

Modell der Bildentstehung mit HDR-Kameras

Wolfram Hans², Thorsten Grosch¹, Tobias Feldmann², Dietrich Paulus², Stefan Müller¹

Universität Koblenz-Landau — Institut für Computervisualistik

¹ Computergraphik ² Aktives Sehen

Universitätsstr. 1, 56070 Koblenz

hans@uni-koblenz.de

Kameras mit hohem Dynamikumfang („high-dynamic range cameras (HDR)“) werden zunehmend in der Computergraphik eingesetzt, um die Lichtverhältnisse in realen Szenen zu erfassen. In der Bildanalyse ermöglichen solche Kameras Untersuchungen, die Szenen mit großen Dynamikunterschieden betreffen. Beispiele sind Nachtfahrten im Automobil oder ein Blick in eine Flamme. Neben einer Reihe von Vorteilen, die eventuell auch neue Methoden und Anwendungsmöglichkeiten nach sich ziehen, ergeben sich durch die Verwendung von HDR-Kameras und -Bildformaten ein Reihe von Problemen, wie etwa die Frage der Kalibrierung, die Verwendung der zusätzlichen Lichtinformation in der Bildverarbeitung oder die Frage der Einschränkung der Farbräume. Um Lösungen für diese Probleme vorzubereiten, werden im Rahmen dieses Beitrags die grundsätzlichen Modelle der Bildverarbeitung und der Computergraphik vor- und gegenübergestellt. Dadurch wird eine Basis für ein gemeinsames Verständnis zum Thema Licht und Farbe der beiden Disziplinen begründet, auf dem die Bildverarbeitung und die Computergraphik gemeinsam aufbauen und voneinander profitieren können. Abschließend wird eine Reihe von Ansätzen und Anwendungsmöglichkeiten skizziert, wie die Modelle entsprechend erweitert werden können, welche gemeinsamen Probleme im Kontext von HDR zu bewältigen sind und wie mögliche Ansätze zur Lösung aussehen könnten.

1 Kameras mit hoher Dynamik

In jüngster Zeit kommen zunehmend Kameras mit einem hohen Dynamikumfang zum Einsatz. Dabei werden sowohl CCD- als auch CMOS-Kameras verwendet. Beide Typen haben Vor- und Nachteile, die sich durch anschließende Signalverarbeitung weitgehend kompensieren lassen.

Bei der hier untersuchten Kamera handelt es sich um eine HDRC Videokamera (IMS Chips), Modell GEVILUX CAM1xCL. Mit dieser CMOS Kamera sind im Gegensatz zu Standardkameras hohe Dynamikbereiche im Bereich von 140 dB darstellbar, die Kamera sieht also mehr als das menschliche Auge. Damit gibt es praktisch keine Überbelichtung mehr, selbst direktes Sonnenlicht kann aufgenommen werden. Alle Einstellungen der Kamera (Weißabgleich, Blendenöffnung, Verschlusszeit usw.) sind fest und adaptieren sich nicht während der Aufnahme eines Videos an die aktuelle Umgebungsbeleuchtung, so dass eine einmalige Kalibrierung der Kamera ausreichend ist. Weiterhin wird durch Kühlung der Kamera ein Driften der Kennlinien weitgehend vermieden, so dass die Sensorwerte immer direkt auf die auftreffende Beleuchtungsstärke abbildbar sind. Die Auflösung des Sensors beträgt 768×496 Pixel, wobei für jedes Pixel auf dem Sensorchip ein Verstärker mit logarithmischer Kennlinie integriert ist. Das durch die Beleuchtungsstärke auf dem Sensor entstehende analoge Signal wird in einen digitalen Datenstrom umgewandelt. Da logarithmisch skalierte Werte vorliegen, reicht eine Datenbreite von 12 Bit aus. Die digitale Datenverarbeitung innerhalb der Kamera arbeitet mit diesen 12 Bit Daten und lässt die Datenbreite unverändert. Die Kamera liefert in der vollen Auflösung Bilder mit einer Wiederholrate von ca. 30 fps. Der Benutzer kann allerdings auch einen kleineren Bildausschnitt für die Darstellung wählen, wodurch größere Wiederholraten erreicht werden.

Für die Farbdarstellung wird ein auf den Sensorchip aufgedampfter Farbfilter mit Bayer Pattern eingesetzt. Da die Filterschichten auch für Infrarotlicht durchlässig sind, wird zusätzlich ein Infrarot-Sperrfilter vorgesetzt. Ein gesteuertes Rücksetzen der Sensorzellen ist nicht vorgesehen, daher kommt es bei extremen Kontrasten in dunklen Szenen zu Nachleuchten.

Zur Darstellung des hohen Dynamikbereichs auf einem Monitor sind Tone Mapping Funktionen notwendig, die die High Dynamic Range (HDR) Werte der Kamera in Low Dynamic Range (LDR) Werte des Displays abbilden (vgl. Abs. 3.2).

2 Bildverarbeitung und Rechnersehen

2.1 Kamerakalibrierung

Um quantitative Bildauswertung zu betreiben, ist eine Kalibrierung der Kamera erforderlich. Unter dem Begriff *Kamerakalibrierung* werden normalerweise diejenigen Verfahren zusammengefasst, die die optischen Eigenschaften der Kamera und die Geometrie der Bildaufnahme aus Referenzdaten (automatisch) ermitteln. Für die intrinsischen geometrischen Kameraparameter und für die Position der Kamera ist hierfür das Verfahren aus [21] ein Standard geworden. In der Photogrammetrie lassen sich mit so kalibrierten Kameras Entfernungen messen.

Darüber hinaus sind für die Farbbildverarbeitung weitere Parameter der Bildentstehung von Bedeutung. Zum einen müssen die Parameter der Sensorkennlinien in den verschiedenen Farbkanälen bekannt sein. Dies wird durch eine so genannte *radiometrische Kalibrierung* ermittelt.

