und Lemma 7.1 eine Translation, Rotation, Spiegelung oder Gleitspiegelung. Abbildung 7.1 zeigt die Isometrien anschaulich.

## 7.1.2 Ornamentegruppen

Gruppentheoretische Betrachtungen der Isometrien der Euklidischen Ebene führen zu den sogenannten Ornamentegruppen. Einige dieser Ornamentegruppen gestatten die Bildung von Äquivalenzklassen, was offensichtlich eine Klassifizierung bedingt.

Man unterscheidet verschiedene Arten der Ornamentegruppen an Hand ihrer Translationsuntergruppe  $Tr$ .

Unterschieden wird zwischen:

1. Rosetten-Gruppen (rosette groups)
2. Streifenornamente-Gruppen (frieze groups)
3. Flächenornamente-Gruppen (wallpaper groups)

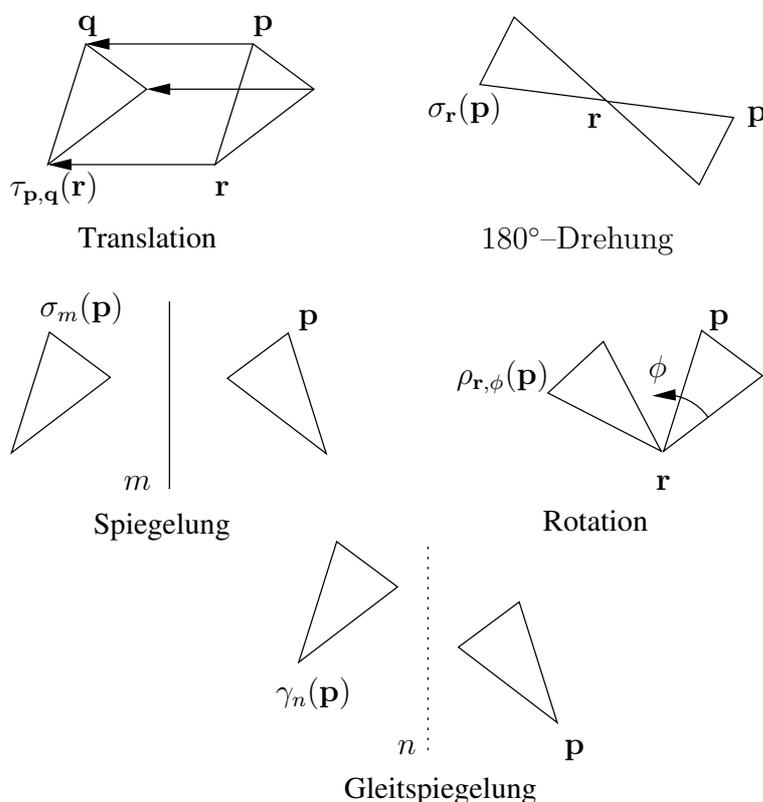


Abbildung 7.1: Isometrien der Euklidischen Ebene

Der Sonderfall der Rosetten-Gruppen umfasst die Gruppen endlicher Isometrien der Euklidischen Ebene. Die Zyklischen-Gruppen (punktsymmetrisch) und Diederer-Gruppen (dihedral groups<sup>1</sup>) gehören zu den Rosetten-Gruppen.

Streifenornamente-Gruppen sind charakterisiert durch die Bildung von Mustern entlang einer Linie in der Ebene. Es existieren genau 7 verschiedene Typen von Streifenornamente-Gruppen [58].

Flächenornamente-Gruppen enthalten zwei nicht-parallele Translationen. Es existieren jedoch nur 17 verschiedene Typen [58]. 13 dieser Gruppen beinhalten bestimmte Arten von Rotations-Symmetrie.

Jede Flächenornamente-Gruppe ist also eine Gruppe von Isometrien der Ebene mit zwei nicht-parallelen Translationen und eingeschränkten Rotationen (falls vorhanden). Die Art der vorkommenden Rotationen ist eine sehr bemerkenswerte Eigenschaft der Flächenornamente-Gruppen. Sei  $\mathbf{A}$  ein Rotationszentrum mit dem Rotationswinkel  $2\pi/n$ .  $\mathbf{A}$  heißt dann  $n$ -Zentrum, wenn die Rotationen eine endliche zyklische Gruppe bilden.

<sup>1</sup>dihedral=zweiflächig; diese Symmetriegruppen besitzen Spiegelungen.

**Satz 7.2 (Kristallographische Restriktion)**

Ist  $A$  ein  $n$ -Zentrum einer Flächenornamente-Gruppe. Dann ist  $n \in \{1, 2, 3, 4, 6\}$ .

**Beweis:**

Man betrachte Abbildung 7.2.

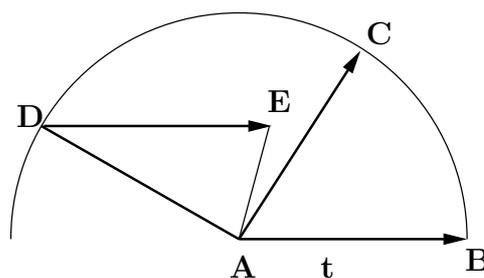


Abbildung 7.2: Kristallographische Restriktion

Sei  $A$  ein  $n$ -Zentrum und  $t$  die kleinste mögliche Translation einer Symmetriegruppe.  $t$  transliert den Punkt  $A$  nach  $B$ . Eine Rotation von  $2\pi/n$  transformiert weiterhin  $B$  nach  $C$ . Aus den Gruppeneigenschaften folgt, daß  $A$  ebenso durch eine Translation nach  $C$  transformiert werden kann. Es folgt, daß  $\angle BAC \geq \pi/3$ , da  $BC \geq AB$ .

Aus der Ungleichung

$$\frac{2\pi}{n} \geq \frac{\pi}{3}$$

folgt sofort

$$n \leq 6$$

Sei nun  $n = 5$ . Rotiert man  $B$  mit einem Winkel  $2 \cdot 2\pi/5$  nach  $D$  und transliert  $D$  mittels  $t$  nach  $E$ , so ergibt sich offensichtlich:  $AE < AB$ . Dies steht im Widerspruch zur Annahme, daß  $t$  die kleinste mögliche Translation ist und somit gilt  $n \neq 5$ , d. h.  $n \in \{1, 2, 3, 4, 6\}$ .  $\square$

Unterschiedliche Flächenornamente-Gruppen werden also über ihre translativen und rotativen Symmetrien identifiziert. Mittels der Translationen einer Gruppe wird ein Grundelement oder Primitiv definiert, welches die kleinste Umgebung ohne Wiederholungen enthält, aus der sich das symmetrische Muster ergibt. Solch ein Primitiv erzeugt mittels seiner bestimmenden Translationen ein planares Gitter (Abbildung 7.3).

Die Konstruktion des Gitters für ein vorliegendes Muster (Flächenornament) verläuft wie folgt: Man wählt einen beliebigen Punkt  $p$  im Muster und eine

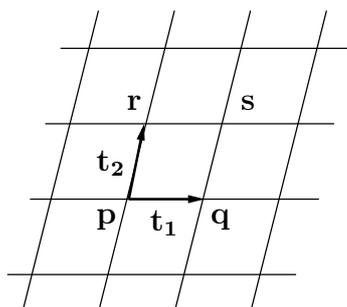


Abbildung 7.3: Primitiv im planaren Gitter

Translation  $\mathbf{t}_1$ , die  $\mathbf{p}$  auf  $\mathbf{q}$  abbildet.  $\mathbf{q}$  ist ein zu  $\mathbf{p}$  äquivalenter Punkt im Muster, der jedoch den kürzest möglichen Abstand zu  $\mathbf{p}$  hat. Translationen parallel zu  $\mathbf{t}_1$  erzeugen eine Reihe von Punkten äquivalent zu  $\mathbf{p}$  auf der Geraden durch  $\mathbf{p}$  und  $\mathbf{q}$ .

Man sucht nun einen weiteren zu  $\mathbf{p}$  äquivalenten Punkt  $\mathbf{r}$ , der nicht auf der Geraden durch  $\mathbf{p}$  und  $\mathbf{q}$  liegt, in der Art, daß  $\mathbf{r}$  ebenfalls so dicht wie möglich an  $\mathbf{p}$  liegt. Die gefundene Translation, die  $\mathbf{p}$  nach  $\mathbf{r}$  abbildet, sei  $\mathbf{t}_2$ . Mit  $\mathbf{s}$  als Bild von  $\mathbf{q}$  unter  $\mathbf{t}_2$  bilden  $\mathbf{pqr}$  ein Parallelogramm.

Alle Translationen einer Symmetriegruppe sind Kombinationen von  $\mathbf{t}_1$  und  $\mathbf{t}_2$  [58]. In Vektorform:

$$\mathbf{t} = m\mathbf{t}_1 + n\mathbf{t}_2$$

mit  $m, n \in \mathbb{N}$ . Das so erzeugte Gitter enthält alle zu  $\mathbf{p}$  äquivalenten Punkte an seinen Schnittpunkten.

## 7.2 Symmetriedetektion

Wie läßt sich nun das Primitiv, also das erzeugende Grundelement, einer symmetrischen Textur finden? Die menschliche Wahrnehmung reagiert sehr „empfindlich“ auf Symmetrien. Durch bloße Anschauung sind sie sehr leicht zu erkennen. Als eher negativer Aspekt sei hier die rasche Feststellbarkeit von Kachel-Effekten zu nennen, wenn mit einer kleinen Textur eine große Fläche ausgefüllt wird, indem die Textur wiederholt wird.

Dennoch ist es ein durchaus komplexes Problem, Symmetrie durch berechnende Verfahren zu erkennen und somit algorithmisch zu detektieren.

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren wurde im Rahmen einer Studienarbeit [66] erarbeitet und implementiert. Für ein vorliegendes Grauwertbild sind zwei grundsätzliche Schritte durchzuführen:

1. Bewertung aller Translationen
2. Ermittlung der Erzeugendentranslationen des Primitivs

Anhand eines Gütemaßes werden sämtliche möglichen Translationen „bester Güte“ gewählt, die dann über ihre Erzeugendenvektoren das Primitiv bilden (siehe Abbildung 7.3).

Da bei beliebigen zu untersuchenden Texturen nicht erwartet werden kann, perfekte Symmetrien vorzufinden, sondern vielmehr der Symmetrieanteil gesucht wird, liegt die Anwendung stochastischer Methoden nahe. Die Bewertung der Translationen erfolgt geeignet mittels einer **Statistical Feature Matrix (SFM)**.

Die Auswertung dieser Matrix liefert eine Punktwolke, aus der sodann ein Gitter geschätzt wird, welches sofort die gesuchten erzeugenden Translationen liefern kann.

### 7.2.1 Statistical Feature Matrix

Eine Statistical Feature Matrix (SFM) empfiehlt sich durch ihre „Handlichkeit“ und durch ihre, bei geschickter Konstruktion, einfache Interpretierbarkeit als Werkzeug zur Translationsbewertung. Darüberhinaus ist der Berechnungsaufwand einer SFM nur von der Größe der zu untersuchenden Textur abhängig, nicht von der Anzahl der in der Textur zugelassenen Graustufen.

#### Definition 7.3 (Statistical Feature Matrix)

Sei  $ft$  ein statistisches Feature (Eigenschaft).

Seien weiterhin  $\alpha_{a_1, \dots, a_n}$  eine Operation mit  $n$  Parametern und  $\mathbf{t}_D$  ein diskretes Grauwertbild gemäß Definition 5.5.

$$SFM_{\alpha_{a_1, \dots, a_n}}^{ft}(\mathbf{t}_D) = (ft(\mathbf{t}_D, \alpha_{a_1, \dots, a_n}(\mathbf{t}_D)))_{a_1, \dots, a_n}$$

heißt **Statistical Feature Matrix (SFM)** zu  $\mathbf{t}_D$  unter der Operation  $\alpha_{a_1, \dots, a_n}$ .

Im vorliegenden Fall ist die Operation  $\alpha_{a_1, \dots, a_n} = \tau_{x,y}$  die Translation, bzw. die zusammengesetzte Translation aus zwei einzelnen Translationen, da ja gerade zwei nicht-kollineare Erzeugende gesucht werden. Folglich ist auch die SFM eine zweidimensionale Matrix:

$$SFM_{\tau_{x,y}}^{ft}(\mathbf{t}_D) = (ft(\mathbf{t}_D, \tau_{x,y}(\mathbf{t}_D)))_{x,y}$$

Das statistische Feature zum Vergleich von Original-Textur und dem durch die Operation (zweifache Translation  $\tau_{x,y}$ ) erzeugten Texturen ist hier die mittlere quadratische Verzerrung. Denkbar wären auch noch andere Features, wie z. B. die Korrelation (siehe auch [66]), wobei der Berechnungsaufwand jedoch beträchtlich ansteigt.

Zur Definition der mittleren quadratischen Verzerrung betrachten wir, wie schon bei der SFM gesehen, diskrete Texturausschnitte  $\mathbf{t}_D, \mathbf{t}_D^1, \dots$ , genauer sogar Grauwertbilder. Zur Erinnerung:

**Definition 7.4 (Diskreter Texturausschnitt, Grauwertbild)**

Sei  $D \subset \mathbb{N}^2$  konvex. Dann heißt  $\mathbf{t}_D = \{(\mathbf{p}, c) \in \mathbf{t} \mid \mathbf{p} \in D, c \in \mathbb{N}\}$  **diskreter Texturausschnitt**. Bei  $D = \{(i, j) \mid i \in [0 : k], j \in [0 : l], k, l \in \mathbb{N}\}$  wird  $\mathbf{t}_D$  **Grauwertbild** genannt.

$\mathbf{p}$  bezeichnet also die Punkte im Grauwertbild mit  $k \times l$  diskreten Punktpositionen und den an den Punkten  $\mathbf{p}$  befindlichen Grauwerten  $c$ . Die **relative Häufigkeit** des Grauwertes  $c$  in  $\mathbf{t}_D$  ist dann

$$\frac{|\{\mathbf{p} \in D \mid gr_{\mathbf{t}_D}(\mathbf{p}) = c\}|}{|D|}$$

wobei die Funktion  $gr_{\mathbf{t}_D}$  für einen Punkt  $\mathbf{p}$  den zugehörigen Grauwert  $c$  liefert.

Mit der relativen Häufigkeit des Grauwertes ergibt sich der Erwartungswert des Grauwertbildes  $\mathbf{t}_D$ :

**Definition 7.5 (Erwartungswert eines Grauwertbildes)**

Der Erwartungswert  $E$  eines Grauwertbildes  $\mathbf{t}_D$  ist

$$E\mathbf{t}_D = \frac{1}{|D|} \cdot \sum_{c \in \mathbb{N}} c \cdot |\{\mathbf{p} \in D \mid gr_{\mathbf{t}_D}(\mathbf{p}) = c\}| = \frac{1}{|D|} \cdot \sum_{\mathbf{p} \in D} gr_{\mathbf{t}_D}(\mathbf{p})$$

Der Erwartungswert eines Grauwertbildes und die folgende Definition der Verzerrung eines Grauwertbildes führen schnell zur in unserer SFM verwendeten mittleren Verzerrung.

**Definition 7.6 (Verzerrung eines Grauwertbildes)**

$\mathbf{t}_D^1$  und  $\mathbf{t}_D^2$  seien zwei Grauwertbilder.

$$|\mathbf{t}_D^1 - \mathbf{t}_D^2| = \{(\mathbf{p}, c) \mid \mathbf{p} \in D, c \in \mathbb{N}, c = |gr_{\mathbf{t}_D^1}(\mathbf{p}) - gr_{\mathbf{t}_D^2}(\mathbf{p})|\}$$

heißt **Verzerrung**,

$$(\mathbf{t}_D^1 - \mathbf{t}_D^2)^2 = \{(\mathbf{p}, c) \mid \mathbf{p} \in D, c \in \mathbb{N}, c = (gr_{\mathbf{t}_D^1}(\mathbf{p}) - gr_{\mathbf{t}_D^2}(\mathbf{p}))^2\}$$

heißt **quadratische Verzerrung** zwischen  $\mathbf{t}_D^1$  und  $\mathbf{t}_D^2$ .

$|\mathbf{t}_D^1 - \mathbf{t}_D^2|$  und  $(\mathbf{t}_D^1 - \mathbf{t}_D^2)^2$  sind ebenfalls Grauwertbilder.

**Definition 7.7 (Mittlere Verzerrung eines Grauwertbildes)**

Der Erwartungswert

$$E(|\mathbf{t}_D - \tau_{x,y}(\mathbf{t}_D)|)$$

heißt **mittlere Verzerrung** von  $\mathbf{t}_D$  bezüglich  $\tau_{x,y}$ .

Der Erwartungswert

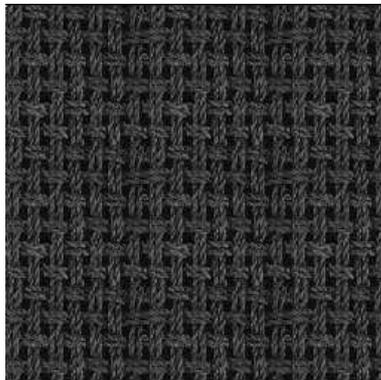
$$E((\mathbf{t}_D - \tau_{x,y}(\mathbf{t}_D))^2)$$

heißt **mittlere quadratische Verzerrung** von  $\mathbf{t}_D$  bezüglich  $\tau_{x,y}$ .

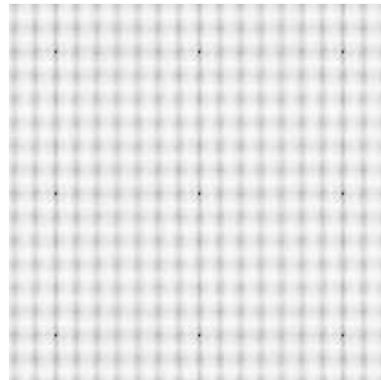
Eine Statistical Feature Matrix für die Verzerrung (engl. distortion) ist dann

$$\text{SFM}_{\tau_{x,y}}^{\text{dist}}(\mathbf{t}_D) = (E(|\mathbf{t}_D - \tau_{x,y}(\mathbf{t}_D)|))_{x,y}$$

Ist  $\mathbf{t}_D$  eine  $k \times l$  Matrix, so konstruiert man auch die SFM als  $k \times l$  Matrix. Für  $i \in [-\lfloor k/2 \rfloor : \lfloor k/2 \rfloor]$ ,  $j \in [-\lfloor l/2 \rfloor : \lfloor l/2 \rfloor]$  repräsentiert der Eintrag an der Stelle  $(\lfloor k/2 \rfloor + i, \lfloor l/2 \rfloor + j)$  den Wert der mittleren (quadratischen) Verzerrung, für den  $\mathbf{t}_D$  in  $i$  in  $x$ -Richtung und  $j$  in  $y$ -Richtung gegen sich selbst verschoben wurde. Abbildung 7.4 zeigt als Beispiel eine Textur und ihre SFM bezüglich Verzerrung. Die Wahl der Intervalle  $[-\lfloor k/2 \rfloor : \lfloor k/2 \rfloor]$ ,  $[-\lfloor l/2 \rfloor : \lfloor l/2 \rfloor]$



(a)



(b)

Abbildung 7.4: Grauwertbild und SFM bezüglich Verzerrung

$[-\lfloor l/2 \rfloor : \lfloor l/2 \rfloor]$  stellt sicher, daß immer noch mindestens ein Viertel der Punkte der Ausgangstextur  $\mathbf{t}_D$  in  $\tau_{x,y}(\mathbf{t}_D)$  vorhanden sind, unabhängig davon, welche Strategie des Auffüllens von „freigeschobenen“ Bereichen der Ausgangstextur verwendet wird.

