in: J. Altmann, G. Neuneck (Hg.): Naturwissenschaftliche Beiträge zu Abrüstung und Verifikation, Verhandlungen der Fachsitzung auf der 60. Physikertagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Jena 1996, S. 138–151. FONAS/DPG, Hamburg 1996.

Änderungsdetektion auf multispektralen Luftbildern – Perspektiven für den *Open-Skies*-Vertrag

Rafael Wiemker und **Hartwig Spitzer**

Universität Hamburg, II. Institut für Experimentalphysik

Arbeitsgruppe CENSIS[1]

Kurzfassung — *Zur Überwachung von Rüstungsbegrenzungsabkommen und zur sicherheitspolitischen Vertrauensbildung erlaubt der Open-Skies-Vertrag den 27 Unterzeichnerstaaten gegenseitige Beobachtungsüberflüge zunächst mit Photo- und Videokameras. Da der Vertrag explizit offen für spätere technische Erweiterungen ist, untersuchen wir die Möglichkeiten von bildgebenden Multispektralscannern. Multispektralbilder erlauben im Gegensatz zu Grauwertbildern eine relativ einfache Klassifizierung der abgebildeten Oberflächen anhand ihrer spektralen Signatur und können somit die Datenauswertung beschleunigen. Sie besitzen bei Überlassung an zivile Institutionen erhebliches Anwendungspotential für ökologisches und Katastrophen-Monitoring.*

Die computergestützte Bildauswertung benötigt physikalische Modelle von Strahlungstransport und -reflexion. Unsere experimentellen Ergebnisse zur Sensorkalibrierung, zu atmosphärischer Beleuchtung und Transmission sowie zur spektralen Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie dienen der Verbesserung von Bildklassifikation und automatisierter Änderungsdetektion.

[1] CENSIS: c/o Prof. H. Spitzer, II. Inst. f. Exp.-Physik, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg
World Wide Web http://kogs-www.informatik.uni-hamburg.de/projects/Censis.html
R. Wiemker: wiemker@informatik.uni-hamburg.de, H. Spitzer: f36hue@dsyibm.desy.de

Der Open-Skies-Vertrag

Der am 24. März 1992 in Helsinki unterzeichnete Open-Skies-Vertrag [1] stellt eine der weitreichendsten internationalen Vereinbarungen zur sicherheitspolitischen Vertrauensbildung und militärischen Transparenz dar [2–7]. Der Zweck des Vertrages ist die „Verbesserung von Offenheit und Transparenz, die Überprüfung der Einhaltung von existierenden und zukünftigen Rüstungsbegrenzungsabkommen und die Stärkung der Fähigkeit zur Konfliktvorbeugung und Krisenbewältigung im Rahmen der Konferenz für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa (KSZE[2]) und in anderen relevanten internationalen Institutionen.“ [3] Erreicht werden soll dies durch gegenseitige Beobachtungsflüge über den Territorien der beteiligten Staaten. Bis heute haben 27 Staaten den Vertrag unterzeichnet, darunter alle 16 NATO-Staaten sowie Weißrußland, Bulgarien, die Tschechische Republik, Georgien, Ungarn, Kirgisien, Polen, Rumänien, Rußland, die Slowakei und die Ukraine.

Noch harrt der Vertrag der Ratifizierung durch die Parlamente von Rußland, der Ukraine und Belarus. In der Zwischenzeit wurden jedoch bilateral vereinbarte Probeflüge durchgeführt, z.T. bereits unter den im Vertrag spezifizierten Bedingungen. Möglicherweise kommt es zu einer faktischen Implementierung auf freiwilliger Basis.

Nach Inkrafttreten wird der Vertrag unbefristete Laufzeit haben. Anfangs werden die nationalen Beobachtungsflugzeuge[4] mit Video- und Photokameras (Panorama- und Einzelbildkameras) ausgestattet. In einer späteren Phase werden Radarsensoren und Zeilen-Scanner für das thermische Infrarot hinzukommen.[5]

Die kooperative Natur des Vertrages ist einzigartig. Sie gibt allen Unterzeichnerstaaten das Zugangsrecht zu den durch die Beobachtungsflüge gewonnenen Daten. Die Beobachtungsflüge werden von gemeinsamen Besatzungen begleitet bzw. durchgeführt. Anhand der Open-Skies-Flüge können insbesondere Informationen über militärische Anlagen und Aktivitäten bereitgestellt werden, die durch Vor-Ort-Inspektionen im Rahmen des KSE-Vertrages [6] und durch Inspektionen im Rahmen des Wiener Dokuments von 1992 bisher *nicht* zugänglich waren.[7] Dadurch kann die militärische Transparenz und die Sicherheit in Europa und darüber hinaus verbessert werden.

Open Skies ist insofern auch ein extrem technischer Vertrag [8], als er umfangreiche Prozeduren zur Bestimmung der wetterabhängigen Flughöhe, der Flugrouten und der technischen Spezifikationen der Sensorsysteme enthält.

---

[2] heute: Organisation für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa (OSZE)

[3] aus der Präambel des Vertrages

[4] Das deutsche Beobachtungsflugzeug ist eine Tupolev TU 154 M.

[5] Die Bodenauflösung ist beschränkt auf 30 cm für photographische Systeme (Video und Einzelbild), 50 cm für das thermische Infrarot und 3 m für Radarsensoren. Die Bodenauflösung wird anhand von Teststreifen ermittelt. Der Auflösungsgrenzwert von 30 cm entspricht im wesentlichen der Auflösung eines digitalen Sensors mit einer Pixelbreite von 30 cm.

[6] Vertrag über Konventionelle Streitkräfte in Europa

[7] Sowohl die Territorien der kontinentalen USA und Kanadas als auch die asiatische Teile der russischen Föderation gehören zum Vertragsgebiet.