Je nach erforderlicher Genauigkeit ergibt sich zusätzlich ein Zusammenhang zwischen geometrischen und radiometrischen Parametern. So entstehen im Zusammenspiel von Objektiv und Blende selbst bei hochwertigen Kameras variierende Farbverzeichnungen und geometrische Verzerrungen. Auch variieren mit der Blende die Streulichteffekte im Objektiv, was die Farbmessung beeinflussen kann. Weitere, von der Wellenlänge abhängige Effekte sind die Dispersion und das Auflösungsvermögen. [6].

Für eine messtechnische Untersuchung der radiometrischen Eigenschaften einer Kamera müssen daher Öffnungswinkel, Sichtkegel und Blendeneinstellung der Messeinrichtung berücksichtigt werden. Für die Durchführung der Kalibrierung ist eine Modellierung der Bildentstehung erforderlich, in der die Parameter der Bildentstehung in Formeln explizit aufgeführt werden.

2.2 Entstehungsmodell

Das in der Bildverarbeitung und Bildanalyse verwendete Bildentstehungsmodell ist in Bild 1 skizziert. In ähnlicher Form findet sich dieses Modell auch z. B. in [1]. In Gleichung 1 beschreibt $\Gamma_k(\cdot)$ eine radiometrische Antwortfunktion und t_b die Belichtungszeit der Kamera. An dem Szenenpunkt $\mathbf{x}^w$ befindet sich das Flächenelement dA_e mit der Normalen $\mathbf{n}(\mathbf{x}^w)$ und der Richtung $\mathbf{l}(\mathbf{x}^w)$ der Lichtquelle, die am Ort des Objektes die spektrale Leuchtdichteverteilung $E(\lambda)$ erzeugt. $\rho(\lambda, \mathbf{x}^w)$ beschreibt die spektrale Reflexivität an dieser Stelle und $R_k(\lambda)$ die spektrale Empfindlichkeit des k -ten Kamerasensors.

$$f^{(k)}(\mathbf{x}^c) = \Gamma_k(t_b \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}^w) \cdot \mathbf{l}(\mathbf{x}^w)) \int_{\lambda} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda, \mathbf{x}^w) \cdot R_k(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

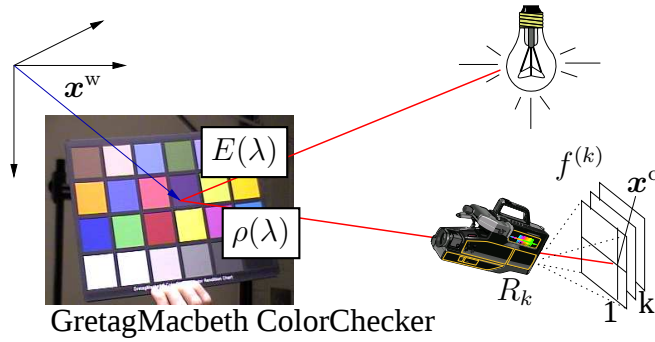


Bild 1: Beleuchtung, Reflexion und Kamera

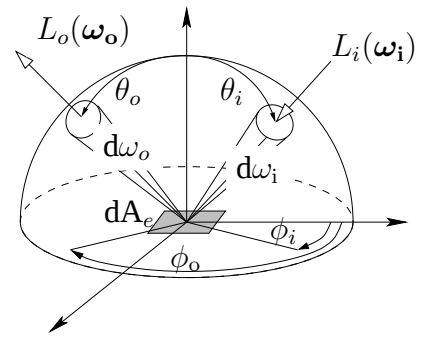


Bild 2: Basisgrößen

Die Pixel-Position x^c lässt sich für den zugehörigen Weltpunkt x^w bei Kenntnis der Szene und Kameraeigenschaften ermitteln. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden als bekannt angenommen. Ein spezieller Anwendungsfall dieses Modells ist die radiometrische Kalibrierung (vgl. 2.1) von Kameras, wie dies in [1] vorgestellt wird. Hierbei werden zunächst vereinfachende Annahmen gemacht: Die Lichtquelle wird als isotrop und das Objekt als Lambert'scher Strahler angenommen. Die Kamera ist idealisiert (die radiometrische Antwortfunktion $\Gamma_k(\cdot)$ wird als Identität angenommen) und die Empfindlichkeit wird für alle Pixel der Sensoren als gleich angenommen. Dies führt zur folgenden Gleichung:

$$f^{(k)} = \int_{\lambda} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot R_k(\lambda) d\lambda \quad . \quad (2)$$

Aus der Diskretisierung von (2) ergibt sich ein Gleichungssystem, mit dem die spektrale Empfindlichkeit der Kamera beschrieben wird. Zur numerischen Lösung des Gleichungssystems aus Messwerten ist eine Regularisierung und weitere Annahmen erforderlich, wie sie in [5] beschrieben werden und für die in [12] ein linearer Lösungsansatz beschrieben wird. Beispielsweise wird so die Glattheit der Sensorantwortkurven erzwungen. Eingabewerte zur Lösung des Gleichungssystems sind die am Sensor abgetasteten Werte, wobei die Gamma-Korrektur rückgängig gemacht wird. Die Kenntnis des Zusammenhangs von x^c und x^w bedeutet, dass es bekannt ist, zu welchem Farbpatch die beobachteten Pixel gehören.

Nach erfolgreicher, so durchgeführter radiometrischer Kalibrierung kann die Kamera für Lichtmessungen verwendet werden. Einflüsse von Beleuchtung oder die in Abschnitt 4.2 beschriebenen geometrischen Informationen können dann zusätzlich betrachtet werden. Im Fall von HDR-Kameras ist in diesem Zusammenhang noch zu ermitteln, wie sich die Sensoren in besonders dunklen und besonders hellen Bereichen verhalten.

2.3 Messtechnik

Im Zusammenhang mit Licht sind zwei Betrachtungsansätze geläufig. Der radiometrische befasst sich mit der physikalischen Beschreibung von Licht als elektromagnetische Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Hierbei spielt auch die spektrale Verteilung eine wesentliche Rolle. Der photometrische Ansatz bezieht sich auf die physiologischen Einflüsse des Lichts und berücksichtigt damit die menschliche Wahrnehmung.

