

5 Vorgehen bei der räumlichen Darstellung

In diesem Kapitel werden Verfahren beschrieben, die basierend auf den Beobachtungen und Überlegungen der Kapitel 2 und 3, Grafiken räumlicher Gegenstände erzeugen, die in taktiler Form von Blinden besonders leicht erkannt werden können. Dabei spielt das Ausgabemedium nur eine untergeordnete Rolle. Grundsätzlich können alle Arten von flächigen taktilen Ausgabemedien verwendet werden. Um aber die grafischen Möglichkeiten der Verfahren optimal zu nutzen, sind rasterlose Medien zu bevorzugen, also Schwellpapier oder sogar Tiefzieh-Folie (siehe Abschnitt 2.4.2).

Diese Medien erlauben es, kontinuierliche Zeichnungen darzustellen. Gerasterte Medien, wie die Stiftplatte [SCHWEIKHARDT 85] oder Index-Print-Papier bieten keine Möglichkeiten, Linien (insbesondere gebogene) ohne tastbares Raster darzustellen. Prinzipiell ist jedoch nicht auszuschließen, daß sich auf dem Gebiet der Stift-Matrix-Displays eine ähnliche Entwicklung vollzieht, wie bei den visuellen Displays: Diese waren zu Beginn ihrer Entwicklung extrem grob gerastert (niedrig aufgelöst), so daß kontinuierliche Zeichnungen nicht darstellbar waren. Die zugrunde liegende Technologie hat sich in der Zwischenzeit nicht verändert (orthogonales Raster von Bildpunkten), aber durch die wesentlich höhere Auflösung moderner Anzeigen werden auch gerasterte Liniengrafiken nicht mehr als diskret wahrgenommen, sie sind gemäß Definition (siehe Seite 39) kontinuierlich. Um kontinuierliche haptische Zeichnungen darzustellen, wären auch gröbere Raster als bei visuellen Displays akzeptabel (siehe Abschnitt 2.4). Bisher entwickelte Displays, wie die Stiftplatte, eignen sich allerdings nicht zur Darstellung kontinuierlicher Zeichnungen.

Andererseits bietet gerade die Stiftplatte durch ihre Interaktionsmöglichkeiten, bzw. ihre "Echtzeit-Fähigkeit" Verfahren und Methoden an, die gesondert zu betrachten wären, z.B. die Änderung im Laufe der Zeit. Ähnliches gilt für neuere Geräte wie Phantom [MASSIE & SALISBURY 94] oder Pantobrilie [RAMSTEIN 96]. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.4 und Kapitel 9.

Allen in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren liegen Modelle zugrunde, die in der Sprache VRML [VRML SPEC 96] formal definiert wurden. Prinzipiell könnte aber auch jede andere Form der formalen Beschreibung der geometrischen Eigenschaften und Positionen verwendet werden, z.B. RIB [UPSTILL 90], DXF [BORN 90] oder ähnliche.

Um die spätere Erkundung der Grafik zu unterstützen (siehe Kapitel 6), ist es wichtig, daß schon im Modell Information *über* das Modellerte vorhanden ist. Mindestens sollten die Einzelobjekte Namen oder einen Verweis auf ihren Namen haben. Diese Information steht bei vielen heute verwendeten Modellen zur Verfügung, da sie schon der Modellierende bei seiner Arbeit benötigt. Während früher solche Information beim herkömmlichen visuellen Rendern verworfen wurde, zeigt sich in jüngerer Zeit, daß Informationen über das Dargestellte auch für Sehende nützlich oder gar notwendig sein kann [EMHARDT & STROTHOTTE 92]²¹. Daraus ergibt sich die Forderung an die Modellbeschreibungssprache, daß man Objekte im Modell *benennen* kann. Während das DXF-Format [BORN 90] solche Benennungen nicht unterstützt, bietet das erweiterte RIB-Format [UPSTILL 90, PREININGER 93] die Möglichkeit, Objektbezeichnungen zusammen mit den Geometriedaten zu verwalten. Das VRML-Format bietet diese Möglichkeit ohne jede proprietäre Erweiterung gemäß der Spezifikation an [VRML SPEC 96]. An dieser Stelle sei noch einmal betont, daß die in diesem Kapitel beschriebenen Abbildungsverfahren unabhängig von

²¹ Dies soll *nicht* bedeuten, daß es ausreicht, Blinden zu übermitteln, welches Objekt sich auf der visuellen Grafik an einer bestimmten Stelle befindet. Ein entsprechender Ansatz [KURZE 93] hat dies zwar erreicht, das Erfassen der dargestellten Szene wurde aber so meist nicht ermöglicht.

einer Benennung der abgebildeten Objekte sind. Für das Rendern werden nur die Geometriedaten benötigt, die in jedem 3D-Modellformat vorhanden sind. Die Objektnamen werden erst bei der Erkundung wieder benötigt, müssen dann aber den grafischen Elementen der 2D-Zeichnung zugeordnet werden, die das jeweilige 3D-Objekt darstellen. Die Verfahren, diese Konsistenz sicherstellen, werden in diesem Kapitel behandelt.

5.1 Randbedingungen

Bei den im folgenden darzustellenden Verfahren zur taktilen Darstellung von Grafiken gelten neben den gestalterischen Kriterien einige physiologische, psychologische und ergonomische Randbedingungen.

1. In den Abschnitten 2.3 und 3.3 wurde schon auf die Auflösung des Tastsinns eingegangen. Daraus ergibt sich, daß bei einem *Linienabstand* von weniger als ca. 1 bis 2 mm zwei Linien nicht mehr zuverlässig unterschieden werden können. Mit taktilen Hilfsmitteln, wie z.B. dem Fingernagel oder dem Stift des Digitalisiertabletts lassen sich höhere Auflösungen erreichen, die jedoch die Formwahrnehmung mitunter beeinflussen.

Folgerungen:

- Schmale Objekte, die als Darstellung im wesentlichen aus zwei dicht beieinander liegenden Linien bestehen würden, können und sollen zu einer Linie verschmolzen werden (z.B. Tischbein).
- Objekte, die sich nicht berühren, die aber so nahe beieinander liegen, daß bei ihrer regulären Darstellung ihre Begrenzungslinien dichter als 2 mm lägen, müssen mit größerem Abstand dargestellt werden.

2. Tastbare Muster/*Mikrostrukturen* können feiner als das angegebene Maß sein.

Folgerung:

- Diese Mikrostrukturen können nicht zur Form- bzw. Objektidentifikation dienen sondern nur Eigenschaften eines auf andere Weise bereits erkannten Objekts symbolisieren.

3. Das *Format* der Grafiken darf, damit die Grafik noch mit beiden Händen abzutasten ist, nicht größer als DIN A3 (Hochformat) sein [BEYER 95].

Folgerung:

- Zusammen mit dem minimalen Linienabstand ergibt sich so eine höchste mögliche Komplexität bzw. Objektanzahl, die auf einer Grafik dargestellt werden kann.

4. Nicht zuletzt spielen allgemeine *ergonomische Eigenschaften* eine Rolle: Die Benutzbarkeit und der Nutzen der Grafik müssen vom Benutzer als hoch eingeschätzt werden und auch nach objektiven Maßstäben hoch sein.

Folgerung:

- Das verwendete Material (Schwellpapier o.ä.) muß vom Betrachter akzeptiert werden. Verschiedene Sorten Schwellpapier, die auf dem Markt existieren, haben - insbesondere nach dem Schwellprozeß - eine sich unangenehm schwammig anfühlende Oberfläche; gleiches gilt für „Flexipaper“, dessen Trägermaterial sehr weich ist und das sich deswegen beim Abtasten oft zusammenschiebt. Die

Benutzerakzeptanz von Riffelfolien ist meist höher. Tiefziehfolien werden allgemein als sehr abtastfreundlich empfunden²².

- Die hinterlegten Informationen müssen qualitativ und quantitativ den Anforderungen entsprechen, die sich aus der jeweiligen Arbeitssituation ergeben. Über die Bedeutung dieser Information wird im Abschnitt 5.7 noch zu diskutieren sein.

Diese letzte hier aufgeführte Randbedingung ist dem Einfluß des Rendering-Vorgangs völlig entzogen. Einerseits sind die objektiven Darstellungsgrenzen der verschiedenen genannten kontinuierlichen haptischen Zeichenmedien identisch, und andererseits ist die Qualität der einer Zeichnung hinterlegbaren semantischen Information abhängig von der Qualität der im Modell vorhandenen Semantik-Information.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen und Folgerungen lassen sich verschiedene Verfahren zur haptischen Darstellung räumlicher Gegenstände identifizieren und implementieren, wie in den Abschnitten 5.3.2 bis 5.3.6 gezeigt wird.

5.2 Optimierung/Vereinfachung von räumlichen Gegenständen

Bevor die Einzelflächen (Facetten) der darzustellenden Szene in die Abbildungsfläche transformiert werden können, sind einige Manipulationen an der Repräsentation dieser Szene (dem Modell) sinnvoll und/oder notwendig:

Zunächst können einige dreidimensionale Objekte auf zweidimensionale Formen zurückgeführt werden, so daß bei der späteren Abbildung in die Ebene diese Objekte nicht weiter zerlegt werden müssen:

- Flache Körper können in einfache Facetten umgewandelt werden. Im einzelnen bedeutet dies:
 - Flache Quader werden zu einfachen Rechtecken.
 - Flache Zylinder werden zu Scheiben.
 - Flache Extrusionskörper werden zu Polygonen
- Lange, schmale Gegenstände (wie Tischbeine) werden zu Linien.

Aus dieser Auflistung ergeben sich allerdings einige Folgeprobleme:

Was ist ein „flacher“ Körper?

Ein Körper ist dann flach, wenn seine Ausdehnung in einer Raumrichtung wesentlich geringer ist als in den beiden anderen. Wenn in einem Quader der Kantenlängen a , b und c (mit $a < b \leq c$) das Verhältnis $(a : b) \ll (b : c)$ ist und daher auch $(a : c) \ll (b : c)$, so ist dieser Quader flach bezüglich seiner Höhe a . Um ihn zu einem echt planaren Rechteck zu machen, muß die Höhe a auf Null gesetzt werden, d.h. das Objekt muß entlang der Raumrichtung von a mit dem Faktor 0 skaliert werden. Entsprechend ist ein Zylinder dann flach, wenn seine Höhe wesentlich kleiner als sein Durchmesser ist.

Was ist ein „langer, schmaler“ („länglicher“) Körper?

Ein Körper ist länglich, wenn seine Ausdehnung in zwei Raumrichtungen wesentlich geringer ist als in der dritten. Es handelt sich also um eine Sonderform des „flachen“ Körpers, der in zwei Richtungen flach ist. Wenn in einem Quader der Kantenlängen a , b und c

²² Leider ist die Herstellung von Tiefziehfolien auch besonders aufwendig, so daß sie für die meisten der hier betrachteten Anwendungsfälle nicht in Frage kommen.

(mit $a \leq b < c$) das Verhältnis $(a : c) \ll (a : b)$ ist und auch $(b : c) \ll (a : b)$, so ist dieser Quader länglich bezüglich seiner Länge c . Um ihn zu einer echten Linie zu machen, müssen Breite b und Höhe a auf Null gesetzt werden, d.h. das Objekt muß entlang der Raumrichtungen von a und b mit dem Faktor 0 skaliert werden. Entsprechend ist ein Zylinder dann länglich, wenn sein Durchmesser wesentlich kleiner als seine Höhe ist.

In beiden Fällen stellt sich die Frage nach der Bedeutung des $\ll$ -Operators, der auch in dem „wesentlich kleiner“-Prädikat bei der Betrachtung der Verhältnisse beim Zylinder steckt. Idealerweise wird die Entscheidung, was „wesentlich“ ist, dem Benutzer überlassen. In der Praxis haben sich Verhältniswerte im Bereich 5 bis 10 als sinnvoll erwiesen; d.h. wenn ein Zylinder 10 mal länger als dick ist, gilt er als länglich und kann zu einer Linie vereinfacht werden. In der implementierten Version des Renderers ist dieses Maß vom Benutzer frei zu wählen.

Da die Außenmaße der in der Szene enthaltenen Einzelobjekte sich durch die Vereinfachung möglicherweise ändern, kann auch die Topologie, der Zusammenhalt benachbarter Objekte, sich ändern. Wegen der besonderen Bedeutung topologischer Eigenschaften für die Wahrnehmung und das Erkennen von Szenen sind hier geeignete Maßnahmen zur Topologieerhaltung zu treffen (siehe Kapitel 7.3).

Anschließend können die Objekte, die nach den Vereinfachungen immer noch aus räumlichen Körpern bestehen, polygonalisiert werden. Das Ergebnis dieser Polygonalisierung ist ein Modellbaum, an dessen Blättern nur noch flache geometrische Objekte (Polygone (Facetten) und Linien) hängen, dessen Topologie jedoch mit der ursprünglichen identisch ist.

Damit erfüllt das Modell nun die Voraussetzung für die taktile Darstellung: Seine Einzelkomponenten können auf der Abbildungsebene ausgebreitet werden. Da bis zu diesem Schritt weder Objekte gedreht noch in nennenswertem Maße bewegt wurden, sind die räumlichen Ausrichtungen der Flächen und Linien sowie der sie begrenzenden Punkte noch so erhalten wie sie für eine Feststellung bestimmter Eigenschaften später gebraucht werden: Die Schräglage eines Polygons im Raum oder die Krümmung eines Zylinders sind problemlos feststellbar (letztere anhand der unterschiedlichen Ausrichtungen der den Zylinder bildenden Polygone). Diese Informationen können später dazu verwendet werden, die räumliche Struktur des Modells in der nunmehr flachen Darstellung wieder zu re-integrieren (siehe Abschnitt 5.4). Zunächst soll jedoch die Transformation des räumlichen Modells in die Abbildungsfläche behandelt werden.

