

Verdeckungskonturen, Schattierung und Glanzlichter

Analyse verschiedener Merkmale von Oberflächen und deren Extraktion

Wolfgang Schulz

ws5@informatik.uni-ulm.de

Perception of Surface Properties: Physics, Graphics and Vision
Universität Ulm

Abstract

Die Erkennung von Oberflächeneigenschaften, deren der Mensch „ohne Weiteres“ fähig ist, ist aktives Forschungsgebiet der Psychophysik¹ und der Computer Vision. Ein Ziel beider Disziplinen ist, einzelne visuelle Merkmale zu extrahieren, um Informationen über die Eigenschaften betrachteter Objekte, wie deren Material, Form oder Oberflächenbeschaffenheit zu erhalten. In dieser Ausarbeitung werden verdeckende Konturen (occluding contours), Glanzlichter (specular highlights), sowie Schattierung (shading) betrachtet. Herangezogen werden vornehmlich psychophysische Untersuchungen. Im Ausblick wird eine Anwendung der Computer Vision vorgestellt.

1 Einleitung

Der Mensch nimmt fortwährend visuelle Strukturen und Merkmale der von ihm betrachteten Umgebung auf. Solche Merkmale sind z.B. Oberflächenausrichtung, glänzende und diffuse Oberflächenreflexionen, Oberflächentexturen, verdeckende Konturen etc. Diese Merkmale werden durch allgemeine und spezielle Fähigkeiten der menschlichen Wahrnehmung, wie z.B. der kongruenten Bestimmung von Oberflächenreflektivität unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen (*Lightness constancy*) verarbeitet. Anschließend differenziert und identifiziert der Mensch einzelne Objekte und deren Eigenschaften.

In der Malerei werden seit Jahrhunderten visuelle Phänomene interpretiert und in Bildelemente einer Abbildung der wahrgenommenen Eindrücke umgesetzt. Dabei werden oft Schattierungsphänomene durch zeichnerische Effekte nachgeahmt. Glanzlichter werden z.B. durch helle (weiße) Farbstriche imitiert.

Für eine genaue Charakterisierung der visuellen Perception des Menschen ist es zunächst erforderlich, deren

¹Die Psychophysik untersucht Zusammenhänge von Reizen und von diesen ausgelösten Empfindungen des Menschen. Sie geht zurück auf G.T. Fechner und E.H. Weber, die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts Grundlagen gelegt haben.

Abläufe sowie ihre Abhängigkeit von bestimmten Faktoren zu erkennen (Psychophysik). Daraus können z.B. mit Hilfe der Computer Vision solche Abläufe maschinell nachvollzogen oder menschliche Fähigkeiten durch eine Präzisierung bzw. Fokussierung mittels Rechnerunterstützung gesteigert werden. Das verfolgte Ziel ist hier, aus Intensitätsinformationen des Netzhautbildes (vgl. Abb. 1) Informationen über Form und Material abgebildeter Objekte (vgl. Abb. 2) zu erhalten.

In den vergangenen Jahren sind verschiedene Algorithmen zur Bestimmung der Form aus Intensitätsinformationen entwickelt worden. Solche Verfahren führen Berechnungen beispielsweise auf der Grundlage verdeckender Konturen (Koenderink, 1984), anhand texturierter Muster (z.B. Malik und Rosenholtz, 1997) oder basierend auf Gradienten aus diffuser Schattierung (Horn und Brooks, 1989) durch. Zur Auswertung von Glanzlichtern existieren bisher nur vereinzelt Ansätze. Auf der anderen Seite ist die Bestimmung von Material noch wenig erforscht. Glanzlichter und Schattierungen sind potentielle Merkmale, um aus Intensitätswerten Informationen über Material abzuleiten.

2 Grundlagen

Ein betrachtetes Objekt lässt sich zunächst anhand seiner Geometrie bestimmen. In jeder lokalen Region der Oberfläche des Objektes ist die Orientierung der Region durch einen Normalenvektor festgelegt. Um dieses Objekt visuell wahrzunehmen, ist eine Beleuchtungsquelle (bestimmt durch Position, Orientierung, Intensität) erforderlich. Der Betrachter (oder Bildsensor) nimmt einen definierten Standort ein. Intensitäten auf dem Netzhautbild bzw. der Sensor-matrix ergeben sich aus diesen geometrischen und Beleuchtungseigenschaften. Daraus können die betrachteten Merkmale abgeleitet werden: Verdeckende Konturen sind in hohem Maße abhängig von der Geometrie, Glanzlichter und Schattierung ebenso von der Beleuchtung.