Erweiterungen des Open-Skies-Vertrages

Der Vertrag ist explizit offen für Erweiterungen des Kreises der Vertragsstaaten, der Anwendungsfelder und der verwendeten Sensoren. Interessant ist aus unserer Sicht insbesondere die Hinzunahme von bildgebenden Multispektral-Scannern. Diese stellen eine natürliche Ergänzung von Video- und Infrarotkameras dar, indem sie die Lücke des dazwischenliegenden Wellenlängenbereichs schließen. Die Hinzunahme von Multispektralscannern wiederum legt eine Erweiterung der Anwendungsfelder des Vertrags z.B. auf ökologische Sicherheit (Umwelt-Monitoring) und die Beobachtung von Umweltkatastrophen nahe.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes von CENSIS, Hamburg, und der Eötvös-Universität, Budapest, sollen damit zusammenhängende Fragen der Vertragserweiterung untersucht werden. P. Dunay (Budapest) wird die erforderlichen politischen Schritte und völkerrechtlichen Klärungen behandeln.[8] In Hamburg sollen dagegen technische Aspekte der Gewinnung und Auswertung von Multispektralbildern im Vordergrund stehen, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

Das Potential von Multispektralbildern für Open Skies

Fernerkundung für militärische Aufklärungszwecke wird herkömmlicherweise mit Schwarzweißphotos durchgeführt, und auch der Open-Skies-Vertrag stützt sich anfänglich auf solche Negative mit nur mittlerer Auflösung, um *Erkennung* von schwerem militärischen Gerät zu ermöglichen, jedoch *Identifizierung* zu vermeiden.[9] Zusätzliche thermische Infrarotbilder zeigen die Temperatur und damit den Betriebszustand von Objekten. Radarbilder geben gröber aufgelöste kartographische und infrastrukturelle Information (Brücken, Straßen, Gebäude etc.) unter Allwetterbedingungen.

Als Ergänzung zu (ggf. digitalisierten) Photographien steht seit zwei Jahrzehnten zusätzlich die multispektrale Fernerkundung für Anwendungen wie Landnutzung, Landschafts- und Städteplanung und Umwelt-Monitoring zur Verfügung und erfreut sich wachsender Verbreitung und Anerkennung. Multispektrale Fernerkundung und Bildverarbeitung bieten höheren Informationsgehalt, da Landschaftsszenen gleichzeitig in mehreren spektralen Kanälen abgebildet werden. Die Klassifikation von Multispektralbildern beruht auf dem Prinzip der für verschiedene Oberflächen typischen wellenlängenabhängigen Absorption und Reflexion des einfallenden Sonnen- und Himmelslichtes. Das reflektierte Wellenlängenspektrum, die sog. spektrale Signatur, kann somit Rückschlüsse auf die physikalische Natur und ggf. den biologischen Zustand erlauben und für Klassifikation genutzt werden [9]. Hier liegt ein erhebliches Potential auch für Open-Skies-Anwendungen.

Ein entscheidender Engpaß für eine möglichst großflächige Verifikation durch den Open-Skies-Vertrag ist die große Menge des anfallenden Bildmaterials. Inaugenscheinnahme von Photographien, aber auch computergestützte Durchsicht von digitalisierten Analogbildern oder Digitalbildern sind durch Personalaufwand beschränkt. Mit dem hohen Datenaufkommen steigt

[8] Prof. Dr. Pál Dunay, Eötvös University Budapest, International Law Department, and Hungarian Institute of Foreign Affairs.

[9] Erkennung meint hier die Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten von Objekten, z.B. Fahrzeugen, während Identifizierung die Feststellung des genauen Typs einschließt.

somit der Bedarf nach halbautomatischer digitaler Bildauswertung [10] (im Gegensatz zu reinen Darstellungshilfen). Diese ist vom Vertrag erlaubt [8]. In diesem Zusammenhange werden Multispektralbilder interessant.

Aus photographisch gewonnenen Schwarzweiß-Bilddaten kann geometrische und texturelle Information extrahiert werden. Kanten, Linien, Ecken, Formen und Texturen können gefunden werden. Noch existiert jedoch eine große Kluft zwischen diesen sog. frühen Merkmalen und einem höheren Bildverstehen. Eine *thematische* Kartierung, die für jede Fläche eine bestimmte Beschaffenheits- oder Nutzungsklasse ausweist (z.B. Wald, Feld, See, Straße, Gebäude), ist aufgrund von Grauwertbildern bisher nur schwer zu erreichen. Daher wird diese zumeist auf Multispektralbildern ausgeführt, die bildelementweise aufgrund ihrer spektralen Signatur einer bestimmten Klasse zugeordnet werden können. Bildelemente mit spektral ähnlichen Signaturen können anschließend algorithmisch gruppiert werden (sog. unbeaufsichtigte Klassifikation/Segmentation). Die Spektren werden dabei als Merkmalsvektoren aufgefaßt.

Aus der Mustererkennung sowie aus den Methoden der Statistik steht eine Reihe von Verfahren zur Analyse mehrdimensionaler Datensätze zur Verfügung, die eine pixelweise Klassifikation der Spektren erlauben. In der Bildverarbeitung sind Verfahren bekannt, die eine Bildsegmentierung aufgrund von texturellen oder Homogenitätskriterien ermöglichen. Des weiteren wurden kombinierte Verfahren entwickelt, die die pixelweise Spektralanalyse mit der Extraktion homogener Regionen verbinden [11]. Multispektralbilder sind somit einer automatisierten Analyse eher zugänglich als Schwarzweißphotographien. Hinzu kommt, daß auch für die `Handauswertung' durch geschulte Operateure Multispektralbilder bei gleicher Auflösung mehr Information liefern als panchromatische Bilder [12].