5.3 Verfahren zur taktilen Darstellung

Im Gegensatz zur visuellen Darstellung, die sich an den Seh- bzw. Kameramodellen orientieren kann, gibt es für taktile Darstellungen noch kein Wahrnehmungsmodell. Entsprechend gibt es auch keine der fotografischen Kamera entsprechenden Geräte für tastbare Abbildungen, an denen sich eine Abbildungsmethode für computergenerierte Zeichnungen orientieren könnte. Geht man davon aus, daß beim fotorealistischen Rendern die Kamera nachgebildet wird, weil sie Bilder erzeugt, die beim visuellen Betrachten einen ähnlichen Eindruck vermittelt wie das abgebildete (fotografierte) Original, so muß es das Ziel des haptischen Renderns sein, beim Ertasten der Zeichnung einen ähnlichen Eindruck wie beim Ertasten des realen Gegenstands zu erzeugen.

Rendern ist in beiden Fällen die Abbildung eines dreidimensionalen Modells auf ein zweidimensionales Medium. Es muß also zunächst darum gehen, Objekte und Szenen auf einer zweidimensionalen Fläche darzustellen. Beim visuellen Rendern wird dazu die Projektion

des in der Szene reflektierten Lichts auf eine Fläche, die Bildfläche, verwendet. Beim haptischen Rendern werden eher mechanische Verfahren angewendet, die dem mechanischen Erfassen der Szene besser entsprechen.

Die hierbei erhaltenen Darstellungen scheinen dem visuell geprägten sehenden Betrachter mitunter schwer erkennbar, wenn er sie mit den Augen wahrnimmt. Sehende sind es (in unserer Kultur) gewohnt, Gegenstände gemäß den Regeln der Perspektive verzerrt wahrzunehmen. Allerdings gibt es auch hier Darstellungsformen, die im Ergebnis den für die haptische Wahrnehmung entworfenen Zeichnungen sehr nahekommen. Abschnitt 5.3.1 geht auf diese Darstellungsformen kurz ein und erläutert, warum solche Verfahren in manchen Situationen für Sehende und in sehr vielen Situationen für Blinde angemessen und wirksam sind.

Anschließend geht es um die methodische Generierung zweidimensionaler grafischer Elemente aus dreidimensionalen Modellen. Bei dieser Generierung wird ein Verlust von räumlicher Information in Kauf genommen. Im Abschnitt 5.4 wird dann gezeigt, wie diese Tiefeninformation wieder in die Grafik integriert werden kann.

5.3.1 Herkömmliche nicht-kamera-orientierte Darstellungsverfahren

Der erste Eindruck, den ein „unvoreingenommener“ Betrachter beim Erfassen von Darstellungen hat, die sich nicht an der perspektivischen Projektion orientieren, ist für ihn oft verwirrend. Mitunter kommt der Eindruck auf, daß die Darstellung eines Gegenstands durch die Beschreibung seiner Konstruktion ersetzt wird.

Nun könnte man sich auf einen empirischen Standpunkt zurückziehen und auf Kapitel 8 „Experimente und Ergebnisse“ verweisen, in dem *experimentell nachgewiesen* wird, daß Blinde Zeichnungen gut erkennen, die mit den beschriebenen Verfahren erstellt wurden. Die Methode funktioniert also. Der vorliegende Abschnitt geht diesen Weg nicht, sondern zeigt auf, daß bei allgemeinerer Betrachtung von Darstellungszweck, Darstellungsform und Wahrnehmungsmodalität die taktilen Zeichenverfahren nicht weniger „natürlich“ sind als die kamera-orientierten.

Der erste Fehler, den Sehende bei der Beurteilung von Zeichnungen oft machen, ist der, sich selbst als „unvoreingenommen“ zu betrachten, obwohl sie in ihrer Wahrnehmung visuell „geprägt“ sind. Durch die Sozialisation und die eigene visuelle Erfahrung bei der Betrachtung von Gegenständen und Darstellungen ist man sich des visuellen Wahrnehmungsablaufs nicht mehr wirklich bewußt. Man sieht auf einem Bild nicht mehr die Darstellung eines Gegenstands, sondern den Gegenstand selbst²³. Der notwendige Zwischenschritt, aus der 2D-Darstellung ein mentales Modell in 3D zu generieren, geschieht meist unbewußt. Dabei ist die mentale Leistung, die hierzu notwendig ist, recht beachtlich: Zusammenlaufende Linien müssen ggf. als in die Tiefe der Szene ragende Parallelen erkannt werden, unvollständig oder überhaupt nicht abgebildete Teilelemente müssen „hinzugedacht“ werden (z.B. ein viertes Tischbein) und Beleuchtungseffekte (insbesondere Schatten) müssen mental entfernt werden, um die „wahre“ Gestalt des Gegenstands im mentalen Modell zu konstruieren.

Insofern ist also *jede* Darstellung eines Gegenstands eine unvollständige Beschreibung seiner Konstruktion, die erst mit den erlernten (im Laufe der Entwicklung erworbenen) Regeln der Wahrnehmung gelingen kann. Dies gilt für visuelle wie auch für taktile Darstellungen. Andererseits ist jede bildliche Darstellung auch als Abbildung bestimmter

²³ René Magritte hat dieses Dilemma in einem „fotorealistischen“ Ölgemälde dargestellt, auf dem eine Pfeife zu sehen ist. Unter der Darstellung der Pfeife steht : „Ceci n'est pas une pipe.“ („Das ist keine Pfeife“).

Eigenschaften des Dargestellten in die Ebene zu verstehen. Da diese Abbildungen im Allgemeinen nicht injektiv sind, sind zusätzliche Informationen, insbesondere Kontextinformationen, notwendig, um das Urbild mental rekonstruieren zu können (siehe auch 5.7).

Neben der *Erfahrung*, die beim Erfasser von Darstellungen vorausgesetzt werden können, spielt der *Zweck* der Darstellung bei der Wahl der Darstellungsform eine entscheidende Rolle: Selbst visuelle Darstellungen verstoßen bewußt gegen die Regeln der perspektivischen Projektion, wenn ihr Zweck durch eine andere Darstellungsform besser erreicht werden kann. Dies wird durch einige Beispiele aus verschiedenen Bereichen deutlich:

Fingerabdrücke in Verbrecherkarteien werden nicht durch eine perspektivische Darstellung der Fingerkuppe dargestellt, sondern durch eine Abrollung der näherungsweise halbzylindrischen Fingerkuppe auf ein Papier. Der räumliche Eindruck geht verloren; der Zweck, möglichst alle relevanten Linien der Fingerkuppe darzustellen, ist jedoch erfüllt.

Unfallprotokolle enthalten Skizzen von Fahrzeugen, auf denen Schäden an diesen eingezeichnet werden können (vgl. Abbildung 5.1). Die gewählte Darstellungsform ist die einzige Möglichkeit, die gesamte Karosserie in einer Zeichnung so abzubilden, daß einzelne Spuren durch genau eine Markierung gekennzeichnet werden können.

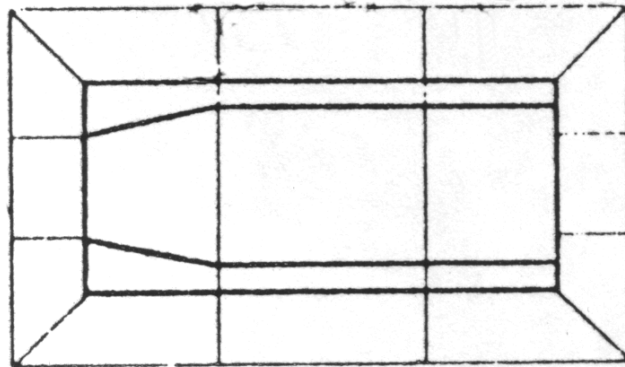


Abbildung 5-1 Aus einem Unfallprotokoll-Formular der Berliner Schutzpolizei. Die Karosserie ist gespreizt bzw. aufgefaltet dargestellt.

Anatomische Zeichnungen zeigen bisweilen nicht eine perspektivische Ansicht, sondern eine auf die Fläche der Darstellung „aufgebogene“ Form des darzustellenden Körperteils. Dies kommt insbesondere dann vor, wenn Oberflächendetails des Gegenstands dargestellt werden müssen und seine allgemeine Form weniger von Bedeutung ist (z.B. weil sie bekannt ist).

Planetenkarten, z.B. Karten der Erde, stellen den Kartografen vor das Problem, eine Kugeloberfläche vollständig und „wirklichkeitsgetreu“ auf eine Fläche darzustellen. Die verschiedenen Lösungen für dieses Dilemma, die alle nur einem Teil der Wirklichkeit „treu“ sein können, führen zu unterschiedlichen Projektionen: *Entweder* stimmen die Winkel zwischen einzelnen Kartenelementen mit denen auf der Kugel überein *oder* die Entfernungen entlang der Längen oder Breitengrade sind im Verhältnis korrekt dargestellt. Eine Lösung, die die Formen der Kontinente möglichst unverzerrt darstellt, zeigt Abbildung 5.2.

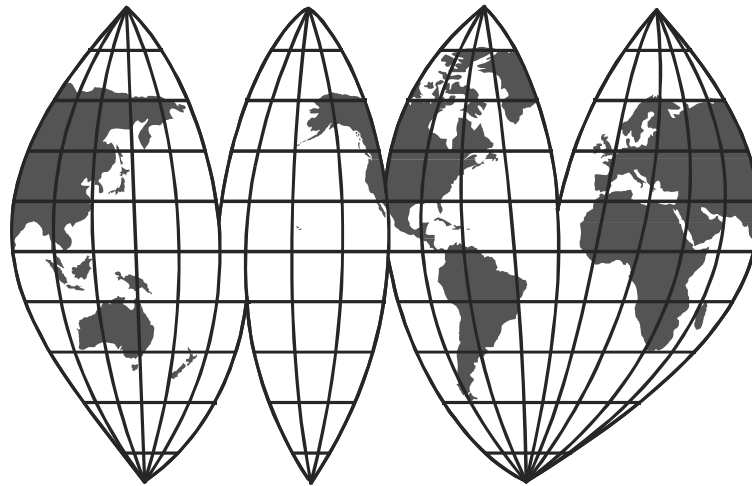


Abbildung 5-2 Darstellung der Erde als aufgefaltete Kugel. Diese Darstellungsform wird von Geografen und Kartografen verwendet, wenn sie möglichst wenige Verzerrungen bei der Abbildung der Kontinente benötigen

Die Beispiele zeigen, daß auch sehende Erwachsene mit nicht-kamera-orientierten Darstellungsformen umgehen, wenn diese dem Zweck angemessener sind als „herkömmliche“.

Gerade das letzte Beispiel aus der Anatomie zeigt, daß für Eigenschaften, die am echten „Objekt“ haptisch erfaßt werden, nicht-kamera-orientierte Darstellungsformen die angemessensten sein können: Ärzte untersuchen (nicht nur den Kiefer) durch Abtasten.

Die geometrischen Eigenschaften von Gegenständen, z.B. ihre äußere Form, sind durch Auffalten und verwandte Methoden eher darzustellen als durch perspektivische Projektionen. Da Blinde nicht durch den Sehsinn geprägt sind, haben sie zu perspektivischen Darstellungen keinen Zugang. Hingegen erkennen sie gezeichnete Formen durch Tasten, wenn diese der Form des dargestellten Gegenstands entsprechen.

Die folgenden Abschnitte beschreiben einige Methoden, räumliche Gegenstände nicht-kamera-orientiert darzustellen.

5.3.2 Auffalten

Da beim Abtasten im Wesentlichen die Oberflächen realer Objekte und deren Begrenzungen erfaßt werden, liegt es nahe, diese Oberflächen(grenzen) als Grundlage für die taktilen Darstellung zu verwenden. Und weil Oberflächen eines Objekts miteinander verbunden sind (im allgemeinen über Kanten), besteht *ein* Verfahren der taktilen Darstellung darin, die Einzelflächen (*faces*) eines Objekts so auf dem Papier auszubreiten, daß man das Ergebnis als Schnittbogen verwenden und durch Zusammenfalten wieder zu einem räumlichen Gegenstand machen könnte.

Man kann sich also den Darstellungsvorgang als ein "Auseinanderfalten" der Oberfläche(n) realer Objekte vorstellen. Die Einzelflächen behalten ihre 2D-Form, alle Winkel und Abstände einer Fläche bleiben erhalten. Die Topologie komplexer Objekte bleibt ebenfalls überwiegend erhalten. Symmetrieeigenschaften gehen jedoch dabei verloren, da die Winkel zwischen den Oberflächen geändert werden und diese Änderung nicht bei allen Oberflächen gleich ist. Außerdem können beim Auseinanderfalten unmittelbar nebeneinander liegende Flächen weit "auseinander gefaltet" werden, so daß eine kognitive Rekonstruktion sehr erschwert wird.

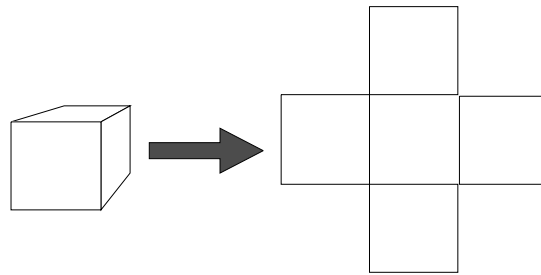


Abbildung 5-3 Würfel, links visuell perspektivisch gerendert, rechts (teilweise) aufgefaltet.