Lokale Minima der Einträge der SFM geben eine lokal größte Ähnlichkeit zwischen Ausgangs- und Ergebnisgrauwertbild unter  $\tau_{x,y}$  für die entsprechenden

$x$  und  $y$  wieder. Die Menge dieser Minima wird nun als Punktwolke aufgefaßt. Aus dieser Punktwolke gilt es nun im nächsten Schritt das gesuchte Gitter und somit die erzeugende Translationsvektoren zu finden. Abbildung 7.5 zeigt das Grauwertbild und die SFM mit Minima.

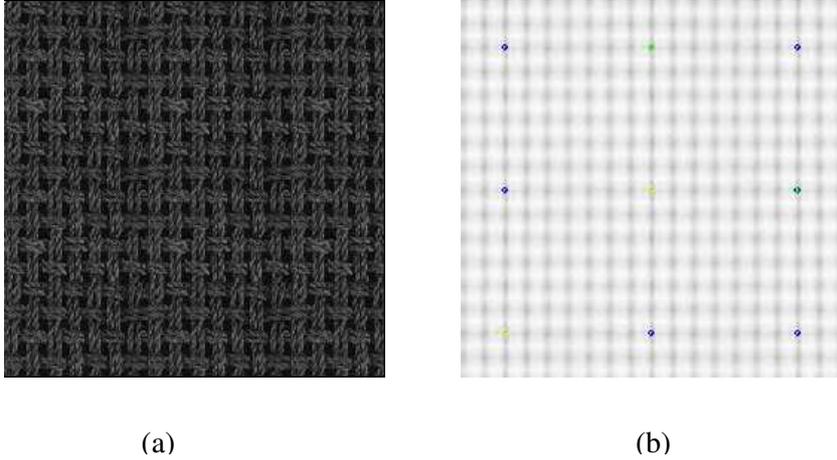


Abbildung 7.5: Grauwertbild und SFM mit Minima

## 7.2.2 Schätzung von Gittern aus Punktwolken

Dieser letzte Schritt zur Gewinnung des erzeugenden Primitivs gliedert sich nochmals in zwei Teilprobleme.

1. Bestimmung der beiden nicht-kollinearen Translationsrichtungen
2. Bestimmung der Länge der Translationsvektoren

Das Verfahren entstammt einer Methode von Davis [20] und wurde von Peinecke [66] adaptiert und implementiert.

### Definition 7.8 (Mittlere Konzentration)

Sei  $P = \{a_1, \dots, a_n\} \subset \mathbb{R}$  und  $P = \text{proj}(\mathcal{P}, \mathbf{q})$ .

Sei  $a_i \in P, \lambda \in \mathbb{R}_{>0}$ . Dann ist die **mittlere Konzentration in  $a_i$**  definiert durch:

$$\text{Konzentration}(\mathcal{P}, \mathbf{q}, a_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \exp^{-\lambda \cdot |a_i - a_j|}$$

Es heißt

$$\text{Konzentration}(\mathcal{P}, \mathbf{q}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \text{Konzentration}(\mathcal{P}, \mathbf{q}, a_j)$$

die mittlere Konzentration von  $\mathcal{P}$  unter  $\mathbf{q}$ .

Es bezeichne im folgenden  $\mathcal{P}$  die Ergebnispunktmenge aus der Ermittlung der Minima.  $\text{proj}(\mathcal{P}, \mathbf{q})$  sei die Projektion von  $\mathcal{P}$  in Richtung  $\mathbf{q}$  auf eine dazu orthogonale Gerade  $g$ .  $P$  ist die Ergebnispunktmenge der Projektion  $\text{proj}(\mathcal{P}, \mathbf{q})$ . Punkte auf der Geraden, die durch  $\mathcal{P}$   $n$  Elemente erhalten, sind dann auch  $n$ -fach in  $P$  enthalten. In Abbildung 7.6(b) sind die Punkte auf  $g$  3-fach, in Abbildung 7.6(c) nur 1-fach.

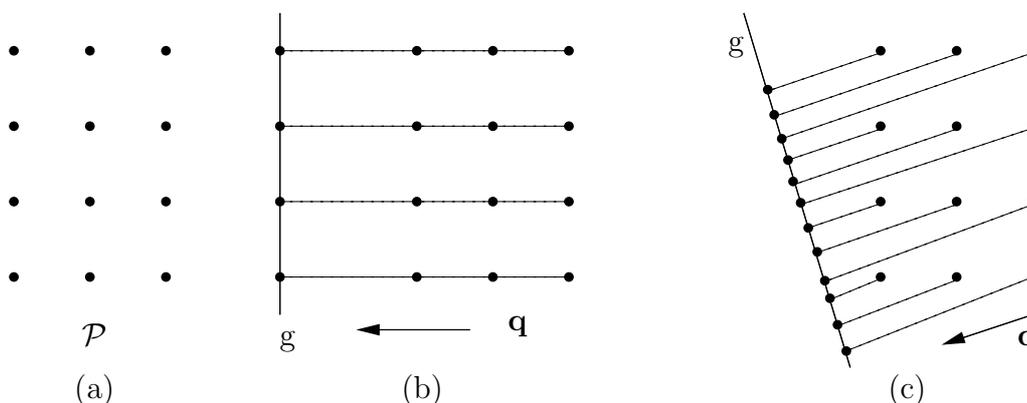


Abbildung 7.6:  $\text{proj}(\mathcal{P}, \mathbf{q})$  auf  $g$  (nach [90])

Die Auswertung der Konzentrationen von  $\mathcal{P}$  liefert die gesuchten Translationsrichtungen.  $\mathbf{q}_1$  und  $\mathbf{q}_2$  sind die beiden Richtungen, die eine maximale sowie zweitmaximale Konzentration von  $\mathcal{P}$  ergeben. Die Verwendung einer Exponentialverteilung bei der Berechnung der Konzentration macht das Verfahren toleranter. Hierdurch wird der Möglichkeit Rechnung getragen, daß auch leicht verzerrte Gitter behandelbar sind.

Die Bestimmung der Länge der Translationsvektoren erfolgt durch Projektion unter Verwendung der gefundenen Richtungen. Um die Länge von  $\mathbf{q}_1$  zu gewinnen, wird  $\mathcal{P}$  in Richtung  $\mathbf{q}_2$  auf eine Gerade in Richtung  $\mathbf{q}_1$  auf die Punktmenge  $P$  projiziert. Der Fall  $\mathbf{q} = \mathbf{q}_2$  und  $g$  parallel zu  $\mathbf{q}_1$  findet sich in Abbildung 7.6(b).

Mittels der euklidischen Abstände der Elemente von  $P$  wird nun die Länge gewonnen. Hierzu wird jeder auftretende Abstand  $d$  als Normalverteilung mit Erwartungswert  $d$  und fester Varianz interpretiert. Auch hier erhöht die Normalverteilung die Toleranz. Die durch die diskrete Punktmenge  $P$  implizierte Funktion entsteht mittels Überlagerung der Normalverteilungen. Das Maximum der Funktion entspricht der wahrscheinlichsten Länge des gesuchten Translationsvektors.

Die analoge Projektion von  $\mathcal{P}$  in Richtung  $\mathbf{q}_1$  auf eine Gerade in Richtung  $\mathbf{q}_2$  liefert nun ebenso die Länge des zweiten Translationsvektors.

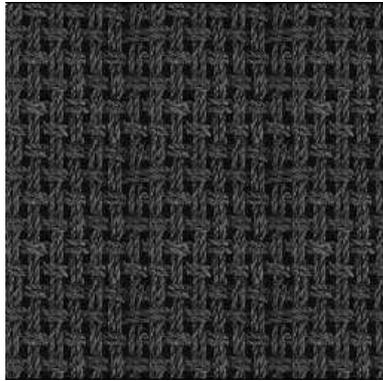
Die beiden gefundenen Translationsvektoren bestimmen direkt das Primitiv und somit den symmetrischen Anteil des Grauwertbildes. Es sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit das Translationsgitter so angeordnet, daß der Schwerpunkt der Positionswerte der Texel des Primitivs in der Mitte des Grauwertbildes liegt. Der symmetrische Anteil Textur ist jetzt bestimmt durch das Gitter und ein Primitiv, das sich texelweise durch Mittelung aller im Grauwertbild enthaltener Primitive errechnet.

Abbildung 7.7 zeigt die beschriebenen Schritte zur Symmetriefindung nochmals zusammenhängend. Es ist Teilbild (a) die Originaltextur, (b) die SFM mit Minima, (c) das extrahierte Primitiv, (d) die aus Primitiv und Gitter synthetisierte Textur und (e) das aus Original und Synthese ermittelte Differenzbild.

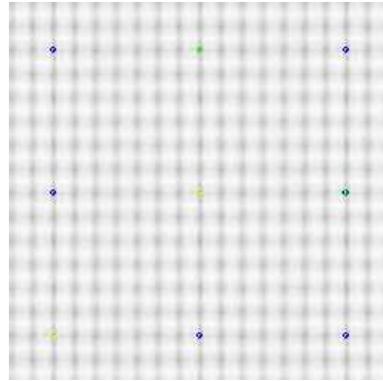
### 7.3 Zusammenfassung

Symmetrische Texturen lassen sich auf die Symmetrien der Euklidischen Ebene zurückführen und mittels der Modelle der Ornamentgruppen klassifizieren.

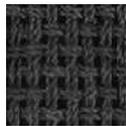
Mit Methoden der bildhaften Texturanalyse lassen sich ein erzeugendes Primitiv und ein erzeugendes Gitter aus einem gegebenen Grauwertbild gewinnen. Hierdurch ist ein symmetrischer Anteil des Grauwertbildes bestimmt. Aus Gitter und Primitiv synthetisiert sich das Grauwertbild, das nur den gewonnenen symmetrischen Anteil enthält.



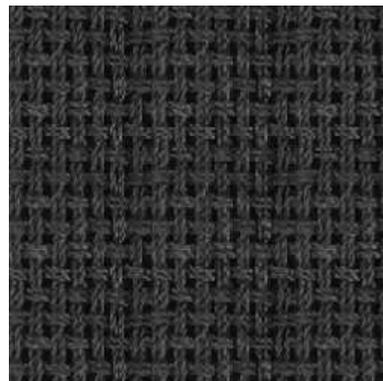
(a)



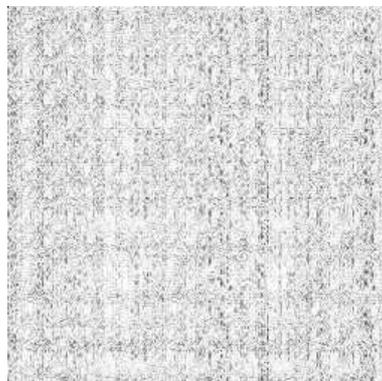
(b)



(c)



(d)



(e)

Abbildung 7.7: Phasen der Symmetriedetektion



# Kapitel 8

## Haptische Simulation

### 8.1 Formgebung des Symmetrianteils

Mit den beiden vorangegangenen Kapiteln haben wir das haptische Merkmal Rauheit von den verbleibenden symmetrischen Merkmalen (computergraphischer) Texturen abgegrenzt. Das Merkmal Rauheit korrespondiert mit der definierten haptischen Struktur (Definition 5.4): Rauheit ist eine Oberflächeneigenschaft, deren erzeugende Strukturen nicht durch den Tastsinn räumlich getrennt werden können.

Umgekehrt ist nicht in allen möglichen Ausprägungen davon auszugehen, daß gefundene Symmetrianteile zwangsläufig die Eigenschaft besitzen, haptisch räumlich trennbar zu sein. Das haptische räumliche Auflösungsvermögen ist beim Menschen beschränkt auf die Erkennung von zwei Punkten, die ca. 1 Millimeter dicht beieinander liegen. Kürzere Abstände zwischen zwei Tastpunkten werden durch den Tastsinn nicht mehr aufgelöst ([76], S. 217). Diese physiologisch höchste Auflösung wird an den vorderen Fingern sowie an Zunge und Lippen erreicht ([76]).

Bei entsprechend fein gewählter Auflösung der Grauwertbilder sind beliebige Symmetrien detektierbar, deren Auflösung unterhalb der physiologisch trennbaren Auflösung des Tastsinns liegt. Die gestellte Aufgabe, eine haptische Simulation auf gegebenen realen, bzw. realistischen Texturen zu gewinnen, erlaubt jedoch die folgenden vereinfachenden Korrespondenzen:

- Rauheit → räumlich nicht auflösbare Oberflächenmerkmale
- Symmetrianteile → räumlich trennbare Oberflächenmerkmale

Zwar sind nicht sämtliche denkbar detektierbaren Symmetrien auch physisch

räumlich trennbar, dennoch besitzen die zu simulierenden Oberflächenstrukturen durchweg räumliche physisch detektierbare Eigenschaften.

Für die gefundene zweidimensionale Repräsentation des symmetrischen Anteils gegebener Oberflächenstrukturen ist somit eine räumliche, also dreidimensionale Repräsentation zu finden.

Solch eine Fragestellung ist bekannt aus dem Bereich Computer-Sehen (*computer vision*). Das Ziel eine dreidimensionale Szenenbeschreibung aus einem oder mehreren zweidimensionalen Bildern zu gewinnen, ist als Problemklasse „Shape from Shading“ (SFS) zusammengefaßt.

### 8.1.1 Shape from Shading

Allgemein handelt es sich bei Shape from Shading um die Lösung eines inversen Problems: Bei gegebenem Eingangsbild und gegebenen Beleuchtungs- und Reflektionsmodellen ist die Oberflächengeometrie gesucht. Problematisch ist hierbei, daß mehr unbekannte Parameter als aufstellbare Gleichungen vorhanden sind, so daß für sämtliche SFS-Methoden bestimmte einschränkende Randbedingungen aufgestellt sind. In [96] werden zwei Klassen von SFS-Algorithmen unterschieden: Globale und lokale Methoden. Die globalen Methoden bestimmen die Form (*shape*) der gegebenen Bilder durch Minimierung von komplexen Kosten-Funktionen, d. h. sie haben einen hohen Berechnungsaufwand. Lokale Methoden ermitteln die Form nur unter Berücksichtigung lokaler Eigenschaften der Eingangsbilder.

Beiden SFS-Klassen gemein ist, daß die zu findende Form als Tiefe  $Z(x, y)$ , als Normale  $(n_x, n_y, n_z)^T$  oder als Gradient  $(p, q)^T$  ausgedrückt wird. Ebenso wird meist ein Lambert-Reflektor als Reflektionsmodell vorausgesetzt. Dies kann allgemein eine recht große Vereinfachung bedeuten. Im Fall der Analyse der Oberflächentexturen ist eine diffuse Beleuchtungssituation beim Gewinnen, bzw. Erstellen der Texturen meist gegeben.

### 8.1.2 Methode von Tsai/Shah

Zur Gewinnung der dreidimensionalen Szenenbeschreibung der gefundenen Symmetrieanteile wurde ein SFS-Algorithmus von Tsai und Shah [83] implementiert. Gemäß einer Analyse in [96], worin 8 bekannte Shape from Shading Verfahren verglichen werden, liefert der Algorithmus von Tsai/Shah unter bestimmten Randbedingungen die gewünschten Ergebnisse bei gleichzeitiger Gewährleistung von effizienter und somit schneller Berechenbarkeit.

Nach [96] ist die Voraussetzung für gute Ergebnisse des Tsai/Shah-Modells, daß bei den Bildern, aus denen die 3D-Information gewonnen wird, die Be-

leuchtungsrichtung nahe der Betrachtungsrichtung ist. Dieses Kriterium kann für die in dieser Schrift gegebene Problemstellung eingehalten werden.

Schwierigkeiten bereitet dem Verfahren starkes „Rauschen“ der Intensitäten in den Eingabebildern. Hier schafft jedoch die Abtrennung des Rauheitsanteils der Originaltexturen durch die Symmetriefindung günstige Voraussetzungen, da hier hochfrequente Anteile gefiltert werden.

Abbildung 8.1 zeigt das Beispiel eines Grauwertbildes und der durch das SFS-Verfahren gewonnenen 3D-Information in Drahtgitterdarstellung.



Abbildung 8.1: Grauwertbild und Gittermodell

Tsai und Shah [83] fassen die zu gewinnende dreidimensionale Form ebenfalls als Lambert-Reflektor auf. Abbildung 8.2 zeigt hierzu das Prinzip.

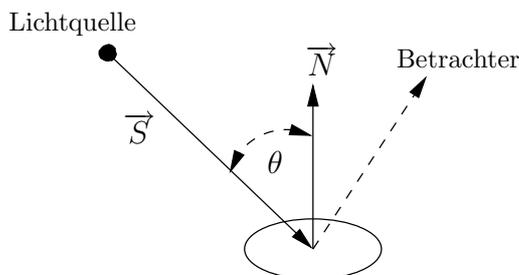


Abbildung 8.2: Lambert-Reflektor

Die Lambertsche Reflektionsabbildung ist nach [31]

$$I = I_p k_d \cos \theta$$

wobei  $I_p$  die Intensität der Lichtquelle und  $k_d$  der Reflektionskoeffizient des Materials ist. Der Betrag des vom Betrachter gesehenen Lichts ist nicht von der Betrachterposition, sondern nur vom Winkel zwischen Normale  $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)$  und Richtung der Lichtquelle  $\vec{S} = (s_x, s_y, s_z)$  abhängig. Sind Normale und Lichtrichtung Einheitsvektoren, so ist die Reflektionsabbildung:

$$R = I = I_p k_d \vec{N} \cdot \vec{S}.$$

Da die Beleuchtungsintensität bei SFS-Verfahren als konstant angenommen wird und mit  $k_d$  somit nur skalierenden Einfluß hat, hängt die Reflektionsabbildung nur noch vom Punktprodukt aus Normale und Beleuchtungsrichtung ab.