Der normalerweise signifikanteste Nachteil von Multispektralbildern gegenüber Schwarzweißphotographien ist die schlechtere räumliche Auflösung. Tatsächlich liegt normalerweise eine gegenseitige Beschränkung von räumlicher und spektraler Auflösung vor, gegeben durch die begrenzte Lichtausbeute der Optik und die Datenaufzeichnungsrate. Ein weiterer Nachteil gegenüber Photographien ist die sicherlich deutlich aufwendigere elektronische Speicherung von Digitaldaten.

Beide Nachteile sind jedoch im Open-Skies-Kontext von geringerem Gewicht. Einerseits scheint eine Digitalisierung aller Bilddaten (einschließlich photographischer Bilder) ohnehin unumgänglich, da eine rein hand- und augengestützte umfassende Auswertung personell kaum machbar erscheint. Andererseits kann die mögliche hohe räumliche Auflösung von photographischen Systemen für Open-Skies sowieso nicht ausgenutzt werden, da diese ja vertraglich beschränkt ist. Eine Bodenauflösung im Einmeterbereich jedoch ist auch für Multispektraldaten erreichbar. Überdies sind Bilddaten bereits ab einer (Pixel-) Auflösung von unter 10 m für den Open-Skies-Vertrag von Nutzen [12].

Das Potential von automatisierter Änderungsdetektion für Open Skies

Interessant sind Multispektralbilder insbesondere im Zusammenhang mit *automatisierter Änderungsdetektion.* Eine Geokodierung der Bildflugdaten, d.h. eine Entzerrung des Bildes und Transformation auf Kartenkoordinaten, erlaubt den Vergleich von denselben Regionen aufgenommen bei verschiedenen Überflügen. Eine Änderung der spektralen Eigenschaften einer bestimmten Region deutet auf eine tatsächliche Landnutzungsänderung hin, nachdem die `natürlichen' Änderungen durch Vegetationszyklen und geänderte Aufnahmebedingungen eliminiert oder korrigiert sind. Die multispektrale Fernerkundung wird daher seit langem zum multitemporalen Monitoring genutzt [13] und ist somit für die Open-Skies-Anwendungen von Interesse.

Hier sind zumindest drei verschiedene Verfahrensrichtungen zur automatisierten Änderungsdetektion zu unterscheiden, und zwar die pixelbasierten, regionenbasierten und wissensbasierten Verfahren. Die *pixelweise* arbeitenden Verfahren erfordern eine Geokodierung oder Registrierung der zu vergleichenden Bilder. Pixelweise verglichen werden können dann entweder die spektralen Strahldichten oder Reflektanzen, oder die durch Klassifikation (classification/labeling) zugeordneten Objektklassen. *Regionenorientierte* Verfahren segmentieren die Aufnahmen zunächst unabhängig voneinander und vergleichen dann geographisch korrespondierende Regionen anhand typischer Merkmale. Im Gegensatz zu diesen datengetriebenen Methoden gehen *wissensbasierte* Methoden [14]. von Erwartungen auf der abstrakten Objektebene aus, die dann in der Abbildungsebene verifiziert oder verworfen werden können. Hierfür muß bereits eine Modellierung der zu bewertenden Szene vorliegen, etwa in einem geographischen Informationssystem (GIS).

Während einerseits der wissensbasierte Ansatz der weittragendste und langfristig vielversprechendste ist, sind für eine heutige, robuste operationelle Anwendung die bereits für Umweltmonitoring erprobten datengetriebenen pixel- und regionenbasierten Verfahren leichter zu verwirklichen.

Das Hauptproblem aller Änderungsdetektionsverfahren bleibt es, zwischen – in einem bestimmten Zusammenhange – relevanten und irrelevanten Änderungen zu unterscheiden bzw. eine Rangfolge der Wichtigkeit aufzustellen. Dabei geht es sowohl um inhaltlich irrelevante Änderungen in der Objektebene (wie z.B. jahreszeitlich oder witterungsbedingte), als auch um irrelevante physikalische Änderungen in der Abbildungsebene (wie z.B. Schattenwurf, Beleuchtungsstärke, Dunst, Aufnahmeperspektive).

Das Potential von Open-Skies-Bilddaten für zivile Anwendungen

Im Text des Open-Skies-Vertrages ist eine mögliche Ausweitung des Vertrages etwa auf den Bereich des Umwelt-Monitorings explizit angesprochen. Die Verbindung von militärisch-vertrauensbildenden Maßnahmen und umweltrelevanten Anwendungen ist keineswegs weit hergeholt. So beschäftigt sich z.B. auch ein Komitee der NATO mit der Problematik der `environmental security' [15]. Einerseits kann der Aspekt der ökologischen Sicherheit an Bedeutung zunehmen und somit eine Erweiterung des Vertrages nahelegen. Andererseits könnte die zusätzliche zivile Nutzbarkeit der Open-Skies-Bildflüge es für kleinere Vertragsstaaten überhaupt erst möglich machen, die finanziellen Belastungen der Bereitstellung und Bereithaltung eines den Open-Skies-Spezifikationen genügenden Flugzeugs zu tragen. In diesem Falle würden dann mehrere innerstaatliche Behörden zum Unterhalt beitragen, wie z.B. Umwelt-, Landwirtschafts- und Katasterämter.

Die regelmäßige Erfliegung von Multispektralbildern im Open-Skies-Kontext könnte einen *Spin Off* für Geowissenschaften und die Erhebung von Umweltdaten haben. Tatsächlich wird die multispektrale Fernerkundung für ein weites Spektrum von Umwelt-Monitoringaufgaben genutzt, wie z.B. Erfassung von landwirtschaftlichem Anbau, Abschätzung von Ernteerträgen, Bewertung von Böden, Wasserqualität und Einleitungen, Waldschäden sowie Stadt- und Landschaftsplanung. All diese Anwendungen sind jedoch durch die hohen Befliegungskosten beschränkt.