Dieses offenbar sehr mächtige Verfahren ist vor allem sinnvoll, wenn einzelne Teile eines Gegenstands eine charakteristische Form haben, die zur Erkennung des Gesamtobjekts wichtiger ist, als sein Zusammenhalt. Anders als z.B. bei Eisenberg [EISENBERG 96] ist es beim haptischen Rendern nicht Ziel der Darstellung, einen Schnittbogen zu erstellen. Vielmehr geht es darum, die haptische Wahrnehmung zu unterstützen. Daher kommt es nicht unbedingt auf die vollständige Darstellung an, sondern auf eine rezeptionsadäquate.

Es muß an dieser Stelle noch einmal betont werden, daß das Identifizieren von Objekten auf der Grundlage von Linien, die sich aus dem Auffalten der Objekte in die Fläche hinein ergeben, eine intellektuelle Umsetzung erfordert, also kognitive Arbeit. Diese kognitive Arbeit muß aber im Gesamtwahrnehmungskontext gesehen werden: Die Linien und Formen werden nicht gesehen, sondern gefühlt, wie die realen Objekte. Außerdem haben Blinde, insbesondere Geburtsblinde, keine visuelle Sozialisation erfahren und sind daher nicht kulturell „vorbelastet“, so daß sie eine Zeichnung nicht (wie Sehende) mit der Erwartung erfassen, daß sie gemäß optischen Gesetzen erstellt wurde. Wie ein Sehender optische Verzerrungen in visuellen Zeichnungen durch kognitive Arbeit in räumliche Eigenschaften umsetzt, so setzen Blinde mechanisch „verzerrte“, also z.B. aufgefaltete, Objekte wieder zu ihrer ursprünglichen Form zusammen. Auf diesen Umstand wird in den Kapiteln 3.3 und 8 näher eingegangen, außerdem bietet er Wahrnehmungspsychologen ein lohnendes Gebiet für weitere Forschungen (siehe hierzu auch Kapitel 9).

Technisch handelt es sich beim Auffalten eines Gegenstands um *Rotationen* von Flächen um eine ihrer begrenzenden Kanten. Die Methode, diese Kanten zu finden und die Rotationen sowie die notwendigen resultierenden Operationen werden im Abschnitt 7.3 näher erläutert.

Bei der genaueren Betrachtung der Verfahren zum Auffalten von Gegenständen ergeben sich an einigen Stellen die Notwendigkeit, Entwurfsentscheidungen zu treffen:

Wahl der aufzufaltenden Flächen: Grundsätzlich sind die Kanten und Flächen darzustellen, die bei einem realen Gegenstand ertastbar wären. Das kann bedeuten, daß bei einem frei beweglichen Würfel alle sechs Flächen dargestellt werden. Falls ein Quader ringsum eingebaut ist, wie z.B. ein Einbauschrank, sind seine Seiten, sein Boden und sein Oberteil in der Realität nicht ertastbar. Daher sollten sie auch nicht ausgefalt werden. Ein Würfel, der auf einer Fläche steht, z.B. auf einem Tisch, ist von fünf Seiten her zugänglich, seine Unterseite bleibt unerreichbar²⁴. Dementsprechend dürfen auch nur fünf Seiten des Würfels in der Zeichnung tastbar sein: eine Primärfläche und vier weitere.

Wahl der Ausgangsfläche für den Auffaltungsprozeß: Grundsätzlich gilt auch hier, daß die erste beim Ertasten des echten Objekts erkundete Fläche auch zur Orientierung auf der Zeichnung verwendet werden sollte. Leider ist nicht immer vorauszusagen, welche Fläche

²⁴ Eigentlich bleibt sogar unklar, ob ein so stehender Würfel überhaupt eine Unterseite hat. Es könnte sich auch um ein würfelförmiges Gefäß handeln, dessen Öffnung auf der Tischfläche liegt.

in der Realität als erste gefunden und ertastet wird. Daher müssen zur Festlegung der Ursprungsfläche beim Auffalten, Regeln aufgestellt werden:

Als Erkundungsrichtung („Blickrichtung“) ist die „Vogelperspektive“ recht verbreitet. Daher werden viele Details und Gegenstände „von oben“ gezeichnet. Dies wiederum legt nahe, die Oberseite eines Gegenstands als Ausgangsfläche für den Auffaltungsalgorithmus zu verwenden.

Alternativ bietet sich die größte Einzelfläche für das Auffalten an. Dies hat zweierlei Vorteile: Einerseits wird hier oft mit der Erkundung begonnen, andererseits bleibt die Gesamtzeichnung des Objekts so kompakt und die meisten Linien in der Zeichnung sind in ihr wie auch in der Realität Kanten, die Flächen miteinander verbinden.

Anzahl der aufzufaltenden Flächen: Hier ist ein Kompromiß zwischen einer möglichst einfach zu ertastenden und einer möglichst vollständigen Darstellung zu wählen: Manche Blinde falten das beim Zeichnen aufgefaltete Objekt mental wieder zusammen und vermissen Flächen, die nicht mitgezeichnet wurden. Andere gehen von der Zentralfläche aus und sind zufrieden, wenn sie das Objekt und seine Form identifiziert haben. Weitere angrenzende Flächen stören sie nur.

In der Praxis kommt dieser Frage allerdings ohnehin wenig Bedeutung zu, da die meisten dargestellten Objekte sich innerhalb einer Szene befinden und so ihre „Auffaltbarkeit“ schon aus Platzgründen beschränkt ist.

Transitivität von Faltungsoperationen: Beim Auffalten eines Gegenstands um seine Kanten ergeben sich Folgeprobleme sobald die mit der Ursprungsfläche direkt verbundenen Flächen (erste Faltungsgeneration) aufgefaltet sind: Alle Objekte, die sich *auf* einer Fläche der ersten Faltungsgeneration befinden, müssen mit dieser Fläche rotiert werden. Das betrifft Teilobjekte des Gesamtobjekts, zu dem die geklappte Fläche gehört (also z.B. Griffe an Türen und Schubladen), aber auch Gegenstände, die nicht zum gleichen Gesamtobjekt gehören (z.B. eine Tasse, die auf dem Möbelstück steht). Abgemildert wird dieses Problem, weil in der Praxis die Vorverarbeitung (Vereinfachung, siehe Abschnitt 5.2) viele solcher Objekte schon derart manipuliert hat, daß sie flach auf der Oberfläche liegen.

Eine Fläche, die im Originalgegenstand an eine Fläche der ersten Faltungsgeneration angrenzt, läßt sich einem der folgenden Fälle zuordnen (siehe Abbildung 5-4 zur Verdeutlichung):

1. Es handelt sich um die Ursprungsfläche (A); dann muß sie nicht weiter behandelt werden
2. Es handelt sich um eine Fläche, die ebenfalls zur ersten Faltungsgeneration gehört; dann ist sie bereits ausgefaltet und muß nicht weiter behandelt werden (C grenzt an B).
3. Die gefundene Fläche grenzt an genau eine Fläche der ersten Faltungsgeneration und an keine weitere Fläche irgendeines Gegenstands; dann kann sie problemlos in die Ebene gefaltet werden, wenn mehr als eine Faltungsgeneration gewünscht wird (D grenzt an B).
4. Die gefundene Fläche grenzt an mehr als eine Fläche der ersten Faltungsgeneration und an keine weitere Fläche irgendeines Gegenstands; dann muß entschieden werden, mit welcher dieser Flächen die betrachtete Fläche verbunden sein soll (wenn sie überhaupt dargestellt werden soll). Oft ergibt sich die Wahl dieser Fläche aus dem Verbot der sich überlagernden Flächen nach dem Auffalten. Sonst hat sich die größte Fläche der ersten Faltungsgeneration als sinnvoll erwiesen (F grenzt an C und E).

5. Die gefundene Fläche gehört zu einem *anderen* Objekt oder Objektteil, das sie berührt; ausgehend von der modellimpliziten Objekthierarchie muß dieses Objekt(teil) zunächst ggf. selbst aufgefaltet und an der Verbindungskante mit der Fläche des Ursprungsobjekts dargestellt werden. Hier ist es besonders wichtig, die Szenen-Topologie zu erhalten, da diese ihre primäre Eigenschaft bei der haptischen Wahrnehmung ist: Tastet man die Oberseite einer Kommode ab und stößt dabei auf die Wand eines daneben stehenden Schanks, kann man die Erkundung unmittelbar am Schrank fortsetzen. Die Beziehungen des Verbundenseins und des Nebeneinanders werden sofort identifiziert (G grenzt an B).

Dieser Fall tritt jedoch sehr selten ein, da sich berührende Flächen verschiedener Objekte sich im allgemeinen überlappen und deswegen überhaupt nicht aufgefaltet werden.

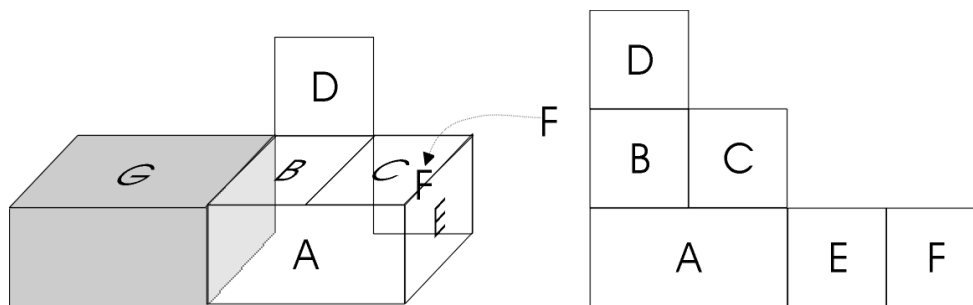


Abbildung 5-4 Illustration zu verschiedenen Situationen, die beim Auffalten vorkommen können. Ursprungsfläche A; erste Faltungsgeneration B, C, E; zweite Faltungsgeneration D, F und ggf. G.

Die Wirkung des Auffaltens einzelner Objektteile läßt sich auch in Abbildung 5-5 erkennen: Dadurch, daß die Seitenflächen des Fahrgestellquaders aufgefaltet wurden, wurden die mit diesen Flächen verbundenen Teile (Rahmen und daran hängende Räder) mit in die gleiche Ebene rotiert. Außerdem wurden die Vorder- und Hinterfläche dieses Quaders rotiert, nicht aber die Unterseite, weil als Faltungstiefe eine Generation gewählt wurde.

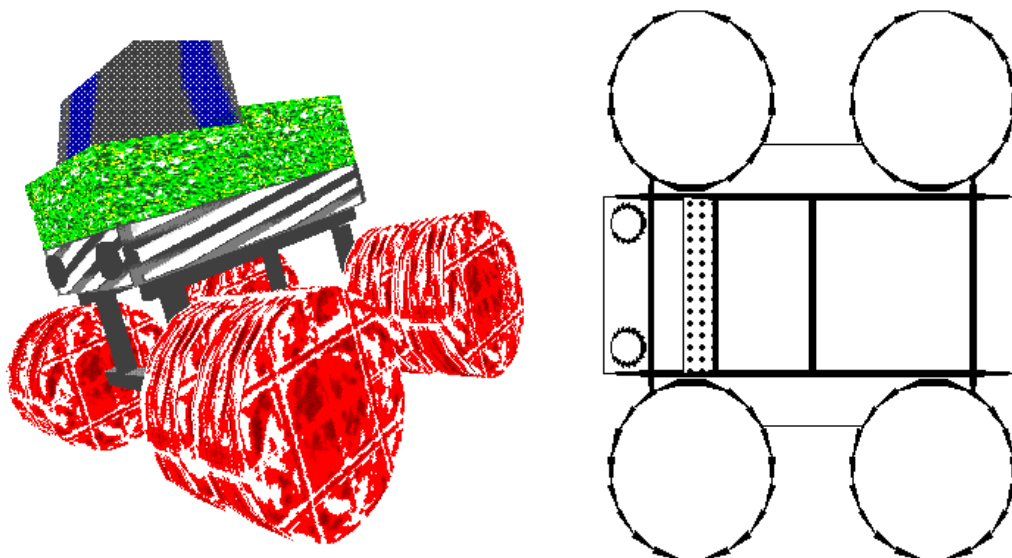


Abbildung 5-5 Ein Spielzeug-LKW, links räumlich, rechts (nach der Optimierung) mit nach oben gefaltetem Fahrgestell, an dem die Räder hängen, die deswegen mit rotiert wurden.

Durch diese relativ einfache Operation (Auffalten des Fahrgestellquaders) wurden alle für das Erkennen und Erkunden des Gegenstands wichtigen Einzelteile in eine Ebene gebracht und gleichzeitig die Topologie des Objekts erhalten.

5.3.3 Spreizen/Gummi-Plättung

Ein dem Auffalten verwandtes Verfahren ist eine Darstellung des Objekts, als ob es aus Gummi bestünde und zwischen der Darstellungsebene und einer dazu parallelen zweiten Ebene zusammengequetscht worden wäre. Auch hier behalten die Einzelteile im wesentlichen ihre Form, werden jedoch so angeordnet, daß sie insgesamt möglichst wenig "Höhe" beanspruchen (Bsp. Tisch). Die Topologie, also der innere Zusammenhalt der Einzelteile, muß beibehalten werden.

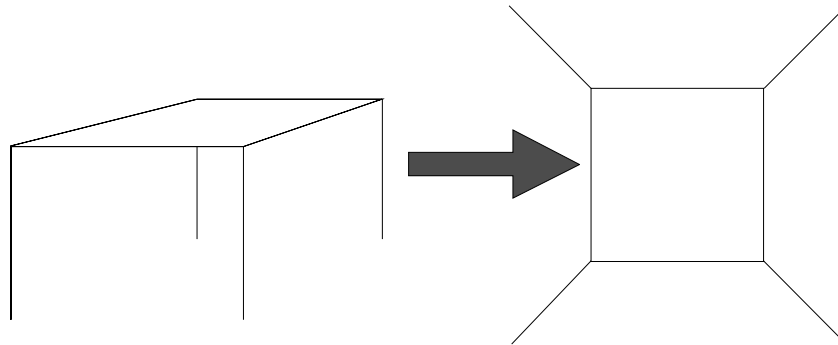


Abbildung 5-6 Ein Tisch, herkömmlich gerendert und mit der Spreizmethode in die 2D-Ebene abgebildet.

