

## GEOMETRISCH-PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER DIGITALEN BILDMESSUNG

B. Wrobel, Darmstadt

### 1. EINFÜHRUNG

Von den Zielen und Möglichkeiten der Photogrammetrie umfaßt die digitale Bildmessung denjenigen Teilbereich, der hier mit der Bestimmung von geometrischen und strahlungsphysikalischen Informationen über Objekte umrissen werden soll. Die vollautomatische Computerberechnung eines digitalen Geländemodells und eines digitalen Orthophotos sind prägnante Ergebnisbeispiele der digitalen Bildmessung. Wir wollen die geometrisch-physikalischen Grundlagen zur Lösung dieser Art der Informationsbestimmung darlegen. Wie wir sehen werden, stehen die geometrischen und strahlungsphysikalischen Objektinformationen in mathematisch verknüpfter Form mit den digitalen Bilddaten in Beziehung, so daß auch nur eine gemeinsame Bestimmung dieser zwei Gruppen von Informationen optimal sein kann. Darüberhinaus muß die digitale Bildmessung in der Lage sein, auch rein geometrische Observable in die Verarbeitung mit einzubeziehen.

Von dieser Art der digitalen Bildverarbeitung weitestgehend getrennt bleibt der dritte Bereich photogrammetrisch bestimmbarer Objektinformationen, nämlich die semantischen Informationen, obwohl es durchaus Überschneidungen gibt, aber eigentlich nur dann, wenn bei komplizierten Oberflächenformen eine geometrisch-physikalische Auswertung von Bildern nicht ohne intelligente Strukturierung der Bildgrauwerte durchführbar ist. Anknüpfungen gibt es auch dadurch, daß die Ergebnisse der digitalen Bildmessung häufig nicht Endergebnisse sein werden, sondern daß eine semantische Informationsgewinnung sich anschließt, sei es mit traditioneller Bildinterpretation durch einen Operateur oder mit automationsgerechter Bildanalyse. Hierauf wird sicherlich in den benachbarten Beiträgen von W. FÜRSTNER und H.-P. BÄHR eingegangen.

Die hier vorgetragenen Gedankengänge haben sich aus den vorausgegangenen Arbeiten zur Bildkorrelation entwickelt, siehe die Beiträge von ACKERMANN, FÜRSTNER, GRÜN, HOBROUGH, ROSENHOLM, WROBEL, HELAVA und EBNER/FRITSCH/GILLESSEN/HEIPKE, vgl. den Übersichtsartikel von WROBEL 1988.

Im Übrigen, es ist interessant zu beobachten, daß eine ähnliche Entwicklung hin zu integrierten Modellen vor nicht allzu langer Zeit in der physikalischen Geodäsie stattgefunden hat, als sie für ihre geometrischen und schwerfeldabhängigen Observablen (Strecken, nivellierte Höhen, ... bzw. Schwerewerte, Potentialdifferenzen, ...) nach dem Vorschlag von EEG, KRARUP u.a. ein gemeinsames, integriertes Modell aufgestellt hat. Es ist unter dem Namen "operationelle" oder "integrierte Geodäsie" bekannt geworden (MORITZ 1978). Die Ähnlichkeiten mit der digitalen Photogrammetrie bestehen vor allem in den formalen mathematischen Ansätzen und algorithmischen Hilfsmitteln, weniger in den zugrundeliegenden Naturgesetzen. Hier sind doch unterschiedliche Gesetze von Bedeutung. Man könnte auch beide Disziplinen mit ihren Observablen in einem vereinigten Übermodell behandeln. Wenn es denn zweckmäßig sein könnte, würde es in der Zukunft sicherlich geschehen.

Die folgenden Betrachtungen zur digitalen Photogrammetrie beziehen sich nur auf die Herleitung der grundlegenden Ansätze. Fragen zur algorithmischen und numerischen Lösung sowie zur Datenverarbeitung werden nicht behandelt. Wir beginnen mit einem Modell der Bilderzeugung und setzen uns mit seinen physikalischen und geometrischen Parametern auseinander. Im folgenden Kapitel wird die Bild-Inversion nach dem Konzept des Facetten-Stereosehen angegeben. Danach lassen wir Erweiterungen zu und stellen Vergleiche mit andern Computer-Vision-Verfahren an. Im Schlußkapitel soll kurz auf offene Fragen eingegangen werden.

### 2. BILDERZEUGUNG NACH GEOMETRISCH-PHYSIKALISCHEN MODELLEN

#### 2.1 Allgemeine Überlegungen zur Bildaufnahme in der Atmosphäre

Am Anfang jeder Photogrammetrie steht die Bilderzeugung. Hierauf fußt auch die digitale Photogrammetrie. Doch anders als die nahezu ausschließlich auf Bildkoordinaten als Meßgrößen abge-

stellte analytische Photogrammetrie, müssen wir bei der digitalen Photogrammetrie viel stärker die physikalische Komponente der Bilderzeugung einbeziehen. Schließlich sind ihre hauptsächlichsten Meßgrößen digitale optische Bilddichten. Es wird deshalb in diesem Kapitel auf mögliche Modelle dieser Art eingegangen und im folgenden Kapitel 3 ein dementsprechender Bildinversionsansatz angegeben.

Modelle der passiven Bilderzeugung mit Betonung der physikalischen Ursachen beziehen sich i.d.R. auf die Strahlungsbilanz Sonne - Erde in der Atmosphäre und auf die darin stattfindenden Wechselwirkungen, Fig. 2.1.

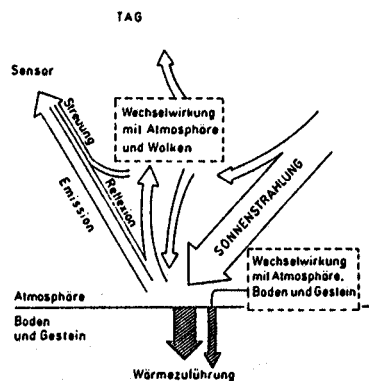


Fig. 2.1.: Komponenten des Strahlungsflusses bei der Bilderzeugung. Die Darstellung gilt auch für mit Vegetation bedeckte Böden und Gesteine (aus: KRONBERG 1985)

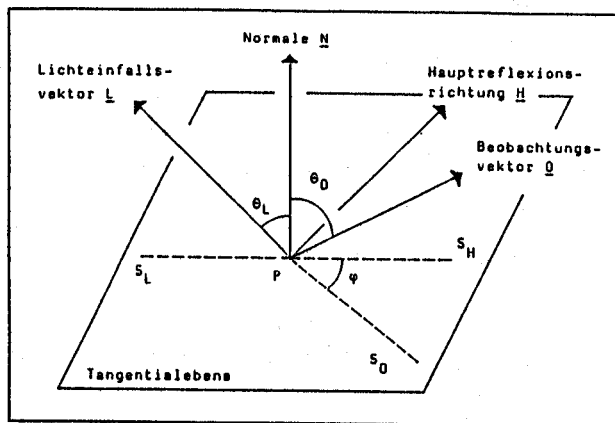


Fig. 2.3: Definition von Vektoren an der Objektoberfläche im Punkt P(X,Y,Z)

Nach SIEBER 1986 gilt für die Nettostrahlungsenergie  $L_n$  in den Einheiten [Watt/m<sup>2</sup>·sr]

$$L_n = L_S + L_B + L_T - \{R(L_S + L_B) + L_E\} \quad (2/1)$$

worin

- $L_S$  = direkte Solarstrahlung
- $L_B$  = diffuses Streulicht
- $L_T$  = thermische Strahlung der Atmosphäre
- $R$  = Reflexionskoeffizient der Erdoberfläche
- $L_E$  = thermische Strahlung der Erdoberfläche

Hierbei muß betont werden, daß das diffuse Streulicht nicht nur in der Atmosphäre entstehen kann, sondern auch in der engeren Nachbarschaft von Gegenständen an der Erdoberfläche. Alle diese physikalischen Größen quantitativ festzustellen und bei der Bilderzeugung zu berücksichtigen, wäre eine

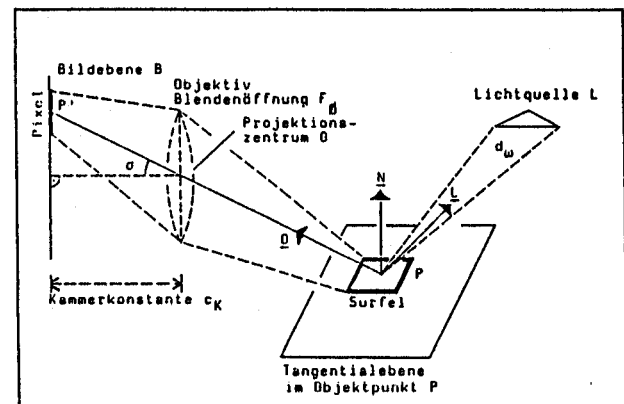


Fig. 2.2.: Bilderzeugung mit einer Kamera: geometrische Größen über Beleuchtung, Objektoberfläche und Kamera  
 Koordinaten: Pixelmitte  $x', y'$ ; Projektionszentrum  $O(x_o, y_o, z_o)$ , Objektpunkt  $P(x, y, z)$

komplizierte und vielparametrische Aufgabe. Man hängt letztlich von den vielen Faktoren und Wechselwirkungen des lokalen, schnell veränderlichen Wetters ab, sowie von der aktuellen Zusammensetzung des Mediums Atmosphäre, vor allem vom Wasserdampf und diversen Aerosolen, deren relevante Daten man zudem oft nicht zur Verfügung hätte.

Von den in (2/1) auftretenden Größen ist für den Photogrammeter in der Regel nur der Reflexionskoeffizient R von Interesse, weil mit R Informationen über das aufgenommene Objekt gewonnen werden können:

- Die Objektoberfläche  $Z = Z(X, Y)$ , worin X, Y, Z kartesische Objektkoordinaten seien, kann mit Hilfe von R schon allein deshalb bestimmt werden, weil die Reflexionsfunktion ebenfalls eine

Ortsfunktion von X,Y ist (neben anderen Parametern, die sie festlegen). Ihre Beträge spielen für diesen Zweck keine Rolle.

● Die strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Objektoberfläche und daraus letztlich das Oberflächenmaterial selbst kann aus den Beträgen von R abgeleitet werden, sei es über spektrale Signaturen  $R_\lambda$ , über eine Bildanalyse oder durch Interpretation. Allerdings, wie die Strahlung selbst, wird R von den vielen Klimafaktoren beeinflusst und kann sich mit ihnen schnell ändern, was die Nutzung dieser Größe sehr erschwert. Eine Konsequenz ist die bekannte Empfehlung, Stereobilder möglichst streng unitemporal aufzunehmen.

● Ferner ist darauf hinzuweisen, daß die Reflexionsfunktion an einem Ort X,Y vor allem eine bidirektionale Funktion der Einstrahlungs- und Reflexionsrichtung darstellt. In einem Gebiet unter konstanter halbräumlicher Einstrahlung (Raumwinkel  $2\pi$ ) hängt R immerhin noch von den zwei Parametern  $\theta_0, \varphi$  der Reflexionsrichtung  $\underline{Q}(\theta_0, \varphi)$  ab. In dieser Definition heißt R gerichteter Reflexionsgrad  $R(2\pi; \underline{Q}; X, Y)$ , vgl. Figur 2.2, 2.3, und gehört zu den wichtigen Reflexionsgrößen bei den Fernerkundungsauswertungen. Figur 2.4 zeigt typische Beispiele von natürlichen Oberflächen, bei denen eine starke Richtungsabhängigkeit der Reflexionsgrade besteht.