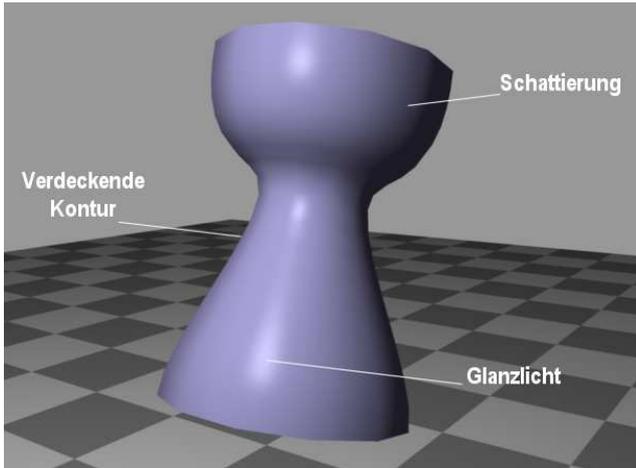


Abbildung 1: Dargestellt ist ein Objekt, das vor dem Hintergrund schwebt. Hier sind die visuellen Merkmale *Glanzlicht*, *Schattierung* und *verdeckende Kontur* zu erkennen. Sie leiten sich aus der fundamentalen Wechselwirkung zwischen der Lichtquelle (hier sind es mehrere Lichtquellen), den Oberflächeneigenschaften des Objekts und dem Standort des Betrachters ab. Einem menschlichen Betrachter ist die Form und Oberflächenbeschaffenheit des Objekts intuitiv verständlich. Ein naives System nimmt jedoch zunächst nur unterschiedliche Intensitäten wahr.

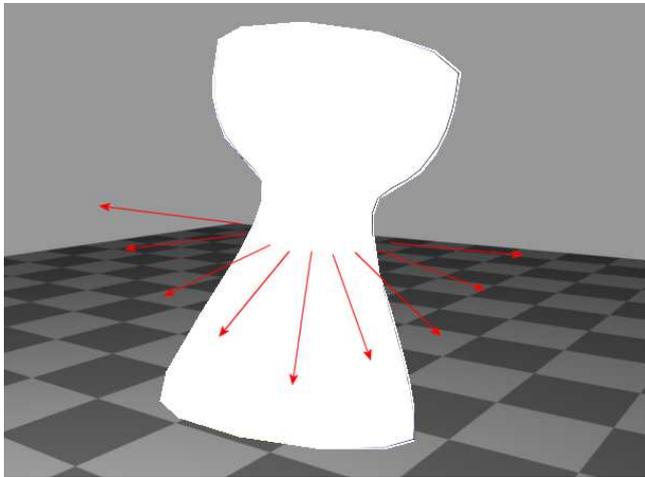


Abbildung 2: Das Objekt aus Abb. 1 ohne Intensitätsinformationen. Ergänzt sind Angaben zur Geometrie des Objekts, dargestellt durch Pfeile. Diese repräsentieren die Ausrichtung der Oberflächennormalen des Objektes. Die Pfeile verdeutlichen die runde *Form* des Körpers. Aus den Merkmalen (Glanzlichter, Schattierung) lassen sich Aussagen über das *Material* des Objekts ableiten. Anhand von Abb. 1 kann auf Plastik geschlossen werden.

2.1 Lambert'sches Gesetz

Trifft das Licht einer Lichtquelle auf die Oberfläche eines Körpers, so reflektiert dieser das Licht. Die Reflektivität einer Oberfläche bestimmt, in welchem Maße das einfallende Licht reflektiert wird. Die Intensität des reflektierten Lichtes wird als Luminanz L bezeichnet, sie wird aus der Intensität I der einfallenden Beleuchtung (Illuminanz) und der Oberflächenreflektivität R gebildet. Es gilt die einfache Formel:

$$L = R \cdot I \quad (1)$$

Der Wissenschaftler Johann Lambert fand heraus, dass der Ausfallswinkel mit dem Kosinus des Einfallswinkels variiert (LAMBERTSches Kosinusetz): Fällt das Licht auf eine Oberfläche, die senkrecht zum Lichtstrahl orientiert ist, so ist die Lichtenergie in einem kleinen Bereich konzentriert und von größerer Intensität als in Bereichen in, denen die Lichtstrahlen in einem kleineren Winkel (also schräg) auftreffen und sich dadurch über eine größere Fläche verteilen [4].

Die Reflektivität einer Oberfläche ist im Wesentlichen von folgenden Komponenten abhängig²: Diffuse Reflexionen, welche die Farbe der Oberfläche wiedergeben sowie spiegelnden Reflexionen, die sich aus der Farbe des einfallenden Lichtes bilden (s. Abb. 3).

2.2 Schattierung (*Shading*)

Matte Oberflächen werden auch als LAMBERTSche Oberflächen bezeichnet. Die Strahlen einer Lichtquelle, die auf ein solches Objekt einfallen, werden diffus in alle Richtungen gestreut. Ein Muster diffuser Schattierung variiert als eine Funktion der Oberflächenkrümmung [5]: die Helligkeit ergibt sich in jedem lokalen Punkt aus der relativen Orientierung zwischen der Oberfläche und ihrer Beleuchtungsrichtung.

Diffuse Komponenten der Oberflächenreflexion können wie nachstehend beschrieben werden. Folgende Formel wird auch zur Berechnung von Schattierungen in artifiziellen Bildern genutzt [6]:

$$L_d = d(\vec{I} \cdot \vec{N}), \quad (2)$$

mit $d > 0$ als einer Konstanten, welche die diffuse Oberflächenreflektivität des Objekts beschreibt (weißer Karton reflektiert beispielsweise 85% des einfallenden Lichts, schwarzer Karton typischerweise 10%). \vec{I} bezeichnet die Richtung (sowie die Intensität) des einfallenden Lichts, \vec{N} die Oberflächennormale.