Die wesentlichen Unterschiede zum Auffalten lassen sich in zwei Punkten zusammenfassen:

1. Es wird nicht um eine Kante, sondern um eine von der Zentralfläche abhängige, meist schräg liegende Achse rotiert.
2. Es werden keine im Raum zusammenhängenden Flächen und Teilobjekte in der Ebene getrennt voneinander dargestellt.

Das Verfahren eignet sich daher für Objekte, deren Topologie baumartig strukturiert ist. Ausgehend von einem zentralen Teilobjekt, oft einer Fläche, werden alle mit diesem direkt verbundenen Teile in der Ebene ausgebreitet, wobei die Verbindung zwischen Kind-Objekt (z.B. Tischbein) und Vater-Objekt (z.B. Tischplatte) erhalten bleibt. Lediglich die räumlichen Winkel dieser Verbindungen ändern sich. Bei komplexeren Objekten kann das Verfahren rekursiv auf die Kind-Objekte angewendet werden.

Obwohl dieses Verfahren prinzipiell auch mit Teilobjekten funktioniert, die eine echte räumliche Ausdehnung in drei Dimensionen haben, sollte das Gesamtobjekt vor der Spreizung optimiert werden (siehe Abschnitt 5.2), so daß nur noch wirklich flache bzw. lineare Teilobjekte rotiert werden müssen. Dadurch ergibt sich die Anordnung in *einer* Fläche mehr oder weniger natürlich. Die Parallelität mit einer „Spreizung“ realer Gegenstände ist auch hier augenfällig: spreizt man einen realen Tisch in der gezeigten Weise, so hat das Ergebnis eine Höhe, die größer als die der Tischfläche ist. Das liegt daran, daß die Beine einen Durchmesser haben, der größer als 0 ist und daß sie an der Unterseite der Tischplatte angebracht sind, die selbst wiederum eine Dicke (Höhe) hat. Beim Spreizen eines solchen Tisches wären zwar alle Teile im wesentlichen parallel zur Darstellungsebene ausgerichtet, sie hätten aber noch unterschiedlichen (und von 0 verschiedenen) Abstand zu dieser Ebene.

Solche Probleme tauchen nicht auf, wenn das Gesamtobjekt nur aus „echten“ Flächen und Linien besteht. Da diese in (mindestens) einer Raumrichtung keine Ausdehnung haben, lassen sie sich problemlos in einer Ebene unterbringen und darstellen.

Damit die gespreizt dargestellten Gegenstände mental leicht wieder in ihre räumliche Form zurück verwandelt werden können, muß die Spreizung „realistisch“ wirken, d.h. die flächige Form muß aussehen/sich anfühlen als ob der Originalgegenstand wirklich „gespreizt“ worden wäre. Technisch handelt es sich bei dem Problem um eine Suche nach der geeigneten Rotationsachse. Die Lage dieser Achse ist durch den Punkt, an dem das zu rotierende Teil an der Zentralfläche hängt, bestimmt. Die Richtung kann mit verschiedenen Verfahren festgelegt werden:

- Ist der Verbindungspunkt ein Eckpunkt der Zentralfläche, kann die Achse orthogonal zur Winkelhalbierenden des Außenwinkels liegen (wie in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7).

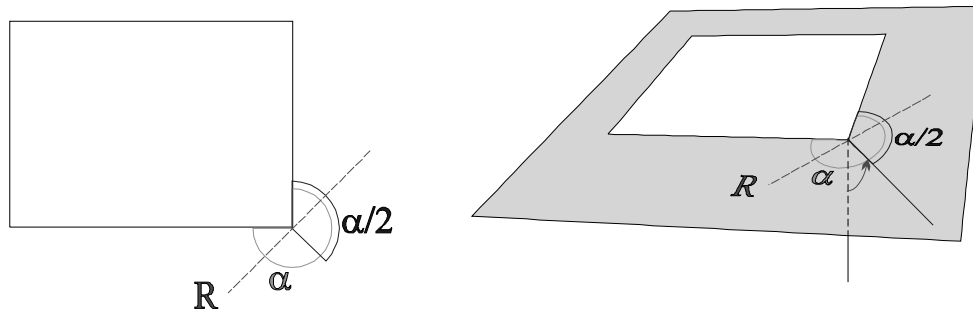


Abbildung 5-7 Rotation um eine zur Winkelhalbierenden $\alpha/2$ orthogonal verlaufende Achse R in die Darstellungsebene

Dies kann bei länglichen oder unregelmäßigen Zentralflächen zu „unnatürlichen“ Ergebnissen führen.

- Eine Energie-Minimierungsfunktion kann verwendet werden, die die gesamte Umgebung des Verbindungspunkts berücksichtigt, so daß die in die Ebene gespreizten Teile (z.B. Tischbeine) sich an der Hauptachse der Zentralfläche, ggf. mit anhängenden weiteren Objekten, orientiert (wie in Abbildung 5-8)

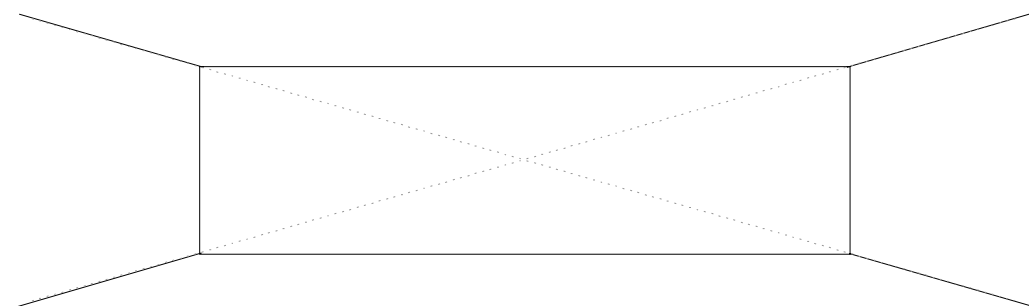


Abbildung 5-8 Spreizung unter Berücksichtigung der Form des Zentralobjekts

Berücksichtigt man nicht nur die Zentralfläche selbst, sondern auch andere Objektteile, die an den Verbindungspunkt grenzen, so spielt die Reihenfolge der Einzelspreizungen eine Rolle. Als Beispiel möge hier die Abbildung 5-9 dienen:

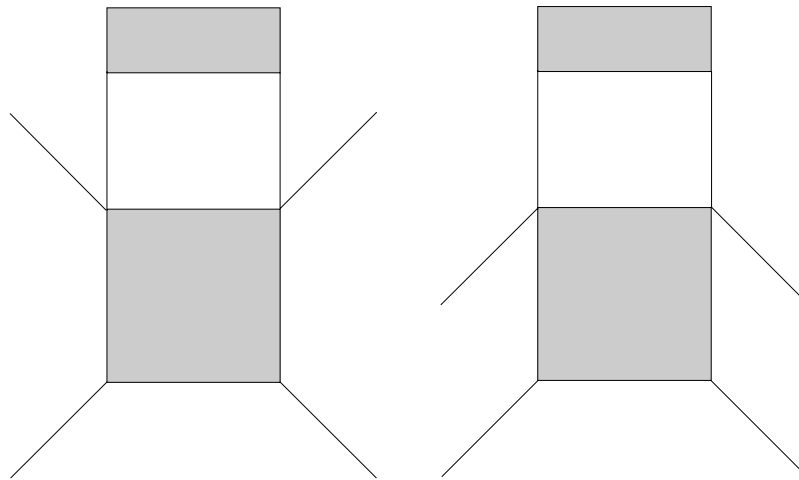


Abbildung 5-9 links: erst Beine abspreizen, dann Lehne herunterklappen
rechts: erst Lehne herunterklappen, dann Beine abspreizen.

Je nach dem, ob zuerst die Stuhllehne nach hinten geklappt wird oder die Stuhlbeine gespreizt werden, wirkt sich die Stuhllehne auf die Stuhlbeine aus oder nicht. Berücksichtigt man auch noch die potentielle Energie, die eine nach hinten geklappte Stuhllehne hat und an die Beine weitergeben kann, so kann sich eine Grafik ergeben, in der die Stuhlbeine paarweise parallel liegen.

Der Ansatz, eine Energie-Minimierungsfunktion zur Bestimmung des Rotationswinkels beim Abspreizen länglicher Gegenstände zu verwenden, verfolgt das Ziel, realistisch *wirkende* Grafiken zu erzeugen. Da zu diesem Zweck nicht die gesamte Physik eines Spreizvorgangs nachgebildet werden muß, kann man auch Approximationen verwenden.

- Eine relativ einfache Annäherung an eine Energie-Minimierungsfunktion ist das Verfahren, bei dem die Rotationsachse senkrecht auf einer Linie zwischen dem Schwerpunkt und dem Verbindungspunkt liegt. Dadurch liegen die abgespreizten Teilobjekte auf einer Verlängerung dieser Linie (siehe Abbildung 5-8). Je nach dem, wie der Schwerpunkt und das Zentralobjekt gewählt wird, können verschiedene Resultate erzeugt werden, die denen der Energie-Minimierungsfunktion entsprechen.

Die schon genannte Vorbedingung, daß das zu spreizende Gesamtobjekt eine Baum-Topologie hat und vor dem Einebenen optimiert werden sollte, schränkt den Einsatzbereich dieses Verfahrens ein. Auf der anderen Seite ist es beim Erfassen intuitiv schnell klar und bedarf kaum einer Erläuterung beim Erlernen (siehe auch Abschnitt 7.3).

In der Tat verwenden manche Blinde diese Methode auch beim Zeichnen von Gesamtobjekten, die keine Baum-Topologie haben, d.h. bei solchen, die mehrere an einer Ecke aneinander grenzende Flächen haben. Dadurch brechen beim Spreizen entweder diese Verbindungen auf oder die Form der Flächen verändert sich stark. Das Ergebnis sind schwer erfassbare Zeichnungen, die mitunter Ähnlichkeit mit entsprechend aufgebrochenen und verbogenen Originalobjekten haben.

5.3.4 Schnittbilder

Manche Gegenstände kann man durch ihr Schnittbild sehr deutlich darstellen. Gefäße und gefäßartige Gegenstände werden auch oft von Blinden als Schnittbilder gezeichnet (siehe Abschnitt 8.2). Hier wird also nicht die tastbare Kante dargestellt, sondern der Weg des

tastenden Fingers, der sich an der Oberfläche des Gegenstands entlang auf einer gedachten Ebene (der Schnittebene) bewegt. Dabei ist es nicht unbedingt nötig, daß diese gedachte Linie auch beim echten Gegenstand abfahrbar wäre: Eine Flasche ist innen allenfalls teilweise ertastbar (am Flaschenhals), trotzdem ist sie als Gefäß bekannt, und man weiß, daß sich die Innenwand der Flasche fortsetzt, auch wenn sie nicht ganz ertastbar ist. Hier genügen wenige Details, um auf ein bereits vorhandenes mentales Modell des Dargestellten zugreifen zu können. Eine kognitiv aufwendige Neukonstruktion des mentalen Modells ist nicht notwendig.

Ein Gefäß in diesem Sinne ist z.B. eine Tasse, aber auch eine (offene) Flasche oder die von Bordwänden umschlossene Ladefläche eines LKW. Das funktional und geometrisch entscheidende Merkmal eines Gefäßes ist, daß es einen *Inhalt* haben kann. Eine Tasse oder eine Flasche kann mehr oder weniger Flüssigkeit enthalten, die Ladefläche des LKW kann eine Ladung tragen. Dieser tastbare Inhalt läßt sich als solcher (also als in dem Gefäß befindlich) am leichtesten in einem Schnittbild erkennen.

Einige Formen, wie z.B. eine (geschlossene) Flasche haben als Schnittbild die gleiche Darstellungsform wie als Umrißzeichnung bzw. Parallelprojektion. Dadurch vereinfacht sich z.B. auch der Rendering-Prozeß, und die Darstellung sieht für einen Sehenden bekannter aus.

Die Wahl der Schnittebene spielt eine wichtige Rolle. Sie muß so gelegt werden, daß einerseits die zum Erfassen entscheidenden Eigenschaften erhalten bleiben, andererseits sollte sie parallel zur Darstellungsebene liegen, um überflüssige mentale Rotationen oder Verwirrung beim Erfassen zu vermeiden. In der Praxis hat sich dieses Problem als wenig bedeutsam gezeigt: Legt man eine zur Darstellungsebene parallele Ebene als Schnittebene durch den Schwerpunkt des Gegenstands, so erhält man im allgemeinen gute Ergebnisse. Wenn ohnehin nur *ein* Gegenstand darzustellen ist, kann die Darstellungsebene entsprechend gewählt werden.

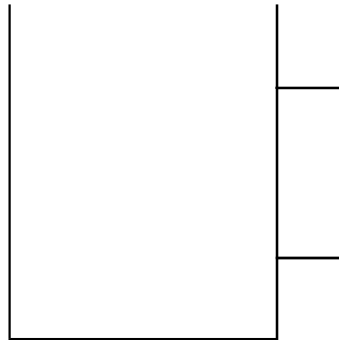


Abbildung 5-10 Eine Tasse als Schnittbild

Gerade bei Schnittbildern ist die Kombination mit anderen Techniken, z.B. dem Auffalten, sinnvoll. Beim Zeichnen müssen jedoch die Linien, die eine Schnittkante darstellen von denen, die eine real ertastbare Kante darstellen, unterschieden werden. Abbildung 5-11 zeigt ein Beispiel, bei dem diese Aspekte nicht berücksichtigt wurden.