Der Zusammenhang beider Sichtweisen lässt sich über die so genannte $V(\lambda)$ -Kurve (Bild 3) herstellen. Sie besitzt ein Maximum bei 555 nm für den photopischen Bereich (Tagsehen) und beschreibt über den sichtbaren Wellenlängenbereich das Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges. Um die photometrischen Größen zu errechnen, werden die radiometrischen Größen mit der

$V(\lambda)$ -Kurve gewichtet und über das gesamte sichtbare Spektrum integriert

$$G_p = K_m \cdot \int_{380nm}^{780nm} G_r(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad , \quad (3)$$

wobei G_p und G_r beliebige korrespondierende Größen aus Tabelle 1 sein können. Nach der Integration über die Wellenlänge λ bleibt eine skalare Größe, die keine Aussage mehr über die spektrale Zusammensetzung erlaubt aber ein Maß für die vom Menschen wahrgenommene Helligkeit der Strahlung liefert. Das so genannte *photometrische Strahlungsäquivalent* K_m ergibt sich aus der Definition der SI¹-Einheit candela (cd). Sie ist definiert als die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung (555nm oder 540THz) mit einer Strahlstärke von $\frac{1}{683} [\frac{W}{sr}]$ in einer bestimmten Richtung abgibt. Für photopisches Sehen beträgt $K_m = 683 \frac{lm}{W}$ und für skotopisches (Nacht-) Sehen $K'_m = 1699 \frac{lm}{W}$ [6].

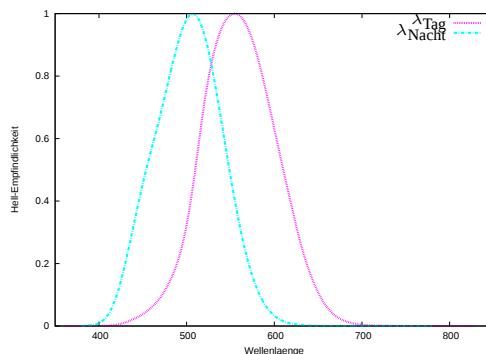


Bild 3: Hell-Empfindlichkeit des menschlichen Auges für Tag- und Nachtsehen.

Die Lichtmessung selbst erfolgt meist mit photoelektrischen Bauelementen (z.B. Photozelle), bei denen ein Lichtteilchen die elektrische Eigenschaft des Materials beeinflusst (innerer oder auch äußerer Photoeffekt). Letztlich wird ein vom einfallenden Licht abhängiger Photostrom gemessen. Neben Nichtlinearitäten im Strom-/Spannungsverlauf weisen die Photozellen eine wellenlängenabhängige, spektrale Empfindlichkeit auf. Für eine exakte Messung der Bestrahlungsstärke am Ort des Sensors oder der Strahlungsleistung der Lichtquelle ist daher die Kenntnis der Kennlinien R_k aus (1) erforderlich.

Kamerasensoren – ob mit CCD- oder CMOS-Technik – basieren ebenfalls auf dem lichtelektrischen Effekt, unter dem sich die Eigenschaften des Halbleiters ändern. Um Kameras als Messgeräte zu verwenden, sind neben den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Einflüssen auf die Genauigkeit auch die systematischen Fehler der Sensoren zu berücksichtigen. Neben Rauschen, Dunkelströmen und anderen globalen Effekten, können lokale Fehler eine Messung beeinflussen. Bei CCD-Wandlern sind das beispielsweise Überstrahlungs- oder Sättigungseffekte (Blooming) in besonders hellen Bereichen. CMOS-Sensoren dagegen übersteuern nicht, haben aber bauartbedingt eine geringere lichtempfindliche Fläche, die selbst meist auch inhomogen ist.

Der Einsatz von HDR-Kameras verspricht mit dem erweiterten Dynamikbereich die gesamte Dynamik einer Szene zu erfassen. Sättigungseffekte treten hierbei nicht mehr auf. Damit wird der Einsatz von HDR-Kameras zur Lichtmessung bei entsprechender Kalibrierung sehr interessant, wenn nicht nur einzelne Objekte oder Lichtquellen gemessen werden sollen. Bei statischen Szenen ist dies auch ohne weiteres möglich. Manche HDR-Aufnahmesysteme benötigen jedoch eine größere Aufnahmedauer und sind deshalb in dynamischen Situationen nur bedingt einsetzbar. Die dabei entstehenden Artefakte müssen nach der Messung eliminiert oder zumindest berücksichtigt werden [14].

Der systematische Fehler bei logarithmischen Kennlinien in sehr niedrigen und sehr hohen Leuchtdichtebereichen ist bei HDR-Kameras zusätzlich zu betrachten.

Farbe ist an sich eine Empfindung, die erst im Gehirn des Betrachters entsteht. Dennoch hat die CIE² durch umfangreiche Versuchsreihen eine Grundlage für Standardisierungen geschaffen. Zum

¹ Systeme international d'unités

² Commission Internationale de l'Éclairage

einen die bereits in Bild 3 eingeführte $V(\lambda)$ -Kurve, die praktisch nur eine Aussage über *hell* und *dunkel* liefert. Zum anderen wurden Farbvergleichs-Experimente durchgeführt, aus denen die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ hervorgehen. Beim farbmimetrischen 2°-Normalbeobachter entspricht die Spektralwertkurve $\bar{y}(\lambda)$ genau $V(\lambda)$.

