



Digitalisieren von Luftbildern

Michael Gruber ¹, Franz Leberl ²

¹ *Vexcel Imaging GmbH, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz*

² *Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz*

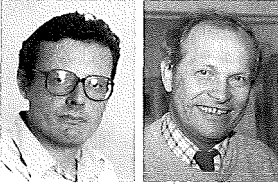
VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (1), S. 2–12

2001

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Gruber_VGI_200101,  
Title = {Digitalisieren von Luftbildern},  
Author = {Gruber, Michael and Leberl, Franz},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {2--12},  
Number = {1},  
Year = {2001},  
Volume = {89}  
}
```





Digitalisieren von Luftbildern

Michael Gruber und Franz Leberl, Graz

Zusammenfassung

Digitale Bilder sind die Quelldaten der modernen Photogrammetrie. Ihre Erzeugung ist heute noch weitgehend den analogen Luftbildkammern vorbehalten. Die notwendige Umsetzung der belichteten Filme in digitale Information wird mit Filmscannern realisiert. Dabei besteht die Forderung, den Informationsgehalt des analogen Mediums auf hohem Niveau zu erhalten. Jeder weitere Arbeitsschritt in der photogrammetrischen Produktion ist von der Qualität der Bilddaten abhängig. Es besteht daher Interesse an der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von photogrammetrischen Filmscannern ebenso wie an der Beurteilung des gesamten Digitalisiervorganges. Einige Gedanken dazu werden im vorliegenden Beitrag formuliert und durch praktische Beispiele ergänzt. Diese wurde mit dem photogrammetrischen Hochleistungsscanner UltraScan5000 der Firma Vexcel Imaging GmbH ausgeführt, der in diesem Beitrag vorgestellt wird.

Abstract

Scanning of analog images has become a new key hardware technology specific to modern digital photogrammetry. Since specialized photogrammetric scanners have been introduced in the late 80's we observe a gradual development and quality enhancement of the resulting scans. Originally, geometric accuracy of scanners was the overriding specification for these products. This is increasingly being augmented by a concern for good color and radiometric performance. This article discusses measures of radiometric range and resolution, and illustrates the ability of the UltraScan5000, a modern photogrammetric scanner manufactured by Vexcel Imaging Austria. The UltraScan5000 was introduced in November 1998 at the GIS/LIS'98 Conference in Ft. Worth, Texas. Since then, a surprisingly large number of systems has been installed on the entire globe. Their successful operation illustrates on a daily basis the validity of the technical solution and many tests at user sites have confirmed a superior performance in accuracy, radiometry and color.

1. Einleitung

Digitale Bilddaten haben in der photogrammetrischen Produktion immer mehr an Bedeutung gewonnen. Leistungsfähige und nicht zuletzt auch preisgünstige Rechenanlagen mit der notwendigen Ausstattung zur Verwaltung und Archivierung von großen Rasterdaten haben diese Entwicklung begünstigt. Die Erzeugung digitaler Bilder ist nach wie vor ein zweistufiges Verfahren. Trotz der Ankündigung digitaler Kammerssysteme am diesjährigen XIX. Kongress für Photogrammetrie und Fernerkundung in Amsterdam sind analoge Aufnahmesysteme weltweit im Einsatz und werden auch in den nächsten Jahren ihren Platz bei der Erzeugung von Luftbildern behaupten. Damit wird auch der Bedarf an Filmscannern vorhanden sein und der Arbeitsschritt des Digitalisierens von Luftbildern Teil der photogrammetrischen Produktion bleiben.

Die hier ausgeführten Überlegungen sollen einen Überblick über die Beurteilungskriterien dieses Produktionsschrittes geben (siehe auch [2,3,4 und 15]). Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf die Qualität bei der Umsetzung radiometrischer Information gelegt. Dichteumfang, ra-

diometrisches Auflösungsvermögen und die radiometrische Genauigkeit eines Scanners bei der Abtastung von analogen Bilddaten sind Kriterien, die für die Qualität des digitalen Ergebnisses relevant sind [7,8 und 14]. Von besonderem Interesse für die photogrammetrische Anwendung ist die geometrische Qualität einer digitalen Kopie. Hier wurde aus verständlichen Gründen die geometrische Genauigkeit eines Scanners mit besonderer Aufmerksamkeit betrachtet. Messungen im digitalen Bild werden im definierten System eines Pixelrasters durchgeführt. Die Metrik der analogen Vorlage kann jedoch nur beim Abtasten erfasst und übertragen werden. Neben dieser geometrischen Genauigkeit ist das geometrische Auflösungsvermögen ein Qualitätskriterium für Scanner. Die kleinste mögliche Pixelgröße kann hier zwar als Richtwert verstanden werden, das tatsächliche Auflösungsvermögen eines opto-elektronischen Systems muß aber experimentell nachgewiesen werden.

Nicht weniger wichtig ist neben der Beurteilung der Qualität die Wirtschaftlichkeit eines Scanners und des produzierenden Umfeldes. Anschaffungskosten, Betriebskosten und Zeitbedarf bei der Erstellung von digitalen Bilddaten

sind Eingabegrößen für dieses Leistungskriterium. Um den Personaleinsatz und damit die Betriebskosten zu reduzieren wurden Anstrengungen unternommen, den Digitalisierungsprozess zu automatisieren. Das Ergebnis sind autonom arbeitende Rollfilmeinrichtungen, die den motorgetriebenen Filmtransport, das exakte Positionieren eines einzelnen Bildes am Scanner und die automatische Definition der variablen Scanparameter leisten.

2. Konstruktionsprinzipien von Filmscannern

Filmscanner werden seit etwa 15 Jahren hergestellt. Besonders im graphischen Gewerbe war der Bedarf mit dem Einsatz von digitalen Methoden gegeben. Die direkte Datenerfassung durch digitale Kameras war vorerst nicht möglich und stößt auch heute noch an gewisse Grenzen.

2.1 Trommelscanner

Das Konstruktionsprinzip der ersten Scanner basierte auf einem schnell rotierenden Zylinder und einem lichtempfindlichen Sensor. Das auf der Trommel aufgespannte Bild wurde durch eine translatorische Bewegung des Sensors nach und nach abgetastet. Neben der etwas umständlichen Aufgabe des Montierens war eine geometrisch exakte Wiedergabe der analogen Vorlage nicht zu erwarten. Trommelscanner konnten daher für photogrammetrische Aufgaben nicht herangezogen werden [16].

2.2 Flachbettscanner

Durch den Einsatz von Mehrfachdetektoren als elektrooptische Sensoren wurde der Bau von Flachbettscannern möglich (siehe Abb. 1). Diese Geräte haben vorerst einen deutlichen Verlust

an radiometrischer Qualität mit sich gebracht. Vorteile bei der Handhabung und kontinuierliche Verbesserungen führten aber zu einer nahezu vollständigen Verdrängung der Trommelscanner und zur Entwicklung neuer Anwendungen (z.B. OCR und DTP).