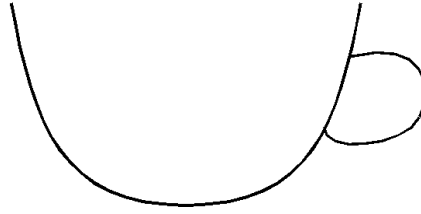


Abbildung 5-11 Zeichnung einer Tasse, die von Fromm [FROMM 95] blinden Kindern vorgelegt wurde. Nachdem sie die Tasse zunächst nicht erkannt hatten und ihnen gesagt wurde, was dargestellt ist, vermuteten einige von ihnen, die geschlossene Form des Henkels wäre die Öffnung, in die die Flüssigkeit zu füllen sei.

Verwendet man jedoch einen eigenen Liniensstil für die Darstellung der Schnittkanten und integriert zudem die für die Funktion der Tasse außerordentlich wichtige kreisrunde Öffnung, kann eine Erkennung wesentlich erleichtert werden. Abbildung 5-12 zeigt ein Beispiel für eine derartige Darstellung

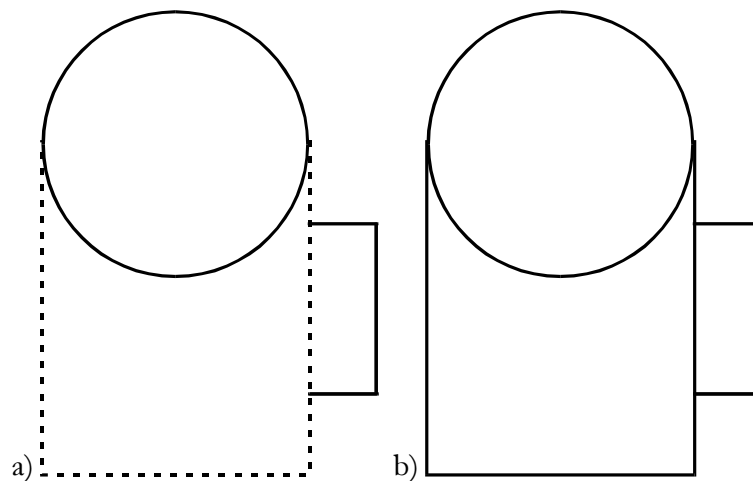


Abbildung 5-12 a) Eine Tasse wie in Abbildung 5-10, jedoch mit gestrichelter Linie für die Schnittkante und dargestellter Öffnung (in die Darstellungsebene geklappt). b) ohne Verwendung eines Schnittkanten-Liniensstils. Auch gestrichelte Linien können tastbar gemacht werden.

Die Verwendung eines eigenen Liniensstils für Schnittkanten erhöht die mentale Belastung beim Erfassen. In Verbindung mit Zusatzinformationen, z.B. der kreisförmigen Öffnung oder Kontext-Information (siehe Abschnitt 5.7) ist das Dargestellte oft einfacher ohne Schnittkanten-Liniensstil zu erkennen.

5.3.5 Kombinationen der obigen Verfahren

In "typischen" Szenen sind verschiedenartige Gegenstände vertreten; viele Gegenstände sind aus unterschiedlichen Einzelteilen und -strukturen zusammengesetzt. Daraus ergibt sich die Folgerung, daß in einer Zeichnung ggf. mehrere Verfahren eingesetzt werden müssen.

Je nach Komplexität der Einzelgegenstände und der Gesamtszene kann eine Kombination verschiedener Methoden zu Überlagerungen von Linien in der Zeichnung führen, die topologische Zusammenhänge nahelegen, welche in der Realität und in der Absicht des Szenen-Designers nicht existieren. Solche Situationen sind zu vermeiden. Verschiedene Verfahren sollten nur dann zusammen angewendet werden, wenn das jeweils verwendete Verfahren beim Erfassen schnell erkannt wird und daher die kognitive Last beim haptischen Erfassen nicht weiter erhöht.

Im Einzelnen bieten sich folgende Situationen für die Kombination verschiedener Verfahren an:

- Zwei Gegenstände stehen in einer für den Sinn der Szene bedeutsamen räumlichen Beziehung, lassen sich aber mit unterschiedlichen Verfahren jeweils optimal darstellen (z.B. Tasse auf Tisch). Wenn sich die räumliche Relation erhalten und darstellen läßt, ohne daß sich Linien der Einzelgegenstände überlappen, können für jeden Gegenstand eigene Verfahren angewendet werden.
- Ein Gegenstand hat zwei charakteristische Eigenschaften, die durch verschiedene Verfahren jeweils optimal abgebildet werden können. In der Praxis kommt die Kombination der Eigenschaften „Gefäß“ und „rund“ häufig vor. In solchen Fällen kann ein Schnittbild mit einer geklappten Kontur kombiniert werden (siehe Abbildung 5-12). Die Rotationsachse für das Klappen der runden Kontur der Öffnung ist durch die Schnittlinie der Schnittfläche mit der Ebene der zu rotierenden Kontur gegeben.

Wie sich gezeigt hat, führt die Kombination verschiedener Verfahren zur Abbildung räumlicher Gegenstände in der Ebene zu Problemen beim automatischen Entwurf der Zeichnungen und auch beim späteren Erfassen. Daher sollten Kombinationen nur sehr sparsam angewendet werden.

5.3.6 Höhenlinien

Sphärische Gegenstände oder Teile wie Kugeln und organische Formen lassen sich oft nicht eindeutig auf eine der bisher genannten Methoden darstellen. Von blinden Zeichnern selbst werden zum Darstellen solcher Gegenstände bisweilen Linien verwendet, die Punkte gleichen Abstands vom Betrachter miteinander verbinden (siehe Abschnitt 8.2). Das Ergebnis sind Zeichnungen, die Ähnlichkeit mit Landkarten haben, auf denen Höhenlinien eingezeichnet sind. Abbildung 5-13 zeigt eine derartige Darstellung einer Kugel, die von einer blinden Versuchsperson entworfen wurde.

Um die Richtung der Wölbung der sphärischen Gegenstände (konkav oder konvex) darzustellen, können Linien, die dichter am Erfasser (weiter „oben“) liegen, dicker als die entfernteren dargestellt werden (siehe wiederum Abschnitt 8.2). Insofern ist die Darstellungsweise konsistent zu der im folgenden Abschnitt (5.4) dargestellten Symbolsprache.

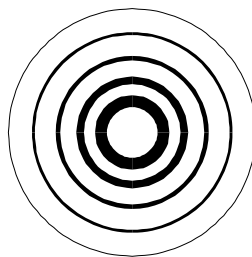


Abbildung 5-13 Eine sphärische Form in der Höhenliniendarstellung.

Die Verwendung von höhenlinienartigen Darstellungsmethoden erfordert zwar beim Erstellen einen höheren kognitiven Aufwand, weil die Form „Schicht für Schicht“ aus den Höhenlinien rekonstruiert werden muß, sie ist jedoch oft die einzige grafische Möglichkeit, solche Formen haptisch abzubilden, wenn man sich auf zweidimensionale Ausgabemedien gemäß unserer Definition beschränkt, wie wir dies im Rahmen dieser Arbeit tun.

Da Höhenlinien keinen am realen Objekt vorhandenen Kanten entsprechen, ist es hier wie bei Schnittbildern besonders wichtig, diese Linien stilistisch von solchen abzuheben, die Kanten entsprechen. Diese Forderung läßt sich allerdings nur schwer mit der nach gestaf-

felter Liniendicke für die verschiedenen Höhenlinien in Einklang bringen. Außerdem bedeutet sie einen zusätzlichen Linienstil neben den Linienstilen für Objektkanten und Schnittkanten.

Wegen dieser zusätzlichen Probleme ist das Höhenlinienverfahren bei der Implementierung des haptischen Renderers nicht berücksichtigt worden. Es ließe sich jedoch als Kombination mehrerer Schnittbilder des gleichen Objekts mit parallelen Schnittebenen emulieren.

5.4 Taktile Symbole für räumliche Eigenschaften

Darstellungen von räumlichen Gegenständen in der Ebene zeigen auch Teilgegenstände, die nicht parallel zur Papierebene liegen. In den vorangegangenen Unterkapiteln wurde beschrieben, wie solche Linien, Kanten und Flächen in die Ebene gefaltet oder gespreizt werden können. Um in der Darstellung trotzdem das Dargestellte zu erkennen, müssen diese Linien, Kanten und Flächen mental zurück in ihre ursprüngliche Position im Raum rotiert werden.

Die Lage der gezeichneten Elemente im Raum ist bei visuellen Darstellungen von Sehenden in der Regel leicht zu rekonstruieren. Tiefenhinweise wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben wurden, werden von ihnen wegen der Ähnlichkeit zu den entsprechenden optischen Eindrücken der realen Objekte und durch eine kulturelle Prägung leicht erkannt und interpretiert.

Eine entsprechende „kulturelle Prägung“ gibt es für taktile Zeichnungen und ihre Erfassung durch Blinde noch nicht. In Analogie zu den visuellen Tiefenhinweisen, die dem optischen Eindruck beim Sehen nahekommen, soll in diesem Abschnitt eine einfache Symbolsprache für taktile Tiefenhinweise skizziert werden, die der haptischen Wahrnehmung des Raumes nahekommt:

Haptische Wahrnehmungen beruhen auf *Kräften*, die auf Mechanorezeptoren ausgeübt werden. Entsprechend müssen bei der haptischen Erfassung von Zeichnungen Kräfte auf die tastende Hand wirken, die denen beim Ertasten realer Gegenstände möglichst entsprechen. Diesem Grundsatz lagen schon die Verfahren zur taktilen Darstellung in Kapitel 4 zugrunde. Leider gibt es keine unmittelbar spürbare Kraft, die zur Unterscheidung eines entfernten von einem näheren Gegenstand verwendet werden könnte. Die in diesem Zusammenhang allenfalls in Frage kommende Gravitation der Gegenstände ist nicht spürbar.

Die Gravitation der Erde (Erddanziehung) wirkt aber auf alle realen Gegenstände und auch auf den Menschen, der sie wahrnimmt. Das wirkt sich aus, indem Körper ein Gewicht haben, das (von Sehenden und Blinden) haptisch wahrgenommen wird. Auch das primäre haptische Wahrnehmungsorgan des Menschen, die Hand, ist der Erddanziehung ausgesetzt und daher leichter von oben nach unten als von unten nach oben zu bewegen.

Da beim aktiven Tasten die Hand bewegt wird, tritt dieser Effekt auch bei der Wahrnehmung von Gegenständen auf: senkrechte Kanten im Raum lassen sich von waagerechten leicht durch die auf die tastende Hand ausgeübte Erddanziehungskraft unterscheiden. Daher kann man auch senkrechte Kanten in einer haptischen Zeichnung dadurch von horizontalen unterscheiden, daß man sie in einer Richtung leichter ertastbar macht, als in der anderen. Diese unterschiedlichen Kräfte beim Ertasten einer Linie entsprechen den unterschiedlichen Kräften beim Ertasten einer senkrechten Kante.

Entsprechendes gilt natürlich auch bei Flächen: Je nachdem, in welcher Richtung man eine nicht horizontale Fläche abtastet, muß man mehr oder weniger Kraft aufbringen, um die Erddanziehungskraft auszugleichen.

Weiterhin kann der Winkel der Kante oder Fläche im Raum zur Horizontalen durch verschiedene nötige Kraftbeträge dargestellt werden: 90° verlangt die größte manuelle Gegenkraft, 0° die geringste (nämlich gar keine).

Natürlich können Linien und Flächen, die nicht horizontal im Raum (oder parallel zur Papierfläche) stehen, auch durch rein abstrakte Symbole gekennzeichnet werden. Die Zuordnung dieser Symbole zu ihrer Bedeutung und die Ableitung der Lage von erfaßten Teilobjekten im Raum daraus erfordern allerdings wiederum kognitive Arbeit bei der Wahrnehmung.

Daher sollten sich die Darstellungsmittel für Linien und Flächen an der Kraft orientieren, die beim Abtasten der Originalobjekte nötig wäre: Ein Tischbein sollte leichter von oben nach unten als von unten nach oben abtastbar sein.

5.4.1 Linien im Raum

Die hierfür zur Verfügung stehenden Mittel hängen stark vom taktilen Medium und der apparativen Ausstattung ab, die verwendet wird.

- Linien können als *Sägezahnmuster* dargestellt werden, wodurch sie in einer Richtung leichter als in der anderen abgefahren werden können (siehe Abbildung 5-14). Leider eignet sich Schwellpapier für diese Darstellungsform nicht, da keine sehr scharfen Kanten erzeugt werden können und prinzipiell auch nur zwischen „erhaben“ und „nicht erhaben“ („Linie“ und „Papierfläche“) unterschieden werden kann. Schräg aus der Papierfläche herauslaufende Linien und Linienabschnitte sind nicht darstellbar. Mit anderen Medien, z.B. Tiefzieh-Folie, können derartige Linien leichter dargestellt werden.

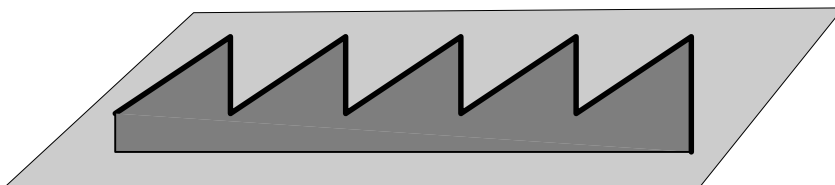


Abbildung 5-14 Sägezahnlinie: Beim Abtasten nach rechts ist weniger Kraftaufwand nötig als beim Abtasten nach links.