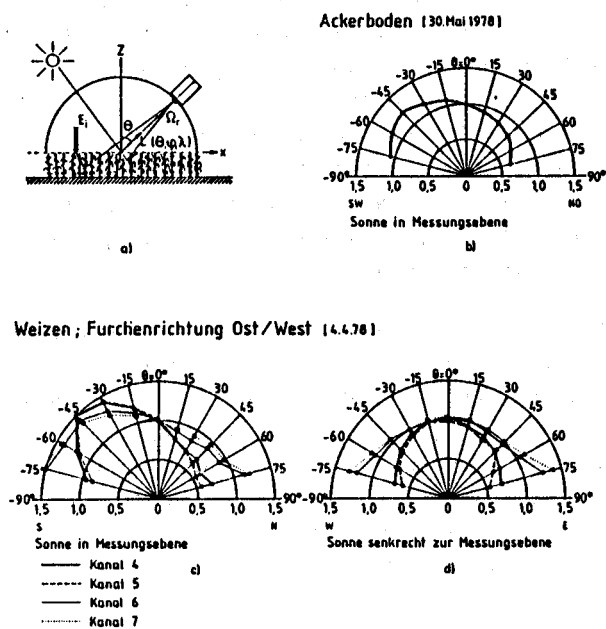


Fig. 2.4: Bidirektionale Reflexionsgrade von natürlichen Oberflächen. Ergebnisse von Bodenmessungen (GUYOT 1980) in den 4 Landsat-Kanälen 4-7 (aus: PFEIFFER 1983)

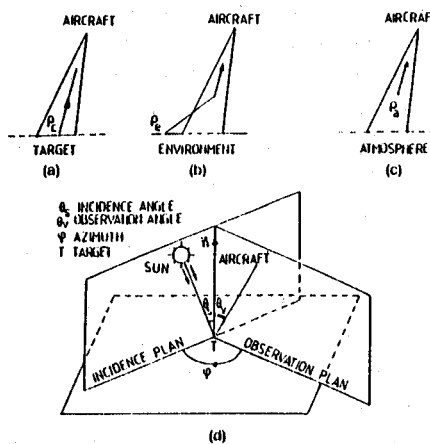


Fig. 2.5: Die Komponenten des scheinbaren Reflexionsgrades eines Oberflächenelementes (aus: BECKER u.a. 1988):

- a)  $\rho_c$  = Beitrag des Oberflächenelementes selbst
- b)  $\rho_e$  = Beitrag der Nachbarschaft
- c)  $\rho_a$  = Beitrag der Atmosphäre
- d) Tangentialebene der Oberfläche mit Lichteinfall- und Beobachtungsebene

● Im Hinblick auf die Beziehung (2/1) wird die mit einem Sensor, z.B. mit einer Kamera (Fig.2.2), in der Atmosphäre registrierte Gesamtstrahlung auch aus Anteilen bestehen, die nicht der Reflexion in einem Oberflächenelement (= Surfel für surface element) zuzuschreiben sind (Fig.2.5), und die deshalb bei der Beurteilung des scheinbaren Reflexionsgrades  $R^*$  getrennt werden müssen. Immerhin können in  $R^*$  ohne weiteres 1/3 Anteile aus den Wechselwirkungen der Strahlung in der Atmosphäre herrühren.

Die an einem Sensor eintreffende Strahlung mit der Strahldichte  $L_R$ , aus der Richtung eines Surfels an der Geländeoberfläche  $Z(X, Y)$  und der Raumrichtung  $\underline{Q}(X, Y)$  zum Sensor, Figur 2.2., besteht aus folgenden relevanten Komponenten (COLWELL 1983, S.234, STEVERS 1976, KRAUS/SCHNEIDER 1988):

$$L_R(X, Y, \underline{Q}) = \frac{1}{\pi} (E_S(X, Y) + E_s(X, Y)) \cdot R(2\pi, \underline{Q}, X, Y) \cdot \tau_A(\underline{Q}) + L_L(\underline{Q}) \quad (2/2)$$

worin

$E_S(X,Y), E_g(X,Y)$  halbräumliche Bestrahlungsstärken auf der Geländeoberfläche  $Z(X,Y)$  durch direkte Solarstrahlung  $L_S$  und Streustrahlung  $L_g$

$R(2\pi; \underline{Q}; X, Y)$  gerichteter Reflexionsgrad an der Oberfläche  $Z(X,Y)$  für die Raumrichtung  $\underline{Q}(\theta_0, \varphi)$

$\tau_A(\underline{Q})$  Transmissionsgrad der Atmosphäre für die Schicht zwischen  $Z(X,Y)$  und dem Sensor in Richtung  $\underline{Q}$

$L_L(\underline{Q})$  Strahldichte des Luftlichts (Streustrahlung) am Sensor in Richtung  $\underline{Q}$

$\tau_A$  und  $L_L$  hängen, neben den Variablen  $\theta_0, \varphi$ , von vielen Atmosphärenparametern ab und werden meist über Modellatmosphären abgeschätzt. Es sind praktisch keine Ortsfunktionen von  $X, Y$ ! In (2/2) wurde auf eine spektrale Spezifizierung verzichtet. (2/2) gilt in erster Linie für nichtthermische Strahlung.

Es gibt zahlreiche Vorschläge zur Trennung bzw. Elimination der verschiedenen Einflüsse in den an einem Sensor eintreffenden Signalen (2/2). SIEVERS 1976 hat mit Hilfe von Reflexionsflächen mit vorgegebenen Reflexionsgraden die optischen Dichten von Schwarzweiß-Luftbildern (Kodak Plus-X 2402, Bildmaßstab  $\sim 1:10\ 000$ ) korrigiert und absolute gerichtete Reflexionsgrade mit einer Genauigkeit von 1,5% erzielt. BECKER u.a. 1988 haben die relativen spektralen Reflexionsgrade  $R_Y, R_M, R_C$  für die Zwecke von Waldschadenserhebungen in den Spektralkanälen von Colorinfrarot-Bildern bestimmt (Bildmaßstäbe  $\sim 1:1700 - 1:10\ 000$ ) und setzten dabei Atmosphärenmodelle und bekannte Reflexionsstandards ein; Genauigkeit 15%. WANG u.a. 1984 haben in den Grauwerten von multi-spektralen LANDSAT-Bildern eine Trennung der Einflüsse erreicht mit unterschiedlichen Verarbeitungsmodellen für Pixel im Schatten und in direkter Sonne sowie mit Ratios zwischen den Spektralkanälen. Eine Übersicht über Geräte- und Bildkalibrierungsverfahren, relative und absolute, gültig für Satellitenbilder, mit Genauigkeitsangaben, hat SLATER 1988 gegeben.

Nach den bisher aufgestellten Überlegungen zur Bildaufnahme in der Atmosphäre, ist es an der Zeit zu fragen, was die digitale Bildmessung als ihre eigene Zielsetzung ansehen sollte. Die Bestimmung welcher der in (2/2) direkt oder indirekt (zu nennen ist  $Z(X,Y)$ ) enthaltenen physikalischen und geometrischen Objektgrößen sollte sie als ihre ureigenste Aufgabe ansehen? Es erscheint mir äußerst unwahrscheinlich, weil zu aufwendig, daß wir stets mit dem recht vollständigen Strahlungsmodell (2/2) arbeiten müßten, sondern daß Varianten sinnvoll sein können, je nach Art der gewünschten Informationen. Die im folgenden skizzierten Aufgabenbereiche A) bis C) beziehen sich auf Luft- und Satellitenbilder, der Bereich D) auf Anwendungen in Nahbereich.

A) Aufnahmesensor als Strahlungsmesser

Die am Sensor eintreffende Strahldichte  $L_R(X,Y;\underline{Q})$  besteht, wie aus (2/2) abgeleitet wird, aus folgenden Anteilen

$$L_R(X,Y;\underline{Q}) = \{L_{RS}(X,Y;\underline{Q}) + L_{Rg}(X,Y;\underline{Q})\} \cdot \tau_A(\underline{Q}) + L_L(\underline{Q}) \quad (2/3)$$

worin  $L_{RS}(X,Y;\underline{Q}), L_{Rg}(X,Y;\underline{Q})$  die von der Geländeoberfläche  $Z(X,Y)$  in Richtung  $\underline{Q}$  abgestrahlten, durch Solarstrahlung  $L_S$  bzw. Streustrahlung  $L_g$  verursachten Strahldichten sind. Digitale Bilddaten in Strahlungswerte umzurechnen, setzt eine sorgfältige Modellierung aller Einflüsse in (2/3) voraus und ebenso eine präzise Sensorkalibrierung, vor allem seiner physikalischen Parameter, vgl. Kapitel 2.2. Der Aufwand ist nicht gering, siehe SIEVERS 1976, SLATER 1988, BECKER u.a. 1988. Diese Anwendung der digitalen Bildmessung wäre aber prinzipiell möglich.

B) Digitale Bildmessung zur Rekonstruktion von Objektoberfläche  $Z(X,Y)$  und Bestimmung von Reflexionsgraden  $R(2\pi; \underline{Q}; X, Y)$

Eine möglichst saubere physikalische Modellierung der Grundbeziehung (2/2) ist hier wie in A) notwendig, um möglichst unverfälschte Reflexionsgrade zu erhalten. Wie wir ausführlicher für den Fall C) in Kapitel 3 zeigen werden, können prinzipiell beide Ortsfunktionen  $Z(X,Y)$  und  $R(\pi; \underline{Q}; X, Y)$  durch digitale Bildmessung bestimmt werden, die Reflexionsgrade allerdings nur für die an der Oberfläche  $Z(X,Y)$  vorhandenen Raumrichtungen  $\underline{Q}(X,Y)$ . Liegen multispektrale Bilddaten vor, so kann  $R$  ebenfalls spektral differenziert und als vektorwertige Funktion bestimmt werden:  $R_\lambda(2\pi; \underline{Q}; X, Y)$ . Die Weiterverarbeitung von  $R_\lambda$  zur semantischen Informationsextraktion könnte mit multispektraler

Klassifizierung, mit Verfahren aus der Signaturenforschung (GUYOT 1988) oder mit der weniger physikalisch basierten, sondern abstrakteren symbolischen Bildverarbeitung (Bildanalyse) geschehen.

Der Fall B) der digitalen Bildmessung wäre ausbaufähig für eine Informationsverarbeitung mit geringer Operateurunterstützung und hohen Genauigkeitsleistungen.

C) Digitale Bildmessung zur Rekonstruktion von Objektoberfläche Z(X,Y) und Orthophoto D(X,Y)

Im Strahlungsmodell (2/2) sind einige Komponenten enthalten, an denen man bei vielen Anwendungen der Bildmessung gar nicht interessiert ist, sondern sie eher als Ballast ansieht, beispielsweise bei den traditionellen Aufgaben der Karten- und Orthophotoherstellung. Die Basisbeziehung (2/2) lädt in diesen Fällen dazu ein, Modellvereinfachungen zu machen, die für das gewählte Ziel unerschädlich sind. So kann man in der Tat in (2/2) alle Strahlungsanteile am Sensor als ausschließlich von der Oberfläche Z(X,Y) herkommend ansehen und erhält:

$$L_R(X,Y,Q) = \frac{1}{\pi} E^*(X,Y) \cdot R^*(2\pi, Q; X,Y) \quad (2/4)$$

worin 
$$E^*(X,Y) = E_S(X,Y) + E_g(X,Y) + \hat{E}_L(Q) \quad (2/5)$$

die scheinbare halbräumliche Bestrahlungsstärke im Surfel (X,Y), mit  $E_L(Q)$  = entsprechender Anteil aus dem Luftlicht  $L_L(Q)$ . Es werden alle am Sensor ankommenden Strahlungsanteile als reflektierte Strahlung interpretiert, wodurch für  $R(2\pi; Q; X,Y)$  ein Fehlerterm  $R_f(Q)$  resultieren muß:

$$R^*(2\pi, Q; X,Y) = R(2\pi, Q; X,Y) \cdot \tau_A(Q) + R_f(Q) \quad (2/6)$$

$R^*$  ist der scheinbare Reflexionsgrad des Surfels (X,Y).