Es muß geklärt werden, in welchem Ausmaß die Daten der Open-Skies-Bildflüge für Umwelt- und andere zivile Anwendungen zugänglich gemacht werden können, gewissermaßen als *Dual Use*. Hier ist zu unterscheiden zwischen der zivilen Mitnutzung von unter sicherheitspolitischen Kriterien aufgenommenen Bildern einerseits und der Aufnahme von Bildern für ausschließlich zivile Fragestellungen andererseits. Ein Beispiel für ersteres ist die 1995 erfolgte Freigabe von militärischen Satellitenbilddaten der USA [16]. Etwa 800 000 zwischen 1960 und 1972 von der CIA gesammelte Satellitenphotographien werden für die zivile Nutzung durch die akademische Forschungsgemeinschaft freigegeben.

Eine Schnittmenge ökologischen und militärischen Interesses bildet beispielsweise die Überwachung von Altlasten aus Waffenproduktion und -lagerung sowie auf Übungsgeländen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine Erweiterung des technischen Open-Skies-Instrumentariums um einen Multispektralscanner nicht nur die Verifikationsfähigkeiten verbessern, sondern eine große Anzahl an Folgenutzungen ermöglichen würde. Dies wiederum könnte das Nutzen-zu-Kosten-Verhältnis der Open-Skies-Praxis steigern.

Eigene Arbeiten in der Gruppe CENSIS

Im Rahmen der Arbeitsgruppe CENSIS[1] in der Universität Hamburg werden physikalische Grundlagen der Fernerkundung mit Hinblick auf Methodenentwicklung für die rechnergestützte Auswertung von Multispektralbildern untersucht. Ziel der Arbeit ist es, physikalische Aspekte der Bildentstehung, die bei der Beschreibung und Klassifizierung von Objekten im Verifikationskontext von Bedeutung sind, zu berücksichtigen und Klassifizierungsverfahren weiterzuentwickeln, die die Basis für eine Bildinterpretation abgeben. Dem Projekt liegt die Einschätzung zugrunde, daß die Entwicklung auf dem Gebiet der Abrüstung und des Umweltschutzes zunehmend auf den Einsatz regelmäßiger Beobachtung und Änderungsdetektion *(Monitoring and Change Detection)* zugeht [17,18].

In Abgrenzung zu einseitiger Spionage muß die Datensammlung zu Verifikations- und Monitoringzwecken kooperativ erfolgen, um stabilitäts- und vertrauensbildend zu wirken. Dementsprechend liegt es nahe, auch die Auswertungsverfahren für kooperative Verifikation und Monitoring als vertrauensbildende Maßnahmen in offener Forschung zu entwickeln, damit sie auch in internationaler Kooperation (etwa im Rahmen der UNO oder der OSZE) verwendet werden können [19].

Das Hamburger Projekt beschäftigt sich vorrangig mit signalnahen Fragestellungen bei der Bildentstehung. Untersucht wird die Überführung der dimensionslosen Rohdaten in physikalische Größen wie spektrale Strahldichte und letztlich das beleuchtungsunabhängige spektrale Reflexionsvermögen (Reflektanz). Insbesondere wird durch Vergleich von Bodenmessungen und Luftaufnahmen der Einfluß der atmosphärischen Streuung untersucht [20–22]. Um tatsächliche Reflektanzänderungen von aufnahmegeometriebedingten Änderungen zu unterscheiden, werden Untersuchungen zum bidirektionalen Reflexionsverhalten ausgewählter Oberflächen durchgeführt [23,24], sowie die Bildung eines gegenüber der Oberflächenorientierung invarianten spektralen Deskriptors erarbeitet[25-27]. Verglichen und vorgeschlagen wurden verschiedene Verfahren zur Geokodierung speziell von flugzeuggetragenen Scanneraufnahmen [28,29]. In Zusammenarbeit mit dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) wird die Nutzung von Multispektralbildern in der Landschaftsökologie untersucht [30].

Die Abbildungen 1 bis 5 zeigen einige Beispiele bisheriger Arbeiten zur Bildauswertung:
Abb. 1 und 2: Geokodierung,
Abb. 3 und 4: automatisierte Klassifikation,
Abb. 5: Änderungsdetektion.

Diskussion und Ausblick

Zur Diskussion über Erweiterungen des Open-Skies-Vertrages wurden von P. Dunay[8] und J. Bienlein[10] sowie den Autoren im März 1996 in Wien eine Reihe von Interviews geführt[11], darunter mit Open-Skies-Unterhändlern der Delegationen von Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Niederlande, Rußland, Türkei, Ukraine, Ungarn und den USA.

Die Möglichkeit der Erweiterung des Open-Skies-Vertrages um Sensoren wie Multispektralscanner und Anwendungsfelder wie Umweltmonitoring wurde bereits im Vorfeld des Vertragsabschlusses sowie auf zwei Workshops[12] diskutiert und wird im Prinzip von allen Seiten bejaht. Der Zeitpunkt einer solchen Erweiterung hängt allerdings von verschiedenen verhandlungstechnischen und finanziellen Faktoren ab. Manche Staaten halten eine Einbeziehung von Erweiterungen für nicht hilfreich, solange die Ratifikation des bisherigen Vertrages nicht abgeschlossen ist. Erfahrungsgemäß benötigt jedes neue Sensorsystem umfangreiche Verhandlungen über die notwendigen technischen Begrenzungen, um Datensammlung auszuschließen, die nicht dem Geist des Vertrages entspricht (wie z.B. Echtzeitaufklärung, Echtzeit-Zielerkennung, Zielplanungs-3D-Modellierung,[13] *battle management* oder Industriespionage). Gleiches gilt für die Regelung der Vereinbarkeit oder aber Abgrenzung von militärischen und ökologischen Missionen.