- *Keilförmige Linien* (Abbildung 5-15) haben einen schwächeren aber prinzipiell ähnlichen Effekt: je breiter eine Linie ist, desto größere Reibung übt sie auf einen Finger aus, der eine Abbildungsfläche abtastet. Dieser Kraftunterschied wird auch beim Abtasten entlang einer keilförmigen Linie wahrgenommen: Tastet man einen Keil von schmal nach breit ab, muß man zunehmende Kraft zur Überwindung des Widerstands ausüben, in der Gegenrichtung nimmt diese Kraft ab. Dieser *Kraftunterschied* je nach Tastrichtung ist wahrnehmbar und wird als Erleichterung bzw. als Erschwernis vergleichbar mit der Schwerkraft wahrgenommen.



Abbildung 5-15 Keilförmige Linie: Beim Abtasten nach rechts nimmt der Reibungswiderstand zu, beim Abtasten nach links ab.

- Mehrere kurze Keile hintereinander als Kombination der beiden obigen Verfahren sollten die Wirkung der Sägezahnlinie mit den Möglichkeiten des Schwellpapiers verbinden (siehe Abbildung 5-16). Insbesondere der erhöhte Widerstand „gegen den

Strich“ beim Abtasten käme dem der Sägezahnlinie nahe. Damit die skizzierte Wirkung tatsächlich eintritt, muß die Linie sehr breit geführt werden, und die Einzelkeile dürfen nicht zu kurz sein. Infolgedessen eignet sich diese Linienform nicht für detaillierte Zeichnungen, bei denen Linien relativ dicht beieinander liegen und sich ggf. auch überschneiden.



Abbildung 5-16 Approximation der Sägezahnlinie durch mehrere kurze keilförmige Elemente.

Löst man sich von der Beschränkung auf Linien, die beim Abtasten eine richtungsabhängige Widerstandskraft auf den Finger ausüben, kommen als zusätzliche Linienstile noch Linien verschiedener Breite, gestrichelte oder gepunktete Linien und ähnliche in Betracht. Wegen des genannten zusätzlichen kognitiven Aufwands bei der Dekodierung im Rahmen des Wahrnehmungsprozesses, werden solche Linienstile im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht für die Darstellung von Linien, die nicht parallel zur Papierebene liegen, verwendet.

Auch bei den drei geschilderten Linienstilen handelt es sich um Symbole, die allerdings (wie beschrieben) leicht intuitiv interpretiert werden können. So kann bei der Auswahl der Methode ein weiterer Gesichtspunkt berücksichtigt werden: Die Kompatibilität mit Symbolen in Grafiken für Sehende: Bei räumlichen Darstellungen von Molekülen in der Chemie werden für Bindungen zwischen Atomen Linien verwendet. Linien, die Bindungen darstellen sollen, die nicht in der Papierebene liegen, werden hier als Keile dargestellt (siehe Abbildung 5-17). Die Metapher stammt hier aus dem visuellen Bereich, in welchem die Seiten eines Bandes mit zunehmender Entfernung vom Betrachter näher zusammenzurücken scheinen. Die Bedeutung entspricht jedoch weitgehend derjenigen der Keillinien in taktilen Zeichnungen.

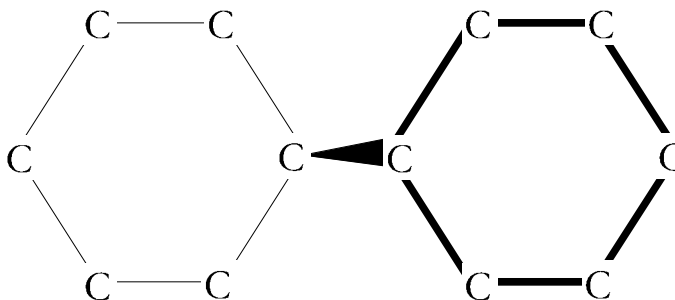


Abbildung 5-17 Darstellung eines Moleküls als Strukturformel, bei dem der eine C_6 -Ring räumlich vor dem anderen liegt. Die Anordnung ist durch die keilförmige Linie der Bindung zwischen den Ringen und die unterschiedliche Linienstärke der verschieden weit entfernten Ringe zu erkennen (rechts breitere Linien, also näher am Betrachter).

Oft werden beim Falten oder Spreizen Flächen, die ursprünglich parallel zueinander lagen, in die gleiche Ebene transformiert. Diese können natürlich nicht mit keilförmigen Linien dargestellt werden. Hier bietet sich die gleiche Methode wie bei chemischen Strukturformeln an: Linien, die näher am Betrachter liegen, werden breiter dargestellt als solche, die weiter entfernt von ihm liegen. Dem Sehenden erscheint dieses Verfahren einleuchtend, da es seinen Sehgewohnheiten (und seiner kulturellen Prägung) entspricht. Blinde müssen das Verfahren jedoch als weitere Kodierung lernen. Da sich das Verfahren aber aus der Keildarstellung (dick = nah, dünn = fern) gut ableiten läßt, scheint seine Einführung jedoch sinnvoll zu sein. Schaden tut sie jedenfalls nicht, denn Linien konstanter Breite werden

immer als parallel zur Papierebene interpretiert, was in jedem Fall stimmt. Wenn die Zusatzinformation über das räumliche Verhältnis verschiedener Objekte, die mit verschiedener Linienstärke dargestellt wurden, nicht unmittelbar erfaßt wird, kann sie auch aus dem Kontext und/oder keilförmigen Verbindungslinien entnommen werden.

5.4.2 Flächen im Raum

Was für Linien und deren Ausrichtung im Raum gilt, hat auch für Flächen grundsätzlich Gültigkeit: Beim Abtasten einer vertikalen Fläche hängt die hierzu aufzubringende Kraft auch von der Abtastrichtung ab. Daher können unterschiedlich ausgerichtete Flächen in der taktilen Zeichnung mit unterschiedlichen Texturen belegt werden, die der tastenden Hand einen richtungsabhängigen Widerstand entgegensetzt.

Natürlich können auch beliebige tastbare Muster für die jeweiligen Schräglagen im Raum als Symbole verwendet werden. Holmes hat in entsprechenden Versuchen nachgewiesen, daß die Verwendung von unterschiedlichen Texturen als Indikator für die Schräglage von Flächen im Raum dienen kann [HOLMES 93]. Leider ist auch für diese Darstellung Schwellpapier wenig geeignet, da es kaum feine flächige Strukturen abbilden kann.

Andererseits böte sich hier die Möglichkeit, auch sphärische Formen anhand von Textur-Übergängen abzubilden. Das würde bedeuten, die Textur einer Fläche in der Zeichnung abhängig vom Gradientenverlauf der dargestellten Form z.B. von grob nach fein verlaufen zu lassen. Geht man von einer punktierten Rasterung der Fläche aus, so könnte der Punktabstand den Winkel im Raum darstellen und die Punktgröße den Abstand zur Papierebene (große Punkte = nah, kleine Punkte = fern).

Auch bei dieser Kodierung ist natürlich der zusätzliche Aufwand für das Dekodieren beim Erfassen der Zeichnung zu berücksichtigen. Außerdem verhindert eine Nutzung der Fläche von gezeichneten Polygonen für die Kodierung ihrer Ausrichtung im Raum, sie anders, z.B. als flächig hervorgehoben, zu kennzeichnen.

5.4.3 Technische Apparate zur Lageidentifizierung im Raum

Eine besonders elegante Variante der Abbildung der Schwerkraft bei taktilen Zeichnungen wäre die eigentliche Ausübung entsprechender externer Kräfte auf die tastende Hand. Hierfür böten sich Geräte in der Art des Pantograph an [RAMSTEIN & HAYWARD 94].

Auch könnte man weitere Modalitäten zur Darstellung von in den Raum hinein ragenden Linien und Flächen beim Ertasten verwenden: Sprache oder Töne könnten entsprechende Informationen liefern.

Beide Verfahren setzen jedoch voraus, daß die Grafik nicht für sich, sondern im Rahmen eines mehr oder weniger aufwendigen apparativen Umfelds erfaßt wird. Daher sei für weitere Überlegungen in dieser Richtung auf Kapitel 9 dieser Arbeit verwiesen.

5.4.4 Der eigene Standort im Raum

Bei den Betrachtungen zur Repräsentation der dritten Dimension in (taktilen) Zeichnungen im Rahmen dieses Kapitels ist implizit davon ausgegangen worden, daß es sich bei dieser dritten Dimension um räumliche Vertikale handelt. Die meisten Zeichnungen für Sehende sind im Gegensatz dazu so gestaltet, daß die Bildfläche vertikal im Raum steht und die dritte Dimension die Tiefe des Raumes (in horizontaler Richtung) ist.

Visuelle Zeichnungen sind aus der Perspektive des Zeichners oder des gedachten Betrachters erstellt worden. Die wichtigste Perspektive für Sehende ist die horizontale. Schon aus

der Bedeutung des Wortes heraus²⁵ und aufgrund seiner etymologischen Wurzeln wird die enge Verknüpfung mit dem Sehsinn deutlich. Es stellt sich die Frage, ob Blinde ebenfalls über eine (nicht-visuelle) „Perspektive“ verfügen.

Um sich in der realen Umwelt bewegen zu können, müssen sich auch Blinde eine Vorstellung (ein „mentales Modell“) von ihrer Umwelt und ihrer eigenen Position darin machen. Also kann man sicher davon ausgehen, daß das Konzept des eigenen Standorts auch Blinden vertraut ist.

Eine Perspektive im Sinne eines Blickwinkels und einer Blickrichtung haben sie jedoch nicht. Dies schließt eine zweckgebundene „Haupterfassungsrichtung“ natürlich nicht aus; eine solche ist für die Mobilität sogar unabdingbar. Die Wahrnehmung ihrer Umwelt ist für Blinde jedoch nicht primär durch den Sehsinn mit seiner „Blickrichtung“ bestimmt sondern durch das Gehör und den Tastsinn. Das Gehör nimmt Umweltgeräusche aus allen Richtungen wahr; und der Tastsinn ist zwar praktisch auf die vordere Hemisphäre des Körpers beschränkt, ist aber durch die sequentielle Natur seiner Wahrnehmungen nicht einer bestimmten Richtung zuzuordnen.

Daraus ergibt sich, daß ein Konzept der Umwelt und des eigenen Standortes sehr wohl existiert, dies aber nicht an irgendeine Richtung („Perspektive“) gebunden ist. Vielmehr existiert das mentale Modell der Umwelt in ihren wahrgenommenen Eigenschaften, und in ihr existiert die eigene Person. Von Blinden wurde diese Art der Wahrnehmung als „objektive“ Wahrnehmung bezeichnet.

Bevor sich ein Blinder ein Bild von einem Gegenstand machen kann, muß er ihn ganz erfaßt haben. Bei tragbaren Gegenständen geschieht dies meist dadurch, daß er in alle Richtungen gedreht und von allen Seiten abgetastet wird. Infolge dessen entfällt auch hier der Bedarf an einem eigenen Standort. Etwas anders verhält es sich bei befestigten Gegenständen wie Schränken und Wänden. Sie können nicht „von allen Seiten“ wahrgenommen werden, indem sie gedreht werden. Hier werden die räumlichen Ausrichtungen zwar festgestellt, aber dadurch, daß sich die Position des Abtastenden ändert, entfällt die „Perspektive“ wiederum.

Wie gezeigt wurde, gibt es keine Präferenz für eine Haupterfassungsrichtung. Daraus ließe sich ableiten, daß es keine Rolle spiele, welche Dimension als „dritte“ (die Tiefe) ausgewählt und bei Zeichnungen entsprechend gekennzeichnet würde. In vielen Fällen ist dies auch richtig. Im Zweifel und bei zusammengesetzten Szenen kommt jedoch ein Aspekt hinzu, der als eine Form von „kultureller Prägung“ bezeichnet werden könnte: In der Schule und im Mobilitätstraining kommen die Schüler meist mit taktilen Grafiken realer Szenen in Form von Landkarten in Berührung. Diese sind naturgemäß „von oben“ gestaltet. Entsprechend gehen viele Blinde mit der Erwartung an taktile Grafiken realer Gegenstände heran, daß sich die Abbildungsfläche parallel zur horizontal wahrgenommenen Erdoberfläche befindet. Das trifft insbesondere dann zu, wenn sich die Zeichnung horizontal auf einem Tisch (oder einem Grafiktablett, siehe Abschnitte 7.2 und 8.2) befindet.

Daraus läßt sich ableiten, daß Blinde sehr wohl ein Konzept vom eigenen Standort im Bezug auf die dargestellte Szene haben. Demzufolge existiert auch die Notation von näher und ferner für Objekte und Objektteile in der Szene. Daraus kann man aber nicht ableiten, daß keilförmige Linien (o.ä.) für Kanten, die im Raum von nah nach fern laufen, verwendet werden sollen. Diese sollten vielmehr stets für Linien verwendet werden, die im Raum von oben nach unten verlaufen. Dadurch kann die entstehende Zeichnung für Sehende schwie-

²⁵ **Per|spek|ti|ve** [...w^e] *die*; -, -n: 1. Betrachtungsweise, -möglichkeit von einem bestimmten Standpunkt aus; Sicht, Blickwinkel [LexiROM2]

riger zu interpretieren sein. In der Praxis kommt es allerdings sehr häufig vor, daß Szenen „von oben“ dargestellt werden, so daß „nah“ mit „oben“ und „fern“ mit „unten“ zusammenfallen.

5.5 automatische Bewertung der Zeichnungen

Die in den Abschnitten 5.3 und 5.4 beschriebenen Abbildungsverfahren können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen: Einerseits können verschiedene Verfahren auf die einzelnen Objekte zur Darstellung angewendet, andererseits auch in unterschiedlicher Weise eingesetzt werden. Die Ergebnisse unterscheiden sich im Umfang der dargestellten Information (=Anzahl der grafischen Primitive) und durch den Manipulationsaufwand, der getrieben werden mußte, um diese 2D-Elemente zu erhalten und in der Fläche abzubilden.