Solange ein genaues Geländemodell Z(X,Y) und ein "schönes" Orthophoto D(X,Y) mit Hilfe von (2/4) ableitbar sind - und dies hat bereits die traditionelle Photogrammetrie mit ihren Verfahren weltweit bewiesen - ist (2/4) als Grundbeziehung auch für die digitale Bildmessung sehr wichtig. Näheres in Kapitel 3.

Wie die Variante B) ist auch C) ausbaufähig für eine Informationsverarbeitung mit geringer Operateurunterstützung. Allerdings, die physikalisch fundierte Semantikextraktion wäre hier nicht optimal.

D) Oberflächenbestimmung Z(X,Y) durch digitale Bildmessung mit Hilfe von analytischen Reflexionsmodellen

Das an sich für die großräumige Atmosphäre aufgestellte Strahlungsmodell (2/2) kann nach zulässigen Anpassungen auf Anwendungen im Nahbereich, z.B. für Industrieobjekte, übertragen werden. Wir setzen den Transmissionsgrad der Atmosphäre  $\tau_A \approx 1$  und das Luftlicht  $L_L \approx 0$  und erhalten für die Strahldichte in Richtung  $Q(\theta_0, \varphi)$ :

$$L_R(X,Y,Q) = \frac{1}{\pi} [E_L(X,Y) + E_g(X,Y)] \cdot R(2\pi, Q; X,Y) \quad (2/7)$$

worin  $E_L(X,Y), E_g(X,Y)$  halbräumliche Bestrahlungsstärken auf einem Surfel der Oberfläche Z(X,Y) sind, durch direkte Strahlung der Lichtquelle L bzw. durch Streustrahlung und Mehrfachreflexionen aus der Umgebung.  $R(2\pi; Q; X,Y)$  ist - wie zuvor - der gerichtete Reflexionsgrad der Objektoberfläche Z(X,Y). Allerdings hat man in einer Reihe von Anwendungen in der Industrie - anders als bei der unendlichen Vielfalt natürlicher Oberflächen - Objekte in ihrer Oberflächenform Z(X,Y) zu bestimmen, denen man ein relativ einfaches, analytisches Modell der bidirektionalen Reflexion unterstellen kann. Infrage kommt vor allem das Reflexionsmodell von COOK/TORRANCE, neben vielen anderen, vgl. WEISENSEE 1988 und Figur 2.6, eine Kombination aus spiegelnder und diffuser Reflexion:

$$R_{CT}(2\pi, Q; X,Y) = R_d(X,Y) \cdot \cos(N(X,Y), L) + R_s(X,Y) \cdot \cos^c(H(X,Y), Q(X,Y)) \quad (2/8)$$

worin

$R_d(X,Y), R_s(X,Y)$  diffuser bzw. spiegelnder Reflexionsgrad an der Oberfläche Z(X,Y)

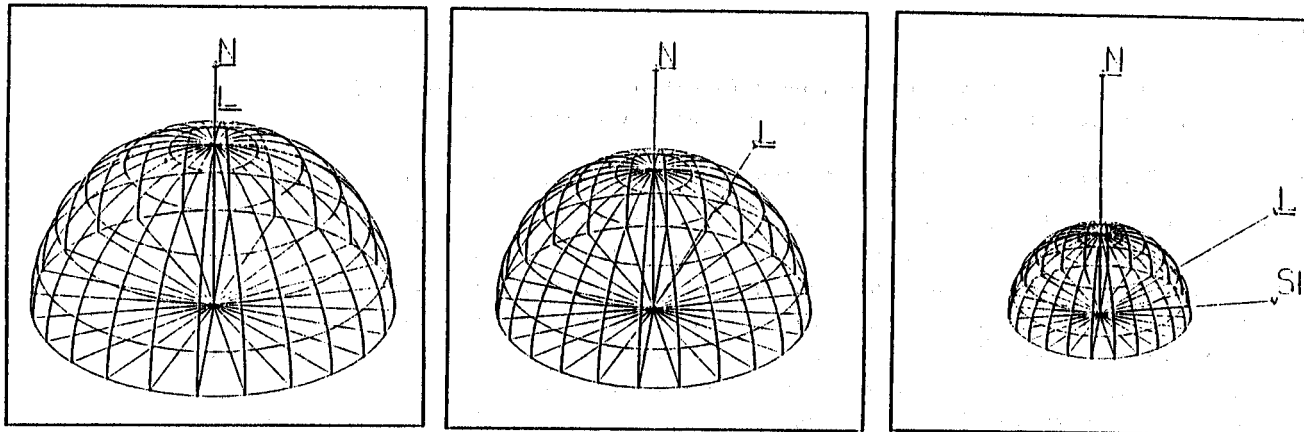
$N(X,Y)$  Flächennormale von Z(X,Y)

$H(X,Y)$  Hauptreflexionsrichtung in Lichteinfallsebene

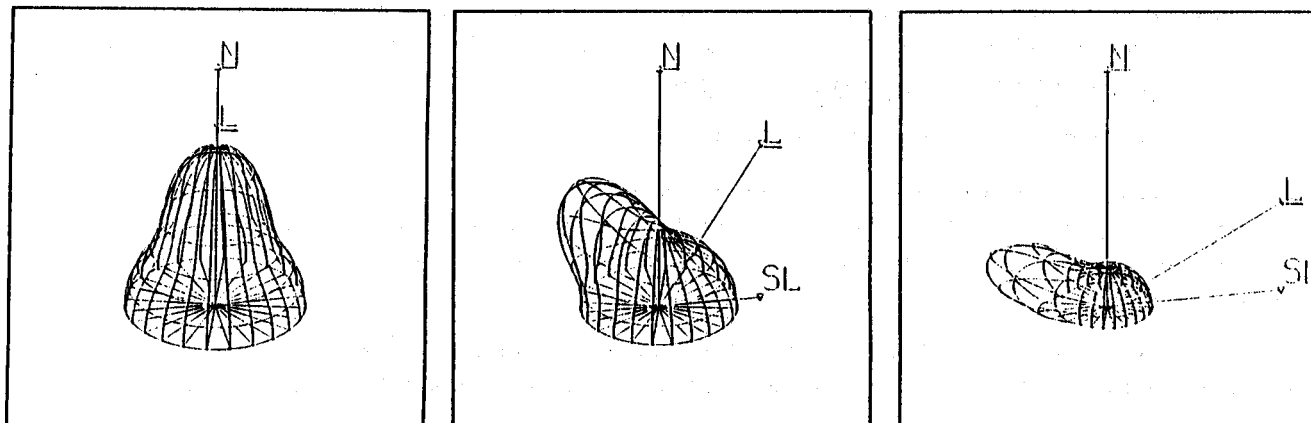
$L$  ~ Konstant Richtungsvektor zu einer weitentfernten Lichtquelle

$R_d, R_s$  und c sind Parameter des Oberflächenmaterials. Hat man homogene Materialien, so sind diese

Parameter Konstanten, keine Ortsfunktionen!



a) diffuse Reflexion  $R_d = 100\%$  (= perfekte Lambert-Reflexion)



b) Kombination diffuser und spiegelnder Reflexion mit  $R_d = R_s = 50\%$ ,  $C = 10$

**Fig. 2.6:** Bidirektionale Reflexionsfunktion nach COOK/TORRANCE für hergestellte Materialien (aus: WEISENSEE) Lichteinfallswinkel  $\theta_L = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ,  $\underline{N}$  = Flächennormale,  $\underline{L}$  = Vektor zur Lichtquelle,  $S_L$  = Spur von  $\underline{L}$  in der Tangentialebene

Natürliche Oberflächen können diesem Modell nahekommen, wenn ihre Oberflächenrauigkeit ein Spektrum hat, das klein ist im Verhältnis zu einem Surfel. Näheres findet sich in WEISENSEE.

Sofern analytische Modelle für  $R$  zutreffen, kann die Aufgabe der Oberflächenbestimmung sehr erleichtert werden, weil dann ein ganz wesentlicher Teil an Objektinformationen bereits bekannt wäre, vgl. Kapitel 3 und 4.

## 2.2 Bilderzeugung mit einer metrischen Kamera: Bestandteile des geometrisch-physikalischen Modells

Für den wichtigsten Sensor der digitalen Photogrammetrie, die metrische Kamera, Fig. 2.2, sind die folgenden geometrischen und physikalischen Beziehungen bei der Erzeugung von Bildsignalen von Bedeutung. Wir verfolgen die Bildsignale von der Bildebene zurück bis in die Geschehnisse an der Objektoberfläche. Dabei sollen die für den Sensor Kamera typischen Parameter hervorgehoben werden. Im übrigen, die Darstellung will nicht in allen Details vollständig sein.

Digitale Bildsignale in einem Bild  $\underline{B}$

$$G'(x,y) = a + b \cdot E(x,y) \cdot t \quad \text{oder} \quad (2/9)$$

$$D'(x,y) = a + b \cdot \log(E(x,y) \cdot t) \quad (2/10)$$

mit

a, b Parameter der linearen Transferfunktion (2/9) bzw. (2/10). Die Sensorparameter a, b dokumentieren die Strahlungsempfindlichkeit des benutzten Photomaterials oder der CCD-Elemente

$G'(x', y')$  digitaler Bildsignalwert eines Pixels als Bestrahlungsäquivalent

$D'(x', y')$  digitaler Bildsignalwert eines Pixels als Äquivalent einer optischen Dichte

$x', y'$  Koordinatensystem in Bild  $\underline{B}$

$E(x', y') \cdot t$  Bestrahlung im Pixel  $x', y'$  bei einer Belichtungszeit  $t$

### Geometrisches Kameramodell

Für die geometrischen Beziehungen zwischen Objektraum und Bildraum gilt nach wie vor das Kameramodell der analytischen Photogrammetrie.

Bild  $\underline{B}'$ :

$$\begin{aligned} x'_i &= c_K \frac{I_{11}(X_i - X_0) + I_{21}(Y_i - Y_0) + I_{31}(Z_i - Z_0)}{I_{13}(X_i - X_0) + I_{23}(Y_i - Y_0) + I_{33}(Z_i - Z_0)} + x_0 + \Delta x(x'_i, y'_i) \\ y'_i &= c_K \frac{I_{12}(X_i - X_0) + I_{22}(Y_i - Y_0) + I_{32}(Z_i - Z_0)}{I_{13}(X_i - X_0) + I_{23}(Y_i - Y_0) + I_{33}(Z_i - Z_0)} + y_0 + \Delta y(x'_i, y'_i) \end{aligned} \quad (2/11)$$

$x'_i, y'_i$  Bildkoordinaten des Punktes  $P'_i$

$X_i, Y_i, Z_i$  Objektkoordinaten des Punktes  $P_i$

Kameradaten

$x_0, y_0, c_K$  innere Orientierung

$\Delta x', \Delta y'$  Verbildungsfunktionen

$X_0, Y_0, Z_0$  äußere Orientierung

$r_{kl} = r_{kl}(\omega, \varphi, \kappa)$

### Strahlungsvermittlung in der Bildebene

Dieser Vorgang im Sensor bestimmt ganz entscheidend zwei Merkmale der Bildsignale: a) ihre Signalthöhe und b) ihr Ortsspektrum

a) Übertragung der Strahlung in die Bildebene

Die an der Kamera eintreffende Strahlung mit der Strahldichte  $L_R(X, Y; \underline{Q})$ , hauptsächlich von einem Surfel  $(X, Y)_i$  mit der Sensorrichtung  $\underline{Q}(X, Y)_i$  herrührend, vgl. (2/2) und Figur 2.2., wird nach folgendem Modell in die Bestrahlungsstärke  $E(x', y')_i$  eines Pixels  $P'(x', y')_i$  in der Bildebene  $\underline{B}'$  übertragen (SIEVERS 1976):

$$E(x', y')_i = \frac{\pi}{4} \tau_0(\sigma_i) \cdot \left(\frac{d}{c_K}\right)^2 \cdot \cos^p \sigma_i \cdot L_R(X, Y, \underline{Q})_i \quad (2/12)$$

worin an Kameradaten enthalten ist:

$\tau_0(\sigma)$  der vom Bildwinkel  $\sigma$  abhängige Transmissionsgrad der Kamera-Optik, evtl. auch von Blendenzahl abhängig

$\left(\frac{d}{c_K}\right)$  Blendenzahl;  $d$  = Blendendurchmesser,  $c_K$  = Kammerkonstante

$\cos^p \sigma$  Lichtabfall, mit  $p \leq 4$ , je nach Optik

Der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten  $x', y'$  und Objektkoordinaten  $X, Y, Z$  ist durch (2/11) gegeben.  $L_R$  ist über (2/2) mit den Oberflächendaten verknüpft.

b) Faltung der Signale in der Bildebene

Eine Kamera wirkt als ein lineares translationsinvariantes System auf die empfangene Strahlung ein.

