

GRUNDLAGEN DER DIGITAL GESTEURTEN PERSPEKTIVISCHEN ABBILDUNG IN CCD-SYSTEMEN

Gerd Nowack

Kurzfassung. Unter Photogrammetrie faßt man alle Verfahren zusammen, mit deren Hilfe Größe, Form und Lage von Objekten aus photographischen Bildern bestimmt werden können. Um die Fehler der perspektivischen Abbildung bzw. der Aufnahmeoptik auszuschließen, versuchte man früher, aus der Vorlage mittels Projektion mit demselben Objektiv den ursprünglichen Aufnahmestrahlengang wieder herzustellen. Heute benutzt man verzeichnungsfreie Objektive (Photogrammetrische Objektive), um das photographische Bild (auf einem Film oder CCD-Sensor) direkt auszuwerten. In dieser Arbeit wird eine CCD-Kamera vorgestellt, deren optische Achse immer senkrecht zu der Gegenstandsebene ausgerichtet wird. Der Bildausschnitt wird dann rechner-gesteuert durch x, y -Verschiebung eines CCD-Sensors eingestellt. Dadurch werden Einflüsse der perspektivische Verzeichnung, der Bildunschärfe und der Maßstabsänderungen auf die Ergebnisse der Bild-Vermessung ausgeschlossen.

1. Einleitung

Die Probleme der optischen Verzerrung sollen diskutiert werden an dem Fall einer unendlich ausgedehnten Halbfäche mit waagerechten und senkrechten Parallelen, die als Gegenstandsfläche die Vorderansicht eines Gebäudes simuliert, das senkrecht auf der Horizontlinie steht. Standort des Aufnahmesystems soll ein beliebiger Ort auf der ebenen Grundfläche sein. In allgemeiner Lage kann die optische Achse in einem beliebigen Winkel die Gegenstandsfläche durchdringen. Dabei überlagern sich die Effekte der perspektivischen Verzerrung, wie sie nacheinander entstehen würden, wenn die optische Achse zunächst nur in x -Richtung bzw. dann in y -Richtung aus der jeweils senkrechten Lage gekippt würde.

Manuscript eingegangen am February 13, 1996.

Dr G. Nowack ist an der Lehrstuhl für Datenverarbeitung Ruhr-Universität Bochum, D-44721 Bochum, Deutschland.

Zum Verständnis des Problems reicht die Verkippung der optischen Achse aus der Normalrichtung senkrecht nach oben. Es soll angenommen werden, daß das Aufnahmesystem solange nach oben gekippt wird, bis der untere Schenkel des Öffnungswinkels gerade horizontal liegt, so daß die Gegenstandsfläche formatfüllend abgebildet wird. Die offensichtlichste Wirkung der Verkippung ist die perspektivische Verzerrung senkrechter Parallelen (a), deren Abstand auf dem Bild (nach oben) verkürzt wird, da die Enttarnung zum Aufnahmesystem vom Fußpunkt der Parallelen aus immer größer wird.

Eine weitere Wirkung der Kippung besteht darin, daß auf der Bildebene nur jeweils ein Punkt der Gegenstandsparallelen exakt scharf abgebildet wird (b). Je nach Fokuseinstellung sind z.B. alle Punkte in der Bildmitte exakt scharf. Da unscharfe Konturen auch maßstäblich fehlerhaft abgebildet werden, treten Verfälschungen bei der photogrammetrischen Auswertung auf, die durch Abblendung zwar verkleinert, aber nicht vollständig unterdrückt werden können.

Ein weiterer Nachteil eines gekippten Aufnahmesystems besteht darin, daß horizontale Linien im Bild zwar waagsrecht bleiben, daß sich aber die Abstände in demselben Maße verkleinern, wie sich der Abstand senkrechter Linien nach oben verjüngt (c). Praktisch bedeutet dies, daß die optische Achse (Mitte des Bildes) nicht durch die Mitte der abgebildeten Gegenstandsfläche tritt sondern darunter. Auch Längenmaße in y -Richtung mußten also korrigiert werden, um sie photogrammetrisch richtig auszuwerten. Außer den Abbildungsfehlern treten noch Verzerrungseffekte durch die Objektive auf. Die Bezeichnungen "tonnen- bzw. kissenförmige" Verzerrung sind anschaulich und bekannt. Fehler der Objektive sollen aber in dieser Arbeit unberücksichtigt bleiben, da sie durch eine geeignete Auswahl des Objektivs ausreichend klein gehalten werden können.

Die quantitative Analyse der photographischen Abbildung bei Verkippung der optischen Achse geschieht in drei Stufen:

- (a) Umwandlung der photographischen in eine zentralperspektivische Abbildung: Bestimmung des Projektionszentrums,
- (b) Anwendung geometrischer Abbildungsgesetze, mit deren Hilfe parallele Strukturen in Strahlen (Zentralrisse der Parallelen) durch den Fluchtpunkt (Zentralriß des Fernpunktes der Parallelen) abgebildet werden und
- (c) Aufstellung eines analytisch algebraischen Formelwerks als Grundlage eines Rechnerprogramms, mit dessen Hilfe schnell die Auswirkungen

von Parameter-Veränderungen (wie z.B. Brennweitenwechsel -bw. -variation) auf den Abbildungsvorgang bestimmt werden können.

2. Grundlagen der quantitativen Analyse der optischen Abbildung

In der Abbildung 1 wird die Bild-Entstehung senkrechter Gegenstandsparallelen in einem rechteckförmigen Hochkant-Format (z.B. Kleinbild: $36 \times 24\text{mm}^2$) bei Verkippung der optischen Achse (bis zur Horizontlinie) konstruiert.

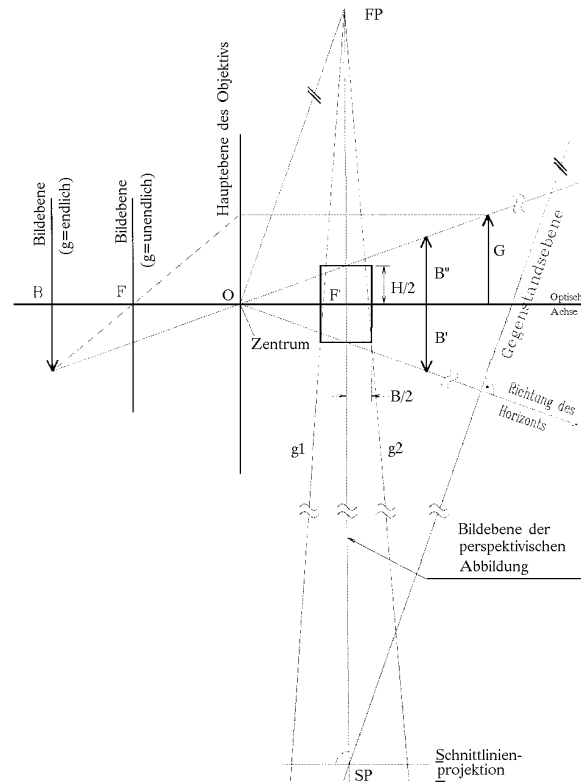


Abbildung 1. Abbildungsgesetze zur Bestimmung der perspektivischen Verzerrung bei Kippung der optischen Achse bis zur Horizontlinie

Senkrecht auf der optischen Achse des Abbildungssystems stehen die Hauptebenen des Objektivs, die bei idealer Abbildung zusammenfallen. Mit F ist der bildseitige mit F' der objektseitige Brennpunkt bezeichnet. Ganz

links ist die Bildebene (Filmebene) für den Fall einer endlichen Gegenstandsweite eingezeichnet: Der Pfeil (G) wird über zwei Konstruktionslinien: (a) durch F gebrochener Parallelstrahl und (b) ungebrochener Zentralstrahl in sein photographisches Abbild (B) überführt. Bei unendlicher Gegenstandsweite verschiebt sich die Bildebene bis in Brennpunktslage (Ebene durch F).

Die photographische Abbildung ($G - B$) kann als perspektivische Abbildung aufgefaßt werden, wenn der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Hauptebenen (O) als Projektionszentrum aufgefaßt wird. Das durch Spiegelung an den Hauptebenen entstandene Abbild B' muß noch um 180° gedreht werden: B'' ist also das zentral-perspektivische Bild von G . Für Gegenstände im Fernbereich verschiebt sich die Bildsebene in den Punkt F' . In F' ist das um 90° gedrehte Hochkantformat (z.B. einer Kleinbildkamera: $36 \times 24 \text{ mm}^2$) mit einem Normalobjektiv: $f = 50 \text{ mm}$ eingezeichnet. Damit ergibt sich ein Öffnungswinkel in der Vertikalen von 39.6° .

Die optische Achse wird nun solange nach oben gekippt, bis der untere Schenkel des Öffnungswinkels mit der Horizontrichtung zusammenfällt. In großem Abstand (also hinter der eingezeichneten Unterbrechung) soll nun eine Gegenstandsfläche senkrecht auf dem unteren Winkelschenkel stehen. Alle senkrechten Parallelen fallen in der Projektion mit der Reißlinie der Gegenstandsebene zusammen. Gesucht sind die Projektionslinien dieser Parallelen in der Bildebene (in F'). Der Fernpunkt der Parallelen auf der Gegenstandsebene liegt im Unendlichen, so daß die Parallelen zur Gegenstandsebene durch das Projektionszentrum (O) auf der Reißlinie der Bildebene die Lage des Fluchtpunktes (FP) bestimmt: dem Punkt, in dem sich in der Bildebene alle Projektionen der Gegenstandsparallelen schneiden müssen. Die zweite Koordinate für die Projektionsstrahlen durch FP liefert die Schnittlinie zwischen der Gegenstands- und Bildebene, deren Projektion der Punkt SP ist. Dreht man diese Schnittlinie um 90° um die Achse der Bildebene, so wird der Abstand der Gegenstandsparallelen und damit ihre Lage in der Bildebene deutlich. Die beiden eingezeichneten Geraden sind die Abbilder derjenigen Gegenstandsparallelen, die genau durch die untere Ecken des Bildformates gehen. Innerhalb des Bildformates kann man jetzt deutlich die "stürzenden Linien" sehen, die im Hochformat auftreten, wenn die Kamera gerade um den halben Öffnungswinkel nach oben gekippt wurde. Die numerische Auswertung ergibt eine Abstandsverringerung um -2295% , wenn der abgebildete Gegenstand eine unendlich große Gegenstandsweite besitzt. Ist die Gegenstandsweite geringer, verschiebt sich die Bildebene von F' nach rechts, d.h. trotz gleichbleibender Brennweite reduziert sich der Öffnungswinkel und damit nimmt die Verzeichnung (geringfügig) ab: z.B.

beträgt sie: -22.85% , wenn die Gegenstandsweite $20m$ beträgt. Im Nahbereich, z.B. bei einer Gegenstandsweite von $100mm$, verringert sich der Öffnungswinkel auf etwa die Hälfte, und die perspektivische Verzerrung beträgt nur noch etwa 6% .

Die geometrischen Abbildungsgesetze sind die Grundlage für die analytisch algebraischen Formeln, die einem Rechnerprogramm zugrunde liegen, mit dessen Hilfe folgende Abbildungen berechnet wurden:

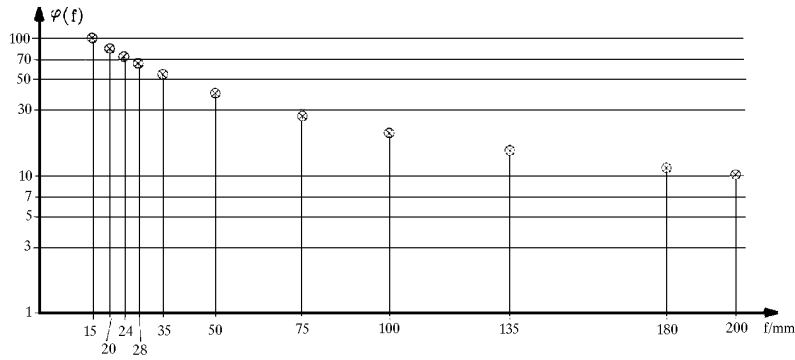


Abbildung 2. Öffnungswinkel als Funktion der Brennweite für das Kleinbild-Hochkant-Format

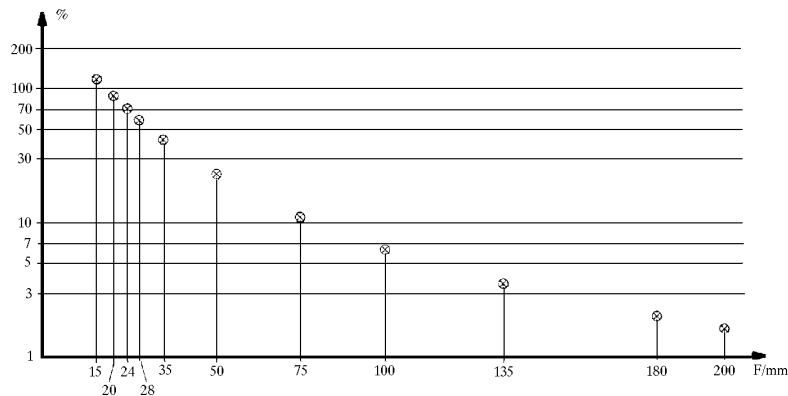


Abbildung 3. Perspektivische Abstandreduktion paralleler Linien als Funktion der Brennweite

{ Beachte: Bei Brennweiten unterhalb 18mm treten Werte größer als 100% auf. Dies ist dann der Fall, wenn aufgrund des großen Öffnungswinkels der Fernpunkt der Gegenstands-parallel (also der Fluchtpunkt selbst) mit auf dem Bildformat abgebildet wird. }

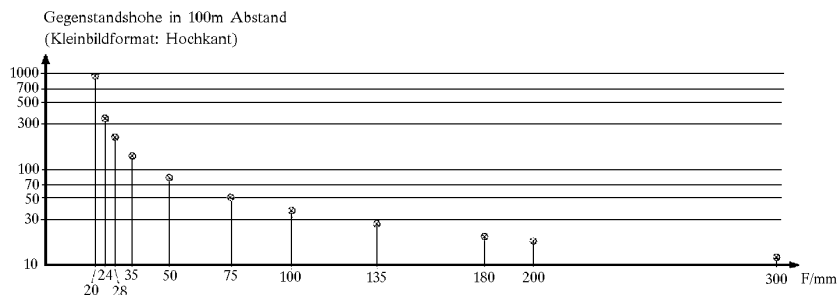


Abbildung 4. Höhe des abgebildeten Gegenstands (aus 100m Abstand in Abhängigkeit von der Brennweite

3. CCD-Bildaufnahme ohne perspektivische Verzerrungen

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute CCD-Kamera vermeidet jedwede Form der perspektivischen Verzerrung dadurch, daß die optische Achse grundsätzlich in Normal-richtung auf der Gegenstandsebene steht. Innerhalb des *Bildkreises* des eingesetzten Objektivs kann nunmehr ein CCD-Bild-Sensor 2-achsig verschoben werden, um den gewünschten Bildausschnitt einzustellen. Der wirksame Bildkreis eines Objektivs hängt von vielen Faktoren ab. Die Objektivhersteller spezifizieren in der Regel nur das Filmformat in achsialer Lage. Wenige Hersteller geben den gemessenen Abfall der lokalen Beleuchtungsstärke in der Bildebene als Funktion des Abstandes von der optischen Achse bei Abbildung einer gleichmäßig ausgeleuchteten (Gegenstands-) Fläche an. Parameter der Kurvenschar ist die jeweilige Blendeneinstellung. Bei offener Blende besitzen die meisten Objektive einen Abfall der Rand-Helligkeit auf ca. 30% (bei mittleren Blenden auf ca. 50%). Auch die *Shift*-Objektive machen da keine Ausnahme, wenngleich die Schärfekorrektur der Abbildung im Durchmesser meist ca. 30% größer bemessen ist, als es der Formatdiagonalen entspricht, beim Kleinbildformat beträgt also der Durchmesser des Bildkreises dann 56mm bei $43,3\text{mm}$ Diagonallänge des Formats.

Ein theoretisch fundiertes Vorgehen für die Bildkreisbestimmung ist bei der Verwendung von *Vignettierungs-Diagrammen* möglich. Dazu bildet man alle lichtbegrenzenden Konturen wie die Linsenfassungen und die Blende selbst durch die jeweils (gegenstandsseitig) vorgelagerten Linsensysteme ab. Die vorderste Linsenfassung bildet sich dabei auf sich selbst ab. Die Abbildung der kleinsten freien Öffnung (in der Regel die Blende) wird als Eintrittspupille bezeichnet. Alle anderen Konturen werden (meist unscharf) auf diese Ebene der Eintrittspupille projiziert. Eine achsial gelegene, punktförmige Lichtquelle bildet also in der Ebene der Eintrittspupille einen scharf begrenzten Leuchtkreis, der umgeben ist von (unsichtbaren, unscharfen) konzentrischen Lochblenden. Das Integral über den Leuchtkreis ergibt die Helligkeit im Bildpunkt.

Bei Verschiebung der Lichtquelle aus der Achse (achsenferne Lage) schiebt sich (meist) die Abbildung der ersten Linsenfassung als Kreisblende über die Eintrittspupille, so daß sich die freie Fläche (und damit die Helligkeit im Bildpunkt) immer weiter (bis auf Null bei voller Verdeckung) reduziert.

Die Abschattung durch die erste Linsenfassung setzt erst bei einer bestimmten Höhe des Gegenstandspunktes von der Achse ein je nachdem, um wieviel größer der erste Linsendurchmesser gegenüber der Eintrittspupille ist, und je nachdem, welche Blende eingestellt ist. Bei einem großen Blendendurchmesser setzt der Helligkeitsverlust praktisch sofort ein, bei einem kleinen bleibt die Helligkeit weitgehend konstant, fällt dann aber schneller ab. Den Berechnungen liegt ein 50mm Objektiv zugrunde, dessen Hauptebenen und Blende zusammenfallen sollen. Das Bild des vorderen Begrenzungskreises in der Hauptebene wurde um 3% größer als die Eintrittspupille gewählt. In Abb. 5 ist die freie Fläche des Lichtkegels eines Punktes (im Maßstab 1 : 1) als Funktion seines Abstandes von der Achse dargestellt (Parameter sind die Blendenzahlen.).

Die Abbildung zeigt, daß die Bildkreisgröße sehr von der Wahl des zulässigen Helligkeitsabfalls abhängt. Es wurden die Grenzwerte: -3% , also praktisch kein Abfall und -90% , also Grenzfall der photogrammetrischen Auswertbarkeit untersucht¹:

Die in der bildgebenden Photographie eingesetzten Shiftobjektive für das Kleinbildformat erlauben eine Verstellung um ca. 10mm : bei einem Helligkeitsverlust von 90% (in der Diagonalen) bedeutet das eine maximal mögliche Abblendung auf Blende 4. Für die aufgebaute sensor-shifted CCD-Kamera wurde die gültige Position in Abhängigkeit von der Brennweite, Blende und Grenzhelligkeit meßtechnisch bestimmt.

¹BZ=Blendenzahl, 90% DM= -90% Durchm., MS=Max. Shift des KB-format

Tabelle 1.

BZ	90% DM/mm	MS/mm	3% DM/mm	MS/mm
1	80	20	2.2	0
2	68	14	14.6	0
4	60	10	20.25	0.25
8	56	8	23.1	3.1
16	53	6.5	24.4	4.4

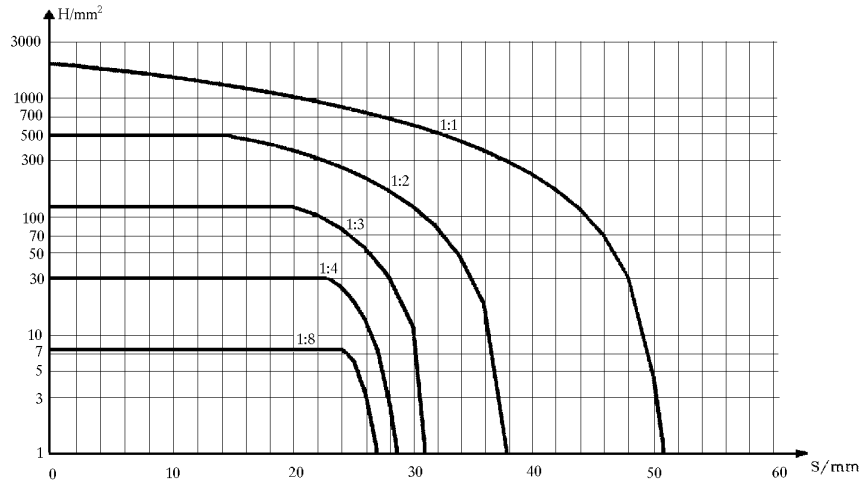


Abbildung 5. Helligkeitsabfall (natürliche Vignettierung)
eines 50mm Objektivs

4. Hardware der Positionssteuerung des CCD-Sensors

Der CCD-Sensor ist auf einer x/y -Verschiebeeinrichtung montiert, deren beide Achsen durch Schrittmotoren verstellt werden. Die Ansteuerimpulse werden durch Standard-Schrittmotor-IC's der Fa. SGS-Thomson erzeugt, da sie nur einen geringen Zusatzaufwand erfordern. Das IC: L297 erzeugt aus den vom 68HC11 -Prozessor kommenden Informationen: Anzahl der Schritte, Drehrichtung und Halb/Voll-Schritt-Betriebsart die 4 Taktphasensignale für bipolaren Schrittmotoren. Das folgende IC: L 298N ist ein Vollbrückentreiber für die Ströme der Motorwicklungen. Zur Erzeugung hoher Schrittraten werden die Motoren (statt mit 5.6V) mit 24V betrieben. Dadurch wird die Stromanschlagszeit erhöht. Die Stromhöhe selbst wird intern durch einen Zweipunktregler (20kHz Stromchopper) bestimmt, so daß

die 24V Quelle nicht geregelt zu sein braucht. Abb. 6 zeigt (1 -fach) die Steuerung der 4 Schrittmotoren.

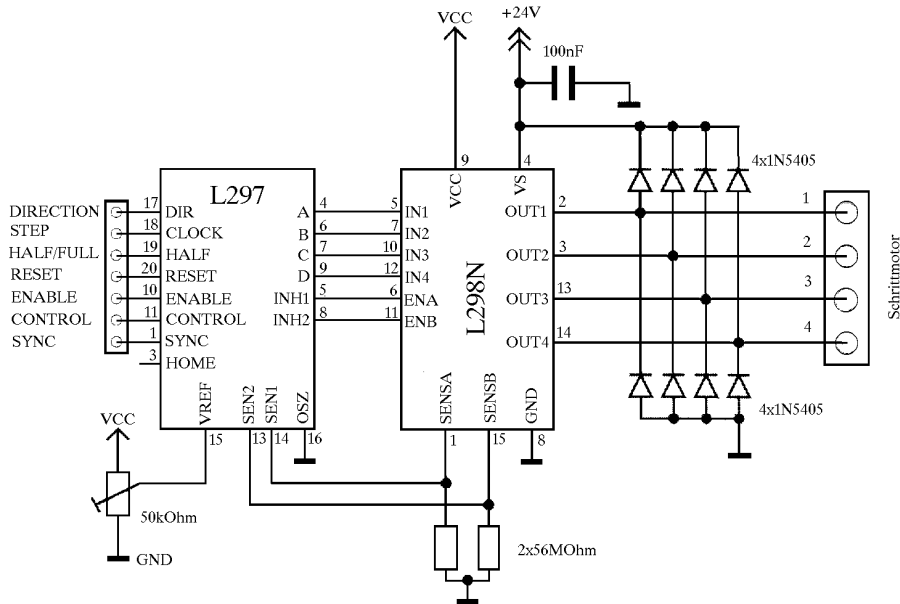


Abbildung 6. Schrittmotorsteuerung für CCD-Chip-Positionierung (1 -fach)

5. Danksagungen

Der Aufbau der Hardware wäre ohne die Mithilfe von Herrn Andr/'e Gleichner nicht möglich gewesen, der dies im Rahmen seiner Diplomarbeit tat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Weber danke ich für sein unterstützendes Engagement.

REFERENCES

1. ERNST SCHÖDER: *Darstellende Geometrie.*, Carl Hanser Verlag, 1977
2. FRITZ REUTER: *Darstellende Geometrie.*, G.Braun-Verlag, 1958
3. MILES V. KLEIN AND THOMAS E. FURTAK: *Optik.*, Springer-Verlag, Berlin, 1988