Heute werden nahezu alle Scanner mit Zeilensensoren ausgestattet. Diese sind mit bis zu 14000 Elementen in drei Spektralbereichen (Rot-, Grün- und Blaukanal) ausgestattet und werden von der Industrie in Massenproduktion hergestellt (siehe dazu [5]). Weniger üblich ist der Einsatz von Flächensensoren, die, abgesehen von Sonderanfertigungen, ein Format von 2000×3000 Elemente erreichen. Werden große Bilder mit hoher Auflösung abgetastet, was in der photogrammetrischen Anwendung Routine ist, muß der Sensor nach einem geeigneten Prinzip über das Bild geführt werden, um formatfüllend Daten zu erfassen. Bei Zeilensensoren wird neben der obligaten Sensorbewegung in Abtastrichtung eine zusätzliche orthogonale Bewegung eingeführt, um in mehreren Streifen abzutasten (engl. „xy-stitching“). Bei Flächensensoren wird ebenfalls eine zweidimensionale Bewegung durchgeführt, die Aufnahme der einzelnen Flächensegmente erfolgt bei unbewegter Kamera (engl. „stare-stepping“, [11,12]).

2.3 Mechanische Präzision

Die Photogrammetrie legt einen besonderen Wert auf die geometrische Genauigkeit der digitalen Kopie eines Luftmessbildes. Es wird erwartet, daß die Qualität der analytischen Photogrammetrie beibehalten und eine mittlere Lageübereinstimmung zwischen analoger Vorlage und digitalem Ergebnis von $\pm 2 \mu\text{m}$ bis $\pm 3 \mu\text{m}$ erreicht wird.

Die mechanische Präzision und damit die Qualität der Vorschubeinrichtung bildet die Grund-

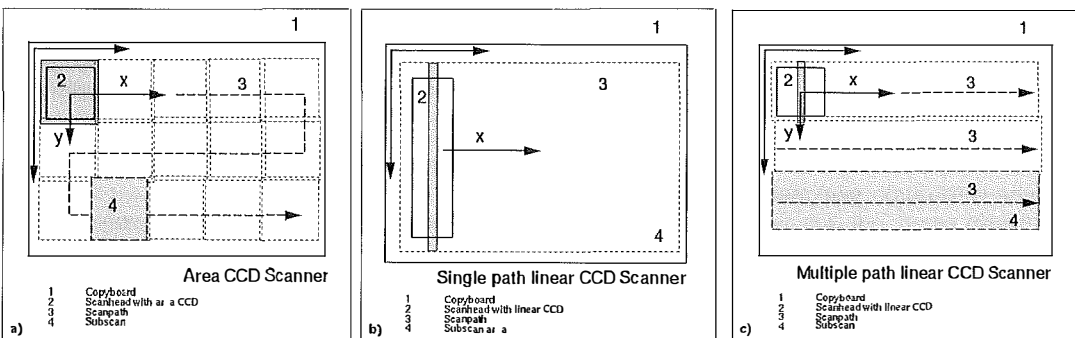


Abb. 1: Drei unterschiedliche Konstruktionsprinzipien für Flachbettscanner: a) mit Flächensensor und mäandrierender Abtastfolge, b) mit Zeilensensor und einem einzelnen Scanstreifen und c) mit Zeilensensor und mehreren Scanstreifen

lage für diese Genauigkeit. Ob nun Sensor und Optik oder die analoge Vorlage bewegt werden, ist in diesem Zusammenhang belanglos.

Die Erfüllung dieses Qualitätskriteriums führte auch zu einer akzeptablen geometrischen Übereinstimmung von benachbarten Teilbildern oder Bildstreifen bei der notwendigerweise partiellen Abtastung des photogrammetrischen Standardbildformates. Die mangelhafte radiometrische Übereinstimmung und damit sichtbare Grenzen zwischen Teilbildern und Streifen wurde bislang weniger streng beanstandet.

Für Anwendungen im graphischen Gewerbe war das vorerst ohne Bedeutung, da die Abtastung mit Flachbettscannern nur in einem einzigen Bildstreifen erfolgte. Erst eine nahezu perfekte Anpassung von Bildstreifen ohne sichtbare geometrische oder radiometrische Stufen erlaubt die Digitalisierung großer analoger Vorlagen mit hoher geometrischer Auflösung. Die geometrische Übereinstimmung zwischen Bildstreifen führte so zum ersten mal zu geometrischen Genauigkeitskriterien für Graphikscanner, ohne jedoch dabei die Gesamtgeometrie des digitalen Bildes zu bewerten.

2.4 Sensor, Optik und Beleuchtung

Der elektronische Sensor ist ein grundlegender Bauteil jedes Scanners. Seine Leistungsmerkmale bestimmen die Qualität der digitalen Ergebnisse und nehmen bereits Einfluß bei der Konstruktion des Scanners. Es wurde bereits erwähnt, dass Sensoren mit mehreren lichtempfindlichen Zellen eingesetzt werden. Zeilenförmige und flächenhafte Anordnungen werden produziert, wobei heute die sogenannte CCD-Technologie vorherrscht. Licht wird bei der Abtastung eines Bildes in den einzelnen Zellen des Sensors in einem gewissen Zeitraum gesammelt und in elektrische Ladung umgesetzt. Diese wird in einer entsprechenden elektronischen Schaltung als vorerst analoges Signal erfasst, in digitale Form umgewandelt und an einen geeigneten Steuerrechner weitergegeben. Dies erfolgt durch elektronische Bauteile, die hier nicht weiter erwähnt werden.

Farbe wird durch geeignete Farbfilter erkannt, die jeweils einen Teil des Spektrums des sichtbaren Lichts ausblenden. Bei Filmscannern ist eine Filtergruppe mit den drei Grundfarben rot, grün und blau (650 nm, 550nm und 450nm) üblich. Die Abtastung kann nun durch drei Sensorgruppen für jede der drei additiven Primärfarben gleichzeitig oder durch einen Sensor in drei getrennten Durchgängen durchgeführt werden.

Die Qualität des Sensors wird durch mehrere Parameter bestimmt, darunter Sättigungsstrom und Dunkelstrom. Aus diesen resultiert die radiometrische Auflösung, d.h. die Fähigkeit, Helligkeitsunterschiede zu erkennen. Die erfasste Lichtmenge und das daraus resultierende elektrische Signal stehen in einem linearen Zusammenhang. Im Gegensatz dazu wird Licht beim Auftreffen auf Filmmaterial nach einem logarithmischen Verhältnis in Schwärzung umgesetzt. Um nun die Brauchbarkeit eines elektro-optischen Sensors für die Abtastung von Filmmaterial bewerten zu können, muß der vom Film erreichte Dichtebereich auf die lineare Skala der Sensorsignale abgebildet werden. Für Hochleistungsscanner, die Filme mit einer maximalen Dichte von mehr als 3.0 D abtasten, kommen daher nur Sensoren in Frage, die mehr als 1000 Intensitätswerte unterscheiden können. Die Umsetzung in ein digitales Signal erfolgt dann sinngemäß mit einer Datentiefe von mehr als 10 Bit.