Es seien vorübergehend  $G(x', y')$  die mit einer idealen, fehlerfreien Kamera empfangenen Grauwerte eines Bildes. Der reale Kamerasensor erzeugt daraus durch Faltung tiefpaßgefilterte Grauwerte

$G'(x', y')$ :

$$G'(x',y') = \int_{\bar{x}=-\infty}^{\bar{x}=\infty} \int_{\bar{y}=-\infty}^{\bar{y}=\infty} \bar{G}(\bar{x},\bar{y}) \cdot \text{PSF}(x' - \bar{x}, y' - \bar{y}) \, d\bar{x} \, d\bar{y} \quad (2/13)$$

worin  $\text{PSF}(x',y')$  die normierte Punktstreufunction des Abbildungssystems ist. Üblicherweise bezieht man in die Faltung (2/13) auch alle anderen Schritte der Signalübertragung in der Atmosphäre mit ein, siehe (2/2), so daß die PSF als Systemfunktion behandelt werden kann, einschließlich ihrer Fouriertransformierten, die Modulationstransferfunktion (= MTF): Die System-MTF kann bekanntlich aus Luftbildern nachträglich bestimmt werden (LEI/TIZIANI 1988).

Die Kenntnis der MTF von Bildern, die durch digitale Bildmessung ausgewertet werden sollen, zeigt Grenzen der Auswertung auf: Die Objektrekonstruktion kann nur Ergebnisse liefern, die im Ortspektrum frequenzbandbeschränkt sind und die nicht besser sein können als die MTF der benutzten Bilder.

### 2.3 Eine Transferfunktion zwischen den Bildsignalen von Stereobildern

Mit den Kapiteln 2.1 und 2.2 haben wir die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Bildsignalen und den sie erzeugenden geometrischen und physikalischen Größen zusammengestellt. Wie längst bekannt ist und nicht weiter überrascht, enthalten die Bildsignale nicht nur Informationen über die Oberfläche von Objekten, die für die digitale Bildmessung nützlich sind (Nutzsignal), sondern auch uninteressante Anteile, die den Charakter von Störsignalen haben. Aber auch die sollten wir mit gebotener Sorgfalt erfassen. Denn, im Interesse einer übersichtlichen und möglichst unverzerrten Verarbeitung der digitalen Bildsignale nach statistischen Modellen, ist es am sichersten, die Modellbildung mit deterministischen Ansätzen vollständig zu machen, so daß rein stochastische, nur schwach korrelierte Residuen verbleiben. Doch wie sollte man Vollständigkeit erreichen und in welchem Ausmaß dabei Residuen zulassen?

Wollte man der digitalen Bildmessung die letzte Konsequenz als Meßverfahren zur Objektrekonstruktion im Sinne der Beziehung (2/2) abverlangen, so müßte man - wie vergleichsweise in der Computer-Animation praktiziert - den aufgenommenen digitalen Bildern ein perfekt synthetisiertes Modellbild gegenüberstellen, berechnet aus einem rekonstruierten Objektraum, der sich im Strahlungsgleichgewicht befindet. Ich glaube, dieser perfektionistische Weg scheitert bis auf weiteres am hohen Computeraufwand, wie ein Blick in die Werkstätten dieser bunten Welt des schönen Scheins lehrt! In der Tat, wir können für die heute bekannten Aufgaben der digitalen Bildmessung durchaus einen pragmatischen Ingenieursstandpunkt annehmen und die perfekte Rekonstruktion von Reflexionsdaten (bzw. von Orthophotodaten) zurückstellen, solange eine möglichst genaue Oberflächenrekonstruktion gesichert bleibt.

Diesem Ziel dient die im folgenden erläuterte Korrespondenzbedingung für Bildsignale von Stereobildern. Sie stellt die Signalwerte von Stereobildern ins Zentrum des Interesses; sie selbst sollen möglichst exakt durch geeignete Funktionen verknüpft und erfaßt werden und nicht unbedingt die sie erzeugenden Beleuchtungs- und Reflexionswerte. Ein Rückgriff auf Reflexionsdaten wäre aber - bei erhöhtem Aufwand natürlich - durchaus möglich, vgl. Aufgabenbereich B) im Kapitel 2.2. Wir erläutern die Korrespondenzbedingung mit der Aufgabenstellung C), Kapitel 2.2, also mit dem Ziel, die Objektoberfläche  $Z(X,Y)$  und ihr Orthophoto  $D(X,Y)$  zu rekonstruieren, siehe die Beziehungen (2/4), (2/12) und (2/11). Die Korrespondenzbedingung lautet für diesen Fall:

$$T'(D'(x',y') \cdot v_{D'}(x',y'))_i = T''(D''(x'',y'') \cdot v_{D''}(x'',y''))_i = \dots = D(X,Y)_i \quad (2/14)$$

worin

$T', T'', \dots$

lokale Transferfunktionen zwischen Bildsignalen korrespondierender Punkte in Stereobildern  $B', B'', \dots$

$D(X,Y)_i$

optische Dichte des zu rekonstruierenden Orthophotos im Objektpunkt  $P(X,Y,Z)_i$



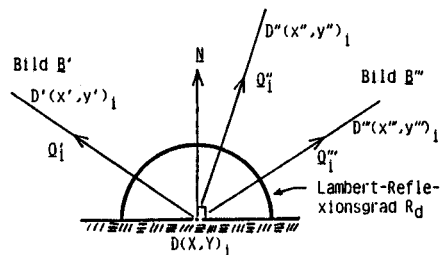
$D'(x',y')_i, D''(x'',y'')_i, \dots$  gegebene digitale optische Dichten in den Bildern  $B', B'', \dots$  an den zu  $P_i$  korrespondierenden Bildpunkten  $P'_i, P''_i, \dots$   
 $v_{D'}, v_{D''}$  stochastische Residuen der Bilddichten  $D'_i, D''_i, \dots$

Die Transferfunktionen (nähere Herleitungen hierzu legt WEISENSEE vor) haben die Aufgabe, die durch die großen Richtungsunterschiede von  $P_i$  zu  $P'_i, P''_i, \dots$  verursachten Signalunterschiede in den Bildern aufzuheben. Ein Rückblick auf die Erörterungen in den Kapiteln 2.1 und 2.2 zeigt, daß es eine ganze Reihe von Ursachen für derartige Anisotropien geben kann, nämlich durch

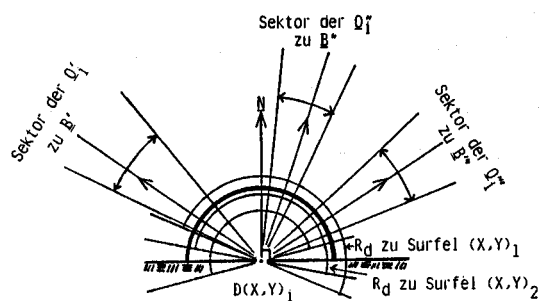
- Sensorunterschiede: Lichtabfall, Transmission, Empfindlichkeit
- Atmosphäre: Transmission, Luftlicht
- Änderung der Bestrahlungsrichtung und damit Änderung des gerichteten Reflexionsgrades
- Anisotropie des gerichteten Reflexionsgrades  $R(2\pi; \underline{Q}, X, Y)_i$ , die wegen der großen Unterschiede in den Reflexionsrichtungen  $\underline{Q}'(X, Y)_i \neq \underline{Q}''(X, Y)_i \neq \dots$  zur Wirkung kommt, siehe das Beispiel natürlicher Oberflächen in Figur 2.5.

Die ersten drei Einflüsse ließen sich durch Kalibrierungen udgl. bzw. einen kurzen Bildflug vermeiden, der dritte aber bliebe im allgemeinen bestehen, siehe das schematische Beispiel der Figur 2.7 a). Wir wollen diesen unvermeidlichen, realistischen Fall weiterverfolgen. Die benötigte Wirkung der Transferfunktion ist für ein einzelnes Surfel ebenfalls in Figur 2.7 a) zu sehen:  $D(X, Y)_i$  soll einem über die vorhandenen Abbildungsrichtungen  $\underline{Q}'_i, \underline{Q}''_i, \dots$  mittleren, gerichteten Reflexionsgrad entsprechen. Die Transferfunktion  $T$  muß man jedoch nicht für jedes Surfel individuell ansetzen, sondern für eine mehr oder weniger große Nachbarschaft mit gleichartigen Reflexionsgraden. Die folgenden zwei Beispiele mögen weitere Klärung über die Art der Transferfunktionen und ihre örtliche Reichweite bringen.

Fig. 2.7: Transferfunktionen  $T$  für Objekte mit anisotropen gerichteten Reflexionsgraden



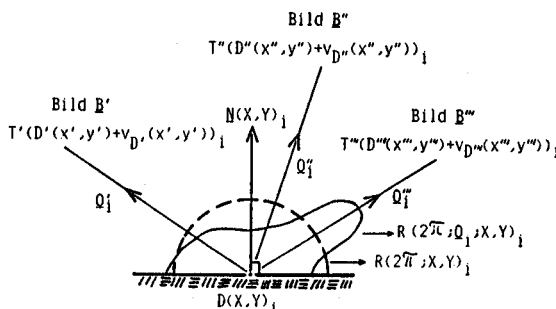
$D'(x', y')_1 = D''(x'', y'')_1 = \dots = D(X, Y)_1$   
 $\Rightarrow$  Transferfunktionen  $T' = T'' = \dots \equiv 1$   
 a) Situation für ein Surfel  $(X, Y)_1$  des Objekts



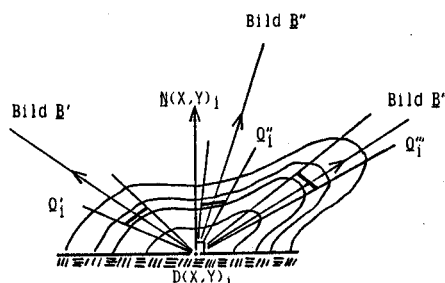
$D'(x', y')_1 = D''(x'', y'')_1 = \dots = D(X, Y)_1$   
 $D'(x', y')_2 = D''(x'', y'')_2 = \dots = D(X, Y)_2 \neq D(X, Y)_1$   
 ... usw.