Im standardisierten CIE XYZ-System lassen sich alle für den Menschen sichtbaren Farben darstellen. Dabei verwendet der Farbraum virtuelle, d.h. physikalisch nicht realisierbare Primärvalenzen X , Y und Z . Diese liegen außerhalb des Spektralfarbenzuges und schließen diesen dadurch vollständig ein. Eine Farbe F ist durch die Normfarbwerte X , Y und Z bestimmt: $F = X \cdot \mathbf{X} + Y \cdot \mathbf{Y} + Z \cdot \mathbf{Z}$. Eine Umrechnung in andere, technisch realisierte Farbräume (z. B. rgb) ist mit Einschränkungen möglich. Abhängig von den dort verwendeten Primärvalenzen ist der darstellbare Farbbereich (*Gamut*) eingeschränkt.

Aus diesem Grund ist eine präzise oder naturgetreue Farbwiedergabe nur möglich, wenn die Farben innerhalb des Gamuts liegen. Aber selbst bei geschickter Wahl der Primärvalenzen werden Farben außerhalb des darstellbaren Bereichs liegen. Die Erhöhung der Anzahl von Primärvalenzen, d. h. mehr als drei, erweitert den Bereich erheblich, wenn diese mit Bedacht ausgewählt werden. Idealerweise sind dies Spektralfarben. Deshalb erwartet man bei der spektralen Betrachtung von Farbe auch die besten Ergebnisse. Eine Erweiterung des Dynamikumfangs durch den Einsatz von HDR-Kameras dagegen bringt an dieser Stelle keine Verbesserung der Farbaufnahme oder -wiedergabe, weil eine genauere Abbildung nur entlang der Unbuntachse erzielt wird. Die von uns verwendete HDR-Kamera verwendet ein Bayer-Pattern und besitzt daher den gleichen Gamut wie herkömmliche Kameras.

Bei der Messung des Farbreizes mit einer spektralen Energieverteilung $F_s(\lambda)$ wird zunächst auch die Wellenlänge berücksichtigt. Erst bei der Berechnung des Zahlentripels (XYZ) gemäß Gleichung (4) geht die spektrale Information verloren. Farbmimetrisch ist diese Beschreibung von Farbe jedoch vollständig und trägt auch Metamerie-Effekten Rechnung.

$$X = c \cdot \int_{\lambda} F_s(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = c \cdot \int_{\lambda} F_s(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = c \cdot \int_{\lambda} F_s(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Die Konstante c normiert weiß ($W(\lambda)$) einer Normlichtart auf den Wert 100:

$$c = 100 / \int_{\lambda} W(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda.$$

An dieser Stelle wird in der Bildverarbeitung ein möglicher Gewinn durch HDR-Kameras verspielt, weil nicht mehr die absolute Helligkeit verwendet wird.

3 Computergraphik

3.1 Licht und Farbe

In der Computergraphik basiert der Bildentstehungsprozess auf der Erkenntnis, dass ein Bild auf der Netzhaut eines menschlichen Auges das Resultat von Licht ist. Das Licht wird von den Lichtquellen der Szene ausgesandt, an den Oberflächen der Umgebung (mitunter mehrfach) reflektiert, bis es schließlich auf unserer Netzhaut auftrifft und als Bild wahrgenommen wird. Speziell im Bereich der photorealistischen Computergraphik und der Bildsynthese basiert der Bildentstehungsprozess somit auf der Simulation von Licht, wobei die Lichtausbreitung auf Basis strahlungsphysikalischer Gleichungen beschrieben wird. Damit sind die meisten der in der Realität wahrgenommenen, visuellen Phänomene abgedeckt; nicht darstellbar sind damit etwa Interferenz- und Beugungserscheinungen.

Die grundlegende „Rendering-Gleichung“ (5) wurde bereits 1986 von Kajiya veröffentlicht [8] und behält bis heute ihre Gültigkeit.

$$L_o(dA_e, d\omega_o) = L_e(dA_e, d\omega_o) + \int_{2\pi} f_r(dA_e, d\omega_i, d\omega_o) \cdot L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i \quad (5)$$

Die Leuchtdichte L_o , die von einem infinitesimalen Flächenelement dA_e in eine beliebige Richtung ausgestrahlt wird, ergibt sich aus der Leuchtdichte L_e , die das Flächenelement in diese Richtung emittiert und den Leuchtdichten L_i , die von allen Raumwinkeln $d\omega_i$ des vorderen Halbraums eingestrahlt und in Richtung $d\omega_o$ reflektiert werden. Bei transparenten Materialien wäre analog auch der hintere Halbraum zu betrachten. f_r ist die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) und beschreibt für jedes Raumwinkelpaar den Anteil der ausfallenden Leuchtdichte zur einfallenden Beleuchtungsstärke.

$$f_r(dA_e, d\omega_i, d\omega_o) = \frac{dL_o(dA_e, d\omega_o)}{dE_i(dA_e, d\omega_i)} \quad (6)$$

Die BRDF beschreibt somit die Eigenschaft des Materials in Bezug auf dessen Reflexionsverhalten. In der dargestellten Form ist sie eine 6D-Funktion; die Werte der BRDF liegen im Bereich $(0, \infty)$ und die Einheit ist $\frac{1}{\text{sr}}$. Nicht jede BRDF ist physikalisch plausibel. Hierfür müssen die Helmholtz-Reziprozität („der Lichtweg ist umkehrbar“) und vor allem der Energieerhaltungssatz erfüllt sein. Letzteres bedingt, dass der Reflexionsgrad ρ im Bereich $(0, 1)$ liegt, wobei Werte von genau Eins absolut keine Absorption bedeuten würden und solche Materialien in der Natur nicht existieren. Der Reflexionsgrad definiert sich über den ausfallenden Lichtstrom im Verhältnis zum gesamten eingestrahlenen Lichtstrom:

$$\rho = \frac{\Phi_o}{\Phi_i} = \frac{\int_{2\pi} L_o(d\omega_o) \cdot \cos \theta_o \cdot d\omega_o}{\int_{2\pi} L_i(d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} \quad (7)$$

Für eine vollständig diffuse Oberfläche ist die BRDF konstant und berechnet sich durch $\rho = f_r \cdot \pi$. Während bislang alle Gleichungen auf einer photometrischen Basis definiert wurden, so lassen sie sich durch Einfügen eines weiteren Parameters $d\lambda$ auch als radiometrische Gleichungen definieren. In der Computergraphik arbeitet man – wie in anderen Bereichen – meist auf Basis von Farbvalenzen, wobei in der Regel das *rgb*-System verwendet wird. Die große Problematik, die zu großen Inkonsistenzen in der Literatur führt, ist letztlich die Frage, ob eine Leuchtdichte, die als Farbvalenz ausgedrückt wird, eine radiometrische oder eine photometrische Größe darstellt. Die genaue Positionierung hängt von den tatsächlichen Ein- und Ausgabegrößen ab. Hier wurde die photometrische Darstellung gewählt, wie aus dem weiteren Verlauf noch ersichtlich wird.