Um aus der großen Menge der möglichen Darstellungen diejenigen herauszufiltern, die haptisch gut zu erfassen sind, müssen die Ergebnisse (die Darstellungen) bewertet werden. Hierzu eignet sich natürlich ein erfahrener Entwerfer haptischer Zeichnungen besonders gut, sei er nun blind oder sehend. Es ist aber auch möglich, automatisch eine Bewertung der Grafik zu erstellen, indem man Heuristiken einsetzt, die bei der Gestaltung haptischer Grafiken schon verwendet werden.

In jedem Fall muß auf den individuellen Endbenutzer, also den blinden Erfasser der Grafik, eingegangen werden. Auf die Bedeutung dieses Aspekts wird im Abschnitt 5.6 näher eingegangen.

5.5.1 Anforderungen an Bewertungskriterien

Eine Grafik ist dann gut gestaltet, wenn sie ihren *Zweck* erfüllt. Dieser Zweck kann unterschiedlicher Natur sein und ist dem 3D-Modell, das der Grafik zugrunde liegt, im allgemeinen nicht zu entnehmen. Man kann allerdings davon ausgehen, daß Grafiken räumlicher Gegenstände zumindest *auch* den Zweck haben, das Erfassen der räumlichen Szene zu erleichtern. Daher erscheint es angemessen, weitergehende Zwecke der Grafik zunächst zu ignorieren.

Die Grafik muß so gestaltet sein, daß erkannt werden kann, *welche Gegenstände* sich in der Szene an *welchen Orten* befinden und welche räumlichen Beziehungen sich daraus ergeben. Die gleiche Forderung läßt sich rekursiv auch wieder auf die einzelnen Gegenstände anwenden: Man muß erkennen können, aus welchen Teilen sie bestehen, und wie diese angeordnet sind.

Eine vollständige Darstellung aller Elemente und Teile in der Ebene führt im allgemeinen zu Zeichnungen, die nicht mehr erkennbar sind, weil die ursprünglichen 3D-räumlichen Beziehungen zwischen den Elementen durch die Vielzahl von geometrischen Transformationen aufgelöst wurden. Es gilt also auch, daß möglichst wenige Manipulationen am 3D-Modell vorzunehmen sind. Auch sollte es vermieden werden, viele verschiedene Verfahren einzusetzen, da vor einer mentalen Rekonstruktion der Szene das Darstellungsverfahren erkannt werden muß. Die Forderung nach geringen Manipulationen widerspricht derjenigen nach Vollständigkeit.

Für die Bewertung haptischer Zeichnungen bedeutet dies, daß eine hohe Bewertung erfolgt, wenn

- viele Gegenstände und Einzelteile der Szene erkennbar sind
- viele räumliche Beziehungen erhalten bleiben und erkennbar sind
- wenige Darstellungsverfahren angewendet werden

- wenige Transformationen das 3D-Modell manipulieren.

Die Bewertungskriterien müssen außerdem individuell adaptierbar sein.

5.5.2 Ein prototypischer Kriterienkatalog

Ein Kriterienkatalog, der die Bewertung einer Zeichnung anhand des Ergebnisses und der zu seiner Erreichung notwendigen Transformationen beim Durchlauf der Rendering Pipeline gestattet und den Anforderungen aus 5.5.1 genügt, kann beispielsweise so aufgebaut werden:

l_0 : Anzahl der dargestellten Linien, die auch im Modell als Linien bzw. Kanten vorhanden sind.

f_0 : Anzahl der Flächen, die als solche (unverzerrt) dargestellt sind.

k_0 : Anzahl der Flächen, die als Kanten-Linie (von der Seite) dargestellt sind.

r_g : Anzahl der (ggf. mehrfach) rotierten (geklappten/gespreizten) Objekte unter Berücksichtigung der Rotationsgeneration g

p_0 : Anzahl der Punktkopien, die durch das Auffalten ursprünglich geschlossener Körper entstanden (Topologie-Verletzungen).

t_0 : Anzahl der Verschiebungen (Transformationen).

s_0 : Anzahl der Schnittkanten.

d_0 : Die Tatsache, ob die räumliche Tiefe der Szene dargestellt wird.

Die hier aufgeführten Größen lassen sich (bis auf d_0) durch einfaches Abzählen der dargestellten Elemente und der in das Modell eingefügten Knoten ermitteln. Da diese Größen die Gesamtbewertung unterschiedlich stark beeinflussen können, werden sie mit jeweils einer Gewichtsfunktion ω normiert. Diese Gewichtsfunktion kann auch das Benutzerprofil (siehe 5.6) berücksichtigen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um Faktoren, die mit den einzelnen Größen multipliziert werden und so den Wert der Einzelkriterien festlegen.

Als brauchbar haben sich dabei Gewichtsfunktionen ω erwiesen, die sich auf Gewichtungsfaktoren w abstützen:

$$\text{Linienzahl: } l = \omega_l(l_0) = w_l l_0 \text{ mit } w_l = 1 \quad (5-1)$$

$$\text{Flächenzahl: } f = \omega_f(f_0) = w_f f_0 \text{ mit } w_f = 2 \quad (5-2)$$

$$\text{Kantenzahl: } k = \omega_k(k_0) = w_k k_0 \text{ mit } w_k = 1 \quad (5-3)$$

$$\text{Zahl der Topologie-Verletzungen: } p = \omega_p(p_0) = w_p p_0 \text{ mit } w_p = 1 \quad (5-4)$$

$$\text{Transformationszahl: } t = \omega_t(t_0) = w_t t_0 \text{ mit } w_t = 1 \quad (5-5)$$

$$\text{Schnittkantenzahl: } s = \omega_s(s_0) = w_s s_0 \text{ mit } w_s = 1 \quad (5-6)$$

$$\text{Rotationszahl: } r = \omega_r(r_g) = \sum_g r_g 2^{g-1} \quad \text{mit } g = \text{Rotationsgeneration} \quad (5-7)$$

Die Rotationsgeneration ist 1 für alle Flächen/Linien, die aus ihrer ursprünglichen räumlichen Lage einmal heraus rotiert wurden. Das betrifft auch alle Teilobjekte, die an einem um seine Kante/Endpunkt rotierten Objekt hängen. Werden diese indirekt mit dem Zentralobjekt verbundenen Teilobjekte selbst um eine ihrer Kanten/Eckpunkte rotiert, um ebenfalls in die Ebene transformiert zu werden, gehört die nun zusätzlich eingefügte Rotation zur zweiten Generation. Entsprechend werden weitere Rotationsgenerationen definiert. Die Gewichtsfunktion ω_r gewichtet die Rotationen späterer Generation wesentlich schwerer als die früherer. So wird sichergestellt, daß Objekte nicht bis zur Unkenntlichkeit ausgefaltet werden.

Schließlich muß die Vollständigkeit der Darstellung bezüglich der Tiefeninformation berücksichtigt werden. Hierzu dient der Faktor d :

$$d = \begin{cases} 1, & \text{falls in die Tiefe ragende Linien dargestellt sind} \\ 0,5 & \text{sonst (alle dargestellten Linien sind im Original parallel zur Darstellungsebene)} \end{cases} \quad (5-8)$$

Die normierten Größen fließen dann in die Formel zur Ermittlung der Bewertung B ein:

$$B = (l + f + k)d - (r + p + t + s) \quad (5-9)$$

Der Teilausdruck $(l + f + k)$ steht dabei für die Vollständigkeit, der Teilausdruck $(r + p + t + s)$ für die Modellmanipulation. Die Bewertung gemäß (5-9) liefert eine Zahl, die als Maß für die Qualität der erzeugten Darstellung dienen kann: Je größer diese Zahl ist, desto mehr werden die Anforderungen an Bewertungskriterien (vgl. Abschnitt 5.5.1) erfüllt, d.h. desto besser ist die Zeichnung haptisch erfaßbar. Durch die Möglichkeit, in den Gewichtsfunktionen die Gewichtungsfaktoren frei zu wählen, ist die Formel individuell an die Bedürfnisse einzelner (blinder) Erfasser anzupassen.

Tabelle 5-1 Drei Versionen einer Würfeldarstellung mit ihren Bewertungen

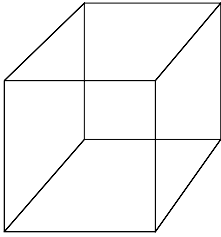
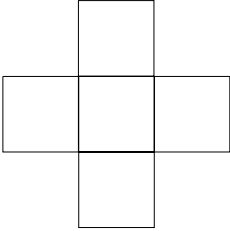
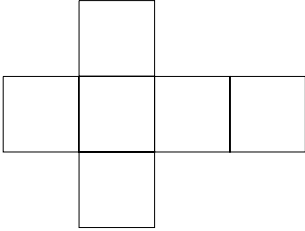
		
a) 	b) 	c) 
Original (nicht aufgefaltet)	teilweise aufgefaltet	komplett aufgefaltet
Flächenzahl $f_0 = 1 \Rightarrow f = 2$	Flächenzahl $f_0 = 5 \Rightarrow f = 10$	Flächenzahl $f_0 = 6 \Rightarrow f = 12$
Tiefendarstellungsfaktor $d = 0,5$	Tiefendarstellungsfaktor $d = 1$	Tiefendarstellungsfaktor $d = 1$
Rotationsanzahl $r = 0$	Rotationsanzahl $r_1 = 4 \Rightarrow r = 4$	Rotationsanzahl $r_1 = 4; r_2 = 1 \Rightarrow r = 4 + 2 = 6$
Topologieverletzungen $p_0 = 0 \Rightarrow p = 0$	Topologieverletzungen $p_0 = 4 \Rightarrow p = 4$	Topologieverletzungen $p_0 = 6 \Rightarrow p = 6$
Bewertung $B = 2 \cdot 0,5 - 0 = 1$	Bewertung $B = 10 \cdot 1 - (4 + 4) = 2$	Bewertung $B = 12 \cdot 1 - (6 + 6) = 0$

Tabelle 5-1 zeigt die Bewertung von drei Methoden, mit dem angegebenen Kriterienkatalog einen Würfel darzustellen. Version a zeigt den nicht manipulierten Modellwürfel, von dem naturgemäß nur eine Fläche dargestellt werden kann; weil hier keine räumlichen Eigenschaften dargestellt werden, ergibt sich für die unvollständige Tiefeninformation der Faktor d zu 0,5. In Version b und c werden jeweils mehr Flächen dargestellt, woraus sich eine größere Vollständigkeit ergibt (10 bzw. 12); durch Manipulationen am Originalmodell (Rotationen der Flächen) ergibt sich ein zu subtrahierender Wert von 8 bzw. 12. Die Rotation der zweiten Generation im Fall c erzeugt einen so hohen Abzug, daß der Vollständigkeitsvorsprung gegenüber b mehr als aufgehoben wird.

Der hier vorgeschlagene Kriterienkatalog erscheint auf den ersten Blick komplex. Durch die Einfachheit der hier verwendeten Gewichtsfunktionen ω wird diese scheinbare Komplexität allerdings ausgeglichen. Die relativ hohe Zahl von Einzelkriterien ermöglicht eine sehr feinkörnige Justierung der gewünschten Bewertung. In der Praxis hat sich jedoch

gezeigt, daß eine relativ einfache Variation der Gewichtung der Rotationszahl zu brauchbaren Ergebnissen führt.

Nach der automatischen Bewertung einer initialen Darstellung ohne Einfügung von Transformationsknoten in den Modellbaum können nun systematisch einzelne Flächen und/oder Linien des Ursprungsmodells in die Darstellungsebene rotiert werden. Dabei wird die Bewertung der sich ergebenden Zwischenergebnisse mit der der initialen Darstellung verglichen. Sobald ein Zwischenergebnis signifikant schlechter ist als die initiale Darstellung, kann die Generierung weiterer Darstellungen auf der Basis dieser (schlechten) Zeichnung abgebrochen werden. Dadurch hält sich die kombinatorische Komplexität in Grenzen.

Wenn die Bewertung manuell auf Grundlage der Einstellungen des Benutzers erfolgt, ist das Ergebnis einerseits per Definition angemessen, andererseits stehen die Einstellungen auch für das Benutzerprofil zur Verfügung, das im folgenden Abschnitt behandelt werden soll.

5.6 Benutzerprofil

Verschiedene Untersuchungen (u.a. mit TDraw, Kapitel 8.2, aber auch [Kennedy 93]) haben gezeigt, daß die Gruppe der Blinden auch in Hinsicht auf ihre Vorlieben bei räumlichen Zeichnungen nicht homogen ist. Beim Zeichnen werden die drei wichtigsten Techniken (Auffalten, Schneiden, Spreizen) in unterschiedlichem Maß angewendet. Manche Blinde kamen nur mit einer der Methoden Spreizen oder Auffalten zurecht.

Diese Unterschiede sind teilweise sicher darin begründet, daß bislang keine einheitliche Ausbildung Blinder für den Umgang mit Grafiken praktiziert wird. Während Sehende in der Schule und während ihrer allgemeinen Sozialisation mit perspektivischen Zeichnungen umzugehen lernen, gibt es keine vergleichbare Ausbildung für Blinde. Da bisher auch noch keine allgemein anerkannten Richtlinien für den Entwurf taktiler Zeichnungen räumlicher Gegenstände existieren, erscheint eine entsprechende Ausbildung auch schwer konzipierbar zu sein. Festzuhalten bleibt, daß die meisten Blinden so gut wie keine Erfahrungen mit taktilen Zeichnungen räumlicher Gegenstände haben.

Daraus ergibt sich die Forderung, die individuellen Vorlieben und Möglichkeiten der Benutzer beim Rendern zu berücksichtigen. Diese müssen zunächst ermittelt und dann formalisiert gespeichert werden. Zur Ermittlung bieten sich (rechnergesteuerte) Befragungen an, aber auch die Auswertung des Zeichenvorgangs.