²Häufig stellen Oberflächen Mischformen dar, bei denen sich die Komponenten der Reflektivität additiv ergänzen.

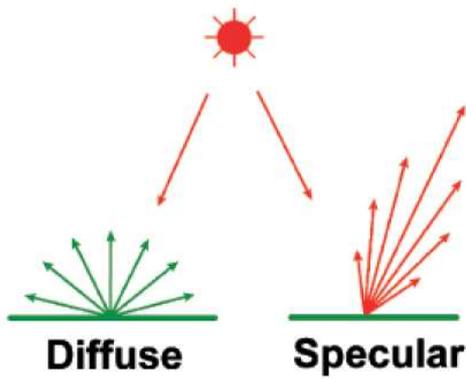


Abbildung 3: Diffuse und spiegelnde (*specular*) Reflexion von Oberflächen: diffuse Reflexionen geben die Farbe des Objekts (hier in grün dargestellt) wieder, spiegelnde Reflexionen die Farbe der Lichtquelle (hier rot) [5].

2.3 Glanzlichter (*Specular Highlights*)

Glänzende Oberflächen reflektieren spiegelnd (*specular*). Einfallende Lichtstrahlen werden kaum gestreut, die Helligkeit ist im Gegensatz zu derjenigen von matten Oberflächen anisotrop, d.h. abhängig vom Blickwinkel. Durch diese Abhängigkeit glänzender Oberflächen von ihrer Orientierung zur Lichtquelle im Betrachtungspunkt werden lokale Bereiche von großer Intensität, sogenannte Glanzlichter, erzeugt.

Spiegelnde (L_s) Komponenten der Reflektivität werden beschrieben durch:

$$L_s = s(\vec{H} \cdot \vec{N})^b. \quad (3)$$

$s > 0$ ist die Konstante der spiegelnden Reflektivität, \vec{H} der winkelhalbierende Vektor zwischen einfallendem Licht und der Richtung des Betrachters. Der Exponent b bestimmt den Sichtbarkeitsbereich des Glanzlichtes.

2.4 Oberflächen und deren Konturen

Eine Fläche, z.B. die Oberfläche eines Objektes, kann in der impliziten Form $F(x, y, z) = 0$ beschrieben werden. Ein Flächenpunkt wird durch $M(x, y, z)$ definiert. Für jeden Punkt M der Fläche kann die Krümmung mit der Formel von EULER berechnet werden [2]:

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \alpha}{R_1} + \frac{\sin^2 \alpha}{R_2} \quad (4)$$

R_1 und R_2 sind die Hauptkrümmungsradien, α ist der Winkel zwischen den Ebenen der Hauptnormalschnitte C_1 und C_2 (s. Abb. 4).

Die Krümmung einer Fläche in einem Punkt M kann weiterhin mit der GAUSSSchen Krümmung (als dem Pro-

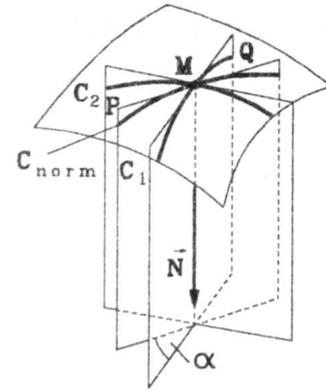


Abbildung 4: Berechnung der Krümmung einer Fläche am Beispiel des Krümmungsradius der Kurve C zwischen den Ebenen der Hauptnormalschnitte C_1 und C_2 [2].

dukt der beiden inversen Hauptkrümmungsradien) beschrieben werden:

$$K = \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (5)$$

mit R_1 und R_2 (s.o.).

Ist $K > 0$, so ist die Oberfläche in dem Punkt M elliptisch oder *synklastisch*, d.h. in allen Richtungen gleichartig gekrümmt. Für $K < 0$ ist die Krümmung in M hyperbolisch oder *antiklastisch*, d.h. in einigen Richtungen verschieden von anderen Richtungen. Die Krümmung für $K = 0$ ist parabolisch oder *monoklastisch*, also lokal zylindrisch oder planar³ (s. Abb. 5) [2].