Der letzte formale Schritt betrifft die Darstellung der Werte. Wären spektrale Werte – also z. B. eine Strahldichte $L(\lambda)$ – gegeben, so wäre der nächste Schritt eine Umrechnung in das CIE XYZ-System mit Hilfe der Normspektralwertkurven:

$$X = \int_{\lambda} L(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_{\lambda} L(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_{\lambda} L(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

wobei zu beachten ist, dass die $\bar{y}(\lambda)$ -Kurve genau der $V(\lambda)$ -Kurve entspricht. Hieraus ergibt sich der Ansatz zur so genannten photometrischen Konsistenz. So erhält man aus einer Strahldichteverteilung $L(\lambda)$ beispielsweise die entsprechende Leuchtdichte mit Hilfe von $L = K_m \cdot Y$. Für die Umrechnung in das *rgb*-System benötigt man die Farbmatrix des entsprechenden Gerätes. Für einen Bildschirm wird diese beispielsweise bestimmt, indem man die maximalen Werte für rot,

grün und blau – in *rgb* also die Werte $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ und $(0, 0, 1)$ – darstellt und mit einem Messgerät die dargestellten Leuchtdichten in XYZ, also (X_r, Y_r, Z_r) , (X_g, Y_g, Z_g) und (X_b, Y_b, Z_b) misst, die die Spalten der Farbmatrix zur Umrechnung von *rgb* in XYZ für das jeweilige Gerät festlegen.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \quad (9)$$

In der Praxis liegen aber nur sehr selten spektrale Eingangsgrößen vor. Vielmehr zumutbar ist die Angabe einer photometrischen Größe in Verbindung mit einem *rgb*-Wert (z. B. eine weiße Lichtquelle mit 1000 cd/m^2). Eine photometrisch konsistente Berechnung der *rgb*-Werte der Lichtquelle geschieht durch den Ansatz

$$\mathbf{L}_{\text{rgb}} = L_0 \cdot (r, g, b)^T \quad \text{wobei} \quad L = K_m \cdot L_0 \cdot (m_{21} \cdot r + m_{22} \cdot g + m_{23} \cdot b) \quad (10)$$

Gesucht wird also eine *rgb*-Repräsentation, die sich aus den gegebenen *rgb*-Werten und einer Konstanten L_0 zusammensetzen. Diese Konstante wird so berechnet, dass die *Y*-Komponente von $\mathbf{L}_{\text{rgb}}$ die tatsächliche photometrische Information (in diesem Fall L) beinhaltet. m_{21} , m_{22} und m_{23} sind dabei die Werte der mittleren Zeile der Farbmatrix.

Aus diesem Vorgehen ergeben sich drei wichtige Betrachtungen.

1. Es wird deutlich, warum eine Darstellung der obigen Gleichungen auf Basis photometrischer Gleichungen genügt, da die *rgb*-Farbvalenzen so verwendet werden, dass ihre photometrische Information in den *Y*-Komponenten erhalten bleibt.
2. Betrachtet man die Vorgehensweise im Vergleich zu den vorgestellten Modellen der Farblehre und Bildverarbeitung, so wird die photometrische Information („Helligkeit“) nicht wegnormiert, sondern bleibt konsistent zur weiteren Verwendung erhalten.
3. Liegen die nach diesem Muster berechneten *rgb*-Werte im Bereich zwischen $(0, 1)$, dann können sie von dem Display direkt wiedergegeben werden und das Display reproduziert tatsächlich die gewünschten Leuchtdichten. Wichtig ist hierbei allerdings eine lineare Einstellung der Gamma-Korrektur des Bildschirms.

3.2 Tone Mapping

Ein Problem ergibt sich, wenn die simulierten oder gemessenen Leuchtdichtewerte größer sind, als der darzustellende Bereich des Ausgabegeräts (also *rgb*-Werte größer Eins auftreten). An dieser Stelle kommen tone mapping-Verfahren zum Einsatz, die die simulierten bzw. gemessenen Werte auf den darstellbaren Bereich abbilden. Lineare Funktionen sind hier ungeeignet, da das menschliche Auge in dunklen Bereichen feinere Helligkeitsunterschiede wahrnimmt, als in hellen Bereichen. Die meisten tone mapping Verfahren verwenden daher logarithmische Funktionen, die der Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges besser angepasst sind. Ein guter Überblick über tone mapping Verfahren findet sich bei [4].