Der Algorithmus in [83] verwendet eine diskrete Approximation der Gradienten  $p$  und  $q$ , um die Reflektionsabbildung zu linearisieren. Ist eine Fläche gegeben als  $z = Z(x, y)$ . Der Gradient  $(p, q)^T$  im Punkt  $(x, y)$  ist definiert als

$$p = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \quad \text{und} \quad q = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}.$$

Der Zusammenhang zwischen Gradient und Normale ist hierbei

$$\vec{n} = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}(-p, -q, 1)^T.$$

Die Reflektionsabbildung definieren Tsai/Shah somit als:

$$R(p_{i,j}, q_{i,j}) = \frac{-s_x p_{i,j} - s_y q_{i,j} + s_z}{\sqrt{1 + p_{i,j}^2 + q_{i,j}^2}} \quad (8.1)$$

mit den diskreten Approximationen  $p = Z_{i,j} - Z_{i-1,j}$  und  $q = Z_{i,j} - Z_{i,j-1}$ . Sie formulieren die Reflektionsgleichung 8.1 um nach

$$0 = f(I_{i,j}, Z_{i,j}, Z_{i-1,j}, Z_{i,j-1}) = I_{i,j} - R(Z_{i,j} - Z_{i-1,j}, Z_{i,j} - Z_{i,j-1}). \quad (8.2)$$

Für einen gegebenen Punkt  $(i, j)$  und die Intensität  $I_{i,j}$  im gegebenen Bild entwickeln sie die lineare Approximation einer gegebenen Tiefenkarte  $Z^{n-1}$  mittels Taylorreihen-Erweiterung. Wie Gleichung 8.3 zeigt, wird nur zur ersten Ordnung entwickelt unter Vernachlässigung des kompletten Restglieds. Entwicklungspunkt ist  $(Z_{i,j}^{n-1}, Z_{i-1,j}^{n-1}, Z_{i,j-1}^{n-1})$ .

$$\begin{aligned} 0 &= f(I_{i,j}, Z_{i,j}, Z_{i-1,j}, Z_{i,j-1}) \\ &\approx f(I_{i,j}, Z_{i,j}^{n-1}, Z_{i-1,j}^{n-1}, Z_{i,j-1}^{n-1}) + \\ &\quad (Z_{i,j} - Z_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial}{\partial Z_{i,j}} f(I_{i,j}, Z_{i,j}^{n-1}, Z_{i-1,j}^{n-1}, Z_{i,j-1}^{n-1}) + \\ &\quad (Z_{i-1,j} - Z_{i-1,j}^{n-1}) \frac{\partial}{\partial Z_{i-1,j}} f(I_{i,j}, Z_{i,j}^{n-1}, Z_{i-1,j}^{n-1}, Z_{i,j-1}^{n-1}) + \\ &\quad (Z_{i,j-1} - Z_{i,j-1}^{n-1}) \frac{\partial}{\partial Z_{i,j-1}} f(I_{i,j}, Z_{i,j}^{n-1}, Z_{i-1,j}^{n-1}, Z_{i,j-1}^{n-1}). \end{aligned} \quad (8.3)$$

Für ein Eingangsbild der Dimension  $N \times N$  existieren  $N^2$  solcher Gleichungen, die ein Linearsystem bilden. Tsai und Shah lösen mittels iterativem Jakobi-Verfahren und erhalten:

$$0 = f(Z_{i,j}) \approx f(Z_{i,j}^{n-1}) + (Z_{i,j} - Z_{i,j}^{n-1}) \frac{d}{dZ_{i,j}} f(Z_{i,j}^{n-1}). \quad (8.4)$$

Somit kann für  $Z_{i,j} = Z_{i,j}^n$  die gesuchte Tiefe in der  $n$ -ten Iteration direkt gelöst werden mit

$$Z_{i,j}^n = Z_{i,j}^{n-1} + \frac{-f(Z_{i,j}^{n-1})}{\frac{d}{dZ_{i,j}}f(Z_{i,j}^{n-1})}, \quad (8.5)$$

wobei initial die  $Z_{i,j}^0$  für die Iteration auf Null gesetzt werden.

## 8.2 Versuchsbedingungen und Versuchsaufbau

Es ist bis hierher ein durchgängiger Weg, ausgehend von vorliegenden zweidimensionalen computergraphischen Oberflächentexturen hin zur dreidimensionalen Beschreibung ihres symmetrischen Anteils entwickelt worden.

Wie wird nun der hiermit synthetisierte Fühleindruck symmetrischer Oberflächenstrukturen von Probanden wahrgenommen? Ist die Synthese als Simulation echten Fühlens akzeptiert? Wie wird die haptische Simulation bei gegebener visueller Vorlage qualitativ eingeschätzt? Läßt die haptische Simulation analytisches Fühlen zu, d. h. , können kleine Strukturen erfühlt und voneinander unterschieden werden?

Neben der reinen Protokollierung der Beurteilungen der Probanden, sollte zusätzlich festgestellt werden, wie die Probanden mit dem Simulationssystem interagieren. Auch wenn man annähme, daß die haptische Simulation im Ergebnis des simulierten Fühleindrucks perfekt sei, so ist dennoch festzustellen, daß die zur Simulation notwendige Technik eine unnatürliche Fühlsituation schafft. Durch den Körperkontakt mit der Apparatur ist die unnatürliche Situation noch direkter wahrnehmbar, als bei visueller Simulation an den meisten bildgebenden Geräten.

Somit waren nicht nur mit der haptischen Simulation erzielbare Ergebnisse, sondern auch das Verhalten der Probanden Untersuchungsgegenstand. Grundsätzlich sollten daher zwei Klassen von Untersuchungsgegenständen betrachtet werden:

- Bewertungen und Beurteilungen, die **von** den Probanden abgefragt werden.
- Beurteilungsfindung und Interaktion, die **an** den Probanden beobachtet werden.

Die Probanden werden mit der Methode des Interviews durch die Experimente geführt. Gleichzeitig hat der Interviewer die Aufgabe, die Art der

Interaktion der Probanden mit der haptischen Simulation, sowohl der virtuellen, als auch der mechanischen, zu beobachten. Die zu beobachtenden Sachverhalte sind:

1. Wie wird die Aufgabe, mit dem haptischen Gerät zu fühlen, aufgenommen? Werden Bedenken geäußert?
2. Wie wird das haptische Gerät motorisch angewendet?
3. Tritt im Laufe der Experimente eine Gewöhnung ein?
4. Bewertende Aussagen, die nicht die konkrete Beantwortung der in den Experimenten gestellten Fragen betreffen, sollen vermerkt werden.

Bei der Auswahl der Probanden wurde Wert darauf gelegt, daß diese keine vorausgehenden Erfahrungen mit synthetischem haptischem Feedback haben. Die Bewertung der Simulation sollte nicht durch pragmatische Erfahrungen beeinflusst sein. Außerdem war auch die Beobachtung eines Erstkontakts mit virtueller Haptik Untersuchungsgegenstand.

Für die Experimente konnte auf eine Gruppe von 20 Probanden zurückgegriffen werden. Hiervon waren 16 Personen männlichen und 4 Personen weiblichen Geschlechts. Die Teilnahme der Probanden beruhte auf freiwilliger Basis, nachdem ihnen Art und Zweck der Experimente dargelegt wurden.

Mit dieser geringen Anzahl von Versuchspersonen und deren nicht repräsentativer Auswahlmöglichkeit lassen sich keine statistisch relevanten Ergebnisse ermitteln. Ziel war vielmehr, die prinzipielle Machbarkeit der Konzepte zu überprüfen und entsprechende Ergebnistrends zu finden.

Mit Hilfe einiger Vortests wurde eine durchschnittliche Testdauer ermittelt. Diese sollte daraufhin die Zeit von 45 Minuten (mit Einweisung) nicht überschreiten. Die Vortests zeigten, daß bei deutlicher Überschreitung dieses gewählten Zeitlimits, ein Effekt der Langeweile, bzw. der Anstrengung empfunden und auch von Probanden geäußert wurde. Entweder waren die Probanden nicht mehr konzentriert oder sie beklagten die Mühe, immer wieder neue Proben zu bewerten.

Inhaltlich sollten durch die Experimente zwei Klassen von Fragestellungen abgedeckt sein:

- Eine objektive Erkennungsleistung
- Eine subjektive Bewertungsleistung

Für die Bewertungsleistung war weiterhin vorgegeben, daß zwei verschiedene Materialgruppen, Kunststoff und Textilien, in ihrer haptischen Darstellung qualitativ beurteilt werden. Die erläuterten Vorbedingungen führten zur Konzeption der folgenden drei Experimente, die in der gegebenen Reihenfolge mit den Probanden durchgeführt wurden:

1. Experiment Unterscheidbarkeit  
Überprüft die haptische Unterscheidbarkeit räumlich ähnlicher Strukturen. Um mögliches Rauschen in der Texturgewinnung auszuschließen, werden synthetische Texturen verwendet. Die Proben sind so erzeugt, daß sie realen Fühlaufgaben entsprechen.
2. Experiment Kunststoffoberflächen  
Überprüft die Qualität der haptischen Simulation am Beispiel von Texturen drei verschiedener Kunststoffoberflächen.
3. Experiment Textiloberflächen  
Überprüft die Qualität der haptischen Simulation am Beispiel von Texturen drei verschiedener Textiloberflächen.

Die im weiteren Verlauf dieses Kapitels dokumentierten Experimente wurden, ebenso wie die für dieses Projekt durchgeführten Experimente zur Rauheit [42], mit dem haptischen Gerät PHANToM (Personal Haptic Interface Mechanism) [59] durchgeführt.

Innerhalb eines Bewegungsbereichs von  $20 \times 20 \times 20$  cm gestattet das PHANToM 3 Freiheitsgrade für die aktive Kraftgabe, 6 Freiheitsgrade für die Bewegung und maximal 6 Freiheitsgrade für die Positionsrückmeldung.

Als zu gebende Maximalkraft sind  $10N$  möglich, die kontinuierliche Rückkopplungskraft wird mit  $1,5N$  angegeben [59]. Konstruktionsbedingt ist das Gerät „in Waage“, so daß die Eigenreibung mit  $0,1N$  sehr gering ausfällt [59].

Rückkopplungskräfte können auf zwei verschiedenen Wegen gegeben werden: Über einen Stift, dessen Aufhängung am PHANToM drei rotatorische Sensoren enthält oder über eine Fingerkappe, in die ein einzelner Finger zum Fühlen gesteckt wird.

Da die Interaktion mit dem Gerät mittels Fingerkappe für das Fühlen von Oberflächen einen direkteren Zugang zum Untersuchungsobjekt erlaubt, wurde diese Art der Interaktion gewählt. Beim Einsatz der Fingerkappe war zu gewährleisten, daß diese den Probanden nicht zu eng anlag. Der Finger soll geführt, nicht aber gepreßt werden. Durch Verwendung der Fingerkappe ergaben sie somit in der aktuellen Konfiguration 3 Freiheitsgrade für Kraft, 6 Freiheitsgrade für Bewegung und 3 Freiheitsgrade für Positionsrückmeldung.

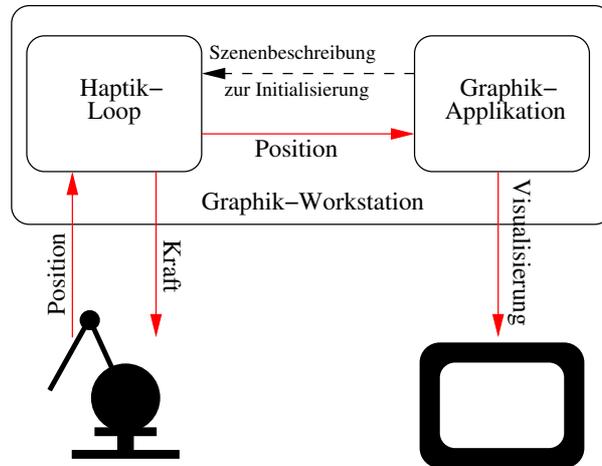


Abbildung 8.3: Versuchskonfiguration

Abbildung 8.3 zeigt die Versuchskonfiguration schematisch. Die graphische Workstation besaß zwei Prozessoren und führte sowohl Visualisierung als auch haptische Simulation aus. Die zu fühlenden dreidimensionalen Daten konnten eine Komplexität von 20000 Dreiecken besitzen, ohne daß die Haptik-Loop die kritische Dauer von 1/1000 Sekunde überschritt.

Die höchstmögliche Komplexität der Szene ist hierbei durch die reine Rechenleistung beschränkt. Wenn sichergestellt ist, daß die haptische Berechnung einen separaten Prozessor vorfindet, skaliert die mögliche Komplexität linear mit der Rechenleistung.

## 8.3 Experiment: Unterscheidbarkeit

Untersuchungsgegenstand dieses Experiments ist die räumliche Unterscheidbarkeit ähnlicher Oberflächenstrukturen innerhalb der Kraft erzeugenden haptischen Simulation.

### 8.3.1 Durchführung

Da an dieser Stelle die synthetische Formgebung und deren Wahrnehmung Kern der Fragestellung sind, wurden rein synthetische Texturen als Eingabemenge zur Formgebung durch Shape from Shading herangezogen. Abbildung 8.4 zeigt die für dieses Experiment verwendeten Bitmaps, Abbildung 8.5 zwei aus diesen Bitmaps generierte dreidimensionale Repräsentationen in Gitterdarstellung. Die aus den synthetischen Texturen resultierenden Gitter enthalten exakt gleiche Grundelemente. Weiterhin ist sichergestellt, daß die

Grundelemente in sämtlichen sechs Ausprägungen die gleiche Höhe aufweisen.

Der Forminhalt der Texturen entspricht den häufig bei technischen Kunststoffoberflächen in Fahrzeuginnenräumen vorzufindenden Strukturen. Dieser ist bewußt so gewählt, um eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse in die motivierende Praxis zu erleichtern.

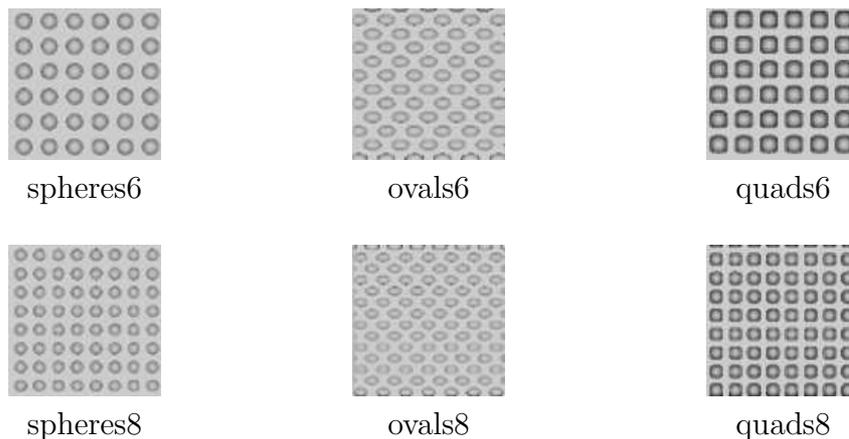


Abbildung 8.4: Synthetische Texturen zur Unterscheidbarkeit

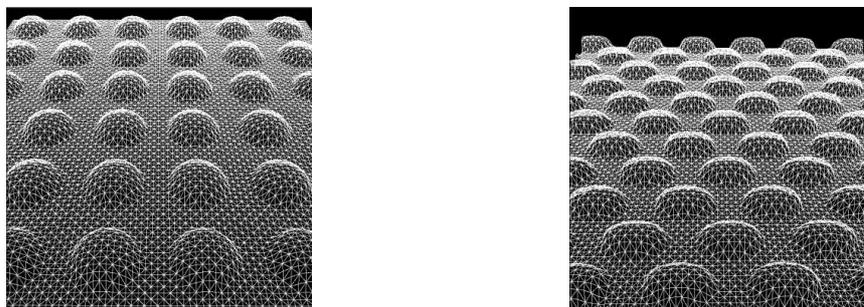


Abbildung 8.5: 3D-Gitterdarstellung spheres6 und ovals6

Untersucht werden drei verschiedene Grundformen: Kugelsegmente (spheres), Ellipsoidsegmente (ovals) und Quadersegmente (quads) mit abgerundeten Kanten.

Alle drei Grundformen liegen in zwei Auflösungsstufen vor. In der gröberen Stufe beinhalten die Texturen spheres6 und quads6 36 Grundelemente auf einer Fläche von  $40 \times 40$  Millimeter. Die grobe Stufe ovals6 weist auf der selben Fläche durch die Verschränkung der Grundelemente 55 davon auf. In der feiner Stufe besitzen spheres8 und quads8 jeweils 64 Grundelemente, ovals8 besitzt 85 Grundelemente.

Als Materialien stehen dem Interviewer ein Ausdruck mit den Bildinhalten der Texturen (Abbildung 8.4) und ein Fragebogen in Tabellenform zur

Verfügung, in dem die im Experiment gegebenen Antworten zur Erkennung eingetragen werden. Auf dem Fragebogen werden zusätzlich die gemachten Beobachtungen des Verhaltens der Probanden und mögliche Bemerkungen eingetragen.

Für jeden Probanden hat das Experiment folgenden Ablauf:

1. Einführung

Der Versuchsaufbau wird erklärt. Die Technik des haptischen Geräts wird skizziert und das Zusammenspiel mit der graphischen Workstation wird erläutert. Es wird gezeigt, wie das haptische Gerät verwendet werden soll. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, daß die aufgebrachten synthetischen Kräfte auch im Fehlerfall keine Verletzungen hervorrufen können.

2. Erläuterung

Der Ablauf des Experiments wird erläutert. Der Ausdruck mit den Bildern der Texturen wird ebenfalls zur ausführlichen Ansicht gezeigt.

3. Eingewöhnungsphase

Die sechs verschiedenen Texturen werden haptisch mit visuellem Feedback präsentiert. Um den Einstieg zu erleichtern, sind sie um den Faktor 2 skaliert, haben also eine Grundfläche von  $80 \times 80$  Millimeter. Der Interviewer fragt nach der Phase der Eingewöhnung explizit, ob der Fühleindruck dem visuellen Eindruck entsprochen hat.

4. Erkennung 1. Durchgang

Es werden fünf der sechs Texturen ohne visuelles Feedback präsentiert, wobei doppelte Vorkommen ausgeschlossen sind. Das visuelle Feedback gibt nur noch eine Positionsangabe zur leichteren Navigation, zeigt aber keinen Forminhalt. In diesem Durchgang wird weiterhin die Grundfläche  $80 \times 80$  Millimeter präsentiert.

5. Erkennung 2. Durchgang

Es werden ebenfalls fünf von sechs Texturen ohne doppelte Vorkommen und ohne visuelles Feedback präsentiert. Die physikalische Ausdehnung der Texturen liegt nun in Originalgröße vor mit einer Grundfläche von  $40 \times 40$  Millimetern.

Nachfragen der Probanden, die der Lösung der gestellten Erkennungsaufgabe dienen, werden vom Interviewer nicht beantwortet. Notwendige Hilfen zur Navigation oder zum Verständnis sind in verbaler Form jedoch erlaubt.

### 8.3.2 Ergebnis

Die Durchführung dieses Versuchs zeigte eindrucksvoll, daß es für durchschnittliche Personen sehr ungewohnt ist, sich ausschließlich auf die haptischen Sinne zu verlassen. Keiner der Probanden hatte bisher Erfahrung mit einer haptischen Oberflächensimulation von Oberflächenstrukturen und es war daher häufig ein Moment der Überraschung zu beobachten, wenn die ersten Texturen in der Phase der Eingewöhnung präsentiert wurden. In dieser Phase wurde zusätzlich zur haptischen Repräsentation die graphische Repräsentation auf dem Monitor gezeigt, wobei der graphische Cursor mit der haptischen Position auf der virtuellen haptischen Oberfläche korrespondiert.

Die Überraschung der Probanden war hierbei durchweg positiv. Man war erfreut oder beeindruckt, daß das, was gesehen wurde, nun auch fühlbar war. Weder wurde die haptische Simulation angezweifelt oder in ihrer Qualität kritisiert. Die Qualität der haptischen Simulation war von allen Probanden vollständig akzeptiert.

Bei der erstmaligen Verwendung des haptischen Geräts, wie auch in der Weiterführenden, wurden keinerlei Widerstände durch die Versuchspersonen beobachtet. Lediglich ein Proband bedauerte, durch die tischgebundene Installation eingeschränkt zu sein.