Die finanzielle Belastung durch die Bereitstellung eines Multispektralscanners dürfte zwischen der einer Luftbildkamera (einige hunderttausend DM) und eines Radarsystems (ca. 10 Millionen DM) liegen. Wenngleich die Beschaffungskosten sicherlich von kleinerer Größenordnung sind als die der Bereithaltung von Open-Skies-Flugzeug und Besatzung sowie der nötigen Bodenanlagen (Point of Entry/Certification etc.), sind sie nicht unbeträchtlich.

---

[10] Prof. Dr. Johann K. Bienlein, DESY, 22761 Hamburg, und CENSIS; f31bie@dsyibm.desy.de

[11] unterstützt durch die Volkswagen-Stiftung, Hannover

[12] Open Skies Seminar on Environment and Ecology, Vienna, 3.–4. Dez. 1992 und 11.–12. Juli 1994.

[13] Beispielsweise sind keine Schleifen im Flugweg zulässig, um die Errechnung von radar-interferometrischen Höhenbildern an den zweimal überflogenen Kreuzungspunkten zu verhindern.

Allerdings wird von manchen Unterhändlern die Ausweitung auf ökologische Missionen mit Open-Skies-Flugzeugen gerade für eine Chance zur Umsetzung des Vertrags gehalten. Tatsache ist, daß die im Open-Skies-Vertrag vorgesehenen Instrumente und Prozeduren von vielen Unterzeichnerstaaten als teuer erachtet werden, und manche Zögerlichkeiten in der Umsetzung eher budgetärer als politischer Natur sind. Für kleinere Unterzeichnerstaaten könnte nun gerade eine Mischnutzung durch militärische und zivile Institutionen die Bereithaltung eines Open-Skies-Flugzeugs erst ermöglichen. Ebenso gilt, daß für territorial kleine Staaten die grenzübergreifende Natur der Open-Skies-Flüge gerade auch für ökologische Missionen von Interesse ist. Open Skies kann auch den Rahmen einer gemeinsamen zwischenstaatlichen Nutzung von relativ teuren Fernerkundungssensoren und entsprechender Flugzeuge bilden.

Die Einstellung zur Freigabe von Daten für die zivile Nutzung ist äußerst verschieden. Während einige Unterzeichnerstaaten der Regierung zugängliche Daten prinzipiell auch den Bürgern zugänglich machen, wenn nicht explizit und begründet anders klassifiziert, herrscht in anderen Unterzeichnerstaaten genau die gegenteilige Rechtsphilosophie. Im Hinblick auf ökologische Open-Skies-Missionen ist in diesem Zusammenhange auch auf das EU-Recht auf Zugang zu behördlichen Umweltinformationen[14] für jedermann anzuführen. Im natur- und geowissenschaftlichen Sinne ist sicherlich auf eine größtmögliche Offenheit der Bilddaten zu drängen. Dies entspräche dann auch am meisten dem Geiste des Open-Skies-Vertrages als einer vordringlich der Vertrauensbildung gewidmeten internationalen Übereinkunft.

[14] Die jeweiligen in nationales Recht umgesetzten Umweltinformationsgesetze (Deutsches UIG vom Juli 1994) beruhen auf der EG-Richtlinie über den freien Zugang zu Informationen über die Umwelt von 1990 und gelten europaweit in der Europäischen Union.

Literaturverweise

[1] Vertrag über den Offenen Himmel, in: Bulletin **48**, 1992, p.433–468, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung; sowie: Bundesgesetzblatt Teil II, 1993, p.2047–2201.

[2] Bonnie D. Jenkins, *Fundamentals and United States Interest in the Treaty on Open Skies*, in: J. Altmann, T. Stock, J.-P. Stroot (eds.), Verification after the Cold War, VU University Press, Amsterdam 1994, p.253–257.

[3] Wolfgang Buttler, *Offener Himmel – Ein Beitrag für die Offenheit und Transparenz,* Europäische Sicherheit, **9**, 1994, p.448–452.

[4] Richard Kokoski, *The Treaty on Open Skies,* in: SIPRI Yearbook 1993, Oxford University Press, Oxford 1993, p.632–634.

[5] Zdzislaw Lachowski, *The Treaty on Open Skies,* in: SIPRI Yearbook 1994, Oxford University Press, Oxford 1994, p.601–603.

[6] Jörg Wallner, *Das Open Skies Regime,* in: OSZE-Jahrbuch 1995, Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik an der Universität Hamburg, p.321–330, Nomos Verlag, Baden-Baden 1995.

[7] Peter Jones, *Open Skies: Events in 1992,* in: J.B. Poole, R. Guthrie (eds.), Verification 1993 – Peacekeeping, Arms Control and the Environment, p.145–170, Verification Technology Information Center, Brassey's/Macmillan, London, New York 1993.

[8] D.G. Armstrong, *Technical Challenges Under Open Skies*, in: First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg 1994, vol. I, p.49–60.

[9] J.A. Richards, *Remote Sensing Digital Image Analysis,* Springer, Heidelberg, New York 1993.

[10] C. Drewniok, C. Schröder, H. Lange, L. Dreschler-Fischer, *Automatisierte Bildauswertung als Hilfsmittel zur Verifikation*, in U. Kronfeld, W. Baus, B. Ebbesen, M. Jathe (eds.): Naturwissenschaft und Abrüstung, Lit Verlag, Münster 1993.

[11] C.A. Bouman, M. Shapiro, *A Multiscale Random Field Model for Bayesian Image Segmentation,* IEEE Transactions on Image Processing **3**, (2), p.162–177, 1994.