2.5 Unterscheidung einzelner Merkmale

Fällt das reflektierte Licht auf die Netzhaut des Menschen oder das Pixelarray einer Kamera, so werden unterschiedliche Intensitätswerte wahr- bzw. aufgenommen. Diese Intensitäten geben Strukturen der abgebildeten Umgebung wieder. Solche Strukturen können z.B. Konturen, schattierte Flächen etc. sein. Um die entstandenen Intensitätseindrücke interpretieren zu können, müssen den Helligkeitsänderungen einzelne Ursachen zugeordnet werden. Es können als ursächliche Komponenten erkannt werden:

- Variationen in der Oberflächenorientierung relativ zum Beobachter und zur Lichtquelle (Oberflächenkrümmung)
- Variationen in der diffusen Komponente der Oberflächenreflexion

³für den Fall $R_1 = R_2 = \infty$ handelt es sich um eine Ebene

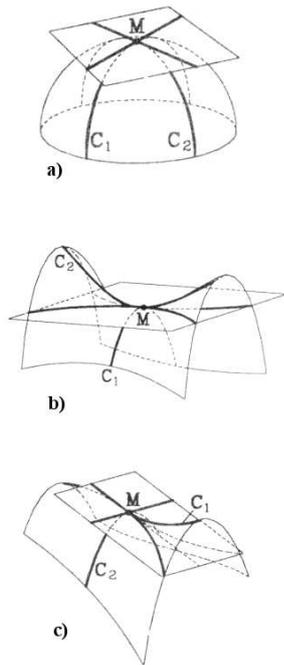


Abbildung 5: Darstellung eines a) elliptischen, b) hyperbolischen, c) parabolischen Flächenpunktes M [2].

- Variationen in der spiegelnden Komponente der Oberflächenreflexion

Unterschiedliche Muster diffus reflektierender Oberflächenregionen setzen sich zu einer Textur zusammen, welche somit ein abgeleitetes Merkmal ist. Weitere schwieriger einzugrenzende und hier nicht weiter betrachtete Merkmale sind:

- Lichtabschwächung aufgrund der Entfernung zur Lichtquelle
- Lichtreflexionen zwischen Objekten
- Halbschatten durch Schattenwurf
- usw.

Nachdem die Komponenten analytisch differenziert wurden, ist der Folgeschritt, diese in einem Intensitätsbild zu erkennen und zu separieren. Ein Problem ist z.B. die Identifizierung von Glanzlichtern. Diese können beispielsweise auch bei selbstleuchtenden Oberflächen oder Beleuchtung durch eine punktförmige Lichtquelle entstehen. Diffuse und spiegelnde Komponenten der Reflexion können anhand ihrer chromatischen Struktur unterschieden werden. Bei vielen natürlichen Objekten geben diffuse Reflexionen die Chrominanz der Lichtquelle wieder, spiegelnde die der Oberfläche: Wird z.B. ein roter Apfel von einer weißen

Lichtquelle beleuchtet, so erscheint die diffuse Komponente rot, die spiegelnde Komponente dagegen weiß (vgl. Abb. 3).

3 Methoden zur Auswertung der betrachteten Merkmale

Bei einer Klassifizierung der Entwicklung von Methoden zur Merkmalsauswertung kann unterschieden werden zwischen (a) experimenteller Überprüfung von Fragestellungen zu Aspekten der Wahrnehmung (s. Abschnitte 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4) und (b) mathematischer Ableitung, hier insbesondere dem Einführen sinnvoller, nützlicher Beschränkungen. Eine derartige Beschränkung ist beispielsweise die Formulierung der Abhängigkeit einer Oberflächenform von der Gestalt (den Krümmungseigenschaften) ihrer Silhouette (s. Abschnitt 3.5). In der Folge werden ausgewählte Methoden vorgestellt.

3.1 Einfluß von Glanzlichtern auf die Wahrnehmung von Oberflächenlanz

Im Vordergrund dieses Experiments stand die Frage, ob die Wahrnehmung des Glanzes von Oberflächen

- eine direkte und damit räumlich begrenzte Wirkung von Glanzlichtern (bzw. spiegelnder Reflexionen) oder
- eine von Glanzlichtern hervorgerufene, sich auf die gesamte Oberfläche des Objekts beziehende perzeptionelle Folgerung

ist.

Beck und Prazdny [1] haben experimentell Glanzlichter von Objekten entfernt und neue Glanzlichter hinzugefügt. Sie fanden heraus, dass Glanzlichter den sie umgebenden Bereich glänzend erscheinen lassen, jedoch nicht das gesamte Objekt. Die Autoren haben dafür einerseits die Größe der Glanzlichter, andererseits ihre Helligkeit erhöht und festgestellt, dass sich die als glänzend erscheinende Fläche entsprechend vergrößert⁴.

Als bedeutsam wurde weiterhin die Orientierung der Glanzlichter bemerkt. Die Autoren haben vertikale Glanzlichter gesetzt, die in der Richtung der minimalen Krümmung lagen und damit konsistent in der Wahrnehmung waren. Horizontale Glanzlichter, die in der Richtung der maximalen Krümmung gesetzt waren, bewirkten einen geringeren Glanz der Oberfläche [1].

Neben dem Vorhandensein von Glanzlichtern stellte sich die eines Intensitätsgradienten als entscheidend für die

⁴Beck und Prazdny gehen nicht näher darauf ein, inwiefern Größe und Helligkeit einzeln Einfluß haben bzw. in welchem Verhältnis die Eingangsänderungen zu den Ausgangsänderungen stehen.



Abbildung 6: Glanzlichter als Kriterium für Oberflächenglanz. (links:) Konsistente Glanzlichter, die entlang der minimalen Krümmung ausgedehnt sind, (rechts:) dieselben Glanzlichter in veränderter Position und Orientierung [6].