Zwei Eigenschaften elektrooptischer Sensoren haben einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität ihrer digitalen Ergebnisse: die temperaturabhängige Entwicklung von Rauschsignalen und die besondere Empfindlichkeit gegenüber langwelligem (infrarotem) Licht. Dieser unerwünschte Qualitätsverlust von Filmscannern kann besonders im graphischen Gewerbe nicht hingenommen werden. Technische Lösungen wurden daher entwickelt, z.B. Kühlaggregate für den Sensor um ein minimales und von der Betriebsdauer unabhängiges Rauschniveau zu erreichen und optische Filter zur Ausblendung von langwelligem Lichtanteilen (Infrarot Cut-Off Filter).

Lichtquelle und Optik bilden weitere Komponenten des Scansystems. Die radiometrische und geometrische Abstimmung dieser Bauteile ist unumgänglich für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis. Trotzdem wird hier auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet.

Das Ziel bleibt insgesamt unverändert : der Filmscanner soll in der Lage sein, den radiometrischen Informationsgehalt von Filmmaterial nahezu verlustfrei in digitale Form umzusetzen.

3. Filmmaterial

Die Qualität digitaler Luftbilder ist von der Qualität des analogen Ausgangsmaterials und der für die Aufnahme eingesetzten Luftbildkammer ebenso abhängig wie von der Leistungsfähigkeit des Scanners. Es ist daher sinnvoll, die Eigenschaften von Luftbildfilmen zu untersuchen, um eine Aussage über Verfahrensgrenzen und die Abstimmung mit den Scannereigenschaften zu

treffen. Hier kann allerdings nur kurz darauf eingegangen werden. Das analoge Quellenbild ist das Produkt von Film, Belichtung und Entwicklung und daher einer Reihe von Einflüssen unterworfen, die in ihrer Gesamtheit zu beachten sind. Wichtige Eigenschaften wie der Dichtumfang eines Materials oder die Korngröße sind daher nur als Richtwerte zu verstehen.

3.1 Panchromatisches Material

Der panchromatische Negativfilm ist das traditionelle Medium der Photogrammetrie.

Obwohl der Verlust an Farbinformation für manche Folgeprodukte eine Einschränkung bedeutet, ist die hohe geometrische Auflösung von Vorteil. Der Dynamikbereich ist in den meisten Fällen durch eine maximale Dichte von 2,5 D begrenzt, kann aber auch Werte bis zu 3,0 D aufweisen. Das Auflösungsvermögen erreicht je nach Emulsion und Entwicklung sehr hohe Werte. Für den Feinkornfilm Aviphot Pan 80 wird je nach Objektkontrast eine Auflösung von 101 bis 287 Linienpaaren/mm angegeben [1]. Für den Feinkornfilm Kodak Panatomic-X werden noch höhere Werte angegeben (bis zu 500 Linienpaare/mm bei hohem Objektkontrast)[5]. Etwas grobkörniger erweist sich der schnellere Kodak Double X 2405 mit einer Auflösung von 50 bis 125 Linienpaaren/mm und einer mittleren diffusen Körnigkeit von 0,026 [5] (siehe Abb. 2).

3.2 Farbumkehrfilm

Farbumkehrfilme zeichnen sich durch einen hohen Dichtumfang aus. Eine maximale opti-

sche Dichte über 3,0 D ist nicht ungewöhnlich. Der Umkehrfilm hat den Vorteil, dass eine direkte analytische Auswertung möglich ist. Für eine digitale Verarbeitung wird jedoch der Farbnegativfilm immer attraktiver. Die Herausforderung an den Filmscanner liegt hier in der radiometrischen Auflösung dichter Bildbereiche (Schattenregionen).

3.3 Farbnegativfilm

Farbnegativfilm war als Luftbildfilm weniger gebräuchlich. Erst durch die digitale Verarbeitung gewinnt dieser Filmtyp wieder an Bedeutung für die photogrammetrische Produktion. Neben dem maskierten Typ werden Filme mit klarer Basis angeboten, darunter der Aviophot Color X100 von Agfa mit einer bemerkenswerten Auflösung von 140 Linienpaaren/mm und niedrigem Kornrauschen [1] (Abb.3). Die Dichte des Negativmaterials ist durch die Basisdichte eingeschränkt, die jedoch auch vom Entwicklungsprozess abhängt. Der Lichtverlust, der durch die Basisdichte entsteht, muß vom Scanner kompensiert werden.

Filmmaterial mit spezieller Sensibilisierung für langwelliges Licht bis 900 nm (nahes Infrarot) hat etwas niedrigere Werte für die geometrische Auflösung und eine höhere diffuse Körnigkeit.

