Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 83 (1985)

Heft: 9: Sonderheft zum Rücktritt und 70. Geburtstag von Prof. Dr. Dr. h. c. H. H. Schmid

Artikel: Invarianten und ihre Bedeutung in Photogrammetrie und Fernerkundung

Autor: Albertz, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-232608

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Fachbeiträge

Invarianten und ihre Bedeutung in Photogrammetrie und Fernerkundung

J. Albertz

1. Was sind Invarianten?

Eine Invariante ist eine ‹Grösse, die bei Eintritt gewisser Veränderungen unverändert bleibt›. So jedenfalls definiert es der Duden [1], und er bezieht diese Aussage ausdrücklich auf die Mathematik. Diese Einschränkung ist freilich in keiner Weise gerechtfertigt. Die Definition ist vielmehr von ganz allgemeiner Bedeutung und gilt für Grössen der verschiedensten Art, von der Mathematik über die Natur- bis zu den Geisteswissenschaften. Selbst gewisse Ideologien scheinen invariant zu sein und auch durch den Eintritt gewisser Veränderungen nicht beeinflusst zu werden!

Es ist besonders darauf hinzuweisen, dass in dieser Definition von ‹gewissen› Veränderungen die Rede ist. Das bedeutet, dass die Invarianz einer Grösse dann aufgehoben werden kann, wenn die Veränderungen ein ‹gewisses› Mass überschreiten. So ist zum Beispiel die Nachricht, die in einem Satz per Telefon übermittelt wird, in weiten Grenzen invariant gegen Veränderungen der Sprecherstimme, der Lautstärke oder des Rauschanteils der Übertragung. Wenn jedoch gewisse Grenzen über- oder unterschritten werden, dann wird die Invarianz durchbrochen und die Nachricht nicht mehr verstanden.

Schon dieses einfache Beispiel zeigt, dass wir in unserem Leben alltäglich von Invarianten Gebrauch machen oder uns auf die Invarianz bestimmter Gegebenheiten verlassen, ohne uns dessen bewusst zu sein. Diesem Gedanken soll hier etwas nachgegangen werden.

2. Invarianten als Bedingungen menschlichen Lebens

Die Welt, in der wir als Menschen leben, denken, planen und handeln, ist nicht die ‹Welt an sich›, sondern das Bild, das wir uns von ihr machen. Alle Informationen über die uns umgebende Aussenwelt – auch über unseren menschlichen Körper – werden uns durch unsere Sinnesorgane zugeführt [2]. Das Zusammenwirken von Sinnesorganen und Gehirn vermittelt uns Empfindungen, Wahrnehmungen und Bewusstseinsinhalte.

Nun ändern sich aber die auf unsere Sinnesorgane wirkenden Reize ständig. Durch unsere Kopf- und Augenbewegungen beispielsweise verändern sich die uns zufliessenden visuellen Reize ununterbrochen. Das uns vermittelte Bild unserer Aussenwelt weist jedoch Stabilität und Kontinuität auf und wird durch diese Art von Reizänderungen offenbar nicht beeinträchtigt. Das heisst in anderen Worten, dass unser Bild von der uns umgebenden Welt in gewisser Weise invariant gegen Änderungen der auf unsere Sinnesorgane einwirkenden Reize ist. Und das muss so sein, denn eine Welt, die sich uns in jedem Augenblick anders darstellte, müsste uns chaotisch erscheinen und könnte uns das Bewusstsein unserer individuellen Existenz gar nicht ermöglichen.

Wenn auch Empfindungen, Wahrnehmungen und Bewusstseinsinhalte von subjektiver Art sind, so kann das uns vermittelte Bild der Welt um uns doch nicht völlig unabhängig sein von jenen Bildern, die andere Menschen gewinnen. Sonst wäre die Kommunikation zwischen Menschen und ihr Zusammenleben nicht denkbar, es würde sozusagen individuelles Chaos herrschen. Tatsächlich können uns jedoch von jedem anderen Menschen sowohl die Existenz wie auch die wesentlichen Eigenschaften der Aussenwelt bestätigt werden. Das bedeutet, dass unser Bild von der Welt auch in vieler Hinsicht invariant gegen die subjektiven Elemente der Wahrnehmung sein muss.