Im Einzelnen muß festgestellt werden, ob der Erfasser mit einer der Techniken überhaupt nicht zurechtkommt und wie stark die Techniken, die schließlich zur Anwendung kommen, ausgeprägt sein dürfen: *Wenn* Objekte aufgefaltet werden, sollen dann alle Flächen oder nur die an die Zentralfläche grenzenden aufgefaltet werden? Solche und ähnliche Fragen lassen sich relativ leicht beantworten, indem man dem Blinden verschiedene Versionen einer Zeichnung vorlegt und ihn selbst die bevorzugte auswählen läßt. Die Bewertungsparameter, die zu der ausgewählten Zeichnung gehören, werden gespeichert und stehen dann auch für andere Zeichnungen zur Verfügung. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß man für neue Zeichnungen die Bewertungsparameter der alten verwendet: Wurde bisher das Auffalten immer auf eine Rotationsgeneration beschränkt, so kann davon ausgegangen werden, daß dies auch in Zukunft so gewünscht wird.

Das Ergebnis ist eine Charakterisierung der Vorlieben des Blinden in Form einer Tabelle, die angibt, welche Technik in welchen Fällen wieweit geeignet ist. Diese Tabelle kann dann beim Rendering verwendet werden. Positiver Nebeneffekt der Personalisierung des Rende-

ringverfahrens ist die Verkleinerung des Suchraums für neue Lösungen. Da gewisse Darstellungsoperationen durch das Benutzerprofil die Bewertung der versuchsweise erzeugten Grafik massiv verschlechtern, werden sie nicht durchgeführt oder weiterverfolgt.

Da das Benutzerprofil allein aus den Bewertungsparametern akzeptierter Zeichnungen gewonnen wird, ist prinzipiell kein sehender Moderator zu seiner Erstellung nötig. Falls das Ergebnis der am Benutzerprofil orientierten automatisch generierten Zeichnung den Anforderungen nicht genügt, kann vom Blinden selbst die Ursache für diesen Mangel ermittelt und behoben werden. Dies ist möglich, weil sämtliche Parameter des Benutzerprofils sich in den aktuellen Bewertungsparametern wiederfinden.

So kann trotz einer halbautomatischen Optimierung die volle Flexibilität des Verfahrens erhalten werden.

5.7 Bedeutung des Kontexts

Die Tatsache, daß es verschiedene und insbesondere verschiedenartige Benutzer, also Erfasser von Grafiken, gibt, ist *ein* Aspekt des Bezugsrahmens, in dem jede Wahrnehmungshandlung abläuft und in dem auch jede Grafik sich befindet. Zwei weitere Aspekte, die in diesem Zusammenhang für die Gestaltung und die Wahrnehmung von Grafiken von Bedeutung sind, sollen in diesem Abschnitt behandelt werden: *Der Kontext, in dem eine Grafik steht*, ist nicht nur im konstruktivistisch-materialistischen [FEYERABEND 74, SNETLING 97] Sinn ein sozialer Kontext, der die Wahrnehmung einer Grafik und damit das Erfassen ihres Inhalts bestimmt. Viel unmittelbarer ist das lokale Umfeld, in dem eine Grafik steht und in dem sie wahrgenommen wird, von Bedeutung (siehe 5.7.1). Im Abschnitt 5.7.2 wird die *Grafik selbst als Bezugsrahmen* für die in ihr dargestellten Gegenstände und deren Wahrnehmung untersucht.

5.7.1 Bild im Kontext

Jede Grafik steht in einem Zusammenhang mit ihrer Umgebung. Aus der Umgebung kommend hat der Erfasser eine bestimmte Erwartungshaltung, wenn er die Grafik vorfindet und untersucht. Auf einer Grafik, die ohne ihren Kontext präsentiert wird, ist das Dargestellte oft nicht oder nur schwer zu erkennen. Das gilt für Sehende wie auch für Blinde.²⁶

Im Einzelnen kann man verschiedene Kontext-Formen unterscheiden, in denen Grafiken vorkommen können. Neben *Text* spielt *Virtual Reality* eine immer wichtigere Rolle als Bezugsrahmen für grafische Information. Neben diesen zwei Beispielen soll hier nur noch auf scheinbar „*kontext-frei*“ Erscheinungsformen von Grafiken eingegangen werden.

Bei informierenden gegenständlichen Zeichnungen, wie sie hier behandelt werden, ist die Umgebung (der Kontext) sehr häufig textueller Natur. Texte in Büchern oder online enthalten oft Grafiken als wesentliche Elemente der Informationsdarstellung. Diese Texte bereiten den Benutzer (Leser) auf die Zeichnung vor, auf die sie sich andererseits später beziehen. Oft enthält der Text sogar Erläuterungen des grafisch Dargestellten. Die Rolle der Grafik innerhalb solcher Texte ist entweder illustrierender oder komplementärer Art.

Im Falle einer Illustration dient die Grafik lediglich zur Unterstützung eines textuell formulierten Arguments, das durch die grafische Präsentation leichter verständlich wird, das aber prinzipiell auch ohne sie verstanden werden kann. Wichtiger ist der Fall, in dem im Text auf Elemente der Grafik als Teilargument verwendet werden. Text und Grafik ergänzen sich hier zu einem Gesamtargument: Der Text ist ohne Grafik nicht verständlich, und die

²⁶ Man denke nur an Fotos auf der Rätselseite von Magazinen, die aus ungewöhnlichen Perspektiven aufgenommen wurden und mit der Frage „Was ist das?“ betitelt werden.

Grafik allein sagt nichts aus. Im folgenden Kapitel 6.4 wird auf die synergetische Wirkung von Text und Grafik ausführlicher eingegangen.

In *Virtual Reality*-(VR)Anwendungen bildet die 3D-Umgebung selbst den Kontext ihrer Elemente und Teilobjekte. Durch das aktive Eintreten in die VR-Umgebung (Immersion) ist dem Benutzer klar, in welcher Umgebung er sich befindet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „virtuellen *Welten*“. Der Begriff „Welt“ ist hier bewußt gewählt worden. Er trifft in allen seinen drei Bedeutungen auf die künstlichen modellierten Szenen zu, die in der Informatik virtuelle Welten heißen:

1. Als „Inbegriff alles Seienden“ [LEXIROM 96] bezeichnet der Begriff die Vollständigkeit der Szene, zu der neben den geometrischen Modellen Verhaltenspotentiale dieser Gegenstände gehören und schließlich auch der Benutzer selbst, der in die Szene eingetaucht ist und nun Teil dieser virtuellen Welt ist. Der Übergang von der Grafik zu deren Kontext ist hier fließend: Die grafisch dargestellten Gegenstände stehen im Allgemeinen für sich selbst. Allerdings sind die Modelle selbst und insbesondere deren Verhaltenspotentiale nicht an die Regeln der realen Welt gebunden. Sie können vom Entwickler der virtuellen Welt frei gestaltet werden, was es auch ermöglicht, einen Gegenstand nicht nur für sich selbst, sondern auch als Verweis auf beliebige andere Objekte zu verwenden.
2. Ein „in sich geschlossener (Lebens-)Bereich“ [LEXIROM 96] ist eine virtuelle Welt, weil sie nur in ihrer Laufzeitumgebung existiert, z.B. einem Hochleistungsgrafikrechner. Als solche kann die VR-Welt von außen beobachtet und gesteuert werden. Ihre Begrenztheit bedingt gleichzeitig die Begrenztheit möglicher Interpretationen für in ihr enthaltene Grafiken oder grafische Elemente. In virtuellen Welten kann der Entwickler für diese grafischen Elemente einerseits einen sehr großen Kontext schaffen, diesen aber andererseits stets kontrollieren, da virtuelle Welten letztlich immer endlich sind.
3. „Als Gegensatz zur religiös-sakralen Sphäre das Profane“ [LEXIROM 96] ist eine virtuelle Welt aus der Sicht ihres Schöpfers/Entwicklers. Insbesondere da die virtuelle Welt seinen Regeln gehorcht und sich die Gegenstände der Welt wie auch ihre Verhaltenspotentiale von ihm manipulieren lassen, ergibt sich für den Entwickler eine Verantwortung für diese Welt, die auch für die Rolle der VR-Welt als Kontext für in ihr enthaltene grafische Elemente gilt.

Bis virtuelle Welten allerdings soweit verbreitet sind, daß sie auch nicht-visuell zugänglich sein sollten, müssen noch einige Probleme gelöst werden, die mit der Parallelität der Wahrnehmung von realen und dargestellten Gegenständen und Szenen zu tun haben: Nach heutigem Kenntnisstand sollte bei der Gestaltung von Darstellungen realer Gegenstände deren Erfassen dem Erfassen der realen Gegenstände so ähnlich wie möglich sein. Für Sehende bedeutet dies, daß virtuelle Welten vor allem visuell überzeugen müssen, während für Blinde akustische und haptische Eigenschaften der virtuellen Welt denen der realen Welt ähnlich sein sollten.

Als Teil einer virtuellen Welt ist die Grafik extrem stark in einen Kontext eingebunden. Das andere Extrem stellt die oben erwähnte scheinbar „kontext-freie“ Grafik dar: Aber sogar wenn die Grafik für sich steht, etwa in einer musealen Umgebung, ist sie Teil eines Kontexts, nämlich der Ausstellung (mit deren Thema), zu der sie gehört. Gerade in solchen Fällen haben Grafiken in der Regel einen Titel²⁷ oder eine Beschriftung, die beim Erfassen der Grafik unterstützen und ein Thema als Kontext vorgeben.

²⁷ An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, daß es hier *nicht* um künstlerische Werke gehen kann oder soll. Diese sind bekanntlich mit oder ohne Titel oft schwer zu erfassen.

Der Kontext der Grafik steuert also Informationen zur Wahrnehmung auf kognitiver Ebene bei. Daher kann die Grafik selbst oft vereinfacht werden, ohne daß ihre Erkennbarkeit im jeweiligen Zusammenhang leidet. Vier Kreise in einem Quadrat werden im Rahmen eines Küchenprospekts als Herd bzw. Kochmulde interpretiert, während sie im Zusammenhang mit Gesellschaftsspielen als die vier Punkte auf dem Spielwürfel interpretiert werden könnten.

5.7.2 Kontext im Bild

Im Zusammenhang mit haptischen Grafiken ermöglicht diese Wahrnehmungsunterstützung durch den Erfassungskontext, daß auf einige Details, auch auf solche, die Tiefeninformationen betreffen, in der Darstellung verzichtet werden kann, wenn der Gegenstand auch ohne sie erkennbar ist. Kommt der Tiefeninformation dagegen essentielle Bedeutung für den Informationsgehalt des Bildes zu, so darf sie natürlich nicht weggelassen werden. Dafür kann in solchen Situationen möglicherweise der Gegenstand selbst weniger detailliert dargestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Vereinfachung der geometrischen Primitive (siehe Abschnitt 0).

Aus den gleichen Gründen ist die Bedeutung eines Kreises am oberen Ende einer Flasche klar, weil sich dort in der Regel deren (kreisrunde) Öffnung finden läßt. Verallgemeinert läßt sich feststellen, daß beim Erfassen von Grafiken eine Arbeitshypothese über die Natur des gerade untersuchten Gegenstands die Wahrnehmung zusätzlich erfaßter Einzelteile nutzbringend unterstützt.

Diese Überlegung, die durch verschiedene Beobachtungen unterstützt wird (siehe auch Kapitel 8), führt zu folgender Erkenntnis: Je komplexer die dargestellte Szene ist, desto einfacher können die in ihr vorhandenen Einzelgegenstände abgebildet werden.

Dadurch lösen sich einige Probleme, die beim haptischen Rendern auftreten könnten: Da die Auflösung des Tastsinns nicht sehr hoch ist (siehe 2.2), ist die Anzahl der detailliert darstellbaren Gegenstände recht klein. Weil aber andererseits ein Gegenstand in seinem Kontext auch ohne viele Details erkannt werden kann, bereitet auch eine große Anzahl von Objekten in einer komplexen Szene keine Probleme.

Eine sehr weitreichende Form der Vereinfachung von Zeichnungen stellt die Ikonisierung dar (engl. iconize = zum Sinnbild vereinfachen/verkleinern). Vereinfacht man die Abbildung eines bestimmten Tisches immer mehr, so erhält man schließlich das Bild irgendeines (beliebigen) Tisches, sein Sinnbild bzw. die Ikone eines Tisches. Sinnbilder sind Symbole für Begriffe, die meist auch sprachlich ausgedrückt werden können. Daraus ergibt sich die Frage, ob statt grafischer Symbole nicht auch textuelle Elemente die Funktion der Darstellung in der Zeichnung übernehmen könnten.

Diese Frage läßt sich auf dreierlei Weise beantworten: Erstens stellt Text ein anderes Medium als Grafik dar und bietet andere Möglichkeiten als diese. Ein Gemisch verschiedener Medien auf der taktilen Grafik führt zu Problemen sowohl bei der Platzaufteilung als auch beim späteren haptischen Erfassen.

Zweitens enthalten auch einfache haptische Grafiken geometrische Informationen, die sprachlich nicht oder nur umständlich vermittelt werden könnten. Und selbst wenn ein Gegenstand nahezu zu einem Symbol vereinfacht wurde, trägt doch seine Position und Ausrichtung auf der Grafik ein hohes Maß an Information.

Drittens können und werden in der haptischen Rendering Pipeline textuelle Informationen *mit* der Grafik produziert und stehen bei geeigneter technischer Ausstattung (Tasttablett o.ä.) bei der Erfassung zusätzlich zu den grafischen Elementen zur Verfügung. Ein Ver-

bund der Medien „Grafik“ und „Text“ gestattet es, beide Formen für die Präsentation der jeweils für sie bestgeeigneten Informationen zu verwenden (Siehe auch Kapitel 6).