Die optischen und radiometrischen Grenzen, die für jeden Filmtyp gelten, bleiben natürlich bei der Abtastung erhalten. Insgesamt muß der Scanner aber in der Lage sein, in der Produktion eine Reihe verschiedener Filme umzusetzen. Geometrische Auflösungen mit Pixelgrößen von

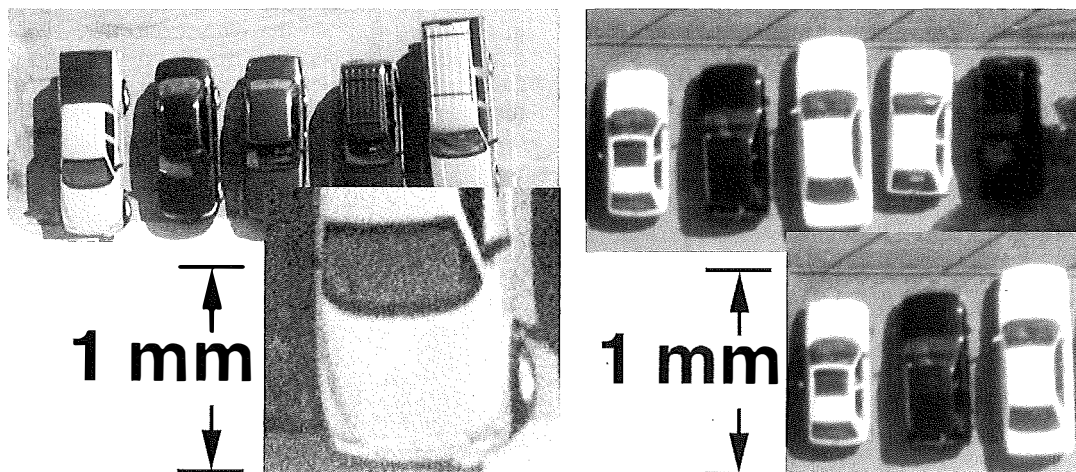


Abb. 2: Panchromatisches Filmmaterial, abgetastet mit UltraScan5000, 5 µm Pixelgröße; links: Kodak Double X 2405, mB ca. 1:2000, mit deutlich sichtbarem Korn, rechts: Kodak Panatomic X 2412, mB ca. 1:5000, die Korngröße liegt hier unterhalb der Auflösung durch die Digitalisierung

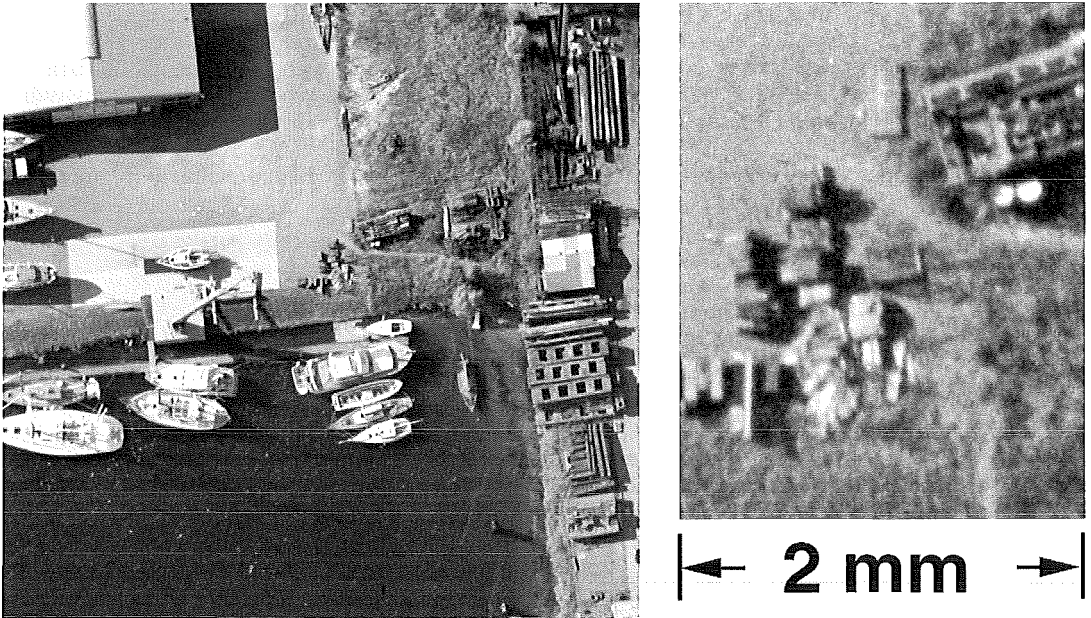


Abb. 3: Colornegativ Filmmaterial, Agfa Aviophot Color X 100, mB ca. 1:5000, abgetastet mit UltraScan5000, Pixelgröße 5 *m. Körnung und Schärfe liegen zwischen den Beispielen aus Abb.2.

wenigen Mikrometern und radiometrische Leistungsfähigkeit bis in optische Dichtebereiche von mehr als 3.0 D müssen daher vorausgesetzt werden.

4. UltraScan5000

Das System UltraScan5000 wurde als Neuentwicklung von Vexcel Imaging Austria im Herbst 1998 vorgestellt und ist daher das jüngste Produkt in der relativ kleinen Marktnische der photogrammetrischen Filmscanner (Abb. 4). Basierend auf den Erfahrungen mit den Serien VX3000 und VX4000 der amerikanischen Schwesterfirmen [9,10,11,12] sowie einer engen Kooperation mit

Partnerfirmen aus der graphischen Industrie wurde ein Gerät entwickelt und produziert, dass photogrammetrische und graphische Anforderungen erfüllt. Hohe geometrische Auflösung, geometrische Genauigkeit und grafikfähige radiometrische Qualität werden erreicht. Zusätzlich ist der Scanner in der Lage, Auflichtmaterial ebenso wie Durchlichtvorlagen zu verarbeiten [6,13].

UltraScan5000 ist ein Flachbettscanner mit Zeilensensor. Das Abtasten der Vorlagen erfolgt in mehreren Bahnen mit einer optischen Auflösung von 50 dpi bis 5080 dpi (5 µm Pixelgröße). Der Sensor ist mit jeweils 6000 CCD - Elementen für die drei primären Farbkanäle ausgestattet und erzeugt ein Signal mit einem Dynamikbe-

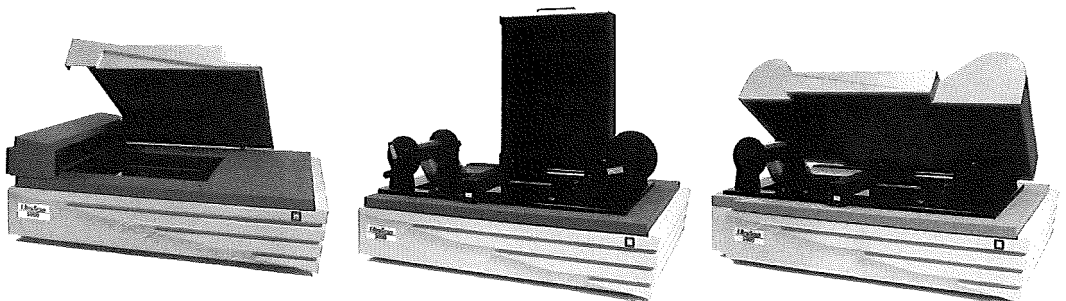


Abb. 4: UltraScan 5000, links in der Basisversion, in der Mitte mit manueller Rollfilmeinrichtung und rechts mit dem automatischen Rollfilmmanagement

reich von 72 dB (Kodak KLI 6003 CCD Sensor). Die Digitalisierung des analogen Signals erfolgt mit einer Breite von 12 bit und damit von 4096 linearen Abstufungen. Der Sensor ist mit einem Kühlelement ausgestattet, dass temperaturabhängig optimale Bedingungen garantiert und Kondensierung durch zu starkes Abkühlen verhindert. Lichtquelle und Optik sind auf den Sensor abgestimmt und jeweils mit Infrarot - Sperrfiltern ausgestattet (siehe auch Tab. 1).

Die Abtastung erfolgt durch eine vordefinierte und kalibrierte Bewegung der Kamera, die als SCSI-Einheit konzipiert ist und die Elektronik Elemente für die Signalabnahme und Digitalisierung (A/D Konverter) beinhaltet. Damit wird eine minimale Distanz für die Übertragung des analogen Signals erreicht und damit verbundene Qualitätsverluste auf niedrigstem Niveau gehalten.

Der Betrieb des Scanners erfolgt über PC mit Windows NT Betriebssystem und SCSI 2 Schnittstelle. Die Scannersoftware umfasst das Benutzer-Interface mit einer graphischen Oberfläche, die Scanner-Betriebssoftware sowie Software zur geometrischen und radiometrischen Kalibrierung, zur Überprüfung der Kalibrierung sowie für die Fehlerdiagnose und zur Serviceunterstützung. Zur Bearbeitung von ungeschnittenen Rollfilmen wird eine manuelle und eine softwaregesteuert-robotische Rollfilmeinheit angeboten, die jeweils nachgerüstet werden kann.

5. Ein praktischer Scannertest

Die wesentlichen technischen Qualitätsmerkmale eines Scanners lassen sich in zwei Gruppen Teilen: Geometrie und Radiometrie. Es gilt nun, geeignete Prüfmethode zu definieren und damit die Grundlagen für eine Beurteilung herzustellen. Ein Vorschlag zur Durchführung eines derartigen Tests und praktische Ergebnisse mit speziellen Vorlagen werden hier anhand von Abtastungen mit UltraScan5000 vorgestellt.