Schliesslich erleben wir die Welt aber nicht nur aufgrund unserer Sinneswahrnehmungen, wir denken auch über sie nach, wir finden Gesetzmässigkeiten in ihr, und dies ermöglicht es uns, zu planen und gezielt zu handeln. Wir setzen dabei voraus, dass es Naturgesetze gibt und dass diese unabhängig von Ort und Zeit gültig sind. So drückt zum Beispiel jeder Erhaltungssatz der Physik die Invarianz eines Naturgesetzes gegen gewisse Transformationen aus [3]. Schon Christian Huygens (1629–1695) erkannte die Invarianz des Impulssatzes gegen den Übergang in ein gradlinig-gleichförmig bewegtes Bezugssystem (Abb. 1). Der Mann am Ufer lässt zwei elastische Kugeln mit bestimmten Geschwindigkeiten aufeinanderprallen. Für den im Boot fahrenden Mann haben die Kugeln andere Geschwindigkeiten. Da beide den selben Vorgang beobachten, muss der Impulssatz, nach dem die Summe der Bewegungsgrössen in einem abgeschlossenen System konstant ist, unabhängig vom Bezugssystem sein. Es gilt:

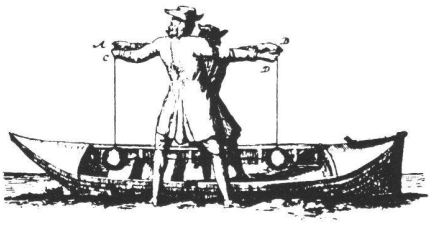

Abb. 1 Zum Impulssatz (nach Huygens)

$$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2,$$

wenn m_1 und m_2 die Massen der Kugeln, u und v ihre Geschwindigkeiten sind.

Ganz allgemein können wir feststellen, dass die Naturgesetze unabhängig von der Wahl des Bezugssystems – also invariant gegen Raumtranslationen – sind. In diesem Sinne ist die Welt homogen, nur die Anfangsbedingungen sind von Ort zu Ort und von Zeit zu Zeit verschieden. Für unsere Orientierung in der Welt ist dies offenbar von grosser Bedeutung, denn ohne diese stillschweigende, d. h. weitgehend unbewusste Voraussetzung einer Invarianz der beobachteten Naturvorgänge wären wir im Leben hilflos, und Wissenschaft und Technik hätten gar nicht entstehen können.

Es scheint also so zu sein, dass Invarianzerscheinungen zu den Grundbestimmungen unseres menschlichen Seins gehören. Sollten sie da für Photogrammetrie und Fernerkundung unwichtig sein?

3. Invarianten der visuellen Wahrnehmung

Beim Verarbeiten der von unseren Sinnesorganen empfangenen Reize zu einem unmittelbar erlebten Bild unserer Umwelt spielen Invarianten eine eminent wichtige Rolle. Da wir die Mehrzahl dieser Reize durch unsere Augen aufnehmen, sollen sich die Betrachtungen hierzu auf die visuelle Wahrnehmung beschränken, zumal diese für Photogrammetrie und Fernerkundung von zentraler Bedeutung ist.

Da ist zunächst eine uns selbstverständlich erscheinende, bei näherer Überlegung aber höchst erstaunliche Invarianzleistung unseres visuellen Wahr-

nehmungssystems, nämlich das Sehen bzw. Ignorieren von Bewegungen. Die Bewegungen unseres Körpers und unserer Augen haben ja zur Folge, dass sich das auf die Augennetzhaut projizierte Bild ständig verändert. Trotzdem nehmen wir eine stabile Umwelt wahr, und eine durch die Bewegung eines Objektes verursachte Verschiebung des Netzhautbildes können wir leicht und sicher als solche erfassen. Wie ist das möglich? Die Frage hat schon im vorigen Jahrhundert zu verschiedenen Theorien geführt [4]. Diese gehen stets davon aus, dass willkürliche Augen- bzw. Kopfbewegungen bei der Verarbeitung der von der Netzhaut kommenden Signale kompensiert werden, legen jedoch unterschiedliche Modellvorstellungen zugrunde.

Von Holst und Mittelstädt [5] erklären die Zusammenhänge mit Hilfe des Reafferenzprinzips unter der Annahme eines niederen und eines höheren optischen Zentrums (Abb.2). Vom höheren Zentrum Z_h gelangt ein willkürlicher Impuls zum niederen Zentrum Z_n und von da weiter zum Auge, z. B. das Kommando, nach rechts zu blicken (Drehimpuls Dr in Abb. 2 oben). Die Bewegung des Auges führe dazu, dass sich das Bild eines Kreuzes auf der Netzhaut von 1' nach 2' verschiebt. Die dadurch ausgelöste Rückmeldung (Reafferenz) gelangt zum Zentrum Z_n, dessen Zustand durch den Kommandoimpuls aber verändert ist. Diese beiden Meldungen kompensieren sich gegenseitig, und es kommt daher zu keiner weiteren Rückmeldung an das übergeordnete Zentrum. Demnach wird keine Bewegung des betrachteten Kreuzes wahrgenommen.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn sich das Objekt von 1 nach 2 bewegt. Die Bildverschiebung auf der Netzhaut ist die gleiche (Abb. 4 unten). Die Rückmeldung trifft aber ein unverändertes Zentrum Z_n und wird deshalb unbeeinflusst zum höheren Zentrum weitergeleitet. Dies führt dazu, dass die Bildverschiebung als Bewegung des Objektes wahrgenommen wird (nach [6]).