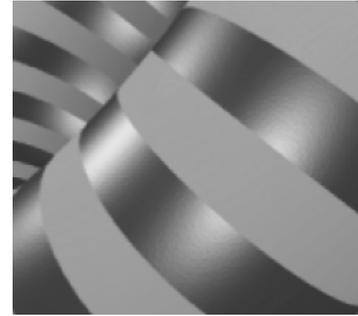


Abbildung 7: Ausschnitt eines Torus mit matten (hellgrau) und glänzenden (schwarz) Oberflächenabschnitten. Die Intensitäten spiegelnder Reflexionen auf dem schwarzen Band entsprechen in deren Zentrum annähernd der Farbintensität von weiß [6].

Wahrnehmung von Glanz heraus. Die Autoren fanden, dass die Art des Gradienten nicht genau passend sein muss, solange er die Form des Objektes (in deren Testfall die kurvige Oberfläche einer Vase) ausreichend wiedergibt.

Ähnlich haben Todd, Norman und Mingolla [6] Glanzlichter extrahiert, in ihrer Position und Orientierung verändert und erneut dem Objekt überlagert. Sie stellten fest: Sind die Glanzlichter nicht mehr konsistent mit der diffusen Schattierung bzw. verlaufen nicht mehr entlang der minimalen Oberflächenkrümmung, so wirkt sich diese Änderung auf den Glanz des Objektes abschwächend aus. Die Glanzlichter werden in dem Fall eher als Streulicht oder weiße Farbstriche wahrgenommen (s. Abb. 6). Die Autoren werteten diese Eigenschaft als einen Anhaltspunkt zur möglichen Nutzbarkeit von Glanzlichtern zur dreidimensionalen Formerkennung.

3.2 Wirkung von Glanzlichtern auf die Perzeption von Oberflächenreflexion

Eine Fähigkeit der menschlichen Wahrnehmung ist, den Reflexionsgrad von Oberflächen unter verschiedenen Beleuchtungen als kongruent zu erkennen. Dieses Phänomen wird als *Lightness constancy* bezeichnet. Ein weißes Blatt Papier erscheint beispielsweise unter rotem Licht als rot, dessen Farbe wird jedoch immer noch als weiß erkannt. Todd, Norman und Mingolla [6] haben untersucht, welchen Einfluß die Faktoren (a) diffuse Reflexion, (b) spiegelnde Reflexion und (c) Transparenz auf die Wahrnehmung der Oberflächenreflektivität haben.

Vor Beginn der Untersuchung war bekannt, dass spiegelnde Reflexionen auf dunklen Oberflächen, welche diese intensiver als helle Oberflächen erscheinen lassen (s. Abb. 7), eher als Glanzlicht, denn als Oberflächenfarbe interpretiert werden. Die zu überprüfende Vermutung war, dass Glanzlichter in der Wahrnehmung des Reflexionsgrades un-

berücksichtigt gelassen werden können.

In der Untersuchung wurde ein Objekt mit abgegrenzten Segmenten, die es zu vergleichen galt, unter verschiedenen Bedingungen bewertet (s. Abb. 8): In den einzelnen Tests wurden die diffuse Reflektivität der Vergleichssegmente, der relative (diffuse) Reflexionsgrad des Testsegments sowie die Richtung der Lichteinstrahlung (von senkrecht bis seitlich einfallend) variiert. Die Aufgabe der Testpersonen war zu entscheiden, ob ein mittleres Testsegment heller oder dunkler als die restlichen Flächen wahrgenommen wurde.

Die Ergebnisse zeigten, dass die bewertenden Personen in den meisten Testfällen hinreichend unterscheiden konnten: Es wurden zwei Maße zur Auswertung genutzt. Der PSE (*Point of Subjective equality*) bestimmt das Verhältnis der als 'heller' wahrgenommenen, zu denen der als 'dunkler' empfundenen Testsegmente. Hier lagen die Werte zwischen -1 und -7 (%). Objekte, bei denen das Glanzlicht das Testsegment stark überdeckte (PSE = -7), wurden folglich als etwas heller wahrgenommen. Als zweites Maß drückt die Weber Fraction⁵ aus, ab welcher Intensitätsänderung ein Unterschied zwischen Test- und Vergleichssegmenten wahrgenommen wurde. Die Weber Fraction lag zwischen 3 und 4 (%). Eine Ausnahme machte der Fall geringen Unterschiedes des Reflexionsgrades von Test- und Vergleichssegmenten, sowie gleichzeitig großflächiger Überdeckung des Testsegments durch die spiegelnde Reflexion. Unterschiede konnten hier nicht zuverlässig festgestellt werden [6].