$\Rightarrow$  Transferfunktionen  $T' = T'' = \dots \equiv 1$   
 b) Situation für alle Surfel des Objekts (alle Surfel parallel zu sich selbst in Surfel  $(X, Y)_1$  geschoben)

Fig. 2.8: Transferfunktionen  $T$  für Objekte mit völlig diffusen gerichteten Reflexionsgraden  $R_d$



$R(2\pi; X, Y)_1 =$   
 $=$  mittlerer, isotroper Reflexionsgrad  
 a) Situation für ein Surfel  $(X, Y)_1$  des Objekts



$d'_0 + (D'(x', y') + v_{D'}(x', y'))_1 d'_1 = d''_0 + (D''(x'', y'') + v_{D''}(x'', y''))_1 d''_1 = \dots = D(X, Y)_1$

$\Rightarrow$  Transferfunktionen  $T': d'_0 + (D'(x', y') + v_{D'}(x', y'))_1 d'_1$   
 b) Situation für alle Surfel einer lokalen genähert gleichgeneigten Umgebung (alle Surfel parallel zu sich selbst in Surfel  $(X, Y)_1$  geschoben)

Beispiel 1, Figur 2.8, unterstellt einer beliebig geformten Objektoberfläche die Eigenschaft der völlig diffusen (Lambert-) Reflexion  $R_d(2\pi; X, Y)$ , ein idealer Sonderfall, vgl. Formel (2/8) und Figur 2.6 a).  $R_d$  ist nur Ortsfunktion von  $X, Y$  und verhält sich sonst völlig isotrop. Für diesen Sonderfall sind die Signalwerte eines Surfels in allen Bildern identisch:

$$D'(x, y)_i = D''(x', y'')_i = \dots = D(X, Y)_i \quad (2/15)$$

so daß  $T' \equiv T'' \equiv \dots \equiv 1$ . Die Transferfunktionen werden an sich nicht benötigt, Figur 2.8, trotz großer Richtungssektoren als Folge einer großen Objektfläche und den darin möglichen, sehr verschiedenen Oberflächenneigungen.

Beispiel 2, Figur 2.7, beschreibt den realistischen Allgemeinfall anisotroper Reflexionsgrade. Aber im Gegensatz zum Beispiel 1 wurde der Geltungsbereich der Transferfunktion auf der Objektoberfläche  $Z(X, Y)$  so eng begrenzt, daß die Richtungsänderungen der Abbildungsstrahlen  $\underline{Q}'(X, Y)$ ,  $\underline{Q}''(X, Y), \dots$  und der Flächennormalen gering sind. Es gelte somit die Situation nach Figur 2.8 b). Wegen der kleinen lokalen Umgebung auf  $Z(X, Y)$  unterstellen wir den Surfeln dieses Gebietes ein gleichartiges Reflexionsverhalten in Gestalt einer genähert parallelen Kurvenschar. Die Schar innerhalb eines Sektors kann deshalb mit einer gemeinsamen linearen Transferfunktion auf die korrespondierende Schar in einem anderen Sektor abgebildet werden. Man könnte auch eines der Bilder zum Referenzbild erklären, z.B. diejenige Perspektive, die man als Orthophoto erhalten will. Falls es das Bild  $\underline{B}'$  sein soll, setzt man seine Transferfunktion in Formel (2/14) stets  $T' \equiv 1$ . Mit linearen Transferfunktionen lautet die Korrespondenzbedingung (2/14):

$$d'_0 + (D'(x, y) + v_D(x, y))_i \cdot d'_1 = d''_0 + (D''(x', y'') + v_{D''}(x', y''))_i \cdot d''_1 = \dots = D(X, Y)_i \quad (2/16)$$

worin

$d'_0, d'_1; d''_0, d''_1, \dots$  Parameter von linearen Transferfunktionen  $T', T'', \dots$

Mit den beiden Beispielen ist der Rahmen für die Eigenschaften der Transferfunktionen abgesteckt. Doch könnte eine Abschätzung über die Größe des Geltungsbereiches der  $T$  hilfreich sein. Wie klein müßte er im äußersten Fall sein? Setzen wir diese Fläche dem stereoskopischen Gesichtsfeld eines Operateurs gleich ( $\sim$  Durchmesser von  $1,5^\circ$  der fovea centralis), so folgt daraus bei einer Vergrößerung von 8-12fach eine Bildfläche von nur  $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ . Mit solchen Gebietsgrößen kann ein Photogrammetrieoperator Stereobilder genau vermessen. Es ist zu hoffen, daß die digitale Bildmessung mit erheblich größeren Gebietsgrößen der  $T$  erfolgreich operieren kann und zwar nicht nur bei lambertischen Oberflächen.

### 3. DIE BILDINVERSION MIT DEM FAST-VISION-ANSATZ ALS GRUNDLAGE DIGITALER BILDMESSUNG: GEMEINSAME BESTIMMUNG GEOMETRISCHER UND PHYSIKALISCHER PARAMETER VON OBJEKTOBERFLÄCHEN

Die Herleitung des Ansatzes zum Facetten-Stereosehen ist bereits an anderer Stelle in mehreren Varianten gegeben (siehe WROBEL 1987 a-c). Eine davon wird in Kurzfassung zusammengestellt.

Wir beziehen uns wieder auf den Aufgabenbereich C), Kapitel 2.2, als Beispiel, das auf die anderen sinngemäß übertragen werden kann. Aufnahmeconfiguration und Ziele der Auswertung sind in den Figuren 3.1 und 3.2 dargestellt. Wir unterstellen digitale Schwarzweißbilder  $\underline{B}', \underline{B}'', \dots$ , deren innere und äußere Orientierung bekannt seien. Zur mathematischen Lösung der Zielsetzung wird eine Bildinversion direkt in den Objektraum nach folgender Definition angesetzt: Ausgehend von der Korrespondenzbedingung (2/16) sind die digitalen Dichtewerte eines Bildes  $\underline{B}'$  im Gebiet eines Objektfensters darzustellen mit Hilfe

- der Transferfunktion  $T'$  im Bildraum,
- der Ortsfunktion  $\tilde{D}(X, Y)$  des Orthophotos und
- der Objektoberfläche  $\tilde{Z}(X, Y)$ .

Wahl passender Funktionen:

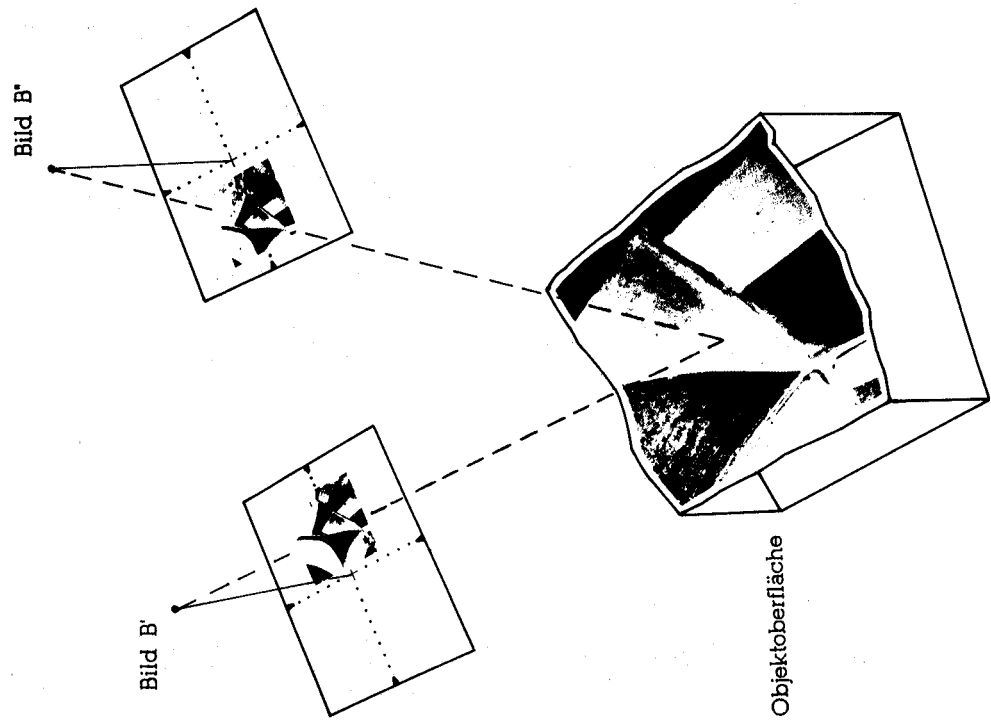
$T'$ :

lineare Funktionen, Parameter  $d'_0, d'_1$ , vgl. (2/16)

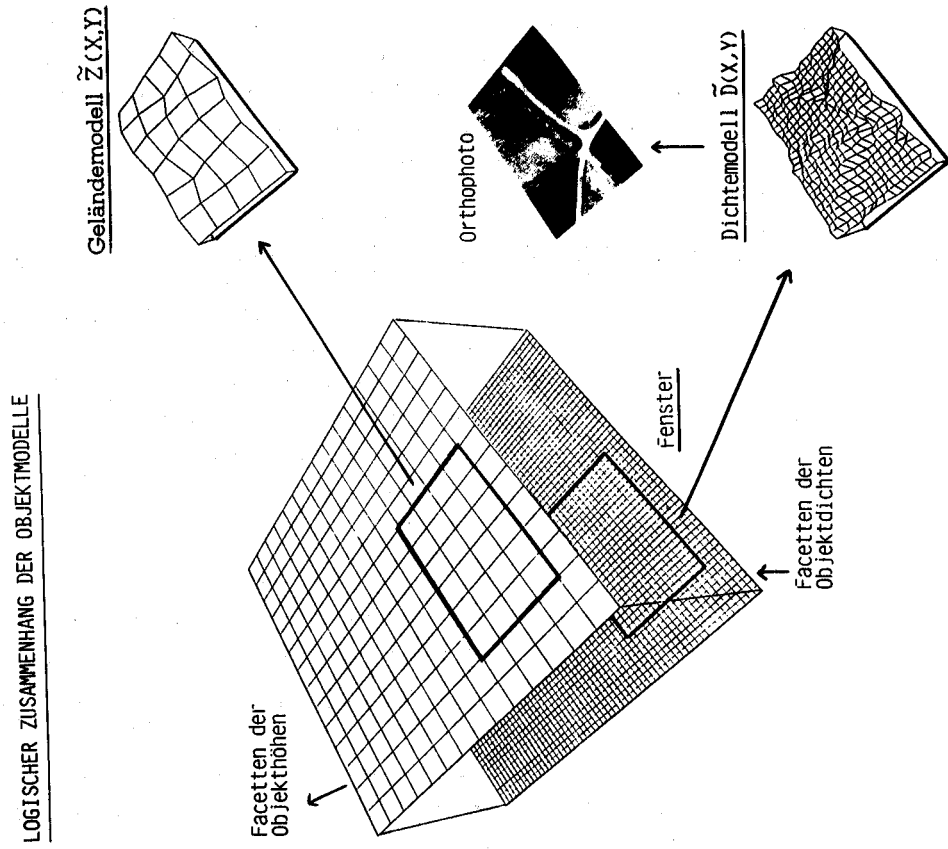
$\tilde{D}(X, Y), \tilde{Z}(X, Y)$ :

Interpolationsfunktionen mit beschränkten Übertragungseigenschaften sind zulässig, vgl. (2/13).

Figur 3.1: Stereoaufnahmen  
 einer Objektoberfläche



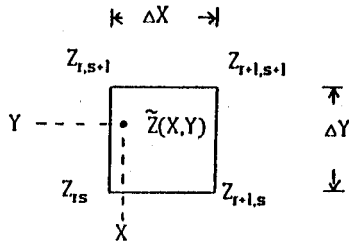
Figur 3.2: Ziel der digitalen Bildmessung  
 (FAST-Vision-Ansatz):  
 Gemeinsame Rekonstruktion von Objektober-  
 fläche  $\tilde{Z}(X,Y)$  und Objektdichte  $\tilde{D}(X,Y)$



Wir haben uns für lokale Interpolationsfunktionen in Facetten mit Stützwerten als Parameter entschieden (Finite Elemente). Diese Wahl gab der Bildinversion den Namen Facetten-Stereosehen; in englischer Abkürzung FAST Vision, siehe Figur 3.2. Nicht gezeigt sind die zu den Parametersätzen von  $d'_0, d'_1$  des Bildes  $B'$  gehörenden Facetten im Bildraum, den jeweiligen Geltungsbereichen der Funktionen  $I'$ . Wir verwenden zur Zeit die Bilinearinterpolation.