5.1 Geometrische Genauigkeit

Die geometrische Genauigkeit eines Scanners kann anhand einer geeigneten Vorlage mit Markierungen überprüft werden. Die Vorlage wird abgetastet und die Markierungen werden im digitalen Bild vermessen. Diese Messergebnisse werden mit den bekannten Positionen der Markierungen verglichen. Die Statistik über die verbleibenden Restabweichungen kann als Grundlage für eine Genauigkeitsaussage herangezogen werden.

Um eine formatfüllende und regelmäßigen Kontrolle der Scannergeometrie zu ermöglichen, ist ein automatisches Verfahren sinnvoll und notwendig. Methoden der Mustererkennung in digitalen Bildern erlauben diese Bestimmung von Strukturen mit hoher Genauigkeit. Die Form der Markierungen ist für die automatische Koordinatenbestimmung zu optimieren.

Scanner Unit

Format	A3+ (280 mm x 440 mm @ 5080 dpi, 330 mm x 440 mm @868 dpi).
Native Resolution	16 different settings, user selectable
Optical resolutions	5080 dpi or 868 dpi, user-selectable
Geometric output resolutions	continuously selectable between 10,160 dpi and 50 dpi
Geometric accuracy	better than $\pm 2 \mu\text{m}$
Density range	> 3.4D
Radiometric accuracy	up to $\pm 0.3 \text{ DN}$ at 1.0D
Illumination	transmissive and reflective light, user-selectable
Color	One-pass color
Bits per pixel	at native 3 x 12 bits from A/D conversion, internal use of 3 x 16 bit per pixel (super-pixels)
Sources	Color, grayscale or line art, negative black&white and color scanning
Roll film	Optional attachment for either manual or automated operation

Software

Graphical User Interface GUI	for Windows NT
Various output formats	TIFF, Tiled TIFF, TIFF-16, RAW, EPS, DCS, SCITEX
Output pixels	at 8 or 16 bits per color separate
Photogrammetric support software	includes special on-line geometric calibration

Tabelle 1: Technische Daten UltraScan 5000

Die von Vexcel Imaging Austria entwickelte Testvorlage entspricht diesen Anforderungen (Abb. 5). Kleine quadratische Marken mit 240 *m Seitenlänge und einem Abstand von 1 mm erlauben eine flächendeckende und automatische Erfassung der Scannergeometrie. Pixelgrößen bis 40*m können bei der Abtastung gewählt werden, ohne bei der Erkennung der Marken die relative Größe von rund 6 Pixeln zu unterschreiten.

Die Überprüfung der geometrischen Genauigkeit kann durch die dazu entwickelte Software beliebig oft durchgeführt werden und stellt damit eine ständige Qualitätskontrolle beim Scannen dar.

metrischen Auflösung eines Scanners erlaubt (Abb. 6). Abtastungen in verschiedenen Auflösungen (Pixelgrößen) und bei unterschiedlichen Positionen und Orientierungen der Testvorlage führen zu einer umfangreichen Reihe von Auflösungsproben.

Die Auflösungsleistung bei niedrigem Kontrast kann durch Abdunkeln der Vorlage durch ein Neutralfilter mit bekannter optischer Dichte bestimmt werden. In jedem Fall wird mit der Bestimmung der Modulationstransferfunktion (MTF) ein geeignetes Maß für die Beschreibung der Auflösungsleistung gefunden. Die Umsetzung des Auflösungsmaßes von Linien-

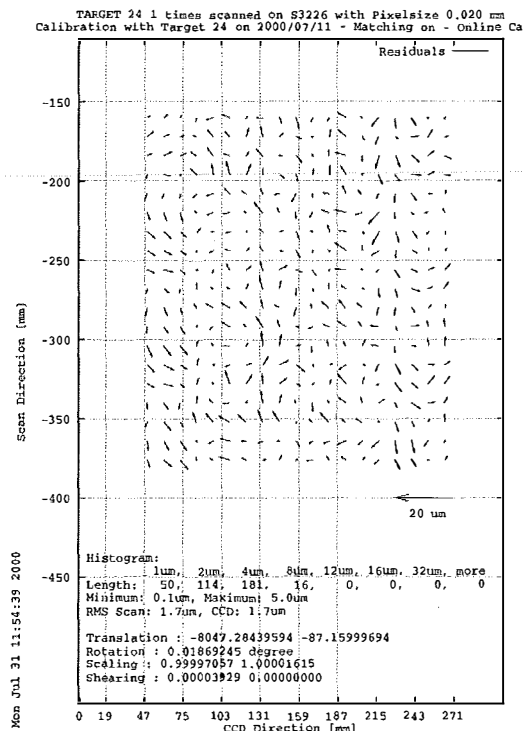
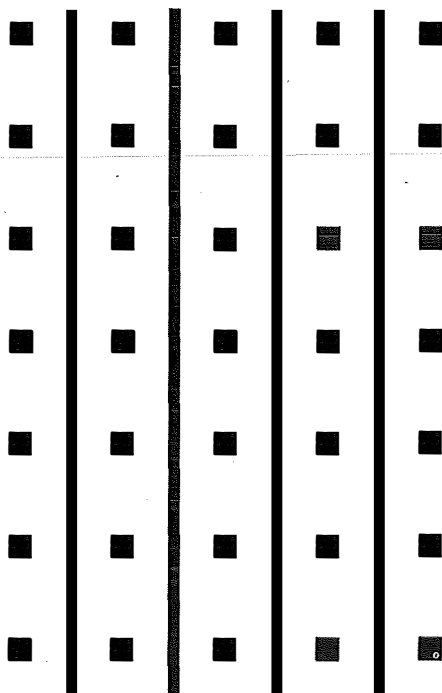


Abb. 5: Gitterplatte mit quadratischen Markierungen und Linien. Links: Detailansicht, rechts: automatisch generiertes Kalibrierungsprotokoll, welches hier bei einer 20 µm Abtastung einen Restfehler von ±1.7 µm in X und ±1.7 µm in Y ausweist

5.2 Geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung eines Filmscanners wird üblicherweise durch die Abtastung von feinen Mustern mit definierten Strukturen und die Analyse der dadurch erzeugten Bilder bestimmt. Mehrere derartige Testvorlagen sind bekannt und werden von einschlägigen Firmen hergestellt. Im folgenden wird auf das US-Airforce Target Bezug genommen, das durch seine Form eine rasche visuelle Beurteilung der geo-

paaren pro mm (lp/mm) in eine Pixelgröße erfolgt mittels Kell-Factor $1000/(2.8 * n) = \text{Pixelgröße in } \mu\text{m}$, wobei n den Wert für lp/mm darstellt.