Durch ein sehr einfaches Experiment wird eine solche Modellvorstellung nachdrücklich unterstützt. Man braucht nur ein Auge durch seitlichen Druck mit einem Finger leicht zu verschieben. Dann sieht man, dass sich bei dieser passiven Augenbewegung die Umwelt in entgegengesetzter Richtung zu bewegen scheint. Dies lässt sich leicht damit erklären, dass ja für diese erzwungene Augenbewegung keine Zustandsänderung im niederen Zentrum vorliegen kann und deshalb die Rückmeldung unverändert an das höhere Zentrum Z_h weitergeleitet wird, was zur Bewegungswahrnehmung führt.

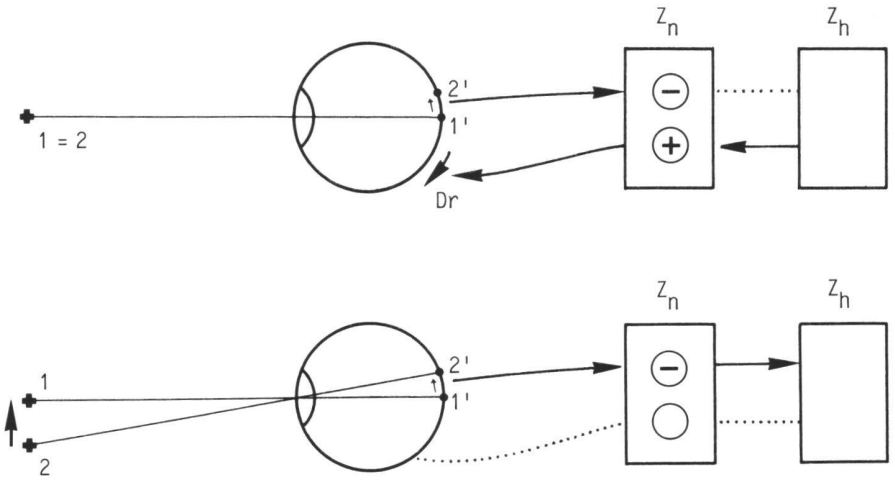

Abb. 2 Bewegungswahrnehmung nach dem Reafferenzprinzip (oben: willkürliche Augenbewegung, unten: Bewegung des Objekts)

Wir können also festhalten, dass die visuelle Wahrnehmung unserer Umwelt gegen Augenbewegungen invariant ist. Damit uns die Umwelt aber so stabil erscheinen kann, wie sie es tatsächlich tut, müssen noch weitere Invarianten wirksam sein.

Dazu muss man sich bewusst machen, dass die Gegenstände um uns in ständig wechselnden geometrischen Formen auf unsere gekrümmte Augennetzhaut projiziert werden. Geradlinigkeit, Parallelität und andere geometrische Eigenschaften bleiben dabei nicht erhalten. Dennoch ‹sehen› wir ständig solche geometrischen Formen. Dies gilt keineswegs nur für die Wahrnehmung von Flächen; wir sind es im Gegenteil gewohnt, unsere Umwelt räumlich zu erleben und trotz veränderlicher geometrischer Figuren stabile Raumstrukturen wahrzunehmen. Dementsprechend werden z.B. einfache Strichzeichnungen trotz veränderlicher Strecken, Winkel und Flächen in gleichbleibender Weise als Quader interpretiert (Abb. 3).

Aus all diesen Tatsachen müssen wir schliessen, dass die von der Netzhaut empfangenen Reize fortlaufend in einen geometrisch entzerrten und damit invarianten Wahrnehmungsraum transformiert werden, was wiederum in einem niederen Zentrum unterhalb unserer Bewusstseinsschwelle geschieht.

Weiterhin muss betont werden, dass wir die Gegenstände unserer Umwelt im allgemeinen in gleichbleibenden Grössen wahrnehmen. Auch das setzt eine Invarianzleistung unseres Wahrnehmungssystems voraus, denn das auf unsere Augennetzhaut projizierte Bild ändert seine Dimension mit der Objektentfernung. Ein Mensch, der uns auf der Strasse begegnet, scheint aber nicht grösser zu werden, wenn er auf uns zukommt und sein Bild auf der Netzhaut wächst. Das hat seinen Grund darin, dass wir unsere Umwelt räumlich erleben und dabei jedem Objekt unbewusst eine bestimmte Entfernung zuordnen. Deshalb besteht eine invariante Beziehung zwischen wahrgenommener Grösse und wahrgenommener Entfernung. Wenn die eine wächst, verkleinert sich die andere, und solange eine von beiden richtig eingeschätzt wird, wird auch die andere Grösse richtig wahrgenommen [7].