Bilinearinterpolation in der Z-Facette rs:

$$Z(X,Y) = Z_{rs} + \frac{X-X_r}{\Delta X} (Z_{r+1,s} - Z_{rs}) + \frac{Y-Y_s}{\Delta Y} (Z_{r,s+1} - Z_{rs}) + \frac{X-X_r}{\Delta X} \frac{Y-Y_s}{\Delta Y} (Z_{rs} + Z_{r+1,s+1} - Z_{r,s+1} - Z_{r+1,s}) \quad (3/1)$$



gesuchte Parameter: Stützwerte  $Z_{rs}$

Das Verfahren läuft auf ein Iterationsverfahren hinaus, das mit Näherungen  $Z_{rs}^0$  für die Stützwerte beginnen muß; siehe die Näherungsoberfläche  $\tilde{Z}^0(X,Y)$  in Figur 3.3. Gesuchte Parameter sind deshalb die Zuschläge  $dZ_{rs}$ :

$$Z_{rs} = Z_{rs}^0 + dZ_{rs} \quad (3/2)$$

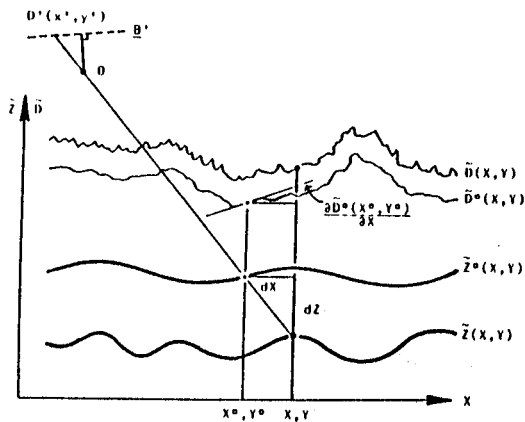
Die Darstellung des Orthophotos  $\tilde{D}(X,Y)$  geschieht in der gleichen Weise.

Änderungen  $d\tilde{Z}_{rs}$  in den Stützstellen als Funktion von Höhenänderungen  $dZ$  an der Stelle  $X^0, Y^0$ :

für Bilinearfunktion:

$$d\tilde{Z} = d\tilde{Z}(X^0, Y^0, dZ_{rs}, dZ_{r+1,s}, dZ_{r,s+1}, dZ_{r+1,s+1}) \quad (3/3)$$

Wir betrachten ein beliebiges Pixel  $i$  mit seiner Dichte  $D'(x',y')_i$  im Bild  $B'$ , vgl. Figur 3.3, und bringen seinen Abbildungsstrahl mit der Näherungsfläche  $\tilde{Z}^0(X,Y)$  an der Stelle  $X^0, Y^0$  zum Schnitt. Seinen Höhenfehler  $dZ$  verknüpfen wir mit Hilfe des Grauwertgradienten mit der Bildichte  $D'(x',y')$  in einer Taylorentwicklung der Korrespondenzbedingung (2/16).



$\tilde{Z}(x,y)$  object surface | represented by interpolation  
 $\tilde{D}(x,y)$  object optical density | functions  
 $\tilde{Z}^0(x,y), \tilde{D}^0(x,y)$  representation of  $Z(x,y), D(x,y)$  computed with approximate parameters  
 • starting points | of Newton - Gauß - iterations  
 • final points

$$d'_0 + (D'(x',y') + v_{D'}(x',y'))_i \cdot d'_1 - \tilde{D}(X,Y)_i - \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i + \frac{\partial \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i}{\partial X} dX + \frac{\partial \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i}{\partial Y} dY \quad (3/4)$$

Kopplung von  $dX$  und  $dY$ :

$$dX = \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)'_i d\tilde{Z}_i, \quad dY = \left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right)'_i d\tilde{Z}_i \quad (3/5)$$

Perspektivabbildung:

$$dX = \frac{X^0_i - X^0_0}{Z^0_i - Z^0_0} d\tilde{Z}_i, \quad dY = \frac{Y^0_i - Y^0_0}{Z^0_i - Z^0_0} d\tilde{Z}_i \quad (3/6)$$

$X^0_0, Y^0_0, Z^0_0 \Rightarrow$  Projektionszentrum von  $B'$

Figur 3.3.: Das Prinzip der Bild-Inversion: Rückprojektion von opt. Dichten eines Bildes auf die Objektoberfläche, Verknüpfung von Dichte-Gradienten mit der Höhenänderung  $dZ$

Einsetzen von (3/6) in (3/4) ergibt:

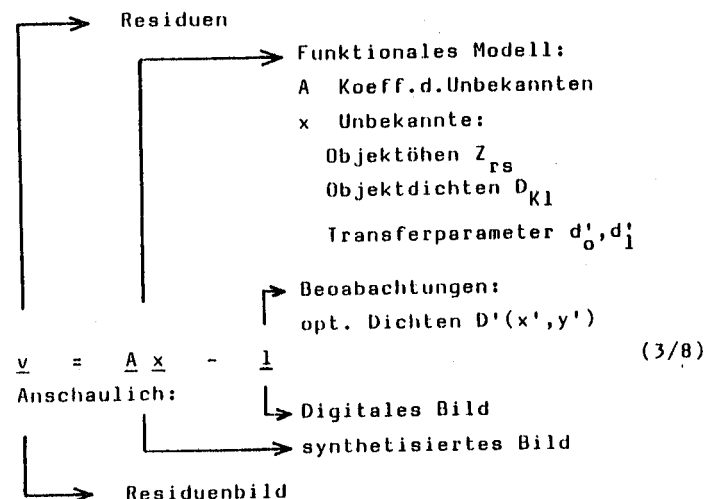
$$d'_0 + (D'(x',y') + v_{D'}(x',y'))_i \cdot d'_1 - \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i + \left[ \frac{\partial \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i}{\partial X} \frac{X^0_i - X^0_0}{Z^0_i - Z^0_0} + \frac{\partial \tilde{D}^0(X^0, Y^0)_i}{\partial Y} \frac{Y^0_i - Y^0_0}{Z^0_i - Z^0_0} \right] \cdot d\tilde{Z} \quad (3/7)$$

Gleichung (3/7) stellt die Grundbeziehung für die Bildinversion dar: Optische Dichten  $D'(x',y')$

des Bildes  $B'$  stehen in direkter Beziehung mit den physikalischen Größen  $\tilde{D}(X,Y)$  und geometrischen Größen  $\tilde{Z}(X,Y)$  des Objektraumes. Die Daten mindestens eines weiteren Bildes müssen hinzutreten in Übereinstimmung mit den Gesetzen der analytischen Photogrammetrie.

Nach völliger Linearisierung von (3/7) hat man für die Pixel eines Bildes folgenden Typus von Verbesserungsgleichung:

Ausgleichsbegriffe:



Die Gesamtheit der Verbesserungsgleichungen könnte einer üblichen Newton-Gauß-Iteration unterzogen werden. Jedoch, wie viele Inversions-Probleme, gehört auch die hier vorgetragene Bildinversion zu den sogenannten "schlecht gestellten" Problemen, die ohne eine stabilisierende Regularisierung nur unzuverlässig lösbar wäre, vgl. MORITZ 1978, TERZOPOULOS 1986. Zur numerischen Lösung von FAST Vision ist folgender Regularisierungsansatz möglich:

$$v^T P v + \lambda \cdot S(Z_{rs}) = \text{Minimum!} \quad (3/9)$$

mit  
 $v^T P v$  = Fehlernorm  
 $S(Z_{rs})$  = Stabilisierungsfunktional für die Oberflächenapproximation  $\tilde{Z}(X,Y)$   
 $\lambda$  = Regularisierungsparameter

Vorschläge für  $S(Z_{rs})$ :

Kubische Splines mit  $C^2$ -Kontinuität

H.Ebner (DGM):

Finite-Element-Methode mit Norm für 2. Ableitungen

Terzopoulos (MIT):

quadrat.Spline  $C^1$ -Kontinuität, jedoch mit gesteuerter Anpassung an lokale Unstetigkeiten => Modell einer "dünnen Platte unter Spannung"

#### 4. VERALLGEMEINERUNGEN UND VERGLEICHE MIT ANDEREN COMPUTER-VISION-ANSÄTZEN ZUR OBERFLÄCHENBESTIMMUNG VON OBJEKTEN

##### 4.1 Verallgemeinerungen

Es werden zunächst einige der zuvor in Kapitel 3 gemachten Einschränkungen aufgehoben und die daraus resultierenden Änderungen in den grundlegenden physikalisch-geometrischen Ansätzen aufgelistet. Weitere Verallgemeinerungen beziehen sich auf in der Photogrammetrie und Fernerkundung bekannte Bildsensoren und Bildmaterialien. Sie alle mögen - in aller Kürze - die Universalität der FAST-Vision-Bildinversion demonstrieren.

A) Einbeziehung von geodätischen Observablen: Paßpunktkoordinaten, Strecken, ...  
 Da der Ansatz zur digitalen Bildmessung stets die zwei Funktionen  $\tilde{D}(X,Y)$  und  $\tilde{Z}(X,Y)$  enthält, müssen auch die geodätischen Informationen die Verbindungen zu beiden herstellen. Ein Paßpunkt muß mit (geglätteter) Objektmarkierung (z.B. Signalscheibe) als optische Dichtefunktion  $D_p(X,Y)$  vorliegen und die dem Signal zugeordneten Paßpunktkoordinaten. Näheres findet sich in WROBEL/WEISENSEE 1987 und KEMPA et al.

B) Hat man Informationen nach A) den Verbesserungsgleichungen (3/7) hinzugefügt, dann ist auch die Orientierungsfrage der Bilder lösbar. Man muß nur in (3/6) die entsprechenden Glieder mit den Daten der äußeren Orientierung hinzunehmen und in (3/7) weitertragen.

Vermehrung der Bilder ohne gleichzeitige Fenstervergrößerung, läßt die Zahl an Parametern nahezu konstant, aber erhöht die Ergebnisgenauigkeit.

Die Zahl der Bilder kann ohnehin, theoretisch betrachtet, beliebig groß sein; auch das Objektgebiet, für das  $\tilde{Z}(X,Y)$  und  $\tilde{D}(X,Y)$  bestimmt werden (digitale Bündelblockausgleichung).

C) Color- oder Multispektralbilder

machen entsprechend der Zahl an Spektralkanälen die Funktion  $\tilde{D}(X,Y)$  zu einer vektorwertigen Funktion  $\underline{\tilde{D}}(X,Y)$  mit derselben Zahl an Komponenten. Die Oberflächenfunktion  $\tilde{Z}(X,Y)$  kann durch diese Informationsvermehrung besser bestimmt werden.

D) Bisher haben wir immer eine metrische Kamera als Sensor unterstellt. Interessante Stereobilder gibt es heute aber auch vom Sensor SPOT und von digitalen Dreizeilenkameras. Die Abbildungsgesetze dieser Systeme sind auszutauschen gegen die der metrischen Kamera. Es ergeben sich dadurch Änderungen im wesentlichen nur in den Gleichungen (2/11) und (2/12).