[12] M. Heric, C. Lucas, C. Devine, *The Open Skies Treaty: Qualitative Utility Evaluations of Aircraft Reconnaissance and Commercial Satellite Imagery,* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **62**, 3, March 1996, p.279–284.

[13] A. Singh, *Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data,* Review Article, International Journal of Remote Sensing, **10**, 6, p.989–1003, 1989.

[14] L. Dreschler-Fischer, C. Drewniok, H. Lange, C. Schröder, *A Knowledge-Based Approach to the Detection and Interpretation of Changes in Aerial Images*, International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Tokyo 1993.

[15] NATO Committee on the Challenges of Modern Society: CCMS Meeting of Nov. 13, 1995 in Washington, NATO Press Release **95**, 116, 24. Nov. 1995, e-published in WWW http://www.nato.int/

[16] Robert A. McDonald, *CORONA: Success for Space Reconnaissance, a Look into the Cold War, and a Revolution for Intelligence,* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **61**, 6, p.689–720, June 1995 .

[17] Hartwig Spitzer, *Aerial observation and overflights,* in: Richard Kokoski and Sergey Koulik (eds.), Verification of Conventional Arms Control in Europe, Technological Constraints and Opportunities, SIPRI, Westview Press, Boulder/Oxford, 1990, p.89–122.

[18] Hartwig Spitzer, *Technical Potential for Monitoring from Air and Space,* in: J. Altmann, H.J. van der Graaf, P. Markl, P. Lewis (eds.), Verification at Vienna – Monitoring Reductions of Conventional Armed Forces, Gordon & Breach, New York, 1992, p.125–139.

[19] Johann Bienlein, *Verifizierung vom Rüstungskontrolle,* Universitas **6**, 1991, S.565–575.

[20] Thomas Hepp, *Erzeugung multispektraler Reflektanzbilder zur automatisierten Bildauswertung,* Diplomarbeit, Universität Hamburg 1994, CENSIS-Report 10-94.

[21] Martin Kollewe, Johann Bienlein, Thomas Kollewe, Hartwig Spitzer, *Comparison of Multispectral Airborne Scanner Reflectance Images with Ground Surface Reflectance Measurements*, Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco 1996.

[22] Thomas Kollewe, *Vergleich multispektraler Scanneraufnahmen mit Reflektanzmessungen am Boden,* Diplomarbeit, Universität Hamburg 1995, CENSIS-Report 17-96.

[23] Gerhard Meister, *Messung der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen unter natürlicher Beleuchtung,* Diplomarbeit, Universität Hamburg 1995, CENSIS-Report 18-96.

[24] G. Meister, R. Wiemker, J. Bienlein, H. Spitzer, *In Situ BRDF Measurements of Selected Surface Materials to Improve Analysis of Remotely Sensed Multispectral Imagery,* XVIII. Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna 1996.

[25] R. Wiemker and T. Hepp, *Surface Orientation Invariant Matching of Spectral Signatures*, ISPRS Commission III Symposium on Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, Munich 1994, SPIE vol. 2357, p.916–923.

[26] R. Wiemker, *Improved Color Constant Classification of Remotely Sensed Multispectral Imagery*, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Florence 1995, vol. II, p.1153–1155.

[27] R. Wiemker, *The Color Constancy Problem: A Fast Illumination Invariant Mapping Approach*, 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Prague 1995, Springer, p.950–955.

[28] R. Wiemker, *Registration of Airborne Scanner Imagery Using Akima Local Quintic Polynomial Interpolation,* Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco 1996.

[29] R. Wiemker, K. Rohr, L. Binder, R. Sprengel, H.S. Stiehl, *Application of Elastic Registration to Imagery from Airborne Scanners*, XVIII. Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna 1996.

[30] Martin Kollewe and Hartwig Spitzer, *A Link Between Multispectral Remote Sensing, Image Processing and Ecological Analysis of Landscape Elements,* International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Florence 1995, vol. I, p.291–293.

Flugrichtung ⟶

Abbildung 1: *Beispiel für eine Scanner-Aufnahme (1995) aus 1800 m Höhe, Nadir-Bodenauflösung ca. 4 m (links). Die Rohdaten wurden auf eine Karte des Maßstabs 1:25 000 registriert und damit geokodiert (rechts, ca. 2100 m Ost-West-Ausdehnung). Im Norden ist der Flughafen Nürnberg zu sehen. Diese und die folgenden Scanner-Aufnahmen wurden mit dem multispektralen DAEDALUS AADS 1268 Line Scanner aufgezeichnet (11 spektrale Kanäle). Die Befliegung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die Charakteristik des Scanners (± 45° Scan-Winkel) bewirkt, daß die Bodenauflösung in den Bildrandzeilen nur halb so gut ist wie in der Nadirzeile (Bildmitte).*