Schliesslich ist die visuelle Wahrnehmung auch in weiten Grenzen unabhängig von anderen Einflüssen, denen die empfangenen Reize unterliegen. Dazu gehören zum Beispiel Änderungen der Beleuchtung, der Farben und Kontraste. Selbst gegen Unschärfen der Abbildung ist die Wahrnehmung in gewissem Masse invariant. Allgemein kann man sagen, dass ein bestimmtes Objekt auch dann zu erkennen ist, wenn auf viele optische Informationen verzichtet wird, solange nur einige objektspezifische Invarianten, wie z. B. gewisse Konturen [8], erhalten bleiben. Deshalb genügen einem Karikaturisten oft wenige charakteristische Striche, um eine bestimmte Person darzustellen.

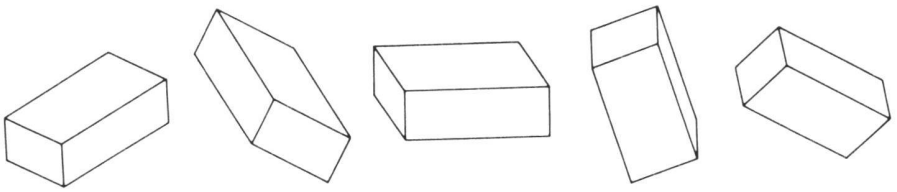

Abb. 3 Invarianz der Raumwahrnehmung von Strichzeichnungen

Die Tatsache, dass unsere Wahrnehmung in so hohem Masse von invarianten Eigenschaften abhängt, scheint nun aber auch für den objektiven Charakter unserer Aussenwelt entscheidend zu sein. Denn offenbar verlaufen die Transformationen der empfangenen Reize in einen geometrisch entzerrten Wahrnehmungsraum bei verschiedenen Menschen sehr ähnlich. Bei aller Subjektivität der sich dabei abspielenden Prozesse besteht also zwischen den sich ergebenden Bewusstseinsinhalten genügend Übereinstimmung, um die Kommunikation und das Zusammenleben der Menschen zu ermöglichen. Das lässt sich – freilich rein formal – so beschreiben, dass über die zwischen der Aussenwelt und unserer subjektiven Wahrnehmung bestehenden Invarianten auch zwischen den Wahrnehmungen einzelner Menschen invariante Beziehungen entstehen.

4. Invarianten in der Photogrammetrie

In der Photogrammetrie stehen bekanntlich die geometrischen Beziehungen zwischen Objekten und ihren Bildern im Vordergrund, die physikalischen Zusammenhänge sind sozusagen nur Mittel zum Zweck. Wir können aber Photogrammetrie nur dann betreiben, wenn zwischen dem aufgenommenen Objektraum und der Bildebene invariante Beziehungen bestehen. Dabei sind grundsätzlich Beziehungen von verschiedener Art möglich. Abb. 4 gibt einen Überblick über die in Frage kommenden Verwandtschaften und über die Eigenschaften, die jeweils als Invariante erhalten bleiben.

Da die in der Photogrammetrie verwendeten Bilder durch Zentralprojektion entstehen, bleiben – wie in allen Lehrbüchern der Photogrammetrie ausführlich dargestellt wird – die Geradlinigkeit, die Linienschnitte und die Doppelverhältnisse erhalten. Auf diesen Invarianten kann im Prinzip jede photogrammetrische Auswertung aufgebaut werden. Dazu lehrt die Projektive Geometrie [9, 10], dass je nach Art der betrachteten Grundgebilde drei bis fünf Punkte zur Herstellung einer eindeutigen Beziehung erforderlich sind, nämlich

- für Punktreihen, Geradenbüschel und Ebenenbüschel (Grundgebilde 1. Stufe) 3 Punkte,
- für Punkt- und Geradenfelder (Ebenen), Strahlenbündel und Ebenenbündel (Grundgebilde 2. Stufe) 4 Punkte,
- für Räume (Grundgebilde 3. Stufe) 5 Punkte.

Von allen Invarianten, die für Grundgebilde der ersten und der zweiten Stufe gelten, wird in der Photogrammetrie bei der Entzerrung fortlaufend Gebrauch gemacht, auch wenn in der Literatur stets das Doppelverhältnis besonders hervorgehoben wird.