4.2 Vergleiche mit anderen Computer-Vision Ansätzen der Oberflächenbestimmung

Die traditionelle Stereophotogrammetrie gilt im Bereich des Computer-Sehens nur als ein Verfahren unter vielen anderen (SHIRAI 1987). Die meisten werden unter dem Sammelbegriff "shape-from-X" geführt, wobei X als Platzhalter für die Verfahrensnamen steht. Sie unterscheiden sich in ihren Ansätzen, stärker aber in der Art der Bildinformation über Objekte. Es soll hier auf drei, zur Zeit wohl besonders wichtige Vertreter kurz eingegangen werden, indem sie aus der Sicht der FAST-Vision-Bildinversion diskutiert werden. Es kann gezeigt werden, daß für sie der FAST-Vision-Ansatz ebenfalls zugrundegelegt werden kann, wodurch sich Vorteile gegenüber der bisherigen Lösung ergeben. Ferner sind jetzt grundsätzlich beliebige Verfahrenskombinationen möglich, indem z.B. Bilder des photogrammetrischen und des photometrischen Stereoverfahrens gemeinsam ausgewertet werden können. Ein für möglichst alle der Vision-Verfahren gültiger oder flexibel anpassungsfähiger Ansatz wäre in der Tat z.Z. sehr hilfreich. Denn es mehren sich die Stimmen (MAGGEE/AGGARWAL 1985, RACZKOWSKY 1988), die eine geeignete Kombination gegensätzlicher Vision-Informationen sehr empfehlen, um typbedingte Schwächen gegenseitig aufheben zu können.

A) Shape-from-shading und photometrisches Stereosehen

Für beide ist charakteristisch, daß sie in den Ansätzen analytische Modelle der Reflexionsfunktion verwenden, deren Parameter - je nach Bilderzahl und Objekt - vorgegeben oder aus den Bild-daten mitbestimmt werden müssen. Wir gehen vom Reflexionsmodell nach COOK/TORRANCE aus, Gleichung (2/8), und erhalten mit (2/7), (2/9) und (2/12):

$$\tilde{G}(x,y) = K_E \cdot R_{CT}(2\pi, Q, X, Y) \quad (4/1)$$

worin

$\tilde{G}(x,y)$  Bildgrauwerte aus  $G'(x,y)$  abgeleitet nach Korrektur mit Kameradaten, vgl. (2/12)

$$K_E = \frac{1}{\pi} \{ E_L(X,Y) + E_S(X,Y) \}$$

Bestrahlungskonstante, vgl. (2/7).

Shape-from-shading

Wir vereinfachen das COOK/TORRANCE-Modell (2/8) durch  $R_S \equiv 0$  zum isotropen LAMBERT-Modell und erhalten aus (4/1):

$$\tilde{G}(x,y) = K_E \cdot R_d(X,Y) \cdot \cos(\underline{N}(X,Y), \underline{L}) \quad (4/2)$$

Das ist die Ausgangsgleichung für das monoskopische Shape-from-shading-Verfahren, das vor allem durch HORN und seine Mitarbeiter WOODHAM, IKEUCHI, u.a. vom MIT, aus entwickelt wurde (HORN 1986).

In einem kamerazentrierten Koordinatensystem ist der Richtungsvektor  $\underline{L}$  zu einer Lichtquelle gegeben. Die Grauwerte eines Bildes liegen vor.  $K_E$  wird willkürlich festgesetzt, und die Reflexionsfunktion  $R_d(X,Y)$  muß vorgegeben sein. Bei Industrieanwendungen kann sogar

$$R_d(X,Y) \equiv \text{Konstant} \quad (4/3)$$

eine ortsunabhängige Konstante sein. Mit diesen Vorgaben kann nun aus jedem Pixelgrauwert mit Formel (4/2) ein Winkel im korrespondierenden Objektpunkt auf der Fläche  $Z(X,Y)$  berechnet werden; es ist der Winkel zwischen der Flächennormale  $\underline{N}(X,Y)$  und dem konstanten Lichtrichtungsvektor  $\underline{L}$ . Dieser Winkel wird mit den eigentlich gesuchten Komponenten p, q von  $\underline{N}(X,Y)$ :

$$\underline{N}(X,Y) = (p(X,Y), q(X,Y), -1)^T / \{p(X,Y)^2 + q(X,Y)^2 + 1\}^{1/2}$$

mit

$$p(X,Y) = \frac{\partial Z(X,Y)}{\partial X}, \quad q(X,Y) = \frac{\partial Z(X,Y)}{\partial Y} \quad (4/4)$$

in Beziehung gesetzt. Aus der Gesamtheit der Flächennormalen ("needle diagram") wird schließlich in einem numerischen Integrationsverfahren die Fläche  $Z(X,Y)$  ermittelt. Jedes Pixel  $(x',y')$  eines Bildes liefert mit (4/2) jedoch nur eine Gleichung für die an sich gesuchten zwei Komponenten  $p$  und  $q$  von  $\underline{N}(X,Y)$ . Die Bestimmung der  $\underline{N}(X,Y)$  und Fläche  $Z(X,Y)$  wäre mit diesen Informationen allein nicht eindeutig. Mit Zusatzbedingungen (Randbedingungen, Glattheitsbedingungen, u.a.) ist es aber gelungen, das Problem prinzipiell zu lösen. Es bleibt jedoch - trotz massiver Regularisierung - anfällig gegen Datenstörungen.

Eine Lösung mit der FASI-Vision-Bildinversion hätte natürlich die gleichen Instabilitätsproblematik, sie wäre aber theoretisch möglich, wie kurz gezeigt sei. Wegen der Vorgabe der Reflexionsfunktion  $R_d(X,Y)$  reduziert sich das Problem auf die Bestimmung der Oberflächenfunktion  $\tilde{Z}(X,Y)$ , allein vermittelt über die in (4/2) enthaltene Ortsfunktion  $\cos(\underline{N}(X,Y), \underline{L})$ . Die Beziehung (4/2) muß - wie in (3/4) bis (3/7) gezeigt - durch Linearisierung mit den Parameteränderungen  $dZ_{rs}$  der Oberfläche  $\tilde{Z}(X,Y)$  in Verbindung gebracht werden.

#### Photometrisches Stereosehen

Die Schwächen des Shape-from-shading-Verfahrens lassen sich beheben, wenn mit WOODHAM (siehe HORN 1986) mehr als ein Bild nach Art der Aufnahmeanordnung in Figur 4.1 aufgenommen wird.

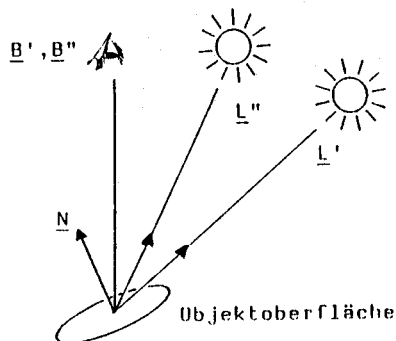


Fig. 4.1: Photometrisches Stereosehen: mehr als ein Bild mit identischer Orientierung aber verschiedener Beleuchtung werden aufgenommen (aus: B.K.P.HORN 1987)

Die Orientierung der Kamera und Lichtquellen seien bekannt. Man hat mit jedem weiteren Bild - ganz analog zum photogrammetrischen Stereosehen - zusätzliche, geometrisch unabhängige Informationen mit den Grauwerten erhalten, solange die Bestrahlungsrichtungen dieser Bilder unabhängig sind. Dies erhöht die Genauigkeit und die Möglichkeiten des Verfahrens.

● 2 Bilder  $B', B''$  seien gegeben, Figur 4.1:  
 Pro Pixelposition  $x', y'$  existieren zwei unabhängige Grauwerte  $G', G''$ , mit denen für den zugehörigen Objektpunkt  $P(X,Y,Z)$  aus (4/2) die zwei Komponenten  $p(X,Y), q(X,Y)$  von  $\underline{N}(X,Y)$  eindeutig bestimmbar sind.  $R_d(X,Y)$  muß bekannt sein.

● 3-4 Bilder seien gegeben:

Mit den 3 Grauwerten aus 3 Bildern kann in jedem Punkt der Fläche  $Z(X,Y)$  zusätzlich zu  $\underline{N}(X,Y)$  auch  $R_d(X,Y)$  bestimmt werden. Das 4. Bild sorgt bereits für operationelle Stabilität: überschüssige Daten dienen der Rauscheindämmung, beheben sichttote Räume, usw.

● mehr als 3-4 Bilder seien gegeben:

In diesen Fällen kann man die doch recht einschränkende LAMBERT-Reflexionseigenschaft des Objekts fallen lassen und das COOK/TORRANCE-Modell heranziehen, vgl. HORN 1986, S.233. Je nach der Bilderzahl und Anordnung der Lichtquellen könnte hierbei pro Flächenpunkt ein Vektor von Reflexionsparametern aus der Gleichung (2/8) errechnet werden.

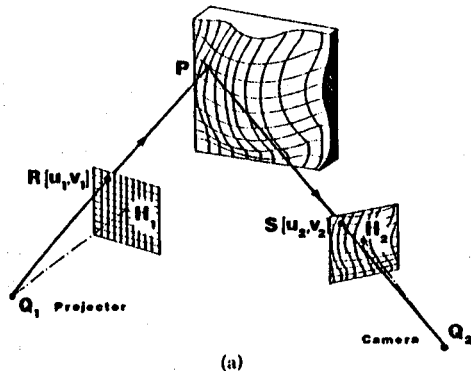
Auch bei diesen mehrbildrigen Aufnahmen des photometrischen Stereosehens hat man zunächst nur das Ziel, ein möglichst zuverlässiges Feld der Flächennormalen  $\underline{N}(X,Y)$  zu erhalten, woraus wie vor erst in einem separaten Schritt die Fläche  $Z(X,Y)$  integriert wird.

Die Mehrbildfälle des photometrischen Stereosehens sind in geradzuvorragender Weise für die Lösung durch FAST-Vision-Bildinversion geeignet. Der Weg kann mit einem Satz erklärt werden. Der Einfachheit halber verwenden wir das LAMBERT-Modell und vergleichen (4/2) mit (3/7):  $\tilde{Z}(X,Y)$  behandeln wir so, wie schon im Kapitel 3, und  $R_d(X,Y)$  wie  $D(X,Y)$ . Dieser Weg ist kompakt und - das war bisher nicht durchgeführt worden - die EDV-gerechte Verarbeitung der redundanten Grauwerte von allen Bildern nach statistischen Modellen wird leicht zugänglich.

B) Shape-from-Texture

Unter diesem Namen faßt man eine Reihe von Verfahren zur Oberflächenbestimmung zusammen (SHIRAI 1987, MAGGEE/AGGARWA/LI 1985), die man auch mit der Bezeichnung "shape-from-contour", "spatial encoding" oder Rasterstereographie antreffen kann. Das Grundprinzip geht aus Figur 4.2 hervor. Mit der Projektion von passend gewählten Texturen auf die Oberfläche von an sich kontrastlosen Körpern, kann man in vielen Fällen überhaupt erst eine photographische Aufnahme zur 3D-Vermessung ermöglichen. Figur 4.2 zeigt ferner, daß im Prinzip eine stereophotogrammetrische Aufnahmekonfiguration vorliegt, doch mit nur einer Kamera für die Aufnahme nur einer Photographie. Das "zweite Bild" liefert die Textur im Projektor.

Figur 4.2: Shape-from-Texture:



a) ein Projektor projiziert eine Textur (hier ein Quadratgitter) auf das Objekt und wird mit einer Meßkammer aufgenommen

b) Bildbeispiel aus der Orthopädie mit Linienraster als Textur (aus: FROBIN, W./HIEROLZER, E. 1983)

Die Textur im Projekt gestaltet man in der Regel so, daß sie durch einfache mathematische Gleichungen als kontinuierliche Grauwertfunktion  $G(x',y')$  dargestellt und auch technisch so realisiert werden kann, häufig mit binären Grauwerten. Aus der bekannten mathematischen Bildfunktion des Projektors "bildes" zieht man Vorteile bei der Rekonstruktion von Objektoberflächen (SHIRAI 1987) nach besonders angepaßten Verfahren.

Im Prinzip läßt sich das FAST-Vision-Verfahren auf Shape-from-Texture direkt anwenden, wenn man die beiden Typen von Bildern in üblicher digitalisierter Form zur Verfügung hat. Ferner müssen Daten der inneren und äußeren Orientierung von beiden optischen Geräten vorliegen. Zu diesem Zweck kann der Projektor ohne weiteres wie eine photogrammetrische Kamera kalibriert werden.

Eine Variante hierzu scheint noch interessant zu sein. Bei der Projektion der Textur durchläuft die Funktion  $G(x',y')$  das optische System 'Projektor', so daß - wie beim Kameramodel (2/12), (2/13) - letztlich gefaltete Texturdaten  $G'(x',y')$  den Projektor verlassen und auf der Oberfläche auftreffen. Die mit FAST Vision zu verarbeitende Grauwertfunktion des Projektors lautet damit:

$$G'(x,y) = \int_{\tilde{x}=-\infty}^{\tilde{x}=\infty} \int_{\tilde{y}=-\infty}^{\tilde{y}=\infty} \tilde{G}(\tilde{x},\tilde{y}) \cdot \text{PSF}_{P_T}(x'-\tilde{x}, y'-\tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \cdot v_{\tilde{G}}(x,y) \quad (4/5)$$



worin

- PSF<sub>P<sub>r</sub></sub>(x',y') Punktstreufunction des Projektors (gegeben)  
 G(x',y') vorgegebene analytische Texturfunction  
 v<sub>G</sub>(x',y') Rauschanteil, charakterisiert durch a priori abschätzbare Varianz  $\sigma^2(v_G)$

G'(x',y') nach Gleichung (4/5) ist als kontinuierliche Funktion berechenbar. Hierdurch haben wir den interessanten Fall vor uns, Grauwerte eines Bildes auch als Kontinuum (= Analogsignal) in FAST Vision einführen zu können und gemeinsam mit den anderen digitalen Bilddaten nach statistischen Modellen auszuwerten.

### C) Shape-from-ranging (Abstandsbilder)

Die "Grauwerte" von digitalen Abstandsbildern sind Abstände zwischen den Pixeln eines Sensors und Surfeln einer Objektoberfläche, gemessen in einer bestimmten Raumrichtung, deren Komponenten den Pixelkoordinaten  $x'_i, y'_i$  entsprechen. Der Pixelsignalwert kann auch eine Funktion des Abstandes sein; dies hängt von eingesetzten Entfernungsmessverfahren ab. Die Gesamtheit von Abstandsmeßwerten  $s(x',y')_i$  zu eng benachbarten Surfeln  $(X,Y)_i$  ergeben insgesamt eine "Bildmatrix".

Digitale Abstandsbilder lassen sich heute mit phantastischer Geschwindigkeit aufnehmen. Sie sind von daher sehr interessant für Echtzeitmeßprobleme der Industrie. Noch größere Chancen räumt man einer Kombination von Intensitätsbildern (= CCD-Bilder, etc.) mit Abstandsbildern ein. Es bleibt zu zeigen, wie mit FAST Vision die Kombinationsaufgabe zu lösen ist. Wir brauchen dies nur noch für die Abstandsbilder zu zeigen.

Wie eine Kamera, besitzt auch der Sensor für Abstandsbilder ein internes Sensorkoordinatensystem, das über Orientierungsdaten mit einem Objektkoordinatensystem verbunden werden muß. Setzt man diese Orientierung einmal voraus, so läßt sich für jedes Pixel des Abstandsbildes  $s(x',y')_i$  eine Verbesserungsgleichung in allgemeiner Form aufstellen:

$$s(x',y')_i + v_s(x',y')_i = A(X,Y,Z(X,Y),K_j) \quad (4/6)$$

worin

- v<sub>s</sub>(x',y')<sub>i</sub> Verbesserung von s(x',y')<sub>i</sub>  
 A(...) Funktion zwischen der Variablen  $s_i$  und  $(X,Y,Z)_i$   
 K<sub>j</sub>, j = 1, ... evtl. weitere Parameter der Funktion A(...), die nicht Orientierungsdaten sind.

Die Funktion muß in eine lineare Form der unbekannt Parameter gebracht werden, z.B. durch Taylorreihe, wobei für Z(X,Y) wieder die Bilinearfunktion eingesetzt werden kann. Bis auf die wenigen Parameter K<sub>j</sub> erscheinen keine neuen Unbekannten, Abstandsbilder und photographische Bilder können also bequem mit FAST Vision gemeinsam verarbeitet werden.

## 5. AUSBLICK

Nach den Definitionen im Bereich des Computer-Sehens (SHAPIRO/HARALICK 1987) lassen sich seine Aufgaben und Probleme insgesamt - entsprechend dem Grad an Komplexität und Abstraktheit - nach drei Stufen gliedern. Die Aufgaben der digitalen Bildmessung, wie wir sie hier umrissen haben, werden als low-level Bildverarbeitung eingestuft. Mir scheint, die ausführlich diskutierte FAST-Vision-Bildinversion könnte in der Lage sein, das allgemeine, zusammenfassende Theoriefundament für die bisherige Vielfalt der Visionsansätze zu bilden. Damit stellt sich - nach meiner Einschätzung - die erste Stufe des Computer-Sehens in bereits recht großer Geschlossenheit und Vollständigkeit dar. Davon werden vermutlich die höheren Stufen der Bildauswertung Vorteile haben. Dennoch, es fehlen noch manche Untersuchungen und Entwicklungsergebnisse, die die digitale Bildmessung zu einem sicheren und wirtschaftlichen Instrument des Ingenieurs machen könnten. Neben der auch heute noch nicht ausreichenden Computer-Hardware, sind noch Fragen zur Datenverarbeitung offen: die optimale Regularisierung der Bildinversion, die Behandlung der Problemfälle topographischer Oberflächen, die Isolierung und Elimination unerwünschter Objektdetails, ... und manches andere mehr.

LITERATUR

- /1/ BECKER, F./NERRY, F./RAMANANTSIHENA, P./FISCHER, J.: Towards a Quantitative use of Aerial Color Infrared Films. Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol. 54, No. 6, Part 1, 1988, 743-750.
- /2/ FROBIN, W./HIERHOLZER, E.: Automatic Measurement of Body Surfaces Using Rasterstereography. Part I. Photogramm. Eng. and Remote Sensing, Vol. 49, No. 3, 1983, 377-384.
- /3/ GUYOT, G.: Main Conclusions of the Activity of the Working Group VII. 3. Between 1984 and 1988. Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Comm. VII, Kyoto 1988.
- /4/ HACKBUSCH, W./TROTTEBERG, U. (Hrsg.): Multigrid Methods. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- /5/ HORN, B.K.P.: Robot Vision. The MIT Press, Cambridge (Mass.) 1986.
- /6/ KRAUS, K./SCHNEIDER, W.: Fernerkundung, Bd. 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken F. Dümmeler Verlag, Bonn 1988.
- /7/ KRONBERG, P.: Fernerkundung der Erde. F. Enke Verlag Stuttgart 1985.
- /8/ LEI, F./TIZIANI, H.J.: Untersuchung der Störanfälligkeit von Meßverfahren zur Bestimmung der MTF aus Kantenbildanalyse. Bildmessung und Luftbildwesen, Jg. 56 (5), 1988, 167-183.
- /9/ MAGGEE, M.J./AGGARWAL, J.K.: Using Multisensory Images to Derive the Structure of Three-Dimensional Objects - A Review. Computer Vision, Graphics and Image Processing 32, 1985, 145-157.
- /10/ MORITZ, H.: The Operational Approach to Physical Geodesy. Ohio State University, Dep. Geodetic Sciences, Rep. No. 277, Columbus 1978.
- /11/ PFEIFFER, B.: Richtungsabhängiges Strahlungsverhalten bei der Klassifizierung von multispektralen Flugzeugabstastdaten. Deutsche Geodät. Komm., Reihe C, Nr. 290, München 1983.
- /12/ RACZKOWSKY, J.: Multisensorik für ein Robotersystem. Robotersysteme 4, 1988, 53-62.
- /13/ SHAPIRO, L.G./HARALICK, R.M.: Relational Matching. Applied Optics, Vol. 26, No. 10, 1987, 1845-1851.
- /14/ SHIRAI, Y.: Three-Dimensional Computer Vision. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- /15/ SIEBER, A.J.: Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. DFVLR-Forschungsbericht 86-37, Köln 1986.
- /16/ SIEVERS, J.: Zusammenhänge zwischen Objektreflexion und Bildschwärzung in Luftbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 221, München 1976.
- /17/ SLATER, P.H.N.: Review of the Calibration of Radiometric Measurements from Satellite to Ground Level. Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 11, Comm. VII, 726-734, Kyoto 1988.
- /18/ TERZOPOULOS, D.: Regularization of Inverse Visual Problems Involving Discontinuities, IEEE T-PAMI-8, No. 4, 1986.
- /19/ WANG, S./HARALICK, R.M./CAMPBELL, J.: Relative Elevation Determination from Landsat Imagery. Photogrammetria, 39 (1984) 193-215.
- /20/ WEISENSEE, M.: Models of Light Reflection for Facets Stereo Vision. Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 3, Comm. III, Kyoto 1988.
- /21/ WEISENSEE, M.: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. TH Darmstadt, in Vorbereitung.
- /22/ WROBEL, B.: Digital Image Matching by Facets Using Object Space Models. 4th Int. Symp. on Optical and Optoelectr. Appl. Sciences and Engin., March 30 - April 3, The Hague, 1987a (SPIE 804, 325-333).

- /23/ WROBEL,B.: Einige Überlegungen über die theoretischen Grundlagen der digitalen Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen 55 (4), 1987b, 129-140.
- /24/ WROBEL,B.: Facets Stereo Vision (FAST Vision) - A New Approach to Computer Stereo Vision and to Digital Photogrammetry. Proc. Intercomm. Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, June 2-4, 1987c.
- /25/ WROBEL,B.: Least Squares Methods for Surface Reconstruction from Images. Intern.Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 3, Comm. III, Kyoto 1988.
- /26/ WROBEL,B./WEISENSEE,M.: Implementation Aspects of Facets Stereo Vision with some Applications. Proc.Intercomm.Conf.on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, June 2-4, 1987 d.
- /27/ KEMPA,M./WROBEL,B./WEISENSEE,M.: Faltungsansätze zur Punktbestimmung mit digitalen Bildern. In Vorbereitung.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es werden Überlegungen und Ansätze zu den geometrischen und physikalischen Grundlagen der digitalen Bildmessung vorgetragen. Begonnen wird mit einem Modell der Bilderzeugung in der Atmosphäre, dessen physikalische und geometrische Parameter erläutert und darauf abgestimmte Aufgabengebiete für die Bildmessung abgegrenzt werden. Danach wird die Bild-Inversion nach dem Konzept des Facetten-Stereosehens abgeleitet, verallgemeinert und auf andere Computer-Vision-Verfahren übertragen. Schließlich wird auf offene Fragen aufmerksam gemacht.

#### GEOMETRICAL AND PHYSICAL FUNDAMENTALS OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

##### ABSTRACT

Arguments and approaches about the geometrical and physical fundamentals of digital photogrammetry are presented. At the beginning the model of image formation under the influences of the atmosphere is regarded, their main physical and geometrical parameters are discussed, and related fields of application for digital photogrammetry are outlined. Subsequently, a general image inversion approach is presented following the concept of Facets Stereo Vision (FAST Vision). Some generalizations and comparisons with shape-from-X procedures are added. Finally, an outlook on open questions is given.

Universitätsprofessor Dr.-Ing. B.Wrobel  
Institut für Photogrammetrie und Kartographie  
Technische Hochschule Darmstadt  
Petersenstraße 13  
D-6100 Darmstadt