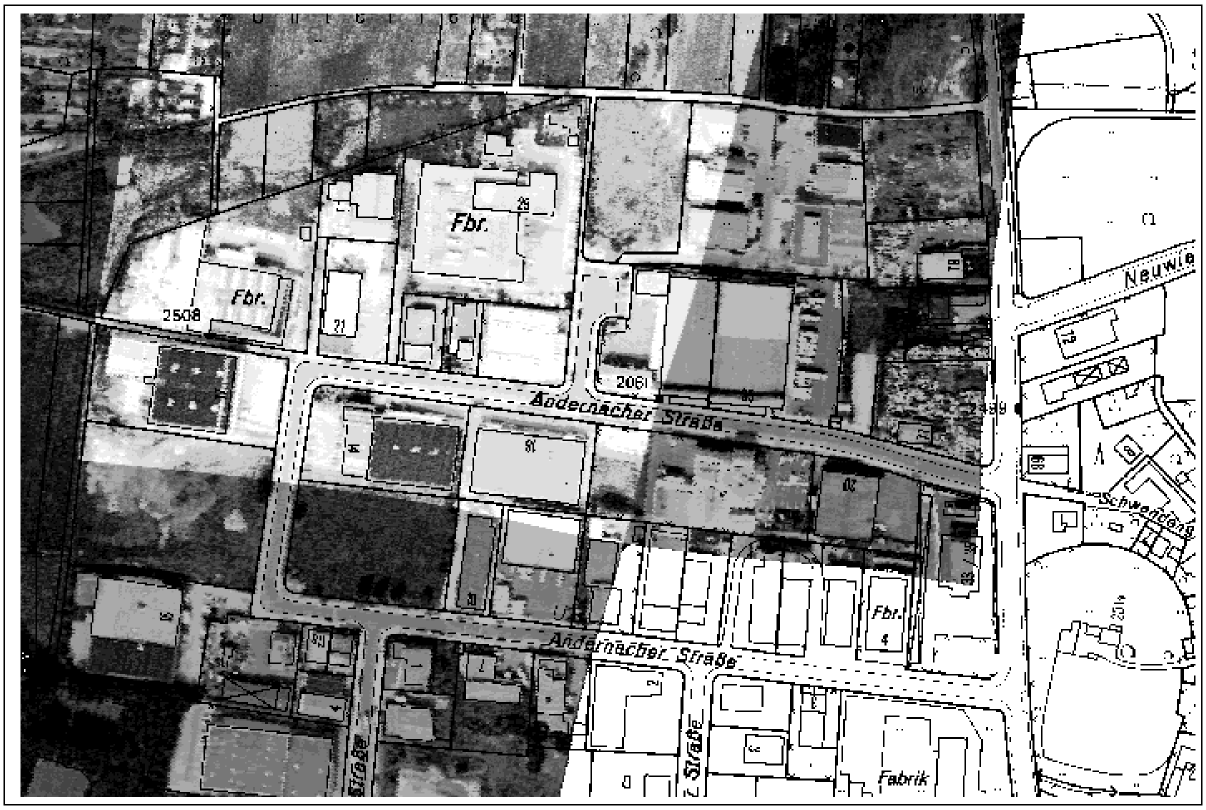

Abbildung 2: *Beispiel für eine Scanner-Aufnahme aus 300 m Höhe, Nadir-Bodenauflösung ca. 0.7 m, registriert auf eine Karte des Maßstabs 1:5000. Das Meßtischblatt sowie eine Aufnahme von 1991 und eine von 1992 wurden durch elastische Registrierung zur Deckung gebracht. Die Aufnahmen entstammen verschiedenen Flugstreifen, und der helle Bildbereich zeigt die Überlappung.*

Abbildung 3: *Beispiel für die in Multispektralbildern mögliche zuverlässige Trennung von Vegetations- (schwarz) und Nichtvegetationsflächen (hell) anhand des Vegetationsindex, der von der hohen Reflektanz der Blätter im nahen Infrarot ($\lambda > 750$ nm) Gebrauch macht. Das Bild ist in einer Höhe von 300 m mit einer Nadir-Bodenauflösung von 0.7 m aufgenommen.*