5.3 Radiometrie

Die radiometrische Leistung eines Scanners wird durch Abtasten von Vorlagen mit bekannter optischer Dichte bestimmt. Diese Graukeile kön-

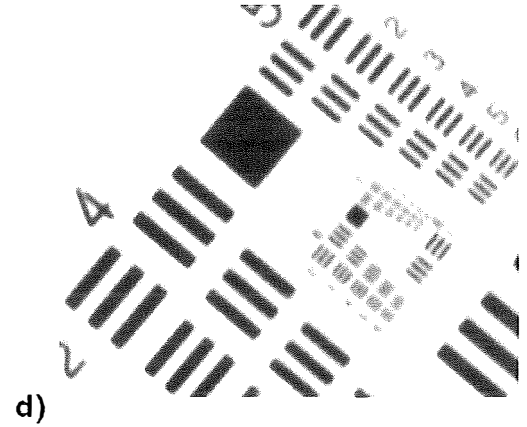
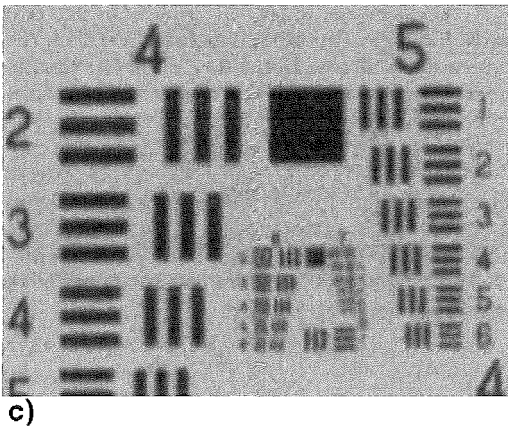
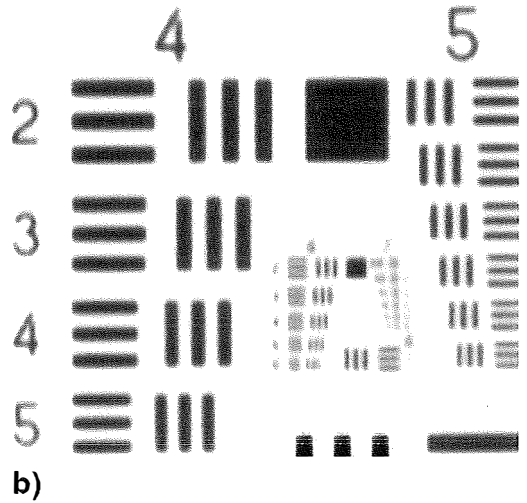
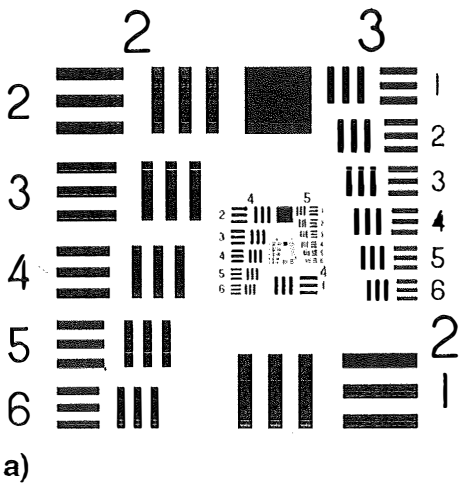


Abb. 6: Ermitteln des Auflösungsvermögens mittels US AirForce Target. Die Trennung der Balken in Gruppe 6.1 (64 lp/mm) ist in allen Fällen sichtbar. a) Übersicht, b) Ausschnitt, c) Abtasten mit Neutralfilter mit optischer Dichte 2.3D, d) Abtasten in gedrehter Lage.

nen über einschlägige Firmen bezogen werden, wobei Qualitätsunterschiede und Dichtebereiche der jeweiligen Produkte zu beachten sind. Nominelle Dichtewerte sind im Zweifelsfalle durch eine Kalibrierungsmessung zu korrigieren.

Die Beurteilung der mit dem Scanner erzeugten digitalen Daten des Graukeils erfolgt nach zwei Gesichtspunkten. Einmal interessiert der radiometrische Umfang, der vom Scanner erfasst werden kann. Dazu werden die hellsten und dun-

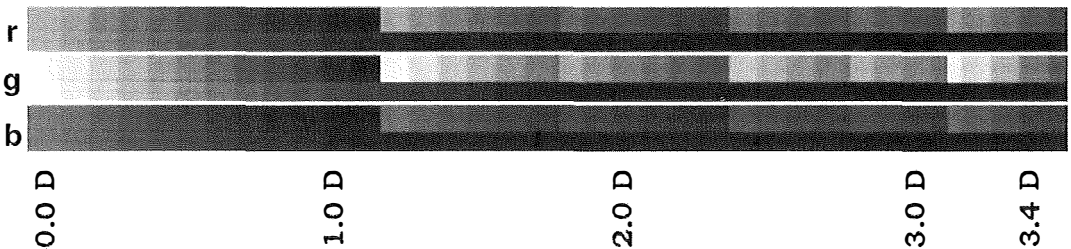


Abb. 7: Abtasten eines Graukeils mit einem Dichtebereich von 3.4 D und Wiedergabe der Intensitätswerte der drei Farbzeilen. Zur Darstellung wurde der Dichtebereich in 6 getrennte Zonen geteilt und radiometrisch gespreizt.

kelsten Bereiche des Graukeils bestimmt, die visuell oder nach einem bestimmten Kriterium unterscheidbar sind.

Darüber hinaus interessiert die radiometrische Genauigkeit, also die Übereinstimmung einer aus den digitalen Bild erzeugten Dichteskala mit den Daten der Vorlage (Abb.7 und Tab. 2).

Dichte	Intensität(DN)	Sigma(DN)
0,0	255,91	0,51
0,2	180,33	1,26
0,4	114,07	0,87
0,6	72,13	0,63
0,8	45,44	0,46
1,0	28,91	0,30
1,2	18,22	0,23
1,4	11,53	0,17
1,6	7,29	0,09
1,8	4,58	0,07
2,0	2,92	0,04
2,2	1,87	0,03
2,4	1,18	0,03
2,6	0,76	0,03
2,8	0,51	0,03
3,0	0,35	0,03
3,2	0,24	0,02
3,4	0,17	0,02

Tab. 2: Numerische Ergebnisse aus der Abtastung des Graukeiles Kodak ST34. Die Daten wurden auf eine Darstellung in 8 bit (256 Werte) skaliert. Daher ergeben sich nicht ganzzahlige Werte für die Intensität und deren Varianz.

5.4 Abtasten von Vorlagen verschiedener optischer Dichte

Die Herausforderungen beim Abtasten von Luftbildern liegen oft am oberen oder unteren Ende des dynamischen Bereiches. Objektdetails in dichten Schattenpartien sollen ebenso erkannt und vermessen werden wie Strukturen in hellen Flächen. Anhand von zwei Experimenten (Abb. 8 und 9) soll die Leistungsfähigkeit des benutzten Scanners dokumentiert werden. Die Abtastung eines panchromatischen Luftbildnegatives mit hohem Kontrast zeigt schließlich, dass eine digitale Darstellung mit 8 bit Bandbreite nicht ausreicht, um die im analogen Bild vorhandene Information darzustellen (Abb.10).