In der Eingewöhnungsphase waren zwei Arten der versuchten Wahrnehmung der haptischen Simulation durch die Probanden zu beobachten: Es wurden lokal die einzelnen sichtbaren Grundelemente der Texturen erfühlt und nachvollzogen. Zusätzlich wurde global durch hin und her reiben auf der Fläche der Gesamteindruck überprüft. 45% der Teilnehmer am Experiment beschränkten sich hierbei jedoch auf das langsame lokale „Abfahren“ der Strukturen. Die andere Gruppe der Probanden zeigte beide Strategien der Erkennung.

Nach der Phase der Eingewöhnung begann der erste Durchgang zur Erkennung der Texturen. Die Dimensionen der Texturen aus der Eingewöhnungsphase (Grundfläche  $80 \times 80$  Millimeter) blieben erhalten. Es war jedoch keine graphische Repräsentation mehr auf dem Monitor sichtbar. Lediglich graphischer Cursor und eine planare Fläche als „Merker“ für die Ausdehnung der haptischen Textur blieb sichtbar.

Jeweils zu Beginn des ersten Durchgangs wurde eine Verunsicherung der Probanden festgestellt. Gerade bei den ersten vorgelegten Proben fiel es schwer, eine Aussage zur konkreten Textur zu machen. Es wurden zeitintensiv und gründlich sowohl lokale als auch globale Überprüfungen der haptischen Probe durchgeführt. Nahezu alle Probanden äußerten an dieser Stelle explizit ihre Unsicherheit, vielfach kombiniert mit der Befürchtung, die gestellte Aufgabe nicht zu bestehen. In diesen Fällen wurde durch den Interviewer abermals

	Übereinstimmungen					
	Keine	1	2	3	4	5
1. Durchgang	10%	40%	15%	10%	25%	0%
2. Durchgang	0%	25%	35%	25%	5%	10%

Tabelle 8.1: Trefferquoten Unterscheidbarkeit

deutlich darauf hingewiesen, daß es nicht das Ziel sein soll, die Texturen „als Wettbewerb“ zu erkennen. Vielmehr soll ermittelt werden, was erkennbar ist. Es wurde klargestellt, daß die haptische Simulation geprüft wird, nicht die Probanden.

Im weiteren Verlauf des Experiments ließ diese beobachtbare und auch durch die Versuchspersonen formulierte Unsicherheit nach, verschwand jedoch nicht vollständig. Vielfach wurde der Wunsch geäußert, vor einer Entscheidung mit bereits vorgelegten oder aber mit allen möglichen Texturen vergleichen zu können. Die Probanden wünschten somit, Sicherheit bei der Abgabe des Urteils zu gewinnen.

Tabelle 8.1 zeigt die Trefferquoten an richtigen Nennungen bei 5 Proben pro Durchgang. Dieses Ergebnis läßt jedoch nur eine begrenzte Aussage zur Erkennbarkeit der haptischen Proben zu: Zwar erkannten 25% der Probanden im ersten Durchgang 4 der gezeigten Proben richtig, 40% der Testpersonen erreichten jedoch nur einen Treffer, 10% sogar gar keinen.

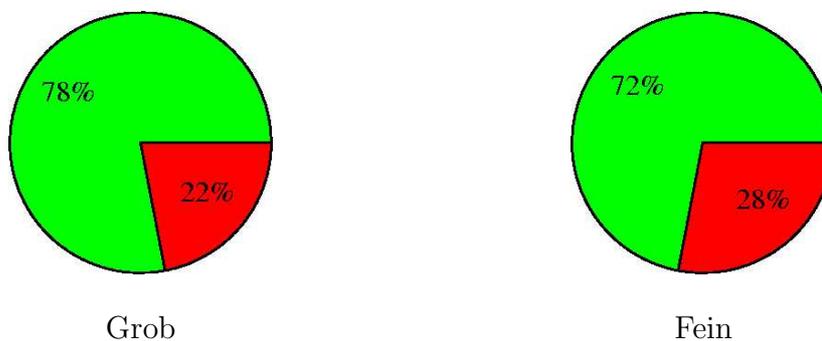
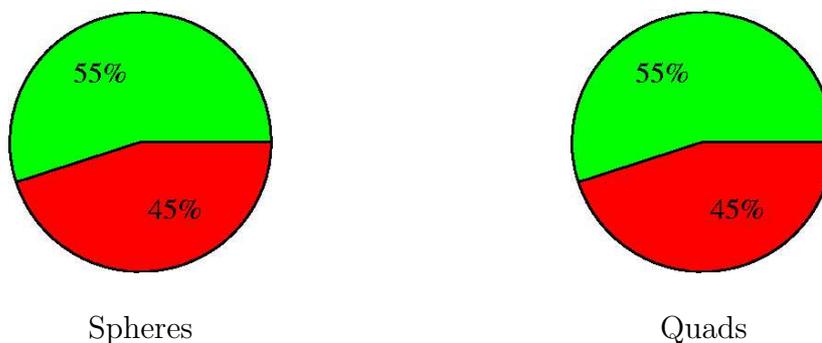
Ähnlich verhält es sich im zweiten Durchgang: Insgesamt 15% erkannten 4 und sogar 5 Proben richtig, insgesamt 60% erzielten aber nur 1 oder 2 Treffer.

Es ist offenbar sehr schwierig, die Gestaltung der einzelnen Grundelemente zu unterscheiden. Ist die Versuchsperson dabei initial „auf der falschen Fährte“, wiederholen sich Fehler beim Zuordnen der Texturen.

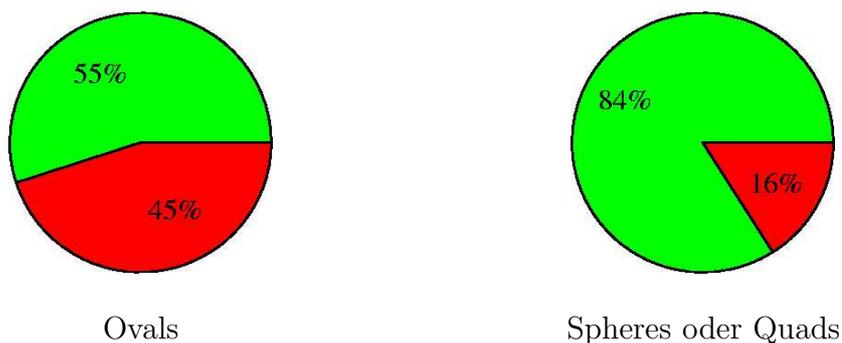
Setzt man nun Merkmale der vorgelegten Texturen zu den Zuordnungsergebnissen in Beziehung, so ergeben sich für den ersten Durchgang ( $80 \times 80$  Millimeter) die Ergebnisse der Abbildungen 8.6–8.8 und für den zweiten Durchgang die der Abbildungen 8.9–8.11.

Abbildung 8.6 zeigt die Trefferquote für grobe Texturen. Wurde eine Textur der groben Körnung {spheres6, quads6, oder ovals6} vorgelegt, so wurde zu 78% auch eine dieser Texturen als erkannt genannt. Ebenso wurde zu 72% als erkannte Textur eine aus der Menge {spheres8, quads8, ovals8} genannt, wenn die zu erkennende Textur von feiner Körnung war.

Wurde als Erkennungsergebnis eine Textur aus {spheres6, spheres8} erwartet, wurde zu 55% eine Textur aus dieser Menge erkannt (Abbildung 8.7,

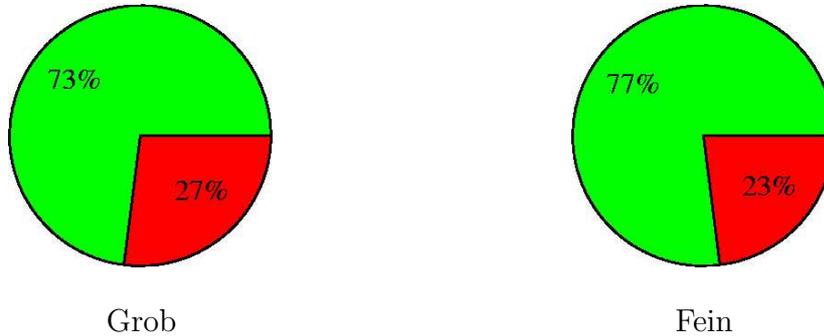
Abbildung 8.6: Unterscheidbarkeit Auflösung bei  $80 \times 80$  MillimeterAbbildung 8.7: Unterscheidbarkeit spheres und quads bei  $80 \times 80$  Millimeter

links). Für {quads6, quads8} (Abbildung 8.7, rechts) und {ovals6, ovals8} (Abbildung 8.8, links) ergeben sich die gleichen Resultate.

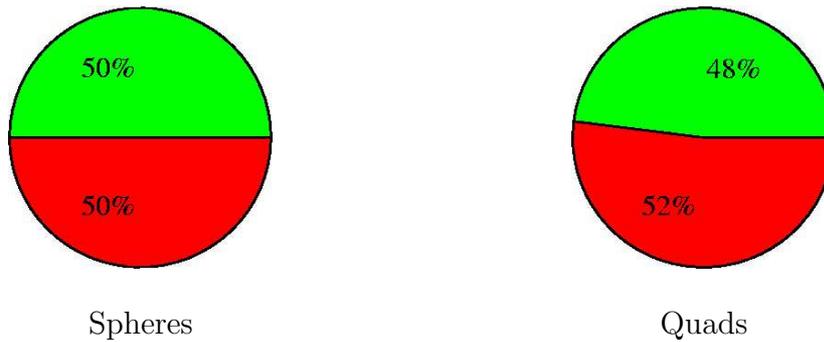
Abbildung 8.8: Unterscheidbarkeit ovals bei  $80 \times 80$  Millimeter

Deutlich fällt die gefühlte Korrespondenz im Fühleindruck von spheres und quads auf (Abbildung 8.8, rechts). 84% erkannten eine Textur aus {spheres6, spheres8, quads6, quads8}, wenn eine Textur aus dieser Menge gezeigt wurde.

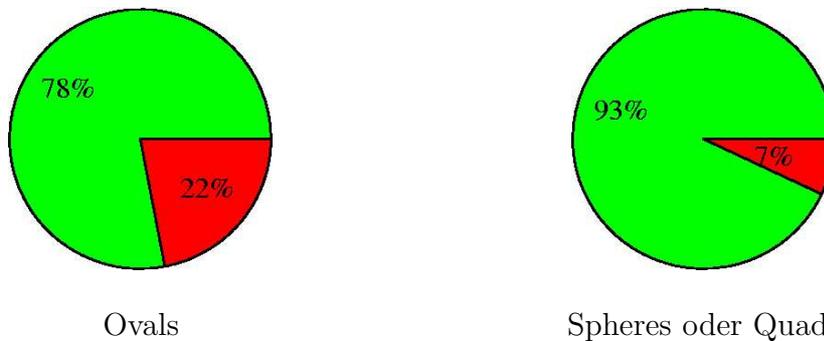
Auch im zweiten Durchgang ergibt sich die Aussage, daß es für die Probanden leichter war, zwischen groben und feinen Texturen zu unterscheiden, als die Art der vorliegenden Grundelemente zu benennen. Wurde eine grobe Tex-

Abbildung 8.9: Unterscheidbarkeit Auflösung bei  $40 \times 40$  Millimeter

tur aus  $\{\text{spheres6}, \text{ovals6}, \text{quads6}\}$  vorgelegt, so erkannten 73% eine grobe Textur aus dieser Menge. Im umgekehrten Fall der feinen Texturen waren es 77% (Abbildung 8.9). Die Erkennungsleistung für spheres und quads ist

Abbildung 8.10: Unterscheidbarkeit spheres und quads bei  $40 \times 40$  Millimeter

nicht eindeutig (Abbildung 8.10). Nur 50% erkannten eine spheres Textur, wenn eine Textur aus  $\{\text{spheres6}, \text{spheres8}\}$  vorgelegt wurde. Für  $\{\text{quads6}, \text{quads8}\}$  sind es analog nur 48%. Eindeutig besser wurden im zweiten Durch-

Abbildung 8.11: Unterscheidbarkeit ovals bei  $40 \times 40$  Millimeter

gang jedoch ovals Texturen von den anderen separiert. Wurde aus  $\{\text{ovals6},$

ovals8} vorgelegt, so erkannten 78% der Probanden eine Textur aus dieser Menge (Abbildung 8.11). Wurde weiterhin eine Textur aus {spheres6, spheres8, quads6, quads8} vorgelegt, so wurde eine Textur aus dieser Menge von 93% der Testpersonen erkannt.

## 8.4 Experiment: Kunststoffoberflächen

Das Experiment zur Wahrnehmung von Kunststoffoberflächen dient, ebenso wie das darauffolgend dokumentierte Experiment mit Textiloberflächen, der qualitativen Bewertung der haptischen Simulation.

Als Proben wurden drei exemplarische computergraphische Texturen von Kunststoffoberflächen ausgewählt. Die ersten beiden mit offensichtlich symmetrischen Anteilen und eine dritte, die nicht symmetrisch erscheint. Sie wurde dennoch durch die entwickelte Analyseketten bearbeitet und es ist interessant, wie die synthetisierte Haptik von den Probanden aufgenommen wird.

Abbildung 8.12 zeigt die im Experiment herangezogenen Texturen und die Zwischenschritte der Symmetrieanalyse.

Die Spalten enthalten hierbei von links nach rechts laufend:

1. Original-Bitmap mit markiertem Primitiv
2. Statistical Feature Matrix mit gefundenen Gitterpunkten
3. Das extrahierte Primitiv
4. Die aus dem Primitiv gewonnene Textur

Die Textur plastic1 ist als Probe gewählt, da sie sehr anschaulich eine symmetrische Textur verkörpert. Textur plastic2 ist ebenfalls der Anschauung nach deutlich symmetrisch, enthält jedoch auch sichtbare Unregelmäßigkeiten.

Schließlich ist Textur plastic3 ebenfalls als Probe verwendet. Sie ist ein durchaus typisches Beispiel für in Fahrzeuginnenräumen anzutreffende Oberflächen, andererseits offensichtlich nicht visuell symmetrisch. Sie erscheint im Gegenteil eher unregelmäßig. Abbildung 8.12 zeigt in der unteren Reihe hierzu, daß die Symmetrieanalyse in der Statistical Feature Matrix<sup>1</sup> zahlreiche und unregelmäßig angeordnete Gitterpunkte enthält. Dennoch gelingt die Extraktion eines „pragmatischen“ Primitivs und daraus die Synthese einer

---

<sup>1</sup>2. Spalte von links.

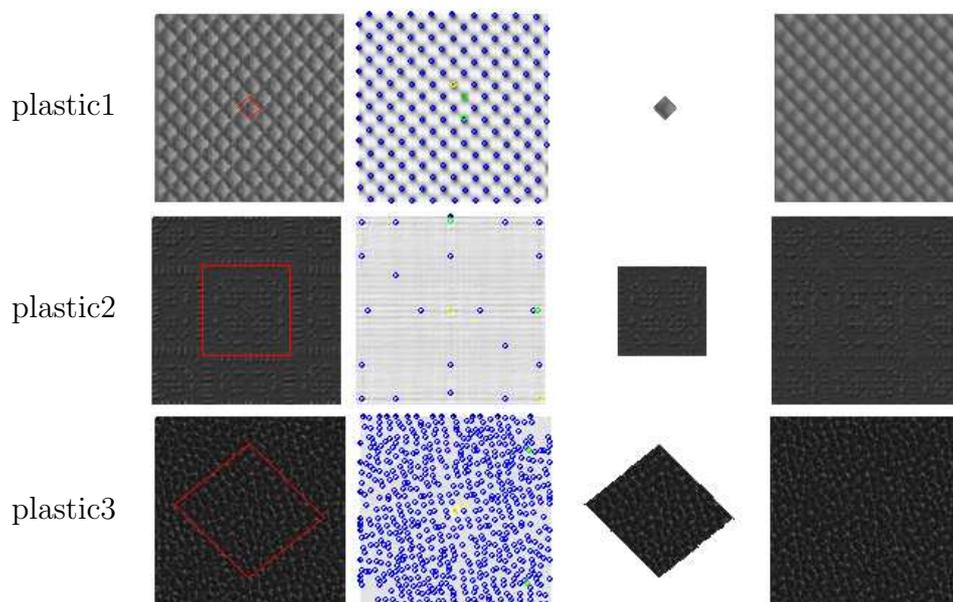


Abbildung 8.12: Analyseketten Kunststoffoberflächen

„pragmatischen“ Textur für die Findung der dreidimensionalen Darstellung zur haptischen Simulation.

Aus Abbildung 8.13 sind generierte 3D-Modelle ersichtlich, die im Experiment haptisch dargestellt werden.

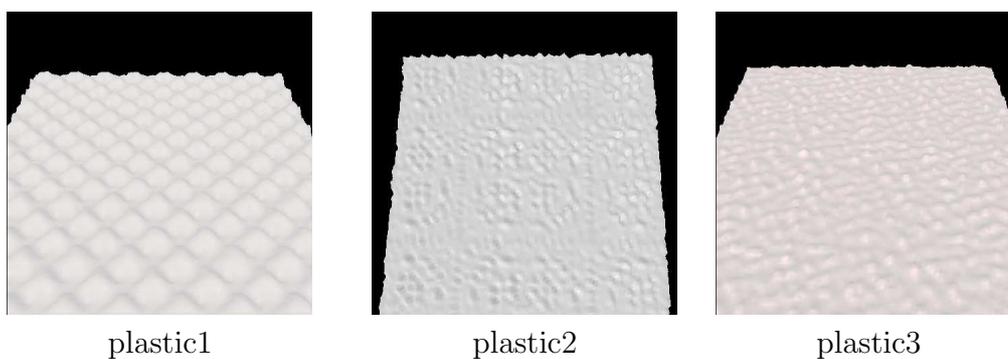


Abbildung 8.13: 3D-Darstellung Kunststoffoberflächen

### 8.4.1 Durchführung

Untersuchungsgegenstand ist die Qualität bezüglich der Erkennbarkeit des erzeugten haptischen Eindrucks. Die Probanden sollen nicht zuordnen, sie sollen eine persönliche und daher auch subjektive Bewertung der simulierten Texturen an einer gegebenen Skala vornehmen.

Als Materialien stehen dem Interviewer ein Ausdruck mit den Bildern der drei unterschiedlichen Oberflächentexturen plastic1, plastic2 und plastic3, sowie ein Fragebogen zur Verfügung. Dieser Fragebogen enthält für jede Textur eine Tabelle, in der die gemäß der Skala gegebenen Bewertungen angekreuzt werden. Die angebotenen Stufen sind hierbei: „**Nicht** erkennbar“, „**vorstellbar** erkennbar“, „**ausreichend** erkennbar“, „**gut** erkennbar“ und „**perfekt** erkennbar“. Weiterhin ist ebenfalls Raum zur Protokollierung gemachter Beobachtungen.

Das Experiment hat den Ablauf:

1. Erläuterung

Der Ablauf des Experiments wird erläutert. Der Ausdruck mit den Bildern der Texturen wird vorgelegt. Die Skala wird erläutert und es wird betont, daß nach der persönlichen Bewertung des Probanden gefragt wird.

2. Präsentation der Texturen

Den Probanden wird mitgeteilt, welche Textur haptisch simuliert wird. Sie haben nun zu bewerten, zu welchem Grad sie die vorgelegte Textur in der Simulation erkennen. Für jede Textur werden dabei hintereinander drei Höhenskalierungen haptisch präsentiert. Es wird mit der unmodifizierten dreidimensionalen Formgebung begonnen. Es folgt eine haptische Repräsentation, bei der die Höhenskalierung verdoppelt ist und schließlich eine weitere mit vierfacher Höhenskalierung.

Bei der Versuchsdurchführung zeigt die Simulation des graphischen Feedbacks die Position des tastenden Fingers, nicht jedoch das visuelle Feedback der Textur. Auch hier sind nur die visuellen Ausdehnungen der befühlten Fläche dargestellt.

### 8.4.2 Ergebnis

Erfragt man von realen Personen ein Urteil zu einem Sachverhalt, hier also nach der Qualität eines haptischen Eindrucks, so sind die gegebenen Urteile in gewissen Grenzen immer auch subjektiv. Was für den Einen nur „ausreichend“ erscheint kann für die Andere durchaus als „gut“ gelten. Dennoch lassen sich Schwerpunkte und Tendenzen ermitteln, wie die den Probanden vorgelegten Simulationen wahrgenommen werden.

Anders als beim vorherigen Experiment zur Unterscheidbarkeit, wurden die in diesem Versuch vorgelegten haptischen Texturen von den Probanden „global“ untersucht: Sie konzentrierten sich nicht auf einzelne Grundelemente, sondern strichen weiträumig über die Oberfläche.

Nahezu sämtliche Probanden verzichteten auf einen Test mit geschlossenen Augen. Ganz im Gegenteil wurde der explizit zum Beurteilen gezeigte Ausdruck mit den Bildern der Texturen intensiv mit der haptischen Simulation verglichen.

Sporadisch wurden allgemeine Kommentare zur Qualität der Simulation abgegeben: So wurde mehrfach bemerkt, daß der präsentierte haptische Eindruck zwar der gezeigten visuellen Repräsentation entspreche, daß solch eine Oberfläche im Fahrzeug jedoch „irgendwie“ weicher sei. Andererseits wurde ebenso festgestellt, daß die haptische Simulation bei großem Anpreßdruck des fühlenden Fingers zu „matschig“, bzw. zu weich sei.

Alle Probanden hatten, abgesehen vom ersten Experiment zur Unterscheidbarkeit, keinerlei vorherige Erfahrungen mit virtuellen haptischen Texturen und bewerteten die Simulation insgesamt als brauchbare Erweiterung bei virtuellen Fahrzeugpräsentationen.

Für die vorgelegten Texturen sind die Ergebnisse im Einzelnen durchaus ambivalent. So zeigen die Ergebnisse für die Texturen plastic1 und plastic3 (Abbildungen 8.14 und 8.16) positive Resultate. Die haptischen Repräsentationen der Textur plastic2 sind dagegen mehrheitlich negativ beurteilt worden (Abbildung 8.15).

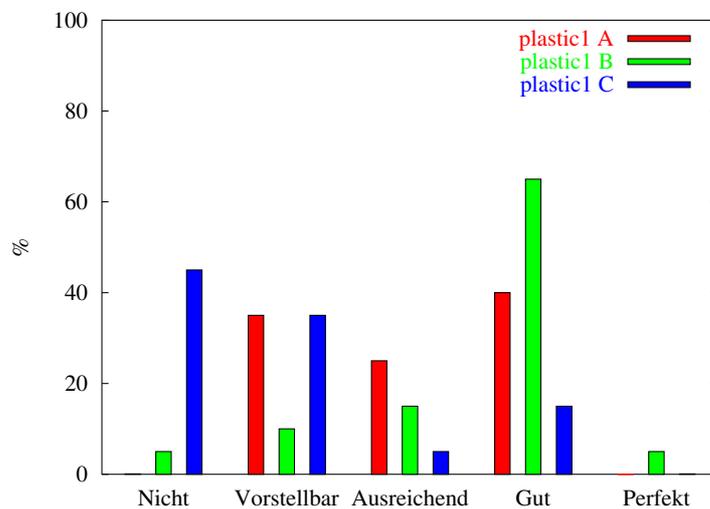


Abbildung 8.14: Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic1

Am positivsten wurde Textur plastic1 bewertet. Die direkt aus der Generierungskette Symmetriedetektion → Synthetisierung → Formgebung gewonnene Variante A (in Abbildung 8.14 plastic1 A) wird zu 40% als gut, zu 30% als ausreichend und zu 35% als vorstellbar erkennbar bewertet. Die Verstärkung der Höhenskalierung um den Faktor 2 (Variante B) führt hier zu einer noch

größeren Akzeptanz. 5% der Probanden empfinden die Präsentation als perfekt, 65% als gut. Variante C mit einer nochmaligen Verstärkung der Höhendarstellung um den Faktor 2 schneidet schlechter als die beiden ersten Varianten ab. Hier empfinden 45% der Probanden die haptische Repräsentation als nicht erkennbar, weitere 35% als lediglich vorstellbar.

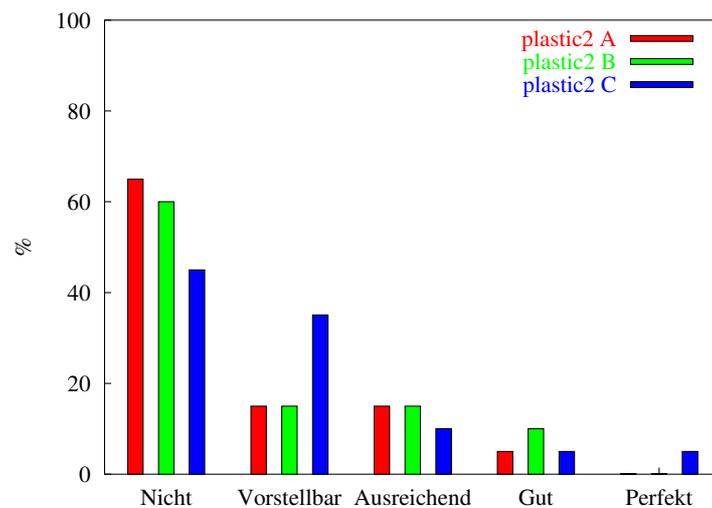


Abbildung 8.15: Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic2

Textur plastic2 mit den Varianten A,B und C (Abbildung 8.15) wurde überwiegend als schlecht erkennbar bewertet. Die Tendenz der Bewertung entwickelt sich positiv mit einem Anstieg der Höhenskalierung. Halten in Variante A noch 65% der Testpersonen die Textur plastic2 für nicht erkennbar und 15% für vorstellbar erkennbar, so sinkt der Anteil der Bewertung „nicht erkennbar“ bei Variante C auf 45% und die Bewertung „vorstellbar erkennbar“ steigt auf 35%. Dennoch zeigen die Ergebnisse in Abbildung 8.15 deutlich die negative Bewertung.

Die haptische Simulation der Textur plastic3 zeigt wieder große Akzeptanz. Auch hier ergibt sich, daß Variante B mit einer Verstärkung des haptischen Effekts um Faktor 2 treffender aufgenommen wurde, als die unskalierte Variante A (Abbildung 8.16). Variante A wurde von 15% als gut, 25% als ausreichend und 50% als vorstellbar erkennbar bewertet. Bei Variante B ist die Bewertung 30% gut, 45% ausreichend und weitere 15% vorstellbar. Zwar wird die starke Höhenskalierung in Variante C von 15% der Probanden als gut empfunden, 60% können die visuelle Textur plastic3 jedoch nicht im haptischen Signal wiedererkennen.

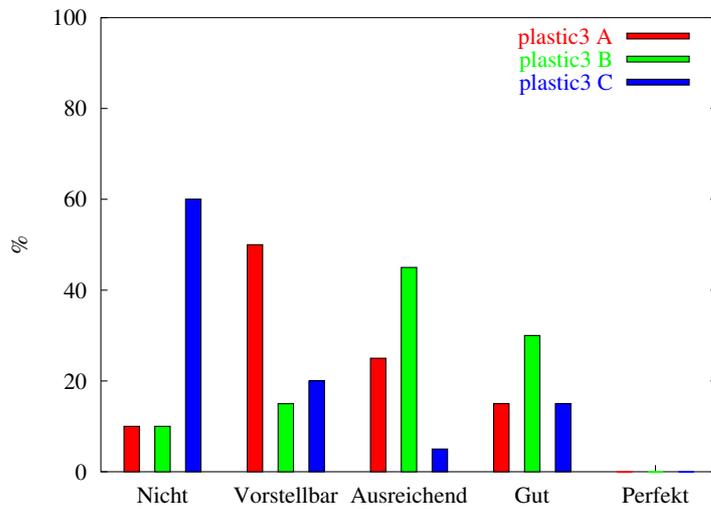


Abbildung 8.16: Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic3

## 8.5 Experiment: Textiloberflächen

Für diesen Versuch sind ebenfalls drei exemplarische Texturen ausgewählt und es gilt auch hier zu bewerten, wie die Qualität der Erkennbarkeit von den Probanden beurteilt wird.

Abbildung 8.17 zeigt die Proben und die einzelnen Zwischenschritte der Symmetrieanalyse.

Die Spalten enthalten hierbei von links nach rechts laufend:

1. Original-Bitmap mit markiertem Primitiv
2. Statistical Feature Matrix mit gefundenen Gitterpunkten
3. Das extrahierte Primitiv
4. Die aus dem Primitiv gewonnene Textur

Die generierten und zur Gabe des haptischen Feedbacks herangezogenen 3D-Modelle zeigt Abbildung 8.18.

### 8.5.1 Durchführung

Die Versuchsdurchführung ist zu der in Abschnitt 8.4 identisch: Die Fragestellung bezieht sich auf die Qualität der Erkennbarkeit der textilen Oberflächentexturen textil1, textil2 und textil3.

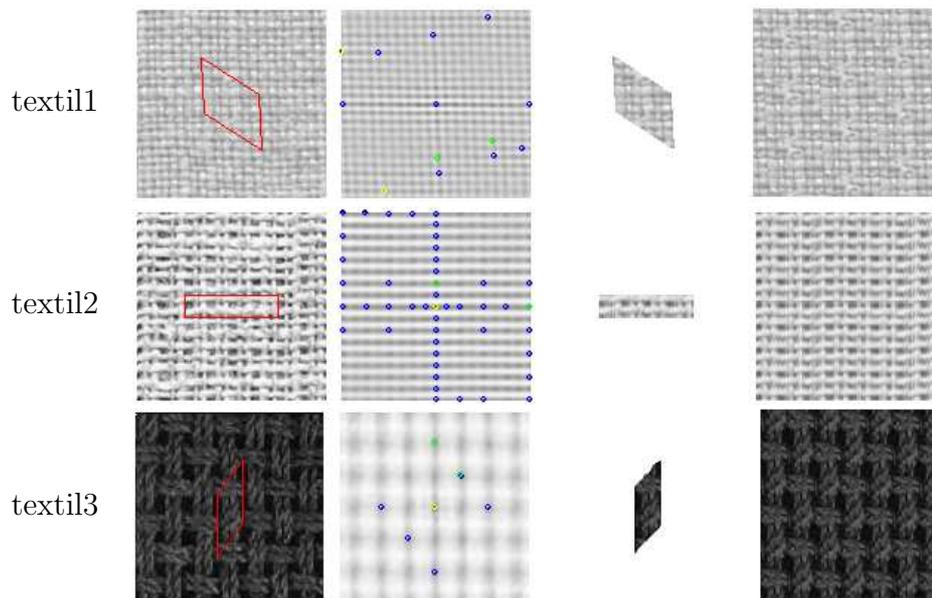


Abbildung 8.17: Analyseketten Textiloberflächen

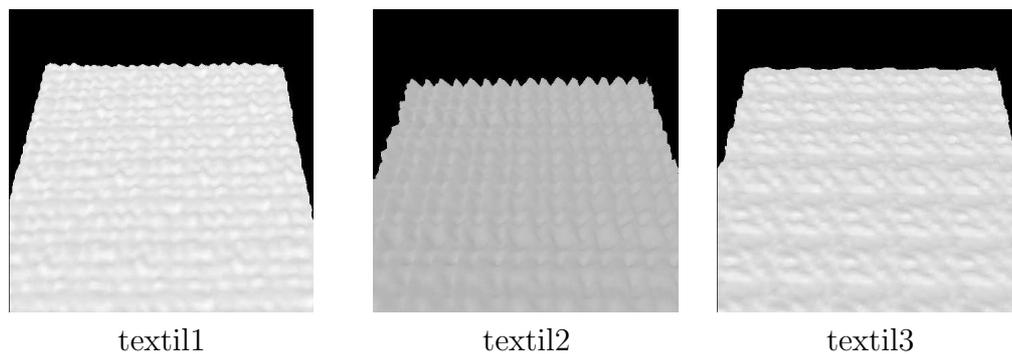


Abbildung 8.18: 3D-Darstellung Textiloberflächen

Die einzelnen Texturen sind nicht im graphischen Feedback der Simulation selbst zu erkennen, sondern werden jeweils als Bild vor der Erkennungsaufgabe gezeigt.

Auch hier zeigt die Simulation des graphischen Feedbacks nur die Position des tastenden Fingers, und nicht das visuelle Feedback der Textur.

Wie in Abschnitt 8.4 sind die angebotenen Stufen der qualitativen Erkennbarkeit: „**Nicht** erkennbar“, „**vorstellbar** erkennbar“, „**ausreichend** erkennbar“, „**gut** erkennbar“ und „**perfekt** erkennbar“.

Auch diese Bewertungen sind ebenfalls für jeweils drei Höhenskalierungen der drei Textil-Texturen abzugeben.

Da die haptisch zu präsentierenden Bildinhalte Textilien zeigen, wird die

dreidimensionale Form „weicher“ simuliert, als die der Kunststoffoberflächen. Kontaktflächen reagieren nicht hundertprozentig steif, sondern federn leicht ein.

## 8.5.2 Ergebnis

Dieses Experiment war in der Durchführung äquivalent zum Versuch mit Kunststoffoberflächen aus Abschnitt 8.4, lediglich die Bild- und Haptikinhalte sind angepasst.

Auch hier war die Strategie beim Erfühlen der Proben durch die Probanden globaler Natur. Es wurde großflächig untersucht durch hin und her streichen auf der Fläche. Ebenso war die intensive Berücksichtigung der gezeigten Bilder der Texturen zu beobachten.

Obwohl die präsentierten haptischen Oberflächen deutlich weicher dargestellt wurden, als die Kunststoffoberflächen, wurde dies explizit nur von einer Probandin bemerkt. Andererseits wurde jedoch ebenfalls nur einmal negativ vermerkt, daß der Eindruck „grundsätzlich zu hart“ vermittelt worden sei.

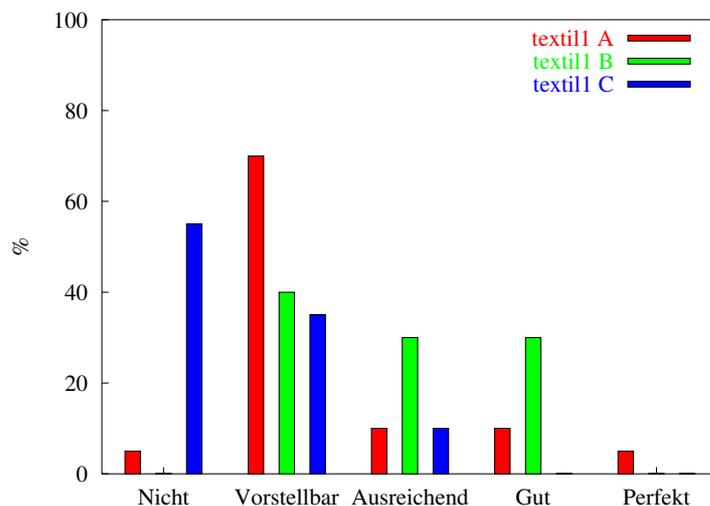


Abbildung 8.19: Bewertungen zu Textiloberfläche textil1

Die konkreten Befragungsergebnisse zur Textur textil1 enthält die Abbildung 8.19. Es zeigt sich, daß auch hier die höhenskalierte Variante B im Gegensatz zum „Original“ Variante A als gelungener empfunden wird. Wird textil1 A von 70% der Testpersonen als vorstellbar, von 10% als ausreichend, 10% als gut und weiteren 5% als perfekt empfunden, so erhält Variante B zu 30% die Bewertung „gut“, zu 30% die Bewertung „ausreichend“ und zu 40% die

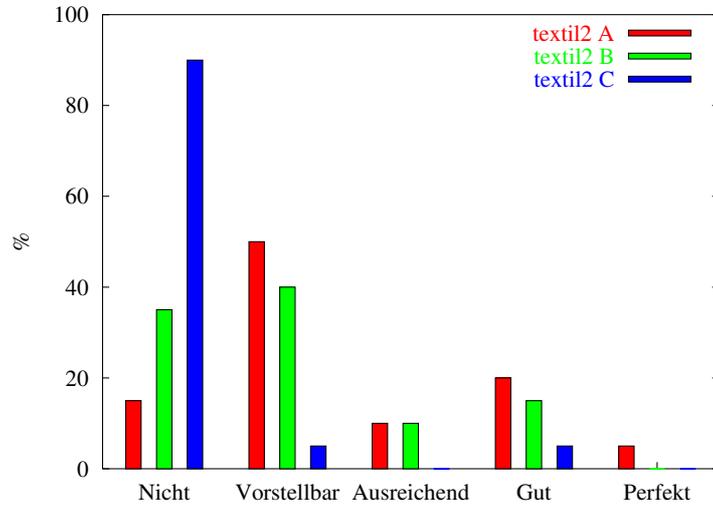


Abbildung 8.20: Bewertungen zu Textiloberfläche textil2

Bewertung „vorstellbar“. Variante C ist mit 55% nicht erkennbar und 35% vorstellbar wieder deutlich schlechter bewertet.

Für die Textur textil2 (Abbildung 8.20) fällt die Ablehnung der Variante C noch deutlicher aus. 90% bewerten hier „nicht erkennbar“. Die beste haptische Repräsentation zeigte sich bei dieser Textur in Variante A. 15% der Probanden empfanden die Textur als nicht erkennbar, 50% als vorstellbar, 10% als ausreichend, 20% als gut und 5% als perfekt. Variante B liegt in der Bewertung zwischen Variante A und C. Hier führt also die Verstärkung des haptischen Effekts zu einer geringeren Akzeptanz bei der Erkennbarkeit.

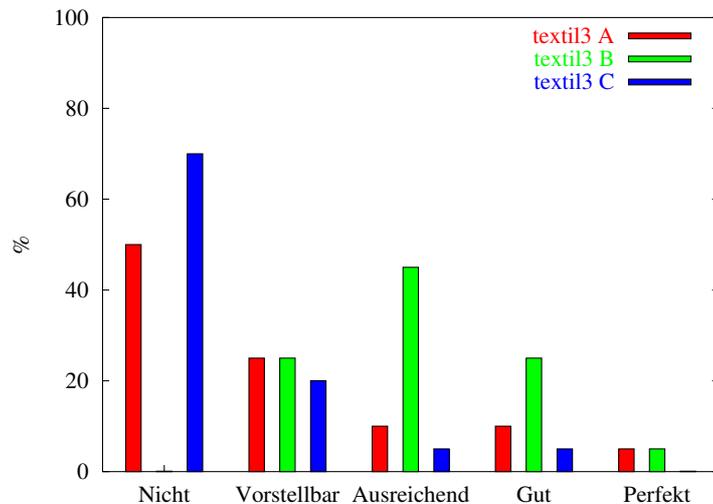


Abbildung 8.21: Bewertungen zu Textiloberfläche textil3

Die Probe *textil3* (Abbildung 8.21) erhält die besten Bewertungen eindeutig in Variante B. Sowohl Variante A als auch Variante C liefern einen hohen Anteil (50%, bzw. 70%) an „nicht erkennbar“ Bewertungen. Für Variante B ergibt sich im Gegensatz dazu 25% vorstellbar, 45% ausreichend, 25% gut und sogar 5% perfekt als Bewertung zur Erkennbarkeit.

## 8.6 Ergebnisse

Die in diesem Kapitel dokumentierten und bewerteten Experimente zur haptischen Simulation schließen die in der Aufgabenstellung als Ziel formulierte Interpretation von graphischen Texturen als haptische Texturen durch ihre konkrete Umsetzung ab. Es wurde ein durchgängiger Weg entwickelt und beispielhaft implementiert, wie mittels geometrischer Analyse der Bildinhalt computergraphischer Texturen haptisch simuliert werden kann. Bezüglich der Versuche zur haptischen Simulation sind an dieser Stelle diese Ergebnisse herausgestellt:

- Die haptischen Versuche ohne visuelles Feedback bedingen bei den Probanden eine lokale Fühlstrategie.
- Die haptischen Versuche mit visuellem Feedback bedingen bei den Probanden eine globale Fühlstrategie.
- Fühlaufgaben ohne visuelles Feedback werden von den Probanden, deren Gesichtssinn nicht eingeschränkt ist, als unnatürlich empfunden. Haptisches Feedback ist zur Ergänzung der VR-Simulation geeignet, nicht als alleiniger Simulationskanal.
- Die Unterscheidbarkeit von Oberflächenstrukturen bezüglich der Merkmale  $\text{grob} \leftrightarrow \text{fein}$  ist für ungeübte Versuchspersonen leicht leistbar, auch im Blindversuch.
- Die Formerkennung der synthetisch erzeugten ähnlichen Primitiva der haptischen Simulation ist für Probanden schwierig und zufallsdominiert.
- Wird die haptische Simulation als Ergänzung zur visuellen Darstellung gegeben, so wird die haptische Simulation von den Versuchspersonen als gültig erkannt.

Aus Anwendungs- und auch Anwendersicht ergeben sich durch die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren weiterhin die folgenden Ergebnisse:

- Die gleichzeitige Verwendung graphischer Texturen als haptische Texturen führt zu Redundanzminimierung bei den adressierten hochinteraktiven Simulationen.
- Die Synthesekette ist vollständig algorithmisch durchführbar.
- Die Beschränkung auf das erzeugende Primitiv einer Oberflächenstruktur kann hinreichend sein, um einen akzeptierten Fühleindruck zu erzeugen.

Schließlich sei als ganzheitliches Ergebnis dieser Arbeit formuliert:

- Zweidimensionale computergraphische Oberflächentexturen können rein geometrisch interpretiert und aus dem gewonnenen Analyseergebnis heraus haptisch simuliert werden.

## 8.7 Zusammenfassung

Die Implementierung eines Shape from Shading Algorithmus ermöglicht die notwendige Umsetzung des aus der Symmetrieanalyse gewonnenen symmetrischen Texturanteils in eine räumliche Oberflächenstruktur.

Hierdurch wird der zweidimensionalen graphischen Bitmap eine haptische Form gegeben, die mit einem kraftgebenden Gerät dargestellt wird.

Ohne visuelles Feedback ist es für durchschnittliche Probanden durchaus schwierig, die gezeigten synthetischen Oberflächenstrukturen eindeutig zu benennen. Gut gelingt jedoch eine grob↔fein Einteilung. Kombiniert man die Gabe des haptischen Feedbacks mit der graphischen Simulation, wird die haptische Simulation als Zugewinn empfunden.

Die auf Basis der entwickelten Analyse- und Synthesekette durchgeführte Simulation von beispielhaften Kunststoff- und Textiloberflächen zeigt ein von Probanden akzeptiertes Ergebnis. Häufig ist jedoch die Höhenskalierung der haptischen Formgebung zu variieren, um eine angemessene Wahrnehmung zu erreichen.

Nach wie vor wird die simulierte Oberfläche nicht als perfekt empfunden. Hierbei sind die Grenzen jedoch vornehmlich durch aktuell unzureichende Berechnungsleistung der Rechnersysteme bestimmt.

Die durchgeführten Experimente schließen die in der Aufgabenstellung als Ziel formulierte Interpretation von graphischen Texturen als haptische Texturen ab. Die aus den Experimenten gewonnenen speziellen Ergebnisse induzieren anwendungsorientierte Resultate und das Gesamtergebnis.



# Kapitel 9

## Diskussion und Ausblick

Der interdisziplinäre Rahmen der vorliegenden Arbeit ist das Forschungsgebiet Virtual Reality als Teilgebiet der Informatik. Methoden der Informatik und Methoden der Mathematik wurden angewendet auf eine Problemstellung des Computer Aided Styling (CAS), die jedoch ebenso als allgemeine Problemstellung der Mensch–Maschine–Interaktion aufzufassen ist. Elemente der Computergraphik, die computergraphischen Texturen, wurden auf eine neuartige Weise interpretiert: Der Bildinhalt der Texturen wurde mit geometrischen Methoden analysiert und aus den so gewonnenen Daten haptisch synthetisiert. Die entwickelten Verfahren wurden anschließend mit den empirischen Methoden Experiment und Beobachtung überprüft, die in der Durchführung an ähnlichen Untersuchungen zur Mensch–Computer–Interaktion und zur Wahrnehmung von haptischen Reizen angelehnt waren.

In Abschnitt 9.1 werden die Erkenntnisse dieser Arbeit unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert. Im Anschluß daran gibt Abschnitt 9.2 einen Ausblick auf mögliche weiterführende Entwicklungs- und Forschungsarbeiten, aber auch auf geeignete Anwendungsfelder, die aus den Ergebnissen dieser Arbeit resultieren.

### 9.1 Diskussion

„Für die Informatik, die sich als Wissenschaft von der systematischen Verarbeitung von Informationen versteht, ist der Begriff Information von zentraler Bedeutung.“ [27] Das lateinische *informare* heißt übersetzt *Gestalt geben*, wodurch die in dieser Arbeit untersuchten Informationen in doppelter Bedeutung treffend beschrieben sind. Informationstheoretisch wird Information aus einer Nachricht durch entsprechende Interpretation gewonnen. Nachrichten im Zusammenhang mit dieser Arbeit sind die computergraphischen Tex-

turen als Träger der haptischen (und visuellen) Information, die durch die beschriebenen Verfahren interpretiert werden.

Schematisch besteht Information aus drei Teilen [27]: Einem syntaktischen Teil, einem semantischen und einem pragmatischen Teil, aus dem sich der Zweck der Information ergibt. Der syntaktische Teil der Information zeigt sich hier als fraktale Dimension und als erzeugendes Primitiv des symmetrischen Texturanteils. Die entsprechenden semantischen Teile sind folglich die räumlich nicht trennbare Rauheit der Textur, bzw. deren räumlich trennbare Strukturelemente. Als pragmatischer Teil der Information ist der Zweck aufzufassen, daß hieraus das haptische Signal synthetisiert werden soll. Die aus der Nachricht *Textur* gewonnene Information *haptische Oberflächeneigenschaft* ist nun selbst wieder Nachricht für den Prozeß der haptischen Synthese.

Die Informatik erhält durch diese Arbeit neue Interpretationsverfahren zur Modellierung und Erzeugung haptischer Texturen. Vorhandene Informationen werden auf neuartige Weise interpretiert und nutzbar gemacht.

Für den Anwender sind neue Verfahren der Informatik dann relevant, wenn sich für die durchzuführenden Aufgaben Vereinfachungen oder Verbesserungen ergeben oder wenn völlig neue Nutzungsmöglichkeiten durch die Informatik erschlossen werden. Die Generierung haptischen Feedbacks zur Oberflächenanmutung ist bisher überwiegend für das Merkmal Rauheit betrachtet worden<sup>1</sup>. Ziel bisheriger Arbeiten war es, grundlegende Erkenntnisse zur Wahrnehmung von synthetischer Haptik zu gewinnen. Folgerichtig wurde dabei mit haptischen Eingabesignalen gearbeitet, die nicht aus einer realen Oberfläche gewonnen wurden, sondern vielmehr generisch erzeugt waren. Sinusschwingungen [89], [65], zufallsgenerierte Höhenkarten [78] oder mittels Fourier-Reihen erzeugte Texturen [6] sind hierfür beispielhaft.

Aus Anwendersicht existiert durch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren nun ein praktikabler Weg von physischer Oberfläche in Gestalt einer Griffprobe über die computergraphische Darstellung der Probe als Textur hin zur haptisch synthetischen Oberfläche. Ist das Verfahren genügend kalibriert, so existiert immer der direkte Bezug der virtuellen haptischen Simulation zum realen Material. Es wird für die Anwendung eine Argumentations- bzw. Entscheidungssicherheit denkbar<sup>2</sup>.

Die Implementation der algorithmischen Gewinnung haptischer Eingangssignale aus gegebenen Vorlagen kann die Anwendungsschwelle für Virtual

---

<sup>1</sup>Siehe Abschnitt 5.4.

<sup>2</sup>Konkret bezieht sich diese Überlegung auf das diese Arbeit motivierende Anwendungsfeld CAS. Virtuelles CAS kann die Styling-/Designprozesse dann angemessen unterstützen, wenn die anfallenden Entscheidungen zu Designvarianten im Virtuellen ebenso getroffen werden können wie an physikalischen Modellen.

Reality senken und die Anwendungsdichte dieser Technologie erhöhen. Obwohl in Vision und Anspruch zum Wert der VR die hohe Interaktivität und Intuitivität festgestellt sind [47], zeigt eine aktuelle empirische Studie zum praktischen Einsatz von VR in [21], daß diese Merkmale zur Zeit nur für die reine Visualisierung umgesetzt sind. Gesamtheitlich wird in [21] sogar festgestellt, daß VR hohes Spezialistentum voraussetzt und daß mangelnde Benutzerfreundlichkeit zu attestieren ist. Die algorithmische Gewinnung haptischer Signale aus existierenden Vorlagen vereinfacht die Anwendung von Virtual Reality und erleichtert die Erhöhung des Interaktionsgrades durch einfache Bereitstellung der taktilen Simulation.

Interaktivität für die visuelle Simulation durch Computergraphik ist bestimmt durch das Echtzeitkriterium. Bei gleichzeitig zu erzielendem Realismus der Darstellung sind entsprechende computergraphische Texturierungsverfahren Voraussetzung. Die Notwendigkeit der Einhaltung des Echtzeitkriteriums schränkt die anwendbaren computergraphischen Verfahren entsprechend ein, so daß sich die in Kapitel 4 entwickelten Bedingungen ergeben. Kernpunkt war dabei, daß zur geeignet schnellen computergraphischen Darstellung die Texturen als zweidimensionale Bitmapdarstellung vorliegen müssen. Neueste Arbeiten zum computergraphischen Raytracing zeigen bezüglich ihrer Möglichkeiten der Echtzeitvisualisierung vielversprechende Ergebnisse [86]. Sind für konventionelle Raytracing-Verfahren Berechnungszeiten von mehreren Sekunden, meist jedoch mehrere Minuten für ein Bild üblich, so können die in [86] beschriebenen Verfahren mehrere Ergebnisbilder pro Sekunde berechnen. Dies gelingt bei geringeren Bildauflösungen und immer noch langsamer als bei klassischen Echtzeit-Renderingverfahren. Durch physikalisch präzise Algorithmen können Raytracing-Verfahren jedoch weitaus realistischere visuelle Ergebnisse erzeugen, als es die Echtzeit-Verfahren erlauben.

Auch computergraphisches Raytracing setzt Texturierungstechniken zur Berechnung der Ergebnisbilder ein, in vielen Anwendungsfällen ebenfalls die Klasse von computergraphischen Texturen, die auch die Grundlage dieser Arbeit sind. Für diesen Fall sind die Raytracing-Texturen mit den hier ausgearbeiteten Techniken kompatibel. Anders verhält es sich mit den im Raytracing anzutreffenden generischen prozeduralen Texturen [91], [92], die nicht als geeignete Vorlage vorhanden sind. Der Vorteil der prozeduralen Texturen zeigt sich in deren Unabhängigkeit von Abbildungsvorschriften. Wie aus Kapitel 4 ersichtlich, ist die geschickte Texturapplikation maßgeblich für den visuellen Eindruck verantwortlich. Bei prozeduraler Applikation werden qualitativ sehr hochwertige Ergebnisse erzeugt, da Verzerrungen vermieden werden. Nachteilig ist wiederum, daß für gute Ergebnisse hohes Expertenwissen notwendig ist. Auch ist kein direkter Bezug zu den visuell dargestellten physischen Materialien vorhanden, wie er durch die in dieser Arbeit entwickelte

Technik beibehalten wird.

Prozedurale Texturen können ebenfalls Eingabe für die geometrische Analyse von Oberflächeneigenschaften sein. Hierzu wäre eine zweidimensionale Probe zu berechnen, die dann auf dem dokumentierten Weg analysiert werden kann. Sehr vielversprechend ist auch die synchrone Berechnung des haptischen Signals. Solch eine prozedurale Berechnung des haptischen Signals findet sich in dieser Arbeit in Ansätzen bei der Synthetisierung der haptischen Rauheit wieder, wenn Brownsche Bewegungen bzw. Brownsche Flächen haptisch erzeugt werden.

Bezüglich der haptischen Simulation von Rauheit ist die Korrespondenz von Rauheit und fraktaler Dimension eindeutig. Je größer die haptisch simulierte fraktale Dimension ist, desto rauer wird die simulierte Fläche empfunden. Unerwünscht im Sinne der getroffenen Abgrenzung für Rauheitsanteile als räumlich nicht trennbare Strukturen der Oberfläche im Gegensatz zu den räumlich trennbaren Symmetrieanteilen, sind von den Probanden in den Experimenten geäußerte Empfindungen zur Einordnung der simulierten Rauheit<sup>3</sup>. Wenn die alleinige Gabe von Rauheit hier die Assoziation von Materialien wie „Raufasertapete“ oder „Waschbeton“ auslöst, so ist das im Rahmen des hier entwickelten Modells nicht beabsichtigt. Es werden Materialien empfunden, deren Oberflächen durch reine Anschauung räumlich sehr große Strukturen erkennen lassen. Eine angemessene Kalibrierung des haptischen Rauheitssignals in der Simulation ist also anzuraten, damit die hohen, rauen fraktalen Dimensionen, für die Fläche also die Dimensionen nahe 3, nicht als Strukturelemente empfunden werden. Aspekte von Empfindung und auch Erwartung der Probanden sind bei der Erzeugung synthetischer Sinnesindrücke von großem Einfluß auf das zu erzielende Ergebnis. Einige dieser Zusammenhänge werden später in diesem Abschnitt noch zusammengehörig diskutiert.

Die Realisierung der entworfenen Verfahren zur Symmetriedetektion zeigt, bestätigt durch die durchgeführten Experimente, deren Praktikabilität. Allein die Ermittlung des erzeugenden Primitivs mit der Symmetrie Translation führt für eine große Menge an realen Oberflächentexturen zum gewünschten Ergebnis. Es ist jedoch sinnvoll, die weiteren Symmetrien wie Rotation, Spiegelung und Gleitspiegelung ebenfalls in die Analyse miteinzubeziehen. Hierdurch würde die Extraktion erzeugender Primitiva präziser werden und sämtliche theoretische Symmetrien einbeziehen. Es ist zu erwarten, daß so kleinere Primitiva aus der Analyse resultieren.

Nach Implementierung und Evaluation der Symmetriedetektion hat sich gezeigt, daß die Wahl des Schwellwertes für die Bestimmung der n-Zentren schwierig sein kann. Es konnte nicht darauf verzichtet werden, den Schwell-

---

<sup>3</sup>Siehe Abschnitt 6.4.2.

wert in vielen Fällen durch Benutzereingriff anzupassen. Eine Automatisierung der Schwellwert-Wahl ist hier erforderlich und könnte adaptiv oder innerhalb einer kontinuierlichen Relaxation erfolgen.

Die haptische Synthese gewonnener Primitiva konnte für die abschließenden Experimente implementiert und deren haptische Wirkung auf Probanden untersucht werden. Die vorgeschlagenen Verfahren erwiesen sich dabei in vielen Fällen als gut geeignet für die haptische Simulation von Oberflächen, andererseits bleibt das Ergebnis an einigen Stellen hinter den Erwartungen an eine perfekte haptische Simulation zurück. Besonders ambivalent zeigt sich das Ergebnis des Experiments zur Unterscheidbarkeit. Zwar ergab sich, daß die Probanden deutlich zwischen den leichten grob/fein Differenzen unterscheiden konnten, die eindeutige Trennung zwischen den in ihrer Form ähnlichen Grundelementen gelang jedoch nicht.

Mitverantwortlich für die bei den Experimenten ermittelte und beobachtete Unsicherheit rührt sicherlich wesentlich aus der Tatsache, daß sämtliche Probanden ungeübt waren, sich ausschließlich auf den Tastsinn bei der Wahrnehmung zu verlassen. Für nicht-blinde Menschen ist solch eine Wahrnehmungsaufgabe sehr ungewöhnlich. Die beobachteten Unsicherheiten traten gerade dann auf, wenn die haptische Simulation ohne visuelles Feedback gegeben wurde.

Der Gesichtssinn ist für den nicht-ingeschränkten Menschen der wichtigste Sinneskanal. Bei der Untersuchung von Objekten mit der Hand werden Informationen durch Gesichtssinn und Tastsinn gemeinsam aufgenommen. Üblicherweise dominiert hierbei die visuelle Wahrnehmung über die haptische [28]. Erst wenn die gelieferte visuelle Information zu unsicher ist oder wenn das haptische Signal in einem deutlichen Kontrast zum visuellen steht, wird für die Wahrnehmung der Tastsinn in der gemeinsamen Wahrnehmung stärker berücksichtigt [29]. Der haptische Kanal scheint somit eher zur Bestätigung der Wahrnehmung zu dienen. Ist das simulierte haptische Signal in seinem Eindruck der visuellen Darstellung weitgehend ähnlich, so wird es leicht als gültig erkannt.

Die durch das haptische Gerät PHANToM bedingte Einschränkung auf nur einen Finger bei der Wahrnehmungsaufgabe ist ein weiterer Aspekt für die beschriebene Unsicherheit. In [50] zeigte sich bei Experimenten zur Formerkennung mittels PHANToM ebenfalls eine Unsicherheit der Probanden bei der Erkennung von virtuellen gekrümmten Flächen. Die bessere Erkennungsleistung von physischen Flächen ist in [50] dadurch erklärt, daß mehrere Kontaktpunkte beim Fühlen, also die Verwendung von mehr als einem Finger, von Bedeutung sind.

Festzustellen war auch, daß die mangelnde Trefferquote beim Experiment zur Unterscheidbarkeit durch eine einmalige Fehlentscheidung verstärkt wurde.

Eine zu Beginn der Blindversuche des Ertastens vorgenommene Zuordnung zu den Grundelementen wurde häufig beibehalten, wenn auch die initiale Zuordnung falsch war. Es scheint daher Gedächtnisleistung bei der Zuordnung der haptischen Grundelemente von Bedeutung zu sein. Zwar wurde nicht die richtige Form erkannt, der einmal eingeordnete haptische Eindruck wurde aber „gemerkt“ und im Verlauf des Experiments gleichbleibend falsch zugeordnet.

In [44] haben die Autoren gezeigt, daß kurzzeitige Übung und Gewöhnung sehr hilfreich bei der Durchführung von haptischen Experimenten mit dem haptischen Gerät PHANToM ist. Die Erkennungsleistungen zu einfachen geometrischen Objekten war deutlich besser bei Probanden, die die Gelegenheit hatten, sich mit der Simulation vor der Durchführung der Experimente vertraut zu machen. Aus diesem Grund war bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen jeweils eine Eingewöhnung vorgesehen. Für das Experiment zur Unterscheidbarkeit läßt sich jedoch offensichtlich nicht feststellen, daß diese Eingewöhnungsphase die Unsicherheit nach Wegfall des visuellen Feedbacks ausgeschlossen hat. Denkbar ist, solch eine Phase der Erprobung zu verlängern. Hierbei ist dann aber zu bedenken, daß die haptische Erkennungsleistung möglichst nicht durch die reine Gedächtnisleistung verfremdet wird.

Die Akzeptanz der präsentierten haptischen Simulation erwies sich bei der Durchführung der Experimente zur qualitativen Einordnung von computerhaptischen Kunststoff- und Textiloberflächen durchweg als hoch. Anders als im ersten Experiment zur Unterscheidbarkeit war keine Unsicherheit der Probanden zu beobachten, eher sogar interessierte Neugier und Erstaunen, wie die gezeigten Oberflächen den gefühlten entsprachen. Der Rückhalt im visuellen Kanal hat sich hierbei positiv ausgewirkt. Der gefühlte Eindruck korrespondierte weitgehend mit dem gesehenen Bild, so daß der Gesamteindruck als akzeptiert bewertet werden konnte.

Bei den drei unterschiedlichen Proben der Kunststoffoberflächen fällt auf, daß die Probe plastic2 auffallend schlechter beurteilt wurde als die anderen beiden Proben. Aus der Anschauung heraus unterscheidet sich die Oberfläche plastic2 von den anderen beiden Proben durch die unterschiedliche Dichte einzelner Strukturelemente. Diese sind zwar symmetrisch angeordnet vorhanden, aber nicht homogen über die Fläche verteilt. Es gelang für diese Probe nicht, ihren visuellen Charakter durch Analyse und Simulation zu transportieren. Visueller und haptischer Eindruck differierten zu stark, als daß das Simulationsergebnis von den Probanden als akzeptabel bewertet werden konnte. Lediglich der dritte Durchgang mit der vierfachen Skalierung der haptischen Probe zeigt eine leicht positivere Bewertung der simulierten Haptik. Offenbar wurden die Unterschiede in der Dichte der Anordnung einzelner Strukturelemente erst erkannt, nachdem der „haptische Kontrast“ erhöht wurde. Es kann

sich hierbei um eine interessante Fragestellung handeln, inwieweit Dichte-, bzw. Frequenzänderungen über eine Strecke, bzw. Fläche haptisch wahrgenommen werden. Methodisch ist darüberhinaus angezeigt, für die Erzeugung der haptischen Signale einen ausreichenden Kontrast sicherzustellen.

Das Ergebnis des Experiments zur Qualität der haptischen Wahrnehmung der Textiloberflächen ist im Vergleich zu den Kunststoffoberflächen durch eine etwas geringere Akzeptanz gekennzeichnet. Dennoch sind auch die präsentierten Proben für textile Oberflächen mehrheitlich als „passend“ simuliert bewertet worden. Besonders markant an den Resultaten ist, daß sämtliche Proben mit textilem Bildinhalt am qualitativ schlechtesten beurteilt wurden, wenn die Skalierung am größten war, d. h. im dritten Durchgang. Hier bestätigt sich der Effekt der Fühlerwartung auf etwas Weiches, Welliges, wenn der visuelle Reiz den Kontext „Textil“ vorgibt.

Bei den Vorversuchen zum Experiment Textiloberflächen wurde deutlich, daß deren haptische Darstellung auf der gleichen Fläche wie die der Kunststoffoberflächen als zu hart generiert wurde. Aus diesem Grund wurde die Trägerfläche für die textilen Proben im Fühleindruck als elastisch simuliert. Daß eine größere Elastizität bewußt wahrgenommen wurde, wurde nur von einem Probanden formuliert, eine zu hohe Festigkeit wurde ebenfalls nur einmal bemängelt. Zur angemessenen Simulation von textilen Oberflächen ist es wünschenswert, die Eigenschaften der Trägermaterialien in hohem Maß mitzuberücksichtigen. Im realen Kontext finden sich Textilien häufig nicht auf festen Unterlagen. Ihre Verwendung als Bezug oder Bespannung bedeutet meist eine sehr elastische Unterlage, die die haptische Wirkung mitbestimmt und dabei auch die elastischen Eigenschaften der Textilien mit zur Wirkung bringt. Schließlich sind haptische Eigenschaften von Textilien durch ihre Webart und ihr Material der einzelnen Fäden beeinflusst [23]. Der in dieser Arbeit umgesetzte Ansatz kann daher nur sehr eingeschränkt beanspruchen, Textilien in ihrer Gesamtheit haptisch verfügbar zu machen. Ein präzises Simulationsmodell benötigt erheblich mehr an Eingangsinformation, als daß diese durch die präsentierte Symmetrieanalyse ermittelt werden könnte.

Insgesamt belegen die Ergebnisse der durchgeführten Experimente die Praktikabilität der Gewinnung von haptischen Informationen mit geometrischen Methoden aus vorliegender computergraphischer Textur. Wünschenswert ist jedoch die verfeinerte haptische Modellbildung zur haptischen Synthese. Die Elastizität von Geweben war ein Beispiel für physikalische Eigenschaften, die nicht direkt aus der visuellen Repräsentation einer Oberfläche gewonnen werden können. Ein visueller Eindruck kann darüberhinaus eine Fühlerwartung erzeugen, die das reale Fühlen dann nicht bestätigt. Hierfür ist eine immer vorhandene Subjektivität menschlicher Wahrnehmung verantwortlich, die sich jedoch durch Erfahrung relativieren kann. Ein gutes Beispiel für die-

sen Sachverhalt ist das Bild einer Schlangenhaut<sup>4</sup>. In der Anschauung ist der gewonnene Eindruck, daß die Schlangenhaut feucht und strukturiert ist. Häufig würden entsprechende Aversionen der Schlangenhaut auch noch das Attribut „kalt“ zusprechen. Diese Fühlerwartungen bestätigen sich bei aktiven Fühlen aber nicht: Der reale haptische Eindruck ist „trocken“, „warm“ und „glatt“. Sollen solche Zusammenhänge allein aus dem Bild einer Oberfläche gewonnen werden, wäre der Bildinhalt semantisch zu interpretieren und geeignet auszuwerten.

Im Gegensatz zur visuellen Simulation ist die haptische Simulation für die Anwender neu und weitgehend unbekannt. Visuelle Simulation ist vielfach in bekannte Wahrnehmungsmuster integriert und eingeübt. Das Betrachten einer visuellen Simulation ist darüberhinaus nicht in hohem Maß durch das bildgebende Gerät beeinflusst. Für den Anwender ist es nicht relevant verschieden, wenn er ein reales Objekt betrachtet oder wenn er ein adäquates simuliertes Objekt auf einem entsprechenden Display ansieht. Haptische Simulation von Oberflächen bedeutet immer den direkten physischen Kontakt durch Berührung eines haptischen Displays. Solch eine Situation muß daher zunächst unrealistisch erscheinen. Die haptische Simulation kann bei der Aufgabe des Fühlens von Oberflächen auch nicht hinter einem realen Werkzeug „versteckt“ werden, wie beispielsweise bei einer virtuellen Fahrsimulation. Werkzeuge beim Erfühlen von Oberflächen sind nun einmal die Finger selbst.

Sollten sich haptische Displays für eine breitere Anwenderbasis durchsetzen, so kann man u. U. eine Adaption von Fühlgewohnheiten beobachten. Wenn sich ein künstlicher Fühleindruck als dem realen adäquat erweist, könnten sich bewußte oder unbewußte Widerstände gegen ungewohnte Technik ebenfalls vermindern. Vergleichbar können solche Phänomene mit Entwicklungen beim CAD-Einsatz sein. Zu Beginn des CAD-Einsatzes stellte diese neue Art des Konstruierens einen Bruch mit bekannten und gewohnten Arbeitstechniken am Reißbrett dar, Skepsis und Widerstände waren entsprechend hoch. Heutzutage ist ein Konstruktionsprozeß ohne CAD-Unterstützung undenkbar. Durch den erweiterten Nutzen neuer Verfahren haben sich die Arbeitstechniken verändert.

## 9.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt und theoretisch eingebettet, wodurch eine semantische Brücke zwischen computergraphischer und haptischer Textur gespannt wurde. Darüberhinaus wurde skizziert, wie

---

<sup>4</sup>Genauer: Das Bild der Haut einer lebenden! Schlange.

diese Technik in das Gesamtkonzept für ein System für Virtual Reality Computer Aided Styling eingebunden werden kann.

An einigen Stellen existiert jedoch Bedarf an weiterführender Forschung. So sollte die Symmetriedetektion erweitert werden, um die Berücksichtigung von Rotation, Spiegelung und Gleitspiegelung.

Weiterhin ist es angezeigt, die Gewinnung der Grauwertbilder geeignet zu kalibrieren. Für derartige Kalibrierungen ist es wünschenswert, eine große Zahl an Eingabe-Oberflächen zu untersuchen. Die für die dokumentierten Experimente verwendeten Oberflächen wurden zwar als repräsentativ angesehen und daher ausgewählt, vollständige Repräsentativität ist jedoch erst durch eine genügend große Datenmenge zu erreichen.

Das untersuchte Anwendungsszenario hatte die Ergänzung der visuellen Simulation um einen haptischen Kanal zu Ziel gehabt. Dies war eine Aufgabenstellung innerhalb der Virtual Reality. Denkbar sind darüberhinaus auch entsprechende Ergänzungen bei Augmented Reality (AR) Themen. AR als sehr junges Forschungsthema der Informatik führt reale und virtuelle Objekte zusammen und untersucht das gleichzeitige Interagieren mit realen und virtuellen Objekten. Für den Anwendungsfall CAS wäre in diesem Zusammenhang interessant, ein physisches Fräsmodell eines Designentwurfs um die virtuelle haptische Oberflächenstruktur zu ergänzen.

Weiterhin liegt es nahe, bei der Umsetzung von VR/AR Szenarien möglichst viele Sinneskanäle gleichzeitig anzusprechen. Die in dieser Arbeit in den Experimenten nachgestellte Aufgabe des Fühlens von Oberflächen betrachtete ausschließlich den visuellen und den haptischen Wahrnehmungskanal. Die einfache Tätigkeit des Reibens eines Fingers auf einer Fläche erzeugt häufig nicht nur taktile Empfindungen. Vielmehr entstehen dabei in der Realität ebenfalls Geräusche, die den Gesamteindruck vervollständigen. Durch eine integrierte Synthetisierung von Video, Haptik und Audio käme die Simulation, bei Gelingen, der Realität sehr nahe.

Die größten Einschränkungen erfährt die Simulation zur Zeit jedoch noch durch die existierenden haptischen Displays. Es bestehen Mängel bezüglich der Mobilität, Qualität der vermittelbaren Eindrücke sowie der Sicherheit in der Verwendung. Auch kann man leicht einsehen, daß die Konstruktion eines haptischen Displays, das sämtliche Aspekte des haptischen Wahrnehmungsapparats des Menschen berücksichtigt, höchst komplex sein muß. Solch ein Gerät müßte Kräfte auf die Gelenke auswirken können, mechanisch so präzise sein, daß durch die Mechanik kein „Spiel“ spürbar ist (Festigkeit der simulierten Körper) und es müßte formbildend die Haut deformieren können. Für Greifeindrücke muß dies auch noch für alle beteiligten Finger gelten.

Trotz dieser Einschränkungen konnte durch diese Arbeit gezeigt werden,

daß schon mit einem einfachen haptischen Gerät eine relevante Erweiterung der bekannten Mensch–Maschine–Interaktion gelingt. Durch das entwickelte Konzept werden graphische und haptische Texturen zusammengeführt, wodurch deren gemeinsame Implementation vereinfacht wird. Die zu erwartende Weiterentwicklung der Geräte zur haptischen Darstellung in Kombination mit der Verfeinerung der theoretischen Modelle zur Gewinnung der haptischen Eingangssignale, wird die haptische Simulation weiten Anwendungsfeldern zugänglich machen.

# Anhang A

## Stochastische Grundbegriffe

Die in Abschnitt 6.3 verwendeten stochastischen Grundbegriffe sind an dieser Stelle der Vollständigkeit halber definiert:

**Definition A.1 ( $\sigma$ -Algebra)**

Ein Mengensystem  $\mathcal{F} \subseteq P(\Omega)$  mit  $\Omega \neq \emptyset$  heißt  $\sigma$ -**Algebra** über  $\Omega$ , falls gilt:

- (i)  $\Omega \in \mathcal{F}$
- (ii)  $A \in \mathcal{F} \Rightarrow A^c (:= \Omega \setminus A) \in \mathcal{F}$
- (iii)  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F} \Rightarrow \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{F}$

**Definition A.2 (Wahrscheinlichkeitsraum, Wahrscheinlichkeitsmaß)**

Ein **Wahrscheinlichkeitsraum**  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  besteht aus einer nichtleeren Menge  $\Omega$ , dem Ergebnisraum, einer  $\sigma$ -Algebra  $\mathcal{F}$  über  $\Omega$  und einer Abbildung  $P : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}$  mit den folgenden Eigenschaften:

- (i)  $P(\Omega) = 1$
- (ii)  $\bigwedge A \in \mathcal{F} : P(A) \geq 0$
- (iii)  $P(\sum_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i)$  für alle paarw. disjunkten  $A_i \in \mathcal{F}$

$P$  heißt **Wahrscheinlichkeitsmaß**.

**Definition A.3 (Zufallsvariable)**

Sei  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  ein Wahrscheinlichkeitsraum. Eine Funktion  $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  heißt **Zufallsvariable**, falls für jedes  $a \in \mathbb{R}$  gilt:  $X^{-1}((-\infty, a]) = \{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq a\} \in \mathcal{F}$ .

**Definition A.4 (Varianz, Kovarianz, Korrelation)**

Seien  $X, Y$  Zufallsvariablen und bezeichne  $E(X)$  bzw.  $E(Y)$  den Erwartungswert von  $X$  bzw.  $Y$ . Dann heißt

- (i)  $\text{var}(X) := E((X - EX)^2)$  die **Varianz** von  $X$ .
- (ii)  $\text{cov}(X, Y) := E((X - EX)(Y - EY))$   
die **Kovarianz** von  $X$  und  $Y$ .  
Ist  $\text{cov}(X, Y) = 0$ , so heißen  $X, Y$  **stochastisch unabhängig**.
- (iii)  $\text{cor}(X, Y) := \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}}$   
die **Korrelation** von  $X, Y$ ,  
falls  $\text{var}(X), \text{var}(Y) \geq 0$  gilt.

**Definition A.5 (Normalverteilung)**

Eine Zufallsvariable  $X$  besitzt eine **Normalverteilung**  $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$  mit dem Erwartungswert  $\mu$  und der Varianz  $\sigma^2$ , falls gilt:

$$P(X \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(u - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) du$$

**Definition A.6 (Stetige Verteilungsfunktion)**

$P(X \leq x) = F(x)$  heißt **stetige Verteilungsfunktion**.

**Definition A.7 (Stochastischer Prozeß)**

Seien  $I \subseteq \mathbb{R}$ ,  $t \in I$  und  $X(t)$  eine von dem Parameter  $t$  abhängige Zufallsvariable.

Dann heißt  $\{X(t) : t \in I\}$  ein **stochastischer Prozeß**. Der Parameter  $t$  wird im allgemeinen mit der Zeit identifiziert.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	CAD- und VR-Darstellung . . . . .	4
1.2	Oberflächenstruktur in einem Fahrzeuginnenraum . . . . .	5
2.1	Klassifizierung VR-Systeme . . . . .	10
2.2	Die Vision von DMU (nach [19]) . . . . .	15
3.1	Allgemeine Prozeßkette: CAD Einsatz . . . . .	18
3.2	VR-CAS Komponenten . . . . .	22
4.1	Beispiele einiger Objekttexturen . . . . .	25
4.2	Regelmäßige Oberflächentexturen . . . . .	26
4.3	Statistische Oberflächentexturen . . . . .	26
4.4	Environmenttextur als Bitmap und appliziert . . . . .	27
4.5	Texturabbildungen . . . . .	29
4.6	Parameterlinien einer Fläche . . . . .	31
4.7	Planare Texturprojektion . . . . .	33
4.8	Environment Mapping (nach Watt [88]) . . . . .	34
4.9	Prinzip des Bump-Mappings . . . . .	35
4.10	Planare Mehrfachprojektion . . . . .	36
4.11	Beispiele für planare Mehrfachprojektion . . . . .	37
4.12	Texturkoordinaten einer Triangulierung . . . . .	39
4.13	Lokales Koordinatensystem des Dreiecks T . . . . .	43
4.14	Gemeinsame Basis zweier Dreiecke (nach [43]) . . . . .	44
5.1	Abbildungsverhältnisse in der Sinnesphysiologie (nach [76]) . . . . .	50

5.2	Weber Quotient . . . . .	52
5.3	Mechanosensoren der unbehaarten Haut (nach [76]) . . . . .	55
5.4	Reiz–Antwort–Verhalten . . . . .	56
5.5	Haptische– und graphische Renderloop . . . . .	62
5.6	Schematische Darstellung eines haptischen Subsystems . . . . .	63
5.7	Abgewandelte Form des Gesetzes der Reibungskraft (nach [97]) . . . . .	65
5.8	Syntheseweg vom Material zum haptischen Signal . . . . .	66
5.9	Textur–Taxonomie nach Rao . . . . .	67
6.1	Koch–Kurve . . . . .	70
6.2	Doppeltlogarithmisches Diagramm . . . . .	71
6.3	Unregelmäßige Struktur und Gittermaschen . . . . .	75
6.4	Grauwert–Bilder gegebener fraktaler Dimension . . . . .	78
6.5	Drei Auflösungsstufen der Dimension $D = 2,7$ . . . . .	78
6.6	Graphen Brownscher Bewegungen . . . . .	81
6.7	Brownsche Fläche mit Index $H=0.1$ . . . . .	82
6.8	Brownsche Fläche mit Index $H=0.5$ . . . . .	83
6.9	Brownsche Fläche mit Index $H=0.9$ . . . . .	83
6.10	Brownsche Flächen, orthogonale Kraft . . . . .	89
6.11	Brownsche Graphen, orthogonale Kraft . . . . .	90
6.12	Brownsche Flächen, laterale Kraft . . . . .	90
6.13	Brownsche Graphen, laterale Kraft . . . . .	91
7.1	Isometrien der Euklidischen Ebene . . . . .	96
7.2	Kristallographische Restriktion . . . . .	97
7.3	Primitiv im planaren Gitter . . . . .	98
7.4	Grauwertbild und SFM bezüglich Verzerrung . . . . .	101
7.5	Grauwertbild und SFM mit Minima . . . . .	102
7.6	$\text{proj}(\mathcal{P}, \mathbf{q})$ auf $g$ (nach [90]) . . . . .	103
7.7	Phasen der Symmetriedetektion . . . . .	105
8.1	Grauwertbild und Gittermodell . . . . .	109

8.2	Lambert–Reflektor . . . . .	109
8.3	Versuchskonfiguration . . . . .	114
8.4	Synthetische Texturen zur Unterscheidbarkeit . . . . .	115
8.5	3D–Gitterdarstellung spheres6 und ovals6 . . . . .	115
8.6	Unterscheidbarkeit Auflösung bei 80 × 80 Millimeter . . . . .	119
8.7	Unterscheidbarkeit spheres und quads bei 80 × 80 Millimeter . . . . .	119
8.8	Unterscheidbarkeit ovals bei 80 × 80 Millimeter . . . . .	119
8.9	Unterscheidbarkeit Auflösung bei 40 × 40 Millimeter . . . . .	120
8.10	Unterscheidbarkeit spheres und quads bei 40 × 40 Millimeter . . . . .	120
8.11	Unterscheidbarkeit ovals bei 40 × 40 Millimeter . . . . .	120
8.12	Analysekette Kunststoffoberflächen . . . . .	122
8.13	3D–Darstellung Kunststoffoberflächen . . . . .	122
8.14	Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic1 . . . . .	124
8.15	Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic2 . . . . .	125
8.16	Bewertungen zu Kunststoffoberfläche plastic3 . . . . .	126
8.17	Analysekette Textiloberflächen . . . . .	127
8.18	3D–Darstellung Textiloberflächen . . . . .	127
8.19	Bewertungen zu Textiloberfläche textil1 . . . . .	128
8.20	Bewertungen zu Textiloberfläche textil2 . . . . .	129
8.21	Bewertungen zu Textiloberfläche textil3 . . . . .	129



# Literaturverzeichnis

- [1] Agus, Marco ; Giachetti, Andrea ; Gobetti, Enrico ; Zanetti, Gianluigi ; Zorcolo, Antonio: Real-time haptic and visual simulation of bone dissection. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002, S. 209–216
- [2] Asamura, Naoya ; Yokoyama, Nozomu ; Shinoda, Hiroyuki: Selectively Stimulating Skin Receptors for Tactile Display. In: IEEE Computer Graphics and Applications 18 (1998), Nr. 6, S. 32–37
- [3] Astheimer, Peter ; Dai, Fan ; Felger, Wolfgang ; Göbel, Martin ; Haase, Helmut ; Müller, Stefan ; Ziegler, Rolf: VirtualDesign II – an Advanced VR System for Industrial Applications. In: Virtual Reality World '95, 1995, S. 337–363
- [4] Astheimer, Peter ; Rosenblum, Lawrence: A Business View of Virtual Reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications 19 (1999), Nr. 6, S. 28–29
- [5] Bangle, Christopher ; Kehler, Timm ; Mischok, Peter: About catalytic design. In: Proceedings of the International Conference Florence ATA 1997, 1997, S. 11–24
- [6] Basdogan, Cagatay ; Ho, Chih-Hao ; Srinivasan, Mandayam: A ray-based haptic rendering technique for displaying shape and texture of 3d objects in virtual environments. In: Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, 1997, S. 77–84
- [7] Basdogan, Cagatay ; Srinivasan, Mandayam A.: Haptic Rendering in Virtual Environments. In: Stanney, Kay (Hrsg.): Handbook of Virtual Environments. London : Lawrence Earlbaum, 2002, S. 117–134
- [8] Bauer, Wilhelm ; Breining, Ralf ; Rößler, Andreas: Co-operative, Virtual Planning and Design. In: Virtual Reality World '95, 1995, S. 213–223
- [9] Bier, Eric: Two-part texture mapping. In: IEEE Computer Graphics and Applications 6 (1986), Nr. 9, S. 40–53

- [10] Boehm, Wolfgang ; Prautzsch, Hartmut: Geometric Concepts for Geometric Design. 1. Auflage. Wellesley : A. K. Peters, 1994
- [11] Boulanger, Olivier: Virtual Models at the Industrial Design Department of Renault. In: Proceedings of the International Conference Florence ATA 1997, 1997, S. 37–44
- [12] Bronstein, Ilja N. ; Semendjajew, Konstantin A.: Taschenbuch der Mathematik. 23. Auflage. Frankfurt : Harri Deutsch, 1987
- [13] Buck, Matthias ; Grebner, Klaus ; Katterfeldt, Harald: Modeling and Interaction Tools for Virtual Environments. In: Virtual Reality World '96, 1996, S. 1–11
- [14] Burdea, Grigore C.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality. 1. Auflage. New York : John Wiley and Sons, 1996
- [15] Buxton, William ; Fitzmaurice, George ; Balakrishnan, Ravin ; Kurtenschach, Gordon: Large Displays in Automotive Design. In: IEEE Computer Graphics and Applications 20 (2000), Nr. 4, S. 68–75
- [16] Carmo, Manfredo do: Differentialgeometrie von Kurven und Flächen. 3. Auflage. Braunschweig : Vieweg, 1993
- [17] Dai, Fan (Hrsg.): Virtual Reality for Industrial Applications. 1. Auflage. Berlin : Springer, 1998
- [18] Dai, Fan ; Felger, Wolfgang ; Frühauf, Thomas ; Göbel, Martin ; Reiners, Dirk ; Zachmann, Gabriel: Virtual Prototyping Examples for Automotive Industries. In: Virtual Reality World '96, 1996, S. 1–11
- [19] Daimler–Benz AG, AIT project office: Project report of the pilot phase / AIT–Consortium. 1995. – Forschungsbericht
- [20] Davis, Larry S.: Computing the Spatial Structure of Cellular Textures. In: IEEE Computer Graphics and Image Processing 11 (1979), S. 111–122
- [21] Decker, Reinhold ; Bödecker, Marc ; Franke, Kai: Realität des Virtuellen. In: IX Magazin für professionelle Informationstechnik (2002), Nr. 3, S. 90–95
- [22] Dekker, Kay: A future interface for computer–aided styling. In: Design Studies 13 (1992), Nr. 1, S. 42–53

- [23] Dillon, Patricia ; Moody, Wendy ; Bartlett, Rebecca ; Scully, Patricia ; Morgan, Roger ; James, Christopher: Sensing the Fabric: To Simulate Sensation through Sensory Evaluation and in Response to Standard Acceptable Properties of Specific Materials when Viewed as a Digital Image. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 205–217
- [24] Durlach, Nathaniel (Hrsg.) ; Mavor, Anne (Hrsg.): Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges. 1. Auflage. Washington : National Academy Press, 1995
- [25] Eberly, David: 3D Game Engine Design. 1. Auflage. San Francisco : Morgan Kaufmann, 2001
- [26] Ellis, Stephen R.: Human Engineering in Virtual Environments. In: Virtual Reality World '95, 1995, S. 295–301
- [27] Engesser, Hermann (Hrsg.): Duden Informatik. 2. Auflage. Mannheim : F. A. Brockhaus, 1993
- [28] Ernst, Marc O. ; Banks, Martin S.: Humans integrate visual and haptic information in a statistical optimal fashion. In: Nature 415 (2002), S. 429–433
- [29] Ernst, Marc O. ; Banks, Martin S. ; Bühlhoff, Heinrich H.: Touch can change visual slant perception. In: Nature Neuroscience 3 (2000), Nr. 1, S. 69–73
- [30] Falconer, Kenneth J.: Fraktale Geometrie. 1. Auflage. Heidelberg : Spektrum, 1993
- [31] Foley, James ; Dam, Andries van ; Feiner, Steven ; Hughes, John: Computer Graphics – Principles and Practice. 2. Auflage. New York : Addison-Wesley, 1990
- [32] Foskey, Mark ; Otaduy, Miguel A. ; Lin, Ming C.: ArtNova: Touch-Enabled 3D Model Design. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002, S. 119–126
- [33] Fritz, Jason P.: Haptic rendering techniques for scientific visualization, University of Delaware, Diplomarbeit, 1996
- [34] Fritz, Jason P. ; Barner, Kenneth E.: Stochastic models for haptic texture. In: Proceedings of the International Symposium of Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, 1996

- [35] Giusto, Nevio di ; Robinson, Michael: Computer aided styling at Stile/Design Fiat. In: Proceedings of the 24th FISTA Congress: „Engineering for the Customer“, 1992, S. 227–233
- [36] Grebner, Klaus ; May, Franz: Applications of Virtual Reality Techniques in the Industry – Selected Examples. In: Virtual Reality World 95, 1995, S. 451–468
- [37] Green, Donald F. ; Salisbury, Kenneth: Texture sensing and simulation using the phantom: Towards remote sensing of soil properties. In: Proceedings of the second Phantom Users Group Workshop, 1997, S. 77–84
- [38] Harders, Matthias ; Szekely, Gabor: Improving Medical Segmentation with Haptic Interaction. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002, S. 243–250
- [39] Hausdorff, Felix: Dimension und äußeres Maß. In: Math. Ann. 79 (1919), S. 157–179
- [40] Hawkins, Kevin ; Astle, Dave: OpenGL Game Programming. 1. Auflage. Roseville : Prima Tech, 2001
- [41] Heckbert, Paul S.: Survey of Texture Mapping. In: Proceedings of Graphics Interface '86, 1986, S. 56–67
- [42] Herbst, Iris: Generierung eines haptischen Signals für rauhe Oberflächen mit Hilfe fraktaler Dimensionen, Universität Hannover, Diplomarbeit, 1999
- [43] Hunold, Jürgen: Automatische Texturierung von Freiformflächen, Universität Hannover, Diplomarbeit, 1999
- [44] Jansson, Gunnar ; Ivas, Anna: Can the Efficiency of a Haptic Display Be Increased by Short–Time Practice in Exploration? In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human–Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 88–97
- [45] Jähne, Bernd: Digitale Bildverarbeitung. 4. Auflage. Berlin : Springer, 1997
- [46] Johnson, David ; Thompson, Thomas ; Kaplan, Matthew ; Nelson, Donald ; Cohen, Elaine: Painting Textures with a Haptic Interface. In: IEEE Virtual Reality Conference, 1999, S. 282–285
- [47] Kalawsky, Roy S.: The Science of Virtual Reality and Virtual Environments. 1. Auflage. Reading : Addison–Wesley, 1994

- [48] Kilpatrick, Jerome: The use of a kinematic supplement in an interactive graphics system, University of North Carolina, Diss., 1976
- [49] Kim, Seahak ; Hasegawa, Shoichi ; Koike, Yasuharu ; Sato, Makoto: Tension Based 7-DOF Force Feedback Device: SPIDAR-G. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002, S. 283-284
- [50] Kirkpatrick, Arthur E. ; Douglas, Sarah A.: A Shape Recognition Benchmark for Evaluating Usability of a Haptic Environment. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 151-156
- [51] Krämer, Ute: Methoden und Verfahren zur Vorlagengewinnung und Applikation von computergraphischen Texturen für Virtual Reality Umgebungen, Fachhochschule Köln, Diplomarbeit, 1999
- [52] Lévy, Bruno ; Mallet, Jean-Laurent: Non-Distorted Texture Mapping For Sheared Triangulated Meshes. In: Computer Graphics SIGGRAPH '98, 1998, S. 343-352
- [53] Loomis, Jack M. ; Lederman, Susan J.: Tactual perception. In: Handbook of Perception and Human Performance. 1. Auflage. New York : John Wiley and Sons, 1986, S. 1-41
- [54] Maillot, Jérôme ; Yahia, Hussein ; Verroust, Anne: Interactive Texture Mapping. In: Computer Graphics SIGGRAPH '93, 1993, S. 27-34
- [55] Mandelbrot, Benoit: Fractals: form, chance and dimension. 1. Auflage. San Francisco : W. H. Freeman and Co., 1977
- [56] Mandelbrot, Benoit: The Fractal Geometry of Nature. 1. Auflage. San Francisco : W. H. Freeman and Co., 1982
- [57] Marsden, Jerrold E.: Mathematical Foundations of Elasticity. 1. Auflage. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1983
- [58] Martin, George E.: Transformation Geometry. 1. Auflage. New York : Springer, 1982
- [59] Massie, Thomas H.: Initial Haptic Explorations with the Phantom: Virtual Touch Through Point Interaction, Massachusetts Institute of Technology, Diplomarbeit, 1996
- [60] McGee, Marilyn R. ; Gray, Phil ; Brewster, Stephen: The Effective Combination of Haptic and Auditory Textural Information. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 118-126

- [61] Millman, Paul A.: Haptic Perception of Localized Features, Northwestern University Illinois, Diss., 1995
- [62] Minsky, Margaret: Computational Haptics: The Sandpaper System for Synthesizing Texture for a Force–Feedback Display, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1995
- [63] Minsky, Margaret ; Ouh-Young, Ming ; Steele, Oliver ; Brooks, Frederick ; Behensky, Max: Feeling and seeing: Issues in force displays. In: ACM Computer Graphics 24 (1990), Nr. 2, S. 235–243
- [64] Möller, Tomas ; Haines, Eric: Real–Time Rendering. 1. Auflage. Natick : A. K. Peters, 1999
- [65] Nara, Takaaki ; Takasaki, Masaya ; Maeda, Taro ; Higuchi, Toshiro ; Ando, Shigeru ; Tachi, Susumu: Surface Acoustic Wave Tactile Display. In: IEEE Computer Graphics and Applications 21 (2001), Nr. 6, S. 56–63
- [66] Peinecke, Niklas: Symmetriefindung in periodischen Texturen / Universität Hannover. 1999. – Forschungsbericht. Studienarbeit
- [67] Peitgen, Heinz-Otto ; Jürgens, Hartmut ; Saupe, Dietmar: Bausteine des Chaos – Fraktale. 1. Auflage. Berlin : Klett–Cotta/Springer, 1992
- [68] Penn, Paul ; Petrie, Helen ; Colwell, Chetz ; Kornbrot, Diana ; Furner, Stephen ; Hardwick, Andrew: The Haptic Perception of Texture in Virtual Environments: An Investigation with Two Devices. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human–Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 25–30
- [69] Pentland, Alex P.: Fractal–based Description of Surfaces. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1983, S. 279–298
- [70] Purschke, Frank ; Rabätje, Ralf ; Schulze, Malte ; Starke, Andreas ; Symietz, Michael ; Zimmermann, Peter: Virtual Reality – New Methods of Improving and Accelerating Vehicle Development. In: Proceedings of the International Conference Florence ATA 1997, 1997, S. 461–471
- [71] Purschke, Frank ; Schulze, Malte ; Zimmermann, Peter: Virtual Reality – New methods for improving and accelerating the development process in vehicle styling and design. In: Computer Graphics International '98, 1998, S. 789–797
- [72] Raab, Frederick H. ; Blood, Ernest B. ; Steiner, Terry O. ; Jones, Herbert R.: Magnetic position and orientation tracking system. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems AES–15 (1979), Nr. 5, S. 709–718

- [73] Radetzky, Arne ; Nürnberger, Andreas ; Pretschner, Dietrich P.: The Simulation of Elastic Tissues in Virtual Medicine using Neuro-Fuzzy Systems. In: Medical Imaging Conference, 1998, S. 399–409
- [74] Rao, Ravishankar: A Taxonomy for Texture Description and Identification. 1. Auflage. Berlin : Springer, 1990
- [75] Reuter, Martin: Fraktaldimension von Grauwertbildern / Universität Hannover. 1999. – Forschungsbericht. Studienarbeit
- [76] Schmidt, Robert F. (Hrsg.) ; Thews, Gerhard (Hrsg.): Physiologie des Menschen. 27. Auflage. Berlin : Springer, 1997
- [77] Schmitz, Claudius A. (Hrsg.): Managementfaktor Design. 1. Auflage. München : C. H. Beck, 1994
- [78] Siira, Juhani ; Pai, Dires K.: Haptic texturing — a stochastic approach. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, S. 557–562
- [79] Stone, Robert J.: Haptic Feedback: A Brief History from Telepresence to Virtual Reality. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 1–16
- [80] Stytz, Martin R.: Distributed Virtual Environments. In: IEEE Computer Graphics and Applications 16 (1996), Nr. 3, S. 19–31
- [81] Tovey, Michael: Intuitive and objective processes in automotive design. In: Design Studies 13 (1992), Nr. 1, S. 23–41
- [82] Tovey, Michael: Form creation techniques for automotive CAD. In: Design Studies 15 (1994), Nr. 1, S. 85–114
- [83] Tsai, Ping-Sing ; Shah, Mubarak: Shape From Shading Using Linear Approximation. In: Image and Vision Computing Journal 12 (1994), Nr. 8, S. 487–498
- [84] Vince, John: Virtual Reality Systems. 1. Auflage. Cambridge : Addison-Wesley, 1995
- [85] Voss, Richard: Random fractals: Characterization and measurement. In: Pynn, Roger (Hrsg.) ; Skjeltorp, Arne (Hrsg.): Scaling Phenomena in Disordered Systems. New York : Plenum, 1986, S. 1–12
- [86] Wald, Ingo ; Slusallek, Philipp ; Benthin, Carsten: Interactive Distributed Ray-Tracing of Highly Complex Models. In: Eurographics Workshop on Rendering 2001, 2001, S. 274–285

- [87] Wall, Steven A. ; Harwin, William S.: Interaction of Visual and Haptic Information in Simulated Environments: Texture Perception. In: Brewster, Stephen (Hrsg.) ; Murray-Smith, Roderick (Hrsg.): Haptic Human-Computer Interaction. Berlin : Springer, 2000, S. 108-117
- [88] Watt, Alan: 3D Computer Graphics. 2. Auflage. Harlow : Addison-Wesley, 1993
- [89] West, Aaron M. ; Cutkosky, Mark R.: Detection of Real and Virtual Fine Surface Features with a Haptic Interface and Stylus. In: Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, 1997, S. 159-165
- [90] Wieding, Rene von: Klassifikation von symmetrischen Texturanteilen als Präprozess der Generierung haptischer Signale, Universität Hannover, Diplomarbeit, 1999
- [91] Witkin, Andrew ; Kass, Michael: Reaction-Diffusion Textures. In: Computer Graphics SIGGRAPH '91, 1991, S. 299-308
- [92] Worley, Steven: A Cellular Texture Basis Function. In: Computer Graphics SIGGRAPH '96, 1996, S. 291-294
- [93] Yamada, Toshio ; Tsubouchi, Daisuke ; Ogi, Tetsuro ; Hirose, Michitaka: Desk-sized Immersive Workplace Using Force Feedback Grid Interface. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002, S. 135-142
- [94] Zamperoni, Piero: Methoden der digitalen Bildsignalverarbeitung. 1. Auflage. Braunschweig : Vieweg, 1989
- [95] Zeltzer, David: Autonomy, Interaction and Presence. In: Presence 1 (1992), Nr. 1, S. 127-132
- [96] Zhang, Ruo ; Tsai, Ping-Sing ; Cryer, James E. ; Shah, Mubarak: Analysis of Shape from Shading Techniques. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition '94, 1994, S. 377-384
- [97] Ziegler, Rolf: System zum integrierten Einsatz von haptischen Displays in Virtuellen Umgebungen, Technische Hochschule Darmstadt, Diss., 1998
- [98] Zimmermann, Peter: Virtual Reality bei Volkswagen. In: Performer (1996), Oktober, Nr. 10, S. 18-19