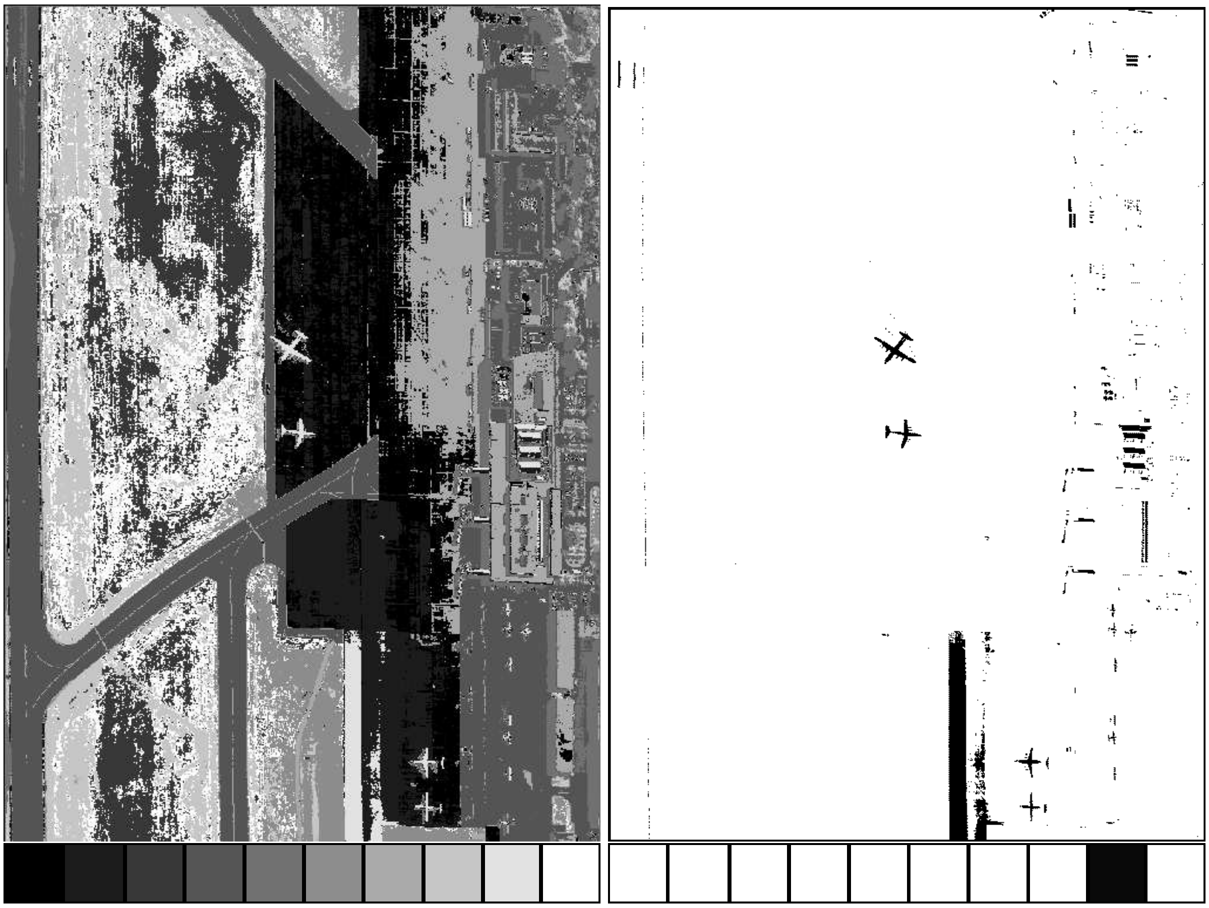

Abbildung 4: *Beispiel einer unüberwachten Klassifikation auf 10 Spektralkanälen in 10 Spektralklassen (unsupervised fuzzy c-means clustering, Szene: Flughafen Nürnberg 1995, Nadir-Bodenauflösung 0.7 m). Eine der – rein statistisch gefundenen – Klassen umfaßt u.a. die Flugzeuge.*
Links sind alle 10 Klassen in verschiedenen Grautönen eingefärbt; rechts ist nur die `Flugzeug'-Klasse hervorgehoben.

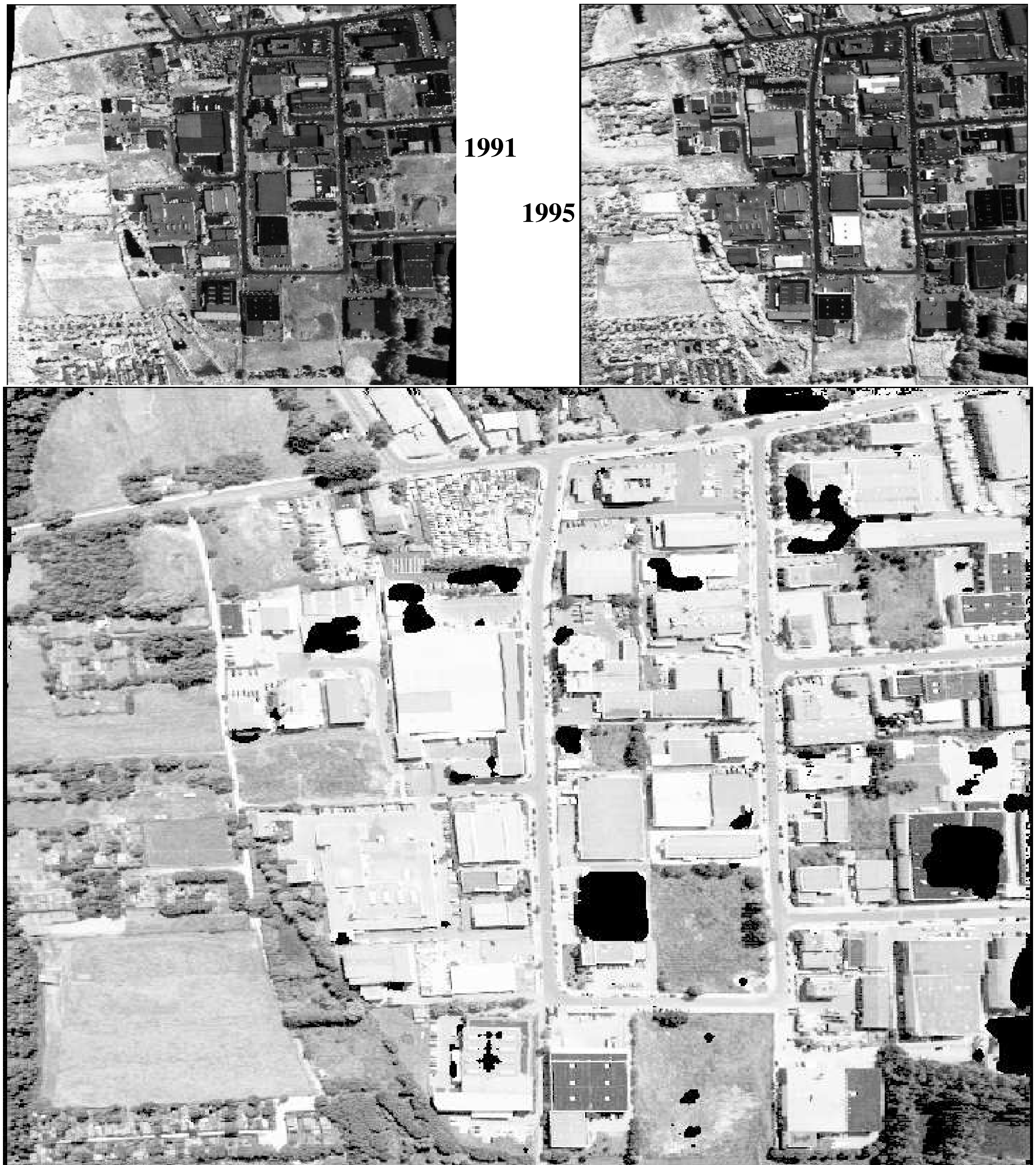

Abbildung 5: *Beispiel für Änderungsdetektion: Eine Aufnahme von 1991 (oben rechts, verkleinert) wurde auf eine Aufnahme der gleichen Szene von 1995 (oben links) registriert, so daß ein pixelweiser Vergleich möglich wird. Schwarz hervorgehoben sind im Bild unten die Bereiche der größten Änderungen zwischen den beiden Aufnahmen. Viele Änderungen entstammen der Bautätigkeit zwischen 1991 und 1995.*