3.3 Einsatz von HDR in der Computergrafik

Basierend auf dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Beleuchtungsmodell sind verschiedene Lichtsimulationsverfahren entwickelt worden, die eine Lösung der Rendering Equation durch Ver-

einfachungen möglich machen. Beispiele sind Ray Tracing [17], Radiosity [18] und Photon Mapping [7]. Diese Verfahren liefern glaubhafte Bilder, sind allerdings meistens immer noch als Computersimulationen zu erkennen. Der Grund hierfür liegt unter anderem in den vereinfachten Modellen bei der Beschreibung der Lichtquellen. Oft werden einfache Punkt- oder Flächenlichtquellen eingesetzt, für indirektes Licht wird manchmal nur ein räumlich konstanter ambienter Term verwendet. Im Gegensatz dazu liefern sogenannte Image-Based-Lighting (IBL) Techniken [14] glaubhafte Ergebnisse für natürliches Umgebungslicht. Als Beschreibung der Lichtquellen werden so genannte High Dynamic Range Environment Maps (HDR EnvMap) eingesetzt. Es handelt sich hierbei um Aufnahmen von verspiegelten Kugeln (Light Probes) [2] oder Fischaugenobjektiven [15], auf denen die gesamte Umgebung sichtbar ist. Da die Aufnahmen im HDR Format vorliegen, können sie als Beschreibung des einfallenden Lichts verwendet werden, um somit virtuelle Objekte mit realem Umgebungslicht zu beleuchten. Normale (LDR) Aufnahmen sind hierfür ungeeignet, da die hellen Lichtquellen überbelichtet sind und die Helligkeitsinformation verloren geht. Die Aufnahme von HDR Bildern geschieht normalerweise über eine Belichtungsserie mit variierender Belichtungszeit, die zu einem Bild mit float Werten pro Pixel kombiniert wird [3]. Mittlerweile gibt es allerdings schon die ersten HDR Kameras, die direkt einen hohen Dynamikbereich aufnehmen können.

4 Ansätze für ein gemeinsames Modell

Im folgenden Abschnitt werden die Modelle der Bildverarbeitung und der Computergraphik aufeinander abgebildet und einige Ansätze skizziert, wie die Modelle erweitert werden bzw. die Disziplinen voneinander profitieren können.

4.1 Abbildung der Modelle

Betrachtet man das grundlegende Modell der Bildverarbeitung (Gleichung (2)), so lässt sich dieses durch Einsetzen der dahinter liegenden Annahmen aus der Rendering-Gleichung herleiten, was auch eine sehr gute Diskussion der Einschränkungen ermöglicht. Die grundsätzlichen Annahmen sind dabei, (1) dass keine Eigenemission der Objekte auftritt, (2) dass es sich um vollständig diffuse Umgebungen handelt und (3) dass keine geometrische Information über die Szene verfügbar ist.

$$\begin{aligned}
 L_o(dA_e, d\omega_o) &= L_e(dA_e, d\omega_o) + \int_{2\pi} f_r(dA_e, d\omega_i, d\omega_o) \cdot L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i \\
 &\stackrel{(1)}{=} \int_{2\pi} f_r(dA_e, d\omega_i, d\omega_o) \cdot L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i \\
 &\stackrel{(2)}{=} \frac{\rho(dA_e)}{\pi} \cdot \int_{2\pi} L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i \quad \stackrel{(3)}{=} L_o(dA_e)
 \end{aligned}$$

Die Vernachlässigung der Eigenemission führt zum Wegfall des linken Terms der Rendering-Gleichung. Dadurch fallen die Lichtquellen selbst für die Bildverarbeitung weg. Eine entsprechende Berücksichtigung ist im Bereich des Trackings für Augmented Reality eventuell sinnvoll, wobei unter *Tracking* hier die Rekonstruktion der Kameraposition und -orientierung verstanden wird. Durch die Annahme vollständig diffuser Umgebungen vereinfacht sich die BRDF zu dem Wert $\frac{\rho}{\pi}$, der als Konstante vor das Integral gezogen werden kann. Das Resultat ist die Leuchtdichte, die von einem Flächenelement in alle Raumwinkel konstant ausgestrahlt wird.

Da dem Modell keine Kenntnis der Geometrie der Szene zugrunde liegt (z. B. Abstand der Lichtquelle zum Flächenelement oder Lichteinfallswinkel), ist keine akkurate Berechnung der Beleuchtungsstärke mit $E(dA_e) = \int_{2\pi} L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i$ möglich. Tatsächlich wird die empfangene Beleuchtungsstärke als konstant angenommen. Während in der Realität die ausgestrahlten Leuchtdichten des Flächenelements von der Distanz und dem Einfallswinkel der Lichtquellen abhängen, wird diesem Fehler dadurch Rechnung getragen, dass die berechneten Werte „beleuchtungsinvariant normiert“ werden, sprich die Y -Komponente auf einen Faktor normiert wird (s. Gl. 2). Damit geht dem Bildverarbeitungsprozess allerdings eine wichtige Dimension, die photometrische Information, verloren und die Primärvalenzen XYZ beschränken sich letztendlich auf den zweidimensionalen Farbbort $c_{xy} = (x, y)^T$. Eine weitere Einschränkung dieses Modells liegt in der Vernachlässigung der Interreflexion zwischen den Materialien (z. B. weißes Licht in roter Box). Die farbliche Zusammensetzung der empfangenen Beleuchtungsstärke hängt speziell in Bereichen, bei denen diffuse Materialien dicht beieinander liegen, nicht mehr alleine von der Farbe der Lichtquelle ab.

$$L_o(dA_e) = \frac{\rho(dA_e)}{\pi} \cdot \int_{2\pi} L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i = \frac{\rho(dA_e)}{\pi} \cdot E^{\text{konstant}}(dA_e) \quad (11)$$

Es sei angemerkt, dass auch hier wieder alle Gleichungen durch Einfügen der spektralen Betrachtung radiometrisch erweiterbar sind. Damit ergibt sich aus Gleichung (2):

$$f^{(k)} = \int_{\lambda} L_o(\lambda, dA_e) \cdot R_k(\lambda) \cdot d\lambda = \int_{\lambda} E^{\text{konstant}}(\lambda, dA_e) \cdot \frac{\rho(\lambda, dA_e)}{\pi} \cdot R_k(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12)$$

mit dem Flächenelement dA_e an der Stelle x^w .