Die stereophotogrammetrische Auswertung dagegen benutzt aus praktischen Gründen nicht die projektiven Beziehungen, sondern das zentralperspektive Strahlenbündel als Modell. Dieser Ansatz geht von zwei anderen Invarianten aus. Einerseits wird vorausgesetzt, dass die Daten der inneren Orientierung der Messkammer konstant, also zeitlich und örtlich invariant sind. Dass diese Voraussetzungen nicht mathematisch streng erfüllt sind und gewisse Abweichungen eventuell durch geeignete Korrekturmethoden kompensiert werden müssen, ändert nichts an der grundlegenden Gültigkeit der Modellvorstellung. Andererseits wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, dass das mit Hilfe der inneren Orientierung rekonstruierte Strahlenbündel gegen Drehungen und Verschiebungen im Raum invariant ist.

Von zentraler Bedeutung für die Photogrammetrie ist bekanntlich die Ausmessung eines Stereomodells unter Verwendung der wandernden Marke. Dieser Vorgang beruht noch in einem ganz anderen Sinne auf einer Invarianz. Denn das vom Beobachter subjektiv wahrgenommene Raummodell ist in starkem Masse von der Aufnahme- und Beobachtungssituation abhängig (z. B. Kammertyp, Basisverhältnis, Betrachtungsvergrösserung). Wenn der Beobachter also die Messmarke bewegt und auf zu erfassende Objektpunkte aufsetzt, dann misst er in einem verzerrten räumlichen Modell. Dass dies dennoch fehlerfreie Messungen ergibt, ist darauf zurückzuführen, dass die Raumlage und die Bewegungen der Messmarke – glücklicherweise! – den selben Verzerrungseinflüssen unterliegen. Dadurch wird dieses Messprinzip invariant gegen die Verzerrungen – insbesondere die Überhöhungen – des Raummodells.

Der stereoskopische Messvorgang selbst kann allgemein als Korrelation zwischen zwei einander entsprechenden Bildausschnitten in der unmittelbaren Umgebung des Messpunktes aufgefasst werden. Seit langem gibt es Bemühungen, diesen Messvorgang durch eine automatische (heute stets digitale) Bildkorrelation zu ersetzen. Die dazu entwickelten Verfahren gehen davon aus, dass innerhalb der benutzten Bildausschnitte die Nachbarschaft der Bildelemente erhalten bleibt, sie

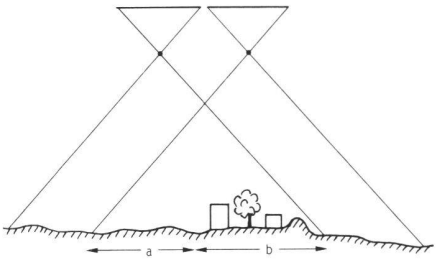

Abb. 5 Schematische Darstellung von Bildbereichen mit invarianter (a) und mit nicht invarianter Nachbarschaft (b)

also invariant ist. Solange diese Voraussetzung erfüllt ist, bereitet die Bildkorrelation keine grundsätzlichen Probleme (Abb. 5a). Häufig, insbesondere in grossmassstäbigen Bildern, ist dies jedoch nicht der Fall, da z. B. verschiedene Seiten eines Gebäudes wiedergegeben werden (Abb. 5b) und die Bilder deshalb nicht mehr topologisch äquivalent sind. Dann versagt der übliche Korrelationsansatz. Um die dadurch verursachten Schwierigkeiten zu überwinden, müssten Verfahren entwickelt werden, bei denen die vorliegenden Bilddaten in solcher Weise transformiert werden, dass die Invarianz der Nachbarschaft im Korrelationsbereich wiederhergestellt wird. Solche Verfahren sind bisher nicht bekannt. Demgegenüber hat ein menschlicher Beobachter keine nennenswerten Schwierigkeiten bei der Ausmessung von Bildern mit gestörten Nachbarschaftsbeziehungen, da er z. B. eine Dachfläche über dem

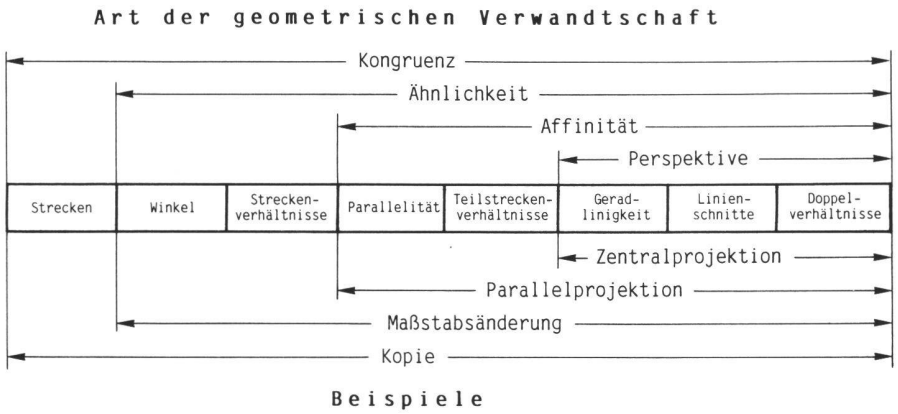

Abb. 4 Übersicht über die Invarianten geometrischer Verwandtschaften

anstehenden Gelände schweben sieht. Dies macht deutlich, dass die Invarianzleistung unserer visuellen Wahrnehmung der Simulation durch automatische Bildkorrelation nach dem heutigen Stand weit überlegen ist.

5. Invarianten in der Fernerkundung

Die Fernerkundung benutzt in erster Linie die physikalischen Informationen, die in Bildern enthalten sind. Zur Auswertung dieser Informationen dient entweder die visuelle Bildinterpretation durch einen Beobachter oder die rechnerische Verarbeitung im Computer. Vielfach werden Kombinationen dieser Möglichkeiten durch interaktive digitale Bildverarbeitung eingesetzt. In jedem Fall spielen aber Invarianten eine entscheidende Rolle.

Bei der visuellen Bildinterpretation macht der Beobachter von allen Erfahrungen Gebrauch, die er in der Verarbeitung visueller Reize aus seiner Umwelt hat [11]. Der einzige prinzipielle Unterschied ist der, dass nicht direkt Objekte, sondern Bildvorlagen als Reizquellen benutzt werden.

In einem Punkt allerdings unterscheiden sich die beiden Wahrnehmungsarten. Bei der direkten Beobachtung kann der räumliche Bezug zwischen Beobachter und Umwelt nicht willkürlich verändert werden, da der erlebte Raum – wie ausgeführt – stabil ist. Bei der Bildinterpretation aber sind beliebige räumliche Lagen möglich. Dabei kann die Wahrnehmung von der Lage des Bildes abhängen und sich z. B. bei Drehung um 180 Grad stark ändern (Abb. 6). Bei der Auswertung von Luftbildern ist das Interpretationsergebnis zwar in vieler Hinsicht unabhängig von der Lage der Bilder, die räumliche Interpretation der durch Schrägbeleuchtung entstandenen Helligkeitsgradienten aber hängt direkt damit zusammen. Diese Tatsache ist damit zu erklären, dass der Beobachter unbewusst für sein Gesichtsfeld die Beleuchtung von oben (vorzugsweise links oben) annimmt. Wenn diese Voraussetzung bei der Betrachtung eines Bildes nicht zutrifft und keine zwingenden anderen Reliefinformationen vorliegen, kommt es bekanntlich zu einer Umkehr (Inversion) des wahrgenommenen Geländereliefs (Abb. 7).

Im übrigen verwendet der Bildinterpret weitgehend unbewusst die in der Luftbildinterpretation bekannten Kriterien zum Erkennen von Objekten, nämlich

Schwärzungsunterschiede bzw.
Farbunterschiede zwischen benachbarten Flächen
Formen von Objekten
relative Objektgrössen
Lagebeziehungen zwischen Objekten
Objektmuster
Oberflächentexturen
Schattierungen und Schlagschatten.

Alle diese Interpretationskriterien verhalten sich in hohem Masse invariant gegen die bei der Bildaufnahme, -verarbeitung und -wiedergabe wirksamen Faktoren. So ist beispielsweise die Erkennbarkeit eines Sportplatzes in einem Luftbild weitgehend unabhängig von Beleuchtung, Luftlicht, Filmsensibilisierung, Belichtung, Gradation, Massstab u. ä. Ebenso wie bei der direkten Beobachtung der Umwelt werden im Wahrnehmungsprozess derartige Einflussfaktoren offenbar unterdrückt und objektspezifische Invarianten – wie z. B. Konturen – herausgefiltert, die auch unter wechselnden äusseren Bedingungen zur Wahrnehmung von Objekten führen.

Ein Grossteil der Forschungsaktivitäten in der Fernerkundung hat die automatische Informationsgewinnung zum Ziel. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass durch einen Automaten prinzipiell die in physikalischer Form gegebenen Anfangsdaten in ebenfalls physikalisch dargestellte Ergebnisdaten überführt werden, was stets als Transformation aufgefasst werden kann. Sinn solcher Transformationen ist es, aus komplexen Anfangsdaten gewünschte Informationen abzuleiten, die in einfacher Weise in Ergebnisdaten codiert sind, also z. B. aus Multispektraldaten eine thematische Kartierung zu gewinnen.

Wenn bei der visuellen Interpretation der in der Fernerkundung vorkommenden Bilddaten die in ihnen enthaltenen Invarianten entscheidend sind, dann kann auch der Weg zur automatischen Auswertung nur über solche Invarianzerscheinungen führen. Für die automatische Auswertung müssen also solche Transformationen gewählt werden, welche die verschiedenartigen Störeinflüsse unterdrücken und die für die zu erkennenden Objekte spezifischen invarianten Eigenschaften verstärken.

Für die meisten der genannten Interpretationskriterien können in diesem Sinne noch keine grossen Erfolge verbucht werden. Bis zu einem gewissen Grad bilden Texturen eine Ausnahme, die wenigstens in Ansätzen in ihren objektspezifischen Ausprägungen automatisch erfassbar sind. Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung beim automatischen Klassifizieren von Oberflächen aufgrund ihrer Farbunterschiede. Bei dieser Multispektral-Klassifizierung sind die Einflüsse der Störfaktoren offenbar vergleichsweise gering und in den Daten in genügendem Masse objektspezifische Invarianten enthalten, um wenigstens wichtige Oberflächenar-

Abb. 6 Abhängigkeit der Wahrnehmung von der Lage

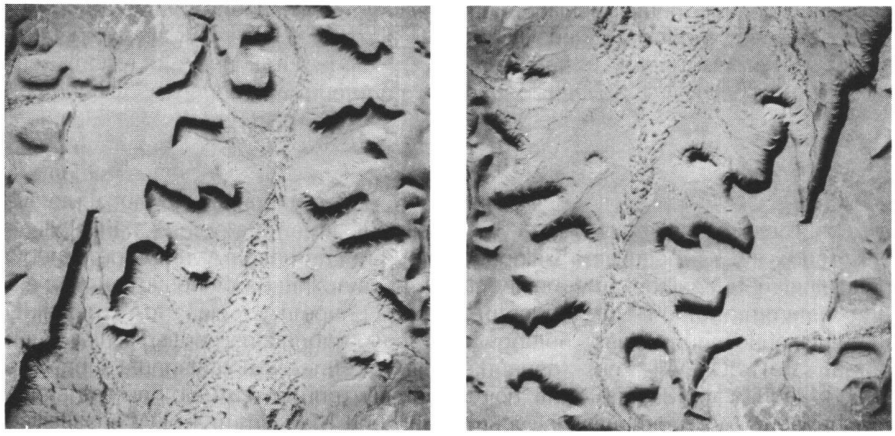

Abb. 7 Inversion des Geländereliefs in Abhängigkeit von der Bildlage

ten voneinander unterscheiden zu können. Freilich wurden mit der Einführung von Trainingsgebieten auch spezielle Transformationsverfahren entwickelt, die zur Elimination von Störfaktoren besonders geeignet erscheinen.

6. Schluss

Photogrammetrie und Fernerkundung unter dem Gesichtspunkt der Invarianten zu diskutieren, ist sicherlich nur eine von vielen möglichen Betrachtungsweisen. Sie erlaubt es aber in besonderem Masse, Vergleiche zwischen der Verarbeitung von Bildinformationen in unserem visuellen Wahrnehmungssystem und den in Photogrammetrie und Fernerkundung üblichen technischen Systemen zu ziehen. Dabei ergibt sich, dass die Invarianzleistungen unserer technischen Systeme noch sehr weit hinter der visuellen Wahrnehmung zurückbleiben. Insbesondere ist zu bedenken, dass wir technisch noch weit davon entfernt sind, Invarianzen simultan auszuwerten, was wir visuell in jedem Augenblick mit der grössten Selbstverständlichkeit tun.

Literatur:

[1] Duden-Fremdwörterbuch. 3. Auflage, Mannheim 1974, S. 340.

[2] J. Albertz: Über den menschlichen Beobachter in der Fernerkundung. Festschrift Kurt Schwidefsky, Karlsruhe 1975, S. 21–38.

[3] Gerthsen, Kneser u. Vogel: Physik. 13. Auflage, Heidelberg 1977, S. 544.

[4] R. L. Gregory: Auge und Gehirn. Zur Psychophysiologie des Sehens. Kindlers Universalbibliothek, München 1966, 256 S.

[5] E. von Holst u. H. Mittelstädt: Das Reafferenzprinzip. Naturwissenschaften 37 (1950) S. 464 (zitiert nach [6]).

[6] W. Trendelenburg: Der Gesichtssinn. Grundzüge der physiologischen Optik. 2. Auflage, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961, S. 304.

[7] W. N. Dember: The Psychology of Perception. London 1969, 402 S.

[8] J. Albertz: Gestaltpsychologische Fragen in der Luftbildinterpretation. Internat. Archiv für Photogrammetrie, Vol. XVIII, 1970, S. 589–598.

[9] T. Reye: Geometrie der Lage. I. Abt., 5. Auflage, Leipzig 1909, 255 S.

[10] K. Schwidefsky: Das Entzerrungsgerät. Berlin/Bad Liebenwerda 1935, 92 S.

[11] J. Albertz: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation. Bildmessung und Luftbildwesen 38 (1970) S. 25–34.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz
Institut für Photogrammetrie
Technische Universität Berlin
Strasse des 17. Juni 135, D-1000 Berlin 12

Ist die bedingte Ausgleichung von Triangulationsnetzen überholt?

R. Conzett

1. Einleitende Bemerkungen

1.1 Die bedingte Methode der Ausgleichungsrechnung wird zwar auch in neueren Lehrbüchern noch dargestellt, doch fehlt es nicht an Hinweisen, dass die Bedingungsgleichungen – im Gegensatz zu den Beobachtungsgleichungen der vermittelnden Ausgleichung – keinen von der Netzgestaltung unabhängigen Aufbau hätten und sich deshalb einer allgemein anwendbaren Programmierung entzögen; kurz: die bedingte Ausgleichung sei nicht computerfreundlich. Auch aus der Praxis ist kaum noch etwas über die bedingte Ausgleichung von Triangulationsnetzen zu vernehmen.

1.2 Wenn nun im folgenden die Vorteile der bedingten Ausgleichung herausgestrichen werden, geht es nicht darum, einen ‹Glaubenskrieg› bedingt kontra vermittelnd heraufzubeschwören; vielmehr soll der Praxis ein neues/altes Verfahren angeboten werden, das dann eingesetzt werden sollte, wenn diese Vorteile ins Gewicht fallen.

1.3 Die bedingte Ausgleichung – man weiss es – arbeitet mit Bedingungsgleichungen, welche die Beobachtungen direkt miteinander verknüpfen.
Jede Bedingungsgleichung

$$\underline{z}_j = F_j(\underline{\ell}_1, \ldots \underline{\ell}_i, \ldots \underline{\ell}_n) = \underline{o}\,;\; j = 1 \ldots r,$$

liefert eine Testvariable $\underline{z}_j$, deren ‹Realisierung› Rückschlüsse auf das mathematische Modell zulässt. Im Vordergrund steht dabei das Erkennen grober Fehler, die sich bei der vermittelnden Ausgleichung – ohne besondere Massnahmen – nicht so unmittelbar bemerkbar machen. Insbesondere werden damit Testverfahren anwendbar, auf die z. B. [Carosio 1983] S. 39 hinweist.

2. Die Rolle des Computers

2.1 Der Einsatz des Computers in einzelnen Anwendungsgebieten ist bisher stark dadurch geprägt, dass man bekannte konventionelle Rechenabläufe automatisch ablaufen lässt. Neben qualitativen Verbesserungen im mathematischen Modell der Ausgleichung steht meist die quantitative Rechenleistung stark im Vordergrund, nicht selten auf Kosten der Qualität der Resultate: in grossen Triangulationsnetzen können sich grobe Fehler recht gut verstecken!

2.2 Bei zukunftsorientierten Programmen stehen demgegenüber zwei Entwicklungstendenzen im Vordergrund:
- die interaktive Durchführung der Berechnungen
- neue, unkonventionelle Verfahrensansätze, die hohe Computerleistung in komfortable Information umsetzen.

2.3 Zur Interaktivität: Rechenabläufe im Stapelbetrieb sind meist dadurch gekennzeichnet, dass vorerst die Daten gesamthaft bereitgestellt und eingegeben werden; dann erfolgt – unabhängig vom Bearbeiter – die Auswertung durch den Computer, und schliesslich werden die Ergebnisse gesichtet und interpretiert. Bei interaktiver Bearbeitung, im Time-sharing-Betrieb, bleibt der Bearbeiter dauernd in Verbindung mit dem System und mit der zu lösenden Aufgabe. Er kann laufend Daten einführen und, je nach Datensituation, Entscheide treffen, d. h. den Ablauf steuern. Solche neue Möglichkeiten in der Programmgestaltung beschreibt u. a. [Kuhn 1985].

2.4 Bei den folgenden Betrachtungen spielen insbesondere der interaktive Einsatz von Matrizenprozeduren und des Stiefelschen Austauschverfahrens [Conzett 1978] eine wichtige Rolle. Eine Unterstützung des Dialogs durch Graphik ist in der hier besprochenen Anwendung noch nicht berücksichtigt.

2.5 Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen muss das Programmpaket PRIMA [Kuhn, Wirth 1983], das am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich entwickelt wurde, kurz charakterisiert werden. PRIMA heisst Pascal Routinen für Interaktive Matrizen Anwendungen. Der Bearbeiter kann mit diesem ‹Werkzeug› nicht nur alle wichtigen Matrizenprozeduren im Dialog durchführen; auch das Austauschverfahren steht ihm interaktiv zur Verfügung. Er kann Elemente in die Matrizen einfüllen, Matrizen löschen, korrigieren, Untermatrizen

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich
Separata Nr. 92