3.3 Glanzlichter als Merkmal zur Formerkennung

Glanzlichter wurden vielfach eher als störend für weitere Algorithmen zur Formerkennung eingestuft. Norman, Todd

⁵E.H. Weber stellte 1834 fest, dass ein konstantes Verhältnis zwischen notwendigem Zuwachs eines Reizes zu dem daraus resultierenden Zuwachs der Empfindung besteht, das bedeutet $\frac{\Delta I}{I} = const.$

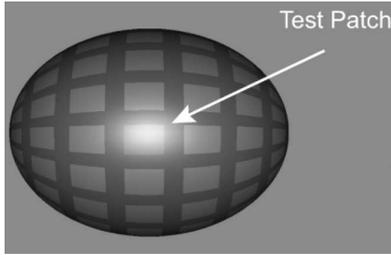


Abbildung 8: Objekt zur Untersuchung der Konstanz des wahrgenommenen Reflexionsgrades (*Lightness Constancy*): Die Helligkeit des in der Mitte befindlichen Testsegmentes (*Test Patch*), wurde im Vergleich zu den umgebenden Segmenten eingestuft. Hier ist erkennbar, dass ein Glanzlicht im ungünstigen Fall (hier: direkter Lichteinfall, geringer Helligkeitsunterschied der diffusen Komponente) das Testsegment überdecken kann [6].

und Orban [5] haben mehrere Merkmale zur Wahrnehmung von Formen eingesetzt und die Ergebnisse verglichen. Als Merkmale wurden gewählt: (a) Verdeckungskonturen, (b) Oberflächentexturen, (c) Glanzlichter und (d) Schattierung. Diese Merkmale wurden einzeln (alle anderen Merkmale wurden entfernt) und in unterschiedlichen Kombinationen ausgewertet. Weiterhin wurden die Objekte als stehendes Bild oder in rotierender Bewegung (betrachtet durch Stereo Shutterbrillen) dargestellt.

In der Testprozedur wurden zwei ähnliche Objekte auf ihre Gleichheit (*same-shape trials*) oder auf ihren Unterschied (*different-shape trials*) bewertet (vgl. Abb. 9). Das zweite der Objekte war gleich dem Ersten kombiniert mit einer sinusförmigen Verzerrung⁶. Die Objekte wurden jeweils leicht verändert (in ihrer Orientierung und dem Beleuchtungswinkel), so dass nicht allein aufgrund der zweidimensionalen Silhouette unterschieden werden konnte.

Als Bewertungsmaß für die Ergebnisse wurde ein Schwellenwert zur Formdiskriminierung (*shape discrimination threshold*) definiert⁷. Bei schrittweiser Adaption der Parameter bis zur gewünschten Erkennungsrate, ergaben sich die größtnotwendigen Formunterschiede bei der Darstellung von ausschließlich texturierten Objekten. Dagegen wurden mit Glanzlichtern versehene Objekte schon bei kleinen Formunterschieden als gleichförmig bzw. unterschiedlich erkannt.

⁶Auf den Tiefenwert jedes Vertexes wurde ein horizontal veränderter Sinus-Funktionswert addiert, d.h. Vertex $b_z = \text{Vertex } a_z + \sin(x)$.

⁷Der Schwellenwert legte in dieser Untersuchung fest, daß die Amplitude der sinusförmigen Verzerrung so lange angepaßt wurde, bis die Ergebnisse der Testpersonen zu 80 % korrekt ausfielen.



Abbildung 9: Zwei leicht unterschiedliche Objekte (hier mit Glanzlichtern und Schattierung) zum Vergleich 3-dimensionaler Formen mittels *same-shape-* bzw. *different-shape trials* [5].

3.4 Schattierung als Merkmal zur Formerkennung

Der Versuch ist der gleiche wie der in Abschnitt 3.3 Beschriebene. Norman, Todd und Orban haben auch hier die notwendigen Formunterschiede (um eine zu 80% korrekte Erkennungsrate zu erreichen) quantitativ bestimmt. Dabei ergab sich, daß für die (Formgleichheits- bzw. Formverschiedenheits-) Erkennung aufgrund des Merkmals *Schattierung* größere Verzerrungen (Sinusamplitude von ca. 0,9 cm) als für die Erkennung anhand von *Glanzlichtern* (Sinusamplitude von ca. 0,7 cm) auf das zweite Objekt addiert werden mußten.

3.5 Verdeckungskonturen (*Occluding Contours*) als Merkmal zur Formerkennung

Werden für ein Objekt von einem Betrachtungspunkt (*vantage point*) aus alle Strahlen konstruiert, die tangential zur Objektoberfläche verlaufen, so formen diese Strahlen eine konische Oberfläche, deren Schnitt mit dem Einheitskreis Koenderink *Kontur* nennt. Die Strahlen berühren das Objekt an einer Kurve auf seiner Oberfläche, dem Rand (*rim*).