4.2 Verwendung von geometrischer Information

Eine Reihe der obigen Einschränkungen lassen sich aufheben, wenn geometrische Informationen verwendet werden können. Im einfachsten Fall ist der Abstand d der Lichtquelle von dem Flächenelement und der Lichteinfallswinkel θ_i zu bestimmen. Betrachtet man wiederum vollständig diffuse Umgebungen, so wird die Kameraposition und -orientierung nicht benötigt. Die einfachste mögliche Erweiterung geht von einer einzigen Punktlichtquelle aus. Eine Punktlichtquelle wird durch ihren Ort und den Gesamtlichtstrom Φ (analog spektraler Strahlungsfluss $\Phi(\lambda)$) definiert; sie hat eine konstante Lichtstärke in alle Raumrichtungen mit $I = \frac{\Phi}{4\pi}$. Die Beleuchtungsstärke auf einem Flächenelement ergibt sich durch:

$$E(dA_e) = I \cdot \frac{\cos \theta_i}{d^2} = \frac{\Phi \cdot \cos \theta_i}{4\pi \cdot d^2} \quad (13)$$

Bei den vereinfachten, so genannten lokalen Beleuchtungsmodellen, geht man davon aus, dass nur das direkte Licht der Lichtquellen auf dem Flächenelement auftrifft. Betrachtet man die Hemisphäre über dem Flächenelement, so wird nur das Licht durch die von den Lichtquellen abgedeckten Raumwinkel empfangen; alle anderen Raumwinkel, die in der Regel von den anderen Flächenelementen der Szene abgedeckt werden und eine indirekte Beleuchtung beitragen, werden vernachlässigt und meist durch einen zusätzlichen, konstanten, so genannten ambienten Term L_a abgeschätzt. Bei der Verwendung mehrerer Lichtquellen lässt sich die folgende Gleichung durch die Summe über alle Lichtquellen erweitern. Der Beitrag einer Punktlichtquelle ist:

$$L_o(dA_e) = \frac{\rho}{\pi} \cdot \int_{2\pi} L_i(dA_e, d\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\Phi \cdot \cos \theta_i}{4\pi \cdot d^2} \quad (14)$$

Legt man ein solches Modell zugrunde, so steht für die Bildverarbeitung neben der Farbinformation des Pixels auch die photometrische Information zur Verfügung. So könnte neben Farbregionen auch die Helligkeit von Pixeln zu deren Klassifizierung oder Korrespondenzsuche verwendet werden (z. B. bei der Suche und Verfolgung von Lichtquellen). Weiterhin ist der Reflexionsgrad ρ aus der Pixelfarbe rekonstruierbar, wobei eine tatsächliche Beleuchtungsinvarianz erreicht werden kann, was ebenfalls zur Klassifikation und Erkennung von Objekten einsetzbar ist. Eine genaue Betrachtung dieser Gleichung zeigt allerdings, dass eine große Distanz der Lichtquelle zu sehr kleinen Beleuchtungsstärken führen wird, während sehr kleine Distanzen im Grenzfall sogar in einer unendlich großen Beleuchtungsstärke resultieren (hier ist die Annahme einer Punktlichtquelle im Vergleich zu einer flächigen Lichtquelle nicht mehr erfüllt). Zur Abdeckung des großen Dynamikbereichs der Leuchtdichten ist die Verwendung von HDR-Formaten letztendlich sinnvoll und der Einsatz von Tone Mapping Verfahren zur Darstellung in der Regel notwendig. Offen ist, inwieweit dann die Verwendung eines tone mapping Verfahrens auch für die Bildverarbeitung sinnvoll ist. Der Vorteil wäre, dass entsprechende Toleranzen bei der Suche nach gleichen Pixelwerten auch entsprechend der Wahrnehmung des menschlichen Auges angepasst werden könnten. Weiterhin wäre eine Analyse in sonst übersättigten Bereichen noch möglich.

4.3 Integration von Glanz

Die bisherigen Betrachtungen basieren auf der Annahme von diffusen Materialien, die eine sehr einfache Darstellung der BRDF ermöglicht. Es gibt eine Reihe von so genannten Beleuchtungsmodellen, die versuchen, die sehr komplexe Form der BRDF durch eine Reihe von Parametern festzulegen, die letztlich von einem Benutzer beherrschbar sind [16]. Oftmals wird die BRDF dabei in 2 Komponenten zerlegt: einen diffusen und einen glänzenden Anteil (ρ_d und ρ_s). Der einfachste Vertreter ist das Beleuchtungsmodell nach Phong [13], wobei der glänzende Teil durch eine $\cos^n$ -Verteilung um die reflektierte Blickrichtung festgelegt wird. Mit Hilfe der Glanzzahl n lassen sich dabei sehr diffuse Materialien (n sehr klein) bis hin zu sehr glänzenden Materialien (n sehr groß) modellieren. Allerdings wird für die Verwendung dieser Modelle auch die Kenntnis über die Position und Orientierung der Kamera benötigt; blickt der reflektierte Blickvektor genau in Richtung der Lichtquelle, so wird hier der Glanzpunkt (*specular highlight*) auf dem Material sichtbar. Für die BRDF ergibt sich:

$$f_r(dA_e, d\omega_i, d\omega_o) = \rho_d \frac{1}{\pi} + \rho_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \psi_i \quad \text{mit} \quad \rho_d + \rho_s \leq 1 \quad (15)$$

wobei ψ_i der Winkel zwischen dem am Flächenelement reflektierten Blickvektor und der Lichteinfallrichtung ist; n ist die Glanzzahl und ρ_d, ρ_s sind die Reflexionsgrade für den diffusen und spiegelnden Anteil des Materials. Der Term vor der Kosinus-Verteilung ist nötig zur Erfüllung der physikalischen Plausibilität (speziell des Energieerhaltungssatzes) des Phong-Modells. Die abgestrahlte Leuchtdichte ergibt sich für den einfachen Fall einer Punktlichtquelle durch [11][10]:

$$L_o(dA_e) = \left(\rho_d \frac{1}{\pi} + \rho_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \psi_i \right) \cdot \frac{\Phi \cdot \cos \theta_i}{4\pi \cdot d^2} \quad (16)$$