6. Reproduktion von Farbe

Farbe wird bei Filmscannern durch geeignete Filter in den Primärfarben rot, grün und blau und damit in einem geräteabhängigen, lokalen System erfasst. Die Verarbeitung in einem graphischen Produktionsprozeß mit wiederum spezifischen Ausgabegeräten (Bildschirme, Drucker) und Ausgabemedien (Filmen, Papiersorten) sowie die Umsetzung für den Rasterdruck bedarf eines sorgfältigen Farbmanagements. Dieses verwendet Kalibrierungsdaten aus den einzelnen Prozessphasen und Transformationsvorschriften, um zwischen Farbräumen verschiedener Geräte wechseln zu können.

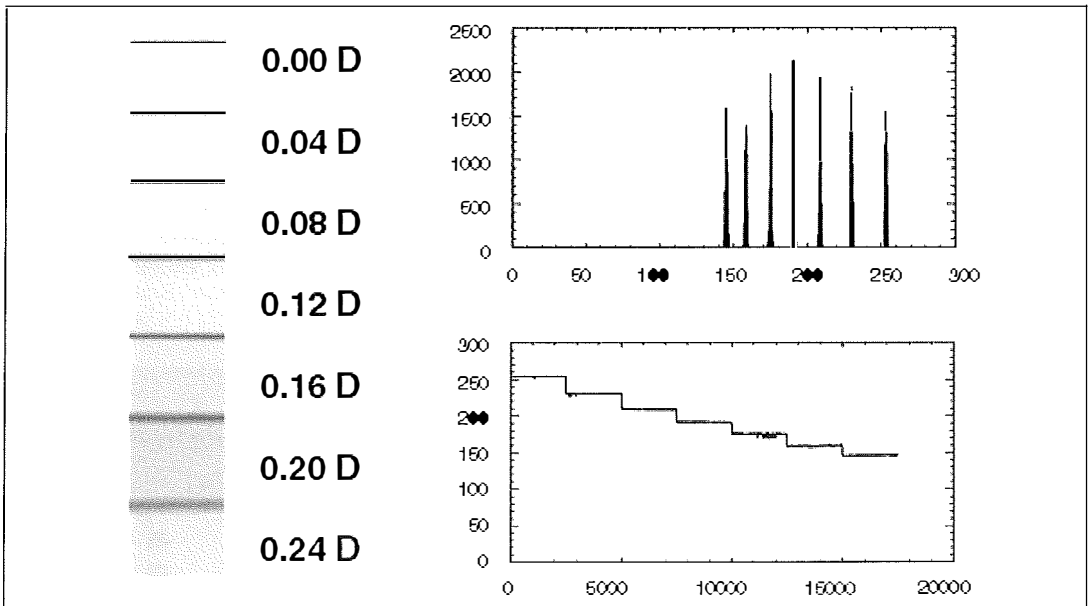


Abb. 8: Abtasten eines sehr hellen Graukeiles mit einem Dichtebereich von 0.0 D bis 0.24 D. Dieser Keil ist aus klaren Glasplatten zusammengesetzt, wobei jede Platte die Gesamtdichte um 0.04 D erhöht.

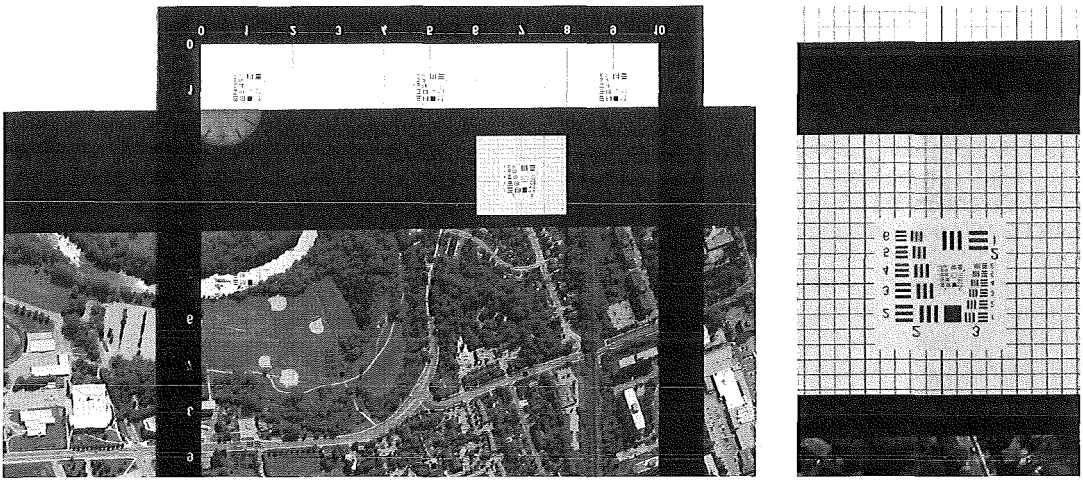


Abb. 9: Auflösung feiner Strukturen in sehr dichten Bildbereichen. Die Struktur eines Testmusters wird durch den Randbereich eines CIR-Dias (optische Dichte ca. 2.9) erfasst. Die Darstellung wurde durch eine Histogrammspreizung in einem Ausschnitt bearbeitet, links: Detail mit dem Testmuster.

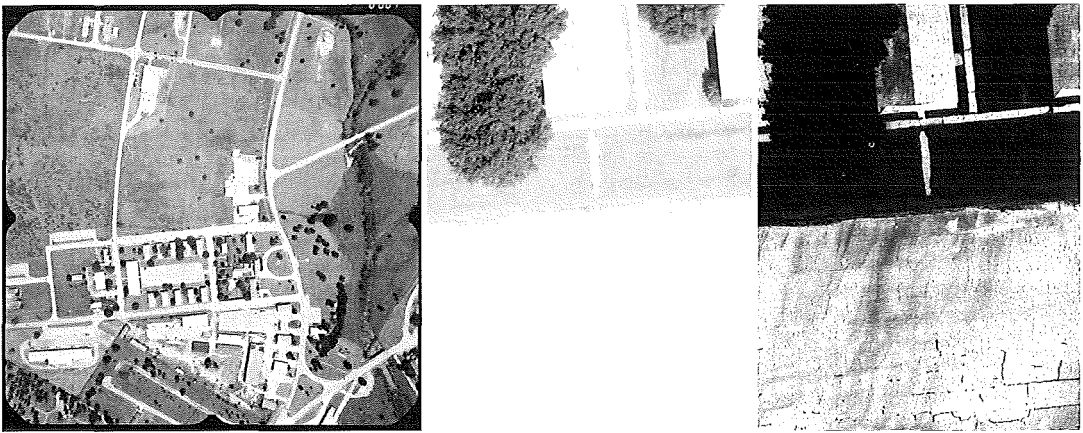


Abb. 10: S/W Luftbild mit hohem Kontrastumfang (0.2 D – 2.9 D), Abtastung mit 25 µm und 16 bit Darstellung der Grauwerte. Links: Übersicht; in der Mitte und rechts ein Ausschnitt mit hohem Kontrast und jeweils unterschiedlicher Histogrammanpassung (dunkle Vegetation und heller Boden).