Für einen entfernten Betrachtungspunkt gilt: Betrachtet man einen Randpunkt R der Kontur von einem Blickwinkel ξ , so ergeben sich folgende Größen: Die Normale zur Oberfläche in R und die Blickrichtung ξ bilden die Normalenebene ν . Die Projektionsebene π verläuft orthogonal zu ξ . Durch diese Ebenen ν und π verlaufen folgende Kurven: Die Kurve λ verläuft durch die Ebene ν , die Kurve μ durch die Ebene π . Im Punkt R können die Radien der Krümmungen gemessen werden:

$$K_r = \frac{1}{r_r} \text{ (radiale Krümmung, mit } r_r \text{ als dem Radius der Kurve } \lambda \text{, s. Abb. 10(c))}$$

$$K_t = \frac{1}{r_t} \text{ (transversale Krümmung, mit } r_t \text{ als dem Radius der Kurve } \mu \text{, s. Abb. 10(b))}$$

$$K_r K_t = K \text{ ist die GAUSSsche Krümmung der Ober-}$$

fläche. Wenn die Distanz d des Betrachtungspunktes begrenzt ist, so kann die augenscheinliche Krümmung (*apparent curvature*) oder Silhouette beschrieben werden als

$$K_{app} = dK_t = \frac{dK}{K_r} \quad (6)$$

Das bedeutet, dass Krümmungen der Kontur ebensolchen Beugungen der Oberfläche entsprechen. Falls $K > 0$, so ist die Oberfläche entweder konkav oder konvex. Ist $K < 0$, so hat die Oberfläche die Form eines Sattels. Verschwindet die GAUSSsche Krümmung vollständig ($K = 0$), so ist die Oberfläche monoklastisch.

Aus Formel (6) können folgende Regeln abgeleitet werden: K_r kann sein Vorzeichen an einer Kontur nicht ändern, da das Objekt die Sichtbarkeit entfernter Teile verdeckt.

1. Fall: $K > 0$, eine konkave Krümmung mit $K_r > 0$ ist nicht möglich.
2. Fall: $K < 0$, die Kontur bildet konkave Oberflächenregionen ab.

Koenderink [4] folgert⁸:

- Konvexe Krümmungen der Kontur entsprechen konvexen Oberflächenregionen
- Konkave Krümmungen der Kontur entsprechen sattelförmig gekrümmten Oberflächenregionen.

Koenderink widerlegt die bis dahin verbreitete Annahme, dass Formen nur aus den Verdeckungskonturen bestimmter Objekte, die sich aus *generalized cones*⁹ zusammensetzen und nur aus bestimmten Perspektiven abgeleitet werden können. Er wertet diese Eingrenzung als die Suche nach einer minimalen Beschränkung, mit der aus einer einzelnen Projektion die globale dreidimensionale Form bestimmt werden kann. Auch argumentiert er gegen die Auffassung, dass Sichtkanten (*rim*) von Objekten eben sein müssen, um auf die Form der Objektoberflächen schließen zu können. Diese Annahme ging einher mit der Behauptung, dass die meisten Oberflächen moderner Designs diese planare Bedingung beinhalten (ein Gegenbeispiel von Koenderink zeigt eine unebene Sichtkante, s. Abb. 11).

⁸Koenderink beschreibt indes nicht, wie einerseits das Objekt und andererseits der Hintergrund bestimmt werden kann.

⁹Ein *generalized cone* wird gebildet, indem eine Querschnittsfläche in einer Richtung bewegt und dabei gleichzeitig um einen Faktor gedehnt bzw. kontrahiert wird (1971 von Binford definiert).

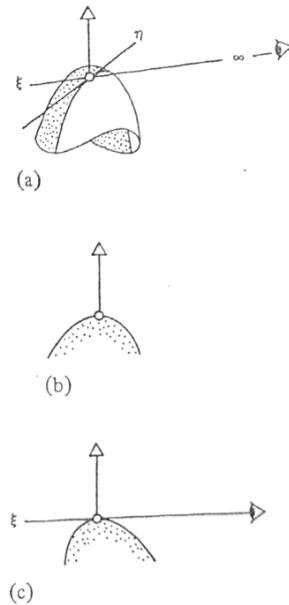


Abbildung 10: (a) Oberfläche aus der Richtung ξ von einem (unendlich weit) entfernten Blickpunkt betrachtet. Die schattierte Region kann von dem Blickpunkt aus nicht gesehen werden, ihre Grenze ist der Rand (*rim*). (b) Projektion des Randes auf die (Projektion-)sebene π . (c) Das Objekt geschnitten von der Normalebene ν [4].

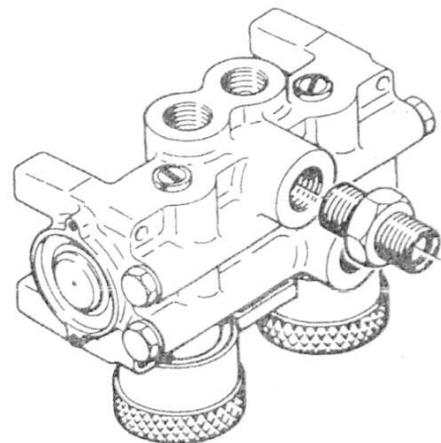


Abbildung 11: Beispiel einer technischen Zeichnung, deren dargestelltes Objekt keine planare Sichtkante (*rim*) aufweist [4].

4 Bewertung

4.1 Aussage einzelner Merkmale, Abhängigkeiten und Rahmenbedingungen

Spiegelnde Reflexionen können Auskunft über den Glanz von Objekten geben [1]. Dabei ist ihre Wirkung (abhängig von ihrer Intensität und Ausweitung) auf einen sie umgebenden Bereich begrenzt.

Lightness wurde häufig als Wahrnehmung der Reflektivität von Oberflächen aufgefasst. Tatsächlich scheint sich diese hauptsächlich aus diffuser Reflektivität abzuleiten, spiegelnde Reflexionen können in vielen Fällen unberücksichtigt bleiben. In Fällen, in denen Glanzlichter die Fläche zu einem großen Teil überlagern, können sie die Bestimmung der *Lightness* stören [6].

Glanzlichter können zu Aussagen über die dreidimensionale Form von Objekten genutzt werden. Wurde früher angenommen, dass Glanzlichter störend bei der Analyse und anschließenden Formerkennung sind, so kann heute festgestellt werden, dass Glanzlichter ein aussagekräftiges Merkmal zur Formwahrnehmung abgeben können [5].

Von Bedeutung ist die teilweise gegenseitige Abhängigkeit einzelner Merkmale. So haben spiegelnde Reflexionen für die Wahrnehmung von Oberflächenglanz zwar eine prominente Rolle, jedoch wird dieser Eindruck erst durch die ergänzende Schattierung des Objekts komplett. Andererseits können Glanzlichter zur Erkennung dreidimensionaler Formen einzeln betrachtet werden und ergeben (in psychophysisch Untersuchungen) gute Ergebnisse.

Glanzlichter, sowie Schattierung erscheinen als Merkmal zur Formwahrnehmung (möglicherweise auch zu deren Erkennung) besser geeignet als bisher angenommen. Dies gilt auch für Objekte, die sich relativ zu ihrer Beleuchtungsquelle bewegen (und mit bisherigen Algorithmen, z.B. der Berechnung des optischen Flusses nicht berechenbar sind). Psychophysische Untersuchungen [5] deuten an, dass die menschliche Perzeption heutigen Algorithmen zur Berechnung dreidimensionaler Struktur überlegen ist. Sie nimmt kleinere Änderungen wahr, da sie vermutlich eine schwächer verbundene Datenstruktur nutzt.

4.2 Chronologische Entwicklung

Beck und Pradzny haben 1981 die Auswirkung von Glanzlichtern als lokales Merkmal zur Aussage über den Glanz von Objekten erforscht. Diese zunächst intuitive Feststellung wurde durch entsprechende Experimente bestätigt. 2004 werden immer noch psychophysische Untersuchungen zur Wirkung von Glanzlichtern angestellt (*Lightness constancy*). Glanzlichtern wird allmählich eine größere Bedeutung in ihrer Funktion als Wahrnehmungsmerkmal zugemessen. Man erkennt, dass mit ihrer Hilfe Aussagen über

die Form von Objekten getroffen werden können.

Als Koenderink (1983) die allgemeine Bedeutung von Verdeckungskonturen festgestellt hat, wurden diese als sinnvoll einsetzbares Merkmal zur Formbestimmung der Oberfläche ausgeschlossen. Seine Regeln dienen seither als fundiertes geometrisches Merkmal.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Schattierung ist in der Computer Vision ein häufig genutztes Merkmal zur Erkennung der dreidimensionalen Form von Objekten (vgl. [7] '*Shape from Shading*'). Verdeckenden Konturen wurde bis zu ihrer Neuinterpretation durch Koenderink eine unterschätzte Rolle als Merkmal zur Formerkennung zuerkannt. Spiegelnde Reflexionen bzw. Glanzlichter werden zunehmend in ihrer Bedeutung für die Formerkennung ermessen. Die in diesem Bericht erwähnten Untersuchungen lassen Ergebnisse ähnliche denen der Auswertung von Schattierung möglich erscheinen.

Fleming, Torralba und Adelson [3] haben die angedeuteten Möglichkeiten, Glanzlichter als Merkmal zur Formerkennung auszuwerten, weiterentwickelt. Der bisherige psychophysische Ansatz wurde von ihnen praktisch umgesetzt, um geometrische Informationen aus Intensitätsbildern zu erhalten. Die Autoren behandeln Glanzlichter ähnlich Texturen; sie nutzen systematische Verzerrungsmuster glänzender Oberflächen, um so auf die Objektform zu schließen (siehe späterer Beitrag des Seminars).

Literatur

- [1] J. Beck, K. Pradzny, "Highlights and the perception of Glossiness," *Perception and Psychophysics*, Vol. 30, pp. 407-410, 1980.
- [2] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 2004.
- [3] R.W. Fleming, A. Torralba, E.H. Adelson, "Specular reflections and the perception of shape," *Journal of Vision*, Vol. 4, pp. 798-820, 2004.
- [4] J.J. Koenderink, "What does the occluding contour tell us about solid shape?," *Perception*, Vol. 13, pp. 321-330, 1984.
- [5] J.F. Norman, J.T. Todd, G.A. Orban, "Perception of Three-Dimensional Shape from Specular Highlights, Deformations of Shading, and Other Types of Visual Information," *Psychological Science*, Vol. 15, pp. 565-570, 2004.
- [6] J.T. Todd, J.F. Norman, E. Mingolla, "Lightness constancy in the presence of specular highlights.," *Psychological Science*, Vol. 15, pp. 33-39, 2004.
- [7] E. Trucco, A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.