Der Einsatz dieses Modells bietet die Herausforderung, 3 Unbekannte (ρ_d, ρ_s und n) aus den Pixelwerten zu rekonstruieren, was wiederum eine genauere Klassifizierung und Erkennung von Objekten ermöglichen würde. Umgekehrt, wenn neben dem geometrischen Modell auch die Materialeigenschaften zur Verfügung stehen, so kann eine Beleuchtungsinvarianz selbst in den Glanzpunkten realisiert werden. Dadurch wäre beispielsweise eine Verbesserung der Korrespondenzfindung

Radiometrische Größe			Photometrische Größe		
Bezeichnung		Einheit	Bezeichnung		Einheit
Strahlungsmenge	Q_r	$J = Ws$	Lichtmenge	Q_p	$lm\ s$
Strahlungleistung/ Strahlungsfluss	Φ_r	W	Lichtstrom	Φ_p	lm
Strahlstärke	I_r	W/sr	Lichtstärke	I_p	$cd = lm/sr$
Strahldichte	L_r	$W/(m^2sr)$	Leuchtdichte	L_p	cd/m^2
Bestrahlungsstärke	E_r	W/m^2	Beleuchtungsstärke	E_p	$lx = lm/m^2$
Bestrahlung	H_r	Ws/m^2	Belichtung	H_p	$lx\ s$

Tabelle 1: Einheiten für die verwendeten Größen

beim AR-Tracking zu erwarten. Generell ist hierfür die Verwendung von HDR-Bildformaten wieder sinnvoll.

5 Offene Fragen und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Bildentstehungsmodelle aus Computergraphik und Bildverarbeitung vorgestellt und verglichen. Spezielles Augenmerk lag auf Farbe und Dynamik. Neue Möglichkeiten, die sich aus der Verwendung von Kameras mit hoher Dynamik ergeben, wurden betrachtet. Im Hinblick auf Messungen realer Licht- und Farbwerte stellt sich die Frage, in wie weit sich HDR Kameras als Messinstrumente einsetzen lassen. [9] hat gezeigt, dass eine photometrische Kalibrierung möglich ist, mit nur kleinen Abweichungen im Vergleich zu real gemessenen Leuchtdichten. Ein Einsatz einer HDR Kamera als Farbmessgerät ist bisher nicht durchgeführt worden. Generell ist eine exakte Farbwiedergabe mit Digitalkameras schwierig [14]. Auch liegen bisher zu HDR Bildern meistens keine Informationen über deren Farbraum vor. Da HDR-Wiedergabegeräte kaum verfügbar sind, ist für die Darstellung ein Tone Mapping nötig und der volle Dynamikumfang nicht mehr gegeben.

Bezüglich der gemeinsam verwendeten Modelle sind die Veröffentlichungen zur bildbasierten Modellierung (BRDF-Modellierung) aus dem Bereich der Bildverarbeitung und Computergraphik weiter zu untersuchen und zu vergleichen. Grundsätzlich lassen sich jedoch wie in Abs. 4 beschrieben beide Sichtweisen durch entsprechende Annahmen ineinander überführen.

Literatur

- [1] Kobus Barnard and Brian V. Funt. Camera characterization for color research. *Color Research and Application*, 27(3):153–164, 2002.
- [2] Paul E. Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. *Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series):189–198, 1998.
- [3] Paul E. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series):369–378, 1997.
- [4] Kate Devlin, Alan Chalmers, Alexander Wilkie, and Werner Purgathofer. Star: Tone reproduction and physically based spectral rendering. In Dieter Fellner and Roberto Scopigno,

- editors, *State of the Art Reports, Eurographics 2002*, pages 101–123. The Eurographics Association, 9 2002.
- [5] Graham D. Finlayson and A. Alsam. Recovering spectral sensitivities with uncertainty. In *Proceedings of the First international Conference CGIV* [19], pages 22–26.
 - [6] Ekbert Hering, Rolf Martin, and Martin Stohrer. *Physik für Ingenieure*. VDI-Verlag GmbH, 3. auflage edition, 1989.
 - [7] Henrik Wann Jensen. *Realistic image synthesis using photon mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001.
 - [8] James T. Kajiya. The rendering equation. In *13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH)*, pages 143–150, 1986.
 - [9] Grzegorz Krawczyk, Michael Goesele, and Hans-Peter Seidel. Photometric calibration of high dynamic range cameras. Technical report, Max-Plank-Institut für Informatik, Stuhlsatzenhauseweg 85 66123 Saarbrücken Germany, 5 2005.
 - [10] Eric P. Lafortune and Yves D. Willems. Using the modified phong BRDF for physically based rendering. Technical Report CW197, Leuven, Leuven, Belgium, 1994.
 - [11] Robert R. Lewis. Making shaders more physically plausible. In *Computer Graphics*, number 13, pages 109–120, 6 1994.
 - [12] Dietrich Paulus, Vinh Hong, Corvin Idler, Joachim Hornegger, and L. Csink. Sensitivity curve approximation using linear algebra. In *CGIV 2004 – Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision* [20], pages 207–212.
 - [13] B. Phong. Illumination for computer generated pictures. In *Communications of the ACM*, volume 18, pages 311–317, 1975.
 - [14] Erik Reinhard. *High dynamic range imaging : acquisition, display, and image based lighting*. Elsevier Books, 2006.
 - [15] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 5(1):1–12, 1999.
 - [16] Christophe Schlick. A survey of shading and reflectance models. *Computer Graphics Forum*, 13(2):121–131, 1994. Eurographics 1994 (Olso, Norway).
 - [17] Peter Shirley. *Realistic ray tracing*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2000.
 - [18] François Sillion and Claude Puech. *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1994. ISBN 1-558.
 - [19] The Society for Imaging Science and Technology. *Proceedings of the First international Conference CGIV*, Poitiers, France, 4 2002.
 - [20] The Society for Imaging Science and Technology. *CGIV 2004 – Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, volume 2, Aachen, Germany, 4 2004.
 - [21] Roger Y. Tsai and R.K. Lenz. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-d machine vision metrology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(5):713–720, 9 1988.