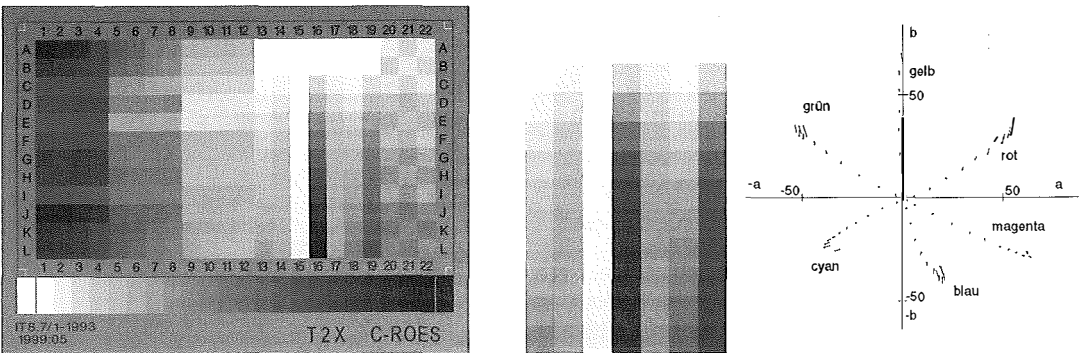


Abb. 11: Abtasten einer Farbvorlage: IT8 Farbtarjet nach CIE Norm. Links: Gesamtansicht, Mitte: Ausschnitt, Rechts: Vergleich zwischen Kalibrierdaten und Auswertung der Abtastung für die 84 Farbfelder der Spalten 13 bis 19 im CIE Lab Farbraum.

Ohne auf die Anforderungen eines Farbmanagementsystems einzugehen, soll die Farbfähigkeit eines Scanners durch geeignete Testvorlagen bestimmt werden. Hier bietet sich das normierte Farbtarget IT 8 an, das neben einem Graukeil eine Reihe von Farbfeldern mit unterschiedlicher Sättigung aufweist. Abbildung 11 illustriert die Farbvorlage, einen Ausschnitt mit den Spalten 13–19 (cyan, magenta, gelb, schwarz, rot, grün und blau) sowie den Vergleich zwischen den colorimetrisch gemessenen Daten der Vorlage und den transformierten Ergebnis der Abtastung. Die graphische Darstellung bezieht sich auf den CIE-Lab Farbraum.

7. Abschließende Bemerkungen

Digitale Bilder sind in der photogrammetrischen Produktion unverzichtbar geworden. Der überwiegende Teil der Quelldaten wird jedoch auf konventionellem Wege erstellt und durch Filmscanner umgewandelt. Das Ergebnis dieser Abtastung ist die Grundlage für weitere Produktionsschritte in der Photogrammetrie. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass durch den messtechnischen Anspruch die geometrische Genauigkeit lange als das dominierende Qualitätskriterium für photogrammetrische Scanner angesehen wurde. Dieser Beitrag hat daher versucht, die Bedeutung der radiometrischen Leistung zu unterstreichen. Gleichzeitig wurde die Gelegenheit wahrgenommen, einen Filmscanner vorzustellen, der Anforderungen aus der graphischen Industrie und der Photogrammetrie gleichzeitig berücksichtigt. Neue, hochauflösende Farbnegativfilme der führenden Hersteller für Luftbildfilme haben der digitalen Photogrammetrie zusätzliche Impulse verliehen und den Bedarf an hoher Qualität bei der Digitalisierung dieser Filme unterstrichen.

Das System UltraScan5000 ist heute nach nur zwei Jahren seit der Markteinführung auf allen Kontinenten im erfolgreichen Dauereinsatz. In einer typischen Konfiguration mit manueller Rollfilmeinrichtung leistet das System einen Durchsatz von mehr als 10 000 Farbabtastungen mit 20 µm Pixelgröße pro Jahr. Dieser Durchsatz wird durch den Einsatz der automatischen Rollfilmeinrichtung im Dauerbetrieb noch gesteigert oder bei höherer Zielauflösung beibehalten.

Literatur

- [1] *Agfa Gevaert*, (2000) <http://www.agfa.com>, Produktinformation
- [2] *Baltsavias E.* (1994) Test Calibration and Procedures for Image Scanners, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXX, Part B1, Como 1994.
- [3] *Baltsavias E.* (1998) Photogrammetric Film Scanners. GIM Geomatics Info Magazine, Vol. 12, July, pp. 55-61.
- [4] *Baltsavias E.* (1999) On the performance of photogrammetric scanners. Proceedings of the Photogrammetric Week 1999, Univ. Stuttgart, Deutschland, pp 155-173.
- [5] *Eastman Kodak* (2000) <http://www.kodak.com>, Produktinformation
- [6] *Gruber M., F. Leberl, G. Thallinger* (1998) Novel High Precision Photogrammetric Scanning, Proceedings of the GIS/LIS'98 Conference, Ft. Worth, Texas. Publ. By the Am. Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [7] *Kölbl O., U.Bach,* (1996) Tone Reproduction of Photographic Scanners, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 62, No.6, pp687-694.
- [8] *Kölbl O.* (1999) Reproduction of Colour and of Image Sharpness with Photogrammetric Scanners - Conclusion of the OEEPE-Scanner Test. Proceedings of the OEEPE Workshop on Automation in Digital Photogrammetric Production, OEEPE-Publication No. 37, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt, Deutschland, pp. 111-134.
- [9] *Leberl F. et al.* (1990a) Mensuration Frame Grabbing Apparatus, US-Patent # 4,928,169.
- [10] *Leberl F. et al.* (1990b) Reseau Apparatus for Photogrammetry Devices. US Patent # 4,841,455.
- [11] *Leberl, F., M. Best, D. Meyer* (1992) Photogrammetric Scanning with a Square Array CCD Camera. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Part B2, Washington 1992, pp 358-363.
- [12] *Leberl, F.* (1992) Precision Scanning of Aerial Photography, Proceedings of the Am. Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing, Albuquerque, NM, (USA), pp 247-252.
- [13] *Leberl F. et al.* (2000) Self Calibrating Reseau-Based Scanner with Single and Multiple CCD's and Single and Multiple Optical Systems. US Patent # 6,122,078.
- [14] *Neumann K., E. Baltsavias* (2000) Enhancement of the Radiometric Image Quality of Photogrammetric Scanners. Proceedings of the ISPRS Congress in Amsterdam, Archives of the ISPRS, Vol. XX-A.
- [15] *Seywald R.* (1996) On the Automated Assessment of Geometric Scanner Accuracy. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B1, Vienna 1996.
- [16] *Thorpe J.* (1992) Oral Contribution at the Occasion of the ISPRS Working Group II/III Workshop on Digital Photogrammetric Workstations, Boulder, Colorado (siehe auch Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 1.

Anschrift der Autoren:

Dr. Michael Gruber: Vexcel Imaging GmbH, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz
 Univ.-Prof. Dr. Franz Leberl: Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz