

**METHODOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR VERÄNDERUNG
SAHELISCHER ÜBERSCHWEMMUNGSGEBIETE
MITTELS FERNERKUNDUNG
–FALLBEISPIEL NIGERBINNENDELTA (MALI) –**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
"Doktor der Naturwissenschaften"

am Fachbereich 22, Geographisches Institut
der
Johannes Gutenberg–Universität
Mainz

Sigrid HESS
geboren in Wittlich

Mainz, November 2002

VERSICHERUNG

für das Gesuch um Zulassung zur Promotion
im Fachbereichen 22 (Geowissenschaften)

Hiermit versichere ich, Sigrid HESS, geb. am 13.03.1967 in Wittlich,
gemäß § 11 (3) d der Promotionsordnung vom 30. April 1990,
daß ich die jetzt als Dissertation vorgelegte Arbeit:

- a) selbst angefertigt und alle benutzten Hilfsmittel (Literatur, Apparaturen, Material) in der Arbeit angegeben habe.
- b) nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe oder hatte.
- c) noch Teile davon bei einer anderen Fakultät bzw. einem anderen Fachbereich als Dissertation eingereicht habe.

Mainz, den 04. November 2002

(Sigrid HESS)

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Alfred KRÖNER

Tag der mündlichen Prüfung: 30.01.2003

VORWORT

Der sehr enthusiastische und herausfordernde ursprüngliche Arbeitstitel dieser Doktorarbeit "Integrative GIS-Modellierung von Desertifikationsprozessen im Nigerbinnendelta der Republik Mali" unterlag aufgrund in langjährigen Studien erworbener Erfahrungen einer beträchtlichen Einschränkung und Richtungsänderung. Einzelstudien können generell nicht die Kapazität leisten, hochkomplexe Themen wie z.B. die Desertifikation semi-arider Räume in erfolgreicher Weise zu erforschen; dazu bedarf es optimal aufeinander eingespielter, koordinierter und kooperierender multi-disziplinärer Forschergruppen.

Diese Arbeit erfreut sich nach Überwindung vielfacher Imponderabilitäten und trotz des großen Mangels an Daten dennoch in Form einer methodologischen Studie realisiert worden zu sein.

Kapitel I gibt dazu ausführliche Erläuterungen, verzichtet jedoch auf die klassische Vorstellung des eine repräsentative Funktion erfüllenden Untersuchungsgebiets. Alternativ wird einführend versucht, eine Synopsis zum fernerkundlichen Forschungsstand im westafrikanischen Sahel zu zeichnen.

Im Gegensatz zur Methodik-Studie, in der regelmäßige Routinen ausgeführt werden, untersucht und diskutiert die Methodologie-Studie die Konzeption und Effizienz der Methoden selbst. Gegenstand dieser Studie ist damit die Entwicklung von Methoden zur Analyse- und Erfassung quantitativer Raumdaten zur Landschaftsveränderung im semi-ariden Sahel unter sorgfältiger Berücksichtigung der Vergleichbarkeit und Qualität historischer Fernerkundungsdaten.

Kapitel II beschäftigt sich zwecks Analyse sahelischer Landschaftsveränderungen mit der Eliminierbarkeit des atmosphärischen und radiometrischen Bildrauschens auf historischen MSS-Daten. Kapitel III präsentiert die entwickelte Methode zur semi-automatischen Extraktion von Sahelgehölzen auf historischen Luftbildern. Abschließend werden die vorgestellten Methoden und Ergebnisse in Kapitel IV synthetisch zusammengeführt.

Diese außerhalb einer Arbeitsgruppe oder Projekteinbindung, unter erschwerten Bedingungen erstellte Studie gab mir vor allem während eines dreijährigen Studienaufenthaltes in Paris die besondere Chance, das generell zur Forschung notwendige Handwerkszeug sowie die zur Realisierung dieser Studie benötigten geodatenverarbeitenden und fernerkundlichen Techniken zu erlernen. Dabei sollen die hier zur Methodenentwicklung verwendeten Bildverarbeitungstechniken "fremder" Fachdisziplinen in ihrer geographischen Eignung und Bedeutung vorgestellt werden. Die Studie belegt neben den methodischen Ergebnissen zur digitalen Auswertbarkeit historischer Satelliten- und Luftbilddaten den Bedarf an weiterer Forschung auf fernerkundlichem Gebiet in semi-ariden Erdräumen, speziell den Sahelregionen.

Mainz, im November 2002

INHALTSVERZEICHNIS

Versicherung.....	I
Vorwort.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX

Kapitel I PROBLEMATIK UND UNTERSUCHUNGSGEBIET

1.1	Raumveränderungsproblematik innerhalb des Sahels und fernerkundlicher Forschungsstand.....	1
1.1.1	Meteorologische Präsentation und Klimawandel.....	2
1.1.2	Boden und Vegetation.....	3
1.1.3	Landnutzung.....	5
1.1.4	Landschaftsdegradation.....	5
1.2	Untersuchungsregion Nigerbinnendelta.....	6
1.2.1	Topographie und Hydrometrie	7
1.2.2	Vegetation und Böden.....	8
1.2.3	Landnutzung und Degradation.....	9
1.3	Synopsis zur Situation und Verfügbarkeit von Daten.....	10
1.3.1	Monitoring-, Vorhersage- und Frühwarn-Informationssysteme des Sahels.....	11
1.3.2	Lokale Datensituation im Nigerbinnendelta.....	14
1.4	Motivation und Zielsetzung.....	17

Kapitel II. METHODEN ZUR AUSWERTUNG OPTISCHER SATELLITENDATEN

2.1.	Optische Sensoren	19
2.1.1	Geschichte der optischen Satellitenbeobachtung	19
2.1.2	Analyse spektraler Signaturcharakteristika	21
2.2	Homogenisierung historischer LANDSAT MSS-Daten.....	25
2.2.1	Zielsetzung und Hypothese.....	25
2.2.2	Analyse des Forschungsstands	27
2.2.3	Präsentation des Testgebiets und der Testdatenbasis	30
2.2.4	Methodendesign.....	38
2.2.4.1	Datenimport	40
2.2.4.2	Ausgleich des radiometrischen Detektorfehlers	40
2.2.4.3	Geokodierung	46
2.2.5	Sensorhomogenisierung	47
2.2.5.1	Radiometrische Korrekturmethode	47
2.2.5.2	Radiometrische Korrektur von MSS-Daten	49
2.2.6	Atmosphärische Einflüsse des radiativen Strahlungstransfers	51
2.2.6.1	Korrekturmethode atmosphärischer Einflüsse	54
2.2.6.2	Atmosphärische Simulationsmodellierung der multitemporalen MSS-Datenserie	58

2.2.7	Kalibrierungsproblematik des MSS–Sensors	72
2.2.8	Evaluierung der Homogenisierungsprozessierung von MSS–Daten	76
2.3	Diskussion und Schlußfolgerung	85
2.4	Ausblick	87

Kapitel III. ENTWICKLUNG OPERATIONELLER METHODEN DER SEMI–AUTOMATISCHEN LUFTBILDAUSWERTUNG

3.1	Daten und Methoden	89
3.1.1	Geschichte der Luftbildphotographie in Westafrika.....	89
3.1.2	Methoden der visuellen Bildinterpretation.....	91
3.1.3	Bodenreflexion.....	93
3.2	Automatische Objekterkennung auf Luftbildern	97
3.2.1	Motivation und Zielsetzung	97
3.2.2	Parametererfassung	98
3.2.3	Methodendesign.....	100
3.2.3.1	Kompilation einer multitemporalen Testdatenserie	102
3.2.3.2	Visuelle Interpretation des multitemporalen Luftbildprototyps	105
3.2.3.3	Digitale Vorverarbeitung der Luftbilddaten	107
3.2.4	Kriterienoptimierung zur Gehölzerkennung	111
3.2.4.1	Binarisierungsanalyse	113
3.2.4.2	Gehölzextraktion mittels nicht linearer Rangordnungsoperatoren	117
3.2.4.2.1	Medianfilterung	118
3.2.4.2.2	Morphomathematische Filterungen	121
3.2.4.2.3	Vergleich von Median– und Schließungsfilterung	132
3.2.4.3	Digitale Ermittlung der Gehölzdichte	134
3.2.5	Automatische Extraktion von Kantenstrukturen	143
3.2.5.1	Agrarkantenextraktion mittels Gradientenoperatoren	144
3.2.5.2	Ermittlung von Strukturveränderungen	149
3.3	Diskussion und Schlußfolgerungen.....	152
3.4	Technische Zukunftsperspektiven	155

Kapitel IV. SYNTHESE UND SCHLUBBETRACHTUNG

4.1	Datenkollekte	161
4.2	Datenqualität	162
4.3	Methoden und Ergebnisse	163
4.4	Datenstandards und –transferierbarkeit	164
4.5	Zukünftige Datensysteme und Forschungsausblick	165

<i>Zusammenfassung/ abstract.....</i>	<i>167</i>
<i>Literatur.....</i>	<i>168</i>
<i>Freie Software.....</i>	<i>179</i>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Kapitel I

Fig. 1.1 a)	Evolution der Holzkohleproduktion in Mali von 1961–2001	12
Fig. 1.1 b)	Evolution der Fischproduktion von 1961–1999 in Mali	12
Fig. 1.2	Lokalisierung der Teststudien im Nigerbinnendelta	18

Kapitel II

Fig. 2.1 a)	Spektrale Reflexionssignaturen mit spektraler Position der MSS–Kanäle.....	21
Fig. 2.1 b)	Geometrische Objektoberflächen–Reflexionstypen	22
Fig. 2.2	Variation des Rückstrahlungsverhaltens in Abhängigkeit	23
	des Sonnenzenitwinkels (am Beispiel des Kanals 1, NOAA9–AVHRR)	
Fig. 2.3	Multitemporale Serie der MSS–Falschfarbenkomposite (212/48).....	31
	für den Gebietsextrakt des Lac Faguibine (1100 [w] x 800 [h])	
Fig. 2.4	NASA–Orbitalphotographie des Lac Faguibine.....	32
Fig. 2.5 a)	Mittlere anuelle Niederschläge und Temperatur der Klimastation Tombouctou	33
Fig. 2.5 b)	Ombrothermisches Klimadiagramm von Tombouctou	35
Fig. 2.6	Topographische Einheiten mit Phytoleitarten in der Region des Lac Faguibine	36
Fig. 2.7	Räumliche Anordnung der multitemporalen MSS–Serie	37
Fig. 2.8	Ablaufschema zur Homogenisierung von Landsat–MSS Daten	39
Fig. 2.9	Homogenisierung des radiometrischen MSS–Streifenfehlers in	45
	mono– und bitemporalen MSS–Ratioausschnitten des Lac Faguibine	
Fig. 2.10	Modellschemata A und B zum radiativen Strahlungstransfer	52
Fig. 2.11 a)	Streamer–interne Standardprofile des atmosphärischen Wasserdampfgehalts	59
Fig. 2.11 b)	Extinktionsverhalten der Streamer–Aerosolmodelle	60
Fig. 2.12 a)	Streamer–Simulation des kanal– und objektspezifischen Reflexionsverhaltens	63
	der MSS–Kanäle 4–7 bei zunehmendem atmosphärischem Wasserdampfgehalt	
Fig. 2.12 b)	Streamer–Simulation des kanal– und objektspezifischen Reflexionsverhaltens.....	64
	der MSS–Kanäle 4–7 bei zunehmendem atmosphärischem Aerosolgehalt	
Fig. 2.13	MSS–Beispielszene mit multitemporalen Testgebietsextrakten	67
Fig. 2.14	TOA–Signale für alle vier Kanäle der MSS–Serie auf Wasser–	69
	und Sand–Testflächen	
Fig. 2.15	Relation von streamer–simulierter zu tatsächlich gemessener	71
	atmosphärischer Aerosolintensität auf Wasserflächen	
Fig. 2.16 a)	Schema des opto–mechanischen Landsat–MSS Scannersystems	72
Fig. 2.16 b)	Interner Kalibrationsmechanismus von Landsat MSS	73
Fig. 2.17	Objektabhängige radiometrische Sensorstabilität der	74
	Landsat–Sensortypen MSS 1–3 nach MARKHAM & BARKER (1987)	
Fig. 2.18	Temporale Evolution der Sensor–Variabilität radiometrisch korrigierter.....	75
	und nicht–korrigierter MSS–Szenenpaare von 1974/72 & 1974/82	
Fig. 2.19	NDVI und SAVI der radiometrisch korrigierten, multitemporalen	78
	MSS–Bildextrakte des Lac Faguibine	
Fig. 2.20	NDVI–Jahressequenz des Nigerbinnendeltas auf der Basis von SPOT–4/VGT	79
Fig. 2.21	Jahresdiagramme der Pluviometrie und Evaporation für die	80
	Klimastationen Djenné, Mopti und Tombouctou	
Fig. 2.22	Saisonale Veränderung des NDVI im Gebiet des Lac Tchad	81
Fig. 2.23	Flächenevolution der SAVI–Klassen I, II & III in Abhängigkeit der Korrektur.....	83
	zunehmender aerosoloptischer Zustände für die MSS–Serie des Lac Faguibine	
Fig. 2.24	Aerosoloptische Modellierung des SAVI für eine MSS–Bildausschnittserie	84
	im östlichen Gebiet des Lac Faguibine	

Kapitel III

Fig. 3.1	Kleinmaßstäbige Luftbildüberdeckung des kolonialen Afrikas90 zu Ende 1960 (a) und zwischen 1961 und 1985 (b)	90
Fig. 3.2 a)	Spektrale Sensibilitätskurve panchromatischer, rot- und94 infrarotempfindlicher Negativfilme und durchschnittliche spektrale Reflexionskurven verschiedener Materialtypen	94
Fig. 3.2 b)	Ausschnitt eines zeitgleich aufgenommenen panchromatischen95 und Infrarot-Luftbildausschnitts aus dem Jahre 1971	95
Fig. 3.3	Ablaufschema zur automatisierten Extraktion von Luftbildobjekten101	101
Fig. 3.4	Räumliche Überdeckung der multitemporalen Luftbildsequenz103	103
Fig. 3.5	Einordnung des Luftbildprototyps in die geomorphologische105 Situation des östlichen Nigerbinnendeltas nach GALLAIS (1967)	105
Fig. 3.6	Varianzanalyse verschiedener Scanauflösungen im Luftbild108	108
Fig. 3.7 a)	Multitemporale Sequenz des co-registrierten Grauton-Luftbildprototyps.....109	109
Fig. 3.7 b)	Sequenz des nach dem maximalen Segmentierungsverfahren110 binarisierten multitemporalen Luftbildprototyps	110
Fig. 3.8	Grauton-Luftbildsequenz vergrößerter, multitemporaler.....112 Gehölzextrakte (Typ A-E) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952	112
Fig. 3.9 a)	Multitemporale Serie der Grauerthistogramme mit mehrgipfliger115 Verteilung der Pixelhäufigkeiten	115
Fig. 3.9 b)	Multitemporale Serie der Maximumsegmentierungs-Binarisierung116 mit unimodaler Verteilung der Labelclusterhäufigkeiten	116
Fig. 3.10 a)	Parameterabhängigkeit der Median-Filterung am Beispiel eines119 Gehölzausschnitts im Luftbild vom 01.02.1952	119
Fig. 3.10 b)	Medianfilterung verschiedener Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel des.....120 binarisierten Luftbildprototyps von 1952	120
Fig. 3.11 a)	Dilatation122	122
Fig. 3.11 b)	Erosion122	122
Fig. 3.11 c)	Öffnung123	123
Fig. 3.11 d)	Schließung123	123
Fig. 3.11 e)	Variationen morphomathematischer Strukturelemente124	124
Fig. 3.12 a)	Morphomathematische Filterungsarten des Gehölzausschnitts von 1952125 im Vergleich der Strukturelemente Block und Kreuz	125
Fig. 3.12 b)	Beeinflussbarkeit der morphomathematischen Filterwirkung durch Form126 und Größe des Strukturelements am Beispiel der Schließung	126
Fig. 3.12 c)	Morphomathematische Erosions- und Dilatationsfilterung verschiedener.....128 Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952	128
Fig. 3.12 d)	Morphomathematische Schließungs- und Öffnungsfilterung verschiedener129 Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952	129
Fig. 3.12 e)	Schließungsfilterung verschiedener Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel.....131 des binarisierten Luftbildprototyps von 1952	131
Fig. 3.13	Bi-temporaler Vergleich zwischen Median mit der Schließungsfilterung133 von Gehölzmustern (A,B,C) der Jahre 1952 und 1971	133
Fig. 3.14 a)	Beziehungen der 4- und 8-Pixelnachbarschaft in einer Rechteck-Matrix135	135
Fig. 3.14 b)	Vergleich des ungefilterten und des schließungsgefilterten136 Ergebnisses der Gehölzdichtevertelung am Beispiel des Luftbildes von 1981	136
Fig. 3.14 c)	Etikettierung des Ergebnisses der Schließungsfilterung und139 Dichteraster der ausgezählten Gehölzlabelcluster je Luftbildsequenz	139
Fig. 3.14 d)	Multitemporale Stati der Gehölzobjektdichte nach Schließungsfilterung.....140 in Isoflächendarstellung und Superposition auf jeweils zeitgleichem Luftbildhintergrund	140
Fig. 3.15	Dynamik der Gehölzobjektbedeckung in Rasterdarstellung und.....142 Superposition der Dichteraster auf Luftbildhintergrund	142

Fig. 3.16 a)	Effekt der Kontrastvorverarbeitung auf die Gradientenfilterung	145
	am Beispiel des Luftbildprototyps von 1981	
Fig. 3.16 b)	Kantenextraktion mittels des First (GEF) und Second	146
	(SDEF) Derivative Operator for Symmetric Exponential Filter nach CASTAN (1993–97) für drei verschiedene Agrarparzellenausschnitte des Luftbilds von 1952	
Fig. 3.16 c)	Kantenextraktion mittels des Optimal Difference Recursive Filter (DRF)	148
	nach CASTAN (1993–97) für zwei verschiedene Testausschnitte des Luftbilds von 1952	
Fig. 3.17 a)	Multitemporaler Vergleich des GEF (First Derivative Operator for	150
	Symmetric Exponential Filter) Ersten Ableitungsoperators am Beispiel von drei ausgewählten Agrarparzellengefügen (A–C)	
Fig. 3.17 b)	Multitemporaler Vergleich des DRF–(Optimal Difference Recursive Filter)	151
	Gradientenoperators am Beispiel von drei ausgewählten Agrarparzellengefügen (A–C)	
Fig. 3.18 a)	"GLOBAL HAWK", Seiten– (links) und Frontansicht (rechts).....	160
	Airsalon 2001, Paris–Bourget	
Fig. 3.18 b)	"EAGLE 1" Seiten– (links) und Frontansicht (rechts).....	160
	Airsalon Juni 2001, Paris–Bourget	
Fig. 3.18 c)	"RQ–1A/B PREDATOR" Seitenansicht, Airsalon Juni 2001	160
	Paris–Bourget	
Fig. 3.18 d)	"PROTEUSHigh Altitude Aircraft" (ERAST Program)	160
	im Flugeinsatz, NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection, http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html , Nr. EC99–45110–8, 26.07.1999, Photo: Patrick Wright	

TABELLENVERZEICHNIS

Kapitel II

Tab. 2.1	Langzeitserie annueller Klimawerte für die Station Tombouctou	34
Tab. 2.2	Hydrometrische Daten der linksnigrischen Faguibine–Seengruppe	35
Tab. 2.3	Aufnahmedaten zur MSS–Serie des Lac Faguibine	38
Tab. 2.4 b)	Statistische Parameter und Korrekturkoeffizienten der	44
	sechs MSS–Detektor–Teilbilder pro MSS–Gesamtkanalszene	
Tab. 2.5 a)	Simulierte MSS–Albedowerte bei zunehmendem	66
	atmosphärischem Wasserdampfgehalt	
Tab. 2.5 b)	Simulierte MSS–Albedowerte bei zunehmendem	66
	atmosphärischem Aerosolgehalt	
Tab. 2.6	Mittlere Albedowerte für die Testflächen innerhalb der	69
	multispektralen und multitemporalen MSS–Bildserie	
	des Lac Faguibine	
Tab. 2.7	Veränderung der SAVI–Flächenklassen in der MSS–Serie	83
	in Abhängigkeit der radiometrischen und atmosphärischen	
	Korrektur verschiedener Aerosolzustände	

Kapitel III

Tab. 3.1	Technische Parameter der panchromatischen	102
	Luftbild–Sequenz	
Tab. 3.2	Labelclusterzahlen der ungefilterten und.....	137
	schließungsgefilterten Bildausschnitte	
Tab. 3.3	Technische Daten verschiedener unbemannter	159
	NASA–Echtzeitaufklärungsdrohnen	

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADDS	=	Africa Data Dissemination Service (USGS/ USAID)
AGHRYMET	=	Centre Régional de Formation et d'Application en AGRoMÉTéorologie et HYdRologie Opérationnelle, Niamey
AOF	=	Afrique Occidental Français
ARTEMIS	=	Africa Real Time Environmental Monitoring Information System (FAO)
AVHRR	=	Advanced Very High Resolution Radiometer
BIL	=	Band Interleaved by Line
BIP	=	Band Interleaved by Pixel
BDPA	=	Bureau pour le Développement de la Production Agricole, Paris
BGR	=	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
BRDF	=	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BSQ	=	Band SeQuential
BUFR	=	Binary Universal Form of Representation of meteorological data
CEOS	=	Committee on Earth Observation Satellites
CILSS	=	Comité permanent de Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel, Niamey
CIPEA	=	Centre International Pour l'Élevage en Afrique
CNES	=	Centre Nationales d'Études Spatiales, Toulouse
CNRS	=	Centre National de Recherche Scientifique
CTA	=	Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale
DGHE	=	Direction Générale de l'hydraulique et de l'Energie, Bamako
DLR	=	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNCM	=	Direction National de Cartographie de la République Du Mali, Bamako
DNM	=	Direction National de la Météorologie, Bamako
EADS	=	European Aeronautic Defence and Space Company
EOSAT	=	Earth Observation SATellite Company (jetzt: Space Imaging)
ERAST	=	Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (Nasa)
ESA	=	European Space Agency
FAC	=	Fond d'Aide et de Cooperation de la République Française
FEWS	=	Famine Early Warning System (USAID)
GAC	=	Global Area Coverage
GIEWS	=	Global Information and Early Warning System (FAO)
GOES	=	Geostationary Operational Environmental Satellites
GRIB	=	GRIdded Binary
HRPT	=	High Resolution Picture Transmission
IEMVT	=	Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux, Maisons-Alfort
IFOV	=	Instantaneous Field Of View
IGAD	=	Intergovernmental Authority on Development
IGN	=	Institut de Géographie National, St-Mandé
INSAH	=	INstitut du SAHel
IRS	=	Indian Remote sensing Satellite
IRSO	=	Indian Space Research Organization
IUCN	=	International Union for the Conservation of Nature
LAC	=	Local Area Coverage
LAI	=	Leaf Area Index
MOS	=	Marine Observation Satellite
MDRE	=	Ministère du Développement Rural et de l'Environnement

MRNE	=	Ministère des Ressources Naturelles et d'Élevage, Bamako
MZA	=	Ministère des Zones Arides
MSG	=	Meteosat Second Generation
NASA	=	National Aeronautics and Space Administration
NASDA	=	National Space Development Agency, Japan
NDF	=	National and Archive Processing System Data Format
NDVI	=	Normalized Difference Vegetation Index
NEMO	=	Naval EarthMap Observer Satellite Program der NRL/DARPA/STDC
NIR	=	Near InfraRed
NLAPS	=	National and Archive Processing System
NOAA	=	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSDA	=	National Space Development Agency of Japan
ODEM	=	Operation de Developpement de l'Eleavage dans le Région du Mopti
ORSTOM	=	(Office pour la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (jetzt: Institut de Recherche pour le Développement, IRD))
OSC	=	Orbital Sciences Corporation
PRODIG	=	Pôle de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique, Paris
RANET	=	Radio And InterNET
SADC	=	Southern African Development Community
SGAOF	=	Service Géographique de l'Afrique Oriental
SPOT	=	Système Pour l'Observation de la Terre
TOA	=	Top Of the Atmosphere
TRMM	=	Tropical Rainfall Measuring Mission
UAV	=	Unmanned Air Vehicles
UNEP	=	United Nations Environment Programme
USAID	=	U.S. Agency for International Development
USGS	=	US Geological Survey
WMO	=	World Meteorological Organisation

Kapitel I PROBLEMATIK UND UNTERSUCHUNGSGEBIET

Durch das Ende der französischen Kolonialherrschaft ab dem Jahre 1960 sowie die nachfolgende politische Umstrukturierung stellte sich in vielen westafrikanischen Staaten eine schlecht organisierte und wenig restriktive Administration ein. Die regenreichen 60er–Jahre hatten im gesamten Sahel einen Nordwärtstrend der Bevölkerungsmigration bewirkt bis zu der in den 70er Jahren durch Aridität ausgelösten südwärtigen Rückbewegung (NICHOLSON, 1998). Die daraus erwachsenen katastrophalen Raumprobleme konnten durch die noch jungen Administrationen vieler westafrikanischer Staaten nicht bewältigt werden. Damit sind die lebensbedrohenden Probleme im Sahel in den internationalen Mittelpunkt fernerkundlicher Aufklärung getreten und führten zur Entwicklung eines Desertifikationskonzepts, das jedoch vor dem Hintergrund der wieder regenreicheren 80–er Jahre in Frage gestellt werden mußte.

Ein Überblick zum fernerkundlichen Forschungsstand der letzten 30 Jahre im westafrikanischen Sahelraum sowie die in der Folge beschriebene mangelhafte Verfügbarkeit an Raumdaten in den einzelnen Sahelländern erklären einleitend die Motivation zur thematischen Abgrenzung und Umsetzung dieser methodologischen Studie.

1.1 Raumveränderungsproblematik innerhalb des Sahels und fernerkundlicher Forschungsstand

Die Lebensaktivität in semi–ariden und ariden Räumen wird in entscheidendem Maße von der Wasserverfügbarkeit gesteuert. Die Aufnahme täglicher globaler Meßwerte in dynamischen Trockenräumen kann systematisch und regelmäßig einzig und allein auf fernerkundliche Weise geschehen; dies insbesondere dann, wenn das zu beobachtende Gelände unzugänglich und/oder keine oder nur wenige funktionsfähige Bodenmeßstationen vorhanden sind. Die Entwicklung der Fernerkundung und der meteorologischen Satellitensysteme hat den Weg für bedeutsame Studien zur klimatischen Situation sahelischer Räume eröffnet. Während die globale Fernerkundungsforschung im Sahel bereits weit progressiert ist, bleibt die regionale und vor allem lokale Forschung und Datenerhebung noch weit zurück.

Fernerkundliche Sahel–Studien wurden in den 70–er Jahren durch die amerikanischen LANDSAT–Satelliten geprägt. Ab den 80–er Jahren kamen NOAA (USA) und SPOT (Frankreich), ab den 90–er Jahren MOS (Japan) und IRS (Indien) hinzu. Die aktuelle Sahel–Satellitenforschung ab 2000 wird von ASTER, den räumlich hochauflösenden Systemen IKONOS (SpaceImaging), QUICKBIRD (EarthWatch), ALOS (NSDA), SPOT–5 (CNES) und IRS–P5 (IRSO) sowie den hyperspektralen Systemen ORBView (OSC), ENVISAT (ESA), NEMO und EO–1 (NASA) geführt werden.

Aus einer Auswahl unzähliger Veröffentlichungen und zahlreicher im Internet verfügbarer Informationen wurde der Versuch unternommen, eine Synopsis zur fernerkundlichen Forschungsbewegung und zum aktuellen Forschungsstand im westafrikanischen Sahel zu geben. PRINCE et al. (1990) und LAMBIN et al. (1993) beschreiben den Stand der fernerkundlichen Sahelforschung bis Anfang der 90er Jahre. GRUNERT & KAPPAS (1999) geben einen umfassenden forschungsgeschichtlichen Überblick zur Sahelproblematik. Die Effizienz bisheriger Fernerkundungsaufklärung zu Desertifikation und Degradation im Sahel wird von ihnen kritisch hinterfragt. Darüberhinaus werden von ihnen fernerkundliche und begleitende geländetechnische Methoden zur Untersuchungen der lokalräumlichen Interaktion von Hydrologie, Boden und Vegetation in Sahelräumen gefordert.

1.1.1 Meteorologische Präsentation und Klimawandel

Die atmosphärische Situation West–Afrikas, wie z.B. witterungsklimatische Verhältnisse oder langfristige mittlere Wetterabläufe in Mali, ist durch niederschlagsauslösende Luftdruckströmungsverhältnisse geprägt. Die Oszillation der dem Sonnenzenit folgenden Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) bedingt den Wechsel zwischen winterlichem Hoch (St. Helen, Azoren und Lybien) und sommerlichem Hitzetief über der Sahara. Zur Zeit der von Oktober bis Mai dauernden Harmattan–Saison transportieren trockene Passat–Winde aus nordöstlicher Richtung Saharastaub heran. Mit der nördlichen Wanderung der ITCZ und dem von Juni bis September andauernden Monsun entwickeln sich zu Ende der Harmattan–Saison instabile atmosphärische Bedingungen. Einzelne Gewitterzyklonen werden vom Südwest–Monsun in schmalen Bahnen unterschiedlich weit nach Norden verfrachtet. Die nachfolgend ausgelösten typischen Gewitterstürme (frz.: ligne de grains, engl.: line squalls) bewirken räumlich und zeitlich stark begrenzte Einzelniederschläge hoher Intensität und können darüber hinaus enorme Staubaufwirbelung mit einer Visibilität bis auf 0 m verursachen. Bei derartigen Ereignissen werden atmosphärische Lithometeore (Aerosole) von Hydrometeoren (Wasserdampf) umhüllt, wodurch die Transmission der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre verhindert wird.

Zum Verständnis der saisonalen Niederschlagsvariabilität während der Monsunzeit wurden mehrere Modelle zur Dynamik des westafrikanischen Monsunsystems etabliert. Die annuell unterschiedliche Ausprägung des Monsunsystems korreliert nach FERRANTI et al. (1999) mit den Einflüssen der Bodenfeuchte und sensiblen Wärme–Inputs in der Bodengrenzschicht. Die Ursachen der hohen annuellen Niederschlagsfluktuation bleiben dennoch nach wie vor ungeklärt (SULTAN & JANICOT, 2000).

Das Ariditäts–Langzeitphänomen im Sahel ist durch ausbleibende Regenfälle, abnehmende Regenfallmengen und verringerte Regenzeitdauer charakterisiert. FOLLAND et al. (1986) bringen die Aridisierungstendenz mit dem Wechsel bzw. den Anomalien der Ozeanoberflächentemperaturen statt mit den Albedoveränderungen in Verbindung. Ein solcher, jedoch umstrittener Erklärungsansatz macht kühlere Meeresoberflächentemperaturen für die Unterdrückung des Sommer–Monsuns und folglich geringer Regenfälle über der Sahelregion verantwortlich (ZENG, 1999). Das mittels Regenfall–Korrelationsmuster der 60–er bis 80–er Jahre über Afrika untersuchte El Niño–Phänomen scheint nach DIAZ & MARKGRAF (2000) einen fortschreitend abnehmenden Einfluß auf das westafrikanische Monsun–System zu haben. Eine direkte Korrelation dieses Phänomens mit der sahelischen Aridität konnte bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Weitere Hypothesen nennen zur Erklärung des sahelischen Ariditätsphänomens der 70er–/Anfang 80–er–Jahre Sonnenflecken– oder Solaremissionsveränderungen. Andere verweisen auf direkte oder indirekte anthropogene Ursachen wie CO₂–Treibhauseffekt infolge der durch Bevölkerungsdruck bewirkten Veränderungen des Ressourceninventars und der Flächennutzung. Nach HULME (2001) ist die kürzlich im Sahel beobachtete Austrocknung größer als fast alle über globale Klimamodellen errechneten Vorhersagen für die durch globale Erwärmung induzierten Regenfalländerungen. Wenn auch nicht von einem Ariditätsphänomen gesprochen werden kann, bleibt bis dato ungeklärt, ob es sich um episodische Kurzzeitanomalien (Pseudo–Periodizität) oder um eine systematische anthropogen verursachte Langzeitveränderung handelt.

Trotz der nahezu homogenen Klimazonierung, d.h. der unbehinderten Zirkulation wetterbestimmender Luftmassen infolge des Fehlens großer Gebirgszüge in Westafrika, reicht zur Untersuchung der stark raum–zeitlich variablen Regenfallmuster im Sahelraum das traditionelle, wenig stationsdichte meteorologische Beobachtungsnetz nicht aus (CSE, 1996). Eine im Internet vorzufindende kartographische Animation des Sahel (<http://maps.unomaha.edu/Peterson/methods/Research/Zale/sahelview.html>, Abfragestand: 08/2002) veranschaulicht im Filmzeitraffer von 5–Jahresschritten die lokalräumlich

variierenden Regenfallmuster während der Jahre 1925 bis 1975. In Mali existieren auf einer Fläche von 1.24 Mio. km² nur ca. 60 Klimabodenstationen (in Deutschland auf 356,91 km² ca. 100 Stationen). Die regionalräumliche Dateninterpolation erfordert jedoch ein Dichtenetz von einer Station pro 1000 km² (LAMBIN et al., 1993).

Zur Bewertung der agroklimatischen Situation wurden bisher Daten der meteorologischen Satelliten NOAA, GOES, METEOSAT eingesetzt. Zukünftig werden die Daten des Nachfolgemodells MSG (seit 27.08.2002 in Umlauf gebracht) herangezogen. METEOSAT-Daten und konventionelle meteorologische Daten wurden zur Analyse der Niederschläge, der Evapotranspiration, der Keimungsdynamik, der Biomasse-Entwicklung sowie der Bodenwasserinfiltration bereits im Sahel Malis und Mauretaniens verwendet (ROSEMA, 1986).

1.1.2 Boden und Vegetation

Die Untersuchung des Bodensubstrats ist im Sahel vor allem hinsichtlich der agrarwirtschaftlichen Eignung, der Tiefgründigkeit, der Bodenfeuchte, des Mineralgehalts und der Erodierbarkeit und Erosivität von Interesse. Bislang existieren nur wenige Studien zur fernerkundlichen Erfassung, in noch geringerem Maße auf Feldaufnahmen basierende Analysen des Bodensubstrats. Hier sind die Studien zur sahelischen Bodenbildung von GRUNERT (1988), sowie die zur Messung und Untersuchung der Niederschlagsbeeinflussung der Bodenfeuchte in der Republik Niger von GRUNERT & ERDMANN (1989 & 1992) zu nennen.

Die Erfassung von Bodenparametern allein auf fernerkundlicher Datenbasis hat bisher keine Erfolge erzielt. Hingegen präsentiert KAPPAS (1998) exemplarisch im Oudalan-Gebiet in Burkina Faso die regional-fernerkundliche Erfassbarkeit von Bodenart und Bodenwasserhaushalt durch geländegestützte Aufnahmedaten von Tensiometern, Bodenbohrungen und von Vegetationsaufnahmen nach BRAUN-BLANQUET (1964). Zur Veränderung des Wassergehalts und des -speichervermögens der Böden werden Ergebnisse einer dreijährigen Zeitreihe von 1994-1996 präsentiert.

Die Ermittlung der Bodenfeuchte mittels Radar-Satellitendaten erweist sich als äußerst problematisch. Ein aktueller Ansatz aus den USA setzt eine Methode zur Erfassung der Bodenfeuchte ein, bei welcher die dielektrischen und texturellen Bodeneigenschaften aus flugzeuggetragenen Mikrowellen-Radiometerdaten analysiert werden. Die jeweils störenden Vegetationssignale werden durch Berechnung des Vegetationswassergehalts und des NDVI, die unerwünschten Bodenrauigkeitssignale durch die Korrektur des mittleren Höhenabweichungsfehlers eliminiert (USDA-ARS-Hydrology and Remote Sensing Laboratory, Beltsville (USA) <http://hydrolab.arsusda.gov/RsatBARC/soilmoisture.html>, Abfragestand: 08/2002).

Die NASDA setzt erstmalig Daten des TRMM-Niederschlagsradars erfolgreich zur Erfassung der globalen Bodenfeuchte ein. Durch die Fähigkeit des TRMM-Sensors, Radarsignale fast vertikal vom Boden empfangen zu können, ist es möglich, Bodenfeuchte-Informationen direkt ohne parasitäre, z.B. durch die Vegetation am Boden verursachte Streusignale aufzunehmen (http://spaceboy.nasda.go.jp/note/eisei/e/eis0010_trmme.html, Abfragestand: 08/2002).

Die präsentierten, neuartigen Methoden zur Bodenfeuchte-Erfassung wurden bisher im Sahel nicht angewendet.

Die Dynamik von Vegetation und Boden kristallisiert sich in zunehmendem Maße als ebenso gewichtiger Teil der Klimaveränderung sowie der atmosphärischen Bedingungen heraus (PIELKE, 1998). Weiträumig und zeitlich frequente Bodenfeuchtedaten versprechen eine Abschätzung des Wasserabflusses. Im Rahmen globaler Zirkulationsmodelle ermöglichen sie die Abschätzung der Umwandlung des einfallenden Strahlungsenergieanteils in latente und

sensible Wärme Flüsse (JACKSON et al., <http://www.nal.usda.gov/ttic/cgi-bin/tektranabs/printV3.pl/ttic/tektran/data/000006/49/0000064905.html>, Seitenstand: 17.10.1995).

Die sahelische Gras- und Gehölzbedeckung steht in direkter Relation zum Bodenuntergrund. Ihre Erhaltung wirkt auf unterschiedliche Art und Weise gegen den Niederschlagsangriff:

1. Der Wasserabfluß wird verlangsamt und zurückgehalten, Infiltration wird ermöglicht.
2. Mit den ersten Regenfällen werden Termiten aktiv. Diese beginnen die unter Nahrungsaufnahme von Grasbiomasse, ein Bodeninfiltration förderndes Labyrinth aus Mikroröhren aufzubauen
3. Ein selbstverstärkender Effekt äußert sich in der Verdichtung der Gras- und Gehölzdecke durch vermehrt zurückgehaltenes und infiltrierendes Wasser. Den Termiten scheint somit in der Boden-Vegetation-Interaktion eine wichtige Schlüsselrolle zuzukommen.

Die Theorie nach CHARNEY (1975), die Degradation der Vegetationsbedeckung habe während der 70er-/Anfang 80er-Jahre im Sahel zu einem Albedoanstieg geführt, welcher wiederum die Abnahme der Niederschläge und eine Kaskade an Rückkopplungseffekten zur Folge gehabt habe, konnte nicht einstimmig belegt werden.

Zahlreiche Studien zur fernerkundlichen Untersuchung der Sahelvegetationsdynamik fußen überwiegend auf NDVI-Auswertungen. KIRCHHOF et al. (1984) belegen in einer Vegetationsstudie die grobe Trennbarkeit zwischen dichter und lichter Vegetationsbedeckung mit auf Grundlage von Landsat MSS-Daten berechneten NDVI-Werten. FRANKLIN (1991) nahm in Mali exemplarisch einen ersten Versuch zur regional-räumlichen Inventarisierung von Gehölzflächen vor. Auf der Basis von Geländedaten führte er in Kombination mit einer visuellen Interpretation eine überwachte Klassifikation von Landsat TM-Daten durch. Zur Erzielung eindeutigerer Resultate verweist der Autor auf die Verwendung geometrisch-spektraler Mischklassifikationsalgorithmen.

ESTEVE et al. (1998) legen dar, daß der NDVI nicht bedenkenlos mit der Vegetationsbedeckung korreliert werden kann. Ein Versuch der Inventarisierung der Weidressourcen in Mali von HIERNAUX & JUSTICE (1986) scheiterte an der nicht eindeutigen Korrelation zwischen Boden- und Flugzeugradiometer gestützten NOAA-(GAC & LAC)-NDVI-Daten und im Gelände erhobener Grasbiomassedaten. Die zeitlich hoch, jedoch räumlich gering auflösenden AVHRR-Daten der meteorologischen NOAA-Satellitenserie haben ihre Eignung speziell zur Kartierung sich großräumig sehr schnell verändernder Phänomene, wie der Beobachtung der Vegetationsveränderung des gesamten afrikanischen Kontinents, bewiesen. TUCKER et al. (1991) konnten mit NOAA-NDVI-Daten nachweisen, daß sich der südliche Sahararand in Jahren geringerer Niederschläge nach Süden, in Jahren höherer Niederschläge wieder nordwärts bewegt hat. Ein Langzeittrend einer Südwärtsverlagerung der südlichen Sahelzone ließ sich mittels der NOAA-NDVI-Daten allerdings nicht nachweisen. Mit den seit Anfang der 80er Jahre verfügbaren NOAA-Daten war eine Erfassung der sich über die 70er-Jahre abzeichnenden und in den 80er Jahren nicht mehr akuten Ariditätsphänomene nicht mehr möglich. Andere Vegetations-Studien stellen den NDVI als einen gegenüber saisonalen Regenfallvariationen sensitiven Indikator heraus. Berechnet auf der Basis von NOAA-GAC-Daten zeigt der NDVI jedoch hinsichtlich einer konsistenten Korrelation zu Biomasse oder Bodenfeuchte keine ausreichende Sensibilität (TOWNSHEND & JUSTICE, 1986), zum Niederschlag hingegen offenbar eine sehr gute (MALO & NICHOLSON, 1989). Neuere Erkenntnisse differenzieren diese Aussage jedoch. Das Verhältnis zwischen NOAA GAC-NDVI-Daten und Niederschlag kann demnach nur in Regionen mit 250 bis 500 mm Jahresniederschlag als robust bezeichnet werden. In Sahelgebieten unter 250 mm Jahresniederschlag präsentiert es sich als nicht prognostizierbar und unsicher (MILICH & WEISS, 2000).

1.1.3 Landnutzung

Für die Sahel–Agrarwirtschaft ist die Entwicklung von Erntevorhersage–Modellen mittels Fernerkundung essentiell, wobei diese lediglich die benötigten biophysikalischen Variablen erfassen können. Die Regenfallvorhersage steht im Kontext der Abschätzung des Potentials der Pflanzenproduktion und darauf aufbauender anthropozoogener Tragfähigkeits–berechnungen. Mittels thermaler Wolkenanalysen auf METEOSAT–Daten können Aussagen zur Niederschlagsvariabilität abgeleitet werden (SNIJDERS, 1991). Nach der "Kalte Wolken Frequenz–Methode" sind auf METEOSAT–Datenbasis über 80 % der Niederschlags–abweichungen in der Sahel–Region zwischen 9° N und 18° N reproduzierbar (NICHOLSON et al., 1996), wobei diese Methode bereits ihre Grenzen erschöpft hat (BERGES, 1993). Andere Methoden beobachten zur Regenfallabschätzung Wolken auf Basis der im visiblen bis thermal–infraroten Spektralbereich gemessenen Satellitenstrahlung über Parameter wie Wolkenlinienwachstum, Wolkentemperatur und –dauer, Temperaturgradient an Wolkenrändern, Wolkentyps etc. verwendet. Die fernerkundliche Erfassung der Evaporation mittels METEOSAT bietet einen geeigneten Indikator zur Beobachtung des im Sahel durch begrenzte Wasserverfügbarkeit eingeschränkten Pflanzenwachstums.

In den 80er–Jahren wurden in ähnlicher Weise NOAA–Daten zur Bestimmung von Getreidedefiziten, der Graslandproduktivität (HIERNAUX & JUSTICE, 1986) und zur Beobachtung der Dürreentwicklung (HENRICKSEN & DURKIN, 1986) – angesichts der sahelischen Massenbedrohung durch lokale Hungersnöte ausgewertet. GROTEN (1991 & 1993) hat beispielhaft NOAA–NDVI–Daten in Burkina Faso analysiert, um über den Parameter des saisonalen Wachstumsbeginns eine Vorhersage der Einsaattermine ableiten zu können.

Eine präzise fernerkundliche Agrarflächeninventarisierung im semi–ariden Afrika scheiterte bisher – selbst mittels räumlich–hochauflösender Daten – an der problematischen Erfassbarkeit der kleinen und unregelmäßigen Parzellengrößen, an stark variierenden Mischkulturen, unter Bäumen angelegten Kulturen und Kulturen mit geringer Bodenbedeckung. Die größte Schwierigkeit resultiert jedoch aus der räumlichen und zeitlichen Instabilität der Beziehung zwischen Feldfrüchten und spektralen Indizes (LAMBIN et al., 1993).

Eine noch wenig verbreitete Bildverarbeitungstechnik stellen die morphologischen Operationen dar. GUYER & LAMBIN (1993) konnten mittels solcher formbasierter Kriterien bereits eine Unterscheidung maschinell und manuell geernteter Feldflächen in Nigeria auf der Basis multispektraler SPOT–Daten erzielen. Zu dieser Thematik werden in Kapitel III die aktuellen, von der Autorin experimentierten, morphomathematischen Ansätze zur Erfassung von Agrarkonturen im Nigerbinnendelta vorgestellt.

1.1.4 Landschaftsdegradation

Zur Beurteilung der Landschaftsdegradation ist eine über die globale Erfassung detaillierte Aufnahme von Inventarzuständen eine *Conditio sine qua non*. Die in großer Literaturfülle beschriebenen, letztendlich durch anthropogenen Druck ausgelösten Probleme und Katastrophen weisen vornehmlich lokalräumliche Dimensionen auf. Hingegen stellen die zumeist auf globalräumlich meteorologischen Satellitendaten geführten sowie einzelne detailräumliche Fernerkundungsstudien im Sahel nur partielle Ergebnisse vor. Die Landschaftsdegradation ist als solches Phänomen nicht direkt, sondern nur indirekt über biophysikalische Daten erfassbar. Mit entsprechenden fernerkundlichen Aufnahmetechniken können solche Daten in operationeller Weise in regionaler bis lokaler Raumqualität gewonnen werden. CSAPLOVICS (1992) zeigt am Beispiel des Office du Niger in Mali eine geländegestützte Fernerkundungsauswertung zur regionalen Identifizierung degradierter, bzw. degradationsgefährdeter Gebiete. Diese stellen sich auf den analysierten panchro–

matischen Luftbildern (1952, 1975, 1987) und multi-spektralen Satellitenbildern (Landsat MSS und TM und SPOT-Serie von 1972 bis 1990) als überformte, aufgelichtete Gehölzformationen mit zunehmenden Bodenanteilen speziell in Wassernähe, durch feuerbeeinflusste Flächen und durch die Ausweitung des Trockenfeldbaus auf Kosten der Weideflächen heraus.

Im Rahmen eines durch das IGN France International geleiteten Projekts wurde eine Studie zum kosteneffizienten Monitoring der Landdegradation und Landrehabilitation im West-Sahel durchgeführt (ARNOLD, 1997). Die Auswertung der Luftbilder der 1950er Jahre und SPOT-Daten von 1987 an drei Standorten eines Nord-Süd-Profiles in Mali wiesen ein erhöhtes Degradationsrisiko speziell im Übergangsbereich zwischen den nördlichen ariden und den südlicheren semi-ariden Gebieten nach. In dieser Zone wurden aufgrund des Bevölkerungszuwachses aus dem ariden Norden während der vergangenen Trockenjahre Anbauflächen in bodenerosionsgefährdete Hang- und Talbereiche ausgeweitet.

MALO & NICHOLSON (1990) favorisieren die Untersuchung der Desertifikation in semi-ariden Räumen mittels einer Kombination aus NOAA-NDVI- und Regenfalldaten. Allerdings bemerkt eine Studie von EHRLICH et al. (1997) kritisch, daß die geringe Bodenauflösung der täglichen NOAA-AVHRR-GAC-Satellitendaten als Nachweis der Feuerzerstörung der Biomasse auf dem afrikanischen Kontinent bei weitem nicht ausreicht.

Die Landnutzung und die mit ihr verbundene Vegetationsdegradation werden zur Ausweitung deflationsanfälliger Gebiete speziell in ariden und semi-ariden Räumen, in Zukunft beitragen und die Mobilisierung und den Eintrag von Aerosolen in die Atmosphäre erhöhen. Die Frage nach der Einflußnahme der Aerosolzunahme auf das Beziehungsgefüge von Vegetation, Atmosphäre und Ozean und damit auf die globale Klimaveränderung wird die zukünftige Forschung intensiv beschäftigen (HARRISON et al., 2001).

Zur Klärung des Langzeiteffekts der Degradationserscheinungen – reversible Fluktuation oder irreversibles Phänomen – ist hinsichtlich der vorausschauenden Erkennung dieser lokalen Problemräume sowie der Verhinderung von Ressourcen- und Nutzungskonflikten die Etablierung länderübergreifender Langzeit-Geodatenbanksystemen unter Einsatz fernerkundlicher raumdetailgenauer Aufnahme Standards zu forcieren.

1.2 Untersuchungsregion Nigerbinnendelta

Das Nigerbinnendelta der Republik Mali repräsentiert einen azonal-hydrologischen, edaphisch begünstigten Landschaftskomplex einer weiten amphibischen Flußlandschaft, inmitten der semiariden westafrikanischen Sahelzone. Die vorteilhaften Bedingungen einer ganzjährigen Wasserverfügbarkeit verursachen im saisonalen Rhythmus anthropozoogene Migrationsbewegungen. Durch die Niederschlagsdefizite der 70er und 80er Jahre wurde das Gleichgewicht der natürlichen Ressourcen dieses sensiblen Ökosystems belastet. Eine Reduktion der Überschwemmungsflächen und die Verminderung des im Delta verfügbaren Wasservolumens waren die Folge.

Vor der Etablierung der fernerkundlichen Satelliten-Erdbeobachtung taten sich Y. URVOY während der 40er Jahre, Jean TRICART und Jean GALLAIS seit Ende der 50er Jahre sowie Karl BARTH seit Mitte der 70er durch intensive geowissenschaftliche Gelände-Studien unterschiedlicher und beschränkter Lokalität im Nigerbinnendelta hervor. Detaillierte Beschreibungen und Studien zum Naturraum und seiner Nutzung sind in ihren zahlreichen, hauptsächlich französischsprachigen Veröffentlichungen nachzulesen.

Für das Nigerbinnendelta existieren einzelne partielle, im Folgenden kurz skizzierte, fernerkundliche Projekte und Studien zur Inventarisierung und Beobachtung des natürlichen Ressourceninventars.

1.2.1 Topographie und Hydromorphie

Der Niger durchfließt in der Republik Mali das in ca. 270 m über Meereshöhe befindliche, unter sehr schwachem Gefälle (0,02–0,06 m/km) nach Nordosten abfallende Becken des Nigerbinnendeltas (MOHR, 1969). Das lebhafte Meso- und Mikrorelief der Überflutungsebene weist beiderseits des Nigersflusses rezente und fossile Uferdämme sowie von Altarmen durchzogene Beckenzonen mit Maren auf. Die von den Sommerniederschlägen im Bereich der Guinea-Schwelle ausgelösten Hochwasserflutwellen werden nach Eintritt in das Niger-Binnendelta durch das hohe Retentionsvermögen seiner Beckenzonen in einer zeitlich verschobenen Phase (Hysteresis-Effekt) von Süden nach Norden weitergegeben. Damit gleicht das Binnendelta einem "Schwamm, der sein Wasser erst nach vollständiger Porensättigung wieder freigibt" (BARTH, 1975). Der von seiner Quelle im Futa Djallon nach einer Wegstrecke von seinem Quellgebiet im Fouta Djallon (Guinea) nach 4200 km in den Golf von Guinea einmündende Niger erreicht in Bamako noch weit vor dem Eingang ins Nigerbinnendelta durchschnittliche Wassermengen von ca. 40 Mrd. m³/Jahr, in Mopti inmitten des Deltas ca. 70 Mrd. m³/Jahr (Zufluß des Bani) und in Niamey (Rep. Niger) weit hinter dem Delta-Ausgang 30 Mrd. m³/Jahr (IGN/ORSTOM/SOGREAH, 1982). Rund die Hälfte der salzarmen Wassermassen gehen zwischen Mopti und Tossaye durch Versickerung, Verdunstung sowie Ablauf in Altarme und Nebenbecken verloren (VAGELER, 1944). Die Überschwemmung verläuft in verschiedenen Regionen des Deltagebiets durch Auffüllung des Altarmwassernetzes und der Mare oder durch Dekantation der Stromverzweigungen und Kanäle. Aufgrund der Flachheit des Reliefs bedingen vertikale Höhendifferenzen im Zentimeterbereich horizontale Hydromorphieveränderungen im Kilometerbereich (BARTH, 1978).

Die Erforschung der raumzeitlichen Ausprägung der periodischen Überschwemmungen im Nigerbinnendelta besitzt eine wirtschaftlich hohe Relevanz. 1972 wurde in Kooperation von DGHE in Bamako sowie ORSTOM und BDPA in Paris das Satellitenprojekt "SAPHYR" zur Untersuchung des Wasserregimes und seiner hydrologischen Anomalien sowie der in Verbindung mit den Überschwemmungen stehenden Vegetationsevolution lanciert. Die Auswertung von Landsat MSS-Szenen des NIR-Bildkanals 7 zur Identifizierung von Biomasse und freien Wasserflächen wurde durch Geländedaten und Daten von weiteren 29 hydrometrischen Stationen gestützt. Die Dynamik der Überschwemmungsflächen wurde auf verschiedenen MSS-Zeitschnitten im Ausschnittbereich des Lac Débo visuell erfaßt. Wegen der störenden Einflüsse der aquatischen Vegetation konnte diese jedoch nur mit großer Unsicherheit extrahiert werden. Eine grobe Korrelation der Ausdehnung der Überschwemmungsflächen mit den Messungen zum Wasserstand ließen in den Wasserarmen jenseits beider Uferseiten des Nigers konträre Wasserströmungsbewegungen erkennen. In den rechts-nigrischen Gebieten scheinen die Überschwemmungsflächen – infolge des Wasserüberlaufs des Flußnetzes – bei zunehmendem Wasserstand zuzunehmen. Hingegen nehmen auf der links-nigrischen Seite – infolge des Wasserrückstroms von den Überschwemmungsflächen in das Flußnetz – die Wasserflächen bei steigendem Wasserpegel ab. Zu den während der Geländekampagne 1976–77 aufgenommenen Daten waren in den Archiven keine zeitgleich aufgenommenen auswertbaren MSS-Produkte auffindbar. Manifestierende und detailgenauere Folgeuntersuchungen können aufgrund der Einstellung des Projekts nicht folgen (BIED-CHARRETON et al., 1977).

Im Rahmen der internationalen Hilfe der Sahel-Länder wurde das Projekt "Modèle Mathématique du Fleuve Niger" von 1978 bis 1982 von der UNDP gefördert, das zur wirtschaftlichen Entwicklung und zum Management (Navigation, Hydro-Elektrizität, Hydro-Agrarwirtschaft) des von 9 Anrainerstaaten berührten Niger-Einzugsgebiets (2 Mio. km²) beitragen sollte. Die Verantwortung zur Realisierung des Modellkonzepts wurde an das Ingenieurbüro Sogreah in Grenoble übergeben (GUYOT, 1985; CARRÈRE, 1982). Hydrologische Daten des Nigers wurden von ORSTOM bereit gestellt. Das IGN France hatte den Auftrag ein topographisch homogenes Höhenmodell auf der Basis von Gelände-Altmetriemessungen in einer Äquidistanzpräzision von 0,25 m zu etablieren (ORSTOM, 1978; CARRÈRE, 1982). Es wurde eine, die Fläche des Nigerbinnendeltas abdeckende Serie

von 39 Orthophoto-Blattschnitten im Maßstab 1/ 50.000 fertiggestellt, die zentimetergenaue Höheninformationen der im Gelände aufgenommenen Meßpunkte liefern (IGN, 1984). MORLEY & MULLER (1996) haben die Eignung und das Potential von multisensoriellen Radarsatellitendaten (ERS X-SAR und NASA/DRA SIR-C) zur Beobachtung der Überschwemmungsdynamik im Nigerbinnendelta untersucht. Die aus den Bildpaaren zur Trocken- und Regenzeit berechneten Kohärenzbilder ergaben für jenes der Trockenzeit eine gute, für jenes der Regenzeit eine uneindeutige Segmentierbarkeit von Wasser- und Nicht-Wasserflächen. Die Autoren verweisen auf den Bedarf an zusätzlichen Informationen zu einzelnen Bedeckungstypen sowie auf weniger zweifelhafte Auswertemöglichkeiten mittels optischer Satellitenbilddaten. Ihr langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines Höhenmodells zur Abschätzung des Wasserspeichervolumens innerhalb des Nigerbinnendeltas auf Grundlage interferometrischer Methoden. Im Rahmen des Veränderungsmonitorings hat sich die interferometrische Auswertung von Radar-Tandem-Daten bislang ausschließlich für die Vermessung der Veränderung von Gletscherkörpern und Eisflächen als zuverlässig erwiesen; nicht für die von Wasserflächen. Durch die schon bei geringer zeitlicher Differenz der jeweils verwendeten Datensätze (nur wenige Stunden reichen bereits aus) auftretenden atmosphärischen und klimatischen Störeinflüsse (Auslösung von Wellen auf Wasserflächen durch Wind etc.) können unerwünschte Kohärenzverluste der Tandem-Daten verursacht werden (THIEL et al., 1995).

1.2.2 Vegetation und Böden

Die Alluvialton-Schwemmlandebene des Nigerbinnendeltas befindet sich innerhalb der weitgespannten Synklinalzone zwischen Mossi- und Assaba-Schwellen. Sie wird von tropisch-hydromorphen Überflutungsböden, gley- bis pseudogleyähnlichen, blass-braunen Schluff-Lehmböden dominiert (BARTH, 1977).

Die räumlich uneinheitliche Bildung von Bodentypen und -arten läßt sich im Nigerbinnendelta auf die Schwebstofffracht der sich ständig verschiebenden Wasserläufe zurückführen (MOHR, 1969). Nach GALLAIS (1967) besitzt der Niger allerdings mit ca. 75 g/m³ eine z.B. im Vergleich zum Senegalfluß vierfach schwächere Trübeführung. Die hydromorphen Böden setzen sich vorwiegend aus sandigen Alluvionen und äolischen Sedimenten zusammen. Vor allem werden mit dem Harmattan Staubpartikel aus der Sahara sowie durch aquatische Vegetation gefiltertes Feinmaterial (nach GALLAIS (1967) auf der gesamten Deltafläche von 1,5 – 4 Mio m³/Jahr, äquivalent zu ca. 0,07 – 0,2 mm/Jahr, über periodische Hochwässer herantransportiert. Die fluviale und vor allem äolische Sedimentation bilden nicht nur den potentiellen, aktuellen Bodenbildungsfaktor, sondern auch natürlichen Bodenregenerationsmechanismus. Messungen von McTAINSH et al. (1997) ermitteln von April bis Mai 1990 auf lokalen Standorten im Nigerbinnendelta tägliche Sedimentationsraten von 2,5 bis zu 28,6 t/km², die einem Tagesdurchschnittswert von 11,5 t/km²/d entsprechen. Studien zur Sedimentation von Staubpartikeln belegen für Westafrika eine höhere Sedimentationsrate nach der Harmattan-Hauptsaison (April bis Juni). Das aus großer Entfernung herantransportierte Staubmaterial weist eine Feintextur mit Partikeldurchmessern < 5 µm auf. Von regionalen Herkunftsorten stammende Partikel liegen im Feintexturbereich von 20–40 µm, von lokalen Standorten stammende im Grobtexturbereich eines Durchmessers von 50–70 µm. Der größte Teil des Sedimentationsmaterials im Überflutungsgebiet des rezenten Nigerbinnendeltas ist lokaler Herkunft (McTAINSH et al., 1997).

Dort lassen sich größtenteils saure bis neutrale, an Stickstoff und Phosphorsäure arme, hydromorphe, zum Reisanbau geeignete Böden vorfinden (MOHR, 1969). Während das Inventar an Bodentypen im Nigerbinnendelta seit den Untersuchungen von BOUYER & DABIN (1963) bekannt ist, fehlt ihre lokalräumliche kartographische Aufnahme.

Fernerkundliche Untersuchungen zur Erfassung der Bodentypen und Eigenschaften der Bodensubstrate im Nigerbinnendelta existieren bisher nicht.

Wie der Boden ist die Vegetation im Delta durch topomorphe Einflüsse, d.h. von Dauer und Höhe der Überflutung geprägt und weist eine, im Gelände von CHEVALIÈRE (1934), TROCHAIN (1940) und REMAUDIÈRE (1954) untersuchte Stockwerkgliederung charakteristischer Pflanzengesellschaften auf. Mit Ausnahme der über das Hochwasserniveau herausragenden Uferdämme und Terrassenbereiche wird die Delta-Überflutungsebene von aquatischer, z.T. flottierender Grasvegetation mit Wildem Reis und verschiedenen *Carex*-Arten besiedelt. Die günstigen Bodenwasserbedingungen bringen eine hohe Biomasseproduktion von ca. 10–20 t/ha (BERTRAND, 1974) mit sich und stellen ein weites Potential für den Naßreisbau. Tonböden der Überflutungsbecken mit hoher Wasserspeicherkapazität bieten auch bei niedrigen Pegelständen genügend Wasser für die vielfach bis tief ins Grundwasser wurzelnden Gramineen. Der traditionelle Trockenreisbau konzentriert sich auf den Bereich der rezenten Uferwälle (BERTRAND, 1974).

Die überwiegend überflutungsfreien Regionen der Terrassen, Uferdämme, toguérés sowie der Randbereich des Deltas sind von Gehölzen besiedelt. Vor allem in den Randbereichen dominieren Strauchsavannen mit einer Bodenbedeckung von 20–50 %. Während die typischen Pflanzenassoziationen und Vegetationsstrukturen der topomorphen Stockwerkgliederung bekannt sind, hat – ebenso wie bei den Böden – die lokalräumliche Inventarisierung mittels fernerkundlicher Methoden noch nicht stattgefunden (s. Kapitel III).

1.2.3 Landnutzung und Degradation

Auf den Dünenrücken des Nigerbinnendeltas sind Hirsekulturen vorzufinden, in den von Totarm- und Seeuferbereichen fast ausnahmslos Naß- oder Schwimmreisflächen. Die Vergrößerung der Reisbauflächen durch Großprojekte (z.B. Opération de Riz in Mopti) sowie durch Flut umgebrochene Reisflächen sind mit Auswehungen von 10 cm Oberboden pro Jahr verstärkt der Bodenerosion durch Deflation ausgesetzt (BARTH, 1978). Zudem werden infolge des durch die Reispflanzen verringerten Retentionsvermögens Sedimentationsprozesse vermindert, bzw. es wird nur noch Grobmaterial abgelagert. Die Humus- und Mineralverarmung der Böden wird infolge der äolischen Entnahme des Oberbodens und der geminderten Bodenregeneration zusätzlich durch die nach der Reisernte ausbleibende natürliche Düngung nomadischer Viehherden verstärkt. Aufgrund von Holz-mangel wird der Viehdung nicht mehr auf die Felder gebracht, sondern als Energiequelle zur Fischräucherung eingesetzt (BARTH, 1977).

Die Dürreeinwirkungen der 70er/80er haben den nomadisch betriebenen Fischfang im Delta-Gebiet gefährdet. Auf den dezimierten Überflutungsflächen kam es zur Überfischung der Delta-Gewässer. Zusätzlich verschwanden mit der Ausbreitung von Reisbauflächen in den 80-er Jahren große Flächen an Laich- und Nahrungsgründen, die "Bourgou"-Grasfluren (*Echinochloa stagnina*), was einen weiteren Rückgang des Fischbestands bewirkte (BARTH, 1975).

Die wenigen vorhandenen Fernerkundungsstudien zur Landnutzung im Deltagebiet haben ausschließlich das Reisflächen-Monitoring zum Gegenstand. Unter diesen sind hinsichtlich der Verbesserung des Reisbaumanagements jene zur Schätzung der Reisproduktion zu nennen. Die maximale Ausdehnung der Überflutungsflächen ist Haupt-Limitierungsfaktor der Reisproduktion. Die Studie von BERG & GREGOIRE (1981 & 1982) versucht, die Vorhersage der Überflutungsausdehnung sowie der Ernteproduktion mit visueller Interpretation einer Landsat MSS-Szene von November 1975 und einer RBV-Szene von Oktober 1980 zu erreichen. Eine recht präzise Vorhersage konnte auf der Szene von 1980 drei Monate vor der Ernte gemacht werden. Doch hängt die Ernteproduktion nicht nur von der Ausdehnung des Anbaugebiets, sondern ebenfalls von der Qualität (Zeitpunkt innerhalb

der Reisswachstumsphase) der Überflutung ab.

Bei der Studie von BERG (1984) kommen zur visuellen Interpretation zwei Landsat MSS–Szenen (Nov. 1972 & 1975), panchromatische Szenen von 1974 sowie Infrarot–Falschfarben–Luftbilder von 1980 zum Einsatz. Aus dem Material wurde in der Szene von 1974 visuell eine Ausweitung des Reisanbaus, in der Szene von 1972 ein Ausbleiben der Überflutung mit extremem Wassermangel interpretiert. Die digitale Klassifikation der MSS–Szene von 1975 läßt eine grobe Identifikation von Überschwemmungsflächen ohne und mit Reis, Trockenfeldbaukulturen und Gehölzsavanne zu. Ergebnisse der angekündigten Projektfortsetzung für 1984–87 zur Durchführung der operationellen Phase konnten nicht vorgefunden werden.

Fast 15 Jahre später unternahmen TURNER & CONGALTON (1998) einen Versuch, traditionell bewirtschaftete Reisfelder im Südwesten des Nigerbinnendeltas kartographisch zu erfassen. Es wurde eine multisaisonale SPOT–XS Datenserie von vor der Überflutung gepflügten Reisfeldern aus drei Aufnahmetermen des Jahres 1988 zum bildkontraststärksten Zeitpunkt gewählt. Auf diesen konnte eine Sequenz mehrerer, teilweise durch Trainingsdaten gestützte Klassifikationsverfahren mit befriedigendem Erfolg angewandt werden.

Von 1994 bis 1996 förderte die FAO die erste Phase eines mit 257.000 EUR dotierten Projekts, "Gestion intégrée des ressources du delta intérieur du Niger: Zone de Dialloubé", (TCP/MLI/4451(I)) zur Inventarisierung und zum Management der im Nigerbinnendelta verfügbaren natürlichen Ressourcen. Es sollten Vegetationsdegradation und Produktionsverluste infolge verminderter Überflutung festgehalten werden. Im Einzelnen waren Phänomene wie dezimierte und übernutzte *Bourgou*–Zonen und Fischereigewässer, kompensativ vergrößerte Reisflächen, Gehölzentnahmeflächen und durch Überweidung auftretende Bodendegradation zu konstatieren. Aus der Konkurrenz um Nutzungsflächen und dem – nicht an die ethnisch–soziologisch komplexe Situation angepassten, die Fischer und Agrarbauern benachteiligenden – traditionellen Bodengrundsystem entstanden bereits Konflikte zwischen den ethnischen Nutzergruppen, z.B. zwischen viehzüchtenden Peulh und *Bourgou* und Reis anbauenden Markas und Rimaibés sowie zwischen den Bozos– und Somonos–Fischern. Das Projekt beabsichtigte die Entwicklung neuer Konzepte zur Bodengrund–Kohabitation; Es fehlen jedoch leider Ergebnisse zur ersten Projektphase wie die Realisierung der Folgephasen.

1.3 Synopsis zur Situation und Verfügbarkeit von Daten

Zur Untersuchung der Landschaftsveränderung im Nigerbinnendelta wurden Recherchen – anhand fernerkundlicher, kartographischer und statistischer Daten sowohl digitalen als auch analogen Ursprungs – nach einer im Folgenden dargestellten Strategie geführt. Dokumente und Daten aus dem Gebiet des Nigerbinnendeltas wurden zunächst per Internet, dann in verschiedenen Forschungsinstitutionen, Bibliotheken, verschiedenen Laboratorien in Paris, Enschede, Berlin, Hannover (BfRG) und nicht zuletzt vor Ort in Mali (Bamako, Mopti) gesucht.

Die meisten Internet–Seiten bieten zur Situation im Sahel Dokumente zu vergangenen, aktuellen oder geplanten Projekten überwiegend in Form globaler Informationen. Das Auffinden von Originaldaten ist selten und beschränkt sich bisher auf das globale Raumniveau. In den letzten Jahren hat sich jedoch das bislang recht geringe Angebot an online zugänglichen digitalen Daten insgesamt verbessert. Die Zugangsmöglichkeiten für das wissenschaftliche Publikum trennen sich an der Stelle eines offenen und kommerziellen Angebots digitaler Daten.

Die folgenden Darstellungen beschreiben das derzeit bestehende Internet–Angebot an globalen Informationen und Daten für den Sahelraum sowie die vorhandene Disponibilität

an, für das Nigerbinnendelta zu wissenschaftlichen Zwecken geeigneten, fernerkundlichen, kartographischen und statistischen Produkten.

1.3.1 Monitoring-, Vorhersage- und Frühwarn-Informationssysteme des Sahels

Hinsichtlich des Sahelraums investieren vor allem finanzstarke internationale Regierungsorganisationen wie FAO und USAID in die Etablierung benutzerfreundlicher, kostenfrei zugänglicher Entwicklungsländer-Online-Datenbanksysteme.

Für den Kontinent Afrika bietet das **ARTEMIS**-Satellitenmonitoringsystem der FAO (<http://metart.fao.org/~~/gbr/Eworld.htm>, Abfragestand: 08/2002) als Teil der RANET-Initiative einen neuen Datenkommunikationsweg. Mit diesem können aus METEOSAT-, NOAA- und SPOT-Satellitendaten abgeleitete Informationen zum Anwender transferiert werden. ARTEMIS liefert Satellitendaten für das Globale Informationssystem der FAO, für das u.a. zur Prävention von Heuschreckenplagen eingesetzte Nahrungs- und Agrarwirtschafts-Frühwarnsystem GIEWS, sowie für regionale und nationale Nahrungs-Frühwarnsysteme in Ost- und Süd-Afrika (IGAD, SADC). Aus den genannten Systemen gewonnene Landnutzungs-Daten fließen wiederum in das ADDS.

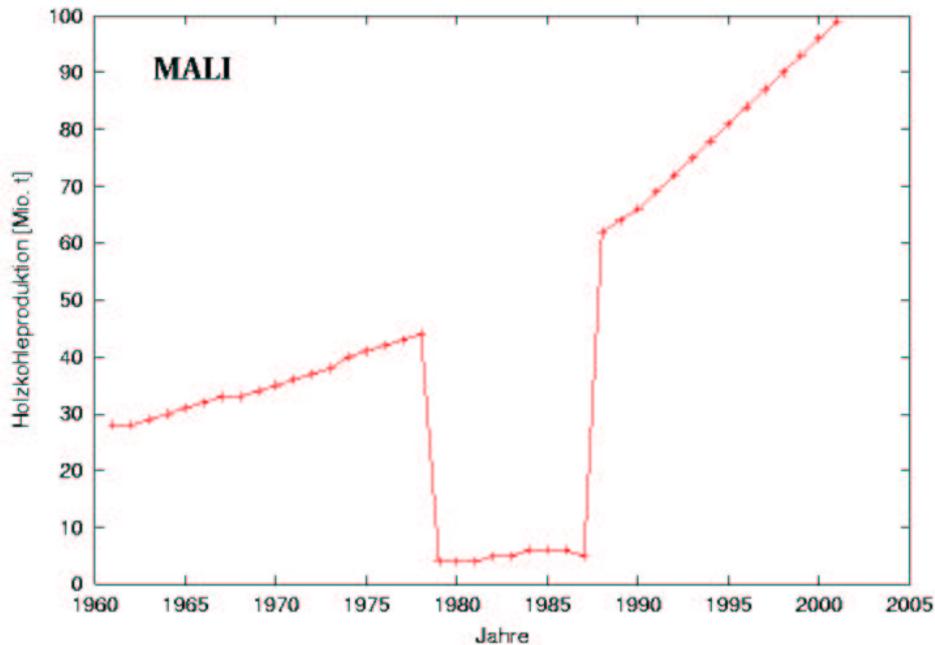
Auf globalem Niveau sind im 50 km-Raster Klimadaten zu Sonnenscheindauer, Temperatur, Biomasseproduktivität und zur Klimaklassifikation nach KÖPPEN sowie im 7,6 km-Raster zu Niederschlag und potentieller Evapotranspiration über die seit Mitte der 80er aufgebaute Datenbank des FAO-AGROMET-Monitoring Projekts (ROSEMA, 1986). Außerdem sind seit 1998 Daten des VEGETATION-Sensors von Spot-4 (Spot Image/CNES) zum Vegetations-Index sowie Geländemodell-Daten des CEOS-GLOBE Digitalen Höhenmodells jeweils im 1km-Raster verfügbar. Auf regionalem Niveau werden für verschiedene afrikanische Länder, so auch für Mali, Daten zur Kalte-Wolken-Dauer (FAO-ARTEMIS) angeboten, die auf Basis der über METEOSAT-Daten (seit 1988) ermittelten Wolkenoberseiten-Temperatur die Bestimmung der Lokalität und Quantität von Gewitterwolken ermöglichen. Die quantitativen Regenfallvorhersage-Daten (FAO-ARTEMIS) fußen auf Daten zur Kalte-Wolken-Dauer und seit 1996 zusätzlich auf über Bodenmeßwerte interpolierte Niederschlagsvorhersage-Daten. Alle drei vorgenannten Datentypen sind im 7,6 km-Raster verfügbar. Daten zum Vegetations-Index liegen entweder im 7,6-km Raster täglicher NOAA-AVHRR (GAC) oder als von AGRHYMET in Niamey (Niger) im 1-km Raster empfangene und prozessierte NOAA-LAC-Daten vor.

Alle aus dem ARTEMIS-System abgerufenen Daten lassen sich in Form von Karten oder Diagrammen visualisieren und z.T. interaktiv analysieren. Die spezielle Architektur des Webabfragesystems ermöglicht, daß die Daten nicht auf dem Webserver, sondern mittels des eigenen Webnavigators unmittelbar auf dem eigenen Computer verarbeitet werden. Nachteile dieses (client-sided) Verfahrens werden von HESS (2002) erläutert. Webabfragesysteme ermöglichen eine zukünftige Datenübertragung bzw. -aktualisierung mittels neuer Technologien wie, z.B. digitalem Funk zu fernen Orten Afrikas.

Daten zur agrarwirtschaftlichen Produktion liegen auf nationalem Niveau im Internet in der Datenbank "FAO STAT (FAO Statistical Databases)" vor (<http://apps.fao.org/page/collections>, Seitenstand: 02.09.2002). Dort können Datenzeitreihen seit 1961 inklusive gewünschter, online berechneter statistischer Parameter individuell in tabellarischer Form erstellt werden. So wurden für die vorliegende Arbeit für das Land Mali aus der Datenbank demonstrativ Datenreihen ab 1961 zur Holzproduktion (**Fig. 1.1 a**) und zum Fischfang (**Fig. 1.1 b**) abgerufen und nachträglich in eine graphische Form übertragen.

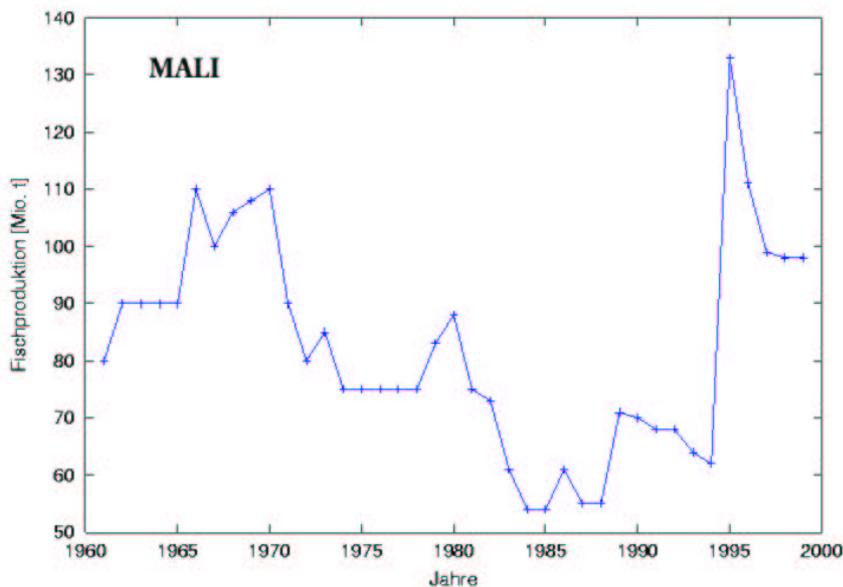
In **Fig. 1.1 a** fällt die Phase einer geringen Holzkohleproduktion zwischen 1978-87 auf, welche vermutlich mit einer Phase intensiver Aridität einherging. Auch die Fischproduktion (**Fig. 1.1 b**), welche in Mali zum größten Teil auf das Nigerbinnendelta konzentriert ist,

erfährt bereits ab 1970 mit leichten Schwankungen, eine erhebliche Reduzierung bis sie im Jahre 1995 bedingt durch die Auswirkungen einer außerordentlich starken Überschwemmung des Jahres 1994 – einen absoluten Maximalstand erreicht und danach wieder auf den Produktionsstand vor 1970 zurückfällt. Beide Datenreihen lassen im landesweiten Überblick keinen Degradationstrend oder eine langfristige Abnahme natürlicher Ressourcen erkennen.



Datenquelle: FAOSTAT, <http://apps.fao.org/page/collections>, Abfragestand: 02.09.2002, Design: S. HESS (2002)

Fig. 1.1 a) Evolution der Holzkohleproduktion in Mali von 1961–2001



Datenquelle: FAOSTAT, <http://apps.fao.org/page/collections>, Abfragestand: 02.09.2002, Design: S. HESS (2002)

Fig. 1.1 b) Evolution der Fischproduktion in Mali von 1961–1999

Ein anderes Projekt der FAO **AFRICOVER** zielt auf eine digitale Geodatenbasis mit georeferenzierten Landnutzungsdaten und geographischer Referenzen (Geodäsie, toponymy, Strassen, Hydrographie) im Maßstab 1:250.000 / 1:200.000, speziell für den afrikanischen

Kontinent, aufzubauen (http://carpe.umd.edu/Contact_Info/Partners/projects.asp?orgid=16, Abfragestand: 08/2002).

Das **FEWS NET** (Famine Early Warning System) der USAID ist ein unter Beteiligung der US-Regierung etabliertes Nahrungssicherungs-Frühwarnsystem, welches derzeit in 17 dürrefährdeten Ländern Afrikas zum Einsatz kommt. Eine Partnerschaft in der Datenbereitstellung besteht mit den US-Organisationen USGS, USAID, Chemonics, Foreign Agriculture Service, NASA und NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Daten innerhalb des FEWS NET werden durch den Vertriebsservice ADDS des USGS/EROS Daten zur fernerkundlichen Wetter- und Regenfallbeobachtung (NOAA) zwecks Katastrophenwarnung und -analyse, zur Agrarproduktion (FAO-GIEWS Daten) und zu Marktpreisbeobachtungen bereitgestellt (<http://www.fews.net>, Abfragestand: 08/2002). Die aus diesen Daten analysierten Ergebnisse sind pro Land anhand von Monatsberichten dokumentiert. Für Mali zeigen die monatlichen Länderberichte des USAID-FEWS aktuelle Karten zur Evolution der ITCZ, sowie zur Regenfall- und Biomasseabschätzung. Weiterhin wird dort von einer im Mai 2002 normal begonnenen Regenzeit berichtet, welche in der Region von Tombouctou 200 mm Niederschläge allein vom 26. auf den 27. Juli 2002 und erhebliche Vieh- und Materialschäden brachte.

Ein anderes aktuelles, von USAID finanziertes Projekt zur Beobachtung der Landnutzung und Landschaftsveränderung im Sahel entstand in Zusammenarbeit mit dem EROS Data Center, INSAH und AGRHYMET. Zum Verständnis der natürlichen Ursachen der Landschaftsveränderungen desertifikationsgefährdeter Sahelländer und damit im Hinblick auf Ressourcenmanagement und Aufrechterhaltung der Landschaftsfunktion als Lebensraum wurde mit der Analyse historischer Satellitenbilder begonnen (<http://edcintl.cr.usgs.gov/sahel.html>, Seitenstand: 03.09.2002).

Das UNEP-Projekt **Data Portal To Africa** beabsichtigt den Aufbau eines Umwelt-Monitoring Systems als Konsultierungsgrundlage für afrikanische Regierungen und private Institutionen auf lokalräumlicher Ebene. Ziel ist die Nutzung der natürlichen Ressourcen auf degradationseinschränkende, ökonomische und soziale Weise (<http://edcintl.cr.usgs.gov/dataportal.html>, Seitenstand: 03.09.02).

Die Internet-Recherche konnte für das Arbeitsgebiet Nigerbinnendelta aufgrund des Angebots ausschließlich globalräumlicher agrarmeteorologischer Daten keine gewinnbringende Ausbeute erzielen.

Das CILSS in Niamey investiert in die Nahrungssicherungsforschung, die Bekämpfung der Ariditätsphänomene und der Desertifikation, die Identifikation und Bekämpfung demographischer Zwänge sowie die nachhaltige Entwicklung im Sahel (<http://www.insah.org/cerpod/cerpod.htm>, Abfragestand: 08/2002). Dem Komitee aus 9 Sahel-Mitgliedsstaaten sind AGRHYMET und INSAH unterstellt. AGRHYMET (<http://www.agrhymet.ne/>, Abfragestand: 08/2002) übernimmt die Funktion eines regionalen Sahel-Zentrums zur Produktion und Bereitstellung originaler wie interpretierter Daten zur Agrometeorologie, Hydrologie sowie zur Erhaltung und zum Schutz der Vegetation. Das INSAH (http://www.insah.org/start_insah.htm, Seitenstand: 11.05.2002) hat die Aufgabe der Koordination und Förderung agrar-sozio-ökonomischer Forschung und Technisierung in den Sahelländern. AGRHYMET präsentiert sich mit einer kleinen Frühwarn-Online-Datenbank, in welcher Daten für Mali von 1996/97 und in Vorhersage Daten für 1997/98 zur Getreideproduktion, zum Getreidebedarf und Getreideimport, zum Viehbestand und eine Bewertung der Nahrungssituation abrufbar sind.

Bedenklich stimmt allerdings, daß INSAH keine Online-Datenbank vorweisen kann und der meteorologische Service ACMAD (<http://www.acmad.ne/>, Seitenstand: 2000), der die Verbreitung regionaler, verlässlicher Klimadaten zur agrometeorologischen Frühwarnung auf dem Plan stehen hat, nur mit der Bereitstellung bloßer, wissenschaftlich nicht verwendbarer Schemata zu Niederschlag, Temperatur, relativer Luftfeuchte und potentieller Evapotranspiration des gesamtafrikanischen Kontinents vertreten ist.

1.3.2 Lokale Datensituation im Nigerbinnendelta

Weitere Rechercharbeiten führten im April 1997 zu einem drei-wöchigen Aufenthalt in Mali, der der Suche nach Daten- und Informationsmaterial sowie der Begutachtung eines angeblich in Kooperation mit dem Forschungslabor PRODIG in Paris speziell für das Nigerbinnendelta etablierten Geographischen Informationssystems diente. Das vermeintliche Informationssystem wurde beim IER in Mopti von der Autorin in rudimentärem, nicht funktionstüchtigem Zustand vorgefunden.

Weiterhin befand sich das lokale GTZ-Büro in Mali zur Zeit des Aufenthalts gerade in einer Etablierungsphase zur Erfassung des Gesundheitszustands der örtlichen Bevölkerung und besaß daher noch keine vor Ort nutzbare Infrastruktur. Vorsprachen bei der Deutschen Botschaft in Bamako, beim MRNE, MZA, MDRE, DNSI sowie Bibliotheksrecherchen bei ORSTOM (jetzt: IRD), IUCN und dem Institut du Sahel (CILSS) brachten keine untersuchungsrelevanten Dokumente und Materialien hervor. In der Bibliothek des IER konnten verschiedene Dokumente von CIPEA und ODEM zum Inventar natürlicher Ressourcen im Nigerbinnendelta auf Microfiche gesichtet werden. Diese Form der Daten- und Dokumentenkonservierung stellte sich letztlich als unbrauchbar heraus. Reproduzierbarkeit und Erwerb ausgewählter Dokumente waren aufgrund des seit Monaten defekten Mikrofiche-Kopiergeräts des IER in Bamako nicht möglich.

Anlässlich einer Konferenz des IER in Mopti wurde für wenige Stunden eine Geländebesichtigung bei Fatoma in der Region nördlich von Mopti möglich. Ein Konferenzteilnehmer stellte am Morgen des 25.04.1997 seinen Geländewagen samt Chauffeur zur Verfügung, so daß nördlich von Mopti (Fatoma) der Regenfeldbau des Deltarandbereichs besichtigt werden konnte.

Fernerkundungsdaten

Da eine finanzielle Unterstützung zum Erwerb von Datenmaterial im Rahmen der Dissertation nicht vorlag, wurde nach kostenfreien oder kostengünstigen Möglichkeiten zur Beschaffung von Luft- und Satellitenbildprodukten recherchiert. Anfragen zur Überlassung von Bilddaten zu wissenschaftlichem Zweck – bei Wissenschaftlern, die im Deltagebiet bereits fernerkundlich geforscht haben, an den Universitäten Gembloux (Belgien), Strasbourg & Paris (Frankreich), an die ORSTOM-Institutionen in Bondy, Montpellier und Orléans (Frankreich), an die BGR in Hannover – blieben jedoch ohne Erfolg. Eine detaillierte Recherche nach Satellitendaten über die Suchmaschinen von ESA, EOSAT, DLR sowie Luftbilddaten der analog vorliegenden Befliegungspläne beim IGN in Paris brachten Verfügbarkeiten an Bilddaten, doch zu z.T. erheblichen Preisen.

Ein Aufenthalt bei dem der Universität Paris 1 und dem CNRS angeschlossenen Forschungslabor PRODIG brachte die erwartete Materialbasis an Geoinformationen und Bilddaten zum Nigerbinnendelta ebenfalls nicht hervor. Es bleibt ungeklärt, ob Material einfach nicht vorhanden war oder aus nicht erfindlichen Gründen zurückgehalten wurde. Letztendlich stellte das Labor in sehr beschränkter Auswahl einzelne historische MSS- und Luftbilddaten, aus denen letztendlich eine gebietskongruente Zeitserie zusammengestellt werden konnte. Die Bilddatenserien werden je detailliert in den Kapiteln 2.2.3 und 3.2.3.1 vorgestellt.

Für das Gebiet des Nigerbinnendeltas wurden Befliegungspläne bei der Direction National de Cartographie et Topographie (DNCT) in Bamako eingesehen. Aus dem dort präsenten "Atlas des données topographiques et cartographiques du Bassin du Niger" (IGN, 1981) wurde ersichtlich, daß keine detailgenaueren topographischen Karten von Mali als jene im Maßstab 1/ 200.000 existieren. Luftbilder sind aus frühesten Befliegungen von Mali aus dem Jahre 1952 und einer Befliegung aus dem Jahre 1995 vorhanden. Luftbildmaterial, welches nach

Ende der französischen Kolonialzeit, d.h. ab 1960 aufgenommen wurde, wird dort archiviert und kann unter Einholung einer Autorisierung erworben werden. Bei der Suche nach aktuellsten Luftbildern konnten im April 1997 bei der DNCT in Bamako gegen "blinde" Vorausszahlung einzelne Luftbilder des Jahres 1984 gekauft werden. Aufgrund der schlechten Reproduktion erwiesen sich diese jedoch für die Analysen als untauglich. Aus den Befliegungsplänen des PGRN wurde ersichtlich, daß die letzten Befliegungen in Mali im Jahr 1993 durchgeführt wurden, welche jedoch das Nigerbinnendelta nicht erfaßten.

Die seit 1999 von der NASA kostenfrei bereitgestellten multispektralen ASTER-Satellitendaten konnten in der Endphase dieser Arbeit nicht mehr hinzugezogen werden. Die einzelnen Datenserien werden in den jeweiligen Kapiteln (Kap. 2.2.3 & Kap. 3.1) detailliert vorgestellt.

Kartographische Produkte:

Aus einem Inventarverzeichnis des IGN (1980) an kartographischen Produkten für alle neun Staaten des Niger-Einzugsgebietes waren die für die Republik Mali vorhandenen Materialien entnehmbar.

Folgende analoge, das Nigerbinnendelta vollständig oder partiell abdeckende Kartenprodukte konnten aufgefunden und für relevante Ausschnitte in Kopie erworben werden:

1. vom *IGN* in Paris in folgenden Maßstäben herausgegebene topographische Karten:
 - "République du Mali", 1962, 1/ 2,5 Mio.
 - "Carte International du Monde", 1/ 1 Mio. mit den Blättern NE-30 Tombouctou & ND-30 Ouagadougou,
 - "Carte Topographique de l'Afrique de l'Ouest" im Maßstab 1/ 500.000 mit vier Blattschnitten und 1/200.000 mit ca. 12 Blättern,
 - Orthophotokarten "Spatiocartes d'Etudes" des Projekts "Modèle Mathématique du Fleuve Niger", 1/ 50.000 mit 39 Blattschnitten
2. bei der *Société de Géologie* in Paris die geomorphologische Blattserie "Cartes morphologiques du Delta Intérieur du Niger" im Maßstab 1/ 200.000 samt dazugehöriger Dokumentation von Jean GALLAIS (1976): "Mémoires et Documents: Le Delta Intérieur du Niger et ses bordures – Etude morphologique"
3. bei der *Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* partielle, geomorphologische Detailkartierungen im Maßstab 1/ 50.000–45.000, enthalten in der Veröffentlichung von Jean TRICART & N. Guerra DE MACEDO (1965): "Reconnaissance géomorphologique de la vallée moyenne du Niger"

Weitere das Nigerbinnendelta berührende thematische Karten waren überwiegend in sehr kleinem Maßstab vorzufinden. Die Recherchen konzentrierten sich demgegenüber auf Kartenwerke größeren Maßstabs als 1/ 500.000.

Nach Informationen des BRGM in Orléans existieren keine großmaßstäbigeren geologischen Karten für Westafrika als die "*Carte géologique de reconnaissance de l'AOF*", 1/500.000 (1959). Die vergriffenen, nur als Pauskopien erhältlichen Kartenblätter Mopti-Ouest, Mopti-Est, San-Ouest und San-Est zeigten keine für die Untersuchungen vordergründige Relevanz.

Die weiterhin vom BRGM genannte Karte des USAID-TAMS "Mali land and water resources" 1983, 1/ 500.000, mit Karten zum Inventar an Böden, Vegetation, Wasserressourcen (Niederschläge, Oberflächen- und Grundwasser) konnte nicht ausfindig gemacht werden. Hingegen wurde in Bamako ein von CTA finanziertes und IEMVT realisiertes Kartenwerk "*Elevage et potentialités pastorales sahéliennes – Synthèse cartographiques – MALI*", 1987, 1/500.000 aufgefunden, das die Verbreitung agropastoraler Vegetationseinheiten mit charakteristischen Gehölz- und Grasleitarten unter relativen Dominanzangaben darstellt. Die Karte von HIERNAUX & HEYWOOD "Carte des pâturages

du delta vif de la République du Mali", 1/ 50.000 waren ebenso wie die thematischen Karten zum Inventar an Gehölzressourcen von PIRT und PIRL nicht auffindbar.

Statistische Daten

Die Klimadaten der Beobachtungsstationen der Republik Mali verwaltet die DNM in Bamako. In analoger Form sind tägliche Datenmesswerte in dem vom Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques bis zum Jahre 1965 herausgegebenen Dokument: "Précipitations Journalières de l'origine des stations à 1965" enthalten. In digitaler Form waren die aufgenommenen Datenreihen ab 1897 bis 1997 mit Monatsdurchschnittswerten für verschiedene Stationen Malis über das Deutsche Seefahrtsamt in Hamburg zum Forschungsstarif käuflich erwerbbar.

Statistische Daten zur Agrarsituation Malis werden in den Jahresberichten der DNSI in Bamako veröffentlicht. Die für die Jahre 1964/65, 73/74, 84/85 und 96/96 erworbenen Berichte enthielten regional begrenzte, nicht miteinander vergleichbare Daten, die sich für den Aufbau von Zeitreihen nicht eignen. Aus diesen Gründen sowie aufgrund ihrer nicht verlässlichen Qualität konnten diese in der vorliegenden Studie nicht eingesetzt werden. Für die Bevölkerungsstatistiken von Mali sind beispielsweise Fehlerquoten von ca. 15 % realistisch. Die beim IER in Bamako angeblich vorhandenen Statistiken zur Fischerei sowie die in Mopti beim Service Agricole gehaltenen Statistiken zum Reisanbau konnten nicht gesichtet werden.

Zur Vegetation und Agronomie waren aus der Veröffentlichung des PIRL "Inventaire des formations végétales: rapport technique Projet Inventaire des ressources ligneuses – les formations végétales" leider keine verwertbaren Dateninformationen exzerpierbar.

Schließlich bleiben die wissenschaftlich nicht auswertbaren, jedoch Eindrücke und Forschungsimpulse zur Problematik der Landschaftsveränderung im Nigerbinnendelta in Mali gebenden, subjektiven Beobachtungen Einheimischer:

1. In kleinräumigen Lokalitäten des Nigerbinnendeltas entstanden auf aufgegebenen *Reisflächen* Gehölzokkupationen. Sind diese landschaftlichen Modifikationen wie auch der Rückzug der *Überschwemmungslinien* sowie die Verminderung an *Bourgouflächen* mit der Aridisierung erklärbar ?
2. Die *Gehölzvegetation* in nächster Nähe zum Nigerlauf weist eine streifenförmige Regression auf. Lässt sich diese auf Luftbildmaterial nachweisen und steht sie in Verbindung zum Relief ?
3. Stellen *Versandungen* im Nigerbinnendelta einen Degradationsindikator dar ?
4. Wie hoch ist das *Weidepotential*, d.h. für welche Dauer können wieviel Rinder im Nigerbinnendelta während der Niedrigwasserphase weiden ohne das Ressourceninventar zu überlasten ?
5. Aufgrund von Wassertrübungen durch Tonkolloide wird der Lichteinfall in den Gewässern vermindert. Die Folge ist eine gehemmte Photosynthese der aquatischen Vegetation, die ein *Fischsterben* speziell sensibler Arten auslöst. Eignet sich die Artenhäufigkeit weniger O₂-sensibler Fischarten als Indikator für eine Milieuveränderung ?
6. Ist eine *Vorhersage der hydrologischen Situation* zur optimalen Nutzung der Überschwemmungsflächen möglich ?
7. Im Nigerbinnendelta treten zwei Formtypen an *Termitenhügeln* auf: Sogenannte "Kathedralen" sowie die niedrigeren "Champignons" entlang des Niger. Nach den Regenjahren 1985–88 wurde scheinbar eine Entwicklung zahlreicher neuer Termitenhügel beobachtet. Welche Funktion haben die Termiten innerhalb des Klima–Boden–Vegetationskomplexes ?

Im komplexen Interaktionsraum des Nigerbinnendeltas entwickelten sich Interessenkonflikte zwischen verschiedenen Landnutzern (Kapitel 1.2.3), welche besonders im inneren Deltabereich durch die Ausweitung des Reisanbaus ausgelöst werden.

1.4 Motivation und Zielsetzung

Die vorliegende Studie ordnet sich in die Thematik der Degradationsproblematik innerhalb des Sahels ein, welche im anti-proportionalen Verhältnis von Mengen an vagen und nebulösen Dokumenten zu harten, Nachweis und Lösungsansätze bringenden Raumdaten steht.

Angesichts des bereits beschriebenen Datenmangels an kompletten Zeitreihen im Sahel bietet die erdbeobachtende Fernerkundung ein methodisches Potential zur Erhebung quantitativer Daten verschiedener Objektdetailniveaus in unzugänglichen Räumen. Werden die verfügbaren Fernerkundungsdaten globaler Tragweite des Sahels mehr und mehr elektronisch zugänglich gemacht, fehlen komplementäre regionale Daten der Republik Mali und in noch beträchtlicherem Maße lokale Daten des Nigerbinnendeltas. Das Verständnis anthropogen induzierter Landschaftsveränderungen in semi-ariden Räumen erfordert zwingend die Auswertung retrospektiver wie auch detailgenauen Datenmaterials.

Im Sahel konzentrieren sich Raumprobleme auf zwei Brennpunkte: Neben großen städtischen Agglomerationen stellen Regionen mit hohem Wasserangebot Anziehungsräume größerer Bevölkerungskonzentration dar. Die Auswahl eines solchen Raumtyps war ausschlaggebend für die Eingrenzung des Untersuchungsraums.

Die Bewertung der Vegetationsbedeckung stellte in semi-ariden Räumen den Schlüsselparameter zur Beurteilung der Ausdehnung und Intensität von Degradationserscheinungen und führte somit zur Etablierung einer Langzeitstudie.

Entgegen einer methodischen Studie, bei der zahlreich vorhandene Daten mittels routinierter Methoden ausgewertet werden, führte der vorliegende Datenmangel zu einer methodologischen Studie, in welcher zunächst geeignete Methoden zur Erhebung von Daten zu entwickeln waren.

Die wenig ergiebige Datenlage erforderte folglich die Auseinandersetzung mit folgenden Problemen:

1. Informationsqualität und Vergleichbarkeit räumlich und spektral unterschiedlicher Bildsensordaten
2. Maßstabs- und Sensitivitätsbetrachtung unterschiedlicher Aufnahmesysteme

und führte zur Entwicklung effizienter, den nachfolgend genannten Ansprüchen genügender Methoden:

1. Verwendung kostengünstiger historischer Satelliten- und Luftbilddaten,
2. Einsatz nicht-proprietärer, offener wissenschaftlicher Softwaresysteme
3. Transferierbarkeit aufgrund geeigneter Methoden-Standardisierung

Die Studien zur sahelischen Landschaftsveränderung konzentrieren sich vornehmlich auf die Veränderung der Vegetation. Sie wurden in den beiden in *Fig. 1.2* dargestellten Testregionen des Lac Faguibine im Norden des Nigerbinnendeltas und im östlichen Deltarandbereich nördlich von Mopti durchgeführt.

Studie A diene der Entwicklung der zum multitemporalen Vergleich erforderlichen Methode der Präprozessierung historischer MSS-Daten. Basisverarbeitende Schritte wurden mit dem freien Geodatenverarbeitungssystem GRASS und Simulationen mit dem freien radiativen Transfercode STREAMER durchgeführt.

Studie B stellt eine innovative Methode zur semi-automatischen Extraktion von Sahelgehölzindividuen auf eingescannten historischen Luftbilddaten vor. Diese Methode wurde mittels des freien Bildverarbeitungssystems KHOROS entwickelt.

Beide Studien beinhalten das Problem des verfälschenden Bildrauschens. Im Fall der MSS-Analysen wurde es aufgrund sensor-technischer und atmosphärischer Effekte, im Fall der Luftbilddatenauswertungen durch die Analog-/Digital-Wandlung (Scannen) verursacht.

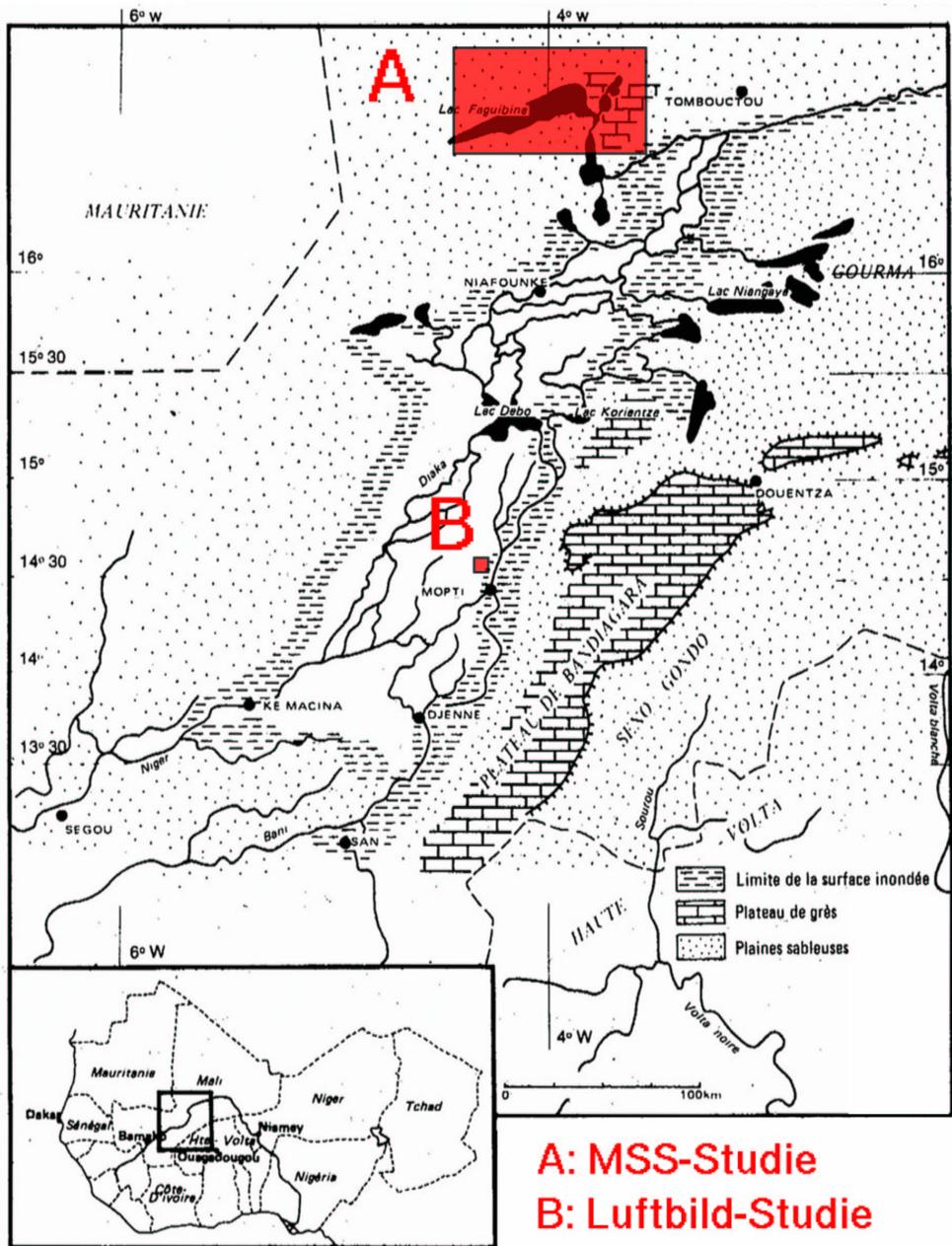


Fig. 1.2 Lokalisierung der Teststudien im Nigerbinnendelta

Kapitel II METHODEN ZUR AUSWERTUNG OPTISCHER SATELLITENDATEN

2.1. Optische Sensoren

Bei der optischen Fernerkundung, die die Sonne als Energiequelle und Strahlungsspektrum nutzt, unterscheidet man zwischen folgenden Aufnahmesystemen:

1. chemo–optische: Momentaufnahmen produzierende photographische Systeme
2. optisch–mechanische: zeilenweise abtastende Scanner–Systeme (z.B. MSS)
3. optisch–elektronische: zeilenweise Videobildaufnahme durch auf Halbleiter–Microchips fest installierten Sensorzeilen, die sog. Charge Coupled Device–Kondensatorketten (z.B. SPOT, MOMS etc.).

Diese Aufnahmesysteme können auf unterschiedlichen Trägerplattformen (Flugzeug, Raumfähre, Satellit, Raumstation) montiert sein.

Die Höhe der Umlaufbahn unterteilt die Satellitenaufnahmesysteme in:

- a) geostationäre oder äquatorumlaufende (Inklination $i = 0^\circ$), z.B. METEOSAT, GOES, TRMM. Sie nehmen aus einer Flughöhe von 36.000 km in frei wählbarem Rhythmus (Repetitionsrate bei MSG: alle 15 Minuten) Bilddaten auf.
- b) sonnensynchrone oder polarumlaufende (Inklination $i > 0^\circ$, Aufnahme bei hoher Neigung fast aller Breiten, bei niedriger Neigung nur der tropischen Breiten), z.B. TIROS, NOAA, NIMBUS, LANDSAT, SPOT etc.. Diese Satelliten bewegen sich in ihrer Umlaufbahn in ca. 700–1000 km Höhe und ermöglichen eine maximale Überfliegungsrate von ca. 16–18 Tagen.

Zur Untersuchung sahelischer Landschaftsveränderungen werden in diesem Kapitel Auswertungsmethoden auf der Basis von multitemporalem historischen Fernerkundungsmaterial aus dem optischen Spektralbereich des polar–umlaufenden, optisch–mechanischen Sensors Landsat –MSS dargestellt.

Eine Studie zur photochemisch–optischen Aufnahme erfolgt in Kapitel “III”.

2.1.1 Geschichte der optischen Satellitenbeobachtung

Bereits in den 50–er Jahren drang die elektronische Bildtechnologie aus den militärischen US–Verteidigungslaboratorien mit der Entwicklung des Fernsehgeräts in zivile Bereiche vor. Der zu dieser Zeit ebenfalls konzipierte erste multispektrale flugzeuggetragene Scanner M–7 favorisierte – zusammen mit der komplexen visuellen Interpretation seiner 12–kanaligen Bildprodukte sowie mit dem Aufkommen zunächst analoger, dann digitaler Computer – die elektronische Bildmessungs– und Bildverarbeitungstechnologie bis hin zur späteren Entwicklung des ersten LANDSAT–MSS Sensors.

Die eigentliche Satellitenfernerkundung begann mit dem Start der **TIROS**–Serie 1960 zur meteorologischen Beobachtung. In das gleiche Jahr fallen die Anfänge der US–Weltraumphotographie–Programme mit dem zur photographischen Spionage (intelligence photography) eingesetzten US–Satelliten **KEYHOLE** (s. dazu Kap. 3.4). Letzterer befindet sich bis heute im Umlauf. Wenig später lieferten auch die bemannten Satellitenflüge von **MERCURY** (1961–63), **GEMINI** (1965–66) und **APOLLO** (1968–72) mittels handgehaltener Kameras Photomaterial (FOWLER, 1996).

Im Jahr 1965 setzte die Chronologie der optischen Erdfernerkundung mit dem **LANDSAT**-Programm der NASA, speziell zur Beobachtung von Erdoressourcen (Earth Resources Survey, ERS) aus dem Weltraum, ein (CAMPBELL, 2002; LILLESAND & KIEFER, 2000; MIKA, 1997; <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/lpchron.html>, Stand:11.04.98):

Innerhalb dieses NASA-Programms interessierten sich US Geology Survey (USGS) und US-Department of Agriculture für Anwendungen in den Disziplinen Geologie, Hydrologie, Geographie und Kartographie. Im Jahr darauf trat das US-Department of Commerce zum ERS-Programm mit der Bildung einer umweltwissenschaftlichen Gruppe (Environmental Sciences Group) – innerhalb der Environmental Sciences Services Administration (Vorläufer von NOAA) – hinzu. Im Jahre 1966 wurden schließlich mittels flugzeuggestützter multispektraler Scanner-Befliegungen Vorstudien zum Einsatz des Earth Resources Technology Satelliten (ERTS) gestartet. Aus den Studien ging zusammen mit dem präzisere Spektraldaten aufnehmenden *Multispectral Scanner (MSS)* das Fernsehkamera-System *Return-Beam Vidicon (RBV)* hervor. Beide werden erstmalig am 23. Juli 1972 mit dem Trägersatelliten ERTS (LANDSAT-1) in Bahnlauf gebracht. In den darauffolgenden zwei Jahren beschloß die amerikanische Regierung, unter Zusicherung von NASA und US-Innenministerium zu einer kontinuierlichen Datenlieferung das ERTS-Programm im experimentellen Status bis zum Jahre 1979 weiterzuführen.

Anfang 1972 wird der erste der ERTS-Satellitenserie in Betrieb genommen, drei weitere MSS-Modelle folgen. Bis zum Jahr 1974 konnte ERTS-1 bereits über 100.000 Bildszenen vorweisen, die insgesamt 75% der globalen Festlandfläche abdeckten. 1975 wechselte die NASA den Namen des Satellitenbeobachtungs-Programms von ERTS zu LANDSAT.

Von 1972 bis 1983 befanden sich verschiedene Kombinationen der LANDSAT-Satelliten 1–3, bestückt mit den beiden Aufnahmekameras RBV (MSS-Kanäle 1–3) und MSS (MSS-Kanäle 4–7), im sonnensynchronen Orbit (14 Umläufe von jeweils 103 Minuten pro Tag). Innerhalb eines Jahres passierte der Satellit insgesamt 20 mal nach jeweils 18 Tagen (251 Umläufen) seine Ausgangsposition.

Die darauffolgenden LANDSAT-MSS Modelle 4 & 5 trugen ab 1982 erstmalig den höher raum- (30m) und spektral- (7 Kanäle je 8 bit) auflösenden Thematic Mapper (TM) an Bord. Der mit dem ersten Enhanced Thematic Mapper (ETM) bestückte LANDSAT-6 wurde am 05.10.1993 bei einem Fehlstart zerstört. LANDSAT-7 wurde am 15.04.1999 mit dem neuen Sensor „Enhanced Thematic Mapper Plus“ (ETM+) in Betrieb genommen und liefert seither Bilddaten des Umfangs von 3,8 GB pro Szene (MSS: ca. 30 Mb/ Szene).

Der Terra-Satellit **ASTER** ist derzeit die Nachfolge von Landsat 7, wobei sein Sensor weder nach einem dem Landsat ETM+ ähnlichen Betriebszyklus, noch einer ihm ähnlichen Bodenaufnahmekapazität konzipiert wurde (KOMAR et al., 1996). Ob wie geplant im Jahr 2005 der Start des bei der NASA in Entwicklung befindlichen Nachfolgesensors Landsat-8 mit dem Landsat Advanced Technology Instrument (LATI) geben wird, ist derzeit noch unklar (http://www.gisuser.com.au/SBN/4_16/4_16_Content.html, Seitenstand: 17. August 1998).

Der Erfolg des LANDSAT-Programms der 70er Jahre regte das Interesse anderer Nationen zur Entwicklung weiterer Erdbeobachtungs-Satellitensysteme an, wie z.B. zur Konstruktion des 1977 vom CNES in Paris, in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Nationen initiierte und am 22.02.1986 in Betrieb genommene **SPOT**-Systems. Die erste SPOT-Serie 1–3 wurde mit identischem Sensor, SPOT 4 & 5 mit veränderten, neuen Sensorsystemen bestückt. SPOT 5 liefert mittels der an Bord mitgeführten Stereo-Bildaufnahmetechnik seit April 2002 panchromatische Bilddaten mit 2,5 m Bodenauflösung, multispektrale Bilddaten in 10 bis 20 m Auflösung, eine tägliche Globalerfassung im 1 km-Bildraster und digitale Höhendaten mit einer horizontalen Auflösung von 10 m und einer vertikalen Auflösung von ca. 15 m (<http://www.spaceflightnow.com/news/n0109/27spot5>, Abfragestand 31.10.2001).

2.1.2 Analyse spektraler Signaturcharakteristika

Bei der optischen Erdfernerkundung wird die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlungsenergie von digitalen Sensoren bzw. bei der Orbitalphotographie auf analogem Filmmaterial erfaßt. Die Wechselwirkungen zwischen einfallender Strahlung und Bodenobjekt erzeugen je nach chemo–physikalischer Beschaffenheit des Bodenobjekts ein von der Wellenlänge abhängiges radiometrisch wie geometrisch differentes Objektreflexionssignal. Die vom Bodenobjekt reflektierten spezifischen Signalantworten werden in Signaturdiagrammen festgehalten. Insgesamt eignen sich fünf Signaturtypen zur Ableitung thematischer Informationen: Spektrale, textuelle, temporale, polarisations– und richtungsabhängige Signaturen.

Fig. 2.1 a) zeigt die spektralen Signaturdiagramme vier verschiedener Objekttypen für den Bereich der spektralen Kanalabgrenzungen des Landsat–Sensors MSS (und AVHRR) in idealisierter Form.

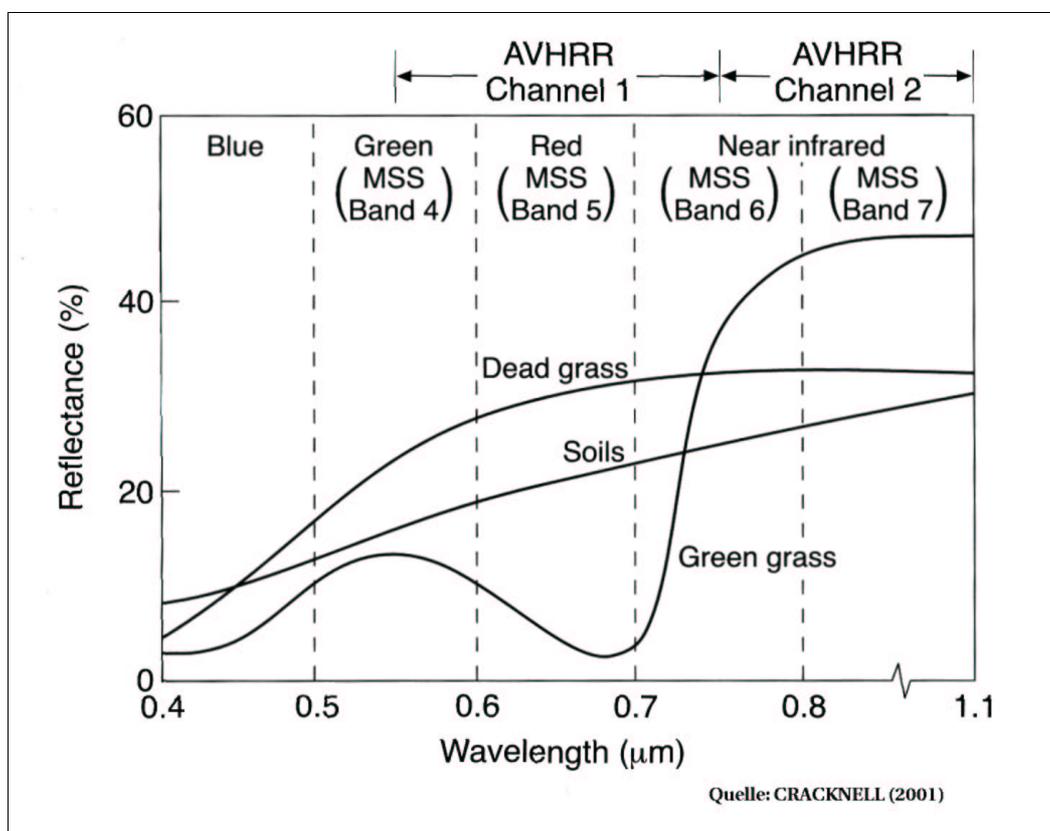


Fig. 2.1 a) Spektrale Reflexionssignaturen mit spektraler Position der MSS–Kanäle

Die Sensoren MSS 1–4 nehmen die Strahlungssignale in vier Kanälen einer normierten, spektralen Bandbreite – im Kanal 4 von 0,5 – 0,6 µm, im Kanal 5 von 0,6 – 0,7 µm, im Kanal 6 0,7 – 0,8 µm und im Kanal 7 von 0,8 – 1,1 µm – auf. Die Strahlungssignale werden in jedem Kanal in Form dimensionsloser digitaler Grauwerte (digital numbers) aufgenommen, die in den Kanälen 4–6 eine Spanne der Originalwerte von 0–127 (7 bit) und im Kanal 7 von 0–63 Originalwerten (6 bit) umfassen.

Photosyntheseaktive Vegetation (z.B. grünes Gras) reflektiert im grünen Spektralbereich (**Fig. 2.1 a**) sowie besonders stark in den beiden NIR–Kanälen 6 und 7 (typische V–Signaturkurve). Die in der Wachstumsruhe befindliche Vegetation (z.B. trockenes Gras) bei gleichzeitig höherer Reflexion im grünen wie roten Spektralbereich weist eine vergleichsweise geringe Signalantwort im NIR–Bereich auf.

Die totale Signalantwort ergibt sich aus der spektralen Signalreflexion, die von der richtungsabhängigen, anisotropen Signalreflexion überlagert wird (FORSTER, 1984). Aus der Beziehung von Oberflächenrauigkeit des Objekts zur Wellenlänge der einfallenden Strahlung lassen sich drei richtungsbestimmte, geometrische Reflexionstypen, (**Fig. 2.1 b**) unterscheiden:

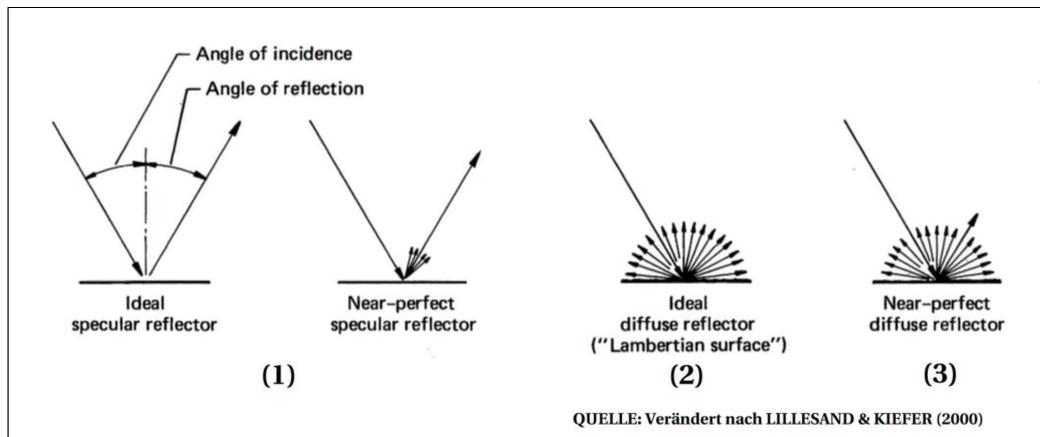


Fig. 2.1 b) Geometrische Objektoberflächen-Reflexionstypen

- (1) Gerichtete Reflexion (ideale oder fast-perfekte Spiegelung) tritt auf, wenn die Oberflächenrauigkeit des Bodenobjekts kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist.
- (2) Diffuse Reflexion (Lambert-Strahler) bewirkt eine annähernd gleichmäßige Streuung in alle Richtungen. Das Verhältnis des von einem Objekt zum Satelliten gerichteten Strahlungsanteils zu der gesamten in die Himmelskugel reflektierten Strahlung ergibt den Wert π^{-1} .
- (3) Gemischte oder anisotrope Reflexion (gerichtete mit diffuser Reflexion) repräsentiert das Reflexionsverhalten der meisten Bodenobjekte. Sie tritt im Fall einer, im Vergleich zur Wellenlänge der einfallenden Strahlung, größeren Objektoberflächenrauigkeit auf und zeichnet sich durch Streuung in bevorzugter Hauptrichtung aus.

Die drei Reflexionstypen, die in direkter Beziehung zur Pixelauflösung des Sensors stehen, lassen sich anhand eines Waldblätterdachs sehr anschaulich darstellen. Für einen Satellitensensor mit hoher Pixelauflösung, d.h. kleinem Sensorsichtfeld (instantaneous field of view, IFOV), kann eine wind- und wasserpflanzenunbeeinflusste Wasserfläche, aber auch ein Einzelblatt, eine glatte homogene Spiegeloberfläche (*Reflexionstyp 1*) simulieren.

Wird das räumliche Sensorsichtfeld vergrößert, d.h. die Pixelauflösung verringert, werden vom Sensor mehrere in verschiedene Richtungen positionierte Blätter als heterogene Oberflächenstruktur des Blätterdachs erfaßt. Dies entspricht dem statistischen Effekt der Lambertschen Reflexion (*Reflexionstyp 2*), der beispielsweise auch bei einer Schneefläche vorzufinden ist.

Eine gemischte Reflexion (*Reflexionstyp 3*) entsteht auf anisotropen Oberflächen, wie z.B. Eis, nacktem Boden oder Sandflächen.

Die Vegetationsdecke zeichnet sich durch das Auftreten sowohl der Spektral-, als auch der von Transmissions-, Mehrfachstreu- und Spiegelungseigenschaften bestimmten Anisotropiesignatur aus. Das Anisotropiesignal wird von der Pflanzenarchitektur und Bestandsstruktur bedingt und beeinflusst die Spektralinformation.

Die am Sensor im Bereich eines Pixels aufgenommene Signalantwort konstituiert sich – zusätzlich zum direkt vom Objekt stammenden Reflexionsanteil – aus zahlreichen am Boden wie in der Atmosphäre erzeugten parasitären Nebensignalen. Die am Boden erzeugten Mischsignale setzen sich aus der Mehrfach-Reflexion an benachbarten Objekten sowie der Strahlung außerhalb des Nadirs stammender Objekte zusammen. Die atmosphärischen Signalbegleiteffekte werden in Kapitel 2.2.6 explizit besprochen.

Auch Beleuchtung (Sonnenstand) sowie Sichtgeometrie der Satellitenszene sind an der Signalantwort eines Objekts in entscheidendem Maße beteiligt. Infolge von Schatten, die durch Bewölkung, unruhige Relieftopographie oder emporragende Geländeobjekte entstehen können, wird die Signalantwort eines Objekts unterschiedlich stark verfälscht.

Fig. 2.2 zeigt am Beispiel von NOAA–AVHRR–Daten die quantitative Veränderung der Reflexionswerte in Abhängigkeit der Einsatzzeit des Sensors und eines variierenden Sonnenhöhenwinkels.

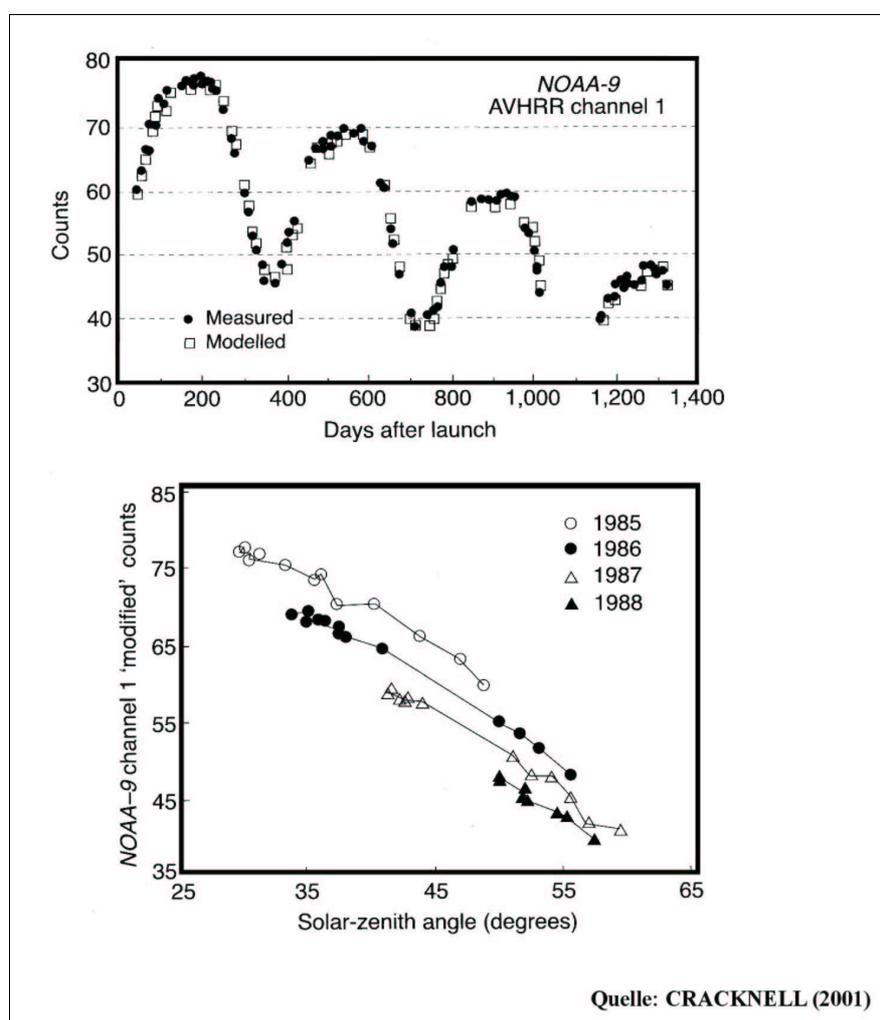


Fig. 2.2 Variation des Rückstrahlungsverhaltens in Abhängigkeit des Sonnenzenitwinkels (am Beispiel des Kanals 1, NOAA9–AVHRR)

Mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel (Periode auf der Nordhemisphäre vom 21.06 bis 23.12) nehmen die Beträge der am Satelliten gemessenen Grauwerte generell ab (*unterer Teil der Fig. 2.2*). In beiden Graphiken wird die zyklische Veränderung der Grauwerte im Jahresverlauf des Sonnenstands deutlich, wobei im oberen Teil der *Fig. 2.2* zudem eine stetige Abnahme der Grauwerte mit zunehmender Dauer des Sensoreinsatzes erkennbar wird, die in Kapitel 2.7 diskutiert wird.

Natürliche Oberflächen nähern sich bei hohem Sonnenstand überwiegend dem diffusen oder Lambertschen Reflexionstyp an. Aus der Sicht des Satellitensensors repräsentieren die meisten Vegetationsbedeckungstypen überwiegend den diffusen, Sandflächen hingegen den gemischten Reflexionstyp. Die spektralen Signaturen des diffusen Reflexionstyps hängen damit nicht von der Beobachtungsrichtung des Sensors ab. Hingegen erweist sich der gemischte Reflexionstyp z.B. Sand gegenüber Variationen des Sonnenhöhenwinkels wesentlich empfindlicher als der diffuse Reflexionstyp z.B. der Vegetation (Landsat-4 Handbook, 1984). Die bei anisotropen oder gemischt reflektierenden Objektoberflächen auftretende, unregelmäßig richtungsbestimmte Reflexion läßt solche Objekte empfindlicher als diffus reflektierende auf die Bestrahlungsrichtung reagieren. Dieser richtungsabhängige Effekt äußert sich durch eine vom Zentrum zum Rand des anisotropen Objekts mit dem Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel differierende Reflexionskomponente.

Fernerkundliche Auswertungen zielen derzeit darauf ab, die Ergebnisse der Signaturanalyse in vegetationspezifische Beurteilungsschemata einzuhängen. Anhand gemessener geobiophysikalischer und bestandsstruktureller Parameter wird eine physikalische Modellierung des Reflexionsverhaltens von Pflanzenbeständen versucht. Eine Beschreibung der objektspezifischen Strahldichteverteilung der reflektierten Strahlung L_r bei gegebener Strahldichteverteilung der einfallenden Strahlung L_e liefert die Reflexionsfunktion (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF) in der Dimension von 1/Steradian (KRIEBEL, 1978). Der in Steradian ausgedrückte Raumwinkel Ω einer Kugelkalotte ergibt sich aus dem Verhältnis des Raumwinkels Ω oder des Kugelkalottenquerschnitts zum quadrierten Radius (KRAUS & SCHNEIDER, 1988). Zur Korrektur der auftretenden richtungsabhängigen Effekte werden hochkomplexe Modelle eingesetzt. Simulationsanalysen zu bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktionen (BRDF) sind erst für die neue Generation von erdbeobachtenden Satelliten (z.B. Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR) der NASA/JPL auf EOS-AM1) notwendig, da dort Sensoren zum Einsatz kommen, die es ermöglichen, die Erde aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten. Die BRDF-Modellierung dient dort der Vergleichbarkeit von Aufnahmen aus verschiedenen Beobachtungswinkeln oder zur Normalisierung der Beleuchtungsgeometrie zwischen Sonne, Objekt und Satellit.

Die Kenntnis des Spektralverhaltens von Bodenobjekten ist in sahelischen Räumen insbesondere für Analysen der Überschwemmungsdynamik, der Agglomerationen, der Landnutzung, der Vegetation etc. von großem Interesse. Der Zustand eines Vegetationsbestandes läßt sich über Faktoren wie z.B. Entwicklungsstadium, Bestandsdichte und -höhe, Blattflächenindex, Chlorophyllgehalt angeben.

1990–1992 fand das HAPEX-Sahel Projekt (Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel), ein internationales Landoberflächen-Atmosphären-Beobachtungsprogramm im Westen der Republik Niger statt. Spektrometrische Gelände-, Flugzeug- und Satelliten-Simultanmessungen atmosphärischer Parameter sowie die Aufnahme von Bodenparametern über Testparzellen zielten auf die Quantifizierung energetischer Prozesse des Erdklimasystems in Beziehung zur Funktion der Ozeane, Land-, Eis- und Vegetationsbedeckungsflächen ab. Aus diesem Projekt sind keinerlei Veröffentlichungen von Signaturergebnissen radiometrisch-spektrometrischer Analysen für Objekte des Sahelraums hervorgegangen. Auch bleibt der Versuch einer Systematik absoluter Signaturdaten von Objekten am Erdboden aufgrund der zuvor angesprochenen Komplexität der Einflußparameter unmöglich. Die Pixelwerte eines Objekts gleicher spektraler Rückstrahlungseigenschaft weichen infolge direktonaler und atmosphärischer Einflüsse voneinander ab. Daher wird die Verwendung von Signaturen in der Erdfernerkundung lediglich in relativer Weise, d.h. zur groben Objekterkennung und -klassifikation, verwendbar.

In der meteorologischen Anwendung sind absolute Signaturdiagramme für

Klassifikationsansätze zwingend erforderlich. Atmosphärische Objekte (z.B. Wolken) lassen sich zwar in ihrer physikalischen Eigenschaft absolut definieren, sind jedoch Erscheinungen von nicht großer zeitlicher Dauer. Dagegen stellen Objekte am Erdboden vergleichsweise dauerhafte Erscheinungen dar, erweisen sich aber in ihrer physikalisch–chemischen Eigenschaft als wesentlich komplexer und verhindern damit die absolute Definition von Objektsignaturen.

Für die Vergleichsanalyse multitemporaler und multisensorieller Erdsatellitenbildprodukte sollte ein Bodenobjekt mit zeitlich unveränderter spektraler Eigenschaft im Datensatz nach Möglichkeit anhand seines Signaturdiagramms wiedererkennbar sein. Da dies in der Realität nicht gegeben ist, bleibt lediglich die Option eines relativen Bild–zu–Bild–Prozessierungsansatzes mit vorangehender relativer Bilddatenhomogenisierung.

2.2 Homogenisierung historischer LANDSAT MSS–Daten

Die visuelle Interpretation fernerkundlicher Bildprodukte ist gegenüber radiometrischen Artefakten weitgehend unempfindlich, da sich das menschliche Auge den durch das Luftlicht (d.h. durch die diffuse Reflexionsstreuung der Lichtstrahlung an Dunstteilchen) aufgehellten, bzw. verminderten Kontrastunterschieden auf dem Bildmaterial anzupassen vermag (ALBERTZ, 2001).

Besteht das Ziel jedoch in einer spektralen bildstatistischen Auswertung multitemporaler Bilddaten, können die Ergebnisse infolge sensor–radiometrischer und atmosphärischer Effekte (dort speziell durch die Richtungsabhängigkeit des Luftlichts als der auf einen Sensor wirkende Anteil der diffusen Himmelsstrahlung) stark verfälscht werden. Daher sind die originalen Bilddaten in radiometrischer Hinsicht sehr sorgfältig zu behandeln.

2.2.1 Zielsetzung und Hypothesen

Vor 30 Jahren, am 23.07.1972, startete die NASA den ERTS als ersten LANDSAT Satelliten. Das Material dieser ersten LANDSAT–Satelliten bietet unter den erdbeobachtenden Systemen den weitesten Rückblick in die jüngere Vergangenheit und somit geeignetes Datenmaterial zur Erstellung einer Datenbasis für multitemporale Langzeitvergleiche.

In den 70er Jahren, nach dem Start des ersten LANDSAT–Satelliten, waren die Rechenkapazitäten und Rechenleistungen von Computern (damals max. 128 KB RAM) noch recht schwach. In der Anfangszeit, in der beispielsweise bereits die bloße Visualisierung digitaler Bilddaten ein rechenaufwendiges Problem darstellte, wurden die Daten überwiegend in analog–photographischer Form ausgewertet. Radiometrische Informationen wurden daher kaum, jedenfalls nicht in quantitativer Form berücksichtigt. Die Sensibilisierung und das Verständnis für radiometrische Effekte kam erst im Laufe der Entwicklung der digitalen Auswertemöglichkeiten schrittweise auf.

Während die analog–visuelle Satellitenbild–Interpretation ohne die Betrachtung physischer Einheiten auskommt, basiert die digitale Bildanalyse ausschließlich auf solchen. Bevor eine Umwandlung der Satellitensignale in physikalische Meßgrößen vorgenommen werden kann, müssen auftretende Artefakte berücksichtigt werden, infolge von:

1. unterschiedlichen Sensorbedingungen
 - Abweichungen der Satellitenbahnparameter
 - Modifikation der Eigenschaften von Sensoren und Kalibrationslampen
2. Variationen der Einstrahlung (Sonnenwinkel/–stand)

3. Atmosphärischen Aerosoleffekten (Streuung und Absorption)

Zum anderen können Sensorsignale, selbst bei der Verwendung termingenauer Jahresdaten zusätzlich zu den vorgenannten instrumentbedingten und atmosphärischen Faktoren – durch saisonale Faktoren wie z.B. durch den Feuchtezustand des Objekts parasitiert werden (SINGH, 1989).

Multitemporale Klassifikationen der Landoberfläche oder auf spektraler Datenbasis basierte Extraktionen quantitativer Informationen erfordern die Kenntnis physikalischer Einheiten. Dies ist insbesondere auch bei der Verwendung von Daten verschiedener Sensoren mit unterschiedlicher räumlicher und spektraler Auflösung unerlässlich. Jeder Sensor weist eine spezifische Beziehung zwischen den dort aufgenommenen Grauwerten und ihrer physikalischen Einheit der Strahlungsdichte (radiance) auf. Insbesondere bei langen Beobachtungszeiträumen tendieren die jeweils in unterschiedlicher Weise radiometrisch kalibrierten Sensoren sich zu verändern (MARKHAM & BARKER, 1987).

Multitemporale Untersuchungen zur Identifikation von ausschließlich auf Bodenobjektveränderung zurückführbaren Signalantworten erfordern die Berücksichtigung der jeweiligen atmosphärischen Aufnahmesituation und der durchschnittlichen Sensorkanalwerte. Am Beispiel der multitemporalen MSS-Szene aus der nördlichen Region des Nigerbinnendeltas (Lac Faguibine) soll die Sensibilität der radiometrischen Sensorwerte gegenüber atmosphärischen Effekten und damit die Relevanz einer Korrektur für multitemporale Analysen untersucht werden. Ziel ist es, eine standardisierte Prozedur zur Präprozessierung von Daten unterschiedlicher MSS-Sensoren zu konzipieren, die trotz einer nachträglich nicht realisierbaren verifizierenden Signalrestitution im Gelände Dauerbeobachtungs-Analysen von geophysikalischen Landschaftsparametern auf multitemporalen und multisensoriellen historischen MSS-Satellitendaten ermöglichen.

Auf historischem Datenmaterial basierte Analysen sind jedoch grundsätzlich mit folgenden Problemen verbunden:

1. Eine retrospektive Reproduzierbarkeit von Bodenkontrollinformationen ist nicht möglich.
2. Stützende Zusatzdaten (radiometrische Vorkenntnisse) fehlen ebenso wie zeitsynchrone Beobachtungen.
3. Die ehemaligen weichen in ihrer technischen Ausführung von den aktuellen MSS-Sensormodelle ab.

Gezielt geht es bei der Untersuchung um die Betrachtung folgender Hypothesen:

1. Bei den Prä-Prozessierungsverfahren helfen die atmosphärische und radiometrische Korrektur zur Eliminierung von Artefakten in Folgeberechnungen (z.B. Bildobjekt-Indizes, Klassifikationen etc.)
2. Die Zeitinstabilität des Sensors kann einen erheblichen Fehler in die Sensor-Meßdaten einbringen.

Der zu entwickelnde Ansatz versucht einer Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Quantifizierung fernerkundlich zu beobachtender Veränderungsphänomene gerecht zu werden:

1. anhand eines präzisen, multitemporalen und multisensoriellen Vergleichs
2. zum beispielhaften Aufzeigen der Grenzen digitaler Erfassung von Veränderungsphänomenen.

Der hier entwickelte Ansatz erhebt Anspruch auf Transferierbarkeit einer exemplarisch experimentierten Methode auf andere, ähnlich geartete semiaride Sahelregionen zur Untersuchung der anthropogenen contra natürlichen Einflußkomponente.

2.2.2 Analyse des Forschungsstands

Die allererste satellitenbasierte „change detection“-Studie wurde im astronomischen Bereich zur Detektion von Veränderungen der Position und Helligkeit von Sternen verwirklicht (MENZEL, 1970). Die ersten Studien auf MSS-Datenbasis (MASRY et al. 1975) beschränkten sich weitestgehend auf die visuelle Interpretationsauswertung von digital erzeugten Farbkompositen, bzw. von rein analog reproduzierten panchromatischen Diapositiven oder Negativ-Kontaktabzügen. Zum damaligen Stand der Computertechnik waren bereits einfache Integerrechnungen, wie z.B. einfache Klassifikationen, möglich. Die Betrachtung und Verarbeitung physikalischer, als Fließkommazahlen vorliegender Sensormesswerte setzte erst in den 80er Jahren mit der Entwicklung leistungsfähigerer Computersysteme ein (MARKHAM & BARKER, 1987; PRICE, 1987).

a) Forschungsentwicklung der Methoden zur atmosphärischen Korrektur

Die Untersuchung atmosphärischer Partikel begann bereits in den 60er Jahren mit den ersten, ursprünglich auf die Quantifizierung kosmischen Staubs ausgerichteten Weltraumprogrammen (SCHÜTZ, 1985). Die Korrektur atmosphärischer Artefakte in speziellen Satellitendatenserien der 70-er Jahre bleibt aufgrund der bereits im vorhergehenden Kapitel 2.1.2 dargelegten Gründe eine stets anhaltende Schwierigkeit (HALL et al. 1991). Obwohl die Theorie der atmosphärischen Strahlungseffekte bereits seit den 60-er Jahren (ÄNGSTROM, 1961) bekannt ist, wurde eine rechnerische Modellierung dieser Effekte erst zwanzig Jahre später mit der Entwicklung der Computertechnik realisierbar. Seit den 80er Jahren resultierten Forschungsbemühungen im Aufkommen zahlreicher radiativer Computer-Transfercodes (s. Kapitel 2.2.6) zur Schätzung der atmosphärischen Streuungs- und Absorptionseffekte (DAVE 1978; KNEIZYS et al. 1983 & 1988; TANRÉ 1990). Die Verwendung solcher Computerprogramme für absolute atmosphärische Datenkorrekturen erfordert a priori nicht nur die Kenntnis der Sensorkalibrationsparameter, sondern auch die zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten existierenden atmosphärischen Kennwerte zu u.a. vertikalen Aerosol- (horizontale Sichtweite) und Wasserdampfgehaltsprofilen oder molekularer Gaskomposition. Diese historischen Daten sind jedoch gerade für die Aufnahmezeitpunkte der ersten Sensorsysteme nicht erhältlich.

Um die atmosphärischen Artefakte in den digitalen Bildprodukten dennoch reduzieren zu können, wurden zunächst Bildtransformationsmethoden entwickelt. KAUTH & THOMAS stellten 1976 auf der Basis von MSS-Daten (CRIST & CICONE, 1984 für TM-Daten) eine solche auf einer Hauptkomponentenanalyse basierte Transformation vor, die aus den vier MSS-Kanälen neue Objektkanäle hervorbringt. Einen dieser Objektkanäle stellt der 'Tasseled Cap Greenness Index' dar, der –ähnlich dem NDVI– die Summe der visiblen und NIR-Kanäle gegenüberstellt, um Regionen hoher Vegetations- bzw. Chlorophyllkonzentration mit hohem Vegetationsbedeckungsanteil, hohem Blattflächenindex (LAI) oder hohem Anteil an frischer Biomasse hervorzuheben.

Die abgeleitete Tasseled Cap Atmospheric Correction sieht die Erzeugung einer modellsimulierten vierten Tasseled Cap-Komponente, dem TC4-Trübungs kanal vor (inklusive der dazu notwendigen Vegetationsmaske und eventuellen Wolkenmaske). Anhand dieses Trübungs kanals wurde eine Korrekturfunktion aus der Beziehung zwischen den am Sensor für unterschiedliche horizontale Sichtweiten simulierten Strahlungswerten und den Parametern zur Streulicht- und Absorptionskorrektur ermittelt.

Folgestudien (DAVE 1980 & 1981; JACKSON et al. 1983) belegten jedoch, daß solche Bildtransformationen zwar generell atmosphärische Artefakte reduzieren können, jedoch des ungeachtet eine signifikant verfälschende Bild-zu-Bild Variabilität beibehalten.

Aus der Motivation der komplexen atmosphärischen Korrektur heraus entwickelten sich alternative Ansätze (HALL et al. 1991), die eine empirische Schätzung der atmosphärischen Beeinflussung direkt aus den Strahldichtewerten (radiance) ausgesuchter Objekte in der

Bildszenen und ohne in situ-Messung atmosphärischer Parameter vorsehen (s. Kap. 2.2.6.1). Diese Methodenansätze berücksichtigten jedoch nicht die Problematik der Sensor-Drift (s. Kap. 2.2.5.1).

b) Anwendung von Methoden zur Datenhomogenisierung in MSS-Langzeit-Fernerkundungsstudien

Nachfolgend wird eine chronologische Auswahl an Forschungsstudien im Sahel auf der Basis von MSS-Daten vorgestellt, vornehmlich aus dem Gebiet des Nigerbinnendeltas. Die hier ausgewählten Studien repräsentieren zum einen die fernerkundliche Forschungsaktivität im westafrikanischen Sahel, belegen zum anderen deutlich den durch sensor- und computertechnische Entwicklung gelenkten Forschungsfortschritt der Methoden zur erdbeobachtenden Satellitenbilddatenauswertung.

Das 1972 von DGHE (Mali), ORSTOM (Paris) & BDPA (Paris) gestartete Projekt 'SAPHYR' zielte auf die hydrologische Untersuchung des Nigerbinnendelta-Einzugsgebiets ab. Speziell sollten die Ursachen für Abflußanomalien sowie die Evolution der Vegetation in Relation zur Überschwemmungsvariation auf der Basis multitemporaler MSS-Farbkomposite ausgewertet werden. Zur Schätzung der Wasserflächenausdehnung und des Biomassegehalts wurde eine multitemporale Datenbasis von fünf digitalen MSS-Szenen akquiriert. Unter Zuhilfenahme von Geländebeobachtungen wurde ausschließlich eine visuell-farbbasierte Klassendiskriminierung an Wasser- und Überschwemmungsflächen realisiert (BIED-CHARRETON et al., 1977). Ergebnisse und Projektausgang bleiben insgesamt unbekannt.

Im Jahre 1980 veröffentlichte COINER (University of New York) einen für diese Zeit recht progressiven rechnerischen „change detection“-Ansatz auf der Basis multispektraler digitaler MSS-Daten des östlichen Nigerbinnendeltas. Bei seinem bildstatistischen Ansatz zur Detektion von Vegetationsveränderungen entwickelte er die drei spektralen Indikatoren Kovarianz und Korrelation der MSS-Kanäle 5 und 7 sowie Varianz mittels des ersten Eigenwerts zur multitemporalen Erfassung des Vegetationsstatus. Ohne Geländeverifikationen anführen zu können, vermutet COINER selbstkritisch eine Überbewertung seiner Vegetationsdynamik-Ergebnisse. Diese führt er auf das Fehlen geländevalidierter Index-Klassengrenzen oder aber auf die – insbesondere in Bereichen mit geringem Vegetationsbedeckungsgrad – gegenüber dem menschlichen Interpretieren möglicherweise sensitivere Reaktion des Vegetationsindex zurück. Zum derzeitigen Stand sind vielmehr atmosphärische und radiometrische Ursachen für die verfälschten Analyseergebnisse der zuvor vom Autor nicht homogenisierten MSS-Szenen zur Debatte zu stellen.

Das 'JOLIBA Project' des EEC Joint Research Centre (Ispra, Italien), erarbeitete in den Jahren 1980/81 mit einer Landsat MSS-Szene, einer RBV-Szene sowie einer SPOT-Simulationsszene im multitemporalen Vergleich eine Reiserntevorausschätzung im Niger-Bani-Gebiet des zentralen Nigerbinnendeltas. Zur Inventarisierung und Erkennung der Ausbreitung von Reisflächen wurde eine visuelle Interpretation des Datenmaterials mit einer digital überwachten Klassifikation kombiniert. Eine visuelle Luftbildinterpretation brachte eine Ausgrenzung der erntebereiten Reisflächen hervor. Mittels der Maximum-Likelihood-Klassifikation wurden Wasser-, Reis-, Trockenfelddbau- und Savannenflächen unterschieden (BERG, 1981; BERG & GREGOIRE, 1982; BERG 1984). Die erzielte hohe Klassifikationsgenauigkeit von ca. 90 % für die SPOT-Daten erscheint allerdings äußerst zweifelhaft. In den Untersuchungen werden weder der Einsatz verschiedener Bildaufnahmesysteme, noch atmosphärische und sensorbedingte Einflusskomponenten berücksichtigt. Dokumente zum geplanten Folgeprojekt 1984–87 existieren nicht.

Zur Detektion saisonaler Oberflächenveränderungen in der Republik Niger war die

Entwicklung, Bewertung und Anwendung verschiedener einfacher Bildverarbeitungsprozeduren auf MSS-Datenbasis Gegenstand einer Studie, welche als Teil eines Sahel-Langzeit-Hilfsprogramms der BGR (Hannover) in Kooperation mit dem Bundesministerium für Wirtschaftliche Entwicklung realisiert wurde. Unter Berücksichtigung atmosphärischer Parameter wurden Bildratios errechnet, die gleichzeitig den Ausgleich unterschiedlicher Sonnenstände beinhalten. Diese multitemporalen, zusätzlich als Schwellenwertbilder ausgegeben Ratio-Ergebnisse wurden als dynamische Ratiobilder in Form von Falschfarben-Kompositen visualisiert und visuell interpretiert, jedoch nicht quantifiziert. Die Autoren weisen kritisch auf die Hauptproblematik einer eingeschränkten spektralen Klassifizierbarkeit der Vegetation aufgrund des Auftretens raumaufhebungsbedingter Objektmischsignale hin (KIRCHHOF et al., 1984).

Besonders nachdenklich stimmt eine Studie von BOSSARD & GUYOT (1987) Ende der 80-er Jahre, d.h. 15 Jahre nach dem Start des ersten LANDSAT-1 Satelliten. In einer Zeit bereits digital fortgeschrittener Bildanalysetechniken wird die zweifelhafte Methode einer analog-visuellen, mono- bzw. stereoskopischen Bildinterpretation von LANDSAT MSS-Quicklooks, d.h. Bildszenen verminderter Pixelauflösung (hier im Reproduktionsmaßstab von 1:1,8 Mio.) favorisiert. Gegenstand der Studie war die Erfassung von Wasserstandsschwankungen und -anomalien im Gebiet des Lac Faguibine sowie Ausbreitungsstadien von Buschfeuern in Guinea-Bissau. Quantifizierte Ergebnisse sind nicht erkennbar.

Eine weitere Studie wurde zur Erfassung der Vegetationsdynamik in Mali mittels analoger, rein visueller Interpretation bi-temporaler MSS-Farbdiaapositiven unternommen. Die nicht quantifizierten, mittels dieser Methode nicht eindeutig nachvollziehbaren Resultate, konstatieren insbesondere im Bereich des südsahelisch-nordsudanischen Übergangs eine Ausdünnung geschlossener Gehölzstrukturen (KUBEROW, 1990).

Die Bewertung von Degradationsobjekten und ihrer Entwicklung im Bereich des zentralen West-Sahels wird in einer weiteren Studie der Universität Casuarina (Australien) beleuchtet. Die durch Geländedaten gestützte, rein analog-visuelle Interpretation bi-temporaler MSS-Farbfilmpositive diente zur Identifikation von Degradationsobjekten und ausgedünnten Weideflächen. Die visuellen Auswertungsergebnisse konstatieren vorwiegend im Bereich des Ost-Sahels hydrologisch induzierte Erosionsmuster und weisen im west-sahelischen Raum auf verstärkte Sandverwehungen hin (MATHESON & RINGROSE, 1994).

Die in beiden vorgenannten Studien erzielten leider keine quantifizierten Resultate und sind für Folgestudien nicht verwendbar.

Eine weitere Untersuchung von GOÏTA & ROYER (1992) analysiert die Variation der Oberflächenparameter Albedo und NDVI im Nordosten von Mali (Nordsahel), auf der Basis multisensorieller MSS-Daten (Landsat 1, 2, 3 & 5). Ihre applizierte Methode umfaßt die radiometrische und atmosphärische Korrektur sowie eine Interkalibration der verschiedenen Sensortypen. Die Korrelation zwischen Albedo-, NDVI- und Niederschlagswerten erweist sich als gering. Dennoch geben die Autoren an, aufgrund anthropogenen Vegetationsdruck einen zunehmenden Desertifikationstrend im südlichen Teilbereich des MSS-Szenenausschnitts aus der Albedo-Zunahme und NDVI-Abnahme, gestützt durch eine Maximum-Likelihood-Klassifikation der Landschaftseinheiten, schlußfolgern zu können. Eine aktuelle Studie zur Thematik von ESTEVE et al. (1998) beruht zur Erfassung der Gehölmortalität in den semi-ariden Räumen Burkina Fasos ebenfalls auf der Auswertung von MSS-Datenreihen. Die mittels des DART-Modells (discrete anisotropic radiative transfer) exerzierte atmosphärische Korrektur basiert auf einer Simulation von spektralen, bi-direktionalen Albedo-Bildern der jeweiligen Satellitensicht- und Einstrahlungsbe-

dingung. Die Autoren bemerken kritisch die starke Beeinflussbarkeit des NDVI durch die wenige Tage vor Aufnahmedatum gefallenen Niederschläge und damit die nur eingeschränkte Aussagekraft in Bezug auf die Vitalität des Ökosystems. Trotz unternommener Labormessungen radiometrischer Strahlungseigenschaften von Vegetation und Boden mittels Kollimator und Goniometer kommen sie zum Schluß, daß der NDVI nicht ohne die Berücksichtigung von Echtzeit-Geländedaten mit der Gehölzbedeckung korreliert werden kann.

Bereits Mitte der 70er Jahre stellten verschiedene Studien (OTTERMAN, 1974; CHARNEY, 1975) einen durch Albedozunahme induzierten Vegetationsverlust in Zweifel.

Die dokumentierte Auswahl zeigt die anfänglich aus technischen Gründen analog-visuell betriebene, damit jedoch subjektive und nicht reproduzierbare Auswertung der ersten MSS-Satellitendaten. Erst mit dem Einsatz der digital-quantitativen Analyse lassen sich standardisierte Datenerfassungsverfahren entwickeln. Jedoch taucht mit der digitalen Verwendung multitemporaler Satellitendaten die Inhomogenität dieser Daten auf. Damit einhergehend wird die Betrachtung physikalischer Sensoreinheiten zwingend. Trotz der bereits Ende der 80er Jahre vorliegenden ersten Computer-Atmosphärenmodelle wird die Korrekturproblematik im Bereich der erdbeobachtenden Fernerkundung noch weitgehend ignoriert. Der im meteorologischen Bereich lang bekannte Wissensstand (CHANDRASEKHAR, 1950) um Relevanz und computertechnische Bearbeitung atmosphärisch-radiometrisch bedingter Satellitenartefakte scheint erst ab den 90-er Jahren in die erdbeobachtende Wissenschaftswelt, z.B. für die globale Erdbeobachtung auf der Datenbasis von METEOSAT (ROSEMA & FISELIER, 1990 etc.) oder NOAA-AVHRR (LAMBIN, 1996 etc.), vorzudringen.

Zur Erforschung der Beziehung zwischen physikalischen Aerosol-Eigenschaften (Größe, Form, Brechungsindex, atmosphärische Konzentration) und atmosphärischem Lichtstrahlungsverhalten wurden während des HAPEX-Projekts u.a. Messungen durchgeführt zur:

1. *aerosoloptischen Dicke* als indirekter Indikator für Größe und Konzentration der Aerosole in einer definierten Luftsäule,
2. *Albedostreuung* mittels der durch Partikel erzeugten Lichtbrechung
3. *Phasen-Funktion* mittels Messung des von einem Partikel gestreuten Lichts als Funktion von Winkel und Richtung der ursprünglichen Wellenausbreitung

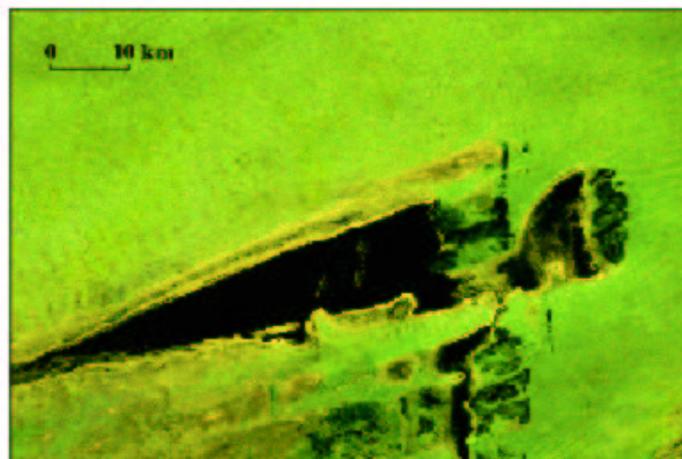
Die Beziehung zwischen Strahlung und Atmosphäre hat sich als komplex und ohne lokal und zeitlich simultan zum Satellitenüberflug vorhandener Messwertreferenzen rechnerisch als äußerst schwierig erwiesen. Zur atmosphärischen Beeinflussung von Signalen erdbeobachtender Satelliten in semi-ariden Räumen, speziell des Sahels, konnten weder standardisierte, noch transferierbare Analysemethoden hervorgebracht werden.

Die in Sahelgebieten eingesetzte digitale Fernerkundungstechnik konzentrierte sich bis dato überwiegend auf die global-meteorologische Arbeitsweise, welche zumeist ohne Geländereferenz auskommt (PRINCE, 1995).

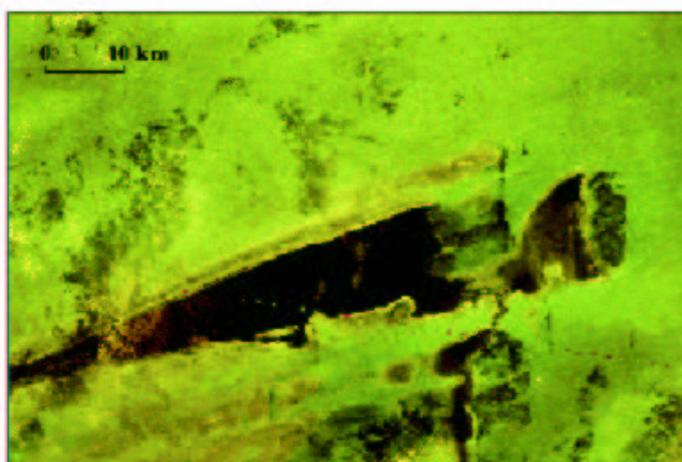
2.2.3 Präsentation des Testgebiets und der Testdatenbasis

Die Untersuchungen zur Datenhomogenisierung basieren auf multitemporalen LANDSAT-MSS-Szenen aus dem Bereich der nördlichsten Erstreckung des Nigerbinnendeltas, dem Seengebiet um den Lac Faguibine bei ca. 16° 50' nördlicher Breite und 4° 00' westlicher Länge (*Fig. 2.7*).

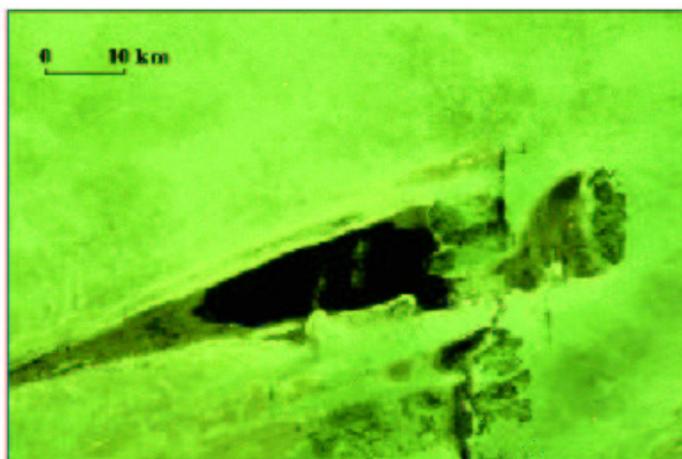
03.12.1972
MSS1



08.02.1974
MSS1



03.02.1982
MSS 3



	Kanal 4 (0,5 - 0,6 μm , Blau/Grün)
	Kanal 5 (0,6 - 0,7 μm , Rot)
	Kanal 7 (0,8 - 1,1 μm , NIR)

Design: S. HESS (2002)

Fig. 2.3 Multitemporale Serie der MSS-Falschfarbenkomposite (212/48) für den Gebietsextrakt des Lac Faguibine (1100 [w] x 800 [h])

Das multitemporale MSS-Datenset (*Fig. 2.3*) erfasst im unteren Szenenrandbereich das Seengebiet des Lac Faguibine inmitten ausgedehnter arider Dünenfelder. Besonders im nordöstlichen Bereich der Szenenausschnitte werden parallele, in Nordost-Südwest-Richtung verlaufende Longitudinaldünen erkennbar. Diese sich besonders in sandreichen Gebieten durch starken, beständigen Wind bildenden fossilen Dünen ("dunes rouges") gehen möglicherweise auf jungpleistozänen Ursprung zurück (BARTH, 1986). Nordwestlich des Lac Faguibine befinden sich zahlreiche wellig geformte Querdünen, die vermutlich in rezenter Zeit durch den mit Saharasand beladenen Harmattan geformt wurden.

Inmitten dieser großen Sandfelder bettet sich das linkseitig des Nigers, ca. 100 km westlich von Tombouctou, gelegene Seengebiet ein; bestehend aus insgesamt vier miteinander verbundenen und zwei isolierten Einzelseen. Das Seenkonglomerat wird im Detail auf einer geometrisch nicht entzerrten, aus einer Höhe von knapp 400 km aufgenommenen, Niedrigschräg-Weltraumphotographie vom 06.04.1991 (*Fig. 2.4*) erkennbar.



Fig. 2.4 NASA-Orbitalphotographie des Lac Faguibine

Es lassen sich im Ausschnitt der größte, markant als spitzwinkliges Dreieck geformte, fischreiche Lac Faguibine, die beiden östlich gelegenen Lac Komango und Lac Gouber sowie der sich über den Lac Takara weit nach Süden erstreckende Lac Télé erkennen. Die Orbitalaufnahme der *Fig. 2.4* von Anfang April 1991 zeigt die Seen zu Ende der Trockenzeit im Zustand minimaler Wasserfüllung.

Während die fünf vorgenannten Seen Zuflußwasser über die Anbindung an das Nigersystem

erhalten, werden die beiden weiter südlichen, von den MSS–Szenenausschnitten nicht mehr erfaßten isolierten Einzelseen – der nierenförmige Lac Oro sowie der östlich von ihm gelegene Lac Fati – durch Überschwemmungsfluten des Nigers gespeist. Der linksseitige Nebenfluß des Nigers, Tassakan, liefert dem Lac Faguibine über den Lac Télé Zuflußwasser. Die Anordnung der Seen wird nach Osten hin durch an die Oberfläche tretende resistente Felserrhebungen von z.T. schieferdurchsetztem Sandstein begrenzt.

BARTH (1975 & 1986) sieht das Seengebiet um den Lac Faguibine als Rest eines einst, das gesamte Nigerbecken einnehmenden und weit bis in die Sahara nach Norden reichenden riesigen Binnen–Endsees. Dieser wurde vermutlich zu Ende der Pluvialzeit vor ca. 8000 Jahren bei der Schlucht von Tossaye durch den Niger–Unterlauf angezapft (VAGELER, 1944). Eine andere Hypothese bringt die Entstehung des Sees mit Deflationsprozessen in Zusammenhang. Die Trogformen der heutigen Seen wurden demnach durch die vorherrschend nordöstlichen Winde ausgeblasen. Das dazu nötige Ausriebmaterial wurde demnach vom Wind an der Leewand der ca. bis zu 500 m steilaufragenden Sandsteinfelsen abgeschürft. In rezenter Zeit wurden diese ausgehöhlten Trogformen schließlich mit Überflutungswasser des Nigers aufgefüllt (http://www.eos.ncsu.edu/eos/info/mea/mea101_info/NASA_by_landform/landforms/j_deserts/10_Mali_Niger_River.html).

Das gesamte Seengebiet befindet sich im Nordsahel mit durchschnittlichen Jahresniederschlägen von ca. 200 mm im langjährigen Mittel. Nachfolgende **Fig. 2.5 a** zeigt die mittleren Jahresniederschläge und –temperatur ab 1897 im hundertjährigen Verlauf sowie in **Tab. 2.1** zusätzlich die Luftfeuchte von 1951–1997 für die ca. 100 km östlich des Lac Faguibine gelegene Klimastation Tombouctou (Stations–Nr. 66123) auf.

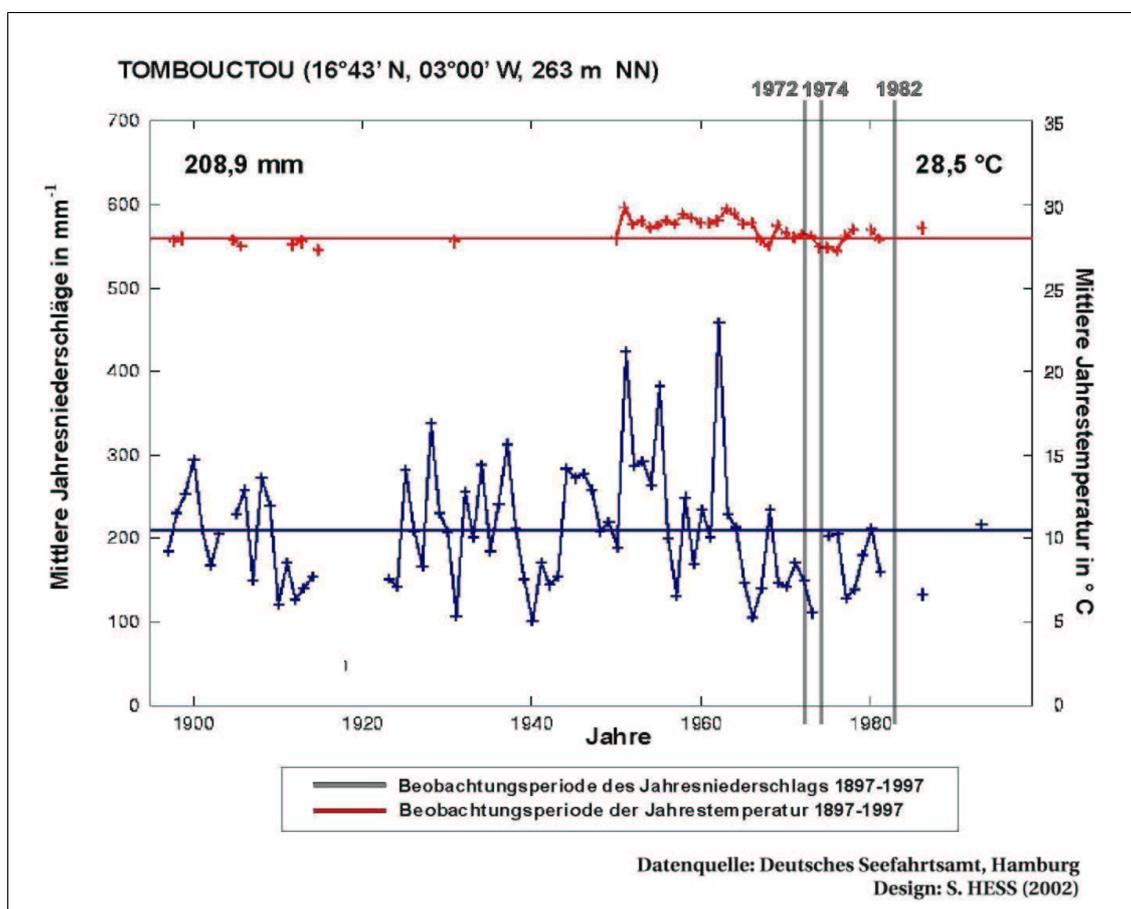


Fig. 2.5 a) Mittlere annuelle Niederschläge und Temperatur der Klimastation Tombouctou

Jahr		1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	
Niederschlag im Jahresmittel	mm ⁻¹	186,0	231,0	254,0	295,0	211,0	168,0	207,0	999	230,0	259,0	150,0	274,0	240,0	121,0	171,0	128,0	141,0	155,0	999	999	
Temperatur im Jahresmittel	[°C]	999	28	28,2	999	999	999	999	999	28,1	27,7	999	999	999	999	27,8	28	999	27,5	999	999	
Dampfdruck im Jahresmittel	[1/10 haP]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Relative Feuchte im Jahresmittel	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Jahr		1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	
Niederschlag im Jahresmittel	mm ⁻¹	999	999	999	999	999	999	152,0	143,0	283,0	210,0	167,0	339,0	231,0	208,0	108,0	257,0	202,0	289,0	186,0	242,0	
Temperatur im Jahresmittel	[°C]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	26,9	999	28	999	999	25	999	999	
Dampfdruck im Jahresmittel	[1/10 haP]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Relative Feuchte im Jahresmittel	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Jahr		1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	
Niederschlag im Jahresmittel	mm ⁻¹	314,0	213,0	152,0	101,0	171,0	145,0	155,0	284,0	273,0	278,0	259,0	209,0	220,0	190,0	424,0	287,0	293,0	265,0	383,0	201,0	
Temperatur im Jahresmittel	[°C]	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	28,2	30	29	29,2	28,8	28,9	29,2	
Dampfdruck im Jahresmittel	[1/10 haP]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Relative Feuchte im Jahresmittel	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	999	999	37	36	36	
Jahr		1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	
Niederschlag im Jahresmittel	mm ⁻¹	132,0	250,0	170,0	235,0	202,5	460,0	230,0	214,0	147,5	106,0	141,0	235,0	147,0	143,0	171,0	150,0	112,0	999	203,0	206,5	
Temperatur im Jahresmittel	[°C]	29	29,6	29,4	29,1	29,1	29,2	29,9	29,6	29	29,1	28	27,7	28,9	28,5	28,2	28,4	28,3	27,6	27,6	27,4	
Dampfdruck im Jahresmittel	[1/10 haP]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	12,7	12,9	11,9	13,2	999	999	12,4	14,1	
Relative Feuchte im Jahresmittel	[%]	37	38	39	37	35	37	36	37	39	38	999	?	?	?	?	?	999	999	?	?	
Jahr		1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Niederschlag im Jahresmittel	mm ⁻¹	129,0	140,0	180,0	212,5	161,0	999	999	999	999	134,0	999	999	999	999	999	999	217,0	999	999	999	999
Temperatur im Jahresmittel	[°C]	28,3	28,7	999	28,7	28,1	999	999	999	999	28,8	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
Dampfdruck im Jahresmittel	[1/10 haP]	13,2	13,5	12,3	13,4	13,2	999	999	999	999	12,9	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999
Relative Feuchte im Jahresmittel	[%]	?	?	?	?	?	999	999	999	999	?	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999	999

''999'' = kein Datenwert vorhanden
 ''-'' = noch nicht aufgenommen

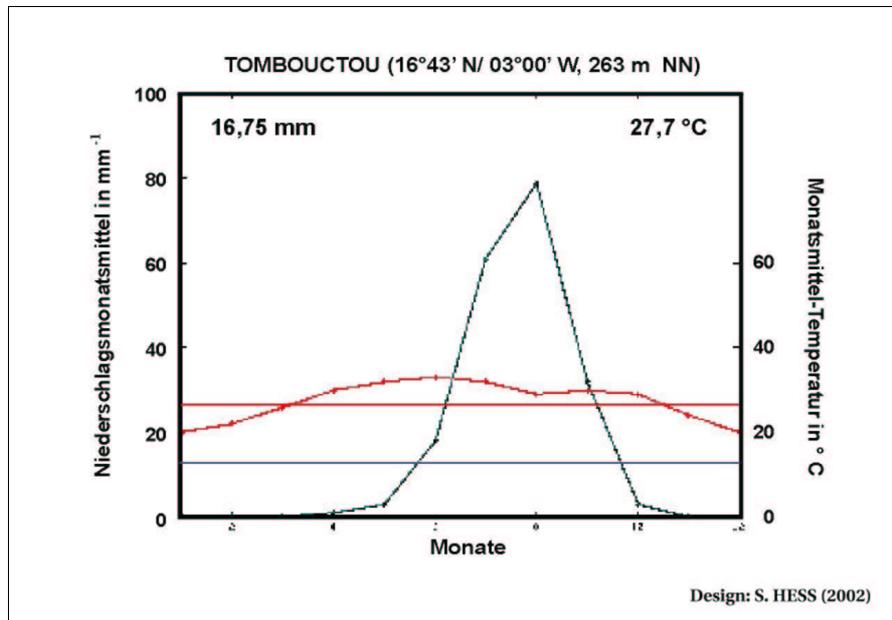
Datenquelle: Deutsches Seefahrtsamt, Hamburg

Tab. 2.1 Langzeitserie annueller Klimawerte für die Station Tombouctou

Das Luftfeuchtemaß hat ab 1968 einen Wechsel der Messmethode von der relativen Luftfeuchte in Prozent (%) hin zum Wasserdampf- oder Wasserdampfpartialdruck in Hekto Pascal (hPa) erfahren. Da die relative Feuchte durch das Verhältnis von Wasserdampfpartialdruck zu Sättigungsdampfdruck bei jeweiliger Temperatur definiert ist, kann zu Vergleichszwecken der Wert der relativen Feuchte aus dem physikalisch zum Sättigungsdampfdruck korrespondierenden Temperaturwert invers der psychometrischen Tabelle entnommen werden.

In den Zeitreihen fallen insgesamt die zahlreichen Datenlücken, insbesondere für die Temperatur zwischen 1897–1950 sowie seit Anfang der 80–er Jahre für Temperatur und Niederschlag auf. Von den drei sich in die Langzeit–Klimadatenreihe einfügenden MSS–Aufnahmetermenen der Jahre 1972, 1974 und 1982 liegen so lediglich für das Jahr 1972 alle Daten der ausgewählten Klimaparameter vor. Auf eine Akquirierung einer nachführenden, die Klimasituation ab dem Jahre 1998 belegenden Klimadatenreihe wurde – aufgrund der vor Ort anhaltend mangelhaften und unzuverlässigen Datenerfassung (fernmündliche Bestätigung des Deutschen Seefahrtsamts in Hamburg von Februar 2002) – verzichtet. Die Zeitreihe von Tombouctou repräsentiert vielmehr die desolante Datensituation der Klimastationen in Mali und vielen anderen westafrikanischen Staaten, welche so nicht zu einer Abschätzung des

vegetationsrelevanten Klimatrends verhelfen kann. Die Ursachen begründen sich in personellen (z.B. Krankheit und unzuverlässige Entlohnung des Personals etc.) sowie infrastrukturellen Schwierigkeiten (z.B. Beschaffung von Messinstrumenten oder von Ersatzteilen zu deren Reparatur).



Datenquelle: <http://www.worldclimate.com>, Stand: 05.03.2002

Fig. 2.5 b) Ombrothermisches Klimadiagramm von Tombouctou

Für die Klimastation Tombouctou beträgt das Jahresmittel des Niederschlags 202,5 mm und die Jahrestemperatur 27,8 ° C. Der saisonale Wechsel verläuft mit einer Regenzeit von sieben Monaten (ab April bis November) und einer Trockenzeit von fünf Monaten (ab Dezember bis März). Die MSS–Aufnahmetermine decken mit den Monaten Dezember (1972), Februar (1974) und März (1982) die Sequenz einer Trockenzeitperiode ab.

Der Lac Faguibine wurde 1894/95 erstmalig von französischen Kolonialmilitärs entdeckt. Mit einer Wasserfläche von ca. 550 km² folgt er als zweitgrößter See Westafrikas dem Lac Tchad. Mit einer Längsausdehnung von maximal ca. 80 km und einer Breite von ca. 15 km an der breitesten Stelle (*Tab. 2.2*) unterliegt der Lac Faguibine in seiner Wasserflächenausdehnung saisonalen Schwankungen eines variierenden Wasserangebots an Regen- und Nigerzuflußwasser. Insgesamt liegen bisher nur vereinzelte, sehr vage Informationen zur Genese, Hydrologie und Bathymetrie der genannten und anderer Binnendelta–Seen vor. Der Service Hydrologique (Bamako, 1973) gibt für den Lac Faguibine im Vergleich zu den umliegenden Seen eine mittlere Tiefe von 6,2 m und eine maximale Tiefe von 10,2 m an.

See	Lage	Wasservolumen in (Mio. m ³) ⁻¹	Oberfläche in (km ²) ⁻¹		Tiefe in m ⁻¹		Max. Länge in km ⁻¹	Max. Breite in km ⁻¹
			Mittl.	Max.	Mittl.	Max.		
Faguibine	04°00'W–16°45'N	5600	535	880	6.2	10.5	80	15
Télé	03°45'W–16°30'N	625	190	250	2.5	5	35	7
Fati	03°41'W–16°16'N	500	80	165	3	6.5	24	10
Kamango	03°38'W–16°32'N	240	33	91	4	6	15	8
Gouber	03°40'W–16°47'N	160	20	66	4	7	10	7
(H)oro	03°51'W–16°13'N	–	25	225	–	–	20	10

QUELLE: Service Hydrologique, Bamako, 1973 in BARTH (1986)

Tab. 2.2 Hydrometrische Daten der linksnigrischen Faguibine–Seengruppe

Saisonale Wasserspiegelschwankungen werden mit einer Differenz des Wasserspiegels im Bereich von ca. 1,5 m beschrieben (SIRCOULON, 1987). Die im Zentrum der Seefläche maximal 400 m NN erreichenden Felsinseln ragen in Abhängigkeit von der Höhe des jeweiligen Wasserstands über die Wasserfläche unterschiedlich stark hervor. Die saisonalen Seespiegelschwankungen zeichnen das Abflußverhalten des Nigerflußsystems in extrem zeitlicher Verzögerung nach. Nach einem regenarmen, extremen Dürrejahr kann das Auffüllen des Faguibine-Sees mehrere Jahre dauern (SIRCOULON, 1987). Dies deutet auf eine Speisung des Sees mit überwiegendem Anteil an Regenwasser hin.

Im Bereich der Dünen und alluvialen Talsandfüllungen nördlich und westlich des Lac Faguibine (Fig. 2.6) ist ein spärlicher Vegetationsbesatz an Kryptophyten mit annuellen Gräsern, wie *Panicum turgidum*, *Aristida mutabilis* und *Cenchrus biflorus* vorzufinden. Im Süden und Osten erstrecken sich Gebiete vegetationsloser Sandsteinformationen sowie *Acacia*-/*Commiphora*-Dornbüsche mit *Tetrapogon*-/*Pennisetum*-Grasgesellschaften (BARTH, 1986). Feuchtigkeitsliebende Gras- und Gehölzarten besiedeln den Saum überschwemmter Sandflächen und Flächen lehmigen Kolluviums rings um den Lac Faguibine herum.

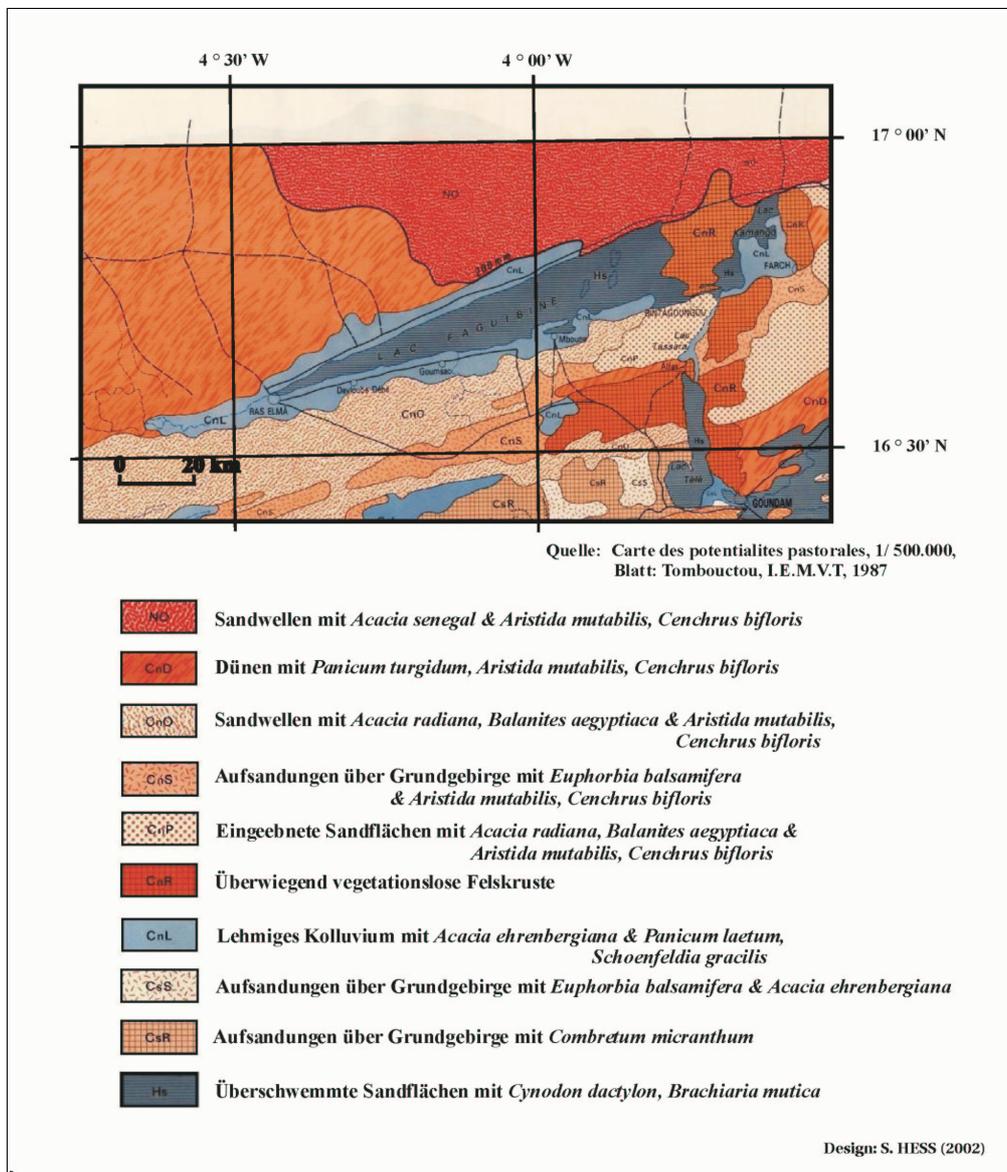


Fig. 2.6 Topographische Einheiten mit Phytoleitarten in der Region des Lac Faguibine

Die im Ausschnitt der Originalvorlage der „Carte des potentialités pastorales“ in **Fig. 2.6** ausgliederten Vegetationsformationen sind auf den Landsat–MSS–Ausschnitten visuell nicht unterscheidbar. Auch Angaben zur Vegetationsdichte liegen nicht vor.

Das verwendete Datenset besteht aus drei im absteigenden Orbit (descending mode), d.h. bei Tage, erstellten LANDSAT MSS–Szenen (**Fig. 2.7**). Diese wurden über die Sensormodelle MSS 1 (Szenen 1972 und 1974) und MSS 3 (Szene 1982) geliefert. Sämtliche Datenszenen sind gegen 10 Uhr MEZ – der Tageszeit mit statistisch geringster Wolkenbedeckung über tropischen Regionen – aufgenommen (CAMPBELL, 2002).

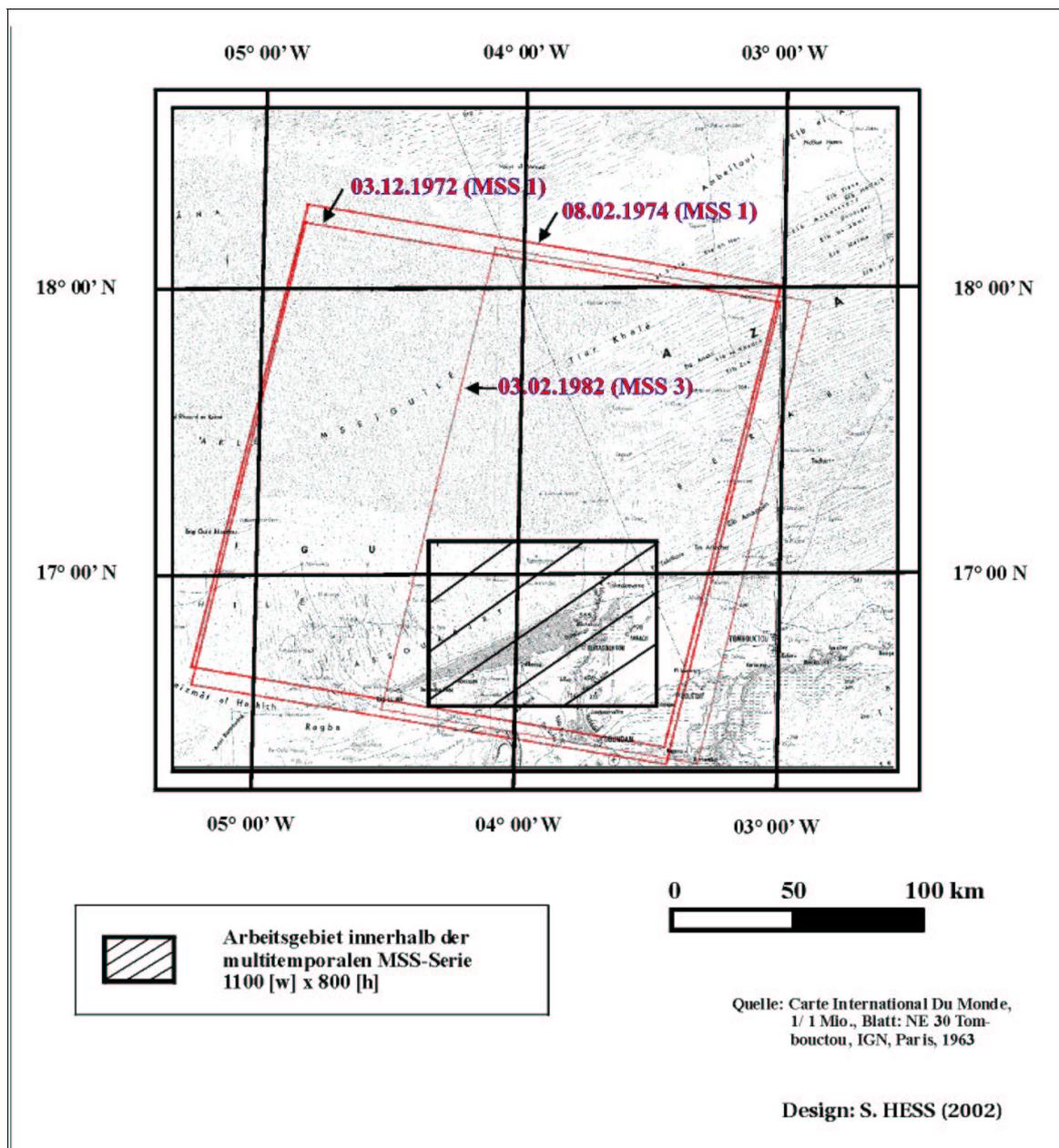


Fig. 2.7 Räumliche Anordnung der multitemporalen MSS–Serie

Die eine Dekade umfassende MSS–Bildserie präsentiert in die Trockenzeit fallende Aufnahmetermine der Monate Dezember, Februar und März (**Tab. 2.3**). In der Wintersaison treten bei niedrigem Sonnenstand typischerweise größere Sonnenzenitwinkel (= 90° minus Sonnenhöhenwinkel) auf.

Der Sonnenazimutwinkel ist der horizontale Winkel (0° bis 360°) zwischen der geographischen Nordausrichtung und der Richtung des Sonnenmittelpunkts. Der Winkel ist sowohl von der geographischen Position als auch von der Jahres- und Tageszeit abhängig. Für die atmosphärischen Korrektursimulationen (s. Kap. 2.5.2) ist die Kenntnis beider Winkel relevant.

<i>Aufnahme- datum</i>	<i>LANDSAT- Sensortyp</i>	<i>path (Boden- bahn)</i>	<i>row (Szenen- zentrum)</i>	<i>Sonnen-zenit</i>	<i>Sonnen- azimut</i>
03.12.1972	MSS 1	212	48	49,92°	157.05
08.02.1974	MSS 1	212	48	49,12°	144.04
10.03.1982	MSS 3	212	48	42,13°	112.06

Tab. 2.3 Aufnahmedaten zur MSS-Serie des Lac Faguibine

Im Gegensatz zum Hochgebirgsrelief wird die Bildaufnahme in der Flachheit eines ebenen Reliefs kaum durch objektverdeckende Reliefschatten beeinträchtigt (FRANKLIN, 1991). Die im sahelischen Sedimentationsbecken des Nigerbinnendeltas nur sehr eingeschränkt auftretende Schattenbildung beeinträchtigt die radiometrische Qualität der genannten Bildszenen somit nur unwesentlich.

2.2.4 Methodendesign

Am Satellitensensor wird ein Strahlungssignal empfangen, welches durch atmosphärische Einflüsse und unterschiedliche Sensordisparitäten verfälscht wird. Zur Vermeidung von Fehlern bei der multitemporalen Signalanalyse des im sichtbaren bis nah-infraroten Spektralbereich ($0,6 - 1,1 \mu\text{m}$) aufnehmenden MSS-Sensors sind sensor-, atmosphären- und rückstrahlungsdirektionell bedingte Datenfehler zu homogenisieren. Die am Satelliten erfaßten Signalintensitäten müssen daher aufbereitet werden bevor sie qualitativen und quantitativen Analysen zugeführt werden können. Eine auf physikalischen Gesetzen basierende, quantitative Auswertung hingegen verlangt genau definierte Maße, wie beispielsweise am Sensor gemessene Strahldichten oder Reflexionswerte am Boden. Dazu sind zunächst Störfaktoren und Unbekannte im Datensatz zu eliminieren. Für eine präzise Vergleichbarkeit multitemporaler Satellitenbilddaten ist dazu eine Umrechnung der am Satellitensensor erfaßten Intensitäten in die physikalische Größe der am Boden auftretenden, von jeglichen Sensorabweichungen und Atmosphärenstörungen befreiten Strahldichte (radiance) – durchzuführen.

Das Schema in *Fig. 2.8* zeigt den zur Homogenisierung der hier verwendeten LANDSAT-MSS Daten von der Autorin entworfenen und vorgeschlagenen Prozessierungsfluß.

Die im üblichen Prozedere der Datenvorverarbeitung stehenden Schritte 1–3 verlangen bei der Verwendung historischer MSS-Daten besondere Prozessierungsfertigkeiten. Die Schritte 4 zur radiometrischen und 5 zur atmosphärischen Korrektur haben große Bedeutung für die fernerkundliche Langzeitauswertung und verlangen besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse. Diese beiden Schritte sowie der letzte Schritt 6 der Evaluierung der Datenhomogenisierung werden in den Folgekapiteln ausführlich behandelt.

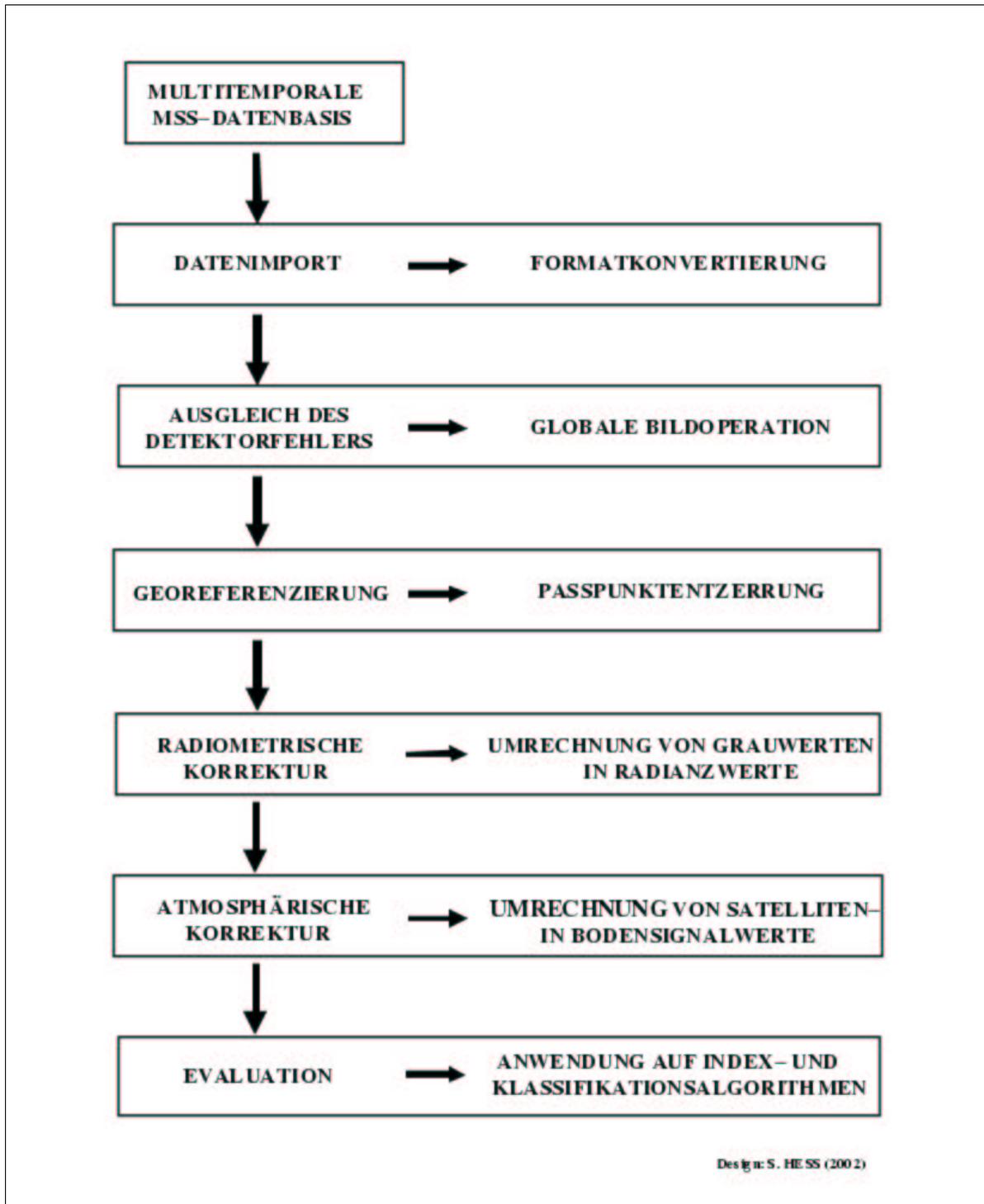


Fig. 2.8 Ablaufschema zur Homogenisierung von LANDSAT-MSS Daten

Die einzelnen bildverarbeitenden Schritte wurden auf einem LINUX-Rechner (600 MHz-Prozessor, 96 MB RAM) mit 1982 von US-Regierungsbehörden entwickelter, unter GNU frei lizenzierter Open GIS-Software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) der Version 5.0.0pre3 (02/2002) geleistet. Zusätzlich wurden zu speziellen Anforderungen in der Programmiersprache C entwickelte Client-Programme eingesetzt. Die atmosphärischen Simulationsrechnungen wurden mit dem Programm-Code zum radiativen Transfer Streamer der Version 2.5p (04/1999) durchgeführt.

2.2.4.1 Datenimport

Zum Import der Daten in ein Bildverarbeitungssystem (hier: Geographic Resources Analysis System, GRASS) ist für MSS-Bilddaten vor 1978 zunächst die Dekodierung und Konvertierung des Datenformats NDPF (Nasa Data Processing Facilities) und BIL/BSQ für Bilddaten nach 1978 in ein einlesbares Rohdatenformat durchzuführen. Vor dem 01.02.1979 von Landsat 1–3 (sowie vor dem 22.10.82 von Landsat 4 mit den später umbenannten Kanälen 1–4) empfangene MSS-Daten liegen für die Kanäle 4–6 im 7-bit-Format (max. 128 Grauwerte), für den Kanal 7 im 6-bit- (max. 64 Grauwerte) Format vor (FORSTER, 1984). Die 7-bit Daten von Landsat MSS-1 wurden an der Bodenempfangsstation für die Kanäle 4–6 mittels linearer Umrechnung zu 8 bit-Daten entkomprimiert, wohingegen die 6-bit Daten des Kanals 7 weder in vorkalibrierter, noch in normierter Form ausgegeben wurden (MARKHAM & BARKER, 1987).

Die LANDSAT-übliche Vorverarbeitung der geometrischen Korrektur des Scan-Skew-Fehlers wurde bei den Daten von Landsat 1–3, dem hier vorliegenden Material, aus technischen Gründen noch nicht durchgeführt. Bei einer solchen Korrektur wird ein keilförmiger Bildbereich zur Kompensation des seitlichen Bildversatzes durch die Erddrehung in die Szene eingefügt. Innerhalb des Bildrechtecks erscheint die MSS-Szene dann als schräges Parallelogramm (CAMPBELL, 1996).

2.2.4.2 Ausgleich des radiometrischen Detektorfehlers

Nach Empfang an der Bodenstation liegen die MSS-Daten in äußerst gering vorkalibrierter Form (radiometrischer Kalibrationsalgorithmus des USGS, 1979) vor. Bei den MSS-Daten von Landsat 1–3 wurde zur Rauschunterdrückung lediglich eine Kalmanfilterung durchgeführt (COLWELL, 1983). Die instrumentenbedingten systematischen Fehler der optischen Sensoren und der Elektronik lassen sich durch solche relativen radiometrischen Normalisierungsverfahren vermindern.

Die Bildprodukte der ersten LANDSAT-Serie sind jedoch besonders stark durch radiometrische Streifenfehler beeinträchtigt. Im Extremfall gehen diese mit dem Verlust partieller oder ganzer Bildzeilen (line dropout) einher oder zeichnen sich in dem für historische Landsat MSS-Aufnahmen typischen Sechs-Linien-Effekt (striping, banding, 6-line effect) ab. Dieser Streifenfehler (**Fig. 2.9**) wird in den Bildszenen (rechte Hälfte) durch abweichende Zeilenkontraste in horizontaler Richtung, speziell in Form von Auf- und/oder Abhellung einzelner Bildzeilen sichtbar.

Da die Daten für jeden Kanal zu je 6 aneinandergereihten Detektoren registriert werden, reproduziert sich der Kontrastfehler in jedem Kanalbild regelmäßig im sechszeiligen horizontalen Streifenmuster, "six-line effect" oder "six line banding" (mißverständlicherweise auch sixth-line striping). Dieser in einem Kanalbild stets nicht nur die sechste Detektorzeile betreffende radiometrische Bildzeilenfehler ist speziell beim ersten LANDSAT MSS-1 Sensor (1972–78) besonders intensiv ausgeprägt (CAMPBELL, 1996). Einhergehend mit den Beobachtungen für die ersten MSS-Modelle von CAMPBELL (1996) und von PRICE (1987) tritt beim Bildmaterial der ersten MSS-Modelle der Streifenfehler am stärksten jeweils im Infrarot-Kanal 7 (0,9–1,1 μm) auf.

Die ersten MSS-Daten wurden nicht kanalangleichend präprozessiert, sondern lediglich einer Rauschunterdrückungsfilterung unterzogen. Das typische Fehlerstreifenmuster tritt bei allen drei hier vorliegenden MSS-Szenen besonders deutlich im Bereich homogener Bildflächen, z.B. auf Wasserflächen (s. obere Hälfte **Fig. 2.9**) hervor. Weniger stark hebt sich der Effekt auf heterogenen Bildstrukturen ab.

Diese Fehler werden von geringen Sensitivitätsdifferenzen der jeweils sechs kanalspezifischen Detektoren im Inneren des MSS-Sensors verursacht. Die radiometrischen Artefakte lassen sich nach THOMAS (1977) und PRICE (1987) zurückführen auf:

1. Ausfälle eines oder mehrerer der in jedem Spektralkanal vorhandenen sechs Detektoren,
2. eine fehlerhafte Aufnahme der Daten mit dem FR1928-Rekorder auf CCT-Magnetbänder,
3. in unregelmäßigen Zeitabständen aufgetretene Probleme des MSS-Sensorkalibrators (sensor controllers) innerhalb des Initialbild-Generierungssubsystems (Initial Generating Subsystem, IGS), d.h. die spektrale Abhängigkeit der integrierten Sphäre stimmt nicht mit der des reflektierten Sonnenlichts überein.

Zum Vergleich multitemporaler Daten ist ein radiometrischer Ausgleich der szenenimmanenten, radiometrischen Datenheterogenität – d.h. eine zeilenweise Anpassung der einzelnen Detektorabweichungen – erforderlich, da sich diese radiometrischen Fehler in Folgeprozessierungen (z.B. bei der Berechnung von Ratio- oder Indexbildern etc.) potenzieren können. Eine solche, die Originalwerte verändernde Datenkorrektur, birgt jedoch die Gefahr einer Datendegradation (Informationsverlust) in sich.

Homogenisierende Bildfilterungen bringen den Nachteil des Verlusts von Bildinformationen durch lokale Bildoperationen. Zur Minimierung der Informationsverluste werden alternative globale Verfahren angewendet, welche eine einzige Operation auf der gesamten Bildszene vorsehen.

Diese radiometrische Kompensation, d.h. Standardisierung der Werte in einer Bildszene kann durch Berechnung statistischer Parameter wie dem arithmetischen Mittel und der Standardabweichung vorgenommen werden.

Dazu werden die vier Kanal-Bildszenen jeweils in getrennten, auf sechs verschiedene Detektoren aufgespaltenen Bildteilmengen betrachtet. Die Daten werden zunächst je Kanal in eine neue, d.h. jede i -te Detektorzeile erfassende Bilddatei umorganisiert. Aus den Original-Kanaldateien mit einer Länge von 2340 Bildzeilen werden jeweils die i -ten Zeilen aller horizontalen 6-er Streifenpakete herausselektiert und hintereinander in eine neue Datei geschrieben. Es ergeben sich, entsprechend der Anzahl der Detektoren, 6 neue Bildteilmengen, die das Originalbild auf 390 Zeilen zu je $1/6$ seiner Länge zusammenstauchen.

Das von BAUER (1994) angewandte Verfahren appliziert für jedes Detektor-Teilbild kanalweise einen individuellen Korrektur-Multiplikator. Dieser wird separat aus der Differenz des Mittelwerts des Gesamtbildes und des Mittelwerts für jedes einzelne Detektor-Teilbild errechnet. Jedes Detektor-Teilbild wird mit dem individuellen Differenzwert multipliziert und erfährt damit eine an die anderen Detektoren angegliche Kontrastanpassung.

Auch das hier konzipierte Verfahren stellt ein lineares Kompensationsverfahren dar. Für den Ausgleich jedes Kanalbildes wird jedoch nicht nur – wie bei BAUER (1994) – eine einzige Variable, sondern es werden zwei unbekannte Variablen, a_i und b_i , in die Korrekturrechnung der 6 Detektor-Teilbilder x_i mit $i = 1, 2, \dots, 6$ einbezogen. Die Rechnungen werden in der Folge exemplarisch für einen einzigen Kanal veranschaulicht.

In dieser Vereinfachung entsprechen die Rechnungen für jedes der Teilbilder x_i einer gesamten MSS-Kanalszene der Funktion:

$$y_i = a_i x_i + b_i$$

- y_i = korrigierter Wert der MSS-Gesamtszene in der i -ten Zeile, $i = 1, 2, \dots, 6$
 x_i = Wert des unkorrigierten Teilbilds für die Detektorzeile i
 a_i = Variable a der Detektorzeile i
 b_i = Variable b der Detektorzeile i

Die Abweichung der Werte in den 6 Detektorzeilenbildern spiegeln die internen Bedingungen sowie die Unterschiede zwischen den Detektoren wieder und können so zum Ausgleich des Fehlers herangezogen werden.

Die statistische Betrachtung konzentriert sich auf die Analyse der Variationen innerhalb und zwischen den 6 detektorspezifischen, unkorrigierten Teilbildern x_i mittels des statistischen Parameter–Mittelwerts m und der Standardabweichung s .

Mit dem Variationsmaß der Standardabweichung s läßt sich das Ausmaß einer nicht linearen quadratischen Abweichung der Datenmengen z_i von ihrem arithmetischen Mittelwert \bar{z}_i innerhalb einer Verteilung quantifizieren:

$$s = \sqrt{1/n \sum (z_i - \bar{z}_i)^2}$$

z_i = zu untersuchende Datenwerte der Variablen z

$z_i - \bar{z}_i^2$ = Abweichungen vom arithmetischen Mittel der Datenwerte der Variablen z

Die Betrachtung der Mittelwerte zeigt, daß der Mittelwert einer Gesamtszene $m_{(y)}$ mit dem aus den Einzelmittelwerten der Teilbilder berechneten Gesamtmittelwert $m_{(x)}$ betragsgleich ist:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= 1/6 [\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \bar{x}_4 + \bar{x}_5 + \bar{x}_6] \\ &= 1/6 \sum \bar{x}_i \\ &= \bar{x} \end{aligned}$$

\bar{y} = Mittelwert der unkorrigierten MSS–Gesamtszene

\bar{x}_i = Mittelwert des i -ten Teilbilds

\bar{x} = Mittelwert aus allen Teilbild–Mittelwerten

Andererseits zeigt sich bei der Standardabweichung erwartungsgemäß, daß der Wert für die gesamte, unkorrigierte MSS–Szene (**Tab. 2.4 a**) von dem aus den unkorrigierten einzelnen Teilbildern gemitteltem Standardabweichungswert (**Tab. 2.4 b**), abweicht:

$$\begin{aligned} s(y) &= \sqrt{1/6 (s(x_1)^2 + s(x_2)^2 + s(x_3)^2 + s(x_4)^2 + s(x_5)^2 + s(x_6)^2)} \\ &= \sqrt{1/6 \sum s(x_i)^2} \\ &\neq s(x) \end{aligned}$$

$s(y)$ = Standardabweichung der unkorrigierten MSS–Gesamtszene

$s(x_i)$ = Standardabweichung des i -ten Teilbilds

$s(x)$ = Mittelwert aus allen Teilbild–Standardabweichungen

Es gilt die Annahme, daß das Gesamt–Trägheitsmoment (Moment 2.Ordnung) oder die totale Inertie sich aus der Summe der Variationen der Werte innerhalb eines Gesamtbildes (Inertie intra) sowie zusätzlich aus der Variation der Werte der einzelnen Teilbilder (Inertie inter) zusammensetzt:

$$\text{Inertie (total)} = \text{Inertie (intra)} + \text{Inertie (inter)}$$

Aus den in der Gesamtszene bekannten Kenngrößen des Mittelwerts und der Standardabweichung sowie den in den Teilbildern bekannten Kenngrößen \bar{x}_i und $s(x_i)$ lassen sich für jedes Detektorzeilen–Teilbild die unbekannt Variablen a_i und b_i auf der Basis folgender linearer Beziehungen berechnen:

Die Variable a_i leitet sich vom Wert der Standardabweichung der MSS–Gesamtszene $s(y)$ ab, welcher wiederum mit dem Wert der Standardabweichung der i -ten Zeile in dieser Gesamtszene $s(y_i)$ identisch ist:

$$s(y) = s(y_i) = s(a_i x_i + b_i)$$

Da die Addition einer Konstanten b_i zum Wert einer Standardabweichung keine Veränderung dieses Wertes hervorruft, kann die Variable b_i vernachlässigt werden:

$$s(y) = s(y_i) = a_i s(x_i)$$

Die Auflösung der linearen Beziehung nach a_i ergibt daher:

$$a_i = s(y) / s(x_i)$$

Die Variable b_i steht in Abhängigkeit des Mittelwerts der MSS–Gesamtszene \bar{y} , die mit dem Mittelwert der i -ten Zeile in dieser Gesamtszene \bar{y}_i identisch ist:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \bar{y}_i = \overline{a_i * x_i + b_i} \\ &= a_i * \bar{x}_i + b_i \end{aligned}$$

Durch Ersetzen von a_i durch den oben aufgelösten Term

$$\bar{y} = s(y) / s(x_i) * \bar{x}_i + b_i$$

ergibt sich schließlich für b_i :

$$b_i = \bar{y} - s(y) / s(x_i) * \bar{x}_i$$

Die für jedes einzelne Detektorzeilen–Teilbild errechneten statistischen Koeffizienten a_i und b_i sind in **Tab. 2.4 b** zusammengefaßt.

Der Ausgleich der radiometrischen Abweichungen geschieht mittels dieser beiden Korrektur–Koeffizienten, separat für jedes der 6 Teilbilder pro MSS–Szene, durch Einsetzen der Koeffizienten in den linearen Ausdruck:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1 x_1 + b_1 \\ y_2 &= a_2 x_2 + b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ y_6 &= a_6 x_6 + b_6 \end{aligned}$$

Tab. 2.4 a zeigt die berechneten Ergebnisse der statistischen Parameter wie arithmetischer Mittelwert \bar{y} , Varianz $v(y)$ und Standardabweichung $s(y)$ für die einzelnen nicht korrigierten radiometrisch gestörten Gesamtkanalszenen.

Kanal	03.12.1972 (MSS 1)			08.02.1974 (MSS 1)			03.02.1982 (MSS 3)		
	\bar{y}	$v(y)$	$s(y)$	\bar{y}	$v(y)$	$s(y)$	\bar{y}	$v(y)$	$s(y)$
K 4	63.140	164.307	12.818	67.736	198.365	14.084	57.708	46.927	06.850
K 5	90.208	296.445	17.218	92.584	402.173	20.054	102.169	257.268	16.040
K 6	87.714	251.198	15.849	84.319	325.979	18.055	106.432	260.655	16.145
K 7	38.051	122.531	11.069	34.217	135.299	11.630	91.994	186.665	13.663

Tab. 2.4 a) Statistische Daten der multitemporalen MSS–Vollszenen

Für die 6 Detektor–Teilbilder L1 bis L6 sind in **Tab. 2.4 b** je MSS–Kanalszene die errechneten Parameter des arithmetischen Mittels, der Standardabweichung und die Ausgleichkorrekturparameter a_i und b_i aufgeführt.

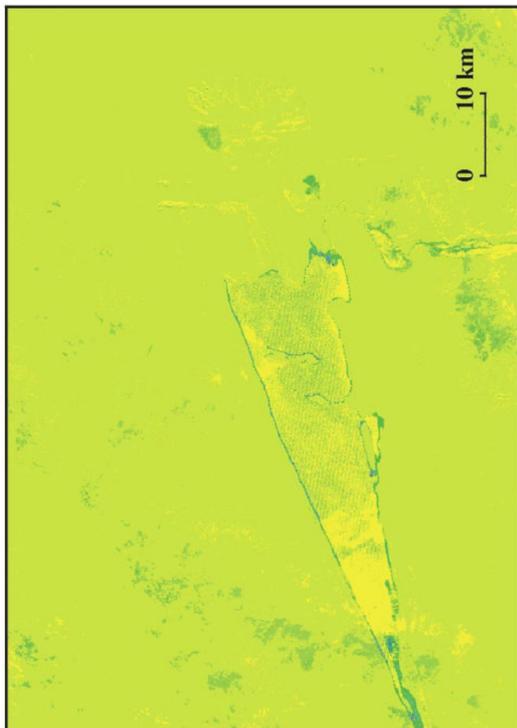
		03.12.1972 (MSS 1)				08.02.1974 (MSS 1)				10.03.1982 (MSS 3)			
		a_i	b_i	\bar{x}_i	$s(x_i)$	a_i	b_i	\bar{x}_i	$s(x_i)$	a_i	b_i	\bar{x}_i	$s(x_i)$
K 4	L1	0.987	1.116	62.830	12.878	0.987	0.762	67.847	14.194	0.983	-0.136	58.860	6.930
	L2	1.018	0.235	62.289	12.698	0.990	0.072	68.350	14.161	1.007	-0.107	57.405	6.764
	L3	1.011	-0.475	62.902	12.737	0.985	0.512	68.220	14.205	0.999	0.657	57.082	6.818
	L4	0.985	0.010	64.085	12.903	1.011	-0.444	67.429	13.980	1.023	-1.285	57.641	6.657
	L5	0.998	0.136	63.151	12.831	1.009	-0.247	67.382	14.006	1.020	-0.251	56.834	6.680
	L6	1.002	-0.605	63.584	12.785	1.019	-0.730	67.188	13.916	0.971	0.997	58.424	7.019
$s_{(xi)}$		12.805				14.077				6.811			
K 5	L1	1.013	-0.511	89.560	16.998	0.998	-0.099	92.886	20.083	0.997	-0.875	103.329	16.072
	L2	1.017	-0.654	89.386	16.987	0.993	-0.402	93.594	20.148	0.999	-0.218	102.491	16.043
	L3	0.988	0.760	90.532	17.377	1.003	0.123	92.227	20.004	1.004	0.186	101.614	15.969
	L4	0.991	0.589	90.398	17.337	0.998	0.219	92.507	20.077	0.997	0.473	101.964	16.070
	L5	0.985	0.142	91.449	17.410	1.003	0.494	91.855	20.010	1.008	-0.025	101.391	15.902
	L6	1.008	-0.405	89.925	17.108	1.005	-0.337	92.436	19.959	0.995	0.452	102.225	16.107
$s_{(xi)}$		17.203				20.047				16.027			
K 6	L1	1.042	-2.463	86.553	15.352	1.011	-0.527	83.912	17.841	0.999	-0.114	106.692	16.155
	L2	1.004	-0.020	87.382	15.781	0.992	0.681	84.298	18.115	0.990	0.469	106.977	16.287
	L3	1.003	-0.306	87.755	15.783	1.013	-0.465	83.701	17.821	0.993	-0.112	107.277	16.243
	L4	0.972	0.941	89.247	16.146	1.000	-0.229	84.587	18.052	1.012	-0.439	105.616	15.944
	L5	0.983	0.704	88.509	16.023	1.005	-0.181	84.079	18.046	1.003	-0.277	106.367	16.081
	L6	1.000	0.885	86.835	15.835	0.980	0.655	85.335	18.401	1.003	0.450	105.662	16.084
$s_{(xi)}$		15.820				18.046				16.632			
K 7	L1	1.034	-0.441	37.244	10.959	0.958	0.182	35.507	11.650	0.985	-0.035	93.429	13.785
	L2	1.033	-0.271	37.128	10.967	0.963	-0.097	35.620	11.627	0.996	-0.006	92.396	13.725
	L3	0.983	0.490	38.192	11.075	0.982	0.347	34.470	11.591	0.994	-0.030	92.539	13.700
	L4	1.004	0.425	37.475	11.036	0.964	0.204	35.271	11.648	1.005	-0.029	91.544	13.474
	L5	0.960	-0.260	39.904	11.096	1.068	-0.290	32.340	11.385	1.011	0.029	90.912	13.537
	L6	0.993	-0.039	38.362	11.040	1.089	-0.710	32.096	11.331	1.009	0.056	91.146	13.583
$s_{(xi)}$		11.029				11.539				13.634			

Tab. 2.4 b) Statistische Parameter und Korrekturkoeffizienten der sechs MSS-Detektor-Teilbilder pro MSS-Gesamtkanalszene

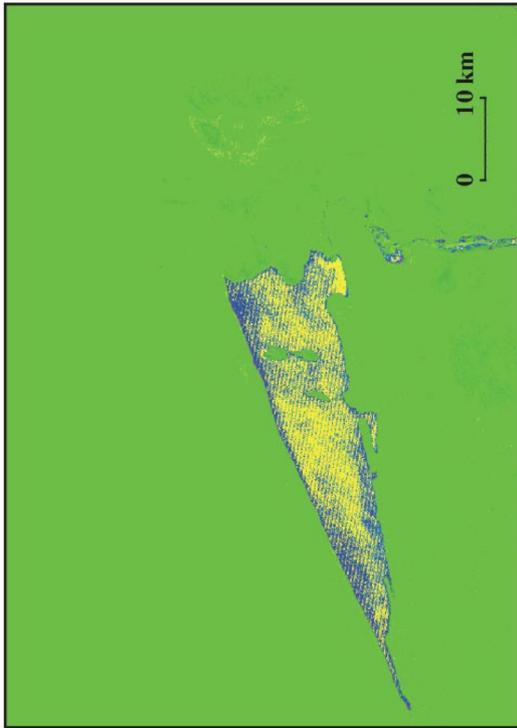
Nach vollzogener Berechnung der Korrekturkoeffizienten und deren linear-algorithmischer Applikation auf die Teilbilder werden letztere wieder zur jeweiligen MSS-Kanalgesamtszene zusammengesetzt.

Die zuvor beschriebenen Schritte zur Umorganisation der Bilddatenstruktur in Zeilen-Teilbilder sowie zur statistischen Berechnung der Korrekturparameter lassen sich bis zur algorithmischen Ausgleichsoperation der MSS-Vollszene mittels eines einzigen, eigens dafür entwickelten C-Programms, realisieren (Berechnungszeit pro Teilbild von 30 Sekunden auf Prozessor 600 Mhz/ 96 Mb RAM).

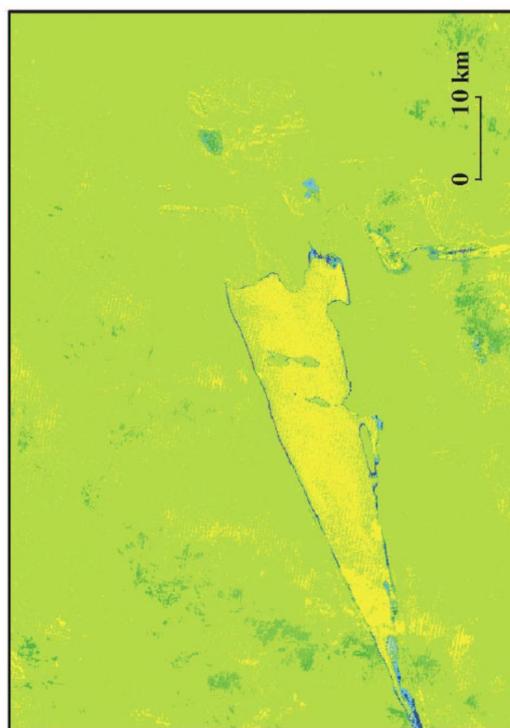
Die Evaluierung des radiometrischen Ausgleichs erfolgt mittels visueller Kontrolle der MSS-Ausgabebilder, die hier als gegenüber radiometrischem Rauschen empfindliche Ratiobilder präsentiert werden (Fig. 2.9). Da das menschliche Auge nur zwischen einem bis drei Dutzend verschiedenen Grauwerten, jedoch zwischen Tausenden von Farbwerten zu unterscheiden vermag, werden zur gezielteren visuellen Erkennung die Grauwert-Ratiobildprodukte mittels einer vordefinierten Farbtabelle in eine Pseudofarbdarstellung umtransformiert.



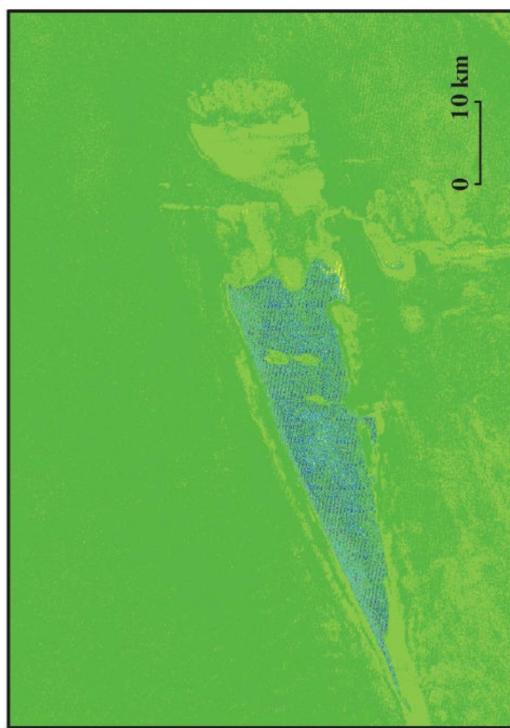
Ratio der unkorrigierten MSS-Kanäle 6 zu 7 von 1972



Ratio im Kanal 7 der unkorrigierten MSS-Szenen 1972 zu 1974



Ratio der homogenisierten MSS-Kanäle 6 zu 7 von 1972



Ratio im Kanal 7 der homogenisierten MSS-Szenen 1972 zu 1974

Design: S. HESS (2002)

Fig. 2.9 Homogenisierung des radiometrischen Streifenfehlers in mono- und bitemporalen MSS-Ratioausschnitten des Lac Faguibine

Das sich überwiegend in den NIR-Kanälen 6 und 7 abzeichnende radiometrische Artefakt (**Fig. 2.9**) tritt stärker in den bi- (rechte Hälfte) als in den monotemporalen (linke Hälfte) Ratiobildern hervor. Die Artefakte kommen insbesondere auf der homogenen Wasserfläche des Lac Faguibine zum Vorschein.

Wie die kolorierten Vergleichsergebnisse insgesamt deutlich zeigen, ist der radiometrische Streifenfehler mittels der angewandten Methode nicht vollständig aus den MSS-Szenen eliminierbar. Da die Detektoren eine nicht lineare Signalantwort erzeugen, kann der Fehler mittels der linearen Methode nicht absolut ausgeglichen, sondern lediglich abgeschwächt, d.h. in relativer Weise ausgeglichen werden.

Das hier angewandte Verfahren ergibt jedoch aufgrund der Verwendung von zwei Parametern –im Vergleich zu dem nur einen Parameter berücksichtigenden Verfahren nach BAUER (1994)– präzisere Angleichungsergebnisse.

Der Ausgleich des radiometrischen Streifenfehlers ließe sich noch verbessern, jedoch mit der Konsequenz einer nicht mehr akzeptablen Veränderung der Satellitenoriginalwerte. Ein solches Verfahren bewirkt dann lediglich einen ästhetischen, nicht jedoch den geforderten systematischen Ausgleich des Sensorfehlers.

2.2.4.3 Geokodierung

LANDSAT-Aufnahmen haben als Vorverarbeitung generell bereits eine geometrische Grobkorrektur des Scanskew-Fehlers erfahren. Zur Kompensation dieses geometrischen, Fehlers werden – wie bereits in Kap. 2.2.4.1 beschrieben –keilförmige Bildbereiche in die Szene eingefügt. Innerhalb des Bildrechtecks erscheint die MSS-Szene anschließend als schräges Parallelogramm (CAMPBELL, 1996).

Die multitemporale Bildanalyse erfordert entweder eine absolute Geokodierung oder aber eine relative Bild-zu-Bild-Koregistrierung. Da innerhalb der fast ausschnittgleichen MSS-Bildszenen sehr wenige und ungleichmäßig verteilte Paßpunkte ausschließlich in der rechten unteren Bildecke, d.h. im Bereich des Faguibine-Seengebiets auffindbar waren, konnten die MSS-Szenen nur mit ungenügender Genauigkeit absolut entzerrt, jedoch relativ aufeinander registriert werden. Die Szene von 1974 wurde aus einer Pixelkoordinaten-Umgebung anhand der in ihrer Kopfdatei angegebenen Eck-Geokoordinaten in die transversale Merkatorprojektion (Universal Transverse Mercator, UTM) der Zone 30 übertragen. Bei dieser wird das Erdellipsoid (für Afrika: Clarke1880) auf eine Zylinderfläche mit je 6 Längengraden breiten Zonen abgebildet.

Subausschnitte der folgenden beiden MSS-Szenen von 1972 und 1982 wurden mittels charakteristischer Paßpunkte im Bereich der Seen relativ auf die Referenz der MSS-Szene von 1974 übertragen. Auf der Basis einer nach dem ersten Polynomgrad errechneten Koeffizientenmatrix wurden die xy-Koordinaten aller Bildszenen mittels der Nächsten-Nachbar-Interpolationsmethode in das UTM-30 Projektionsgitter übertragen. Für die drei Bildszenen konnte ein mittlerer geometrischer Fehler (root mean square, RMS) jeweils im Subpixelbereich unter 50 m erzielt werden. Zur Vermeidung eines Verlusts an radiometrischer Präzision wurde für die Pixelübertragung, d.h. die Umrechnung der xy-Pixelkoordinaten in die Lagekoordinaten des UTM-Gitters, die auf der Distanzgewichtung basierende Nächste-Nachbar-Interpolation (nearest-neighbor resampling) gewählt. Der Original-Grauwert wird bei diesem Verfahren unverändert übertragen und demjenigen Pixel zugewiesen, welches der gerundeten Gleitkommazahl des xy-Pixels am nächsten liegt.

Da der RMS-Fehler lediglich algorithmische Aussagen zur Übereinstimmung an den Paßpunkten macht, ermöglicht erst die visuelle Kontrolle mittels kanalweiser Überlagerung multitemporaler Bildszenen eine Qualitätsbewertung der geometrischen Korrektur des gesamten Szenenausschnitts.

Sofern kein anderes Interpolationsverfahren als die Nearest-Neighbour-Methode angewandt

wird, sollte zur Bewahrung der bei jeder anderen Interpolationsmethode veränderten Originalpixelwerte die geometrische Korrektur erst im Nachhinein abgehandelt werden.

2.2.5 Sensorhomogenisierung

Die Bildhomogenisierung hat die Aufgabe der Reduzierung sensorbedingter Signalvariation, so daß verbleibende Signaldifferenzen ausschließlich als Veränderungen der Oberflächenobjekte gedeutet werden können.

2.2.5.1 Radiometrische Korrekturmethoden

Im Gegensatz zum bildstatistischen Ausgleich des radiometrischen Detektorfehlers beinhaltet die radiometrische Korrektur den quantitativen Prozeß der radiometrischen Kalibration über die visuell-kosmetische Bild-Normalisierung hinaus. Bei letzterer wird die Konvertierung der am Sensor beobachteten Original-Grauwerte (raw digital numbers, DN) in physikalische Einheiten vorgenommen (ROBINOVE, 1982). Das Hauptziel besteht in der Vergleichbarmachung spektraler Informationen verschiedener Messquellen (Sensoren) mittels sensorspezifischer Modellierung der physikalischen Einheiten.

Unter den Methoden zur Erfassung radiometrischer Kalibrationskoeffizienten ist zwischen absoluten und relativen zu differenzieren:

a) Absolute Sensorkalibrationsmethoden

Bei der absoluten Korrektur werden u.a. die am Satelliten aufgenommenen Grauwerte zu den exakt mit einem Radiometer am Bodenobjekt oder in Testgebieten gemessenen Strahlungsdichtewerten (radiances) ins Verhältnis gesetzt. Dazu werden über verschiedene Mess-, bzw. Modellierungsverfahren die optischen und elektronischen Eigenschaften des Sensors, d.h. die zur Korrekturrechnung erforderlichen sensorspezifischen Kalibrationskoeffizienten ermittelt:

A priori- und Post-Kalibrierung (pre-, post-flight)

Zur Ermittlung der u.a. – infolge Orbitalabweichung, spektraler Drift der Signalantwort und spektraler Sensitivitätsabnahme der Sensoren – induzierten Fehler werden im Vorfeld des Satellitenstarts Kalibrationsmessungen (Sensitivität gegenüber Polarisation, Streulichteffekten, Sensorlinearität etc.) im Labor durchgeführt. Nach erfolgter Mission werden die während des Betriebs an Bord nicht ausgeglichenen Sensorungenauigkeiten noch einmal durch Labormessungen erfaßt.

Zur präzisen Etablierung des Instrumenten-Modells, d.h. zur Messung der spektralen Empfindlichkeit des Sensors und zur Ermittlung der absoluten Kalibrationskoeffizienten werden Kollimatoren (integrated spheres) eingesetzt, die den offiziellen Labor-Standards entsprechen. Zur Vermeidung systematischer Fehler werden die bei MSS verwendeten integrierten Kalibrationslampen oder Kollimatoren durch Inter-Kalibration des Sensors geeicht. Bei aktuellen Satellitensystemen werden der Sonne ähnliche Strahlungsquellen (Schwarzkörper mit einer Temperatur von 6000 K, z.B. bei SeaWiFS) den Schwarzkörperlampen (3000 K) aufgrund höherer Präzision vorgezogen (DINGUIRARD & SLATER, 1997).

On-Bord Kalibrierung (in-flight)

Mittels künstlicher oder natürlicher Strahlungsquellen wird die Sensormesspräzision während des Fluges an Bord des Satelliten einer kontinuierlichen Kontrolle unterzogen. Interne

Kalibrationslampen wie bei MSS sind im blauen Spektralbereich unempfindlich und eignen sich daher weniger zur Simulation der operationellen Aufnahmebedingungen. Bei aktuellen Satellitensystemen (SeaWiFS, MERIS, MISR, MODIS etc.) werden spektral flache (weiß), weitschweifige, von der Strahlung flächig ausgefüllte Sonnensegel (solar panels) des lambertschen Reflexionstyps vor die Sensoroptik geschoben. Die dort eingesetzten Kalibrationslampen besitzen gegenüber herkömmlichen eine höhere Empfindlichkeit im blauen Spektralbereich. Darüberhinaus tendieren die bei SeaWiFS, MERIS, MISR und MODIS eingesetzten modereren diffusen Sonnensegel (solar panels) bei intensiver Energieeinstrahlung weniger zur Degradation.

Bei den ersten Landsat MSS-Systemen wurde zur Eichung ein Teilapertur-Solarkalibrator verwendet, welcher einen schmalen Sonnenlichtstrahl auf alle Sensorelemente lenkte (MARKHAM, 1996). SPOT-HRV setzt ein fiber-optisches System ein. Die solare Einstrahlung wird mittels einer Kalibrationslampe auf die Charge Coupled Device-Kondensatoren geleitet.

Experimentelle radiometrische Kalibrierung

Ansätze basieren auf einer Auswahl großflächig homogener und überwiegend wolkenfreier Teststandorte. Diese Standorte werden als Bodenreferenzflächen zur absoluten, radiometrischen Eichung eingesetzt, wobei Messungen am Bodenobjekt und in der Atmosphäre simultan zum Satellitenüberflug durchzuführen sind.

Unter Einbeziehung der Messparameter der spektralen Reflexion am Bodenobjekt, der spektralen Extinktion und weiterer atmosphärischer Parameter wird bei der *Reflexions-Methode* die atmosphärische Streuung und Absorption mittels eines radiativen Strahlungstransfermodells errechnet. Ausgabewert ist die am Satelliten gemessene (Top of the Atmosphere, TOA) Strahldichte des entsprechenden Bodenobjekt-Albedowerts. Aus der Beziehung zwischen TOA-Strahldichtewert und dem betreffenden Satellitengrauwert läßt sich der Kalibrationskoeffizient errechnen. Durch die bei der *verbesserten Reflexions-Methode* zusätzlich berücksichtigten Messungen der diffusen Strahlung am Boden und globalen Einstrahlung (irradiance) können Fehler bei der Berechnung der Streuung im Aerosolmodell reduziert werden.

Bei der *Strahldichte-Methode* wird ein hochgenau geeichtes und stabiles Radiometer mittels eines Flugzeugträgers oder Hubschraubers in eine atmosphärische Schicht oberhalb der stärksten Aerosolkonzentration gebracht. Die in einer Höhe von ca. 3000 m gemessene Strahldichte wird um den auf dem Strahlungsweg zwischen Flugträger-Radiometer und Satellitenscanner entstehenden Anteil der Rest-Streuung und Absorption korrigiert.

Die Radianz- oder Strahldichtemethode erweist sich somit als die exakteste Methode.

Rayleigh-Streuungsmethode

Die Rayleigh-optische Streuung oder Dicke erzeugt an Aerosolen das sogenannte diffuse Himmelslicht. Dieser Effekt tritt besonders stark im Bereich der kurzwelligen Strahlung auf. Bei dieser Methode wird die Aerosol-Komponente über dunklen, luftverschmutzungsfreien Ozeanflächen durch das gegenüber der Mie-Molekülstreuung (s. Kap. 2.2.6) unempfindliche NIR-Signal erfaßt. Zur Vermeidung der sich zum Aerosolsignal addierenden Artefakte, wie Wasserschaum und Glitzerreflexe, wird unter großem Sicht- und Sonnenwinkel aufgenommen. Der im NIR-Bereich ermittelte Aerosolgehalt wird von verschiedenen Aerosolmodellen auf den Bereich der kurzwelligen Strahlung übertragen. Allerdings eignet sich diese Methode bei SPOT aufgrund fehlender Verfügbarkeit eines kurzwelligen Kanals weniger (DILLIGEARD, 1996).

b) Relative Sensorkalibrationsmethoden

Die relativen Kalibrationsmethoden bewirken eine Eliminierung der in den kalibrierten Daten verbleibenden Fehler zwecks Verbesserung der qualitativ-visuellen Erscheinung der Bilddaten.

Die relative Kalibrierung umfaßt verschiedene Unterformen der Datenhomogenisierung:

- a) kanal–interne Equalisierung (engl. intra–band) der Satellitensignale, d.h. eine Angleichung der voneinander abweichenden Detektorwerte eines Kanals an den jeweiligen Durchschnittswert des Kanals
- b) Signale verschiedener Kanäle eines Sensors (engl. inter–band)
- c) Kanalsignale multitemporaler Sensoren oder verschiedener Sensorinstrumententypen

Der relative Kalibrierungsansatz erfordert die Kenntnis der absoluten Werte von invarianten Objektstrahlungsfeldern:

1. Stabile Wüstenflächen

Die temporale radiometrische Instabilität nicht atmosphärisch korrigierter Wüstenflächen wird über den Zeitraum eines Jahres mit weniger als 1–2 % angegeben (COSNEFROY, 1996). Unter der Annahme eines invarianten TOA–Reflexionssignals läßt sich mittels des direkten Vergleichs der Sensorsignale die temporale Sensitivität des Sensors ablesen, bzw. eine Kontrolle der Sensorkalibrierung vornehmen. Zusätzlich läßt sich so die Stabilität der an Bord befindlichen Kalibrationsquellen überprüfen, die im Fall von SPOT 1–3 eine sehr hohe Stabilität aufweisen (HENRY, 1993). Die Betrachtung invarianter Wüstenflächen eignet sich zudem zur Interkalibrierung verschiedener Satellitensensortypen (DINGUIRARD, 1995).

2. Wolkenfelder

Insbesondere spektral flache, helle Wolkenfelder in großer Höhe (10 km) weisen im visuellen und NIR–Spektralbereich eine spektral konstante Reflexion auf (VERMOTE, 1995). Atmosphärische Effekte intervenieren in diesen großen Höhen ausschließlich durch geringfügige Rayleighstreuungs– und Ozoneffekte, da Aerosole sich vorwiegend in geringeren Atmosphärenhöhen konzentrieren. Erfahrungswerte der radiometrischen Instabilität bewegen sich im Bereich von 1 % (HAGOLLE, 1996).

3. Lichtreflexionen auf Wasser

Die spiegelnde Reflexion auf Wasserflächen kann –ähnlich der Wolkenfelder– zur Kalibrierung verschiedener Kanäle eines Sensors eingesetzt werden. Bei dieser Methode wird die Differenz aus dem Sensorsignal auf einer Wasserschimmerzone und jenem abseits dieser Zone gebildet. Das Verhältnis dieser Differenz zweier verschiedener Kanäle steht in Abhängigkeit zur atmosphärischen Streuung und Absorption, welche sich jeweils leicht modellieren läßt. Dieser Ansatz funktioniert nur bei Windgeschwindigkeiten, die einerseits keine Signalsättigung erzeugen und andererseits die Wasserreflexe ausreichend großflächig ausbreiten. Die Ungenauigkeit bewegt sich um den Wert von 1 %, wobei die größte Fehlerquelle von der Kenntnis und Wahl des korrekten Aerosoltyps ausgeht.

4. Mondbeobachtungen

Die Reflexionsstabilität des Mondes ist zwar extrem hoch, doch variiert seine Strahldichte während einer Mondphase im Bereich von ± 5 %. Diese große Werteschwankung ist für eine präzise radiometrische Kalibrierung unakzeptabel.

Der quadratische mittlere Fehler (RMS) liegt insgesamt für die absolute Korrektur mit 3–5 % erfahrungsgemäß höher als für die relative Angleichung mit 0,1–0,5 % (DINGUIRARD & SLATER, 1997).

2.2.5.2 Radiometrische Korrektur von MSS–Daten

Optische Sensoren messen die durch Reflexion und Streuung der einfallenden Solarstrahlung

am Boden und in der Atmosphäre erzeugte Strahldichte in einem gefilterten Spektralbereich, im Fall von MSS in einer Spektralbreite von 0,5–1,1 μm . Die spektrale Strahldichte L_λ erlaubt – im Gegensatz zur kanalspezifischen Strahldichte L – einen Vergleich unterschiedlicher Satellitensensoren.

L_λ beschreibt den gewichteten Durchschnitt der Strahldichte in Abhängigkeit zur spektralen Bandbreite oder Sensitivität BW (MARKHAM & BARKER, 1987):

$$L = L_\lambda * BW$$

$$L_\lambda = L_{\min\lambda} + (L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda} / DN_{\max\lambda}) * DN$$

L	= kanalspezifische Strahldichte oder Radianz in [$\text{mWcm}^{-2} \text{sr}^{-1}$]
L_λ	= spektrale Strahldichte oder Radianz in [$\text{mWcm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$]
BW	= spektrale Breite eines Kanals (bandwidth) in [μm]
$L_{\min\lambda}$	= kanalspezifischer Minimumwert der Strahldichte oder Radianz (L_{\min} / BW)
$L_{\max\lambda}$	= kanalspezifischer Maximumwert der Strahldichte oder Radianz (L_{\max} / BW)
$DN_{\max\lambda}$	= max. Wertespanne der in DN (digital numbers) skalierten Grauwerte
DN	= in DN (digital numbers) quantifizierter, bit-skaliertes, diskreter Grauwert

Bei der Betrachtung des physikalischen Sensormodells von Landsat MSS ergeben sich folgende Probleme (MARKHAM & BARKER, 1987):

1. Im Kanal 7 (s. Kap. 2.2.4.1) wurden die Daten von Landsat–1 MSS durch die Bodenprozessierungsstation unkalibriert, lediglich in streifenkorrigierter Form herausgegeben. Die Übereinstimmung der a priori gemessenen Sättigungsgrenzwerte der spektralen Strahlungsdichte ($L_{\max\lambda}$) zu den tatsächlich während des Betriebs am Satellitensensor gemessenen bleibt hier ungewiss.
2. Weiterhin bleibt die Vergleichbarkeit aller Landsat MSS–Sensortypen aufgrund der Unkenntnis der zur Errechnung der Konstanten für die dynamische spektrale Kanalbreite (BW) bei Landsat–1 und jener für die darauffolgenden Sensoren von Landsat 2–5 verwendeten Algorithmen fraglich.

Zwischen dem Sensorgrauwert DN , der Strahldichte L sowie dem absoluten Sensorkalibrationskoeffizienten A wird eine lineare Beziehung vorausgesetzt. Letzterer wird entweder vor dem Start (pre–flight) unter Laborbedingungen, während des Betriebs (in–flight) an Bord oder nach der Mission mittels eichender Strahlungsquellen (Lampen, Sonne) oder einer bekannten Objektstrahlung im Labor (post–flight) ermittelt (DINGUIRARD & SLATER, 1997):

$$DN = A * L$$

Im Bereich niedriger Signalantwort zeigt sich eine Nicht–Linearität des Sensors, die mittels der quadratischen Beziehung nach PALMER (1984) wesentlich präziser ausgedrückt werden kann:

$$DN = A * L + B * L^2$$

$A, B =$ interne Kalibrationskoeffizienten oder durch a posteriori–Experimente ermittelte Sensor–Kalibrationskoeffizienten

Zur Umrechnung der Sensor–Grauwerte in physikalische Werte der spektralen Strahldichte (spectral radiance) sind Kennwerte der spektralen Kanalbreite (Maximum– und Minimum–Wert oder Mittelwert) erforderlich. Für den MSS–Sensor erwiesen sich die auf der Basis relativer spektraler Signalkurven errechneten Mittelwerte der spektralen Kanalbreite nach der

Methode des quadratischen Moments von PALMER (1984) als die exaktesten (MARKHAM & BARKER, 1987).

2.2.6 Atmosphärische Einflüsse des radiativen Strahlungstransfers

Oberflächeneigenschaften und atmosphärische Effekte bestimmen in Abhängigkeit von der Sonnenposition die am optischen Satellitensensor innerhalb des Spektralbereichs vom visiblen bis nahen Infrarot ($0,4 - 2,5 \mu\text{m}$) auftreffende Strahlung. Diese wird beim Durchgang der Atmosphäre durch die atmosphärische Extinktion (Filterung), die Abschwächung der Strahlung infolge diffuser Streuung und Absorption an Litho- und Hydrometeoren, gewandelt. Atmosphärische Störungen verursachen spektrale und räumliche Variationen des Satellitensignals, die sich auf beiden Strahlungspfaden, sowohl auf dem Hinweg von der Sonne zur Erdoberfläche als auch auf dem Rückweg von der Erdoberfläche zum Satellitensensor, auswirken.

Das hier im Gebiet des Lac Faguibine ausgewählte MSS-Satellitenmaterial wird vor allem durch atmosphärisches Aerosol aus Mineralstaub beeinflusst.

In den Modellschemata A und B zum radiativen Transfer (*Fig. 2.10*) wird die atmosphärische Beeinflussung der Strahlungspfade von der Einstrahlung zum Bodenobjekt bis zur Rückstrahlung und zum Eintreffen des Meßstrahlungssignals am Satelliten deutlich. Die am Satelliten eintreffende Strahlung besteht aus einer Kombination drei verschiedener Quellen:

1. die tatsächlich von Boden- und Nachbarobjekten reflektierte und durch die Atmosphäre zum Satelliten transportierte Strahlung
2. die Strahlung, die innerhalb der Atmosphäre diffus verstreut wird
3. die von der Atmosphäre gestreute Strahlung, die im weiteren mit dem Atmosphärenhintergrund interagiert

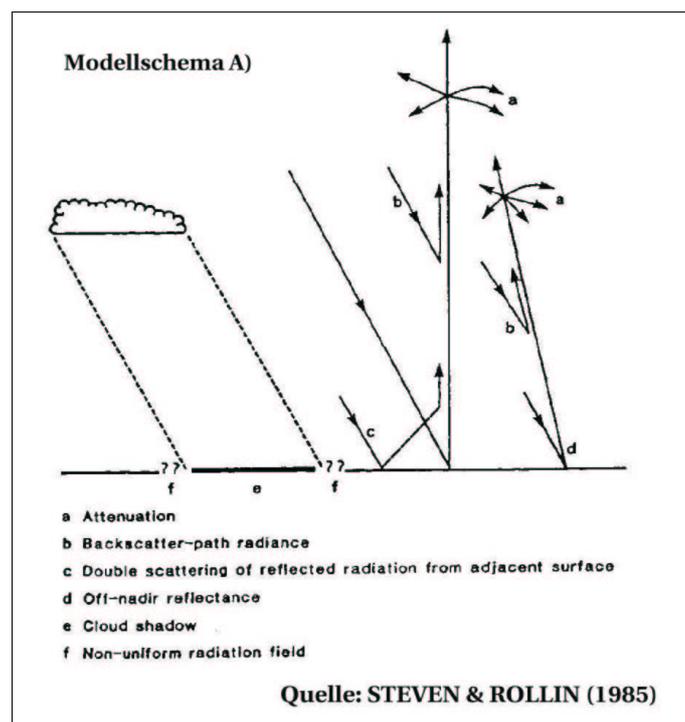


Fig. 2.10 Modellschema A zum radiativen Strahlungstransfer

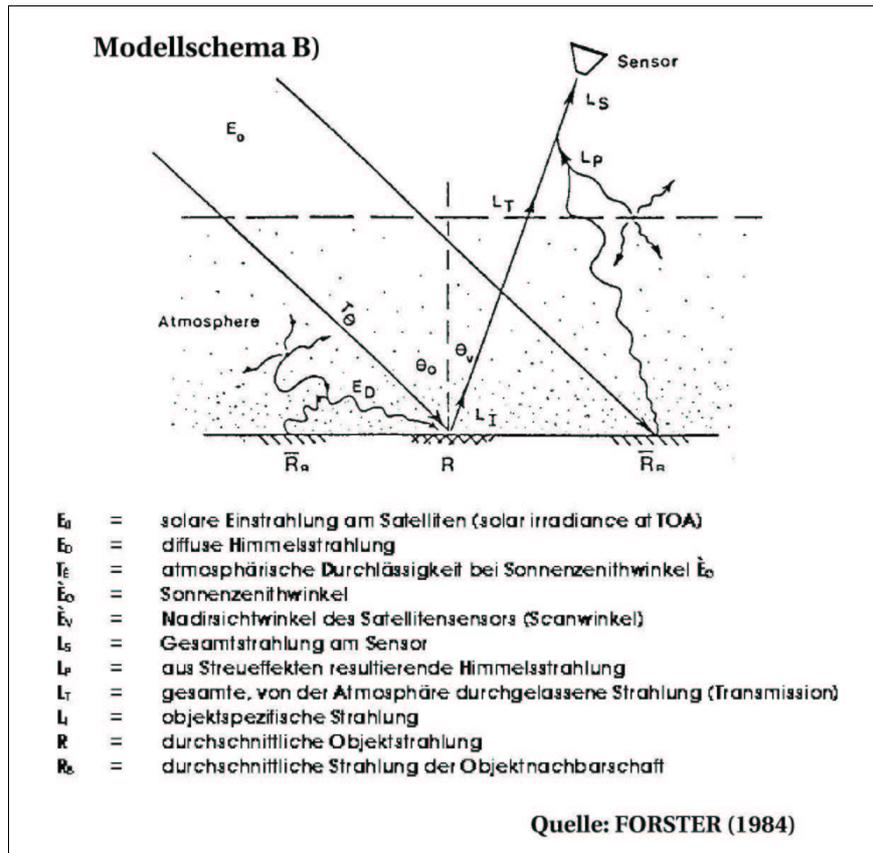


Fig. 2.10 Modellschema B zum radiativen Strahlungstransfer

Die vom Bodenobjekt reflektierte Strahlung trägt ihre Energie direkt, während die beiden anderen Strahlungsquellen ihre Energie in gegenseitiger Kombination zum Satelliten transportieren. Die Satellitenbeobachtung von Ozeanflächen zeigt beispielsweise, daß 80–90% der am Satelliten eintreffenden Strahlung aus dem Atmosphärenhintergrund stammen und nur 10–20% einzig vom Bodenobjekt der Ozeanfläche reflektiert werden (http://www.physics.miami.edu/~chris/envr_optics.html).

Wie in Kap. 2.1.2 bereits angeführt, bedingt die physikalisch–chemische Charakteristik des Bodenobjekts nicht nur den jeweiligen Reflexionstyp (spekular, diffus oder anisotrop), sondern auch die Intensität der reflektierten Sonnenstrahlung sowie auch die Intensität der Himmelsstrahlung (diffuse sky irradiance).

Das diffuse Himmelslicht bzw. der Eigenstrahlungsanteil der Atmosphäre (**Fig. 2.10**) addiert sich in rückkoppelnder Weise zu den Strahlungspfaden der am Bodenobjekt einfallenden sowie der vom Bodenobjekt reflektierten Sonnenstrahlung (solar irradiance).

Zusammen mit der Strahlung eines Objekts in Pixelnachbarschaft wird dieser Strahlungspfadanteil, der nicht mit dem Bodenobjekt selbst im jeweiligen Pixelausschnitt in Verbindung tritt, als Strahlungsstreuung im Atmosphärenhintergrund (backscatter path radiance) bezeichnet. Damit erreicht in Abhängigkeit von der Intensität der atmosphärischen Partikelladung und der Länge der Strecke der zu durchquerenden Atmosphärenschicht nur ein Teil der Strahlung den Satellitensensor. Die von der Strahlung zu überwindende Atmosphärenstrecke hängt dabei vom Sichtfeld (angular field of view) des Luftbild- oder Öffnungswinkels (instantaneous field of view) am Satellitensensor ab. Je größer sich der jeweilige Winkel erweist (bei Flugzeugscannern zwischen 90–120°), desto größer wird die Wegstrecke durch die Atmosphäre. Der Flugzeugscanner Daedalus verfügt beispielsweise

über einen großen Öffnungswinkel von ca. 80° mit ca. 37 % Zuwachs vom Nadir bis zum Rand des Flugstreifens. Im Verhältnis dazu besitzt LANDSAT-MSS einen recht kleinen Öffnungswinkel von nur 11.56° mit folglich kürzeren Atmosphärenwegen.

Die atmosphärische Transmission wird mittels der Trübungsintensität oder dem Anteil des Sonnenlichts ausgedrückt, welches die Atmosphäre zu durchqueren vermag. Die Extinktion ist die Summe der atmosphärischen Streu- und Absorptionsprozesse der globalen Sonneneinstrahlung. Sie wird durch das dimensionslose Maß der **aerosoptischen Dicke** ausgedrückt, welche sich als Produkt aus der Summe aller spektraler Extinktionskoeffizienten und der Weglänge des Strahlungspfads errechnen läßt.

Eine optische Dicke von 1 bedeutet, daß der $1/e$ -te Teil ($e = 2,71828\dots$) der am Oberrand der Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung den Boden erreicht. Das vom Boden reflektierte Signal wird auf dem Weg zum Oberrand der Atmosphäre um gut $2/3$ von atmosphärischen Partikeln zurückgehalten (KAUFMANN, 1993).

Die atmosphärische Transmission T_θ wird rechnerisch ausgedrückt durch (FORSTER, 1984):

$$T_\theta = \exp(-\tau \sec\theta)$$

$$\begin{aligned} \tau &= \text{optische Dicke} \\ \theta &= \text{Sonnenzenit- oder Satellitennadirwinkel} \end{aligned}$$

Die spektralabhängige optische Dicke $\tau(\lambda)$ setzt sich aus drei verschiedenen, durch unterschiedliche Atmosphärenpartikelgrößen hervorgerufene, atmosphären-physikalische Teilkomponenten zusammen (FORSTER, 1984):

$$\tau(\lambda) = \tau_m + \tau_p + \tau_a$$

$$\begin{aligned} \tau_m &= \text{Rayleigh-Streuung} \\ \tau_p &= \text{Mie-Streuung} \\ \tau_a &= \text{selektive Absorption} \end{aligned}$$

Innerhalb dieser Summengleichung stellen die ersten beiden Komponenten der optischen Dicke einen Streuprozess dar. Bei der dritten Komponente handelt es sich um einen Absorptionsprozess (STEVEN & ROLLIN, 1986). Das Auftreten eines der nachfolgend beschriebenen Effekttypen ist von der Beschaffenheit der als feste (griech.: sol) und/oder flüssige, in der Luft (griech.: aero) schwebenden Aerosole abhängig.

1. Molekulare oder Rayleigh-Streuung (τ_m)

wird durch Interaktion von Molekülen bewirkt, die kleiner als die Wellenlänge der Strahlung sind. Dies können z.B. permanente Gasmoleküle (Sauerstoff, Stickstoff etc.) und kleinere, in Wolken und Nebel vorkommende Hydrosole. Diese, erst durch die Existenz anderer Aerosolpartikel gebildeten Wassertröpfchen und Eiskristalle, können Radien von $r = 0,1-1,0 \mu\text{m}$ erreichen. Die durch Rayleigh-Streuung verursachte wellenlängenabhängige atmosphärische Zurückhaltung der Strahlung (attenuation) bzw. Streuungsintensität ist invers proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge.

Die *Raman-Streuung* hängt wie die Rayleigh-Streuung von der Polarisierbarkeit der Moleküle ab. Infolge von Molekül-Eigenschwingungen bewirkt sie eine Frequenzverschiebung des Lichtes.

2. Aerosol- oder Mie-Streuung (τ_p)

tritt dann auf, wenn die Partikel ähnliche Grösse zur Wellenlänge aufweisen, wie z.B. bei größeren Aerosolen, windgetragenen Mineralstaub, Seesalzteilchen, Pollen, Ruß etc., die sich um einen Partikelradius von $r = 0,5$ bis $100 \mu\text{m}$ bewegen. Die ebenso

wellenlängenabhängige (nach ÅNGSTROM (1961) um den Faktor $1/\lambda^{1,3}$) Mie–Streuung wird in nicht linearer Weise durch die Größe und vertikale Verteilung der Aerosole beeinflusst. Diese Aerosolstreuphänomene tauchen vornehmlich in den unteren Atmosphärenschichten (1,5 – 5 km) auf.

3. Nicht selektive Streuung

tritt auf, wenn die Strahlung mit atmosphärischen Bestandteilen zusammentrifft, deren Durchmesser deutlich größer als die Wellenlänge ist.

Die Wirkung der durch atmosphärische Gase erzeugten Rayleigh–Streuung ist mittlerweile aufgrund genauer Kenntnisse der atmosphärischen Gas–Zusammensetzung (99 % Stick– und Sauerstoff), Konzentration und Verteilung gut erforscht. Zu den aerosolbedingten Streueffekten liegen aufgrund ihrer sehr variablen Konzentration und hohen Formvariabilität weniger gesicherte Erkenntnisse vor.

Während der nach unten zum Bodenobjekt (forward scattering) und nach oben zum Satelliten (back scattering) gerichtete Strahlungspfad anteilsleich durch die Rayleigh–Luftmolekülstreuung modifiziert wird, wirkt sich die Mie–Aerosolstreuung stärker auf den nach oben gerichteten Strahlungspfad aus (FORSTER, 1984). In einer relativ ungetrübten Atmosphäre ist hingegen eine in beide Strahlungspfadrichtungen anteilsleiche Rayleigh–Streuung vorzufinden. Eine stark getrübte Atmosphäre weist ca. 95 % des Gesamtanteils der gestreuten Strahlung durch die nach oben gerichtete Mie–Aerosolstreuung auf (TURNER & SPENCER, 1972). Rayleigh– und Mie–Streuung verhalten sich invers zur Wellenlänge der Strahlung mit stärkster Beeinflussung des kurzwelligen Strahlungsbereichs in beiden Fällen (AVERY & BERLIN, 1992).

4. Selektive Absorption (τ_a)

Sie wird infolge stark wellenlängenabhängiger Absorptionseffekte (τ_a) – nur ein selektiver Strahlungsanteil wird vom Medium transmittiert – im Wesentlichen an Wasserdampf–, Sauerstoff–, Ozon– und Kohlendioxid–Molekülen auf beiden Richtungspfaden der Strahlung ausgelöst:

$$\tau_a = \tau_{\text{H}_2\text{O}} + \tau_{\text{O}_2} + \tau_{\text{O}_3} + \tau_{\text{CO}_2}$$

Beim Passieren eines Mediums werden damit bestimmte Spektralbereiche geschwächt oder vollständig rausgefiltert (Absorptionsbanden). Der spektrale Bandenbereich um 0,76 μm wird von der Strahlungsabsorption an Sauerstoffmolekülen eingenommen, der Spektralbereich von 0,5 – 1,0 μm dagegen in nur geringem Maße durch Wasser– und Ozonabsorption.

Während in den kürzeren Wellenlängenbereichen (0,2–4,0 μm) vorwiegend atmosphärische Streueffekte an Wolken und anderen atmosphärischen Bestandteilen auftreten, kommen im langwelligen Spektralbereich der thermalen Infrarotstrahlung (4,0 –20,0 μm) besonders starke Absorptionseffekte an Ozon– und Wasserdampfpartikeln vor.

2.2.6.1 Korrekturmethode atmosphärischer Einflüsse

Infolge der zuvor beschriebenen vielfältigen atmosphärischen Einflußkomponenten sind die in einer Satellitenszene empfangenen Radianzwerte jeweils nur für diese betreffende Szene gültig. Die Übertragbarkeit auf ein anderes nicht atmosphärisch korrigiertes Szenendatum ist generell mit Fehlern behaftet. Das Ziel der atmosphärischen Korrektur besteht in der Reduzierung von Fehlern mittels Schätzung der Boden–Albedowerte und/oder der

Normierung eines multitemporalen/–sensoriellen Datensets auf eine gemeinsame radiometrische Werteskala.

Da hier eine Landsat–Datenserie des visiblen bis nahen Infrarot–Spektralbereichs zur Debatte steht, werden in der Folge nur die sich zu den Radianzwerten addierenden atmosphärischen Streuungseffekte – die bei Bilddaten des visiblen Spektrums dominierenden Fehler – diskutiert. Die MSS–Spektren wurden hinsichtlich der Vermeidung atmosphärischer Absorptionseffekte so definiert, daß der durch diese erzeugte multiplikative Effekt vernachlässigbar ist (SONG et al., 2001).

Absolute atmosphärische Korrekturmethode bestehen in der Umrechnung der am Satelliten oder Oberrand der Atmosphäre aufgenommenen Radianz–, bzw. Grauwerte in Albedowerte am Boden. Dies kann während des Satellitenüberflugs zeitgleich durch mit einem Spektroradiometer im Gelände aufgenommene Bodenradianzwerte realisiert werden. Fehlen solche Referenzwerte, können stattdessen präzisere, aber kompliziertere absolute radiative Transfermodelle herangezogen werden, die eine theoretische Schätzung der zum Aufnahmezeitpunkt vorhandenen aerosoloptischen Dicke vornehmen.

Bei den relativen atmosphärischen Korrekturmethode entsprechen – ohne Betrachtung der am Boden tatsächlich vorhandenen absoluten Albedowerte – im korrigierten Bild alle Pixel gleichen Grauwerts einem jeweils korrespondierenden Albedowert (ELVIDGE et al. 1995; SONG et al. 2001). Die relative Methode ist ein empirisches Verfahren, welches auf der Annahme einer simplen linearen Beziehung zwischen den Kanälen verschiedener Bildszenen, ungeachtet der zeitlichen Sensorevolution, basiert. Sie erfordert zwingend die Identifizierbarkeit zeitstabiler Bodenobjekte im Satellitenbild (HALL et al. 1991). Relative atmosphärische Korrekturmethode bieten zwar den Vorteil keine zum Überflugtermin aufgenommene atmosphären–optische Messdaten zu benötigen, liefern jedoch gegenüber den absoluten Methoden keine Eliminierung atmosphärischer Artefakte. Bei letzterer werden lediglich alle verwendeten Bildszenendaten zur radiometrischen Skala des Referenzbildes in Übereinstimmung gebracht.

Die atmosphärischen Korrekturmethode unterscheiden generell relative empirische und modellorientierte absolute Verfahren:

Regressionsbasierte Methoden (regression based technique)

Diese Korrekturverfahren konzentrieren sich auf die Ermittlung des Strahlungsgewinns (gain) und des Versatzwertes der linearen Regressionsfunktion. In ihrem gebietslokalen Bildansatz unterscheiden sich die Methoden nach der Art der Auswahl geeigneter Pixeltestflächen.

Histogrammverschiebung (histogram shift oder bulk correction)

Diese sehr vereinfachte empirische Korrekturmethode beruht auf einer einfachen linearen Regressionsbeziehung zeitlich invarianter Objektflächen. Dies erfordert eine Analyse der Histogrammverteilung im Bereich eines dunklen, stabilen Bildausschnitts wie z.B. einer tiefen oligotrophen Wasser– oder intensiven Schattenfläche (CASELLES & LOPEZ GARZIA, 1989).

Die Methode unterstellt die atmosphärische Nicht–Beeinflussung des NIR–Kanals (bei MSS–Kanal 7) und folglich eine Repräsentation klarer Wasserflächen durch Null–Grauwerte infolge totaler Absorption der NIR–Strahlung. Ein Pixelminimum, das also über dem Wert 0 oder über dem 3 %–Wert der Summenkurve des Bildhistogramms liegt, wird als atmosphärische Beeinflussung eingestuft. Zur Korrektur werden schließlich die Pixelwerte aller Kanäle um genau diesen Differenzbetrag vermindert. Die Methode wird als *Dunkle–Pixel–Subtraktion (dark pixel/ object subtraction)* bezeichnet (GONIMA, 1993), besitzt jedoch nur Gültigkeit unter der idealisierten, in der Realität nicht anzutreffenden Annahme einer gleichmässigen Verteilung atmosphärischer Störungseffekte über der gesamten Satellitenszene (z.B bei MSS eine Szenenfläche von 185 x 185 km²).

Da atmosphärische Störungen (z.B. Wolkenfelder) und Wetterereignisse (z.B. Sandstürme, staubbeladene Windfelder) oftmals nur Teilbereiche einer Satellitenszenenfläche beeinflussen, erlaubt die Methode keine eindeutige Eliminierung atmosphärischer Artefakte, sondern lediglich eine relative radiometrische Anpassung multitemporaler Datenszenen mittels Normalisierung der Bildgrauwertfunktionen. Weiterhin neigt die Methode zur Rauschanfälligkeit und verlangt die Existenz einer Vielzahl dunkler Pixel im betreffenden Bild. Dennoch wird diese Korrekturtechnik in der Literatur, mit dem Argument einer auf älterem Datenmaterial nicht rekonstruierbaren Atmosphärensituation, gerechtfertigt (RICHARDS, 1986). Andererseits beschränken ELVIDGE et al. (1995) die Anwendbarkeit ausschließlich auf Bildmaterial phänologisch ähnlicher Aufnahmezeitpunkte. Dieser ersten Annäherungs-Methode steht der potentielle Einsatz von Atmosphären-Schätzmodellen entgegen, von welchen im Rahmen dieser Studie das Streamer-Modell in seiner Anwendung und Wirksamkeit vorgestellt wird.

Pseudo-Invariante Objekte (Pseudo-Invariant Feature)

Die von SCHOTT et al. (1988) entwickelte Methode wendet zur Lokalisierung möglichst objekt-invarianter Testpixelmengen mit niedriger grüner Vegetationsbedeckung einen Schwellenwert auf das Kanalverhältnis von nahem Infrarot zum roten Spektralbereich an. Die kanalspezifischen Werte für Steigung (gain) und Achsenversatz (offset) der Grauwert-Regressionsfunktion werden jeweils mittels einer linearen Verschiebung, d.h. aus den Werten für Mittel- und Standardabweichung, die jeweils zur Übereinstimmung der Pixelwertemenge von Ratio- und Original-Bezugsbild führen – ermittelt.

Dunkle und helle Pixelmenge (dark and bright pixel set)

HALL et al. (1991) wählen in den betreffenden Satellitenbildern auf der Basis des „Durchgrünungs“-Hauptkomponenten-Kanalbildes nach KAUTH & THOMAS (1976) (kritische Anmerkungen dazu in Kap. 2.2.2) unabhängig voneinander dunkle und helle Pixelmengen aus. Das Hauptkomponententransformations-Ergebnisbild erschließt dunkle Pixel überwiegend als tiefe Wasserbereiche, helle Pixel als überwiegend vegetationslose, helle Landoberflächen. Die Mittelwerte der dunklen sowie der hellen Pixel-Testmengen werden in den betreffenden Satellitenbildern zur Festlegung der kanalspezifischen Grauwert-Regressionsfunktion verwendet.

Beide bildstatistischen Verfahren benötigen keine aufeinander abgestimmte Lokalisierung der Pixel-Testmengen in den verschiedenen Ausgangsbildern.

Streuungsdiagramm-kontrollierte Regression (scattergram controlled regression)

YUAN & ELVIDGE (1993) entwickelten ein Verfahren speziell zum Einsatz in der Veränderungsdetektion auf Landsat MSS-Bildern. Invariante Bildpixel werden hier manuell aus Infrarot-Streuungsdiagrammen entlang der visuell bestimmten Korrelationsdiagonalen selektiert und zur Definition der Regressionsfunktion verwendet. Wasser- und Landflächen lassen sich am deutlichsten im Infrarot-Spektralbereich unterscheiden. ELVIDGE & YUAN (1995) stellten wenige Jahre später eine automatisierte Version ihres Ansatzes vor.

Atmosphärische Modellierung (atmospheric modelling)

Mit den zum Aufnahmezeitpunkt aufgenommenen oder modellierten atmosphärischen Parameter (Wasserdampfgehalt, Ozon, Temperatur etc.) wird ein komplexes Modell zur theoretischen Bestimmung des atmosphärischen Strahlungspfadanteils für den speziellen Satellitenüberflugstermin zusammengestellt. Die Eliminierung oder Minimierung der atmosphärischen Einflüsse wie Aerosolstreuung und Gasabsorption wird in derartigen radiativen Strahlungstransfer-Modellen durch die Lösung der radiativen Transfergleichung erzielt. Die meisten Modelle benötigen zur Berechnung der korrigierten Strahlungsdichte oder Radianz am Satellitensensor die atmosphärischen Parameter horizontale Visibilität und Wasserdampfgehalt zum Aufnahmezeitpunkt. Die zahlreichen und teilweise äußerst

komplexen Korrekturmodelle atmosphärischer Einflüsse laufen im wesentlichen auf eine Simulation des radiativen Strahlungstransfers hinaus, wobei spezielle Modelle für den Bereich des visiblen bis nahen Infrarot-Spektrums (Disort, Streamer, FluxNet etc.) und spezielle zur zeilenweisen atmosphärischen Strahlungsdichte-Korrektur (MODTRAN, LOWTRAN 7, 6S etc.) entwickelt wurden. In diese sind atmosphärische Erfahrungswerte integriert. Darüber hinaus können mit diesen Modellen auch umfangreiche – so vorhanden – just zum Satellitenüberflug aufgenommene absolute Referenz-Messdaten (z.B. mittels Radiosonden etc.) verarbeitet werden (ITTEN & MEYER, 1993).

Radiative Computer-Modelle leisten eine Radianz-zu-Albedo-Konvertierung (radiance to reflectance conversion) mit der Ausgabe der geschätzten Boden-Albedowerte. Die Konvertierung von Satelliten-Radianz- zu tatsächlich am Boden vorhandenen Albedowerten erfordert zur Definition der Beziehung Satelliten-Radianzwerte von mindestens zwei spektral differenten, homogenen Bildkalibrationsobjekten. Zur Errechnung der Boden-Albedowerte wird eine diffuse Reflexionsoberfläche (Lambert Strahler) in wolkenloser Atmosphäre vorausgesetzt. Das am Satelliten eingehende, atmosphärisch beeinflusste Signal läßt sich folgendermaßen errechnen (MORAN et al. 1992):

$$\mathbf{L}_{\text{sat}} = \mathbf{L}_p + \frac{(\rho \mathbf{F}_d \mathbf{T}_v)}{(\pi(1 - s\rho))}$$

\mathbf{L}_{sat}	=	Radianz am Satelliten (<i>at-sat-radiance</i>)
\mathbf{L}_p	=	aus verschiedenen Streueffekten resultierende Pfad-Strahlung (<i>path radiance</i>)
ρ	=	Albedo am Boden (<i>surface reflectance</i>)
\mathbf{F}_d	=	Bestrahlungsstärke am Boden (<i>surface irradiance</i>)
\mathbf{T}_v	=	atmosphärische Durchlässigkeit (<i>transmittance</i>)
s	=	durch den nach oben gerichteten Strahlungspfad zum Boden zurückgestreuter Strahlungsanteil (<i>backscatter downwelling radiance</i>)

Es setzt sich im wesentlichen aus der Addition von Strahlungspfad-Streuung und der von der atmosphärischen Durchlässigkeit beeinflussten Bestrahlungsstärke am Boden \mathbf{F}_d zusammen. \mathbf{F}_d wird wiederum aus dem Produkt der exoatmosphärischen Solarkonstante, dem Kosinus des Sonnenzenitwinkels und der atmosphärischen Durchlässigkeit in Einstrahlungsrichtung gebildet. Da der Anteil s , der vom aufwärts gerichteten Strahlungspfad wieder zum Boden zurückgestreut wird, sehr klein ist, kann der Ausdruck $(1 - s\rho)$ bei der Auflösung der Gleichung nach der Boden-Albedo ρ vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich:

$$\rho = \frac{\pi(\mathbf{L}_{\text{sat}} - \mathbf{L}_p)}{\mathbf{F}_d \mathbf{T}_v}$$

Die Algorithmen der real am Boden gemessenen Reflexion ergeben:

1. eine Normalisierung der spektralen Kanalbreitenschwankung
2. eine Reduktion der Szenenvariabilität infolge der Kompensation des Sonnenstands sowie von Effekten der Entfernung zwischen Sonne und Erde.
3. eine Eliminierung der atmosphärischen Aerosolartefakte

Liegen zum Überflugstermin detaillierte in-situ-Messdaten sowie mittels eines Feldspektrometers aufgenommene Boden-Radianzwerte vor, kann das Korrekturverfahren in absoluter Weise angewandt werden.

Über relative Korrekturmethode sind lediglich relative Differenzen atmosphärischer Bedingungen kompensierbar. Bei weiträumig und langzeitlich einzusetzenden Klassifikations- und change detection-Analysen sind lineare Korrekturmethode ungeeignet.

Zum einen sind invariante Bildobjektbereiche nur sehr schwierig auffindbar oder identifizierbar, zum anderen kann die horizontale atmosphärische Aerosolkonzentration eines ausgedehnten Beobachtungsgebiets nicht als homogen unterstellt werden. Weiterhin verursacht der Einsatz multipler Sensoren innerhalb eines multitemporalen Bilddatensets aufgrund der zeitlichen Sensorveränderung zumindest bei historischen Sensorserien eine nicht-lineare Abweichung der Sensorwerte. Da keine retrospektive Rekonstruktion der atmosphärischen Situation zum Aufnahmezeitpunkt der hier verwendeten multi-temporalen und multi-sensoriellen historischen MSS-Daten möglich ist, kann eine einfache Regressions-Korrekturmethode nicht zur Anwendung kommen.

2.2.6.2 Atmosphärische Simulationsmodellierung der multitemporalen MSS Datenserie

Bei der vorliegenden MSS-Datenserie fällt die Wahl auf einen atmosphärischen Simulationsansatz mit empirischer Komponente. Dazu werden die erforderlichen, zu den retrospektiven Aufnahmezeitpunkten nicht rekonstruierbaren aerosol-optischen Messdaten aus einem Computer-Modell verwendet.

Seit der Konzeption von LOWTRAN (KNEIZYS et al., 1983) Anfang der 80er Jahre existieren mehrere Softwarekonzepte zur Simulation des radiativen Strahlungstransfers, darunter die weiterhin recht verbreiteten Modelle 5S/6S (TANRÉ et al. 1990; VERMOTE et al., 1994) und MODTRAN (SNELL et al., 1995) etc., die allesamt zur Simulation radiativer Strahlungsflüsse und der am Sensor gemessenen Strahldichtewerte eingesetzt werden.

Für die atmosphärischen Simulations-Experimente wurde aufgrund der einfachen Parameterdefinierung das digitale Softwaremodell zum radiativen Transfer „Streamer“ der Version 2.5p (KEY, 1999) ausgewählt. In Streamer lässt sich eine große Variation unterschiedlicher Atmosphären- und Bodensituationen modellieren. Als Ausgabeinheit kann entweder der strahlungsenergetische Parameter der Strahldichte (radiance oder intensity) oder die Bestrahlungsstärke (irradiance oder flux) gewählt werden. Das 1992 von SCHWEIGER & KEY an der Universität Boston entwickelte Softwaremodell enthält einen von der Rechnerarchitektur unabhängigen, über das Internet frei verfügbaren Quellcode mit einem text-kommandobasierten und benutzerfreundlichen Interface. (<ftp://stratus.bu.edu>, Stand: Jan. 2000).

Der Rechenprozeß wird in Streamer durch verschiedene Eingabeparameter gesteuert, deren Optionszuweisungen die Eigenschaften der Gesamt-Eingabedatenmenge repräsentieren. Die Ausgabe liefert Daten zur Strahldichte am Boden (at-soil) und am Satelliten (top-of-the-atmosphere) sowie zur Boden- und Satelliten-Albedo; dies optional für eine gesamte Satellitenszene oder für ein einzelnes Beispiel-Bildobjektpixel. Ebenfalls ist die Berechnung radiativer Strahlungseffekte von Wolken möglich, welche in dieser Studie jedoch keine Berücksichtigung finden wird.

Mittels Modellierungen in Streamer wird die atmosphärisch bedingte Veränderung der spektralen Bodenrückstrahlungssignale für die vier LANDSAT MSS-Kanäle 4–7 exemplarisch nachvollziehbar. Die generell dort definierbaren (KEY, 1999) und speziell für die MSS-Experimente definierten wesentlichen Eingabe- und Ausgabeparameter werden nachfolgend genannt:

1. Als *Ausgabeinheit* kann entweder die Strahldichte (radiance) oder die Bestrahlungsstärke (irradiance) gewählt werden. Letztere findet zumeist in Klimamodellen Anwendung. Die Strahldichte (radiance) wird als auf ein definiertes Flächen- und Raumwinkelelement treffender Strahlungsfluß in der Einheit Watt pro Quadratmeter und pro Steradian [W m^{-2}]

2 sr⁻¹] definiert (KRAUS & SCHNEIDER, 1988). In Streamer wird die in Satellitenhöhe empfangene TOA-Albedo oder Strahlungstemperatur (brightness temperature) auf ihren Bodenwert zurückrechenbar.

2. Die atmosphärischen *Streuungstypen* können optional und unabhängig von der Gasabsorption berücksichtigt werden. Die Rayleigh-Streuung wird insbesondere durch die kurzwellige Strahlung an Mikroaerosolen eines Partikelradius von $r = 0,1$ bis $1 \mu\text{m}$ ausgelöst, während die Mie-Streuung an Makroaerosolen eines Partikelradius von $r = 1$ bis $100 \mu\text{m}$ wirksam wird. Die atmosphärische Gaszusammensetzung des Streamer-Modells berücksichtigt Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlendioxid und Ozon.
3. In Streamer sind insgesamt fünf *Standard-Atmosphärenprofile* in der Differenzierung nach Sommer oder Winter und ihrer Breitenzonierung verfügbar, welche zu Luftdruck, Temperatur, Wasserdampf- und Ozongehalt auf Daten von ELLINGTON et al. (1991) basieren. Die Daten für die Temperatur- und Wasserdampfprofile des Arktischen Modells stammen von Küsten- und Drift-Meßstationen des arktischen Ozeans. Die maximale Vertikalausdehnung des Atmosphärenprofils ist auf eine Höhe von 100 km dimensioniert, wobei die Anzahl der sich über diese Distanz erstreckenden Höhenschichten individuell definiert werden kann.

Mit seiner geringen Konzentration an atmosphärischem Wasserdampf im unteren Profildbereich von ca. 6–8 km Höhe (*Fig. 2.11 a*) kommt das atmosphärische Wasserdampf-Standardprofil des 'Arktischen Winters' in Streamer der Charakteristik der sahelischen Atmosphäre am nächsten.

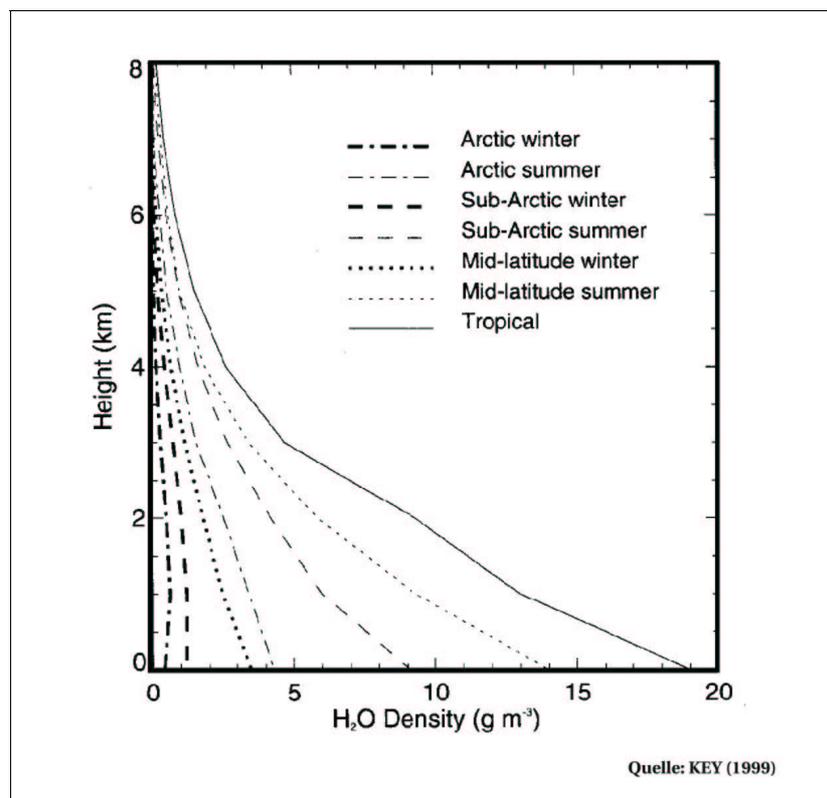


Fig. 2.11 a) Streamer-interne Standardprofile des atmosphärischen Wasserdampfgehalts

4. Die atmosphärische Aerosolkonzentration (Visibilität) wird in den Streamer-Aerosolmodellen über das Verhalten des Aerosol-Skalierungsfaktors (default aerosol vertical profile) und des normalisierten Extinktionskoeffizienten (default aerosol optical model) definiert. Es besteht die Möglichkeit zur Auswahl zwischen einem

benutzerdefinierten Aerosolmodell oder einem der vier Streamer–intern angebotenen Modelle, deren Daten dem radiativen Transfermodell LOWTRAN 7 entstammen. Für die vier Aerosolmodelle (troposphärisches, urbanes, rurales und ozeanisches) wird die spektralabhängige Extinktion in **Fig. 2.11 b**) dargestellt. Die Extinktion ist in Streamer nach einer Kombination aus troposphärisch und stratosphärisch unterschiedlicher Aerosolfracht definiert.

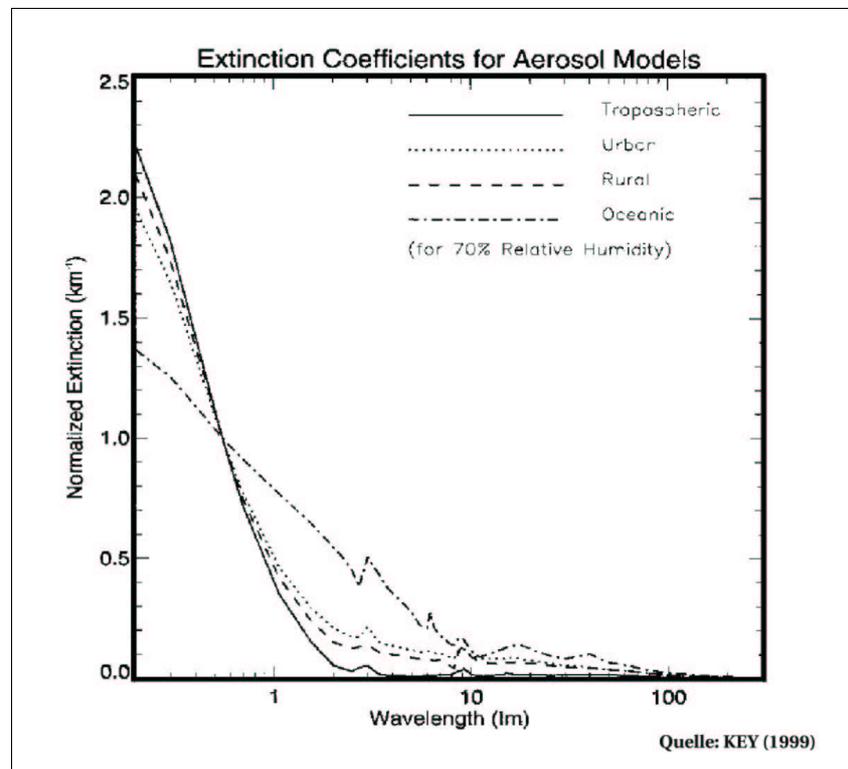


Fig. 2.11 b) Extinktionsverhalten der Streamer–Aerosolmodelle

Während die Aerosolkonzentration in ozeanischen sowie abgelegenen kontinentalen Gebieten in der Größenordnung von ca. 1000 bis ca. 10.000 Teilchen/ cm³ liegt, kann sie im urbanen Bereich insbesondere während der Heizperiode zur Winterzeit, durch Rußausstoß oder Oxidation aromatischer Kohlenwasserstoffe auf weit über 100.000 Teilchen/ cm³ ansteigen (<http://www.espere.net/Germany/theme/aerosolpart.html>, Abfragestand: 15.02.02).

Ozeanisches Aerosol wird u.a. aus Seesalzteilchen gebildet, die in der Luft zerstäubt werden und eine niedrige optische Dicke bedingen können. Urbanes Aerosol wird lokal als autochthones Material und als durch die Luft herantransportiertes kontinentales Aerosol gebildet. Es besteht typischerweise aus relativ kleinen Partikeln einer hohen optischen Dicke.

Im spektralen Scanbereich des MSS von 0,5 – 1,1 µm zeigen mit Ausnahme des ozeanischen alle Modelle eine ähnlich starke optische Dicke.

Aerosole arider Gebiete unterscheiden sich durch eine extrem hohe optische Dicke mit einer dichten Aerosolschicht aus vielen großen Teilchen (0,5 bis 1,0 bzw. bis zu 10 µm). In Mali ist Wüstenaerosol bestimmend, das durch aus der Sahara oder von den trockenen Böden der Sahelzone stammende Bodenpartikel beeinflusst wird. Nach SCHÜTZ (1989) können mineralische Aerosole von Staubwolken in Wüstenregionen und im Atmosphärenhintergrund einen Partikeldurchmesser von 0,2 bis 200 µm erreichen. Die aus weiterer Entfernung herangebrachten Staubwolken–Aerosole liegen nach seinen Angaben generell unter einem Partikeldurchmesser von 10 µm, welche ca. 95–98 % der Aerosolpartikel Malis erreichen. Nach McTAINSH et al. (1997) liegen die aus weiter

Ferne herantransportierten Partikel unter $5 \mu\text{m}$, die regionalen Ursprungs zwischen $20\text{--}40 \mu\text{m}$ sowie die lokalen, anthropogen erzeugten bei einem Durchmesser von $50\text{--}70 \mu\text{m}$.

Beobachtungen zur Aerosolkonzentration des Atmosphärenhintergrunds ergaben im Nigerbinnendelta eine Wertspanne von $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $13.735 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mittelwert von ca. $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (NICKLING & GILLIES 1993; GILLIES et al., 1996). Diese Werte entsprechen der von d'ALMEIDA (1987) im Sahel ermittelten Aerosolkonzentration von minimal $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Matan, Senegal) bis maximal $15.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tombouctou, Mali), wobei die Höchstwerte höchstwahrscheinlich Staubsturmereignisse widerspiegeln.

Aufgrund der größten Ähnlichkeit der sahelischen Atmosphäre Malis mit einer im unteren troposphärischen Bereich stark angereicherten Aerosolkonzentration fällt die Auswahl in Streamer auf das urbane Aerosolmodell (B05,T23, SBK) mit:

- hochtroposphärischer Aerosolkonzentration in einer Höhe von $0\text{--}2 \text{ km}$ mit einer Sichtweite von 5 km und
- stratosphärischer Hintergrund-Aerosolfracht in einer Höhe von $2\text{--}10 \text{ km}$ mit einer Sichtweite von 23 km

Untersuchungen von BETZER (1988) mit optischen und Elektronenmikroskopen haben gezeigt, daß Wüstenaerosole entgegen bisheriger Annahmen nicht kugelförmig sind. Die Nichtsphärizität der Staubteilchen bewirkt, daß sie im Vergleich mit kugelförmigen Teilchen mehr Licht zur Seite streuen. BETZER (1988) weist darauf hin, daß bei der Berechnung der optischen Eigenschaften der Aerosole und ihrer Folgen für das Klima die Annahme der Kugelform im Aerosol-Modell zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen führen kann.

5. Definition der Streamer-Eingabeparameter der *Anzahl und Breite der spektralen Bänder*, bzw. des Mittelpunkts der Spektralbänder (bandweights) gestaltet sich für MSS unter Verwendung der genormten Werte für die Spektralbandbreite nach folgender Kodierung:

```

1  122 123
   0.60 0.50
2  120 121
   0.70 0.60
3  118 119
   0.80 0.70
4  115 117
   1.10 1.00 0.80
   850.
```

6. Für atmosphärische Simulationen und Modellierungen werden in Streamer mehrere spektrale *Albedodatensets unterschiedlicher Objektoberflächen* (u.a. Sand, Vegetation, offenes See-, Frischwasser etc.) angeboten.

7. Zur Berücksichtigung der zeitlich differierenden Beleuchtungs- und Sichtgeometrie in den Simulationskorrekturrechnungen sind *Aufnahmedatum* und *Sonnenhöhenwinkel* anzugeben. Der Winkel des Sonnenazimuts wird automatisch aus den beiden vorgenannten Parametern errechnet, die aus der MSS-Header-Informationsdatei zu entnehmen sind.

Beschreibung des Streamer-Simulationsexperiments

Untersuchungen zur Veränderung der sahelischen Vegetationsbedeckung erfordern genaue Korrekturmethode. Da die Geländesituation aufgrund nicht vorhandener aufnahmesynchroner Bodenkontrolldaten und Atmosphärenmessreihen retrospektiv nicht

rekonstruiert werden kann, ist zur Auswertung der historischen MSS-Bilddaten (Landsat-MSS 1 mit den Szenen von 1972 & 1974, MSS-3 mit der Szene von 1982) eine relative Korrekturmethode des Typs der Regressionsanalyse nicht anwendbar. Zur Vergleichbarmachung und Homogenisierung der MSS-Daten ist ein alternativer Ansatz zu entwickeln, der trotz fehlender Termin-Geländemessdaten möglichst präzise Ergebnisse liefern soll. Auf der Basis der im Streamer-Transfermodell für die MSS-Datenserie des Lac Faguibine definierten Eingabeparameter und Optionszuweisungen wird daher die Ermittlung der atmosphärischen Korrekturkoeffizienten über einen ersten theoretischen und zwei nachfolgende praktische Streamer-Simulationsschritte experimentiert:

1. Schritt: Simulation des MSS-Rückstrahlungsverhaltens bei Zunahme des atmosphärischen Aerosol- und Wasserdampfgehalts
2. Schritt: Versuch zur Korrelation der auf den Testflächen der MSS-Bildszenen erfassten mit den Streamer-simulierten Reflexionssignalen
3. Schritt: Ableitung der optischen Dicke für jedes MSS-Szenendatum aus gemessenen und simulierten Albedowerten

Bei den mittels des radiativen Transfercodes Streamer durchgeführten Modellexperimenten (Standardprofil: Arktischer Winter, Aerosolmodell: Urban (B05,T23,SBK)) wurde als Ausgabeinheit die am Sensor erfasste Albedo (exo-atmospheric reflection oder TOA) gewählt. In die Berechnungen zur Abschätzung der Streuungs- und Absorptionseffekte wurden Aerosole und Gase, jedoch keine Wolken einbezogen. Die errechneten und in den folgenden Abbildungen **2.12 a, b und 2.14** dargestellten Albedo- oder Reflexionswerte werden in ihrer dimensionslosen Einheit in Form von Prozentsätzen zwischen 0 % (0,1) und 100 % (1,0) repräsentiert.

1. Streamer-Simulation des MSS-Rückstrahlungsverhaltens

Das Rückstrahlungsverhalten aller MSS-Kanäle wurde mittels Streamer für zwei Szenarien einer unterschiedlichen atmosphärischen Partikelbelastung zum einen an Hydro- und zum anderen an Aerosolen simuliert:

Im ersten Modellverlauf (**Fig. 2.12 a**) wurde der Wert des atmosphärischen Aerosolgehalts (aerosoloptische Dicke in Prozent) konstant auf Null gehalten und der Gehalt an atmosphärischem Wasserdampf stetig erhöht.

Im zweiten Experiment (**Fig. 2.12 b**) wurde vice versa der Wert des atmosphärischen Wasserdampfgehalts (kondensiertes Wasser in g/m²) konstant auf 0 % gehalten und die atmosphärische Aerosolladung von 0 % in Schritten zu je 20 % auf einen Anteil von 100 % gesteigert.

Die auf der Basis der Modellsoftware Streamer hypothetisch errechneten Rückstrahlungssignale werden in **Fig. 2.12 a & b** jeweils separat für die vier MSS-Kanäle und drei verschiedenen Objekttypen Sand, Vegetation und Wasser dargestellt. Es sei angemerkt, daß bei atmosphärischem Wasserdampf- oder Aerosolgehalt einer optischen Dicke von 0 % das TOA-Albedosignal unbeeinflusst bleibt, d.h. daß es dem Signal am Boden entspricht. Eine aerosoloptische Dicke von 0 % hingegen bedeutet, daß infolge der Signalzurückhaltung auf dem gesamten atmosphärischen Strahlungspfad die TOA-Albedo nur 2/3 des am Bodenobjekt einfallenden Strahlungssignals beträgt.

Aus den mittels Streamer durchgeführten Schätzungs- oder Simulationsrechnungen zum TOA-Strahlungsverhalten der vier MSS-Kanäle resultieren folgende Ergebnisse hinsichtlich der Präzision der atmosphärischen Strahlungsextinktion:

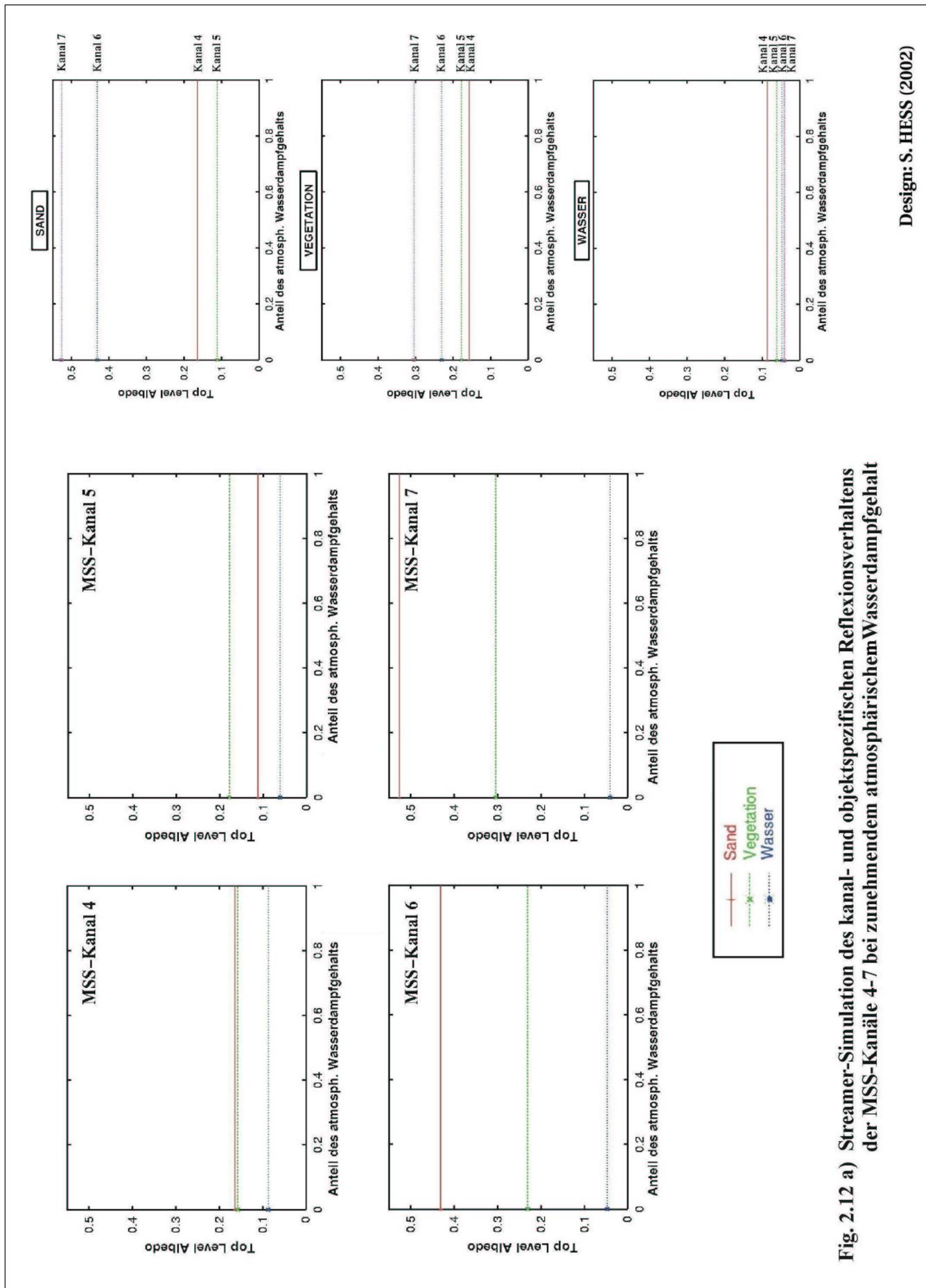
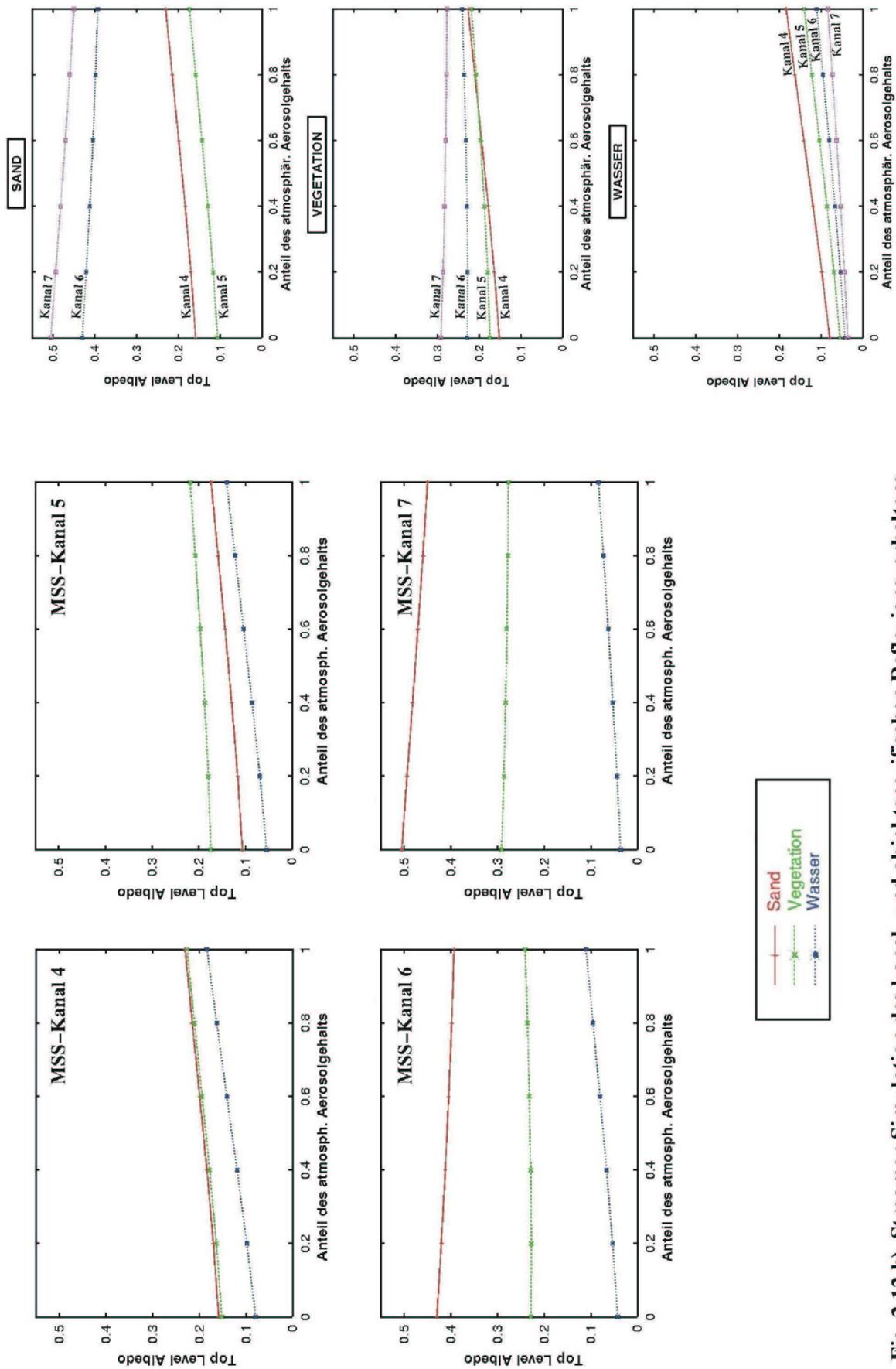


Fig. 2.12 a) Streamer-Simulation des kanal- und objektspezifischen Reflexionsverhaltens der MSS-Kanäle 4-7 bei zunehmendem atmosphärischem Wasserdampfgehalt

Design: S. HESS (2002)



Design: S. HESS (2002)

Fig. 2.12 b) Streamer-Simulation des kanal- und objektspezifischen Reflexionsverhaltens der MSS-Kanäle 4-7 bei zunehmendem atmosphärischem Aerosolgehalt

Wasserdampfgehalt:

In **Fig. 2.12 a)** wird graphisch und in **Tab. 2.5 a** numerisch deutlich, daß die am Satellitensensor eingehenden Reflexionssignale bei der simulierten Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfgehalts sowohl im kurzwelligen als auch im langwelligen Spektralbereich konstant bzw. unbeeinflusst bleiben. Bei den verwendeten Testobjekttypen Sand, Vegetation und Wasser stimmen in diesem Fall die am Satelliten gemessenen Albedowerten mit jenen am Boden überein. Bei der Betrachtung der objektspezifischen Rückstrahlungssimulationen zeichnen sich die typischen Albedo-Signaturen der Objekte am Boden und den 4 MSS-Kanal-Diagrammen ab.

Wasser- dampf- gehalt	WASSER				SAND				VEGETATION			
	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7
0	0.0869	0.0606	0.0470	0.0408	0.1636	0.1111	0.4309	0.5269	0.1569	0.1776	0.2303	0.3042
10000	0.0869	0.0606	0.0459	0.0371	0.1636	0.1111	0.4194	0.4718	0.1569	0.1776	0.2242	0.2727
15000	0.0869	0.0606	0.0457	0.0364	0.1636	0.1110	0.4166	0.4622	0.1568	0.1776	0.2227	0.2672
20000	0.0869	0.0605	0.0454	0.0359	0.1636	0.1110	0.4142	0.4548	0.1568	0.1776	0.2214	0.2630
30000	0.0869	0.0605	0.0450	0.0351	0.1635	0.1110	0.4102	0.4438	0.1568	0.1776	0.2192	0.2566
50000	0.0861	0.0600	0.0442	0.0339	0.1632	0.1107	0.4048	0.4048	0.1565	0.1776	0.2161	0.2483

Tab. 2.5 a) Simulierte MSS-Albedowerte bei zunehmendem atmosphärischem Wasserdampfgehalt

Eine auf atmosphärischen Wasserdampfgehalt zurückführbare Beeinträchtigung der atmosphärischen Durchlässigkeit betrifft einen Spektralbereich außerhalb des vom MSS-Sensor erfaßten. Beispielsweise werden Anteile der Infrarot-Strahlung im Bereich $> 1 \mu\text{m}$ von Wasserdampf und die UV-Strahlung im Bereich $< 0,3 \mu\text{m}$ von Ozon absorbiert.

Aerosolgehalt:

Bei der Betrachtung der simulierten Zunahme der atmosphärischen Aerosolgehalte (**Fig. 2.12 b & Tab. 2.5 b**) zeigen sich hingegen deutliche Differenzen zwischen Boden- und TOA-Satelliteneingangssignalwerten. Erwartungsgemäß steigen mit zunehmenden Aerosolgehalten die objektspezifischen TOA-Albedowerte in den einzelnen Kanälen mit Einschränkungen in den Kanälen 7 und 6 an. In Kanal 6 ist eine Abnahme für das Objekt Sand und im Kanal 7 sogar für die beiden Objekte Sand und Vegetation festzuhalten.

Aerosol- gehalt	WASSER				SAND				VEGETATION			
	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7
0,0	0.0793	0.0546	0.0425	0.0362	0.1586	0.1062	0.4301	0.5055	0.1516	0.1741	0.2285	0.2915
0,2	0.0980	0.0688	0.0534	0.0437	0.1698	0.1164	0.4208	0.4942	0.1635	0.1793	0.2277	0.2866
0,4	0.1191	0.0856	0.0664	0.0528	0.1837	0.1292	0.4121	0.4823	0.1780	0.1871	0.2290	0,2828
0,6	0.1410	0.1036	0.0806	0.0627	0.1991	0.1435	0.4047	0.4709	0.1940	0.1967	0.2318	0.2800
0,8	0.1627	0.1220	0.0954	0.0731	0.2149	0.1584	0.3984	0.4602	0.2103	0.2073	0.2358	0.2781
1,0	0.1835	0.1403	0.1103	0.0838	0.2305	0.1735	0.3932	0.4500	0.2263	0.2183	0.2406	0,28

Tab. 2.5 b) Simulierte MSS-Albedowerte bei zunehmendem atmosphärischem Aerosolgehalt

Die Intensität der atmosphärischen Trübung (optischen Dicke) wird an der Steigung der Albedogeraden erkennbar. Zudem kann über ihre Steigung auf die Partikelgröße der Aerosole geschlossen werden (FORSTER, 1984).

Beim Anstieg des atmosphärischen Aerosolgehalts zeigen die Kanalpaare 4 & 5 und 6 & 7 ähnliche Verläufe der objektspezifischen Rückstrahlungsgeraden. In den kurzwelligen Kanälen 4 & 5 erhöht sich die Signalantwort gleich stark für alle Objekttypen. Im Bereich der NIR-Kanäle 6 & 7 zeichnet sich eine Abnahme der Albedowerte beim Sand und in schwacher Form bei der Vegetation ab. Beim Objekt Wasser ist eine Zunahme der TOA-Albedowerte in allen MSS-Kanälen zu verzeichnen.

Bei der Betrachtung der einzelnen Objekte verhalten sich die Differenzen der kanalspezifischen Signalantworten von Sand und Vegetation in ähnlicher Weise, so daß die Albedowerte der beiden IR-Kanäle beim Objekt Sand weit über denen der Vegetation liegen und einen stärkeren Abfall aufweisen. Die Satellitensignale werden in den beiden NIR-Kanälen vermindert und in den beiden visiblen Kanälen angehoben. Beim Objekt Wasser ist ein Anstieg der Satelliten-Albedowerte in allen vier Kanälen erkennbar.

Beim Objekt Sand, ähnlich wie bei der Vegetation, nehmen die am Satelliten zu verzeichnenden Albedowerte im Bereich des Nahen Infrarots ab und in den Kanälen des visiblen Bereichs zu. Für Wasser steigen alle Kanalantworten am Satelliten höher als am Boden an.

Wie insgesamt vielfach belegt, wird die kurzwellige Strahlung von Aerosolen stark gestreut und erzeugt so ein Satellitensignal, das wertemässig höher ist als das Bodensignal. Nur im Bereich des Nahen Infrarots treten albedovermindernde Effekte auf, wie z.B. bei Sand und Vegetation. Für diese Objekte sind die am Satelliten eingehenden Albedowerte niedriger als am Boden.

Zusammenfassend stellen die MSS-Simulationen heraus:

1. Die größten Beeinträchtigungen durch atmosphärische Aerosole betreffen von allen MSS-Kanälen den Kanal 4 des blauen Spektralbereichs. Bereits JENSEN (1986) konstatierte für Landsat MSS-Daten einen dort viermal so hohen Streueffekt, wie im Nahen Infrarotbereich der Kanäle 6 & 7.
2. Entsprechend der stärksten Anstiege der Albedogeraden sind Oberflächen mit geringerem Bodenreflexionssignal, wie z.B. Wasser und auch Vegetation empfindlicher gegenüber atmosphärischen Bildartefakten.

Die atmosphärischen Aerosolstreueffekte bewirken insgesamt eine Verminderung des Bildkontrasts. Bei den MSS-Sensoren von Landsat 1, 2 und 3 erweist sich der Kanal 4 (0,5 – 0,6 μm) als der von atmosphärischen Streueffekten am stärksten und Kanal 7 (0,8–1,1 μm) als der von diesen am geringsten beeinflusste. Ein starker Aerosolstreueffekt verursacht insbesondere im panchromatischen MSS-Bild des Kanals 4 einen verschwommenen, nebligen Ausdruck, im 3-kanaligen MSS-Falschfarbenkomposit (RGB-Kombination: 4,5,7) einen Blaustich (AVERY & BERLIN, 1992).

Das Transfermodell Streamer weist für den MSS-Sensor im Spektralbereich von 0,5 – 1,1 μm eine deutliche Beeinflussung des atmosphärischen Strahlungspfades durch feste Aerosolpartikel, hingegen keine durch Wasserdampfpartikel nach. Daraus deutet sich bereits die Notwendigkeit zur Atmosphärenkorrektur bei der Satellitenauswertung gerade in aerosolbelasteten, semi-ariden Gebieten wie z.B. dem Sahel an. Bei überwiegend durch atmosphärischen Wasserdampf beeinflussten Satellitenaufnahmen wie z.B. der gemässigten Breiten ist die atmosphärische Verfälschung der am Satelliten erfassten Signale mit Ausnahme industriell aerosolbelasteter Räume vernachlässigbar.

2. Korrelierbarkeit satelliten-erfasster und streamer-simulierter Reflexionssignale

Der bei den einzelnen MSS-Aufnahmeterminen vorhandene Zustand der Atmosphärensäule kann nicht für den gesamten MSS-Szenenschnitt von 184 km x 172 km (3420 Pixel [w] x 2340 Pixel [h]) als homogen angenommen werden. Daher beschränken sich die Auswertungen auf den multitemporalen Szenen-Subausschnitt des Lac Faguibine einer Größe von 1100 [w] x 900 [h] Pixel (ca. 8,7 x 7,1 km²).

Für die Modellrechnungen in Streamer kommen fünf exemplarische, innerhalb des multitemporalen MSS-Szenensatzes definierte Testausschnitte (**Fig. 2.13**) mit einer Größe von je 30 x 30 Pixeln oder von je 2,37 x 2,37 km² zur Auswahl.

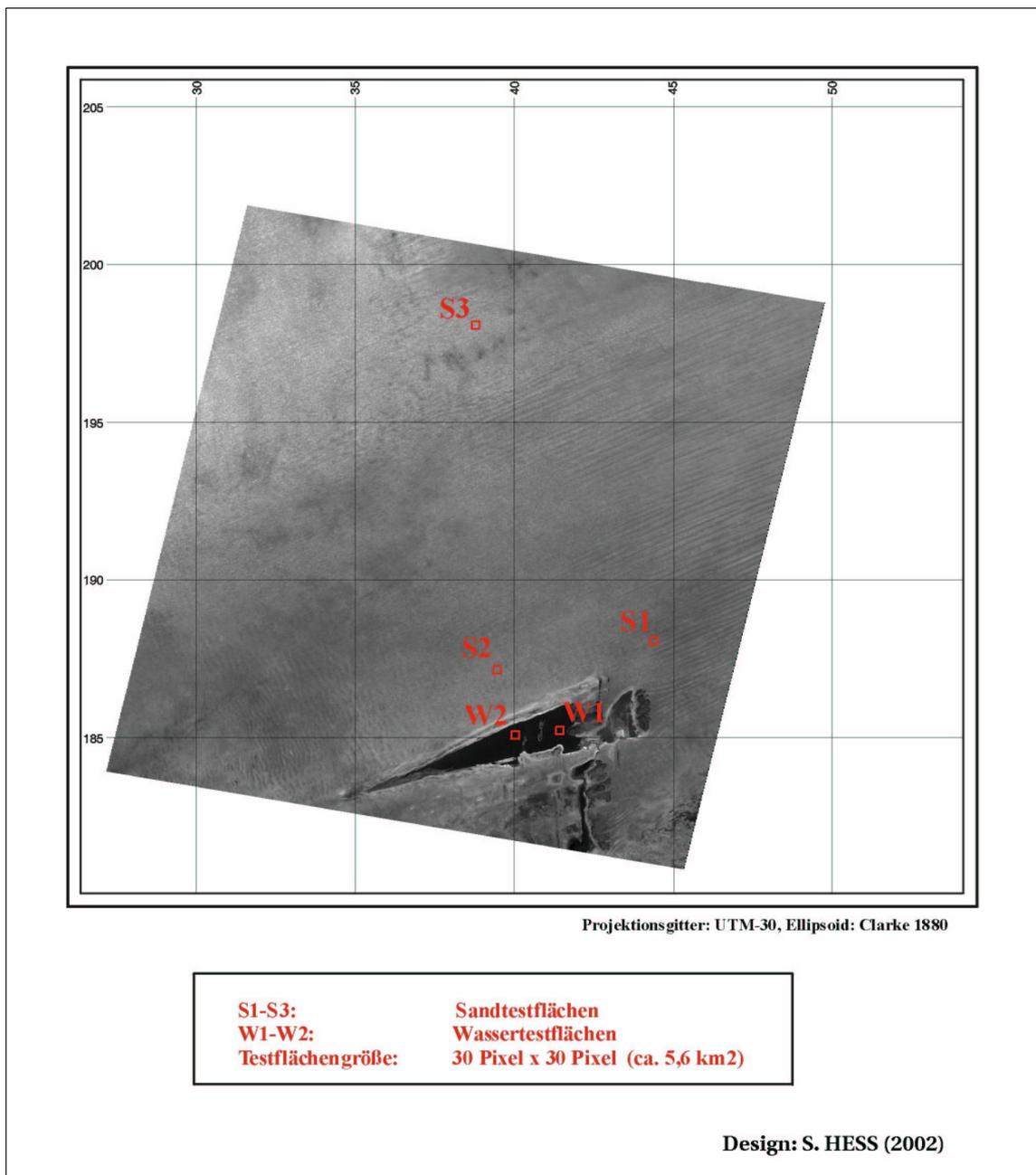


Fig. 2.13 MSS-Beispielszene mit multitemporalen Testgebietsextrakten

Die für die fünf Testausschnitte ausgewählten, gegenüber zeitlichen Veränderungen als invariant und stabil angenommene Objekttypen sind:

1. Objekt *Wasser* (W1, W2):

Auf allen LANDSAT–MSS Szenen wurden möglichst reine Pixel aus dem oligotrophen Wasserbereich der bathymetrisch tiefsten Stellen im Zentrum des Lac Faguibine ausgewählt. Von diesen wird angenommen, daß sie keine Beimischungen von Nicht–Wasser Objekten (z.B. Vegetation, Seegrund, Felsinseln etc.) enthalten. Es werden zwei, in allen multitemporalen Bildszenen kongruente Testflächen W1 und W2 definiert, die in den NIR–Kanälen 6 und 7 aller drei MSS–Szenentermine maximale Pixelgrauwerte von kleiner als 20 aufweisen.

2. Objekt *Sand* (S1, S2, S3):

Die weiten vegetationslosen Sandflächen im Norden des Lac Faguibine füllen die nördliche Hälfte der multitemporalen MSS–Szenenausschnitte. Aus diesem Bereich werden hier drei als weitgehend vegetationslos angenommene, multitemporal invariante Vergleichs–Referenzflächen bestimmt. Zwei Testflächen S1 und S2 liegen nordöstlich und nördlich des Lac Faguibine, eine dritte Testfläche S3 inmitten der Wanderdünenfelder (Aklé Mseïguîlé) am nördlichen Rand der MSS–Serie.

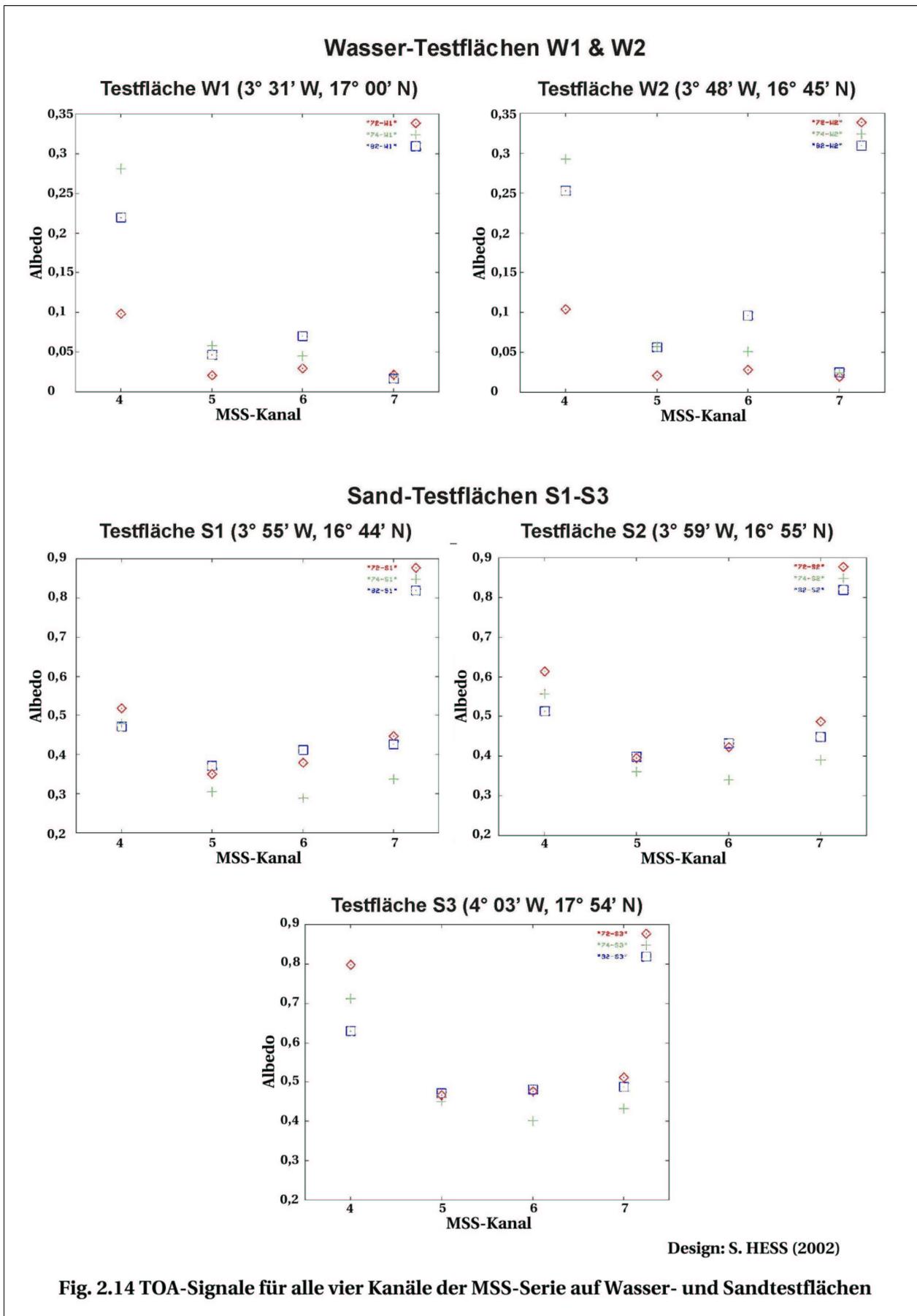
Grundsätzlich sind dunkle Testflächen besser zur Sensorkalibration geeignet als helle, da letztere zur Sensorsättigung neigen. Orte, die eine solche Sensorsättigung (DN < 256, bzw. Albedo > 100 %) aufweisen, sind in der MSS–Datenserie ausschließlich im Bereich von Wolkenfeldern anzutreffen. Dunklere Flächen bieten außerdem die Möglichkeit zur Kontrolle der Sensorscanlinearität (vgl. Kap. 2.2.4.2), sind jedoch sensitiver hinsichtlich atmosphärischer Effekte (DINGUIARD & SLATER, 1997).

Die Graphiken in **Fig. 2.14** zeigen für die drei verschiedenen MSS–Terminsszenen (1972, 1974, 1982) die kanalspezifischen Reflexionswerte als Mittelwerte aller Wasser– (W1, W2) und Sand–Testflächen (S1, S2, S3).

Die Reflexions–Mittelwerte sind in numerischer Form (**Tab. 2.6**) sowohl als Grauwerte (DN) als auch als dimensionslose Albedowerte zwischen 0 % (0,1) und 100 % (1,0) aufgeführt.

Jahr	Kanal	W1		W2		S1		S2		S3	
		DN	Albedo	DN	Albedo	DN	Albedo	DN	Albedo	DN	Albedo
1972 (MSS 1)	4	19,3856	00,0989	20,4244	00,1042	101,5410	00,5183	120,3270	00,6142	156,4600	00,7987
	5	04,4089	00,0212	04,3222	00,0208	72,8522	00,3506	82,2644	00,3959	97,0089	00,4669
	6	05,6322	00,0296	05,3733	00,0282	72,2589	00,3799	80,5811	00,4237	90,5800	00,4763
	7	01,7156	00,0221	01,5167	00,0196	34,6656	00,4474	37,8322	00,4881	39,7322	00,5127
1974 (MSS 1)	4	62,2444	00,2814	64,8878	00,2929	107,8330	00,4799	125,6190	00,5574	161,3890	00,7131
	5	11,9422	00,0582	11,8200	00,0577	71,8756	00,3043	85,9200	00,3619	107,5430	00,4507
	6	08,2567	00,0453	09,5667	00,0507	67,0656	00,2883	79,7044	00,3404	94,6433	00,4022
	7	01,2867	00,0207	01,5567	00,0242	27,6067	00,3375	32,0467	00,3909	35,4833	00,4322
1982 (MSS 3)	4	46,4889	00,2200	53,7333	00,2529	101,8130	00,4710	111,3670	00,5144	136,9890	00,6307
	5	10,5345	00,0471	13,0439	00,0565	97,9535	00,3713	105,2010	00,3981	125,0550	00,4717
	6	16,1567	00,0704	23,0195	00,0961	107,3610	00,4123	112,9210	00,4331	125,8700	00,4817
	7	02,6867	00,0171	04,3350	00,0247	91,4610	00,4271	97,6195	00,4486	104,6880	00,4882

Tab. 2.6 Mittlere Albedowerte für die Testflächen innerhalb der multispektralen und multitemporalen MSS–Bildserie des Lac Faguibine



Reflexionssignale sind für alle fünf – drei Sand– und zwei Wasser–Testflächen – zu allen Aufnahmetermine im MSS–Kanal 4 des blauen sichtbaren Lichts am höchsten. Wie aus den Albedowerten der **Tab. 2.6** errechenbar, schwanken die Werte auf Wasser im Bereich von 10–30 % und auf Sand im Wertbereich von 45 – 80 %. In den verbleibenden Kanälen 5–7 (rot bis NIR) liegen die Albedowerte beim Objekt Wasser im Schwankungsbereich von 1–10%, auf Sand bei 30–50 %. Weiterhin wird auf den, die NIR–Strahlung total absorbierenden Wasser–Testflächen, die grössere atmosphärische Sensibilität des atmosphärischen Aerosols des NIR–Kanals 6 gegenüber dem NIR–Kanal 7 deutlich. Die Albedowerte im Kanal 6 sind höher als im Kanal 7. Der Kanal 7 erscheint auf den Wasser–Testflächen als der atmosphärisch am geringsten beeinflusste. Die Werte aller Aufnahmetermine konzentrieren sich um den gleichen Betrag.

Bei der Betrachtung der Zeitserien 1972, 1974 und 1982 ist allerdings aus den Albedowerten entgegen den Erwartungen weder ein objekt–, noch ein kanalübergreifendes kohärentes Abhängigkeitsverhalten zum aufnahmeterminbedingten atmosphärischen Aerosolzustand herauszulesen. Die Albedowerte der Wasser– wie Sandtestflächen schwanken in allen Kanälen in unregelmässiger Weise.

3. Ableitung der optischen Dicke

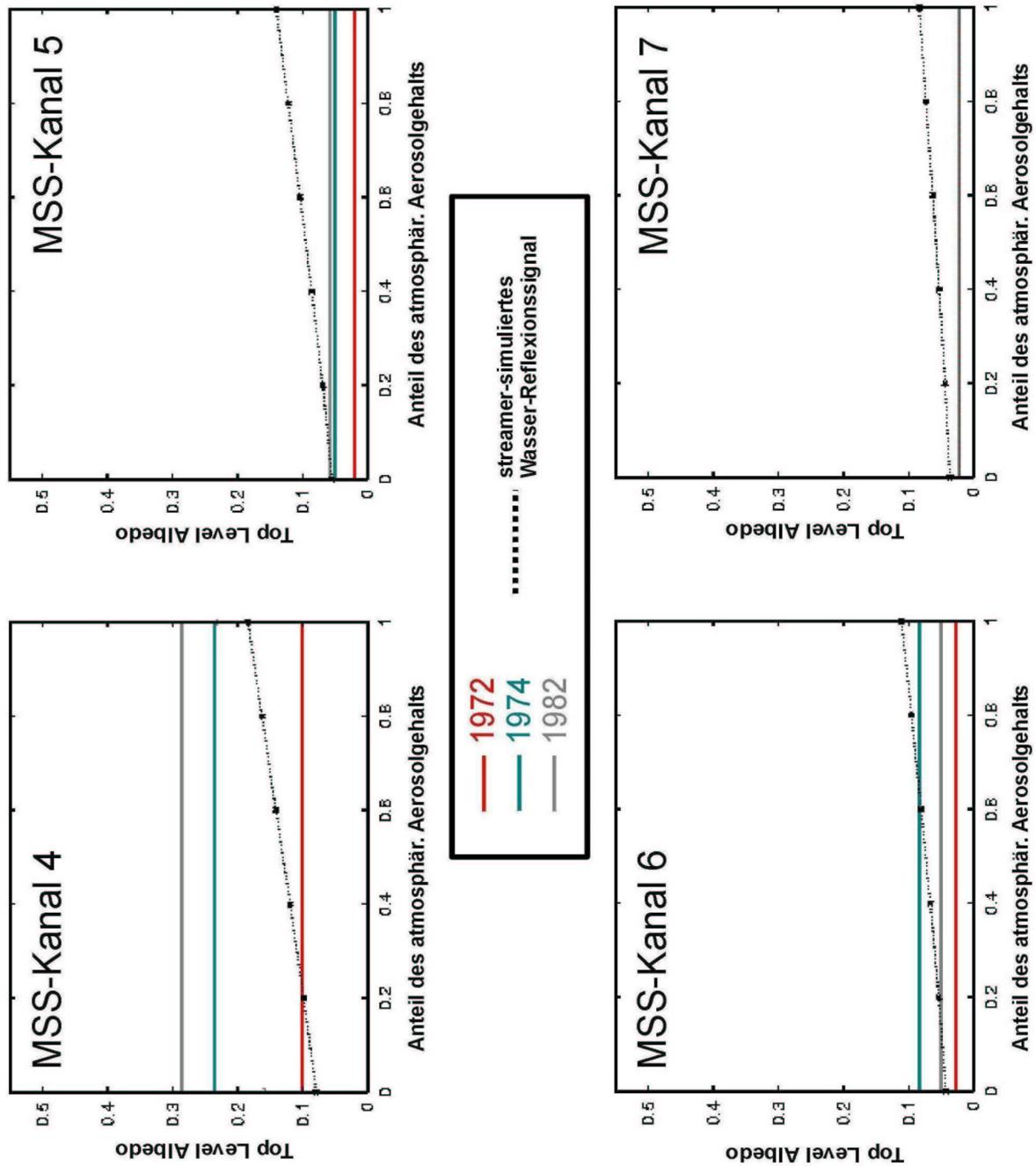
Das Ergebnis einer zeitlich nicht korrelierbaren Zuweisung der im Bereich der Testflächen erfassten kanal– und objektspezifischen Albedowerte wurde mittels der streamer–simulierten Satelliten–Albedowerte genauer überprüft. Dazu sollte die zu den drei Aufnahmetermine jeweils vorhandene aerosoloptische Dicke über die Korrelierung satelliten–erfasster und streamer–simulierter Albedowerte erschlossen werden. Diese Betrachtung wurde ausschließlich auf den beiden Wasser–Testflächen durchgeführt, da auf oligotrophen Wasserflächen der gesamte Bereich des visiblen bis NIR–Spektrums absorbiert wird. Die dort über Null auftretenden Grauwerte sind folglich anderen Nicht–Wasser Objekten, nämlich dem Auftreten atmosphärischer Aerosole, zuzuschreiben.

In **Fig. 2.15** werden die zu den jeweils drei verschiedenen Terminen aufgenommenen kanal–spezifischen Satelliten–Albedowerte der Testflächen W1 und W2 je zu einem Wert gemittelt und jeweils separat in Form einer konstanten Betragesgeraden dargestellt. Diese werden für jeden MSS–Kanal in Zusammenschau der für das Objekt Wasser simulierten Streamer–Albedogeraden dargestellt. Der sich je Kanaldarstellung ergebende Schnittpunkt aus simuliertem und satellitenbild–erfaßtem Albedowert würde nach dieser Verfahrensweise auf der Abszisse die jeweils zum Szenentermin bestehende aerosoloptische Dicke oder den atmosphärischen Aerosolgehalt zeigen. Erwartungsgemäß sollten die in allen vier Kanälen pro Aufnahmetermin erfaßten Werte des atmosphärischen Aerosolgehalts einander entsprechen.

Wie allerdings in **Fig. 2.15** erkennbar wird, lassen sich jedoch für alle drei Aufnahmetermine 1972, 1974 und 1982 keine oder nicht einheitliche Schnittpunkte herauslesen. Die Werte lassen sich also nicht aufeinander beziehen.

Es scheint, daß das Modell Streamer zur Atmosphärenkorrektur in diesem Fall nicht ausreicht, um die in der MSS–Serie auftretenden atmosphärischen Phänomene zu erklären. Allerdings kann trotz sorgfältiger Auswahl einer möglichst großflächigen, homogenen Wasserfläche (Werte im Kanal 6 und 7 < DN 6) keine Gewähr für die Erfassung eines absolut klaren, oligotrophen Gebietes gegeben werden. Möglicherweise sind Störungen oder Beimischungen anderer Objektsignale, z.B durch aquatische Vegetation oder Trübung, für die mangelhafte Kohärenz der Albedowerte verantwortlich.

Diese Ergebnisse lassen vielmehr vermuten, daß MSS–sensortechnische Ursachen für die gescheiterte Streamer–Modellierung der aerosoloptischen Dicke verantwortlich sind. Zu dieser Problematik bezieht Kapitel 2.2.7 in der Folge ausführlich Stellung.



Design: S. HESS (2002)

Fig. 2.15 Relation von streamer-simulierter zu tatsächlich gemessener atmosphärischer Aerosolintensität auf Wasserflächen

2.2.7 Kalibrierungsproblematik des MSS–Sensors

In der Vergangenheit wurde der absoluten radiometrischen Kalibrierung des ersten erdbeobachtenden Sensors Landsat–MSS im Vergleich zu den darauffolgenden Sensorsystemen wie TM, SPOT und AVHRR wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Zum Verständnis der radiometrischen Kalibrationsproblematik des MSS–Sensors folgt vorab eine Darstellung des MSS–Sensoraufbaus, inklusive seiner Kalibrationsvorrichtung.

Der MSS ist ein optisch–mechanischer Scanner mit oszillierendem Spiegel, welcher die einfallende Strahlung auf die sechs Detektoren eines jeden der insgesamt vier Kanalsensoren (Landsat MSS–3 hatte einen fünften Thermalkanal) lenkt. Bei den im sichtbaren und nah–infraroten Spektralbereich eingesetzten Quantendetektoren schlagen auftreffende energiereiche Photonen Elektronen unter Produktion eines meßbaren Stroms aus dem Detektormaterial (Photokathode) heraus. Die Meßwerte sind, physikalisch bedingt, der statistischen Unsicherheit des Rauschens unterworfen. Dieses Rauschen drückt sich in Satellitenbilddaten durch Schwankungen der Meßgrauwerte (im Luftbild durch körnige Speckle–Struktur) aus. Ein meßbares Detektorsignal kann nur nach einer Verstärkung des erzeugten Elektronenstroms durch einen Strahlungssignalverstärker (Photomultiplier) über dem Signalniveau des Rauschens erhalten werden.

Die Qualität der Informationsgewinnung eines Detektors wird also durch erstens seine spektrale Empfindlichkeit (Bandbreite) und zweitens seine Rauscheigenschaften (radiometrische Auflösung) charakterisiert (KRAUS & SCHNEIDER, 1988).

Die ersten drei Kanäle 4, 5 & 6 der Landsat MSS–Sensoren benutzen Photomultiplier–Röhren, hingegen Kanal 7 Silikon–Photodioden als Detektorelemente (*Fig. 2.16 a*).

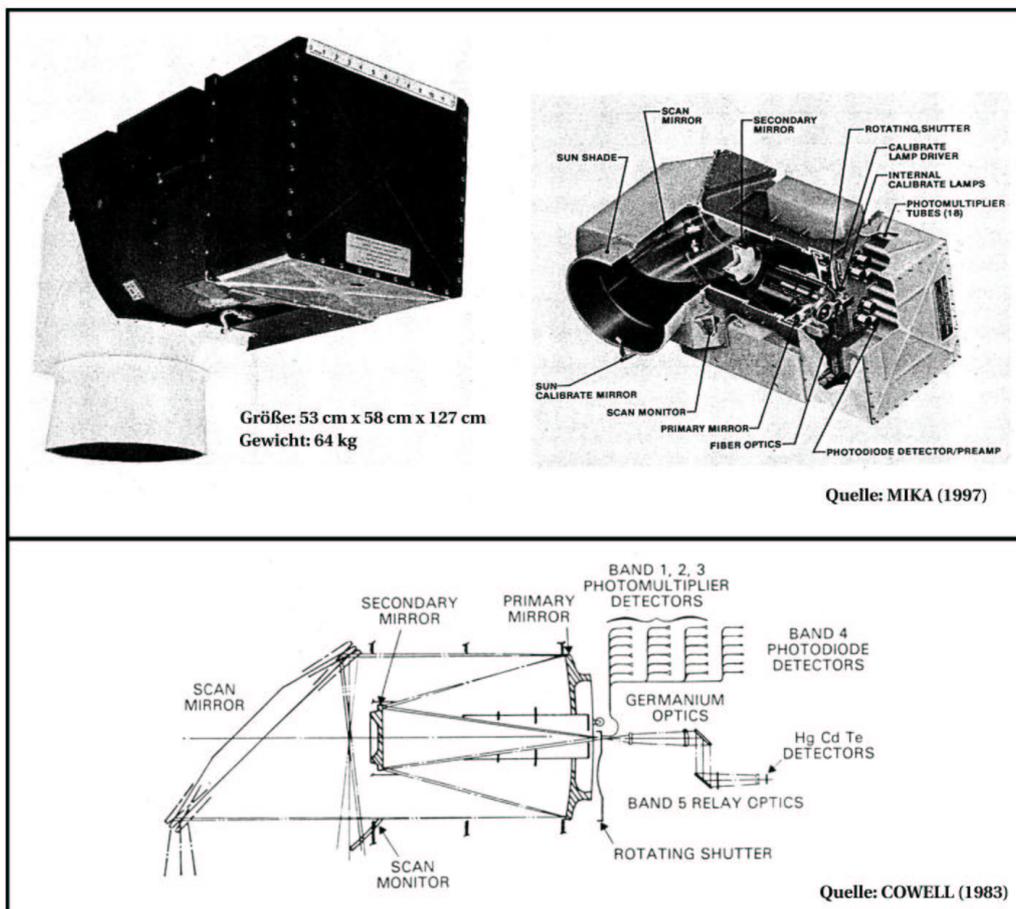
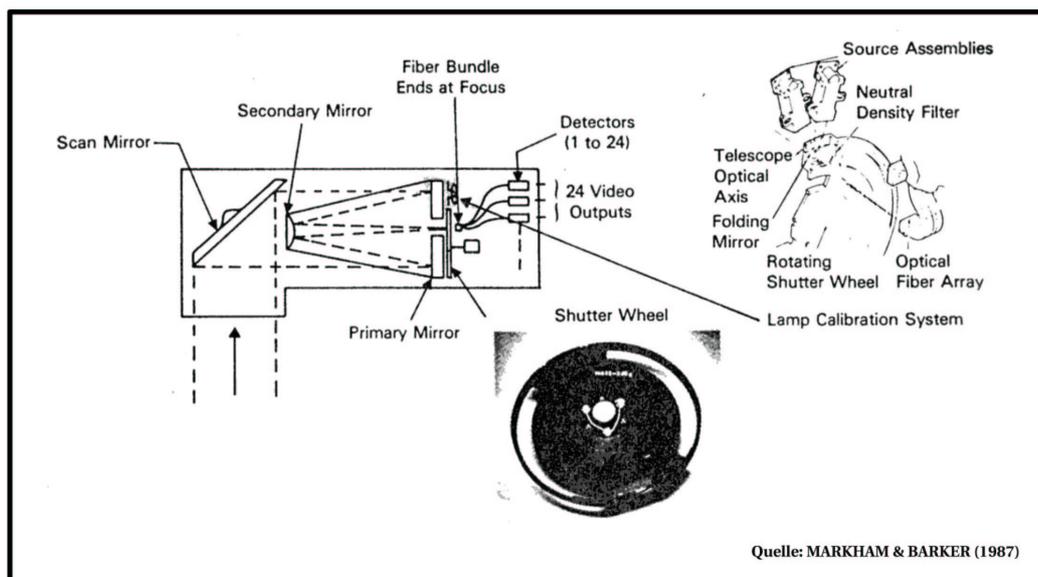


Fig. 2.16 a) Schema des opto-mechanischen Landsat-MSS Scannersystems

Die 7-bit Original-Daten werden in den Kanälen 4 bis 6 mittels einer auf a priori-Labormessungen basierenden Farbtabelle mit einer radiometrischen Auflösung von 7-bit zu 8-bit dekomprimiert. Lediglich im Kanal 7 werden sie in komprimierter Form der ursprünglichen, radiometrischen Auflösung von 7 Bit herausgegeben (FORSTER, 1984). Die postum ermittelten radiometrischen Korrekturkoeffizienten wurden individuell (Berechnung der linearen Regression aus ausgewählten Proben) zwischen den durch Eichungskeile an Bord kalibrierten Kanalsignalantworten und den korrespondierenden, nach dem Start ermittelten Labor-Strahlungsdichtewerten berechnet (MARKHAM & BARKER, 1987). Der technische Aufbau und die Funktionsweise des an Bord mitgeführten MSS-internen Sensorkalibrators verdeutlicht **Fig. 2.16 b**.

**Fig. 2.16 b) Interner Kalibrationsmechanismus von LANDSAT-MSS**

Jedes MSS-Scansystem besitzt ein internes Kalibrationssystem, bestehend aus einem Kalibrationslampenpaar und einem Verschlussmechanismus. Während jeder Spiegelzeilenrückbewegung wird die auf den MSS-Detektor einfallende Strahlung durch ein Verschlussrad (shutter wheel) ausgeblendet. Der mit gleicher Frequenz wie der Abtastspiegel oszillierende Detektor-Verschluss blendet in diesem Moment die einfallende Strahlung aus und leitet Lichtstrahlen von den beiden an Bord mitgeführten Kalibrationsglühlampen unmittelbar vor das Sichtfeld (IFOV) des Detektors. Die Wolframfaden-Kalibrationslampen sind vor der optischen Hauptfokalebene angeordnet und werden im zweiwöchentlichen Rhythmus durch das Sonnenlicht geeicht. Die durch einen variablen rotierenden optischen Filter (neutral density filter) passierende Strahlung der Glühlampen erzeugt einen Eichungs- oder Schwärzungskeil (density-wedge). Die aus der Eichung resultierenden Kalibrations-Meßwerte werden als während des Sensorbetriebs ermittelte Koeffizienten für jeden der 24 Detektoren für nachträgliche radiometrische Korrekturen der MSS-Sensorsignale an der Bodenempfangsstation festgehalten (LANDSAT-4 Data User Handbook, 1984; COLWELL, 1983; MARKHAM & BARKER, 1987).

Die Problematik der absoluten radiometrischen Kalibration des MSS-Sensors wurde während der gesamten MSS-Betriebsphase wenig beachtet. Aufgrund des Mangels an nachvollziehbaren Fehleranalysen und bestehender Informationslücken (z.B. zur Veränderung der Spektralfilter, der Detektoren und des internen Kalibrationssystems nach Satellitenstart) läßt sich die radiometrische Genauigkeit der abgeleiteten Strahldichtewerte nicht absolut rekonstruieren (MARKHAM & BARKER, 1987).

Die an Bord mitgeführten Kalibrationssysteme erweisen sich aufgrund aufgetauchter

Inkohärenzen zwischen den Daten der Sensoren MSS 1–4 (und TM) als unverlässlich. Wie MARKHAM & BAKER (1987) anhand von Kreuzkorrelationsvergleichen von Kalibrationstests nach dem Start belegen, pendelt die spektrale Variation zwischen den MSS-Sensoren 1–4 für den roten Kanal 5 ($0,6\text{--}0,7\ \mu\text{m}$) im Bereich von $3,0\text{--}10,0\%$ und für den Kanal 6 des nahen Infrarots ($0,7\text{--}0,8\ \mu\text{m}$) zwischen $3,0\text{--}11,0\%$. Diese Variationen tendieren mit zunehmendem Sensoralter stärker zu werden. Die mit einer Einschränkung der radiometrischen Leistungsfähigkeit einhergehende Drift oder Degradation der MSS Sensoren auf längere Sicht ist bereits Mitte der 80er Jahre auch von NELSON (1985) und von ELVIDGE et al. (1985) erkannt und beschrieben worden. Auch PRICE (1987) erwähnt, daß für die MSS-(und TM-) Sensormodelle lediglich eine Kurzzeitstabilität der internen Kalibrationslampen garantiert sei.

Der Konsistenz-Test von MARKHAM & BARKER (1987) anhand einer MSS-Datenserie über eine Aufnahmeperiode von 5 Jahren (1975 bis 1979) belegt für die während dieser Phase simultan im Umlauf befindlichen Sensoren MSS-1 und MSS-2 und ab 1978 zusätzlich MSS-3 die zeitliche Instabilität der MSS-Sensoren (*Fig. 2.17*) bei der Beobachtung zeitlich invarianter Objektflächen.

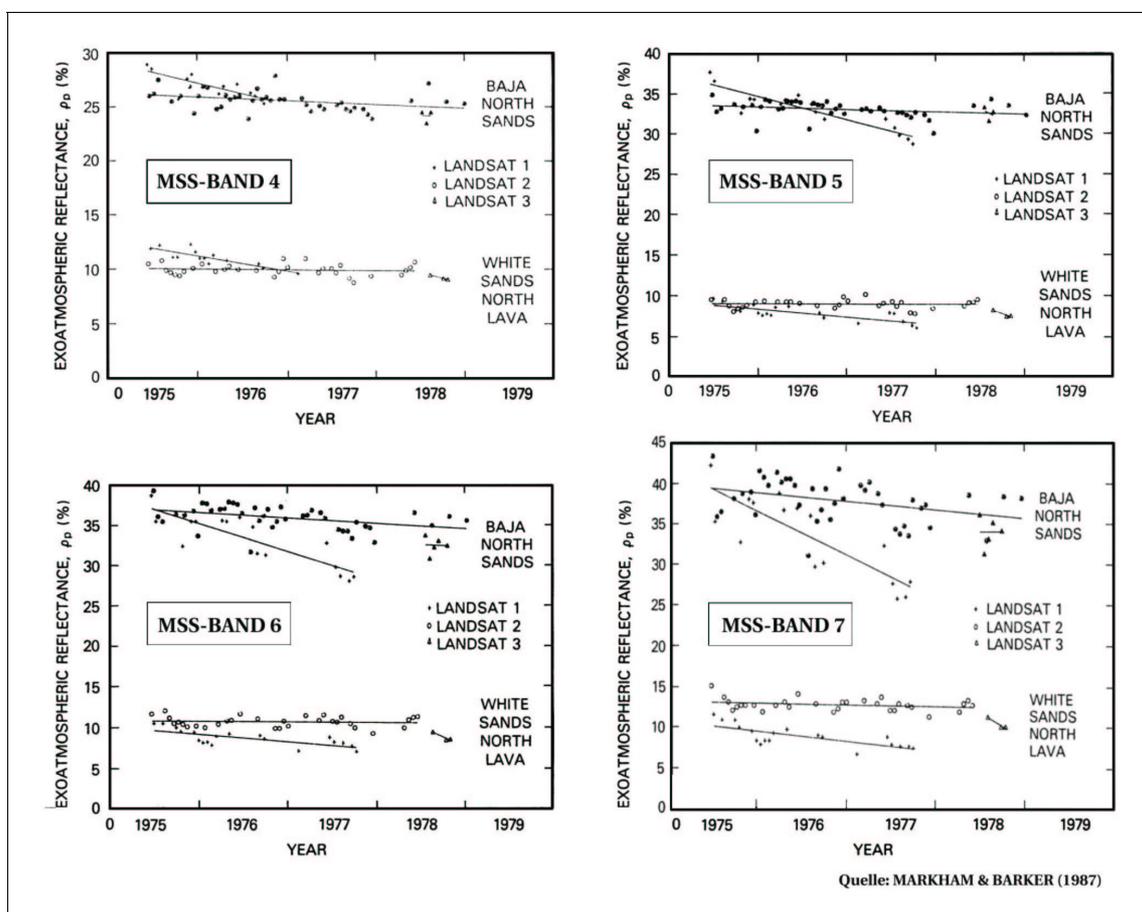


Fig. 2.17 Objektabhängige radiometrische Sensorstabilität der Landsat-Sensortypen MSS 1–3 nach MARKHAM & BARKER (1987)

In den ausgewählten Szenen störungsfreier atmosphärischer Bedingungen wird anhand zweier invarianter, weitgehend vegetationsunbeeinflusster Bodenobjekte – Sand (Baja North Sands) mit hoher Albedo und Lava (White Sands North) mit geringer Albedo – die Instabilität, bzw. der Sensorleistungsabfall der MSS-Sensoren 1–3 deutlich. Der stärkste Sensorabfall zeigt sich beim ersten Sensor MSS-1 deutlich für alle vier Kanäle. Zudem wird in *Fig. 2.17* bei allen drei Sensoren der stärkere Leistungsabfall auf den dunklen Lavaflächen erkennbar.

Bei dem in dieser Studie verwendeten MSS-Datenmaterial kann ebenso die Zeitinstabilität für die Sensoren MSS-1 und MSS-3 nachgewiesen werden. Dazu werden Histogramme der weder radiometrisch noch atmosphärisch korrigierten MSS-Szenen des Lac Faguibine für das Szenenpaar 1972 zu 1974 sowie für jenes 1982 zu 1974 je MSS-Kanal separat gegenübergestellt (*Fig. 2.18*).

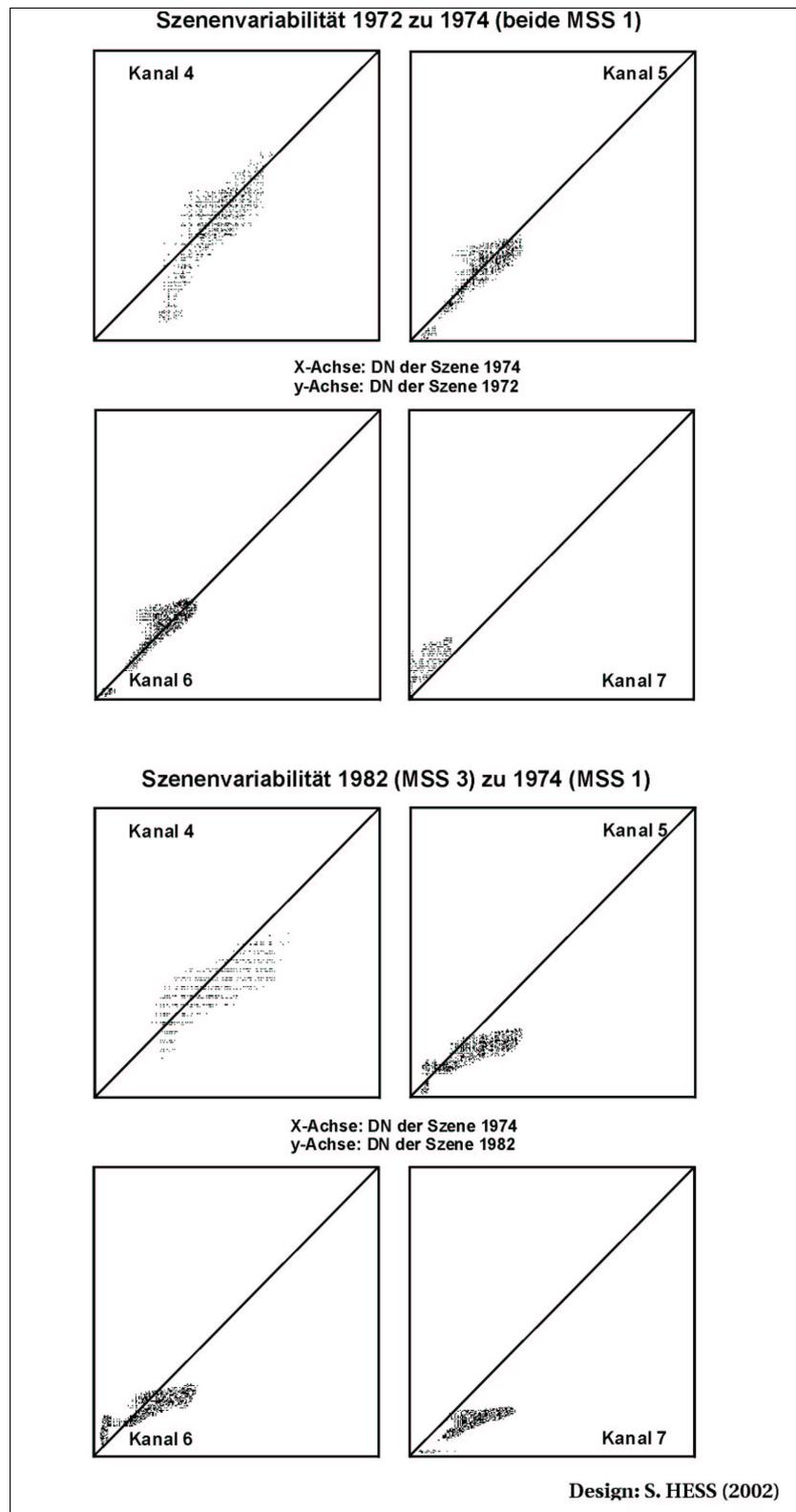


Fig. 2.18 Temporale Evolution der Szenen-Variabilität radiometrisch korrigierter sowie nicht-korrigierter MSS-Szenenpaare von 1974/72 & 1974/82

Die MSS-Bildszene von 1974 stellt in beiden MSS-Szenenpaaren das Referenzbild. In den dargestellten bi-dimensionalen Histogrammen (scatterogramms) werden die verteilten Grauwerthäufigkeiten eines jeden MSS-Szenenpaars jeweils für alle vier Kanäle dargestellt. Die stabilen Anteile eines jeden Bildpaares gruppieren sich um die Regressions-Diagonale des Bi-Histogramms. Je stärker sich die Grauwertwolken in orthogonaler Richtung von den Diagonalen innerhalb der bi-dimensionalen Histogramme entfernen, desto weniger korrelieren die beiden Szenentermine miteinander. Dieser als Szenenvariabilität zu deutende Effekt tritt in allen Kanal-Bihistogrammen beider Szenenpaare auf und ist auf atmosphärische Rauscheffekte zurückzuführen. Hingegen fällt in den kanalweisen Bihistogrammen des Szenenpaars '72 zu '74 der Sensoren MSS-1 und MSS-3 ein deutlich stärkeres Phänomen der bi-dimensionalen Grauwertabweichung auf als bei dem ausschließlich vom Sensor MSS-1 stammenden Szenenpaar '72 zu '74. Das im Szenenpaar verschiedener MSS-Sensoren von 1974 zu 1982 stärker ausgeprägte Phänomen ist als durch den Multisensoreffekt bedingte Szenenvariabilität zu deuten.

Damit scheinen also die atmosphärischen von MSS-sensorradiometrischen Fehlern übertroffen zu werden. MARKAM & BARKER (1987) geben in ihrer Publikation eine ausführliche Beschreibung der radiometrischen Fehlerursachen für den MSS-Sensor, die detailliert und unter Angabe des jeweiligen Fehlerwerts nachlesbar sind. Ihre Fehlerquantifizierung beruht auf historischen Daten von Prelaunch-Tests der Sensorhersteller und den Daten des Basisprozessierungssystems zur Leistungsfähigkeit an Bord. Für die bei den a-priori durchgeführten radiometrischen Labor-Tests (Kalibrationsfehler der Kollimatoren, Transferverluste zum MSS-Sensor, Degradation der Kollimatoren etc.) aufgetretenen Fehler geben sie einen Wert von $\pm 12-17\%$ an. Neben Prozessierungsfehlern an den Bodenempfangsstationen, z.B. beim radiometrischen Ausgleich des Sensorstreifenfehlers, addiert sich die Kurzzeit-Instabilität durch von Temperatur- und Unterdrucks-Modifikation ausgelösten Sensorvariationen hinzu. Einen hohen Fehleranteil nimmt vor allem die Langzeit-Instabilität des Sensors ein. Die altersbedingte radiometrische Drift der Sensor-Spektralkanäle und Degradation der Front-Optik bringt einen Fehlerwert von ca. $5-30\%$ hervor.

Auch HALL et al. (1991) bestätigen die nicht ausreichende Präzision der radiometrischen Korrektur von MSS-Daten mittels der Sensor-zu-Sensor-Laborkalibrationskoeffizienten für multitemporale und multisensorielle Vergleiche.

2.2.8 Evaluierung der Homogenisierungsprozessierung von MSS-Daten

Eine gängige Methode zur Verifikation der Präzision verschiedener atmosphärischer Korrekturalgorithmen besteht in der Betrachtung der Ergebnisgenauigkeit verschiedener Bildverarbeitungsalgorithmen, wie z.B. Klassifikations- oder Indexoperationen.

Auf den vorliegenden MSS-Daten waren wie zuvor ausführlich dargelegt keine absoluten Korrekturverfahren anwendbar. Daher kann anhand dieser Studie die Frage nach der zur Erfassung eines Bodenobjektphänomens auf historischen MSS-Daten erforderlichen Sensitivität gegenüber radiometrischen Fehlerschwankungen des MSS-Sensors sowie gegenüber atmosphärischen Aerosolstreueffekten nicht beantwortet werden.

Dennoch können zur Bewertung des aerosolbedingten Modifikationsverhaltens von MSS-Vegetationsindex-Bilddaten Hypothesen zu aerosolbelasteten Atmosphärenzuständen aufgestellt werden. Hierzu wurden verschiedene Aerosolgehalte einer sahelähnlichen Atmosphäre mittels Streamer auf MSS-Vegetationsindex-Bildern modelliert.

Die Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist eine gängige Routine zur multi-spektralen Analyse des Vegetationsinventars. Sie ist folgendermaßen

definiert:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - R)}{\text{NIR} + R}$$

Die Auswertung des spektral abgeleiteten NDVI wird sowohl von empirischen Studien als auch von Simulationsmodellen zum radiativen Strahlungstransfer – hinsichtlich der Analyse der räumlichen Ausdehnung und des Zustands der Vegetationsdecke (Vitalität, Stress, Chlorophyllgehalt), des Vegetationsbedeckungsgrads (Leaf Area Index, Biomasse über dem Boden, Prozentanteil der Bodenbedeckung), der Beziehung zwischen Sonnenstrahlung und Vegetationsdecke (Interzeption oder Absorption photosyntheseaktiver Strahlung), der Vegetationsfeuchte (Blattwassergehalt, Wassersättigungs-Index), ökologischer Parameter (Niederschlag, potentielle und aktuelle Evapotranspiration, Bodentemperatur) sowie mit der Vegetationsaktivität direkt verbundenen Parametern (Photosyntheseanteil, Transpiration, CO₂-Austausch etc.) – unterstützt (LAMBIN, 1993). Eine detaillierte empirische Studie von HIERNAUX & JUSTICE (1986) zeigt jedoch eine geringe Korrelation zwischen NDVI und Biomasse in tropischen Trockengebieten.

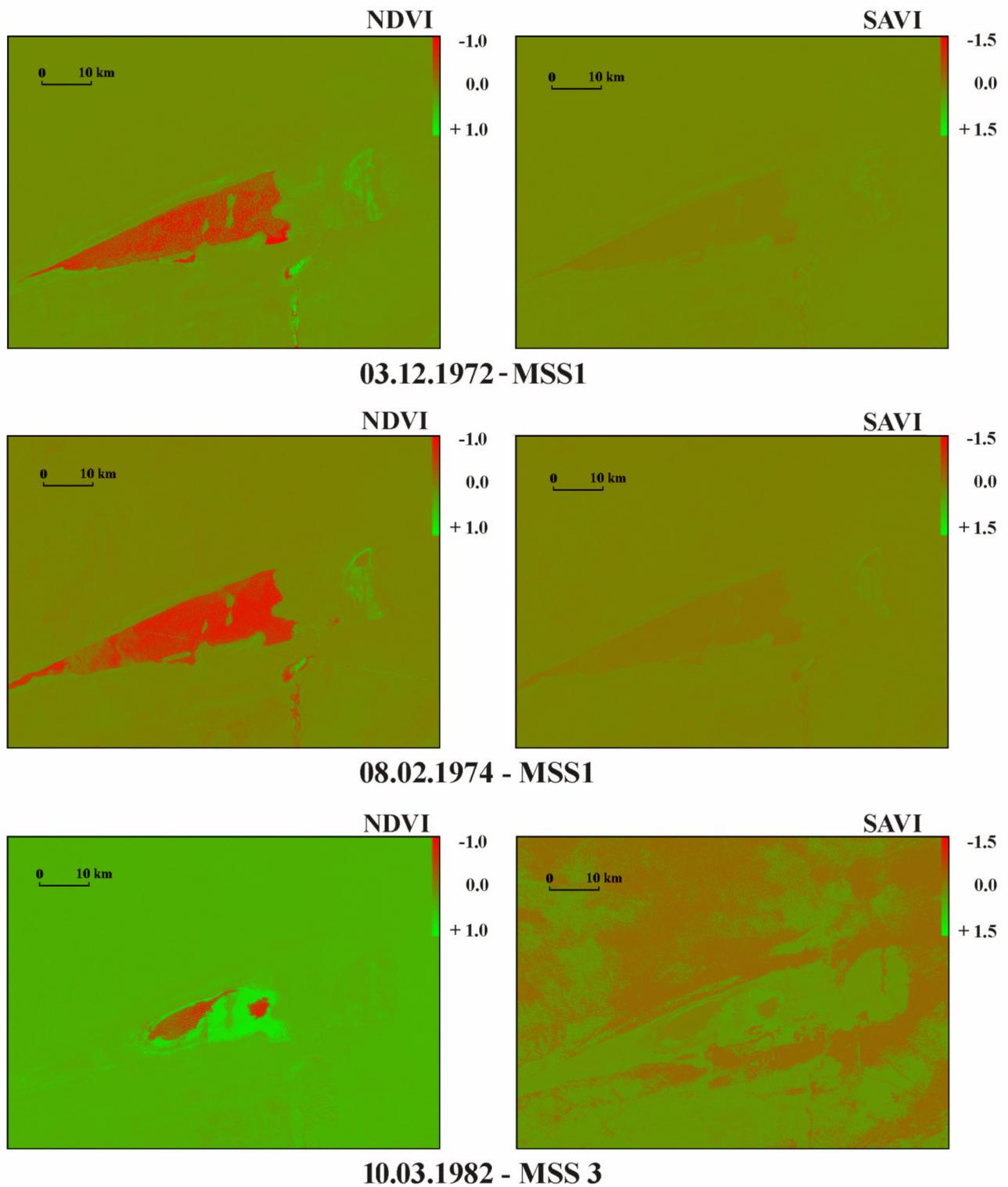
Aufgrund des im Gebiet des Lac Faguibine dominierenden Bodenuntergrunds wurde zur Analyse und Evaluierung der Vegetationsmodifikation der Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) dem SAVI vorgezogen.

Der SAVI gehört, wie der Perpendicular VI oder Weighted Difference VI, zur Gruppe der "Soil-Line Related Indices". Alle diese Vegetations-Indizes basieren auf dem typischen Spektralverhältnis zwischen rotem und infrarotem Strahlungsbereich. Böden sind generell durch etwa gleiche Anteile beider Spektralbereiche charakterisiert. Strahlungssignale der Vegetation verhalten sich demgegenüber abweichend. Während die Strahlung von den Farbpigmenten (Chloro- und Xantophylle) des Blattwerks im visiblen, dort insbesondere im roten Spektralbereich (0,4 – 0,7 µm) stark absorbiert wird, wird die Strahlung im Bereich des Nahen Infrarots (0,7 – 1,3 µm) vom Schwammparenchym der Blattstruktur intensiv reflektiert (CSE, 1996). Die verschiedenen Varianten an Vegetations-Indizes unterscheiden sich allein durch die algorithmische Ausgleichung parasitischer Einflüsse des Bodenuntergrundes (JONG et al., 1998). Beim SAVI werden die dominierenden Bodeneinflüsse anhand des Faktors L, in folgender Weise gewichtet (LYON et al., 1998):

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L)(\text{NIR} - R)}{\text{NIR} + R + L} \quad L = 0,5$$

Fig. 2.19 demonstriert im Untersuchungsgebiet die für die MSS-Serie berechneten Resultate von NDVI und SAVI. Die in roter Farbe kodierte Bildzonen entsprechen den vegetationsfreien bis -armen Bereichen mit Werten beim NDVI von -1 bis 0 und beim SAVI von -1,5 bis 0. Die in Grün kodierte Flächen weisen beim NDVI vegetationsbesetzte bis -reiche Bereiche mit Werten von 0 bis +1 und beim SAVI von 0 bis + 1,5 auf.

Die Vegetationssituation wird von NDVI und SAVI für alle drei MSS-Trockenzeittermine in kohärenter Weise widergegeben. Allerdings scheint im Vergleich zum SAVI der NDVI die vorwiegend spärliche Vegetationsbedeckung innerhalb der MSS-Serie deutlich überzubewerten.



Design: S. HESS (2002)

Fig. 2.19 NDVI und SAVI des radiometrisch korrigierten, multitemporalen MSS-Bildextrakts des Lac Faguibine

Die MSS–NDVI–Szenen von 1972 und 1974 zeigen den Lac Faguibine in der spitzwinkligen Form einer zusammenhängenden Wasserfläche. Ein geringer Vegetationsbesatz hoher Konzentration wird in den ausgetrockneten Bereichen des Lac Kamango und Gouber, östlich des Lac Takara und im Verbindungsbereich zwischen Lac Takara und Lac Télé sichtbar. Vermutlich handelt es sich dabei um die aquatische Seevegetation sowie Reisanbauflächen im Überschwemmungsbereich der Seen. Der Zeitschnitt von 1974 zeigt gegenüber dem von 1972 einen geringeren Vegetationsbesatz und eine trockenere Situation. Im Jahre 1982 schien der Lac Faguibine hingegen von erheblicher Trockenheit betroffen zu sein. Seine Wasserflächen sind bis auf zwei getrennte Residualflächen dezimiert, die nicht mehr wasserbedeckten Stellen sind mit Vegetation besiedelt, welche die Dreiecksform des sonst wassergefüllten Lac Faguibine markiert.

Da die vorliegende MSS–Serie keine genauen Jahrestermine aufweist, ist zur Auswertung der interannuellen Veränderung eine Berücksichtigung der saisonalen Modifikationen erforderlich. Zur Verdeutlichung der saisonalen Abfolge der Vegetationsausprägung im Nigerbinnendelta wurden für den Verlauf eines Jahres die aktuellsten, monatlich gemittelten NDVI–SPOT 4/VGT–Bildszenenausschnitte von Juli 2001 bis Juni 2002 in **Fig. 2.20** zusammengestellt.

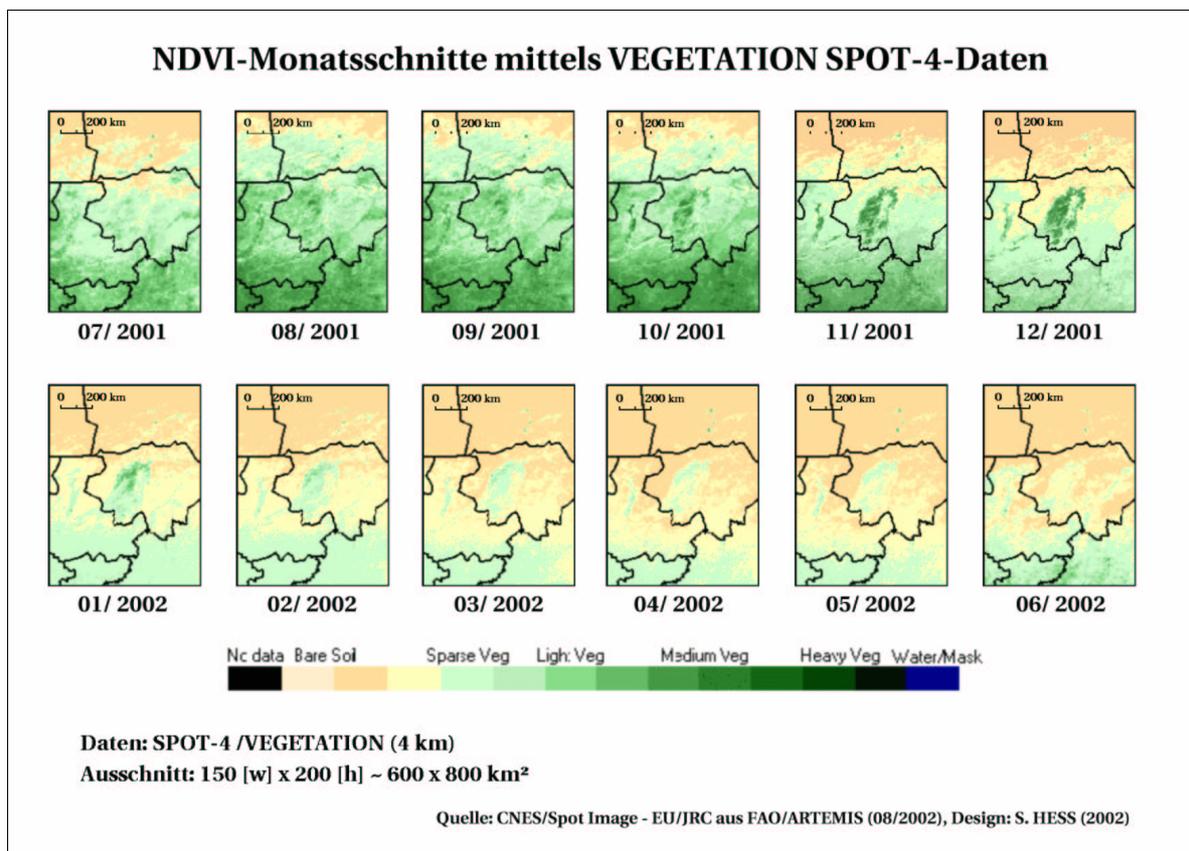


Fig. 2.20 NDVI–Jahressequenz des Nigerbinnendeltas auf der Basis von SPOT–4/VGT

Der Zustand minimalster Vegetationsaktivität wird im Nigerbinnendelta generell im Juni eines Jahres erreicht. Im Vergleich des in **Fig. 2.21** dargestellten pluviometrischen Jahresverlaufs für drei Klimastationen im Nigerbinnendelta fällt die zum Niederschlagsverhalten um ca. drei Monate verzögerte Vegetationsphänologie auf.

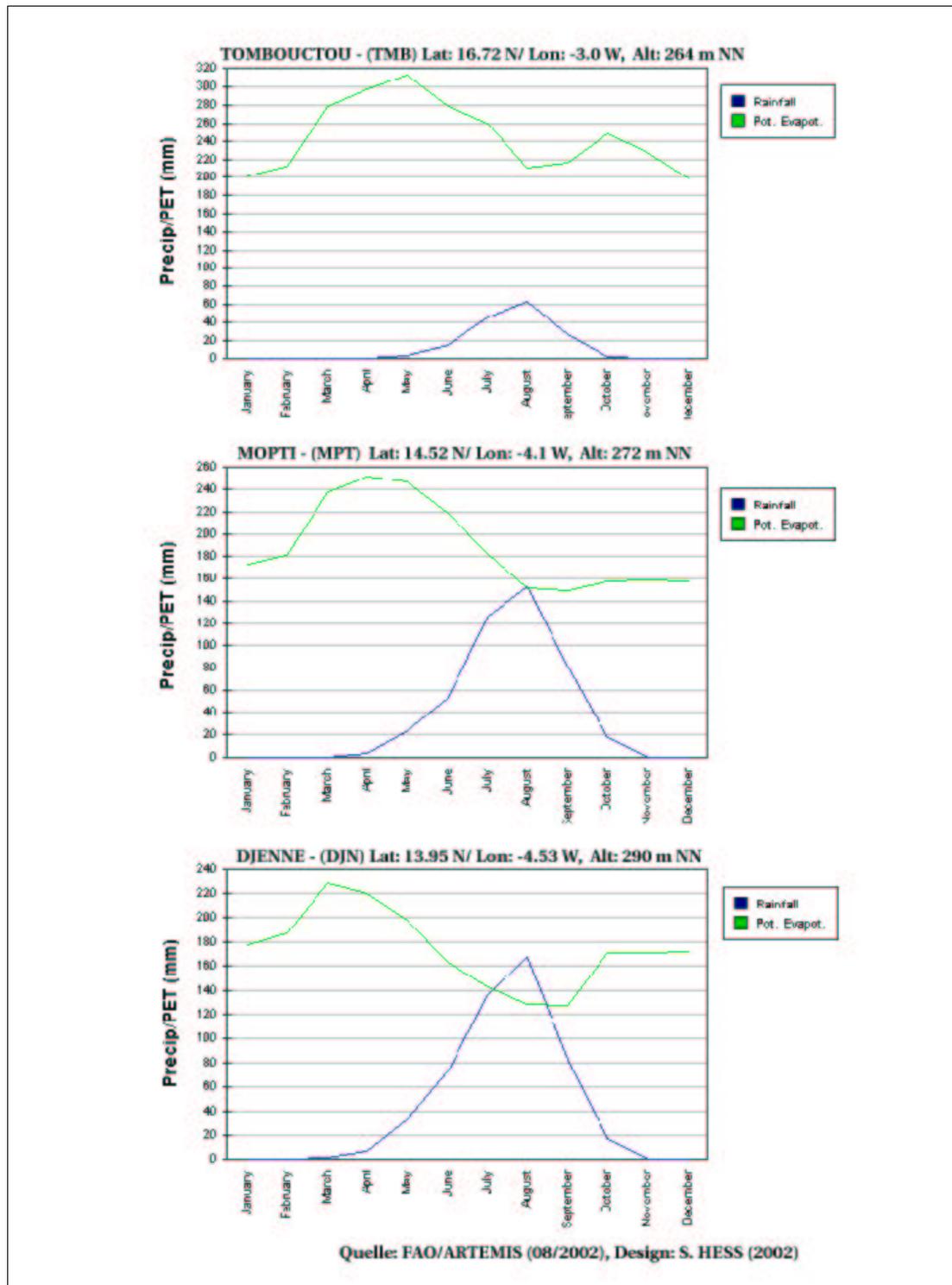


Fig. 2.21 Jahresdiagramme der Pluviometrie und Evaporation für die Klimastationen Djenné, Mopti und Tombouctou

Dem Jahresniederschlagsmaximum im August folgt das Vegetationsmaximum erst im Dezember. Nach der Trockenzeit und den von Süden nach Norden einsetzenden Niederschlägen – in Djenné Mitte Februar, in Mopti Anfang März und in Tombouctou Anfang April – tritt das Vegetationsminimum im gesamten Nigerbinnendelta erst im Juni ein. Für die drei MSS–Aufnahmetermine bedeutet dies, daß im nördlichen Nigerbinnendelta der Trockenzeitbeginn zu Anfang Dezember auf den Zeitpunkt maximaler Vegetationsentwicklung trifft. Die Termine Anfang Februar und Anfang März fallen mitten

in die Trockenzeit und sind durch eine im Photosyntheseminimum befindliche Vegetation gekennzeichnet.

Ein Vergleich der direkt von einer NOAA HRPT-Empfangsstation übertragenen AVHRR-LAC-Daten der Pixelauflösung von 1,1 km mit NDVI-Bildprodukten der **Fig. 2.22**, ermöglicht eine Einschätzung der saisonalen Vegetationsveränderung im Sahel-Feuchtgebiet des Lac Tchad (Republik Tschad). Der Lac Tchad hat von 1963/64 bis 1997 eine Dezimierung seiner Wasserfläche auf 1/20 seiner Flächengröße erfahren. Für die Periode von 1966–1975 gehen die Ursachen zu 95 % auf Aridität und zu 5 % auf Wasserentnahme für Feldbewässerung zurück. In der Periode von 1983–1994 hat sich infolge von Aridität die Wasserentnahme zur Feldbewässerung vervierfacht. Doch vor allem durch den zusätzlichen, für den Export bestimmten Anbau wasserzehrender Cash Crops in den 80er Jahren hat sich die Gewichtung der beiden Ursachenanteile auf 50 % zu 50 % angeglichen. Damit kann die Wasserdezimierung des Lac Tchad nicht als fortschreitendes Ariditätsphänomen, sondern ist vielmehr mit dem anthropogenen Bedarfsanstieg der Wasserressource zu erklären (<http://usinfo.state.gov/regional/af/usafr/french/f1030504.htm>, Abfragestand: 08/2002).

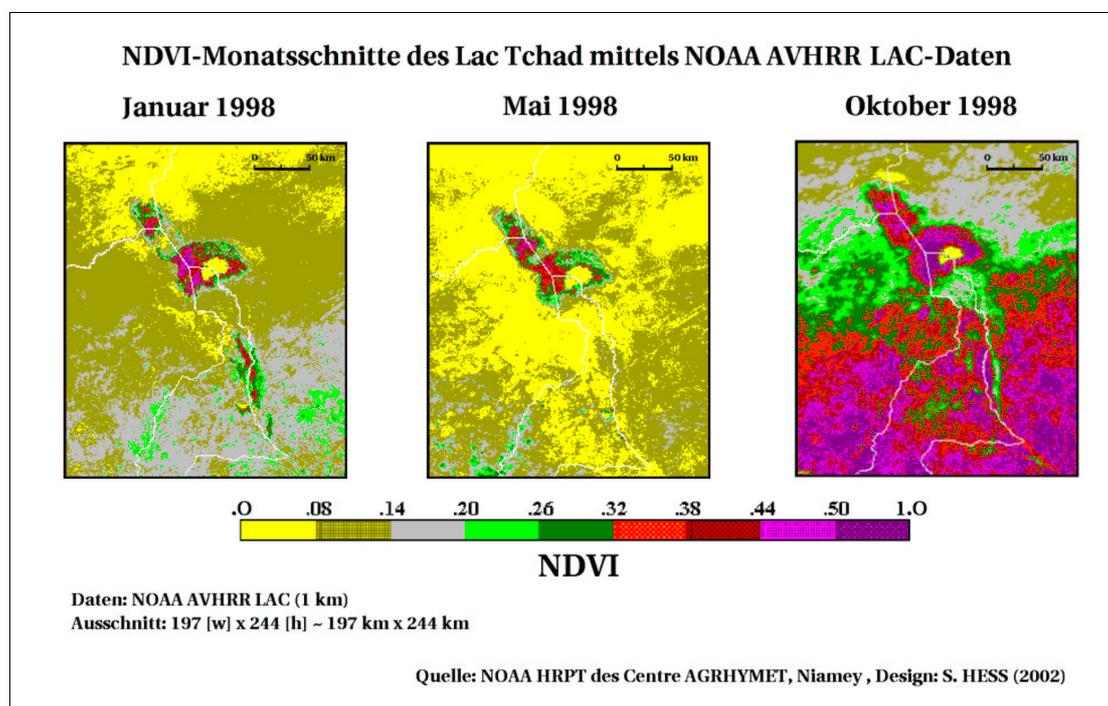


Fig. 2.22 Saisonale Veränderung des NDVI im Gebiet des Lac Tchad

Die drei NDVI-Monatszeitschnitte des Jahres 1998 zeigen einen dem Nigerbinnendelta kohärenten saisonalen Phänologieverlauf der Vegetation von geringer Vegetationsausbreitung im Januar, noch geringerer im Mai und starker Vegetationsausbreitung im Oktober. Eine Besonderheit von Feuchtgebieten im Sahel ist die zur Trockenzeit sich abzeichnende Zunahme von Flächen hoher NDVI-Werte in der ausgetrockneten Umgebung um die dezimierten Wasserflächen. Somit kann die edaphische Abhängigkeit des Vegetationsindex im Bereich sahelischer Feuchtflächen als geeigneter Indikator für eine saisonale und im Falle von anthropogen wenig beeinflussten Feuchtflächen als Trend-Ariditätsindikator eingesetzt werden.

Im Gebiet des Lac Faguibine wird kaum Bewässerungswirtschaft betrieben. Analog zur hydrologisch-pluviometrischen Situation müsste der Dezembertermin von 1972 in der annuellen Repräsentation des Lac Faguibines im Vergleich zum Februartermin von 1974 eine stärkere Vegetationspräsenz aufweisen. Der Termin im Dezember 1972 deutet daher auf ein Trockenjahr. Die Szene von Februar 1974 zeigt einen typischen Trockenzeitermin und

ähnelt im annuellen Vergleich der Ariditätssituation der Szene von 1972. Im März 1982 scheint eine im Vergleich zur saisonal trockenzeitlichen Vegetationsausprägung außerordentliche Ariditätssituation vorzuliegen, angezeigt durch die auf zwei Residualflächen dezimierte Wasserfläche des Lac Faguibine. Starke Reduktion seiner Wasserfläche wird in solchen Extremjahren für den Lac Faguibine beschrieben (SIRCOULON, 1987).

Mit dem Fehlen stützender Klimadatenreihen und Kennwerte der atmosphärischen Zustände können aus den MSS-Daten für die betreffenden Aufnahmetermine weder gesicherte Aussagen zur annuellen Ariditätssituation, noch Trendaussagen für den Zeitraum zwischen 1972 und 1982 vorgenommen werden.

Durch die Modellierung verschiedener Aerosoltrübungszustände auf den MSS-Originaldaten unbekannter Atmosphärensituation kann das infolge atmosphärischer Effekte korrumpierte Vegetationsreflexsignal dennoch simuliert werden. Dazu wird das Ergebnis der Korrekturrechnung von am Satelliten parasitär eingehenden zum am Boden atmosphärisch unbeeinflussten Signalen mittels eines speziell definierten Streamer-Aerosolmodells vorgestellt. Aus den aerosoloptisch-modellierten MSS-Kanälen 5 (Rot) und 7 (NIR) werden SAVI-Korrekturbilder für die jeweils vordefinierte aerosoloptische Dicke (0%, 6%, 16%, 33%, 66% und 100%) berechnet. Aus diesen Ergebnisbildern werden mittels experimentell ermittelter Schwellenwerte jeweils drei SAVI-Klassen unterschiedlicher Vegetationsdurchgrünung (gering: 0.20 – 0.25, mittel: 0.25 – 0.30, hoch: > 0.30) segmentiert. Pixelanzahl und Flächenausdehnung der einzelnen Klassen sind in numerischer Form aus **Tab. 2.7** entnehmbar. Als Referenz wird der auf radiometrisch korrigierten MSS-Originalszenen berechnete SAVI (*r*) festgelegt.

Jahr	aerosol-optische Dicke	SAVI-Klassen								
		0.20 – 0.25			0.25 – 0.30			> 0.30		
		Pixel anzahl	Fläche [km ²]	Anteil von r	Pixel anzahl	Fläche [km ²]	Anteil von r	Pixel anzahl	Fläche [km ²]	Anteil von r
1972	r	2697	1,28	100,00%	1268	0,29	100,00%	822	0,17	100,00%
1972	0%	301783	23,84	111,90%	47015	3,71	37,08%	7056	0,56	8,58%
1972	6%	300452	23,74	111,40%	46284	3,66	36,50%	6602	0,52	8,03%
1972	16%	288574	22,8	107,00%	45669	3,61	36,02%	7217	0,57	8,78%
1972	33%	316252	24,98	117,26%	45767	3,62	36,09%	6657	0,53	8,10%
1972	66%	376687	29,76	139,67%	38325	3,03	30,22%	6791	0,54	8,26%
1972	100%	440828	34,83	163,45%	30620	2,42	24,15%	3993	0,32	4,86%
1974	r	664	0,05	100,00%	266	0,02	100,00%	202	0,02	100,00%
1974	0%	16195	1,28	24,39%	3726	0,29	14,01%	2145	0,17	10,62%
1974	6%	14836	1,17	22,34%	3706	0,29	13,93%	2208	0,17	10,93%
1974	16%	15727	1,24	23,69%	3731	0,29	14,03%	2208	0,17	10,93%
1974	33%	15399	1,22	23,19%	3693	0,29	13,88%	2250	0,18	11,14%
1974	66%	14165	1,12	21,33%	3545	0,28	13,33%	2073	0,16	10,26%
1974	100%	6848	0,54	10,31%	2248	0,18	8,45%	1286	0,1	6,37%
1982	r	84800	6,7	100,00%	297283	23,49	100,00%	33831	2,67	100,00%
1982	0%	2823	0,22	0,03%	5030	0,4	0,02%	56885	4,49	1,68%
1982	6%	2918	0,23	0,03%	4940	0,39	0,02%	57230	4,52	1,69%
1982	16%	2918	0,23	0,03%	4940	0,39	0,02%	57230	4,52	1,69%
1982	33%	2919	0,23	0,03%	4939	0,39	0,02%	57543	4,55	1,70%
1982	66%	2927	0,23	0,03%	5301	0,42	0,02%	60997	4,82	1,80%
1982	100%	4610	0,36	0,05%	12511	0,99	0,04%	71331	5,64	2,11%

r = nur radiometrisch korrigiert

Tab. 2.7 Veränderung der SAVI–Flächenklassen in der MSS–Serie in Abhängigkeit der radiometrischen und atmosphärischen Korrektur verschiedener Aerosolzustände

Fig. 2.23 visualisiert für verschiedene Aerosolbelastungsgrade zwischen 0 und 100 % die flächenhafte Ausdehnung jeder der drei SAVI–Klassen im Anteilsverhältnis ihrer Referenz der radiometrisch homogenisierten und sensor-korrigierten MSS–Szene. Werte über 100 % markieren eine größere und solche unter 100 % eine geringere Flächenausdehnung einer SAVI–Klasse gegenüber dem aerosoloptisch unveränderten Referenzbild. Werte über 100 % treten im Indexbild von 1972 für die SAVI–Klasse I und Werte unter 100 % für alle SAVI–Klassen in den Indexbildern von 1974 und 1982 auf.

Aus den Graphverläufen werden keine Regelmäßigkeiten erkennbar, weder eine mit zunehmendem Aerosolgehalt erwartete, konsequent erfolgende NDVI–Signalanhebung noch Spezifika bezüglich der unterschiedlich dichten oder durchgrünten Vegetationsbedeckung. Die infolge von atmosphärischen Streuungseffekten generell erhöhten Eingangssignale am Atmosphärenoberrand oder Satellitensensor erweisen sich im Vergleich zum vom radiativen Transfermodell korrigierten Boden–Signalen stets als höher (SONG et al., 2001). Erhöhte Satelliteneingangssignalwerte bedeuten bei Nicht–Korrektur folglich auch erhöhte Vegetationsindex–Werte. Gerade über dunklen Flächen wie z.B. dichter Vegetationsbedeckung oder Wasserflächen sind die Strahlungswerte im Verhältnis stärker angehoben als auf hellen, vegetationslichteren Flächen. Entgegen dieser Beobachtung fällt bei den Streamer–Modellierungen der MSS–Daten eine sich abzeichnende Abnahme der SAVI–Werte bei einer Aerosoltrübung größer als 66 % auf. Dies deutet auf eine, bei sehr hohen atmosphärischen Aerosolgehalten, starke Aerosolabsorption und Signaldämpfung der vom Boden reflektierten Strahlung. Unterhalb einer Aerosoltrübung von 66 % sind Phänomene einer Ab– und Zunahme der NDVI–Werte in unregelmäßig schwankender Weise vorzufinden.

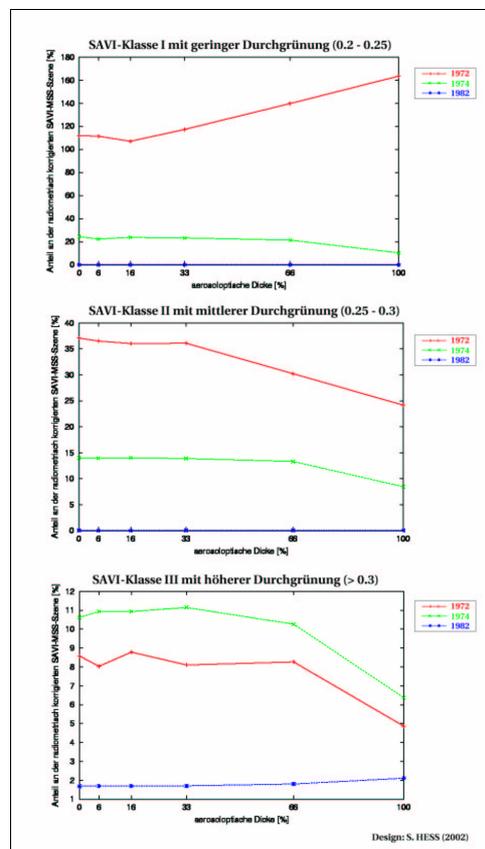


Fig. 2.23 Flächenevolution der SAVI–Klassen I, II & III in Abhängigkeit der Korrektur zunehmender aerosoloptischer Zustände für die MSS–Serie des Lac Faguibine

Die zuvor beschriebenen Phänomene eines durch erhöhte Bildindex–Werte bedingten Anstiegs der SAVI–Flächenklassenausdehnung sowie vice versa die durch Abnahme der Bildindex–Werte bewirkte Verringerung der SAVI–Flächenanteile wird in **Fig. 2.24** durch drei Atmosphärenzustände einer aerosoloptischen Dicke von 0 %, 33 % und 100 % visualisiert. Das visuelle Ergebnis der drei auf den Vegetationsindex angewandten aerosoloptischen Modelle wird für einen Ausschnitt im Seengebiet östlich des Lac Faguibine vorgestellt.

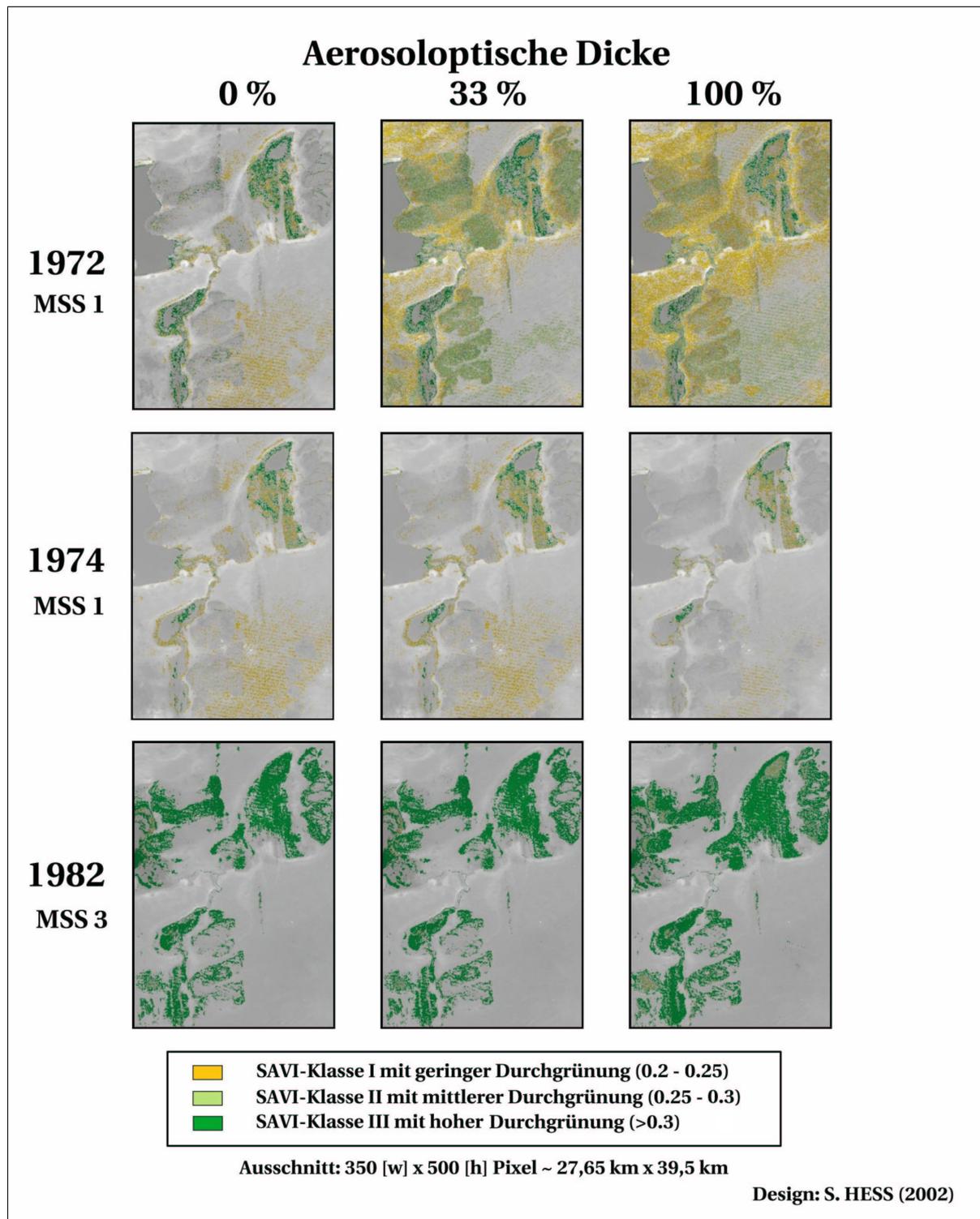


Fig. 2.24 Aerosoloptische Modellierung des SAVI für eine MSS–Bildausschnittserie im östlichen Gebiet des Lac Faguibine

In der SAVI–Szene von 1972 wird insbesondere die flächige Ausdehnung der SAVI–Klassen I und II im Falle der simulierten aerosoloptischen Dicke von 33 und 100 % gegenüber jener von 0 % sichtbar. Die Erhöhung von 33 auf 100 % geht mit einem Verlust der vegetationsdichteren SAVI–Klasse II zugunsten der lichtereren SAVI–Klasse I einher. Die vegetationsintensivste SAVI–Klasse III scheint vom Aerosolphänomen unbeeinflusst.

Der Bildindex–Ausschnitt von 1974 zeigt eine, im Vergleich zu 1972, wesentlich stärkere Vegetationsarmut an. Eine Erhöhung der aerosoloptischen Dicke wirkt sich in einem Flächenverlust der SAVI–Klassen I und II aus, wobei sich auch hier die dichteste SAVI–Klasse III entsprechend dem Bildindex von 1972 ähnlich robust verhält. Entgegen der erheblichen Ariditätssituation dominiert in der SAVI–Bildserie von 1982 die dichteste SAVI–Klasse III in ausgedehnter Flächenpräsenz in den ausgetrockneten, dennoch ausreichende Bodenfeuchte bietenden Seebecken–Randbereichen. Die SAVI–Klassen I und II sind kaum vorfindbar. Auch in diesem Fall bleibt die SAVI–Klasse III gegenüber einer zunehmenden aerosoloptischen Dicke stabil.

Davon ausgehend, daß die Modellalgorithmen korrekt sind und die Berechnungen fehlerfrei ausgeführt wurden, stellen die hier vorgeführten Modell–Simulationen das Schwellenwert–Phänomen bei zunehmender atmosphärischer Aerosolfracht heraus.

Saisonale Variationen des Vegetationsindex sind mit der Phänologie der Vegetation und der Saisonalität des Bioms verbunden (LAMBIN & EHRLICH, 1997). Für die Variationsspanne des NDVI während der Wachstumsphase in Sahelräumen wird den vielfach beobachteten Schwankungen der aerosoloptischen Dicke ein Ratiowert von 0.04 zugemessen (HOLBEN et al., 1992; JUSTICE et al., 1991). VERSTRAETE (1994) schreibt den atmosphärischen Effekten, die das NDVI–Signal in nicht–linearer Weise kontaminieren, sogar einen sich zum NDVI–Signal addierenden Maximalwert von 50 % oder mehr über Flächen mit geringer Vegetationsbedeckung zu.

Bei der Berücksichtigung des, im Vergleich zum atmosphärischen Fehler noch gewichtigeren radiometrischen Sensorfehlers, wie im Fall der ersten Satellitensensordaten von MSS, ist eine noch stärkere Variation der NDVI–Werte zu erwarten.

2.3 Diskussion und Schlußfolgerung

Die Datensituation in Mali erweist sich als repräsentativ für viele der ehemaligen französischen Kolonialstaaten Westafrikas, von denen die meisten nach Ende der Kolonialzeit einen Zusammenbruch erlitten haben. Die in lokalen Stationen vor Ort verfügbaren Klimadaten waren aufgrund von Lückenhaftigkeit und mangelhafter Laufendhaltung insbesondere ab den 80–er Jahren zur stützenden, retrospektiven bis aktuellen Analyse der Vegetations–Langzeitveränderung nicht auswertbar. Zum fernerkundlichen Monitoring unwegsamer und politisch instabiler Regionen wie dem Sahel wäre jedoch die Etablierung automatischer Messnetze sinnvoll und äußerst wünschenswert.

Um dennoch ohne verfügbare Geländeverifikation in diesen Gebieten fernerkundlich Daten aufnehmen zu können, müssen die Methoden sehr sorgfältig eingesetzt werden. Über radiometrische Kennwerte ist eine Transformation der Grauwert–Satellitensignale in physikalische Signalwerte grundsätzlich möglich. Dennoch steht eine präzise a priori–Kalibrierung den Veränderungen von Orbit–Parametern, von spektraler Signaldrift, von Sensitivitätsverlust des Sensors etc. speziell bei den historischen, multi–sensoriellen Daten von MSS, auf problematische Weise gegenüber. Eine absolute Kalibrierung setzt das Vorhandensein stabiler und präziser Kalibrationslichtquellen voraus, die die Bedingungen des Strahlenempfangs am Satelliten möglichst real simulieren. Die gängigen internen Kalibrationslampen, wie auch jene bei MSS, sind aufgrund ihres eingeschränkten spektralen Spektrums (blauer Anteil unterrepräsentiert) sowie ihres kleinen Bestrahlungsfeldes, ungenügend leistungsfähig (DINGUIRAD & SLATER, 1997).

Die multitemporale Vergleichsanalyse scheitert in dieser Studie bereits an der ungenügenden Sensorstabilität der verschiedenen MSS-Modelle, ungeachtet der hinzukommenden, in Raum und Zeit variierenden atmosphärischen Situation.

Nach Angaben von SCHÜTZ (1985) werden in semi-ariden Räumen jährlich etwa $2000 \cdot 10^6$ t atmosphärischer Mineralstaub produziert. In sahelischen Agrargebieten erhöhen zudem Kurzzeit-Ariditätsperioden die Staubbildung in erheblichem Maße (McCAULEY et al. 1981). Regionen mit Niederschlägen um ca. 100–200 mm/a weisen zudem die höchste Zahl an Staubstürmen auf (GOUDIE, 1981). Beim Monitoring semi-arider Räume wie hier im Sahelausschnitt des Lac Faguibine, ist vor allem die atmosphärische Aerosol-Belastung zu berücksichtigen. Die Beeinflussung des Reflexionssignals durch atmosphärischen Wasserdampf ist im sichtbaren bis NIR-Spektralbereich vernachlässigbar.

Infolge atmosphärischer Aerosol-Streueffekte wird die Reflexion dunkler Objekte unverhältnismäßig mehr zu hellen erhöht. Während eine stark streuende Atmosphäre eine Reduktion des Kontrasts zwischen dunklen und hellen Bildobjekten bedingt, bedeutet diese für die statistische Klassifikationsanalyse eine numerische Verfälschung der Ergebnisse (FRANKLIN, 1991). Zur rechnerischen Korrektur hinsichtlich der Transformation der am Satelliten gemessenen aerosolstreuungs-verfälschten Signalwerte sind atmosphärische Parameter notwendig.

Schlüsselpunkt der Korrekturverfahren ist die Erhaltung der Konsistenz der Boden-Albedowerte im multitemporalen Datenset. Dabei ist es grundsätzlich ohne Bedeutung, ob eine Korrektur auf relative oder absolute Weise geleistet wird. Allerdings reichen lineare Korrekturverfahren zur Auswertung multi-sensorieller Daten nicht aus. Die Genauigkeit der radiativen Transfer-Schätzung hängt von der Reflektionsreinheit der schwarzen Eichungskörper, der Aerosolphasenfunktion und der Aerosolreflexion ab (SONG et al., 2001). Die Heterogenität der Landschaft bewirkt aufgrund bi-direktionaler Reflexionseffekte auf anisotropen Oberflächen (s. Kap. 2.1.2) eine zusätzliche Komplexität (VERMOTE et al., 1997).

Es reichte weder das radiative Transfer-Modell Streamer aus, um die atmosphärischen Phänomene zu erklären, noch konnte mit selbigem eine erfolgreiche Korrektur der MSS-Datenserie erzielt werden. Vermutlich waren die als Schwarzkörper-Referenz definierten großen Wasserflächen infolge der Störung durch anderer im Wasser befindliche Objekte (Sedimentfracht, Wasserpflanzen etc.), nicht ausreichend reflexionsrein. Eine andere, vielmehr plausible Erklärung der nicht kontrollierbaren Berechnung der atmosphärischen Effekte führt zu den gegenüber den atmosphärischen Störeinflüssen größere radiometrische Abweichungen des zeit-instabilen MSS-Sensors.

Die meisten Landschaftsveränderungen auf dem afrikanischen Kontinent beruhen auf unregelmäßigen Variationen der Landschaftsbedingungen infolge interannueller klimatischer Variabilität, temporärer Modifikationen der Saisonalität, Verschiebung der Regenfalltermine und episodischer Ereignisse, welchen die meisten Ökosysteme mit hoher Widerstandsfähigkeit begegnen (LAMBIN & EHRLICH, 1997). Dieser Tatsache steht die Präzisionsforderung an ein multitemporales und -sensorielles Satellitendatenset zur Untersuchung von Langzeitphänomenen gegenüber. In diesem Zusammenhang stellen die hier durchgeführten Untersuchungen fest, daß die sensor-technische und atmosphärische Korrektur hinsichtlich einer multitemporalen Langzeitanalyse der Vegetation nicht zur Homogenisierung des MSS-Datenmaterials ausreicht. Aus den vorgeführten Korrektorexperimenten folgt, daß MSS-Daten zu fernerkundlichen Langzeit-Analysen der Landschaftsveränderung untauglich sind. Die Untersuchungen belegen deutlich die Existenz und Bedeutung der Zeit-Instabilität der verschiedenen MSS-Sensormodelle. Des weiteren scheint die radiometrische Ungenauigkeit die atmosphärischen Fehler zu übertreffen. Die radiometrische Präzision des MSS-Sensors zeigt sich insbesondere für die Analyse sensibler Objektveränderungen, wie z.B. der Sahelvegetation mit geringem Bedeckungsgrad, als nicht ausreichend.

2.4 Ausblick

Es besteht wachsendes wissenschaftliches Interesse an der Beobachtung großflächiger Gebiete mittels hochauflösender Fernerkundungsdaten. Die einzige Möglichkeit zur Gewährung von Daten, die reale Änderungen der Erdoberfläche und nicht solche von Instrumenten induzierte wiedergeben, bietet die absolute Sensor-Kalibrierung. Sie kann zu einem Synergismus zwischen verschiedenen Sensoren (z.B. andere Instrumente des Terra-Raumfahrzeugs oder der Landsat-Satelliten etc.) unter Verwendung sensorstabiler Aufnahmesysteme beitragen. Die modernen optischen Scanner sind nahezu, im Vergleich zum opto-mechanischen Abtaster der ersten Landsat MSS-Modelle, ausnahmslos nach dem radiometrisch stabileren opto-elektronischen CCD-System gebaut (ALBERTZ, 2001). Zudem hat sich das technische Design der nachfolgenden radiometrischen Kalibrationssysteme beträchtlich verändert. Das im MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer) –Kalibrationssystem verwendete und für seine hohe Reflexions-Gleichförmigkeit bekannte Material, Spectralon, übersteigt die Leistungsfähigkeit der in den nationalen Standardlabors herkömmlich eingesetzten Kalibrationsdetektoren. Das MISR-Bordkalibrationssystem besteht aus einem Paar ausschwenkbarer, mit Spectralon überzogener Platten, die, wenn sie im Sensorsichtfeld gedreht werden, das diffus von der Sonne reflektierte Licht direkt auf den Sensor leiten. Die dort gemessenen Strahldichtestufen werden nicht nur durch die MISR-Hauptkameras überwacht, sondern auch durch ein Set an Präzisions-Photodioden. Die MISR-Bordkalibrationsdaten werden durch zusätzliche Kalibrierungs-Datensets ergänzt, die zeitsynchron durch in situ-Messungen an speziellen Bodenstandorten aufgenommen werden. Im Vergleich zur radiometrischen Genauigkeit des opto-mechanischen MSS-Scanners von 5–30 % wird diese für den CCD-Sensor des Terra-Satelliten MISR mit ca. 3 % angegeben (<http://www-misr.jpl.nasa.gov/mission/ilgtsens.html>, Abfragestand: 08/2002).

Multitemporale change detection-Studien erfordern zum Ausschluß von Artefakten neben einer hochpräzisen Kenntnis des verwendeten Sensorsystems jene der atmosphärischen Parameter zum Aufnahmezeitpunkt (DINGUIRARD & SLATER, 1997). Daher benötigt die Satelliten-Beobachtung großflächiger Gebiete, sowie zur Korrekturrechnung notwendige flächenrepräsentative atmosphärische Kennwerte inklusive leistungsfähiger, auf weite Gebietsräume übertragbare atmosphärische Korrektur-Standards. Mit dieser Forderung zeichnet sich eine Wende ab weg von den im homogenen Atmosphärenprofil kleiner Testgebiete gültigen konventionellen Ansätzen zu Methoden, die auf großflächig transferierbaren atmosphärischen Referenzwerten basieren. Ein perfektes Schema in diesem Sinne wäre die Etablierung einer Signaturdatenbank, zu deren Aufbau jedoch standardisierte, genormte, sensor- und objektspezifische Daten als kalibrierte Energiemeßwerte benötigt werden. Dies ist jedoch aufgrund der Komplexität der raum-zeitlichen Einflußparameter nicht zu gewährleisten. Aufgrund der Heterogenität tropischer Trockenräume ist dort die Anwendung radiativer auf der Hypothese homogener Atmosphärenstörung beruhender Transfermodelle unmöglich. Hingegen scheinen hier anisotrope Modelle, die auf eine heterogene Atmosphärenrealität zugeschnitten sind, geeigneter zu sein. (ESTEVE et al. 1998). Die weitere Forschung konzentriert sich zunehmend auf die satelliten-synchrone Messung atmosphärischer Parameter. Während die Messung meteorologischer Standardparameter mittels von Flugzeugen, Satelliten oder von aerologischen Radio- und Ballonsonden getragenen Instrumenten bereits routiniert verläuft, bleibt die Messung der Aerosole bislang problembehaftet. Die fernerkundliche Polarisationsmessung von Aerosolen scheint aufgrund der in ariden Gebieten auftretenden großen Aerosole, die die gestreute Strahlung nur schwach polarisieren, an ihre Grenzen geraten zu sein (VERMOTE et al., 1997). Um auf effiziente Weise Daten zur zeitlich-räumlichen Verteilung von Aerosolen zu gewinnen, werden fernerkundliche Messungen der atmosphärischen Aerosoleigenschaften mittels MISR- und täglicher MODIS- (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Daten vorgenommen. Das Fernerkundungsinstrument MISR, sowie auch POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance) haben – in Verbindung mit

Feldmessungen – bereits zu Verbesserung von Laborstandards speziell bei der Untersuchung der bi-direktionalen Effekte, beitragen können. Dennoch ist der bisher allgemein erreichte Fehlerwert der atmosphärischen Korrektur von 2–3 % für viele Anwendungen noch zu hoch (DINGUIRARD & SLATER, 1997).

Das leistungsfähige, weitreichende Datenkommunikations-Netzwerk der NASA, AERONET (Aerosol Robotic Network), erhebt aktuell präzise aerosoloptische Daten an 100 weltweit installierten automatischen Bodenmeßstationen (robotic aerosol observing stations). Ziel ist die Messung der optischen Eigenschaften von Aerosolen zur Korrektur der Aerosol-Artefakte in erdbeobachtenden wie meteorologischen Satellitendaten. Das Netz definiert die Normierung und Kalibrierung der Instrumente sowie die Verarbeitung der Daten. Es verspricht die Abfrage von global verteilten Daten zur optischen Dicke des spektralen Aerosols und des präzipitierbaren Wassers in den geographisch verschiedenen Aerosolregimen zum gewünschten Aufnahmezeitpunkt (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/Aeronetnew.html>, Abfragestand: 07/2002).

Die AERONET-Datenbank ermöglicht in Verbindung mit modernen Satellitensensoren zukünftig eine hohe Präzision bei der fernerkundlichen Beobachtung von Langzeitphänomenen.

Nachfolgendes Kapitel III resultiert aus dem Scheitern des radiometrischen Ansatzes auf der historischen MSS-Datenserie mit der Darstellung eines alternativ entwickelten Methodenansatzes auf historischer Luftbildbasis zur Vegetationserfassung und Detektion ihrer Veränderung.

III. ENTWICKLUNG OPERATIONELLER METHODEN DER SEMI-AUTOMATISCHEN LUFTBILDAUSWERTUNG

3.1 Daten und Methoden

3.1.1 Geschichte der Luftbildphotographie in Westafrika

Mit den ersten Aufnahmen im Jahre 1855 (Ballonphotographie von TOURNACHON – "Nadar" genannt – über dem ehemaligen Bièvre-Viertel in Paris) erlangt die Luftbildphotographie in der Folge einer verbesserten Aufnahme- und Auswertungstechnik eine Schlüsselstellung für die topographische Basiskartierung und geodätische Kartenvermessung.

Die Anfänge kartographischer Produktion in Westafrika gehen dort auf die sozio-ökonomischen Entwicklungsbestrebungen der französischen Kolonien (4,72 Mio. km²) zurück und werden im Jahr 1903 durch den SGAOF mit der Erstellung einer auf astronomischen Referenzpunkten beruhenden Übersichtskarte (1/500.000) begründet. Ab 1920 schließlich werden südlich des 16. Breitengrades topographische Basiskarten (1/200.000) mittels der klassischen, geodätischen Triangulation im Gelände vermessen. Diese aufwendige Aufnahmemethode erfasst jedoch bis zum Jahre 1945 nicht mehr als 18 % des ehemaligen Kolonialraums Westafrikas. Seit 1944 verwendet der SGAOF für die Herstellung aeronautischer Flugkarten (1/100.000) großer Teile Afrikas nördlich des 8. Breitengrades die bereits ein Jahr zuvor von US-Amerikanern aufgenommenen Trimetrogon-Luftbilder (Simultanaufnahme einer kleinmaßstäbigen Vertikal Aufnahme und zweier im 60°-Winkel geneigten Schrägaufnahmen). Die unzulängliche Auswertbarkeit der Schrägluftbildaufnahmen bedingen in der Folge die Produktion kleinmaßstäbiger, stereoskopischer (60 % Längs- und 10 % Querüberdeckung) Vertikal Aufnahmen (CARRÈRE et al., 1990).

Ab 1945 wird das gesamte historische Luftbildmaterial aller ehemaligen französischen Kolonien West- und Zentralafrikas (états d'expression française d'Afrique Occidentale et d'Afrique Centrale) vom Institut Géographique National (IGN) in Paris zentral in einem analogen Archiv gehalten (TRICART et al., 1970).

Die Befliegungen des IGN in den westafrikanischen AOF-Gebieten dienten seit der frühen 50-er Jahre zunächst der Kartierung und Vermessung. Dazu wurden viermotorige amerikanische Flugzeuge des Typs B17 (Höchstgeschwindigkeit von 300–320 km/h, max. Flugbetriebsautonomie von 13 h, max. Flughöhe 10.000 m) und des Typs Hurel Dubois HD 34 (Höchstgeschwindigkeit von 240 km/h, max. Flugbetriebsautonomie: 3600 km, max. Flughöhe 7.000 m) eingesetzt, bestückt mit einer Reihenmeßkammer des Typs Poivilliers-SOM (Magazin mit 96 Platten à 19 x 19 cm², Einzelobjektiv Aquilor, 125 mm) (TRICART et al., 1970). Später wurden die WILD-Meßkammern RC 8 und 9 mit Aviogon-Objektiven der Brennweiten 152 mm oder 88 mm verwendet, die letztlich durch die multifokale Meßkammer WILD RC 10 ersetzt wurden (IGN, 1990).

Aus mehreren in dieser Zeit vom IGN unternommenen Befliegungen resultiert die topographische Aufnahme der Republik Mali zwischen 1952 und 1957 als Basis für darauffolgende Entwicklungsprojekte (Hygiene- und Agrarprogramme, Staudammplanung etc.). Bei späteren thematischen Erfassungen standen insbesondere Forstwesen und Botanik im Vordergrund, da Luftbilder in erster Linie den diese Disziplinen interessierenden Aspekt der terrestrischen Bedeckung, z.B. der Vegetationsbedeckung, wiedergeben.

Nach der kolonialen Unabhängigkeit seit Beginn der 60er Jahre (Mali: 1960) untersteht die kartographische Entwicklung und Produktion in den meisten ehemaligen Kolonialstaaten Westafrikas direkt dem Politikgeschehen. In einigen wurden Luftbildmissionen mit Unterstützung von Hilfs- und Entwicklungsorganisationen weitergeführt. Ab ca. 1960 aufgenommenes Luftbild- oder editiertes Kartenmaterial untersteht hinsichtlich der

Urheber- und Vertriebsrechte der Verantwortung der afrikanischen Regierungen und kann nur von dort unter Autorisierung bezogen werden. Das in den ersten Jahren nach der Unabhängigkeit aufgenommene Luftbildmaterial wird aufgrund der überwiegend noch im Etablierungsstadium befindlichen Archivierungssysteme bis dato beim IGN aufbewahrt.

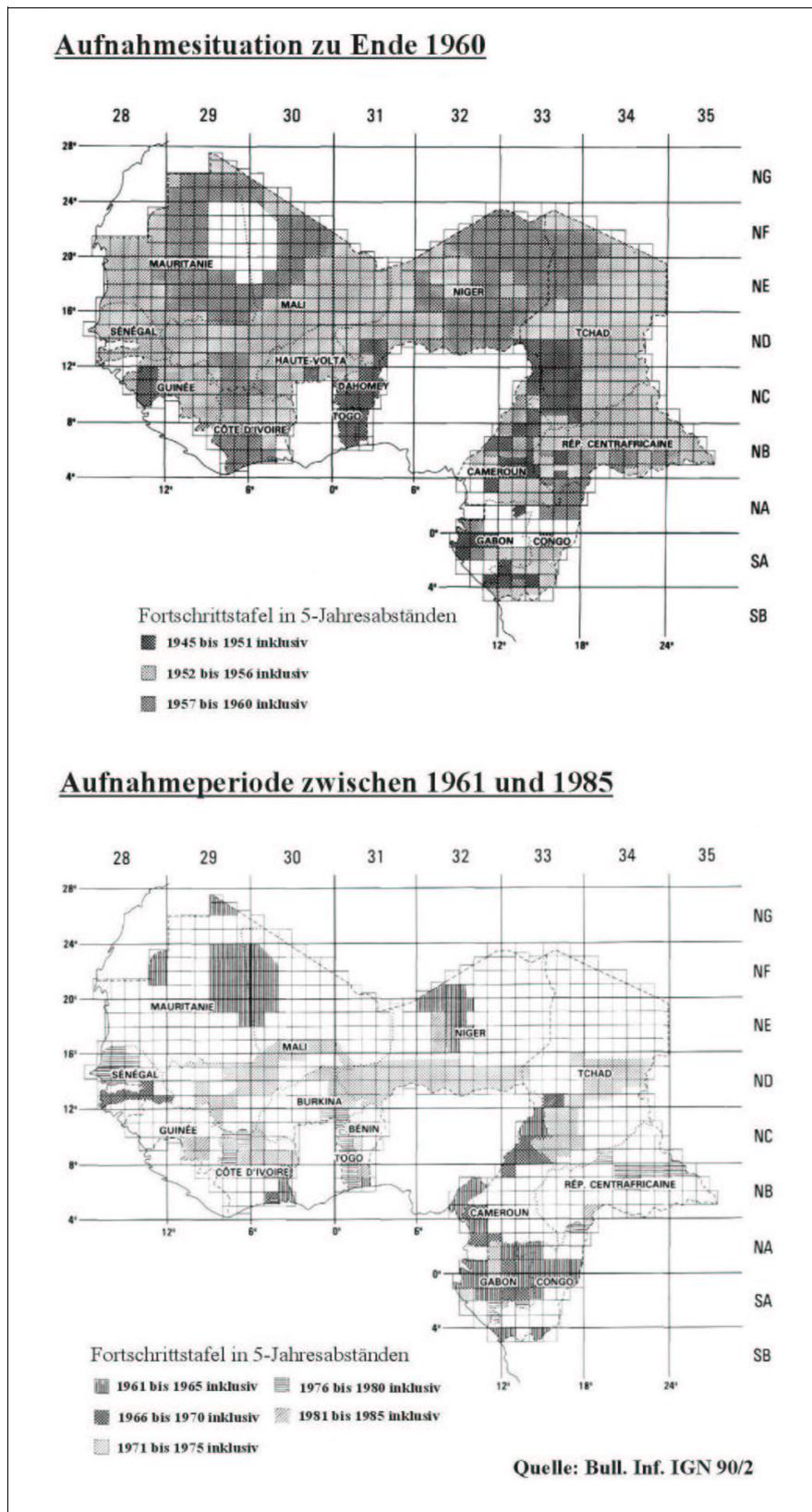


Fig. 3.1 Kleinmaßstäbige Luftbildüberdeckung des kolonialen Afrikas zu Ende 1960 (a) und zwischen 1961 und 1985 (b)

Für die Zeit vor 1960 (*Fig. 3.1*, links) und die Zeit nach 1960 (*Fig. 3.1*, rechts) liegen für die meisten dieser westafrikanischen Länder beim IGN zu zwei Überflugterminen großflächig abdeckende, historische Bilddatensätze vor: Panchromatische Aufnahmen von Anfang der 50-er Jahre und solche ab den 70-er Jahren, letztere zusätzlich überwiegend als Infrarot-Luftbildsätze vorliegen.

Während Ende 1960 bereits 97 % der AOF-Gebiete durch Luftbildmaterial zur Abdeckung gebracht werden konnten, haben Folgebefliegungen zwischen 1961–85 (*Fig. 3.1 b*) nur einen Anteil von 36 % aktualisiert.

Nach Aufnahmestatus des Jahres 1985 verfügt das IGN über insgesamt ca. 800.000 Luftbildprodukte der westafrikanischen Staaten, welche bis heute noch nicht in ein recherche-effizientes digitales Archivierungs-Datenbanksystem aufgenommen werden konnten (CARRÈRE et al., 1990).

3.1.2 Methoden der visuellen Bildinterpretation

Die visuelle Luftbildinterpretation ist ein klassisches Instrument zur Abgrenzung von räumlichen Erfassungseinheiten. Während die Erkennung der Bildobjekte in starkem Maße von der optischen Wahrnehmungsfähigkeit und Intuition abhängt, obliegt die eigentliche Interpretation, d.h. das Rückschließen auf das Erkannte, dem Grad der Vor- und Geländekenntnis des Experten. Die Interpretation beinhaltet eine visuelle Abprüfung und Zuordnung der gesuchten, bzw. erwarteten Objektmerkmale im photographischen Bildinhalt. Das menschliche Sehvermögen beruht auf einer logarithmischen Kennlinie bezüglich der Wahrnehmung der Grau-/Farbhelligkeitswerte und -intensität. Bei der Objekterkennung orientiert sich das Sehvermögen sehr stark an einer gesamtheitlichen Betrachtung der Ausprägung des Bildkontexts, wobei der menschliche Sehsinn stark auf die Wahrnehmung von Bilddiskontinuitäten sensibilisiert ist. Der Bildkontext wird in Verbindung mit der Farb- oder Grautongebung durch eine sich aus verschiedenen Texturen zusammensetzende Bildoberflächenstruktur – je nach individuellem Ansprechverhalten auf diese Bildinhalte und je nach mentaler Reizumsetzungsfähigkeit – sehr subjektiv wahrgenommen. Erfährt dieser Kontext örtliche Veränderungen, können leicht optische Täuschungen oder psychologische Fehlwahrnehmungen von Helligkeitsgradienten, z.B. der in dunklen Bereichen geringeren örtlichen Auflösung, sowie Inversionen der Form-, Flächen- und Distanzgröße von Bildobjekten auftreten (JÄHNE, 1995).

Diese Fehlerfassungen können – durch Einbeziehung von für den eigentlichen Interpretationsprozeß relevantem Hintergrundwissen des Experten – nur begrenzt vermieden werden.

Die Methodik zur visuellen Bildinterpretation stützt sich generell auf folgende Schritte:

1. Vorbereitende Geländeerkundung und Vorinterpretation

Eine flächen- und linienhafte Vorgliederung des Bildinhalts unter Zuhilfenahme von Referenzinformationen verschafft einen groben Überblick über die vorhandenen Landschaftselemente und die einzelnen Teilgebiete hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Funktion. Eine Flächenvorauswahl dient zur Gewinnung von Schlüsselinformationen bei Geländevorerkundungen.

2. Analyse der Kriterien zur Objekterkennung

Informationen zu Art, Entstehung und Funktion der Bildobjekte sind aus folgenden, sich z.T. wechselseitig beeinflussenden Interpretationskriterien herauszulesen (ALBERTZ, 1991; AVERY & BERLIN, 1992; KRAUS, 1990; LILLESAND & KIEFER, 1987):

Helligkeit oder Schwärzung wird durch die Dichte der Bildelemente beschrieben und

hängt neben den –im Folgekapitel 3.1.3– genannten Einflußfaktoren in erster Linie von den Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche ab.

Die Schwärzung der Objektoberflächen kann jedoch besonders innerhalb kleinmaßstäbiger Bildebenen variieren; sowohl durch den, infolge des großen Aufnahmebildwinkels bedingten Helligkeitsabfalls zum Bildrand hin, sowie durch die ungleichmäßige Beleuchtungsstärke des unebenen Geländes infolge der schräg einfallenden Sonnenstrahlen. Letztere können hingegen aufgrund von Gegenlichteffekten auch evtl. erwünschte, jedoch auch ein energiearmes Relief akzentuierende Schattierungen erzeugen. Die Objektidentifizierung kann, aufgrund der mitunter erheblichen Variationen, nicht allein mittels des Schwärzungskriteriums erfolgen.

Bei der Objektdifferenzierung sind die relativen Werteunterschiede von Helligkeit sowie von Farbton und –sättigung aussagekräftiger als die absoluten Einzeltonwerte. Grenzlinien zwischen unterschiedlichen Schwärzungen zeichnen im Grundriß die Konturen der Objektform in ihrer vom Bildmaßstab abhängigen Größe nach.

Die Textur oder das Objektmuster wird als die im jeweiligen Bildmaßstab vorfindbare homogene Struktur nicht mehr getrennt im Bild wahrnehmbarer Einzelstrukturen definiert. In ihrer typischen Ausprägung trägt sie entscheidend zur Objekterkennung bei. Während natürliche Flächen unregelmäßige Texturen aufweisen, werden künstlich geformte Flächen generell durch regelmäßige Muster wiedergegeben.

Die relative Lage der Objekte liefert in großmaßstäbigen Luftbildern wichtige topologische Informationen von Einzelobjekten, wird jedoch mit kleiner werdendem Maßstab auf die Ausprägung von Objektmustern verlagert. Die in gleicher Weise beeinflussende Assoziation beschreibt die räumliche Beziehung zwischen Objekten oder Objektmustern zu ihrer Umgebung und ermöglicht eine deduktive Erfassung im Fall einer nicht direkt aus dem Bild ableitbaren Information.

3. Training zur Erkennung der Objektmerkmale

Der Detailinterpretation geht üblicherweise ein Training voraus, bei welchem dem Luftbildinhalt das entsprechende, im Gelände festgestellte Merkmal zugewiesen wird. Auf dieser Basis kann ein Interpretationsschlüssel zur Erzielung objektiverer Ergebnisse entworfen werden.

4. Festhalten der Objektmerkmale in Form eines Interpretationsschlüssels

Die Aufstellung eines problemabgestimmten *Interpretationsschlüssels*, verstanden als systematische Kompilation charakteristischer Bildobjektmerkmale, legt in einem vereinheitlichten Schema Angaben zu Einzelobjekten fest. Grundsätzlich steht dem Selektionsschlüssel (Auswahl repräsentativer Bildvergleichsmuster) der Eliminations-schlüssel (Hierarchiesystem von Objektbeschreibungen) gegenüber. Ein solches, mehr Objektivität hervorbringendes Schlüsselssystem läßt sich jedoch aufgrund der durch variable Bildwiedergabebedingungen (Jahreszeit, Beleuchtung, Filmtyp etc.) geprägten Vielfältigkeit der Objekterscheinung in multitemporaler Funktionalität nur eingeschränkt entwickeln.

5. Visuelle (stereoskopische) Auswertung

Das *stereoskopische Sehen* ermöglicht im Fall eines nicht zu kleinmaßstäbigen Bildmaßstabs die zusätzliche visuelle Auswertungsmöglichkeit der räumlichen Dimension, d.h. die Einbeziehung der Objekthöhe in den Identifikationsprozeß.

Die Ergebnisse dieser subjektiv bestimmten visuellen Bildobjekterfassung und –interpretation sind mit Hilfe des menschlichen Expertenwissens nicht exakt reproduzierbar. Wahrnehmungsspezifische Interpretationsfehler wie die inkorrekte Identifikation und Zuweisung von Zielobjekten bleiben mit Anwendung dieser Methode unkontrollierbar. In Abhängigkeit von Qualität und Aufnahmemmaßstab des Luftbildmaterials können Fehlinterpretationen entstehen, wie beispielsweise die Verwechslung einer rauhen

Bodenoberfläche (z.B. Besatz mit Termitenhügeln) mit dem Muster individueller Gehölzobjekte oder aber Nicht-Erkennen von Gehölzobjekten auf gedunkeltem Bildhintergrund. Gehölze werden hier als ausdauernde, Holzgewebe erzeugende Lebensformen (Phanerophyten) verstanden, die entweder als Baum einen aufrechten, sich erst in der Höhe verzweigenden Stamm haben oder als Strauch Achsenverzweigungen an oder unterhalb der Basisknospen entwickeln (STRASBURGER, 1991).

Wenngleich ein digitalisiertes Luftbild im Vergleich zu einem analogen Bild einen wesentlich geringeren Kontrastumfang aufweist, läßt sich bereits durch digitale Vergrößerung am Monitor die Detailerkennbarkeit von Objekten in einem, durch das menschliche Auflösungsvermögen begrenzten, so doch effektiven Maß erhöhen.

Semi-automatische Bildverarbeitungsmethoden zur Erfassung quantitativer Daten sind bei der Untersuchung langzeitlicher Veränderungsphänomene unerlässlich. Zum einen kann unter möglichst geringem Zeitaufwand die für eine große Flächenüberdeckung erforderliche hohe Luftbildanzahl effizient verarbeitet werden. Zum anderen ermöglicht und garantiert die maschinelle Verarbeitung Quantifizierung und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu unterschiedlichen thematischen Erfassungen.

Vor dem Hintergrund einer expandierenden Wissensbasis zur Bildsemantik, zur Objektextraktion und der damit einhergehenden Automatisierung des Methodenflusses in der Bildauswertung wird die visuelle Interpretation stets ihre wichtige Funktion und Leistungsfähigkeit im Erkennungsprozess beibehalten, dies sowohl hinsichtlich der visuellen Definition der Parameter zur Objektextraktion als auch als Mittel zur visuellen Verifikation der Ergebnisse.

3.1.3 Bodenreflexion

Bildobjekte werden im panchromatischen Bild durch die Unterschiede der Schwärzung oder Helligkeit, im chromatischen Bild durch jene der Färbung (Ton, Sättigung, Helligkeit) wiedergegeben.

Die Schwärzung wird nicht nur durch Unterschiede spektraler Reflexionseigenschaften der Bodenobjektoberfläche des chemisch-physikalischen Objektzustands (Farbpigmentierung, Struktur und Rauigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur etc.), sondern auch durch aufnahmetechnische Faktoren (Belichtung, Filmtyp) sowie geometrische Verhältnisse (Beleuchtungseinfall, Beobachtungsrichtung) gesteuert. Darüber hinaus kann das Reflexionsvermögen (Albedo) des Bodenobjekts durch atmosphärische Bedingungen besonders in bodennahen Luftschichten – insbesondere Luftturbulenzen, Nebel, Dunst etc. – beeinträchtigt werden (ALBERTZ, 1991).

Während die Erfassung der Objektreflexion beim Satelliten von der Sensibilität des Sensors (s. Kap. 3.2.3) abhängt, wird diese beim photographischen System durch die Qualitätseigenschaften der Linse, evtl. des Filters, unterschiedliche Filmemulsion, wie z.B. speziell beschichteter Kurzbelichtungs-Luftbildfilme beeinflusst (*Fig. 3.2 a*).

Im Gegensatz zur panchromatischen Emulsion (0,4–0,7 μm) reduziert der Infrarotfilm (0,7–0,9 μm) auf Luftbildern z.T. den kontrasttrübenden Effekt der beispielsweise in der subtropischen Atmosphäre semiarider Gebiete oft vorhandenen Trockendunstnebel, die als feine, mit Wasser beladene Staubkörnchen definiert sind (TRICART et al., 1970). Die im Bereich des nahen Infrarots (NIR) sensible Emulsion (*Fig. 3.2 a*) ist nur für den kurzwelligen, vom Boden reflektierten nebeldurchdringenden, nicht hingegen für den langwelligen Anteil der Infrarot-Strahlung jener vom Boden abgestrahlten Wärme- oder Thermalenergie empfindlich.

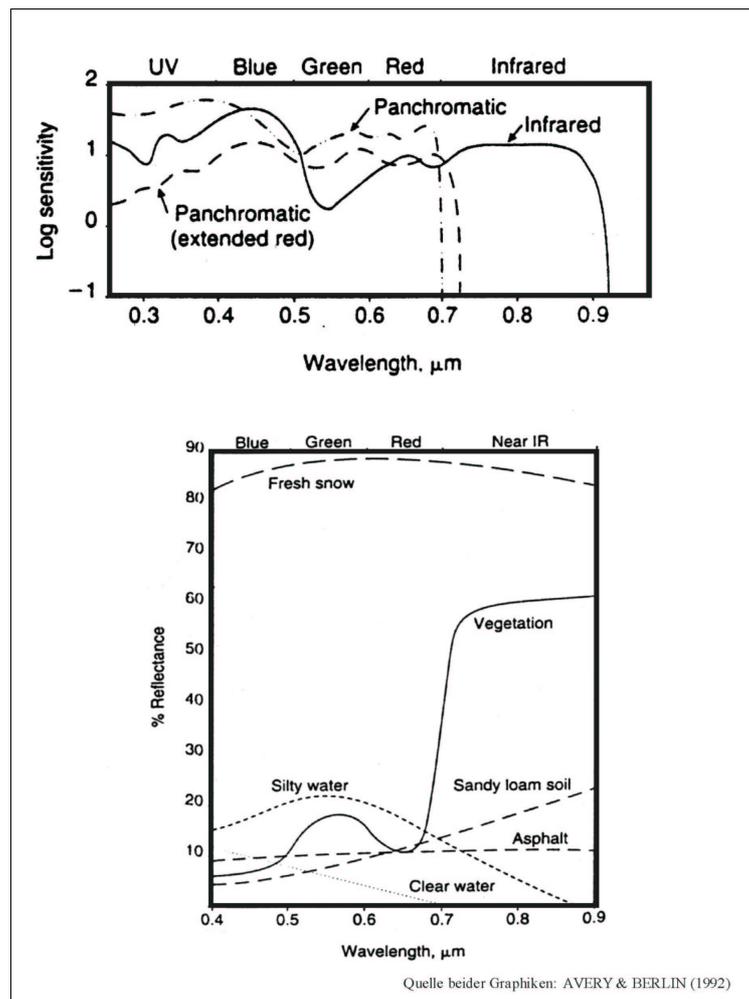


Fig. 3.2 a) Spektrale Sensibilitätskurven panchromatischer rot- und infrarot-empfindlicher Negativfilme und durchschnittliche spektrale Reflexionskurven verschiedener Materialtypen

Wie **Fig. 3.2 a** darlegt, nähert sich die infrarotspezifische Filmempfindlichkeitskurve stärker als die panchromatische an die spektrale Reflexionskurve der Vegetation an.

Photosyntheseaktive Vegetation weist generell eine erhöhte Absorption blauer und roter Strahlung, jedoch eine starke Reflexion grüner Strahlung in den Chloroplasten, speziell den Chlorophyllpigmenten des Palisadengewebes auf. Besonders stark wird die Strahlung im Infrarotbereich durch die gasgefüllten Mesophyllzellen des darunterliegenden Schwammparenchyms an der Übergangsstelle von der Zellwand zum Luftraum reflektiert. Die gegenüber der grünen Strahlung der Chloroplasten stärkere Antwort der Infrarotstrahlung in den an Chlorophyll ärmeren Mesophyllzellen macht nicht nur die Identifizierbarkeit photosyntheseaktiver, vitaler Vegetation (hellgrau auf IR- und dunkelgrau auf panchromatisch. Bildmaterial) möglich, sondern erlaubt auf großmaßstäbigem Luftbildmaterial zusätzlich die Ausgrenzung einzelner Arten – bis hin zur Erfassbarkeit im Gelände nicht direkt erkennbarer Vegetationsschäden – möglich. Die Infrarotreflexion der Vegetation wird weiterhin durch demographische (Blattalter) und phänologische Faktoren (Blattfeuchtigkeit, Wuchsdichte) sowie die topographische Lage mitbeeinflusst (AVERY & BERLIN, 1992).

Die im Bereich des grünen bis roten sichtbaren Lichts verhältnismäßig empfindliche panchromatische Filmemulsion weist damit – gegenüber der im infraroten Spektralbereich sensiblen – hinsichtlich der Erkenn- und Differenzierbarkeit von Vegetationsobjekten ein sehr differenziertes Verhalten auf. Stark IR-reflektierende Objekte erscheinen im Infrarot-

Luftbild in hellgrauem Ton, gering IR-reflektierende Objekte in geschwärztem Ton. Der Infrarotfilm wurde bereits zu Ende des zweiten Weltkriegs zur Vegetationserkennung, d.h. zur Detektion mit Laubzweigen camoufflierter Militärobjecte eingesetzt (AVERY & BERLIN, 1992).

Da Infrarotstrahlung durch Wasserkörper nahezu vollständig absorbiert wird, werden diese auf IR-Filmmaterial durch eine intensive schwarze Färbung eindeutig abgrenzbar. Ebenso werden feuchtere Flächen aufgrund ihrer höheren IR-Absorption (dunklere Tönung) gegenüber trockeneren Bodenflächen deutlich differenzierbar. So lassen sich beispielsweise zwischen Uferböschung, Fließgewässer und Vegetationsgürtel oder Feuchtflächen und umgebendem Stehgewässer klare Kontaktlinien abgrenzen (AVERY & BERLIN, 1992). Ebenso bilden sich auf Infrarotbildern Schatten in kontraststärkerer Ausprägung ab und lassen sich dort deutlicher von Nicht-Schatten oder Geländeobjekten unterscheiden (TRICART, 1980; ALBERTZ, 1991).

Innerhalb der multitemporalen panchromatischen Luftbildserie bringt die zu Anfang Februar 1971 durchgeführte Befliegung als einzige einen zusätzlich simultan aufgenommenen Satz an Infrarot-Luftbildern hervor. Im Fall der vorliegenden Situation können diese jedoch keinen Informationsgewinn zu einer eindeutigen Gehölzidentifikation liefern.

Fig. 3.2 b zeigt einen identischen Vergleichsausschnitt aus dem östlichen Randbereich des Nigerbinnendeltas mit zeitgleich aufgenommenen panchromatischen Luftbildsätzen des sichtbaren und infraroten Spektralbereichs.

Im IR-Luftbild erscheint das aus mehreren parallelen Fluvialdämmen zusammengesetzte tonige fluviale Schleifensystem in schwächerer Ausprägung. Auf der IR-Emulsion werden nur die höchsten und trockensten Kuppenbereiche des Dammsystems in einem weißlichen Ton, hingegen alle tiefer liegenden und feuchteren Hangbereiche als gräulicher Basisgrund wiedergegeben. Weiterhin lassen sich die Ränder der Anfang Februar überwiegend feldfruchtlosen, vermutlich brach liegenden Agrarparzellen auf dem IR-Bildprodukt weniger deutlich als auf dem panchromatischen austrassieren.

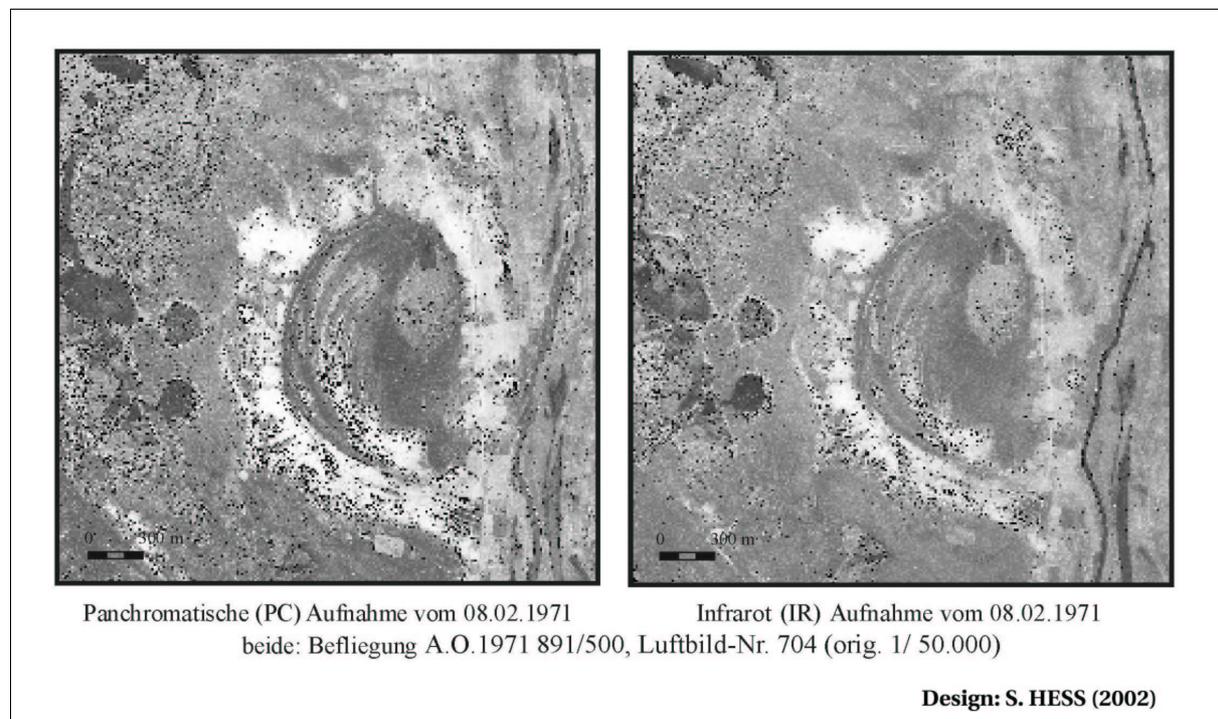


Fig. 3.2 b) Ausschnitt eines zeitgleich aufgenommenen panchromatischen und Infrarot-Luftbildausschnitts aus dem Jahre 1971

Der vorwiegend durch eine unregelmäßig gestreute Assoziation einer schwarzen Körnung erkennbare Gehölzbesatz erscheint im gesamten IR-Luftbild insbesondere im Bereich des grasarmen Dammschleifensystems wesentlich ausgedünnter.

Grüne Biomasse wird auf infrarot-sensibler Panchro-Filmemulsion generell in hellgräulicher Tönung, auf der im visuellen, speziell im grünen Spektralbereich sensiblen Panchro-Filmemulsion hingegen in dunkelgrauer Tönung wiedergegeben. Gehölze mit aktiver Biomasse würden daher auf dem Panchro-Filmmaterial stärker vom gräulich getönten Bodenuntergrund abgehoben werden.

Die Sahelgehölzvegetation weist zur Trockenzeit typischerweise eine überwiegend dürre, wenig durchgrünte bis blattlose Biomasse auf. Die laubarmen Gehölze treten folglich stärker durch den Habitus ihres Stamm- und Astskelettes als durch ihr Blattkleid in Erscheinung oder werden in Anbetracht des kleinen Luftbildmaßstabs (1/50.000, 1/25.000) in ihrer Abbildung möglicherweise lediglich auf ihre Schattenfläche reduziert. Schatten werden im Infrarot-Luftbild etwas stärker als auf dem Panchro-Luftbild eingeschwärzt.

Die in den identischen Luftbildausschnitten beider Filmemulsionstypen (*Fig. 3.2 b*), speziell auf dem Panchro-Filmmaterial zu erkennende höhere Dichte der schwarzen Körnungstextur würde auf einen Besatz an photosyntheseaktiven Gehölzobjekten hindeuten. Ohne geländesimulierende Experimente bleiben jedoch jegliche Identifikationsansätze, zusätzlich zur absoluten visuellen Erkennbarkeit der Gehölze in ihrem trockenzeitlichen Erscheinungszustand, auf beiden Filmemulsionstypen hypothetisch und für diesen Untersuchungsansatz zunächst nebensächlich.

Die radiometrische Kalibrierung von Einflußfaktoren photographischer Systeme – zum Ausgleich von Farb- oder Helligkeitsverschiebungen für eine multitemporale Auswertung – ist im Rahmen der digitalen Bildverarbeitung grundsätzlich möglich. Die durch Belichtungs- und Entwicklungsfehler sowie Alterungsdegradation des photographischen Materials bedingten Bildabweichungen können mittels vorheriger Aufbelichtung von Grau- oder Farbstufenkeilen eines Sensitometers korrigiert werden. Die Farb- oder Graustufenkeile wiederum sind mit der Belichtungsstärke korreliert. Der Anteil der Strahlung der Wellenlänge λ an der Bildschwärzung D läßt sich grundsätzlich wie folgt berechnen (KRAUS, 1990):

$$D_{\lambda} = E_{\lambda} \cdot p_{\lambda} \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}$$

- E = *Objektbeleuchtung*
- p = *spektraler Reflexionsgrad der Objektoberfläche*
- τ = *Durchlässigkeit des Filters*
- S = *Empfindlichkeit der photographischen Schicht*

Bei dem vorliegenden historischen Material wurde keine solche physikalische a priori-Sensitometer-Eichung durchgeführt. Aus diesem Grund sowie aufgrund des nicht eindeutigen Zusammenhangs zwischen Belichtungsstärke und Schwärzung oder Dichte der Bildelemente (D) infolge der die Reflexion beeinflussenden atmosphärischen, beleuchtungs- und sensorbedingten Eigenschaften liefert eine radiometrische Kalibrierung stets unpräzise Ergebnisse.

Aussagekräftig und auswertbar bleibt daher lediglich die Betrachtung relativer Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenartig reflektierenden Flächen.

3.2 Automatische Objekterkennung auf Luftbildern

3.2.1 Motivation und Zielsetzung

Aus Mangel an kartographischen und statistischen Rauminformationen für überwiegende Teile des afrikanischen Kontinents wird, unter Minimierung des u.a. für Geländeaufnahmen aufwendigen Zeit- und Kostenaufwands, eine automatisierte und effiziente Erfassung thematischer Raumdaten über die fernerkundliche Aufnahme angestrebt.

Während klimatische Einflußfaktoren aufgrund intensiver Wechselbeziehungen zu ihren Umgebungsparametern (Atmosphärenbewegung, Temperatur der Meeresoberfläche, Energieflüsse etc.) auf globalem Fernerkundungsdatenniveau auszuwerten sind, erfordert die Erfassung direkt auf die Landschaft einwirkender, anthropogener Einflüsse ein lokales Daten- oder Maßstabsniveau. Bei der Betrachtung anthropogener Landschaftseinflüsse müssen große Energiemengen einbeziehende (Treibhauseffekt) Fernerkundungsphänomene von lokalen, mit traditionellen Praktiken und dem Bevölkerungswachstum verbundenen, Phänomenen unterschieden werden.

Andererseits zeichnen sich durchaus globale Klimaveränderungen bis hin zum lokalräumlichen Niveau hier im komplexen Wasserhaushaltsgeschehen des azonalen Nigerbinnendeltagebiets ab. Seit Beginn der 50er Jahre stehen dort tendenziell abnehmende Niederschläge in Beziehung zu einer Abnahme der Abflußmengen und Hochwasserpegelstände des Nigers. Folgewirkung ist eine horizontale und vertikale Reduzierung der Überschwemmungsflächen (QUENSIERE, 1994). Für die dort vorkommenden Gehölze, welche dauerhafte Überschwemmungen meist nicht überstehen, könnte dies eine potentielle Erweiterung ihres Besiedlungsraums bedeuten. Eine Gehölzinvasion im Deltagebiet wurde von BLANCK & TRICART (1991) für das Strauchgehölz *Mimosa asperata* beobachtet. Diese Beobachtungen gehen für die Region des Nigerbinnendeltas mit der Hypothese von BREMAN & KESSLER (1995) einher, die die Gehölzbedeckung in den meisten fluvialen Sahellandschaften als kaum von Dürreperioden beeinträchtigt sehen, d.h. keine Dezimierung feststellen.

Direkte, anthropogene Landschaftseinflüsse (agrарwirtschaftliche Nutzung, anthropozoogene Migrationsbewegung: Nomadische und transhumante Viehhaltung) spiegeln sich vordergründig in lokalräumlicher Dimension wieder, so daß Beobachtung und frühzeitige Detektion anthropogener Veränderungen zwingend Analysen mit lokaler Detailgenauigkeit erfordern (GOWARD & WILLIAMS, 1997).

Im Bereich der fernerkundlichen Beobachtung von Veränderungen sahelischer Landschaften ist die Aufnahme multitemporaler Inventarstadien eine Basisvoraussetzung. Die Aufnahme von Inventarständen der Vegetationsbedeckung mittels digitaler Bildanalysetechniken basiert bis dato überwiegend auf der Auswertung von Satellitendaten globaler (IFOV von 4000 m bis 1000 m) bis regionaler Raumauflösung (IFOV von 100 m bis 10 m).

Zur Erforschung lokalräumlicher Vegetationsveränderungen, die hier als Langzeitphänomene von in großem Maßstab variierenden Gehölzgefügemustern verstanden werden, reichen jedoch gering raumauflösende Satellitenbilddaten mit geringer zeitlicher Frequenz nicht aus. Zur objektivierten Einschätzung der potentiellen Degradationsgefährdung ist nicht nur die Quantifizierung flächenhafter Veränderungen der Gehölzbedeckungsmuster, sondern auch eine geometrische Analyse zu den Modifikationen der physiognomischen Struktur und Verteilung der Gehölzindividuen auf objektdetailgenauem Luftbildmaterial erforderlich. Gleiches gilt für die Analyse kleinparzelliger Agrargefügemuster.

Zusätzlich stellen Luftbilder mit ihren im Gegensatz zu Satellitenbildern weiter zurückreichenden Aufnahmezeitpunkten eine wertvolle Quelle historischer Landschaftsinformationen dar. Die Bedeutung und Eignung dieser photographischen Aufnahmen speziell als Datenquelle für eine computergestützte Auswertung der Vegetationsdynamik ist bisher noch unzureichend erforscht. Im Vergleich zur klassischen Luftbilddauswertung bieten sie zusammen mit dem Einsatz digitaler Verarbeitungsmethoden ein leistungsfähiges, effizientes Werkzeug zur schnellen und kostengünstigen Auswertung großer Gebietsareale.

Im Hinblick auf eine großräumige Untersuchung der Gehölzdichtedynamik und des

Agrarraumgefüges in der Region des Nigerbinnendeltas konzentriert sich die luftbildbasierte Studie innerhalb eines exemplarischen multitemporalen Luftbilddausschnitts auf die Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Extraktion von Gehölzobjekten und linearen Feldkanten.

3.2.2 Parametererfassung

Die Aufnahme visuell definierter Luftbild-Objektmerkmale in den Datenverarbeitungs-Code erfordert bei einer detaillierten Erfassung von Einzelobjekten die Definition von Merkmalen für jedes Objektindividuum. Zur Ausgrenzung von Flächen homogener Texturausprägung sind durch ähnliche Grautonfrequenzen und Oberflächentexturen gekennzeichnete Objektmustertypen festzulegen. Um die exemplarisch auf kleinen Luftbilddausschnitten erprobten Methoden zur Extraktion von Luftbildobjekten auf große Areale ausdehnen zu können, bedient man sich im allgemeinen entweder des Stichprobenverfahrens, bei welchem Leitobjekte herausgegriffen werden oder aber der Rastermethode, bei der Stichproben in einem geometrisch vorgegebenen Bildraster ausgewählt werden (KRAUS, 1990).

Beim vorliegenden Untersuchungsansatz wird ein repräsentativer Luftbilddausschnitt gewählt, in dem mittels der Leitobjekte einerseits dargestellt durch die Gehölzbedeckung in ihrer flächigen Ausprägung von Einzelstrukturen, andererseits durch das Agrargefüge mit seinen vernetzten Kantenstrukturen erfaßt wird.

Die gängigen Methoden zur spektralen Prozessierung von Satellitendaten lassen sich nicht auf digitalisierte, hochauflösende historische Luftbilddaten übertragen, da die radiometrischen Informationen der Strahlungsdichte (radiance) auf letzteren nicht eindeutig rekonstruiert und quantifiziert werden können (s. Kap. 3.1.3). Folglich ist eine Parametrisierung der zu extrahierenden Objekte nicht realisierbar. Segmentierungs- und Klassifikationsalgorithmen können nicht auf radiometrische Informationen übertragen werden, sondern bleiben auf die morphologischen Bildinformationen, also die geometrische Form der zu extrahierenden Bildobjekte, beschränkt.

Gehölzbedeckung:

Zahlreiche Diagnose- und Trendanalysen zur Veränderung der Gehölzbedeckung stützen sich auf die physiognomische und floristische Beschaffenheit der Gehölze. Unter der Annahme einer stärker gewichteten anthropogenen Einflußkomponente hinsichtlich der Veränderung der Gehölzdecke in sahelischen Gunsträumen, wie z.B. den städtischen Agglomerationen oder dem klimatischen und wirtschaftlichen Gunstraum des Nigerbinnendeltas, werden insbesondere multitemporale Untersuchungen im räumlichen Detail erforderlich. Hierzu liegen bisher mehrere qualitative, auf visueller Luftbilddauswertung basierende, regionalmaßstäbige Beobachtungen vor (DE WISPELAERE, 1980; ANHUF et al., 1990; ANHUF, 1994; KESSLER & BREMAN, 1995; KUßEROW, 1994; KUßEROW & HAENISCH, 1999, etc.). Hingegen existieren quantifizierende Luftbilddergebnisse zur Gehölzdichteveränderung der Sahelräume erst in Ansätzen (PULLAN, 1974; GIJSBERS et al., 1994, BREMAN & KESSLER, 1995). Ebenso fehlen digital automatisierende, in lokalräumlicher Detailgenauigkeit erfassende Methoden. In dieser Richtung ist aktuell eine Studie von DUVERNOY (1999) hervorzuheben, in welcher ein digitaler Methodenansatz zur automatisierten Dichteerfassung von *Buxus*-Gehölzen auf digitalisierten Luftbildern im Causse Méjan (Süd-Frankreich) vorgestellt. Weitere aktuelle Luftbilddstudien zur retrospektiven Vegetations-Langzeiterfassung, wie jene von KADMON & HARARI-KREMER (1999) in den Kushiuro Wetlands von Hokkaido (Japan) und jene von WAHR et al. (2001) in der Gehölzsavanne bei Chikal in der Republik Niger beschränken sich in ihrer Methodik auf die analog-visuelle, subjektiv behaftete Luftbilddinterpretation. Digitale Wege werden wie dort lediglich zur Georeferenzierung und Verschneidung der Luftbildddaten mit thematischen Karten beschränkt.

Sehr wohl haben einige der oben genannten Autoren übereinstimmend die Tendenz einer abnehmenden Diversität und Dichte des Gehölzbestandes, von unterbrochener Regeneration bis

zur Zerstörung der Gehölze seit den 50-er Jahren in verschiedenen Sahelregionen beobachtet. Diese Degradationsphänomene werden für zahlreiche Regionen des sub-saharischen Afrikas beschrieben.

Bei der Untersuchung der floristischen Diversität kann eine einzig auf pflanzensoziologischen Parametern basierte Indikation keine eindeutige Beweislage einer anthropogen induzierten Degradation hervorbringen. Denn im hochkomplexen Zusammenspiel intervenierender natürlich-klimatischer Faktoren kann beispielsweise eine länger andauernde Ariditätsphase ebenso eine südwärtsige Verlagerung der regions-spezifischen Florenzzusammensetzung bewirken, wie dies beispielsweise für *Acacia senegal* neben mehreren anderen betroffenen Gehölzarten von OBEID (1971) im Sudan und POUPON (1977) im Senegal bestätigt wurde.

Eine solche fernerkundliche Detailanalyse würde allerdings die Verwendung einer Langzeitserie von Luftbilddaufnahmen (im Maßstab genauer als 1/25.000) mit komplementären, präzisen Felddaufnahmedaten erfordern. Denn die Erkennung einzelner Gehölzarten ist auf kleinmaßstäbigem Luftbildmaterial nur unzureichend möglich.

Mit ihrer grösseren Resistenz gegenüber der saisonalen Aspektfolge eignen sich Gehölze – gegenüber der Gras- und Krautvegetation – besonders gut als Langzeitindikator für Landschaftsveränderungen.

In semi-ariden Regionen bietet die Gehölzbedeckung abgesehen von der ökonomischen Funktion einen ökologisch wertvollen Parameter zur Indikation natürlicher Konkurrenzbeziehung zwischen Gras und Gehölz sowie zur Indikation des Potentials beschattender, vor direkter Einstrahlung und Austrocknung geschützter Flächen.

Wie der Parameter Gehölzdichte kann jener der Gehölzbedeckung isoliert keine Aussage zur demographischen Strukturierung und Verteilung innerhalb der Gehölzdecke machen. HIERNAUX (1980) versucht mittels Geländeaufnahmen im Nigerbinnendelta für eine kleine, beispielhafte Artenauswahl an Sahelbäumen ansatzweise die Beziehung zwischen der Verteilungsdichte (Baumanzahl/ha) und dem Stammdurchmesser einerseits und ihrem Anteil am Bedeckungsgrad andererseits zu ermitteln.

Über die Gehölzdichte lassen sich unter Berücksichtigung spezifischer Geländekennwerte die Struktur der Gehölzverteilung ermitteln, das Holzvolumen rechnerisch abschätzen, sowie Rückschlüsse auf die Regeneration ziehen. Allerdings ist der gehölzdichte-relevante physiognomische Kennwert des «Stammdurchmessers in Brusthöhe» nicht bei Gehölzen anwendbar, die aufgrund ihrer speziellen Physiognomie (z.B. mehrstämmig ausgeprägte Strauchgehölze) nicht dieser forstlichen Norm entsprechen (BREMAN & KESSLER, 1995).

Die sahelische Gehölzbedeckung setzt sich vorwiegend aus Solitärgehölzen, kleinen Baum- und Strauchgruppen zusammen. Deren Erkennbarkeit auf der ausgewählten, multitemporalen Luftbildserie wird hier zur Festlegung eines Gehölzbedeckungsindikators für die multitemporale Bewertung der Landschaftsdegradation vorausgesetzt.

Da allerdings die historischen Luftbilddaufnahmen begleitende Felddaufnahmedaten weder vorhanden noch nachträglich reproduzierbar sind, aktuelle Felddaufnahme- wie Geländedaten, sowie ergänzende Statistikreferenzdaten fehlen oder als nicht verlässlich angenommen werden müssen, war ein Methodenansatz zu entwickeln, der keine stützende Gelände- und Referenzparameter erfordert. Zur quantitativen Erfassung der Gehöldynamik waren daher Kriterien zu definieren (s. Kap. 3.2.4), welche eine multitemporale Auswertung ohne Absicherung mittels Geländeverification zulassen.

Agrarparzellengefüge:

Die sich im Sahel mit abnehmender Tendenz der Pluviometrie abzeichnenden hydrologischen Folgeeffekte im Gebiet des Niger-Binnendeltas betreffen dort den gesamten Sektor der ethnien-spezifischen Agrar- und Fischereikultur, wie die ursprünglich von den *Bozo* betriebene Fischerei, der Getreideanbau der *Nono* (Reis) und *Bambara* (Hirse) und die Weidenutzung der *Peulh* (GALLAIS, 1971 & 1984).

Das Feldparzellengefüge im Binnendelta ist aufgrund komplexer Ursachen zeitlich sehr veränderlich. Der saisonale Rhythmus bestimmt die Agrarbewirtschaftung: Zur Haupttrockenzeit im April brachliegende Feldflächen, zur Zeit der ersten Regen Mitte Mai-

Juni beginnende Feldarbeit und Einsaat, im Oktober zu Ende der Regenzeit Einholen der Ernte und schließlich zur Zeit der wieder abklingenden Überschwemmung November–Dezember Gartenfruchtbewirtschaftung um die noch wassergefüllten Senken (mare) herum (MARTONNE, 1948). Einen weiteren Faktor zeitlicher Veränderlichkeit bilden politisch-ethnische Konflikte des stammesgebundenen Landnahme-, Besitz- und Verkaufsrechts, administrativer Zuständigkeiten etc. sowie Änderungen der Landnutzungspraktiken, wie z.B. Einführung moderner Techniken und Anbaufrüchte, Aufgabe oder Brachephase der agrarischen Nutzung etc. (QUENSIERE, 1994).

Eine detaillierte Luftbildbeobachtung der Lage und Veränderung des Agrargefüges läßt sich in Interaktion mit der Gehölzbedeckungsdynamik betrachten. Gehölze werden beispielsweise zur Anlage von Naßreisflächen in Überflutungskultur abgehackt (MOHR, 1969), siedeln sich gegebenenfalls auf aufgegebenen Agrarflächen wieder an und werden stellenweise entlang der Agrarränder als dornige Schutzpflanzungen gegen Verbiß angelegt.

Im Nigerbinnendelta befinden sich Agrarflächen mit Naßreisanbau vorwiegend in tonigen Überschwemmungssenken und -becken. In bewirtschafteten Stehgewässern (mares), sowie auf überschwemmungsfreien, sandigen Terrassen- und Glacisbereichen herrscht Hirse- und Sorghumanbau vor (GALLAIS, 1971; BERTRAND, 1974). Diese unterschiedlich bestellten Agrarflächen weisen Parzellenformen mit nicht ausschließlich rechtwinkligen, sondern oftmals den topologischen Reliefgegebenheiten angepaßten, polyedrischen oder abgerundeten Formausprägungen auf. Somit ist die Methode zur automatisierten Extraktion auf die Erfassung linienhafter, gerade bis kurviger Kantenstrukturen zu konzentrieren.

3.2.3 Methodendesign

Die vorliegende Studie stellt eine Methodik zur semi-automatischen Erkennung, Extraktion und Quantifizierung von Landschaftsobjekten auf historischem Luftbildmaterial vor, welcher zur Erkundung langzeitlicher Modifikationen der Sahelgehölzbedeckung sowie zur Beobachtung von Veränderungen des Agrarstrukturgefüges anwendbar ist.

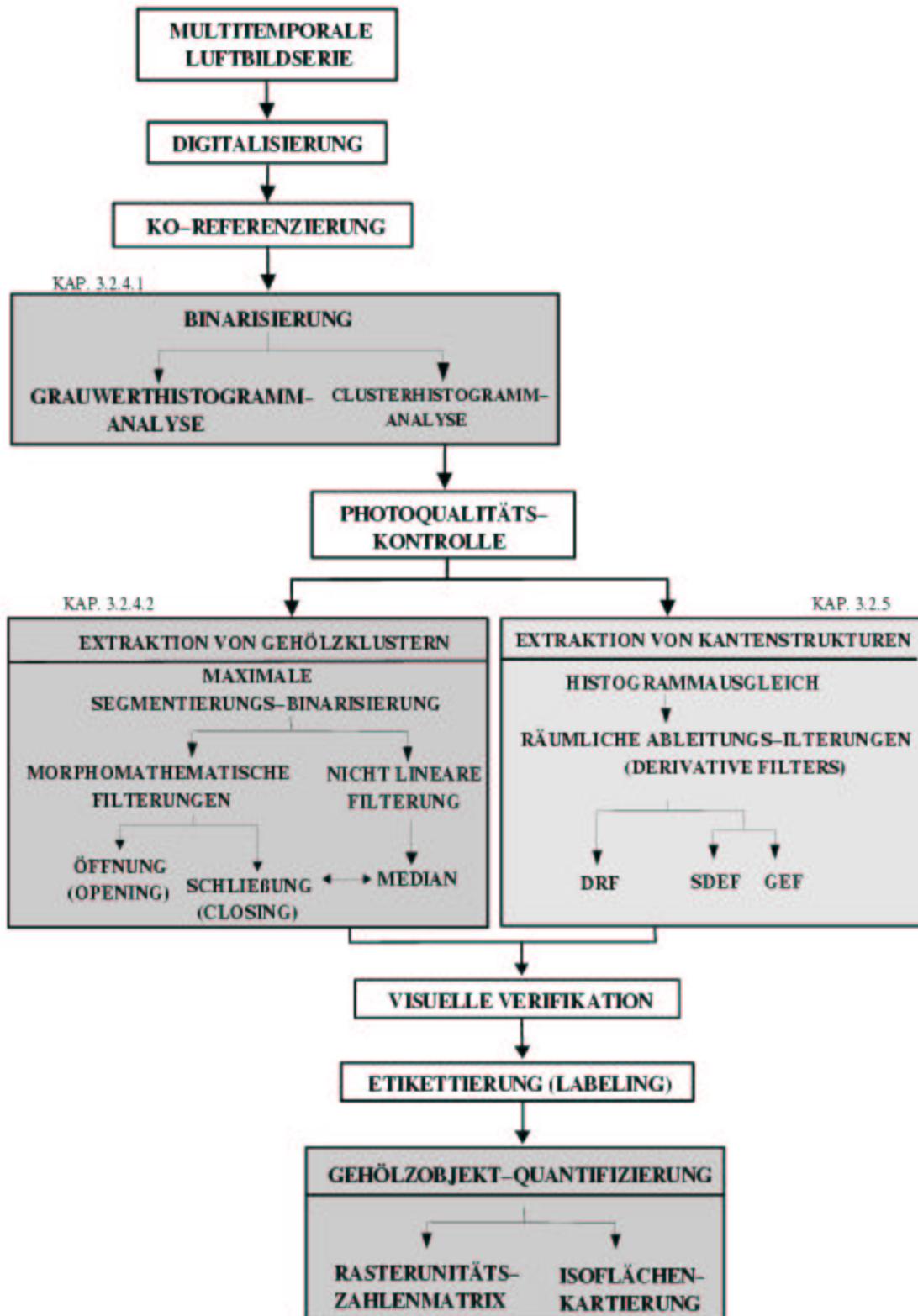
Der Bildverarbeitungsfluß (*Fig. 3.3*) basiert auf einem objektspezifischen Ansatz und ist darauf abgestimmt, trotz minimaler Basis an Expertenwissen mittels visueller Referenzkontrollen eine progressive Annäherung an die Extraktion der gewünschten Objekte zu erzielen.

Die einzelnen Schritte der Bildverarbeitung wurden mit dem für die Öffentlichkeit lizenz- und kostenfrei zugänglichen, nicht proprietären KHOROS 2.2-Softwaresystem (1993–97) der Khoral Research Incorporation, (<http://www.khoral.com> Stand:03.11.2000) durchgeführt. Khoros wurde vom Institut für Elektro- und Computertechnik der Universität New Mexico (Albuquerque, USA) speziell zu Forschungszwecken in der Bildverarbeitung und Algorithmenentwicklung sowie zu Zwecken der didaktischen Anwendung entwickelt. Das auf eine UNIX/LINUX- und XWindows-Standardumgebung basierende Software-System verfügt über eine offene (Einsehbarkeit der Quellcodes) und weiterentwickelbare Umgebung zur graphisch-visuellen Programmierung klientenangepaßter Daten- und Prozeßflüsse (workspaces) in der Systemsprache *Cantata*. Ebenfalls ist die Visualisierung und Verarbeitung von Bilddaten möglich (KONSTANTINIDES & RASURE, 1994).

Die speziellen Gehölzkalkulationen und Interpolationen zur Quantifizierung der Bildobjekte wurden mittels expliziter, in der Programmiersprache C entwickelter Routinen (JC BERGES, Univ. Paris 1) durchgeführt.

Fig. 3.3 gibt einen Überblick über das entwickelte Prozessierungsmodell. Die dort aufgezeigten, einzelnen Verarbeitungsschritte werden in nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

Die zur Extraktionsfilterung der Gehölze relevanten Prozessierungsschritte sind dunkelgrau, jene der Agrarkanten hellgrau eingefärbt.



Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.3 Ablaufschema zur automatisierten Extraktion von Luftbildobjekten

3.2.3.1 Kompilation einer multitemporalen Testdatenserie

Eine retrospektive Recherche nach historischen Bildarchivdaten brachte – neben jenen durch die NASA im Juli 1972 aufgenommenen ersten zivilen LANDSAT ERTS-1 Satellitendaten – eine Auswahl hochauflösender Luftbilder mit Entstehungsdatum ab den 50er Jahren hervor. Für die anvisierte Langzeitstudie zur Vegetationsdynamik bilden diese die am weitesten zurückreichende Quelle an Fernerkundungsinformationen. Sie weisen darüberhinaus eine hohe Raumauflösung, große Befliegungsflächenüberdeckung (s. auch *Fig. 3.1 a & b*) und ein langes Zeiterfassungsintervall auf.

Das zur Kompilation einer multitemporalen Zeitserie benötigte Luftbildmaterial stammt für die Befliegungstermine 1952 (AOF 019/500, 552 Aufnahmen), 1971 (AO 891/500, 989 Aufnahmen) und 1981 (MAL 57/500) vom IGN, für den aktuellsten Zeitschnitt 1984 (MALI 93/250) von der Direction National de Cartographie de la République du Mali (DNCM).

Innerhalb dieser multitemporalen Luftbildsequenz liegen panchromatische Infrarotaufnahmen lediglich für die Luftbildmission von 1971 vor. Aus Gründen der Erfordernis einer für Vergleichsanalysen möglichst homogenen, multitemporalen Luftbilddatensequenz wurden sie jedoch nicht berücksichtigt.

Aus dem verfügbaren Material konnte eine Serie panchromatischer (pc) Luftbilder zusammengestellt werden (*Tab. 3.1 & Fig. 3.4*). Innerhalb der alle vier Zeitschnitte der insgesamt drei Zeitdekaden umfassenden Aufnahmeperiode der 50er bis 80er Jahre wurde ein multitemporal überdeckender Gebietsausschnitt definiert.

Aufgrund des kleinen Luftbildmaßstabs, der geringen Differenzierung des Makroreliefs im Deltagebiet (Kap. 1.2.1) und hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes der Gehölz- und Agrarstrukturerrfassung war eine Monoauswertung der überwiegend als Stereopaare vorliegenden Luftbilder ausreichend. Eine experimentierte Stereoauswertung konnte für die anvisierten Untersuchungen aufgrund der Kleinmaßstäbigkeit der Luftbildprodukte keine zusätzlich gewinnbringenden Informationen erbringen.

Das durch die multitemporale Luftbildserie abgedeckte Testgebiet mit einer Ausschnittsgröße von ca. 3 x 3 km² befindet sich am östlichen Rand des rezenten Nigerbinnendeltas («delta vif»), südlich des Lac Debo im periodischen Überschwemmungsbereich des linksseitigen Nigerufers ca. 12 km nördlich von Mopti (14°39' N/ 04°12' W) (*Fig. 3.4*).

Befliegungsnr. (Auftraggeber)	Aufnahme- datum/	Aufnahme- uhrzeit	Luftbild- typ/	Luft- bildnr.	Aufnahmemä- ßstab (tatsächl.)	Höhe [m] Meer	Boden	Brenn- weite [mm]	Papier- abzugs- format [cm]	Gelände- größe [km]	Pixel- auflö- sung [m] (600dpi)
A.O.F. 019 (IGN)	01.02.52	11:20 – 16:00	PC (st)/ IGN	412	1/ 50.000 (1/ 52.800)	6250	6600	125.00	19 x 19	9.5 x 9.5	2.1 (2.24)
A.O. 1971 891/ 500 P (B.D.P.A., OICNA)	08.02.71	13:00 – 15:00	PC & IR (st)/ IGN	704	1/ 50.000 (1/ 53.555)	4425	4760	88.88	23 x 23	12.0 x 12.0	2.1 (2.26)
1981 MAL 57/ 500	06.05.81	11:16 – 12:01	PC (st)/ IGN	140	1/ 50.000 (1/ 51.544)	7650	7896	153.19	23 x 23	12.0 x 12.0	2.1 (2.18)
1984 MALI 93/ 250	29.03.84	09:51 – 11:23	PC (st)/ DNC (Mali)	001	1/ 25.000 (1/ 26.847)	3825	4085	152.16	23 x 23	6.0 x 6.0	1.1 (1.14)

Tab. 3.1 Technische Parameter der panchromatischen Luftbild-Sequenz

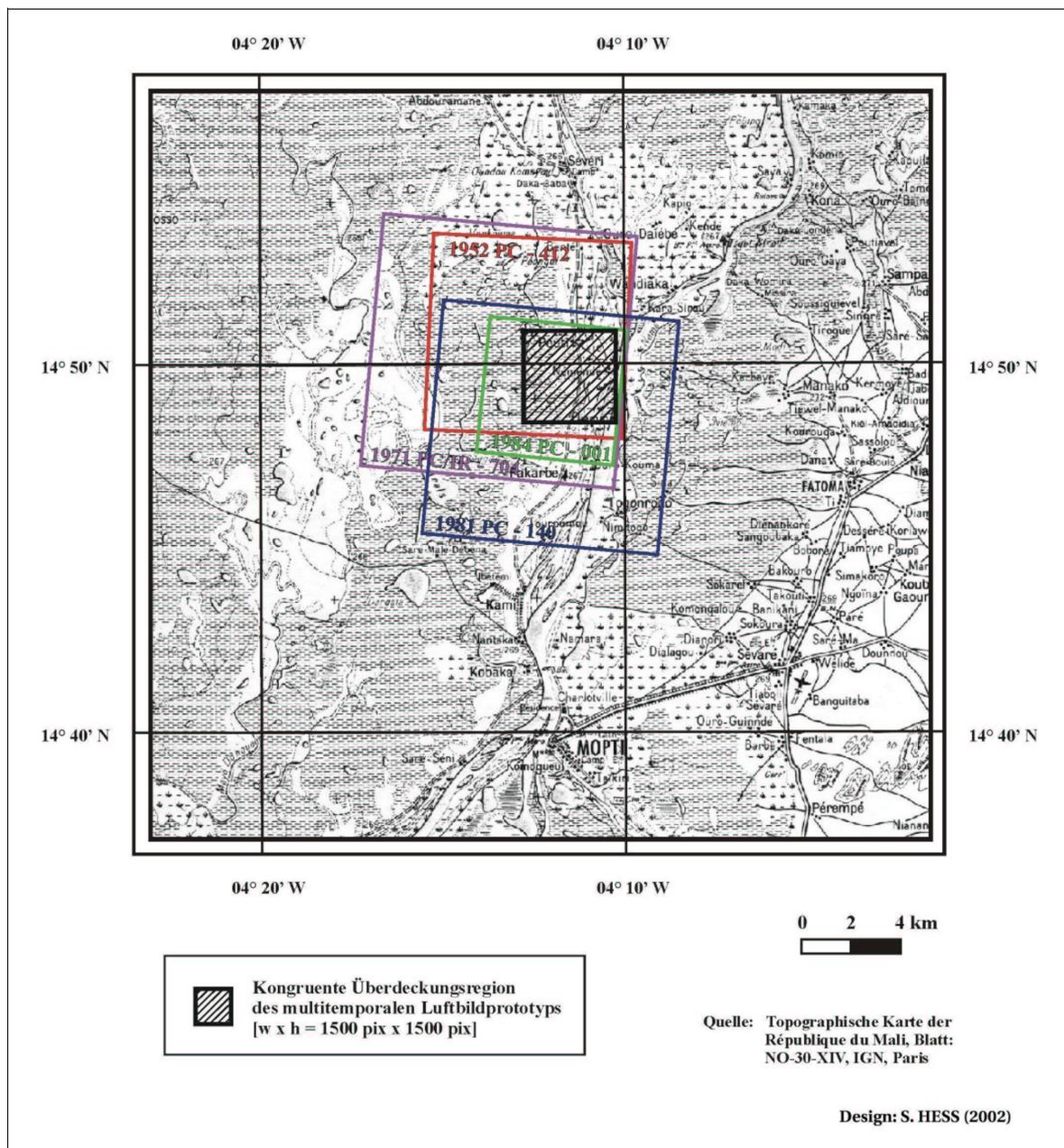


Fig. 3.4 Räumliche Überdeckung der multitemporalen Luftbildsequenz

Im einem vom IGN (1980) akquirierten und für die FAC zusammengestellten Dokument, «Inventaire des données topographiques et cartographiques du bassin du fleuve Niger en République...» sind alle ab 1952 bis zum Stand von 1979 durchgeführten Befliegungen der Anrainerstaaten (ausgenommen Algerien) des Nigerabflußregimes inventarisiert. Dort sind auch die wenigen, zu punktuellen Erkundungen in der Region des Nigerbinnendeltas durchgeführten Luftbildbefliegungen großer Aufnahmemaßstäbe aufgeführt. Aufgrund nur kleiner Arealabdeckung und lokaler Verstreuung läßt sich dieses Material zur multitemporalen Luftbilddauswertung nicht nutzen.

Die aktuellste kleinmaßstäbige Luftbildserie stammt aus dem Jahre 1984. Lediglich für ein sehr kleinräumig um Mopti gelegenes Areal existiert neueres Luftbildmaterial vom 01.03.1990 (1990 MAL 123/100, Vermerk der DNC in Bamako im April 1999: fehlende Negative).

Die 19 x 19 cm² Luftbildformate wurden mit einer Brennweite von 125 mm (Serie von 1952) aufgenommen, während die Formate 24 x 24 cm² mit Brennweiten von ca. 88 mm (Serie von 1971) oder ca. 152 mm (Serien von 1981 und 1984) aufgenommen wurden.

Der mittlere Luftbildmaßstab (mb) wird durch das Verhältnis von Flughöhe (h) zu gewählter

Brennweite (c) definiert (HILDEBRANDT, 1996):

$$mb = h / c$$

mb	=	Maßstab
h	=	Höhe
c	=	Brennweite

Bei konstantem Maßstab wird also mit steigender Aufnahmehöhe eine größere Brennweite erforderlich. In Abhängigkeit von der Flughöhe über NN liegt dieser in den Luftbildprodukten von 1952, 1971 und 1981 bei einem mittleren Wert von 1/50.000, bei der 1984er Serie bei 1/25.000. Der hingegen durch die Flughöhe über dem Boden ermittelbare tatsächliche Aufnahmemaßstab (s. **Tab 3.1**) weicht in allen multitemporalen Bildprodukten mit einer prozentualen Maßstabsverkleinerung von ca. 3–7 % vom ideal-theoretischen Aufnahmemaßstab ab.

Der reliefbedingte horizontale Versatz von Objekten steht im Verhältnis von maximal im Luftbild vorhandenem Höhenunterschied zum Luftbildmaßstab. Ein Bild ist als versatzfrei zu beurteilen, wenn der maximale Reliefhöhenunterschied unter einem Verhältniswert $mb/500$, hier dem Wert von 100 (= 50.000/500) liegt (SCHNEIDER, 1974). In den vorliegenden Luftbildausschnitten der Maßstäbe 1/50.000, bzw. 1/25.000 eines wenig höhenvariierenden, ebenen Reliefs ist der Versatz bei einem Höhenunterschied von maximal ca. 2 m innerhalb eines Luftbildausschnitts zu vernachlässigen.

Die Aufnahmezeitpunkte korrespondieren zwischen den Luftbilddaufnahmen vom 01.02.1952 und 08.02.1971 am besten. Die saisonale Überdeckung zur Trockenzeit erlaubt in diesem Serienpaar (**Fig. 3.7 a**) eine besonders gute Vergleichbarkeit der phänologischen Bedingungen. Die Serien zu Beginn der Regenzeit Anfang Mai (05.05.1981) und zum Ausklang der Trockenzeit Ende März (29.03.1984) bieten für die Vergleichsanalysen weniger optimale Aufnahmezeitpunkte.

Für eine auf morphologischen Objektmerkmalen basierte Luftbildanalyse sind zur Untersuchung der Gehölydynamik in der Sahelregion besonders Aufnahmefmomente während der Trockenzeit (November bis April) als optimal zu bewerten. Zu dieser Zeit werden maximale phänologische und spektrale Bildkontraste erreicht, welche eine optimale Differenzierbarkeit zwischen Gehölydecke und Bodenuntergrund ermöglichen (FRANKLIN, & HIERNAUX, 1991). Die zu dieser Zeit im Photosyntheseminimum eingestellte Vegetation zeigt einen vegetationsfreien, nackten oder mit vertrockneten, ausgebleichten Gräsern bestandenen Bodengrund. Darüber treten wenig belaubte bis laublose Gehölyskelette samt ihres evtl. vorhandenen Schattenfeldes als dunkle Objekte hervor. Im reliefarmen Gelände des Sahels kann der zu dieser Zeit geringer Sonnenstand aufgrund erhöhter Schattenbildung zur verbesserten Identifizierbarkeit genutzt werden (FRANKLIN & STRAHLER, 1988; JUPP et al., 1986; PECH et al. 1986a).

In der Sahelregion wird die für eine multitemporale Vergleichsanalyse beste spektrale Unterscheidung der Vegetationsobjekte gerade zur Regenzeit erzielt. Zu dieser Zeit weist die Belaubung eine intensive Durchgrünung infolge der hohen Photosyntheseaktivität auf.

Feldparzellen werden durch die Kontraste zu ihrer Umgebung hervorgehoben. Der überwiegend in die Trockenzeit fallende Aufnahmezeitpunkt aller Zeitschnitte der Luftbildserie fällt in die Ruhephase der Feldbestellung. Die Feldkonturen sind zur Trockenzeit auf den Luftbildern weniger stark akzentuiert und werden als solche entweder durch die umgrenzenden Wege, die Feldränder begleitende Gehölystrukturen oder kleine Dammbauten um die Reisfelder visuell erfäßbar.

3.2.3.2 Visuelle Interpretation des multitemporalen Luftbildprototyps

An der Stelle retrospektiver, nicht reproduzierbarer Geländekenntnisse konnten zur visuellen Interpretation des ausgewählten Luftbildprototyps aus dem Bereich des linksseitigen Niger-Überflutungsgebietes geomorphologische Geländebeobachtungen von GALLAIS aus der Zeit von 1956 bis 1959 herangezogen werden. Gestützt auf diese sowie auf zwischen Dezember 1959 und März 1960 komplementär durchgeführte granulometrische Analysen erstellte GALLAIS – auf der Kartengrundbasis der vom IGN zur Verfügung gestellten planimetrischen Entwürfe, (1/100.000) die zur Herstellung der topographischen Finalkarte im Maßstab 1/200.000 dienen – für das Deltagebiet ein geomorphologisches Kartenwerk «Cartes morphologiques du Delta Interieur du Niger, feuilles: III, A–E, 1/200.000, Paris, 1967» (GALLAIS, 1967).

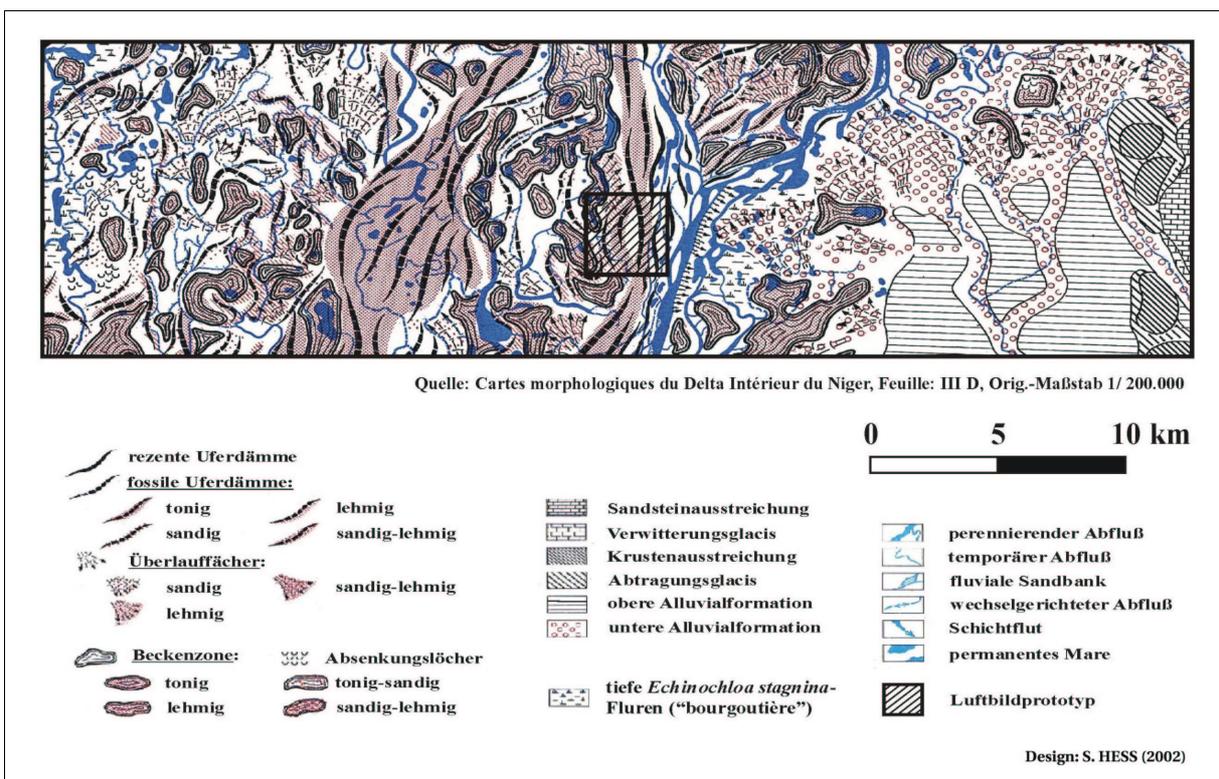


Fig. 3.5 Einordnung des Luftbildprototyps in die geomorphologische Situation des östlichen Nigerbinnendeltas nach GALLAIS (1967)

Der gewählte Ausschnitt des Kartenblatts III–D in **Fig. 3.5** repräsentiert die Abfolge einer von Ost nach West zunehmenden hydrographisch überprägten Landschaft (GALLAIS, 1967). Es gliedern sich dementsprechend folgende Geotopeinheiten heraus:

1. Bandiagara–Sandsteinfelsen mit kiesigen Krusten- und Glacisflächen,
2. überschwemmungsfreie Sandablagerungen der oberen Alluvialformation,
3. überschwemmte Sandablagerungen der mittleren Alluvialformation bis hin zum Nigerbett, auf der linksnigerischen Seite gefolgt von:
4. Uferwällen und mehr oder weniger stark überschwemmten Tonschlammebenen der unteren Alluvialformation mit Becken, Depressionen, Überlauffächern und fossilen Fluvialwällen.

Der sich in diese Toposequenz der **Fig. 3.5** einordnende Luftbildprototyp zeigt innerhalb seiner Ausschnittgrenzen folgendes, von Ost nach West verlaufendes geomorphologisches Landschaftsprofil einer linksnigerischen Fluviallandschaft:

1. Entlang des nicht mehr abgebildeten perennierenden Nigerhauptarms (östliche Kontinuität des Bildausschnitts) hebt sich ein System alluvialer, teilweise durchbrochener Uferdämme und Terrassen hervor.
2. Westwärts schließt sich eine Zone älterer Uferdämme von sandig-lehmiger Fazies an. Der gewählte Bildausschnitt erfaßt ein spezielles Bündelgeflecht mehrerer, nebeneinander geführter, durch schmale Sandwälle getrennter sich zu einer großen Schleife zusammenschließender Wasserrinnen. Im Zentrum dieser Schleife münden die Rinnen in eine pfannenartige Überschwemmungssenke.
3. Im Westen wird die Überschwemmungsebene durch kleine marigots durchquert. In ihr sind mehr oder weniger geschlossene Überschwemmungsbecken unterschiedlicher Tiefe angesiedelt, in welche periodisch oder permanent wasserführende Mare eingesenkt sind.

Ein visuelles Interpretationsergebnis einer nördlich an den Luftbildausschnitt angrenzenden Region, dem Goundam-Gebiet, bestätigt nach TRICART et al. (1970) die im Bereich des ausgewählten Prototypausschnitts von GALLAIS (1967) zuvor beschriebenen Geländeformen .

Mit Hilfe der von TRICART et al. (1970) im nördlich angrenzenden Gebiet interpretierten Bildinhalte lassen sich im multitemporalen Prototypausschnitt (**Fig. 3.7 a**, Kap. 3.2.3.3) für die Zeitschnitte von 1952 und 1971 mit geringen, für jene von 1981 und 1984 mit größeren Abweichungen folgende hydrographische Landschaftsformen aktueller Fluvialdynamik in ihrer jeweiligen spezifischen Grautonfärbung identifizieren:

- a) Überschwemmungsfreie Bereiche der *Uferwälle, Terrassen, Wurthügel (toguérés, tumuli)*:

Die höchsten, bedeckungsfreien Erhebungen dehnen sich hangabwärts aus und erscheinen in einem grellen Weiß. Aus ihrer Sedimentationsrichtung läßt sich die Fließrichtung rekonstruieren. Diese hellen Bereiche korrespondieren mit Flächen von sandiger und trockener Beschaffenheit, welche vorwiegend mit Bäumen und Sträuchern der Gattung *Acacia* besetzte Uferwälle kennzeichnen. Die Gehölze heben sich auf den panchromatischen Luftbildern als gestreute, schwarze Punkte von ihrem Untergrund ab. Rötliche Paläoböden wie Gräser werden in grauer Tönung abgebildet. Weitere unter durchschnittlichen Hochwasserständen überschwemmungsfreie Formen wie *Terrassen* und wurtenartige, künstlich aufgeschüttete Grabhügel, die *tumuli*, oder Hügeldörfer, die *toguérés*, die östlich und westlich der Altarmschleife von Gehölzen besiedelt sind. Die *toguérés* erzielen im Gesamtdelta lediglich eine punktuell verstreute, kleinräumige Verbreitung.

- b) Überschwemmte Bereiche der *eingeschnittenen Uferwallhänge*:

Entlang der bildzentralen Bündelschleife bildet sich in der Kontaktzone zwischen nicht mehr überschwemmten Hangbereichen und dem Fließbereich der Flutkanäle eine deutlich eingebuchtete Grenzlinie aus.

Zur Regenzeit, noch vor Eintreffen der Überschwemmungen, schneiden sich diese Einkerbungen in die oberen Hangbereiche. Ende März zeigen im Bereich dieser Wallhänge angelegte Felder, die teilweise schon mit den ersten Flutwässern der Kanäle bewässert wurden, in dunklem Grauton bereits einsetzendes Getreide- und Hirsewachstum an.

Überschwemmungsbecken in Senken:

Bei Abwesenheit der aquatischen Vegetation («*bourgou*», flottierende Algen etc.) erscheinen zwischen nicht überschwemmbar Sedimentationsflächen Beckenbereiche in einem sehr dunklen Grauton. Ein Netz aus marigots verbindet diese Beckenzonen mit den Seitenarmen des Nigers.

Die Anfang Februar bei annähernd maximalem Wassertiefstand aufgenommenen

Luftbildzeitschnitte von 1952 und 1971 geben vom Wasserrückzug betroffene, rötliche Paläoböden und vergilbte Grasflächen in von der Feuchtigkeit gedunkelten Grautönen wieder.

Der mit der Flughöhe korrelierende Luftbildkontrast zeigt höchste Qualität für die in geringster Höhe aufgenommene Serie von 1971. Der Luftbildausschnitt von Anfang Mai 1981 zeigt innerhalb der multitemporalen Serie aufgrund starker atmosphärischer Trübung infolge großer Flughöhe (ca. 7900 m NN, Tab. 3.1) die geringste Kontrastqualität.

Flottierende Algen sind in allen Bildausschnitten aufgrund schwärzlicher Tönung nur vereinzelt und in ihren Besiedlungsbereichen der mare relativ schlecht lokalisierbar.

Das Luftbild von Ende März 1984 läßt, aufgrund seiner fehlerhaften, kontrastübersteuerten Aufnahme- oder/und Abzugsqualität, nur gröbste Formumrisse erkennen (*Fig. 3.7 a*, Kapitel 3.2.3.3).

3.2.3.3 Digitale Vorverarbeitung der Luftbilddaten

Einscannen

Zur digitalen Verarbeitung der analogen Luftbildprodukte (Papierabzüge) ist eine Analog-Digital-Wandlung oder Digitalisierung mittels Abtastung durch einen Scanner notwendig. Hinsichtlich der Festlegung der maximalen räumlichen Auflösung des digitalen Ausgabe-Bildelements oder der Pixelkantenlänge ist die Ermittlung der maximalen Detailerkennbarkeit im analogen Eingabe-Luftbild von Interesse.

Die Objektdetailerkennbarkeit steht in direktem Zusammenhang mit dem aus der Flughöhe oder über Bilddistanzmessungen ermittelbaren Maßstab eines Luftbildes. Zudem wird diese stark durch kontrastbeeinflussende Faktoren (Uhrzeit, Sonnenstand, Blendenzahl etc.) sowie die kamera- und aufnahmebedingte Abbildungsunschärfe (Tiefen-, Beugungs- und Bewegungsunschärfe, Linsenfehler, Auflösungsvermögen) beeinflusst. Abbildungsunschärfe und geometrische Projektionsfehler werden durch Verzerrungen, Verzeichnungen und insbesondere Höhenversätze im Bildrandbereich deutlich. In diesen Bildbereichen kann die, wegen des räumlichen Auflösungsvermögens in Linienpaaren pro mm (lp/mm) quantifizierbare Detailerkennbarkeit leicht abweichen (KRAUS, 1990).

Mittels des von Aufnahmemmaßstab, Blendenzahl, Form und Kontrast abhängigen Auflösungsvermögens kann die maximale Erkennbarkeit eines Objektdetails (D_{\max}) im jeweiligen analogen Luftbild nach folgender Formel bestimmt werden (KRAUS, 1990):

$$D_{\max} = l \times h / c$$

l = *Linienbreite*

h = *Flughöhe (Boden)*

c = *Kammerkonstante*

Im Vergleich zum maximalen Auflösungsvermögen des menschlichen Auges von ca. 6 lp/mm beträgt das einer modernen Meßkammer ca. 150 lp/mm. Nicht zuletzt wird jedoch das Auflösungsvermögen durch die Körnigkeit der Filmemulsion, die Qualität der Filmentwicklung sowie die Produktion des Negativabzugs herabgesetzt. Letztere wird für historisches Luftbildfilmmaterial mit durchschnittlich ca. 20–50 lp/mm angegeben (ALBERTZ, 1991; KRAUS, 1988). Für sämtliche innerhalb der multitemporalen Luftbildserie verwendeten Aufnahmen bedeutet dies maximale Erkennbarkeit eines Objektdetails von ca. 0,5 m (50 lp/mm) bei hohem Kontrast und von 1,25 m (20 lp/mm) bei gemindertem Kontrast.

Die Bestimmung der optimalen Abtastauflösung wird bei Satellitenscansystemen mit der Nyquistfrequenz (Abtasttheorem nach SHANNON) erreicht (KAPPAS, 1993). Die

Errechnung des Grenzwertes der Nyquistfrequenz ist bei photographischen Systemen aufgrund der nicht vergleichbaren, stark differierenden Aufnahmesysteme und –parameter nicht möglich. Daher ist bei der Digitalisierung analogen Photomaterials zu beachten, daß zu hoch gewählte Scanauflösungen (oversampling) intrinsisch durch störendes Bildrauschen und enorme Bilddateigrößen beeinträchtigt werden. Demgegenüber birgt eine zu gering gewählte Auflösung die Gefahr von Bildinformationsverlusten (aliasing).

Hinsichtlich der Entwicklung eines objektivierten und möglichst durchgängig automatisierten Methodenkonzepts zur quantitativen und reproduzierbaren Bestimmung der optimalen Abtastauflösung wurde das nachfolgend beschriebene Experiment statuiert: Als Maß für den Informationsgehalt oder den Kontrastreichtum eines Bildes wird die Varianz in Beziehung zu unterschiedlichen Scanauflösungswerten gesetzt. Die Ergebnisse der für drei verschiedene Luftbildextrakte mit je einer Flächengröße von 1 inch² exerzierten Berechnungen sind aus *Fig. 3.6* ersichtlich.

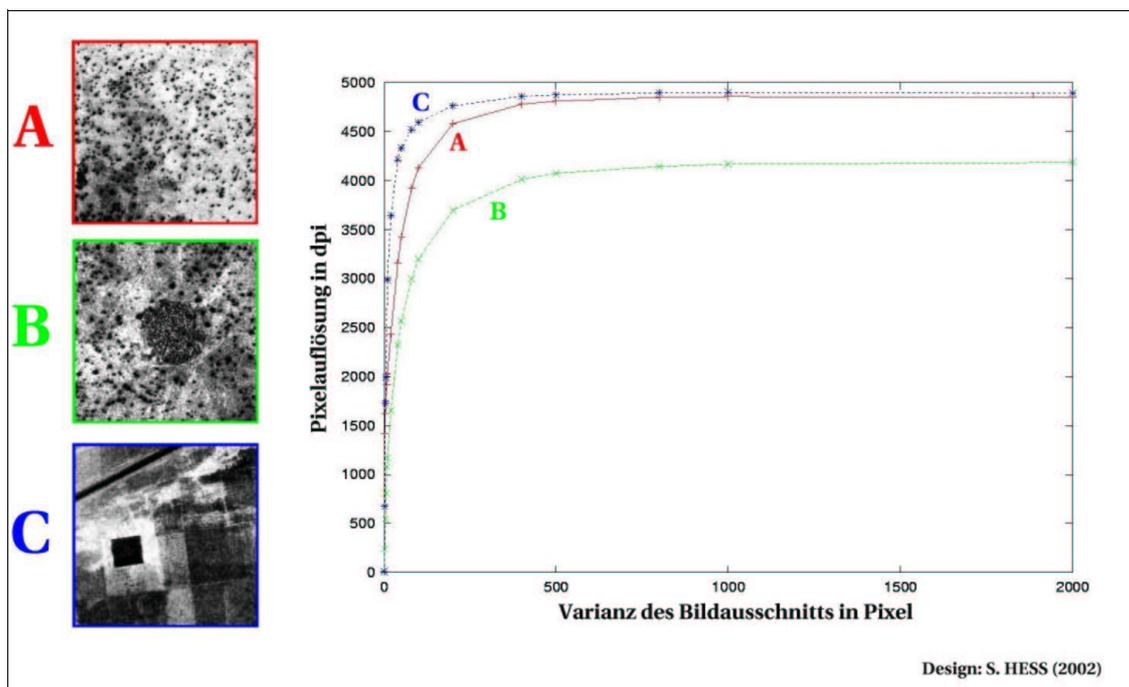


Fig. 3.6 Varianzanalyse verschiedener Scanauflösungen im Luftbild

Die für die jeweiligen Luftbildextrakte berechneten Kurven weisen allesamt den kohärenten Verlauf einer logarithmischen Verteilung auf. Bis zu einer Scanauflösung von ca. 200 dpi (dots per inch, 1 inch = 2,54 cm) nehmen die Varianzwerte in allen drei Kurven in nur gering von einander abweichendem steilem Verlauf zu. Im Bereich zwischen ca. 200 – 800 dpi nähern sich die drei Kurven sehr gemäßigt ihrem Maximum an. Ein Einscannen im Wertebereich unter 200 dpi ist folglich mit starkem Informationsverlust verbunden. Im Wertebereich oberhalb von 800 dpi läßt sich dagegen nur noch unwesentlich zusätzlicher Informationsgewinn erzielen. Daher impliziert ein Wert von 800 dpi hinsichtlich der Relation von Datenvolumen zu Informationsgehalt das Optimum.

Letztendlich beeinflusst jedoch das Anwendungsziel in entscheidendem Maße die Wahl der optimalen Scanauflösung. Für das vorliegende Luftbildmaterial wurde die Scanauflösung unterhalb des Varianzoptimums auf einen Wert von 600 dpi festgelegt. Dieser reduzierte Wert begründet sich durch den mit zunehmender Scanauflösung im Quadrat ansteigenden Speicherbedarf der Bilddateien, die maximale Leistungskapazität der Prozessorsysteme und Ausgabesysteme sowie die Auswahl und Qualität der erforderlichen Prozeduren und Algorithmen zur digitalen Verarbeitung großer Luftbilddatenmengen.

Im Bildmaßstab von 1/50.000 (1984: 1/25.000) entspricht eine Scanauflösung von 600 dpi – äquivalent zu 236,2 Pixeln pro cm – einer Bodenauflösung von ca. 2,1 m pro Pixel (1984: ca. 1,1 m). Die bereits in Kap 3.2.3.1 erwähnte Abweichung zwischen dem tatsächlichen und

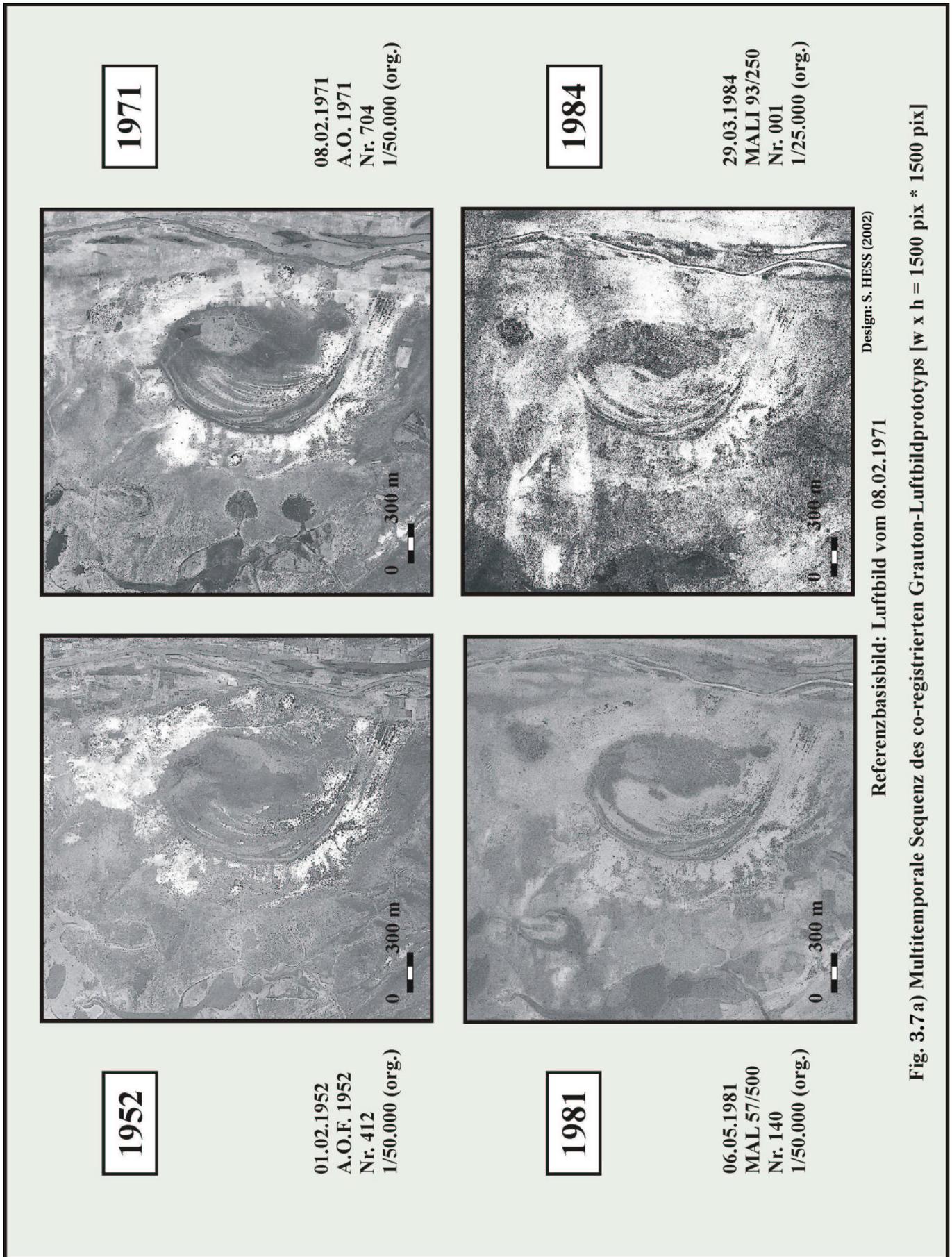


Fig. 3.7 a) Multitemporale Sequenz des co-registrierten Grauton-Luftbildprototyps [w x h = 1500 pix * 1500 pix]

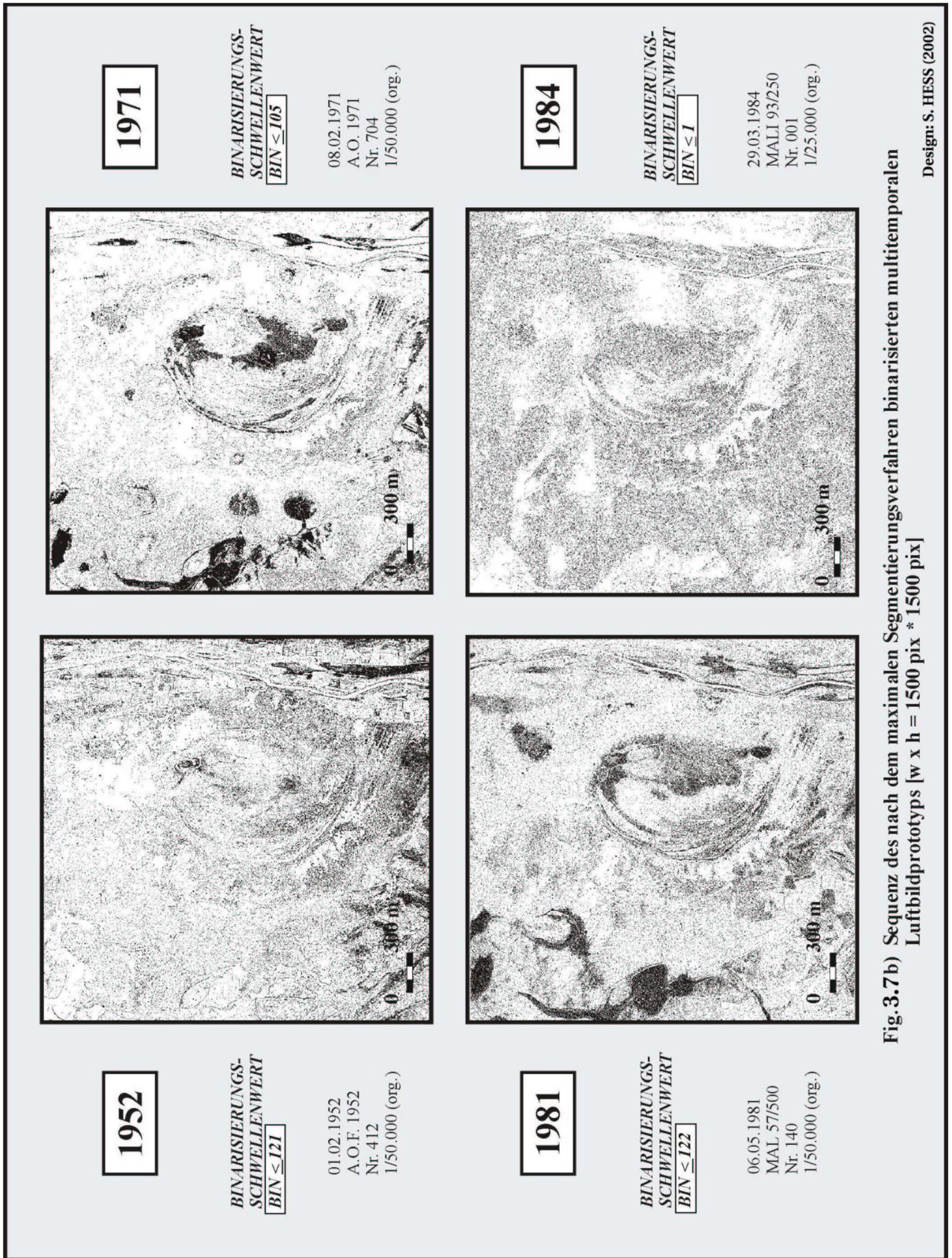


Fig. 3.7b) Sequenz des nach dem maximalen Segmentierungsverfahren binarisierten multitemporalen Luftbildprototyps [w x h = 1500 pix * 1500 pix]

Design: S. HESS (2002)

dem mittleren Maßstab bewegt sich für die räumliche Auflösung am Erdboden im Bereich von 14 – 18 cm pro Pixel (für die Aufnahmen von 1984 bei 4 cm pro Pixel) und können somit in den vorliegenden Untersuchungen vernachlässigt werden.

Die mit 8 bit codierten Bilddaten (256 Grautonwerte) ergaben im Papierabzugsformat von 19 cm x 19 cm eine Dateigröße von ca. 20 Mb, bei 24 cm x 24 cm (1984) ca. 30 Mb.

Ko-Registrierung

Zur Vermeidung des Effekts unterschiedlicher Papierabzugsformate und Luftbildorientierungen sowie zur exakten Vergleichsanalyse der räumlichen Verteilung und Konnektivität von Bildobjektstrukturen- und mustern, wurde ein Geländeausschnitt definiert, welcher von allen vier verschiedenen Luftbildzeitschnitten kongruent überdeckt wird.

Die Ko-Registrierung der multitemporalen Bildprodukte wurde in Khoros 2.2 mit einer einfachen 2D-affinen geometrischen Transformation, die eine Translation, Skalierung, Rotation und Scherung auf der Basis eines Polynoms ersten Grades realisiert. Aufgrund von Reliefarmut und Kleinmaßstäbigkeit der Luftbildprodukte ist diese Methode ausreichend, die multitemporalen Aufnahmen auf die Basisreferenz des kontraststärksten Luftbildes von 1971 zu referenzieren. Die Genauigkeit der Referenzierungsergebnisse (Angabe der RMS-Fehlerwerte) ist in diesem Zusammenhang nachrangig.

Die Schwierigkeit ergab sich bei der Suche nach Paßpunkten, welche in allen vier Zeitschnittbildern – überwiegend entlang des veränderlichen Gewässer- und Wegenetzes, selten in präziserer Lokalisierung an unveränderten Gehölz- oder Siedlungsstandorten – aufgefunden werden konnten.

Anschließend wurde ein multitemporaler Überdeckungs-Prototyp, d.h. ein für jeden Zeitschnitt gebietskongruenter Bildextrakt einer Zeilen- und Spaltenausdehnung von je 1500 Pixeln – entsprechend einer Feldgröße von ca. 3 km x 3 km – extrahiert (**Fig. 3.7 a**).

3.2.4 Kriterienoptimierung zur Gehölzerkennung

Während die visuelle Interpretation die Beziehungen zwischen Bildmerkmal und gesuchter Objektklasse analysiert, ist für die anschließende Bildverarbeitung ein Merkmalsatz zu finden, der eine möglichst fehlerfreie Zuordnung der einzelnen Objekte und Objektklassen erzielt.

Zur visuellen Identifizierung spontan verteilter Vegetationsformationen nennt TRICART (1970) die Kriterien Objekthöhe, Objekttextur, räumliche Organisation (Assoziation) sowie Grau- oder Farbtonalität, wobei die Albedovariation in Abhängigkeit vom saisonalen Zustand der Biomasse zu bewerten ist.

Im Nigerbinnendelta beschränkt sich das Vorkommen von Gehölzen ausschließlich auf Flächen, die über das Hochwasserniveau aufragen, auf Uferwälle (levées) und flache wurtenartige Hügel (*toгуérés, tumuli*) sowie die temporär geringer überschwemmten Bereiche der Deltarandzone (BARTH, 1986).

Nach vergrößerter Bildschirmauflösung (**Fig. 3.8**) sind die Gehölze in den überschwemmungsfreien Bereichen (überwiegend *Acacia sp.*) auf den digitalisierten Luftbildern anhand ihrer schwarz gepunkteten Körnungstextur besonders gut zu erkennen. In allen Luftbildzeitschnitten weisen diese Objekte nicht kohärente Reflexions- oder Schwärzungsbeträge ihrer 8 bit-Grautonwerte auf, die sich im Wertebereich zwischen den Graustufen 0 bis maximal 100 bewegen.

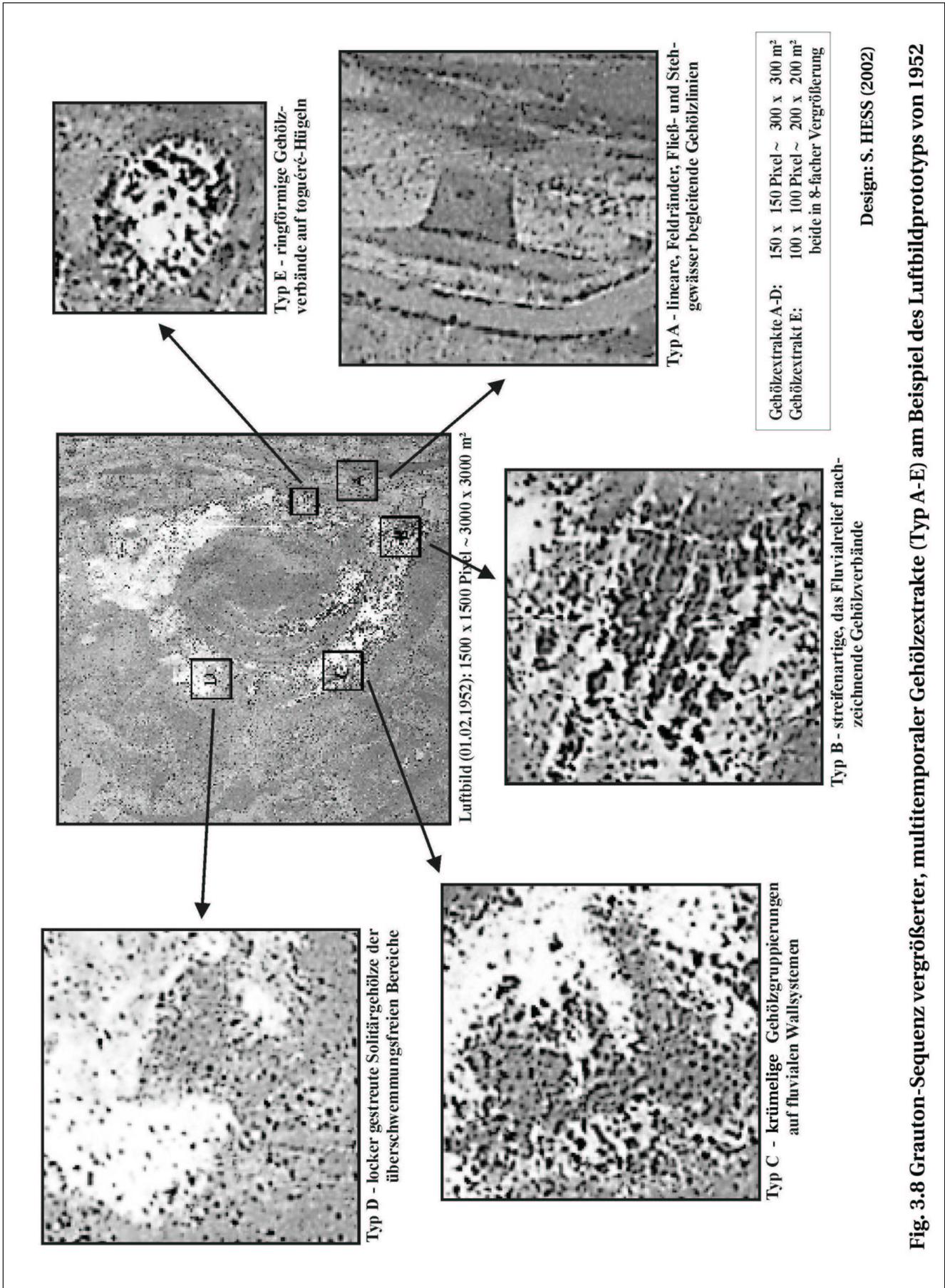


Fig. 3.8 Grafton-Sequenz vergrößerter, multitemporaler Gehölzextrakte (Typ A-E) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952

Die aus der Senkrechtsicht mit einer maximalen Lotabweichung bis 3° (LÖFFLER, 1994) aufgenommenen Luftbilder zeigen die Gehölze – mit Ausnahme der wenigen permanent laubtragenden Arten, z.B. *Acacia albida* & *Acacia nilotica* (HIERNAUX et al., 1984) – zur Trockenzeit größtenteils als gering bis unbelaubte Gebilde. In den kleinmaßstäbigen Luftbildern werden die über die Trockenzeit hinweg belaubten Arten durch ihre Laubkrone, die überwiegend unbelaubten Arten durch ihr Astskelett abgebildet. Schattenphänomene sowie die zur Aufnahmezeit aus dem Sonnenstand herleitbare Projektionsrichtung bleiben im vorliegenden Maßstab uneindeutig.

Folgende für die Deltaregion charakteristische Gehölzmustertypen (**Fig. 3.8**) lassen sich in den überschwemmungsfreien Bereichen ausgliedern:

- Typ A – lineare, Feldränder, Fließ- und Stehgewässer begleitende Gehölzlinien
- Typ B – streifenartige, das Fluvialrelief nachzeichnende Gehölzverbände
- Typ C – krümelige Gehölzgruppierungen auf fluvialen Wallsystemen
- Typ D – locker gestreute Solitärgehölze überschwemmungsfreie Bereiche
- Typ E – ringförmige Gehölzverbände auf *toguéré*- und *tumuli*-Hügeln

Die Typen A (z.B. Feldeingrenzung als Verbißschutz) und E (Siedlungs-Schattenbäume) lassen auf eine anthropogen bedingte, die Typen B bis D eine naturnahe Gehölzbesiedlung schließen.

Die Festlegung eines die Landschaftsdegradation bewertenden Gehölzbedeckungsindikators, erfordert u.a. – aus den in Kap. 3.2.2 bereits ausgeführten Gründen – für eine Analyse von Einzelgehölzen und kleinen Gehölzgruppen die Entwicklung multitemporal anwendbarer Segmentierungs- und Klassifikationsalgorithmen auf morphologischer Basis.

3.2.4.1 Binarisierungsanalyse

Bei der auf die Formgeometrie ausgerichteten automatisierten Extraktion – hier Solitärobjekte von punktueller, krümeliger bis linearer Struktur – gilt es zunächst, die Problematik der Segmentierung, d.h. Trennung des Objektes vom Bildhintergrund zu überwinden. Dies kann auf einfache Weise mittels Definition eines spektralen Schwellenwertes oder einer Schwellenwertspanne realisiert werden.

Da einerseits die Suche nach in allen vier Bildzeitschnitten korrespondierenden Objekten sehr subjektiv ist, andererseits die spektralen Pixelwerte eines jeweiligen Objekttyps als nicht identisch angenommen werden müssen, erfordert dies ein multitemporal anwendbares Schwellenwertbestimmungs-Verfahren zur Separierung der Gehölze von Nicht-Gehölzen in jedem einzelnen Luftbildzeitschnitt.

In allen vier Luftbildzeitschnitten ist die Festlegung einer durch Minimum- und Maximumwert multitemporal gültigen Schwellenwertspanne an Gehölz-Reflexionswerten nicht möglich. Daher kann keine Normalisierung der Helligkeitswerte – z.B. mittels Histogrammausgleich, bei welchem die Werte aller Zeitschnitte auf eine einheitliche Skalierung abgestimmt werden – erreicht werden.

Methoden zur automatischen Bildmustererkennung erfordern im ersten Schritt fast ausnahmslos die Bildbinarisierung durch Definition einer Schwellenwertbedingung in einem Bildverarbeitungssystem. Die meisten Implementierungen auf Grauwertniveau basieren auf einer solchen ersten Segmentierung, d.h. einer Transformation zu sogenannten 1 bit- oder Zweipegelebildern. Bei der Binarisierungsumwandlung werden die Digitalwerte des Originalbildes ($g(x,y)$) – im vorliegenden Fall die 256 Werte eines 8 bit codierten Grauwertluftbilds (Wertspanne von 0–255 Graustufen) – auf ein Bild mit lediglich zwei Binärwerten ($g_s(x,y)$), z.B. 0 (schwarz) und 1 (weiß) reduziert:

$$g_s(x,y) = \begin{cases} 1: g(x,y) \in \text{Hintergrund} \\ 0: g(x,y) \in (\text{Gehölz-})\text{Objekte, falls } g(x,y) \leq S \end{cases}$$

$g(x,y)$ = Originalbild
 $g_s(x,y)$ = mittels Schwellenwert S erzeugtes Binärbild
 S = Schwellenwert

Nach der Umwandlung zu einem Zweipegelebild (g_s) sollten in idealer Weise die schwarzen Pixel mit dem Digitalwert 0 das gewünschte Objekt (z.B. Gehölz), die weißen Pixel mit dem Digitalwert 1 den Hintergrund (d.h. alle Nicht-Gehölzobjekte) darstellen. Um die Grauwerte oberhalb und unterhalb des Schwellenwerts den Binärwerten 0 und 1 zuordnen zu können, ist eine Transformation zur Bestimmung der Schwellenwertzuweisungsregel erforderlich. Die Wahl eines geeigneten Schwellenwertes (S) innerhalb der bildimmanenten Grauwertspanne stellt jedoch ein schwieriges, oft mißverständenes Unterfangen dar. Üblicherweise wird ein Grauwert in experimenteller Weise interaktiv als Schwellenwert definiert. Das hieraus resultierende Bildbinarisierungsergebnis wird anschließend unter Zuhilfenahme visueller Kriterien bewertet (WHITEMAN & BROWN, 1998).

Da die Grauwertniveaus zwischen den unterschiedlichen Luftbildzeitschnitten nicht miteinander korrespondieren, oftmals stark variieren, führt eine solch subjektiv bestimmte Schwellenwertwahl in der Datenweiterverarbeitung unweigerlich zu fehlerhaften Ergebnissen. Aufgrund der auftretenden Objektwertschwankungen ist daher die subjektive Definition des Grauwertschwellenwertes zu vermeiden.

Eine andere gängige Methode setzt eine bimodale Verteilung voraus (KAY et al., 1998), bei welcher im Häufigkeitshistogramm vor dem Beginn des zweiten Pixelhäufigkeitsmaximums der Schwellenwert auf den Grauwert festgesetzt wird. Häufig weichen die Verteilungen der Grauwertfrequenzen im Bildhistogramm stark von der bimodalen Form ab (**Fig. 3.9 a**), so daß die Methode letztendlich ebenfalls zweifelhafte Resultate ergibt.

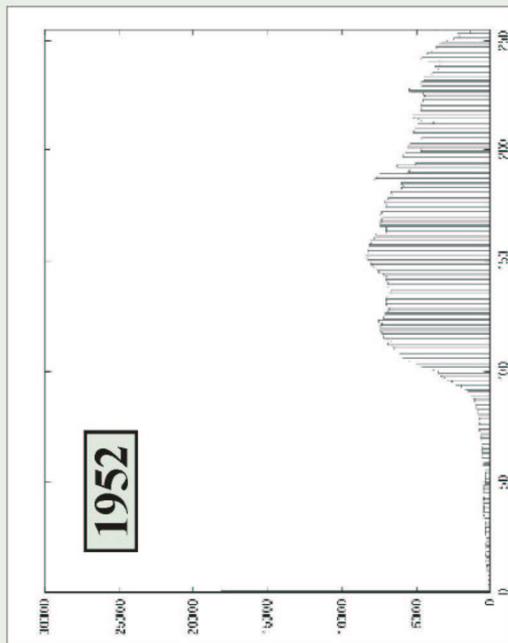
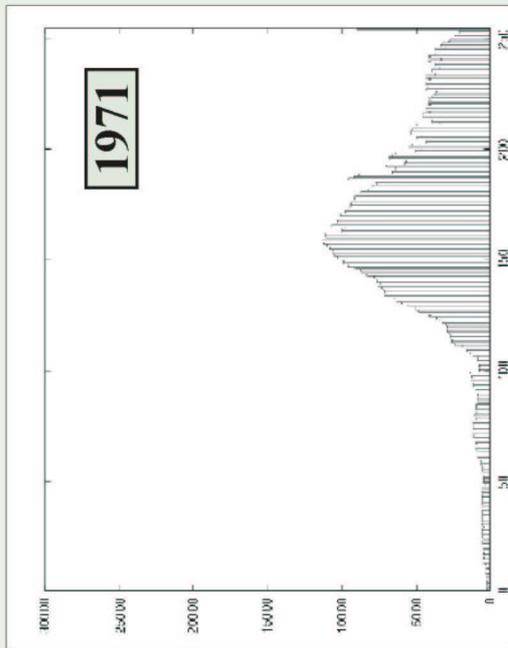
Der Schwellenwert wird folglich nicht anhand der im Bild auftretenden Grauwert-Pixelhäufigkeiten, sondern über die hier vorgestellte alternative Methode (HESS & BERGES, 1999) mittels eines speziellen, in C programmierten Algorithmus definiert.

Der Schwellenwert wird für jeden multitemporalen Luftbildzeitschnitt individuell auf der Basis eines Histogramms berechnet, welches nicht die Häufigkeit der Grauwertpixel, sondern jene der Gehölzobjektcluster berücksichtigt. Diese Methode berücksichtigt den Umstand, daß die optimale Trennung der als Solitärobjekte angenommenen Gehölze vom Hintergrund genau dann gewährleistet ist, sofern eine maximale Clusteranzahl im jeweiligen multitemporalen Bildausschnitt vorliegt.

Die in diesem Histogrammtyp dargestellte Clusteranzahl beruht für jedes Bild auf zwei sukzessiven Berechnungsschritten: Zunächst werden insgesamt alle 256 Grauwerte (0–255) als Binarisierungsschwelle definiert. Es folgt die Identifizierung und Etikettierung (Labelisierung) der auf 0 codierten, schwarzen Objektcluster für jedes der insgesamt 256 Binarisierungsergebnisse. Auf dieser Grundlage läßt sich je Bildzeitschnitt separat für jeden der 256 Binarisierungsschwellenwerte die resultierende Gesamtzahl aller Cluster berechnen, welche je Zeitschnitt in einem separaten Cluster-Häufigkeitsdiagramm (**Fig. 3.9 b**) aufgetragen wurden.

Diese Methode zielt auf die Ermittlung des Optimum-Schwellenwerts als den Wert, der im Binarisierungsergebnis die maximale Anzahl an getrennten Gehölzgruppen oder -cluster erzeugt. Während bei der Unterschreitung des Schwellenwertoptimums die Gehölzgruppen im binarisierten Bildergebnis miteinander verschmolzen werden, werden sie im anderen Extremfall bei Überschreitung dem Hintergrund zugeordnet.

Design: S. HESS (2002)



x-Achse: Grauwertstufen (256) des gesamteten Luftbilds
 y-Achse: Anzahl der Pixel pro Luftbildgrauwert

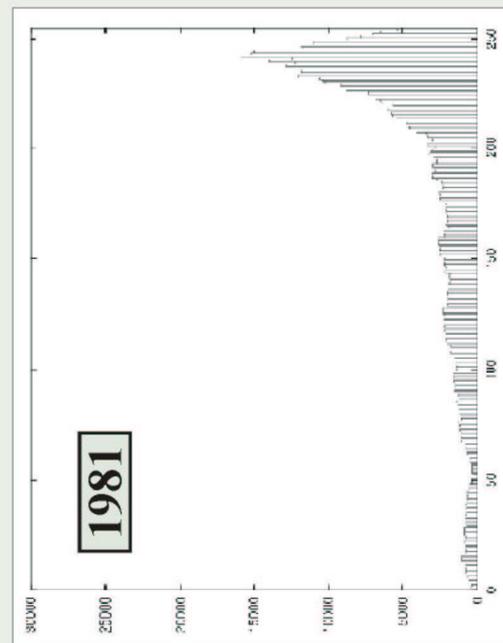
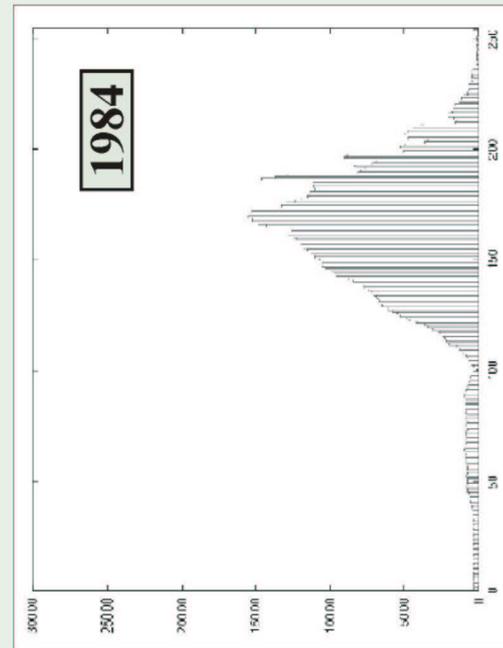


Fig. 3.9a) Multitemporale Serie der Grauerthistogramme mit mehrgipfliger Verteilung der Pixelhäufigkeiten

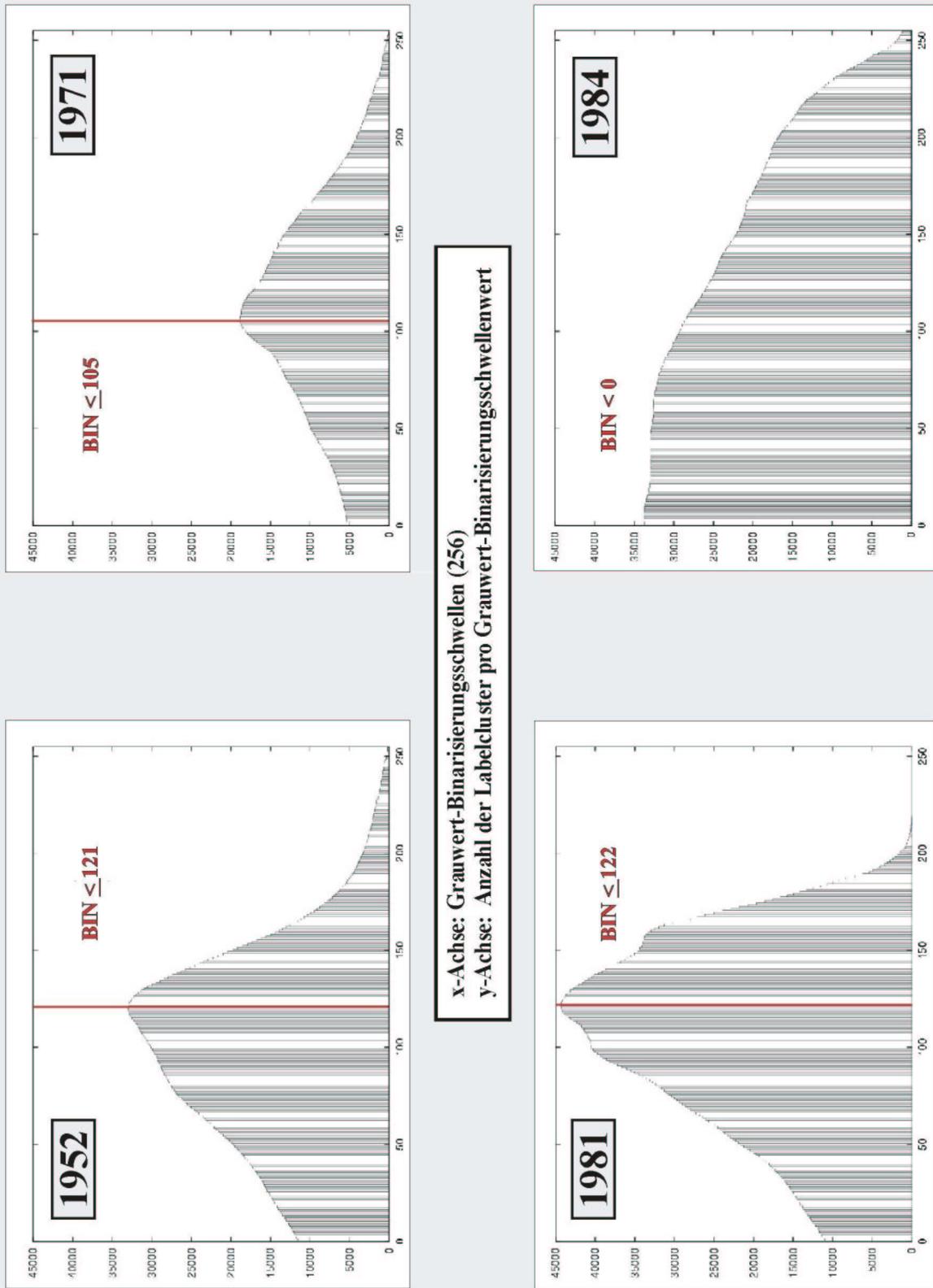


Fig. 3.9b Multitemporale Serie der Maximumsegmentierungs-Binarisierung mit unimodaler Verteilung der Labelclusterhäufigkeiten

Design: S. HESS (2002)

In Übereinstimmung mit der theoretischen Grundlage stellte sich eine unimodale Verteilung der Labelclusterzahl mit einem eindeutigen Maximum, ausgenommen des Exemplars von 1984, in allen Luftbildschnitten heraus. Das im Luftbild von 1984 irregulär außerhalb des Histogrammbereichs auftretende Maximum resultiert aus dessen schlechter Kontrastqualität. Der übersteuert wirkende panchromatische Papierabzug weist kaum Grauwerte im mittleren Bereich auf und suggeriert somit ein bereits binarisiertes Bildergebnis. Bei nur geringer Erhöhung des Schwellenwertes > 0 sind alle vorhandenen Bildobjekte der 0-Segmentierungsklasse zugeordnet.

Das Maximum eines jeden Labelclusterhistogramms definiert in objektiver Weise den jeweiligen Binarisierungsschwellenwert. Mit seiner kombinierten Eigenschaft der „maximalen Segmentierungs-Klassifikation“ stellt dieses Binarisierungsverfahren mithin eine neuartige Methode zur Optimierung des Objektkontrasts dar. Die Maximum-Segmentierungs-Binarisierung leistet einen ersten richtungsweisenden Schritt zu einer objektiveren, automatisierten Extraktion gewünschter Bildobjekte. Allerdings besteht auch hier im visuellen Ergebnis (*Fig. 3.7 b*) der unterschiedlichen Bildzeitschnitte die Gefahr fehlerhafter Erfassung:

Die Binarisierungsschwellenwerte erfassen nicht nur die gewünschten Gehölzobjekte, sondern auch nicht dazugehörige Bildbereiche:

1. Kleinere Einzelstrukturen, welche möglicherweise beim Einscannen oder filmmaterial- und filmentwicklungsbedingt als störendes Bildrauschen eingebracht wurden,
2. Teile von Feuchtfächen der Senken- und Beckenbereiche, die als gehölzobjektähnliche, dunkle Reflexionsgrauwerte erscheinen,
3. Gebäudeobjekte kleinerer Siedlungshügel (auf *tumuli-* oder *toguéré-*Wurten)

Derartige einzelstrukturelle Objektfehlextraktionen lassen sich mittels verschiedener Filter- und Maskierungstechniken in automatisierter Weise aus dem Bild eliminieren. Eine visuell definierte a priori-Ausgrenzung ausschließlicher Gehölzflächen erfordert demgegenüber einen enormen Expertenaufwand.

3.2.4.2 Gehölzextraktion mittels nicht linearer Rangordnungsoperationen

Nachdem anhand der Maximumsegmentierungs-Bildbinarisierung auf operationelle Weise eine maximale Objektsegmentierung erreicht wurde, gilt es im nächsten Schritt die als Gehölze identifizierten Objekte und Objektgruppen aus den Binärluftbilddausschnitten zu selektieren.

Neben den Filtern, die sich auf den Frequenzbereich oder die sogenannte «tonale Bildrauhigkeit» (LILLESAND et al., 2000) beschränken, konzentrieren sich die nachfolgend dargelegten Experimente auf Filterungen im Ortsbereich und dort, speziell auf regionenorientierte Filterungen, die im Vergleich zu bildpunktorientierten Filterungen zusätzlich Informationen benachbarter Bildpunkte berücksichtigen.

Da lineare Raumfilter (z.B. Faltung, engl. convolution) die Wellenkomponenten eines Bildes homogen oder verschiebungsinvariant mit ein und dem gleichen Faktor versehen, können sie die vorliegende Bildstruktur nicht differenziert berücksichtigen. Nicht-lineare Filter (z.B. Rangwert, engl. rank value) hingegen bieten aufgrund ihrer Verschiebungsvarianz den Vorteil, die Bildstruktur differenziert erfassen zu können. Sie verflachen nicht – wie beispielsweise die linearen Filter – das gesamte Bildgrauwertrelief, sondern vermindern das Bildrauschen, ohne die Kantenstrukturen zu verschmieren (JÄHNE, 1989). Nicht-lineare Operatoren sind im Gegensatz zu den linearen allerdings nicht invers anwendbar.

Zur Auslöschung der beim Scannen im Bild erzeugten Rauschstörungen werden daher bei gleichzeitiger Segmentierung von Gehölzobjekten auf den Binarisierungsergebnissen alternative, nicht-lineare Rangordnungsoperationen, Medianfilterung und morphomathematische Filterung gegeneinander experimentiert:

3.2.4.2.1 Medianfilterung

Die Medianfilterung (engl. adaptive center weighted median, ACWM) ist eine starke nicht-lineare Bildglättungs- und Bildverbesserungstechnik, welche Signal- und Zufallsrauschen sowie anteilig auch impulsives Rauschen effektiv reduziert.

Auf jeder Pixelstelle des Bildes wird ein zweidimensionales quadratisches Maskenfenster (Filterkern) plaziert, welches die Grauwerte aller vom Maskenfenster erfaßten Bildpixel, nach einem zuvor definierten Algorithmus analysiert. Anschließend wird das zentrale Originalpixel durch einen neuen Bildwert ersetzt, welcher nicht aus der Pixelgesamtheit des Maskenfensters neu errechnet wurde, sondern im Einflußbereich des Maskenfensters bereits vorhanden ist. Das Filtermatrixfenster wird sukzessiv über jeden Bildpunkt bewegt, wobei die Zuweisungsoperation stets erneut wiederholt wird. Im Ergebnis wird jedem zentralen Bildpunkt ein neuer, auf der Basis des festgelegten Kriteriums ermittelter Wert zugewiesen.

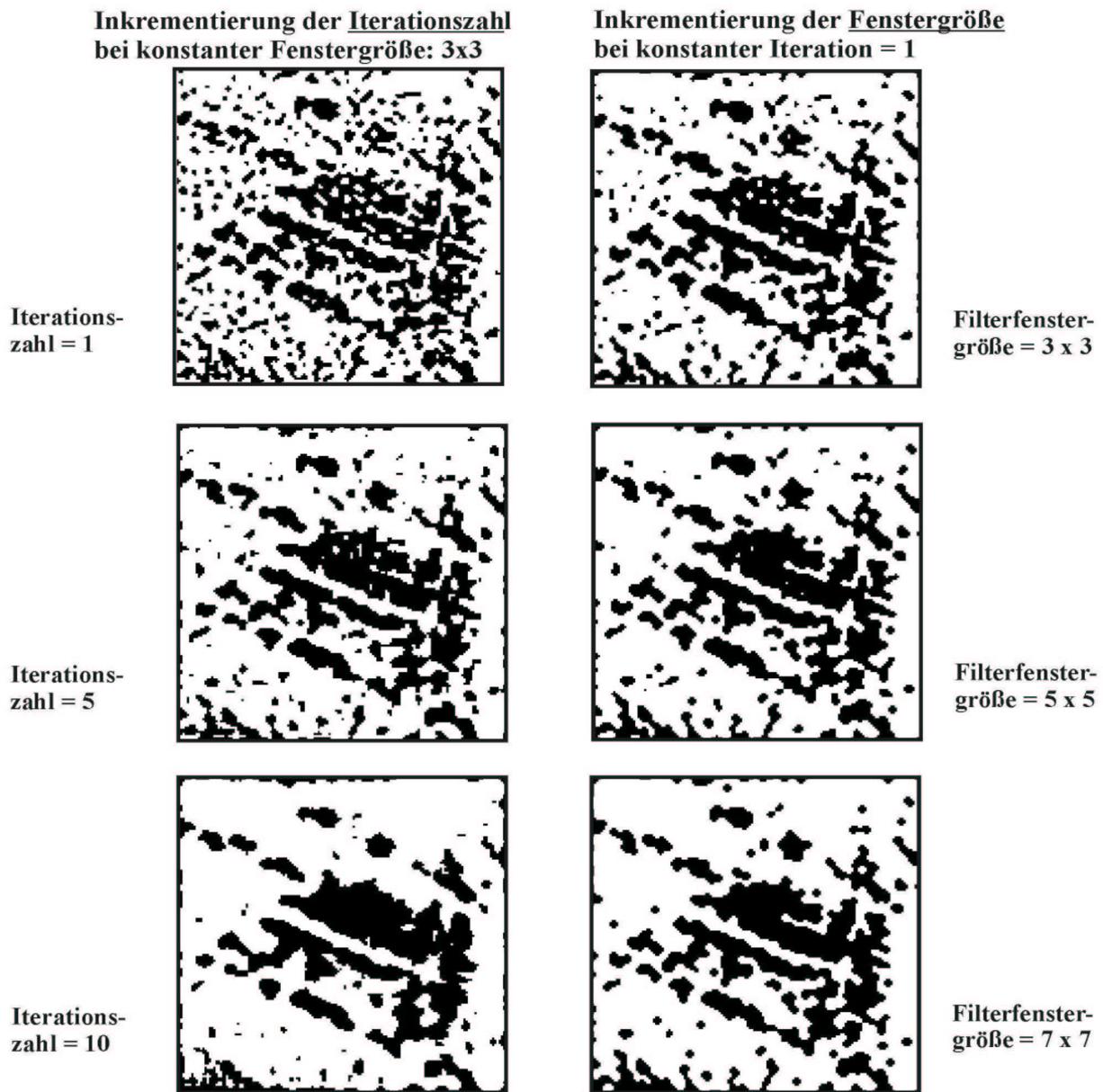
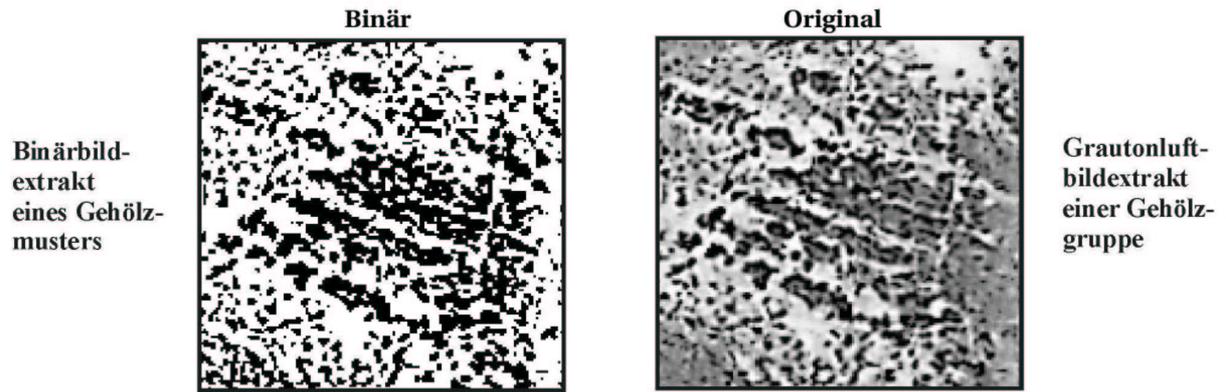
Der Median-Algorithmus bewirkt eine Sortierung der vom Maskenfenster erfaßten Grauwerte nach ihrer Betragsgröße und weist dem Zentralpixel den in der Mitte dieser Rangfolge stehenden Ordinalzahlenwert zu. Monoton ansteigende Grauwertgradienten sowie abrupte, zwischen zwei konstanten Grauwertbereichen auftretende Grauwertkanten bleiben vom Filter unbeeinflusst. Herausragende Eigenschaft des Filters ist die verlustfreie Eliminierung einzelner Rauschpixel, ohne eine Verfälschung der Nachbarpixel oder signifikante Verschlechterung der Bildschärfe zu bewirken (JÄHNE, 1989).

Sukzessive Erhöhung von Maskenfenstergröße und Filterungswiederholungsrate verstärken die eliminierende Wirkung, wie *Fig. 3.10 a* anhand eines Gehölzausschnitts von 1952 belegt. Gleichzeitig werden die Gehölzstrukturen kulminiert, wobei die Vergrößerung des Maskenfensters bei gleichzeitig konstant gehaltener Iteration zu stärker objektglättenden und -verbindenden Filterungsergebnissen tendiert. Die Inkrementierung der Iterationszahl erzeugt bei konstanter Fenstergröße von 3 x 3 Pixel vergleichsweise kantigere, jedoch stärker lückenschließendere Ergebnisse.

Die Filterungen sind theoretisch solange wiederholbar, bis ausschließlich konstante, nicht mehr veränderbare Bereiche und Kanten im Bild zurückbleiben (JÄHNE, 1989). Eine solche „statische Klimax“ wurde in diesem Gehölz-Beispielausschnitt im 10. Iterationsdurchgang erreicht.

Auf der Grundlage der vorangegangenen Filterexperimente wurde ein günstiges Ergebnis einer effektiven Auslöschung des Bildrauschens bei gleichzeitiger Extraktion eines der realen Bedeckung am nächsten kommenden Gehölzbesatzes bei der Wahl der Fenstermaskengröße von 3 x 3 Pixeln unter Anwendung eines einzigen Filterdurchgangs erzielt. *Fig. 3.10 b* zeigt am Beispiel des Luftbildausschnitts von 1952 die Filterwirkung auf unterschiedlich strukturierten Gehölzmustern im Vergleich zum ungefilterten Binarisierungsergebnis.

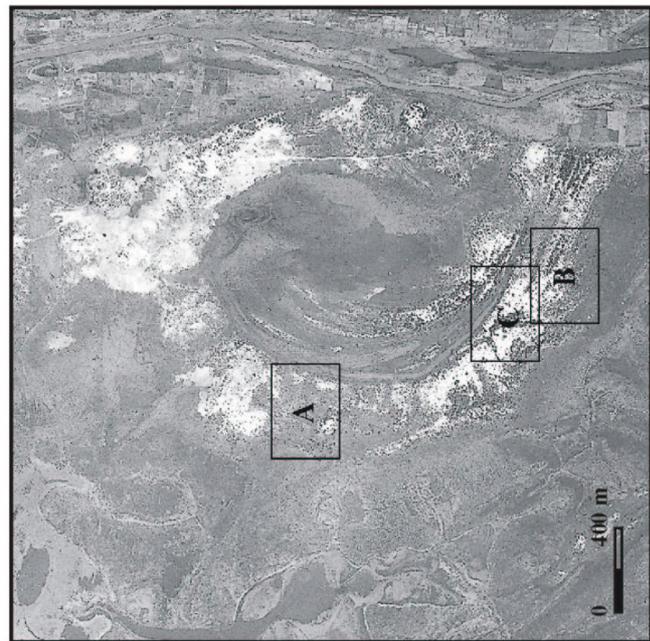
Die charakteristische Filterwirkung betrifft in allen Fensterausschnitten A-C die Herauslöschung von Einzelpixeln, unter denen sich u.a. in kleinen, miteinander verbundenen Pixelgruppen der Größe < 6 Pixel auch nicht erwünschter Weise potentielle Gehölzobjekte befinden können. Die Abtrennung schmaler Pixelanhänge bewirkt einen formabrundenden Filterungseffekt. Das Verkitten kleinerer Löcher im Inneren oder im Randbereich größerer Gehölzgruppen erzeugt eine zusätzliche Glättung.



Größe des ausgewählten Gehölzextrakts: 150 Pixel x 150 Pixel (~ 300 m x 300 m)

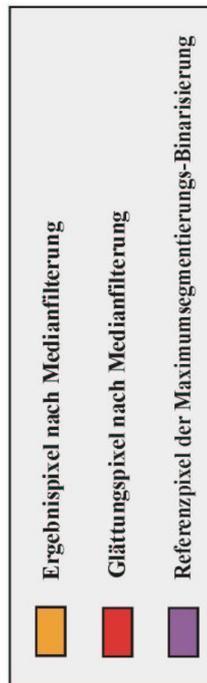
Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.10 a) Parameterabhängigkeit der Median-Filterung am Beispiel eines Gehölzausschnitts im Luftbild vom 01.02.1952

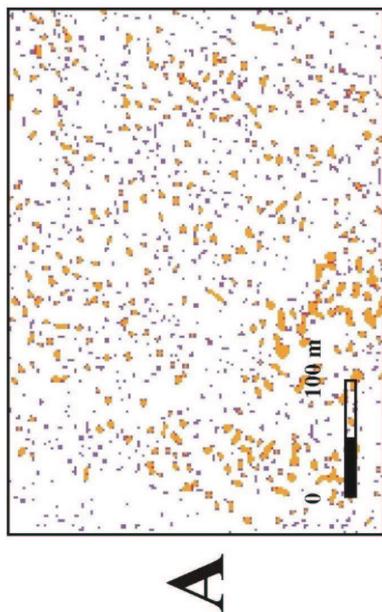


Luftbildprototyp vom 01.02.1952

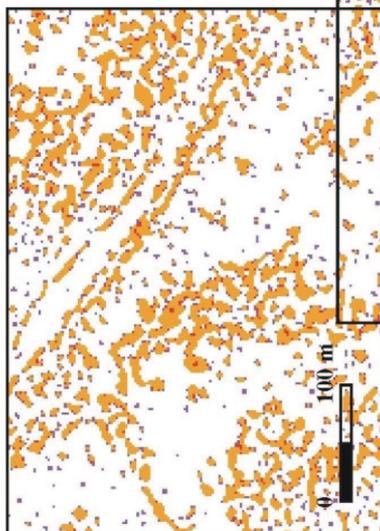
Medianfilterung mit 3 x 3-Fiterfenster nach einmaliger Filter-Iteration



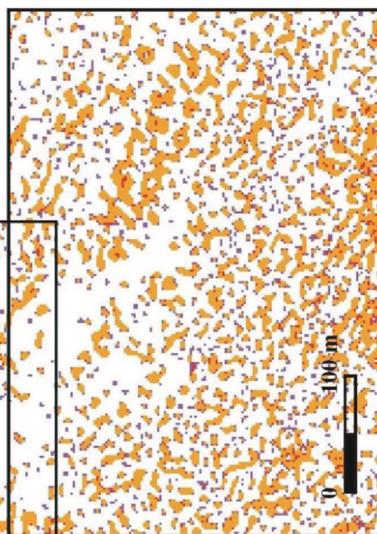
Ausschnittgröße der Filterergebnisse (A,B,C) mit 225 [w] x 160[h] Pixeln, einer Geländegröße von 450 m x 320 m, in 5,5-facher Vergrößerung entsprechend



A



C



B

Fig. 3.10 b) Medianfilterung verschiedener Gehölmuster (A,B,C) am Beispiel des binarisierten Luftbildprototyps von 1952

Design: S. HESS (2002)

Im Ausschnitt A eines locker verstreuten Gehölzbesatzes wurden zahlreiche Einzelpixel eliminiert. Im Ausschnitt B, charakterisiert durch weniger stark miteinander verbundene, größere Gehölzgruppen erhält der Abrundungs- gegenüber dem Glättungseffekt eine stärkere Betonung. Im durch eine stärkere Konnektivität größerer Pixelgruppen gekennzeichneten Ausschnitt C überwiegt der Glättungseffekt.

3.2.4.2.2 Morphomathematische Filterungen

Die morphomathematische Theorie gewinnt aktuell als effizientes Werkzeug zur automatischen Extraktion von Bildkomponenten, Kantendetektion, Bildsegmentierung und -verbesserung insbesondere in der industriellen (z.B. Materialoberflächendefekte) und medizinischen Mustererkennung (z.B. Krebszellen, Hämatologie) dem Bereich des maschinellen Sehens (computer vision) und der Robotertechnik (robotics) immer stärker an Bedeutung.

Sie basiert zur Analyse von Bildformen und -strukturen auf einer robusten Mengentheorie mit dem Ziel der geometrischen Transformation in eine diskrete Bildmatrix oder in ein Rastergitter (SERRA, 1982 & 1988; HEIJMANS 1994). Aufgrund ihrer direkten Prozessierung der Objektform sind die morphologischen Operatoren der Bildkonvolution überlegen (BOW, 1992).

Die Binär- oder Grauwertbildmengen werden durch Objektformen und -strukturen zusammengesetzt. In diesen verändern morphologische Rangordnungs-Operatoren Form und Topologie der Bildobjekte mittels logischer Verknüpfungen der Booleschen Algebra. Im Gegensatz zu Verknüpfungen der Linearen Algebra wird bei der im Binärraum einsetzbaren Booleschen Algebra eine Multiplikation durch eine logische UND-Verknüpfung (\wedge), eine Addition durch eine logische ODER-Verknüpfung (\vee) ersetzt (JÄHNE, 1989).

Unter den morphologischen, nicht inversen Filteroperatoren wird zwischen den elementaren Grundoperationen Erosion und Dilatation sowie den daraus zusammensetzbaren, idempotenten Operatoren Öffnung und Schließung unterschieden.

Diese elementaren Operatoren sind sowohl in einer Grauwert- als auch einer Binärbildmenge anwendbar. Letztere definiert sich als spezielle Form einer Bildwertmenge aus zwei Grauwerten.

In den folgenden, in Darstellung und Nomenklatur an BOW (1992) angelehnten, morphomathematischen Ausführungen bezeichnen A und B Mengen des Euklidischen Raums C (A, B) mit den Komponenten $\vec{a} = a_1, a_2, \dots, a_n$ als Element der Objektmenge des Grau- oder Binärbilds A sowie $\vec{b} = b_1, b_2, \dots, b_n$ als Element der Menge des Strukturelements B.

Dilatation

Die Dilatation (engl. dilation) von Objekt A durch das Strukturelement B wird für alle Punkte bzw. Vektoren \vec{c} , für die $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ gilt, als Vektor- oder Minkowskiaddition definiert:

$$C(A,B) = A \oplus B = \{ \vec{c} \mid \vec{c} = \vec{a} + \vec{b}, \text{ für einige } \vec{a} \in A \text{ und } \vec{b} \in B \}$$

Bei der Dilatation (**Fig. 3.11 a**) werden Bildobjektpixel selektiv dergestalt hinzugefügt, daß jedes Pixel eines dargestellten Objekts mit der Pixelanordnung der verschiebbaren Maske des Strukturelements verglichen wird. Es wird einer bestehenden Bildobjektmenge nur dann ein Pixel hinzugefügt, wenn das Zentralpixel des Strukturelements mit mindestens einem Pixel der Bildobjektmenge kongruent ist. Die Dilatation liefert also diejenige Menge an Bildpixeln, die gleich der Vereinigungsmenge von Bildobjekt- und Strukturelementen ist, d.h. im Binärbereich ist jeder Punkt des Strukturelements eine verschobene Kopie des Originalbildes.

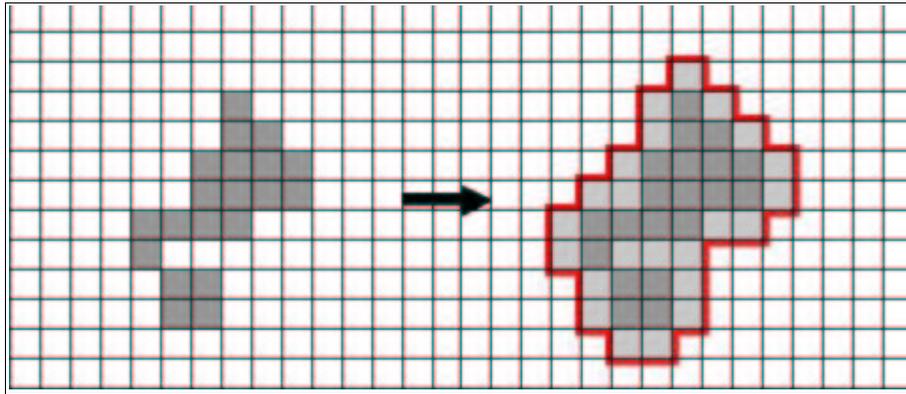


Fig. 3.11 a) Dilatation

Erosion

Die Erosion (engl. erosion) des Objektes A durch das Strukturelement B wird mathematisch für alle Punkte c, für welche $c = a + b$ gilt, als Vektor- oder Minkowskisubstraktion definiert:

$$C(A,B) = A \ominus B = \{ \vec{c} \mid \vec{c} = \vec{a} - \vec{b}, \text{ für alle } \vec{b} \in B \}$$

Die Erosion (**Fig. 3.11 b**) bewirkt das selektive Löschen von Bildobjektpixeln. Dabei wird jedes Bildpixel eines dargestellten Objekts mit einer verschiebbaren Maske, dem Strukturelement, verglichen. Es werden nur die Bildteile des Objekts erhalten, die vollständig durch die Maske bedeckt werden. Die Erosion liefert also diejenige Menge von Bildpixeln, die mit dem Durchschnitt von Bildelementen und Strukturelement übereinstimmt. Sie beschreibt alle Bezugspunkte im Binärbereich, bei welchen das Strukturelement in das Originalbild paßt.

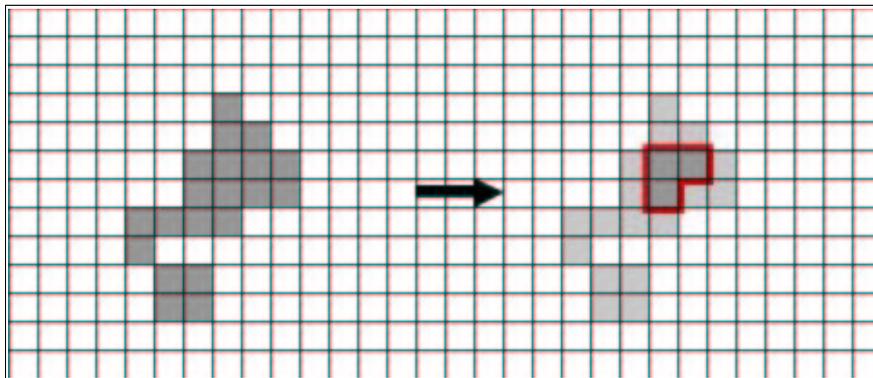


Fig. 3.11 b) Erosion

Öffnung

Die Öffnungsfiltrierung (engl. opening) einer Bildmenge A mittels des Strukturelements B bedingt die sukzessive Folge einer Erosion, gefolgt von einer Dilatation (**Fig. 3.11 c**), welche mathematisch folgendermaßen definiert wird:

$$\begin{aligned} C(A,B) &= [A \ominus B] \oplus [A \ominus B] \\ &= [A \ominus B] \oplus B \end{aligned}$$

Nah beieinander liegende Objekte werden verbunden, enge Lücken und Zwischenräume innerhalb eines Objektes werden verklebt. Charakteristischer Begleiteffekt ist die Glättung

von Konturen, d.h., die Vereinfachung der Formen infolge Eliminierung konkaver Ränder und Überstände.

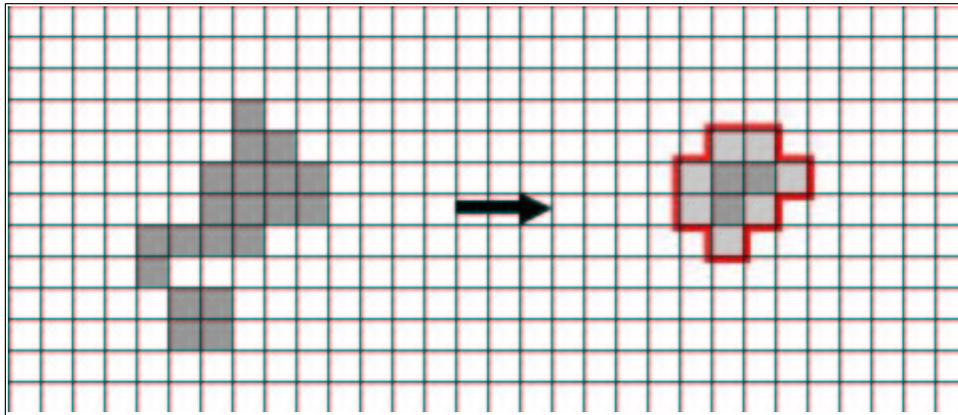


Fig. 3.11 c) Öffnung

Schließung

Bei der Schließungsfilterung (engl. closing) einer Bildmenge A mittels des Strukturelements B folgt vice versa eine Erosion auf eine Dilatation:

$$\begin{aligned} C(A,B) &= [A \oplus B] \wedge [A \ominus B] \\ &= [A \oplus B] \ominus B \end{aligned}$$

Bei der Schließung (*Fig. 3.11 d*) verschwinden im Dilatationsergebnis alle Objektstrukturen, in die das Strukturelement nicht hineinpaßt. Die übrigen Pixel bleiben unverändert, d.h. der Operator öffnet Lücken zwischen Objekten, glättet Konturen und bricht bei gleichzeitiger Eliminierung kleiner Partikel schmale Verbindungen zwischen Pixelgruppen auf.

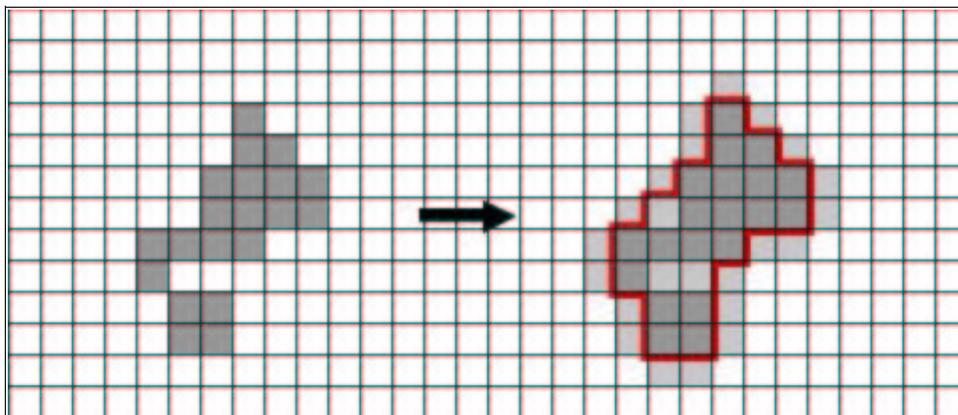


Fig. 3.11 d) Schließung

In einem rechteckigen Rastergitter sind zwei grundsätzliche Arten von Nachbarschaftbeziehungen, die 4-Pixel- sowie die 8-Pixel-Nachbarschaft (*Fig. 3.14 a*, Kap. 3.2.4.3) zu unterscheiden (DIP Courses, KHOROS 2, 1997). Die 4-Pixel-Nachbarschaft beschreibt die Topologie aller Pixel, die mit dem zentralen Pixel eine Kante bilden, wohingegen bei der 8-Pixel-Nachbarschaft zusätzlich diejenigen Pixel hinzugezogen werden, welche eine Ecke mit dem zentralen Pixel gemeinsam haben.

In Verbindung mit dem Typ der Nachbarschaftsbeziehung bestimmt der jeweils gewählte Distanzbeziehungstyp die Form des Strukturelements. Die Nachbarschaftsbeziehungen werden in Kapitel 3.2.4.3 in ihrer Bedeutung bei der Prüfung und Zuweisung der

Zusammengehörigkeit von Pixelgruppen zu einer Objektunität näher dargelegt.

In der 2-dimensionalen Betrachtung werden drei unterschiedliche Strukturelementformen in der nach ihrer Größe vordefinierten Fenster-Matrix (*Fig. 3.11 e*) durch unterschiedliche Distanzbeziehungen D zwischen den Punkten p und q definiert (DIP Courses, KHOROS 2.2, 1993-97):

1. Rechteck-Form mittels der Manhattan- oder Schachbrett-Distanz (L1):

$$D(p,q) = \max(|px-qx|, |py-qy|)$$

2. Kreis-Form mittels der Euklidischen Distanz (L2):

$$D(p,q) = \sqrt{(px-qx)^2 + (py-qy)^2}$$

3. Diamant-Form mittels der City-Block-Distanz (L):

$$D(p,q) = |px-qx| + |py-qy|$$

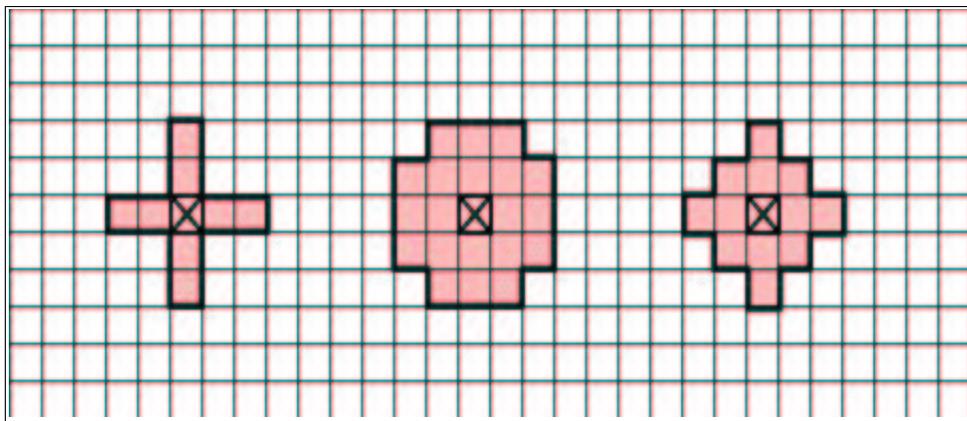


Fig. 3.11 e) Variationen morphomathematischer Strukturelemente

Während Kreis- und Diamantform durch die 8-Pixel-Nachbarschaft bestimmt werden, kann die Rechteck-Form in Abhängigkeit einer wahlweisen 2-Pixel-, 4-Pixel- oder 8-Pixel-Nachbarschaft weitere geometrische Formen – z.B. linearer Stab (2-Pixel-Nachbarschaft), Kreuz (4-Pixel-Nachbarschaft) oder Block (8-Pixel-Nachbarschaft) – annehmen. Im einfachsten Fall wird eine in einer 8-Pixel-Nachbarschaft befindliche 3 x 3 Pixel-Matrix als Einheitsstrukturelement definiert.

Das ausgewählte Strukturelement wandert mit seinem Zentralpixel als Referenzpunkt über die Bildmenge hinweg. Je nach vordefinierter morphologischer Operationszuweisungsregel wird die topologische Zugehörigkeit der Bildpixel geprüft und die entsprechende Zuweisung vorgenommen.

Form und Größe der Rastermaske oder des aus mehreren Pixeln zusammengesetzten Strukturelements beeinflussen die Wirkungsweise des morphologischen Filteroperators entscheidend. Die strukturelementbedingten Effekte sind in *Fig. 3.12 a* am Beispiel des Gehölzbilddausschnitts von 1952 anhand vier morphomathematischer Filteroperationen für je zwei unterschiedliche Strukturelemente dargestellt.

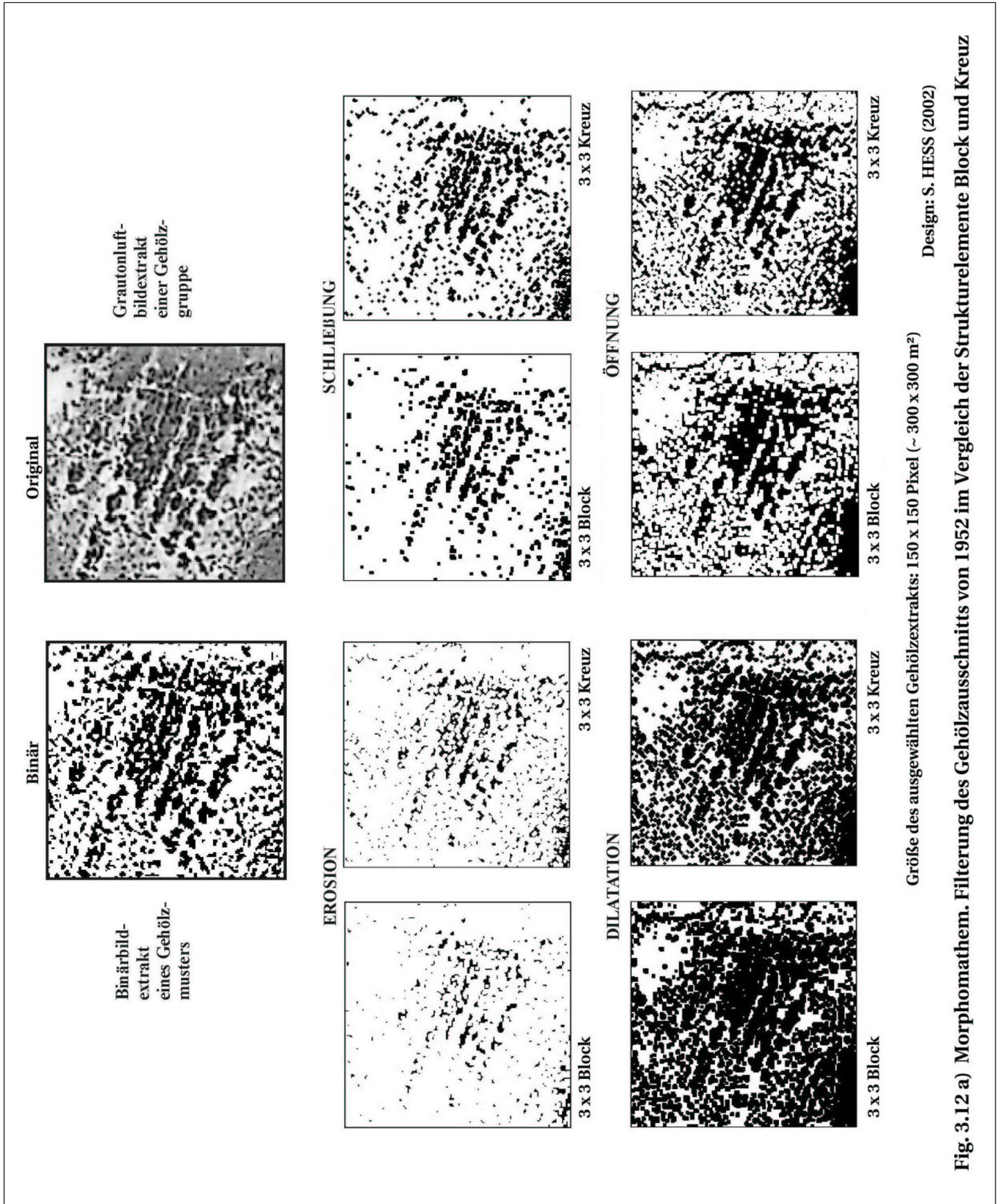
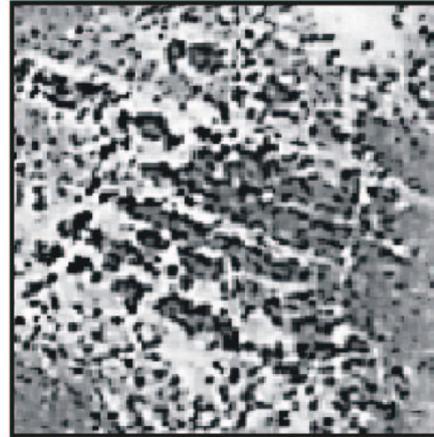
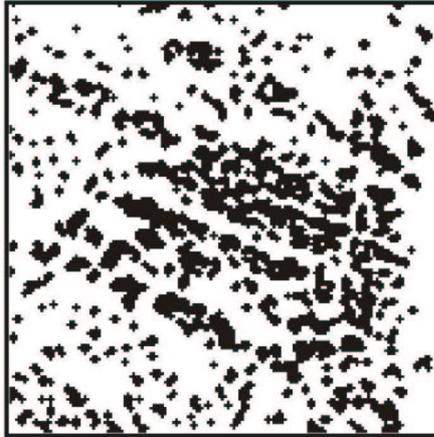


Fig. 3.12 a) Morphomathem. Filtering des Gehölzausschnitts von 1952 im Vergleich der Strukturelemente Block und Kreuz

Schachbrett-Distanz:

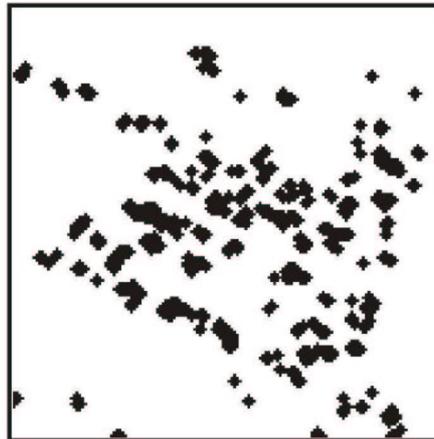
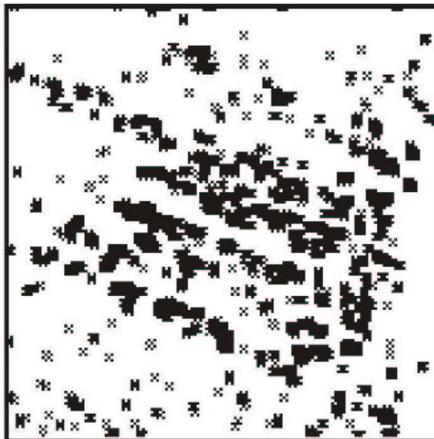
Kreuz-Strukturelement
Größe: 3x3
(ident. mit *Diamant*)



Gräutonluftbildextrakt einer Gehölzgruppe vom 01.02.1952

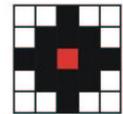
Schachbrett-Distanz:

Kreuz-Strukturelement, 45°-Ausrichtung
Größe: 3x3



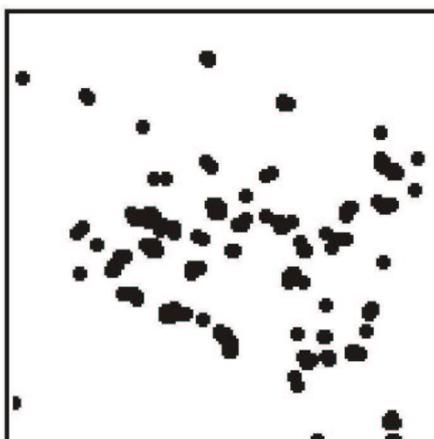
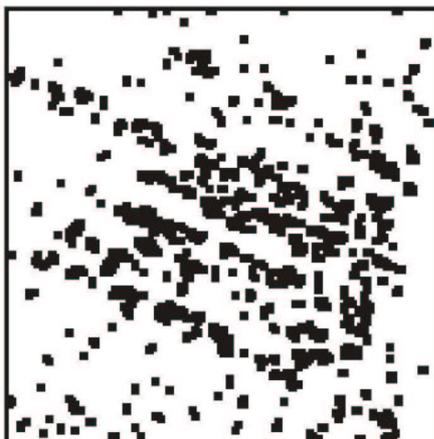
City-Block-Distanz:

Diamant-Strukturelement
Größe: 5x5



Euklidische Distanz:

Kreis- oder Block-Strukturelement
Größe: 3x3



Euklidische Distanz:

Kreis-Strukturelement
Größe: 5x5



Größe des ausgewählten Gehölzextrakts: 150 Pixel x 150 Pixel (~ 300 m x 300 m)

Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.12 b) Beeinflussbarkeit der morphomathematischen Filterwirkung durch Form und Größe des Strukturelements am Beispiel der Schließung

Die *Dilatation* vergrößert und verdichtet die vorhandenen Bildobjekte. Sie glättet darüber hinaus Objektkonturen durch das Auffüllen kleiner Löcher und Lücken.

Die *Erosion* zeigt gegenteilige Wirkung in Richtung der Ausfilterung kleiner Bildeinzelstrukturen (Rauschen). Sie bedingt gleichzeitig eine starke Schrumpfung aller verbleibenden Bildobjekte.

Die *Schließungsfilterung* ($Dilatation \vee Erosion$) eliminiert Strukturen mit einer Größe oder Linienstärke kleiner als jene des Strukturelements ohne die verbleibenden Objekte aufzublähen.

Mittels *Öffnungsfilterung* ($Erosion \vee Dilatation$) kann eine unerwünschte Objektschrumpfung unterdrückt, jedoch keine Ausfilterung des störenden Bildrauschens erzielt werden.

Die Filterungsoperationen der Erosion und der Schließung nähern sich –im Gegensatz zur Dilatations- und Öffnungsfilterung – in den binarisierten Luftbilddauschnitten am nächsten einer Extraktion des spontanen Ausbreitungs- und Formgefüges der Gehölmuster an. Erosion- und Schließungsfilterung dünne das Binarisierungsergebnis um unerwünschte Einzelpixelstörungen aus. Die Schließungsfilterung unterbindet die unerwünschte Verkleinerung verbleibender Objektformen unter gleichzeitigem Erhalt der originalen Formgeometrie der Gehölze.

Die am Beispiel des multitemporalen Luftbild-Gehölzbedeckungsextrakts durchgeführten Experimente zur maschinellen, semi-automatischen Quantifizierung der Sahelgehölzobjekte favorisieren somit die morphomathematische Methode gegenüber der Schließungsfilterung.

Am Beispiel der durch Schließungsfilterung erzeugten Filterextraktionsergebnisse werden nachfolgend die Resultate zur Beeinflussbarkeit anhand Form und Größe des Strukturelements (**Fig. 3.12 b**) vorgestellt.

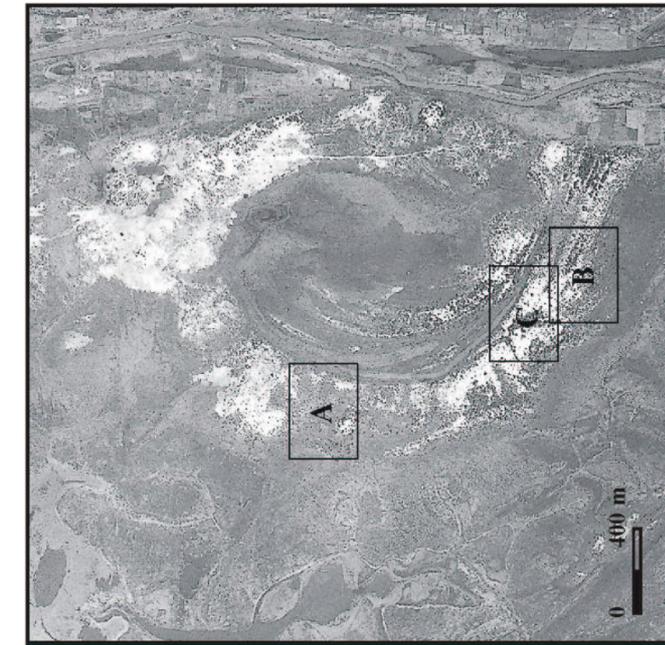
Grundsätzlich runden konvexe Strukturelemente (Block, Kreis, Diamant) die Formen im Ergebnisbild ab, während konkave Strukturelemente (Kreuz) eine Ausrichtung in Richtung der Längsachsen der gefilterten Objekte bewirken.

Das Kreuzstrukturelement der Größe 3 Pixel in 0°-Ausrichtung zeigt das von allen fünf dargestellten Filterresultaten der originalen Gehölzstruktur am nächsten kommende, weniger stark ausgedünnte Filterergebnis. Die 45°-Ausrichtung des gleichen Elements tilgt in wesentlich radikalerem Maße Objektstrukturen aus. Das Kreiselement mit der Pixelgröße 3 kulminiert die Objektformen und rundet sie in der Größenwahl von 5 Pixeln bei starker Ausrichtung der Gehölmuster recht überbetont ab. Das Diamantelement, das im Fall der Pixelgröße 3 mit einem Kreuzelement identisch ist, wird hier in der Strukturelementgröße von 5 Pixeln vorgestellt und liefert ein sehr intensiv ausgedünntes und gemäß seiner Form gerautetes Filterergebnis.

Während die Größe des Strukturelements die Ausdünnungsstärke bestimmt, entscheidet die Form über die geometrische Formausprägung oder Musterungsausprägung der gefilterten Ergebnisobjekte.

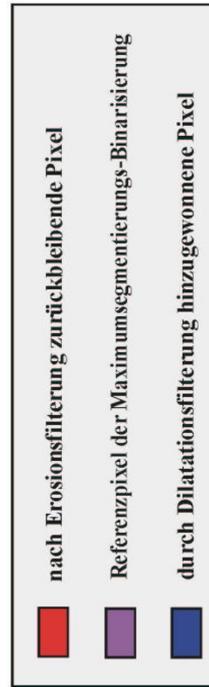
Die nachfolgenden Abbildungen stellen anhand dreier unterschiedlicher Gehölmustertypen des Luftbilddextrakts von 1952 beispielhaft die charakteristische Wirkung der morphomathischen Filterungen in Auswahl des experimentierten 3 x 3-Pixel-Kreuz-Strukturelements dar:

Fig. 3.12 c stellt die Erosion der Dilatation, **Fig. 3.12 d** die Öffnung der Schließung gegenüber. Zu Vergleichszwecken sind in violetter Einfärbung jeweils die Referenzpixel der Maximumsegmentierungs-Binarisierung eingeblendet. Die rot dargestellten Pixel kennzeichnen ausschließlich die nach der Erosions- oder der Schließungsfilterung verbleibenden Restpixel. Das Filterungsergebnis der Dilatation oder Öffnung bildet die gesamte farbige Bildpixelmenge, d.h. es setzt sich aus den violetten Binarisierungspixeln, den durch Dilatation oder Öffnung hinzugewonnenen blauen sowie den nach Erosion oder Schließung verbleibenden roten Pixel zusammen.



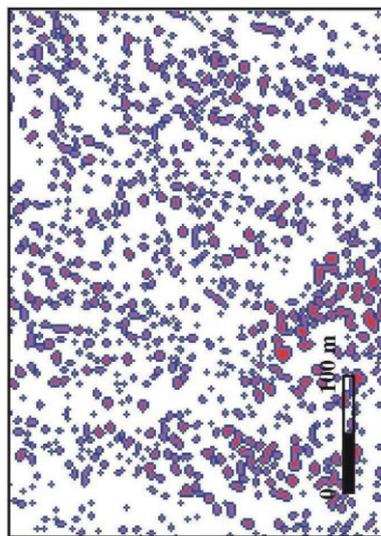
Luftbildprototyp vom 01.02.1952

Morphomathematische Filterungen mittels 3x3-Kreuz-Strukturelement

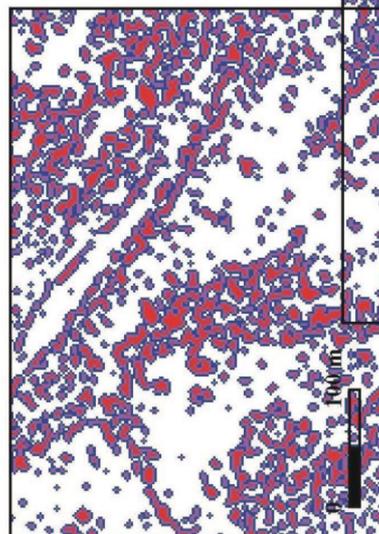


Ausschnittgröße der Filterergebnisse (A,B,C) mit 225 [w] x 160[h] Pixeln, einer Geländegröße von 450 m x 320 m, in 5,5-facher Vergrößerung entsprechend

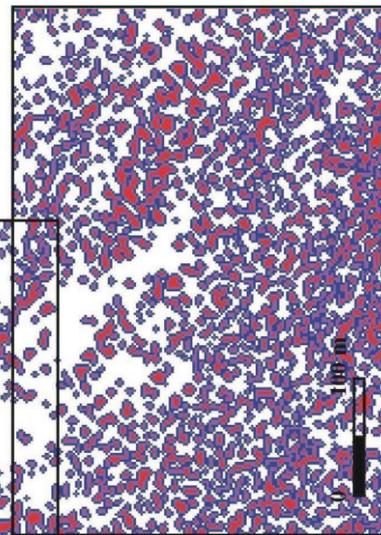
Design: S. HESS (2002)



A



C



B

Fig. 3.12c) Morphomathematische Erosions- und Dilatationsfilterung verschiedener Gehölmuster (A,B,C) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952

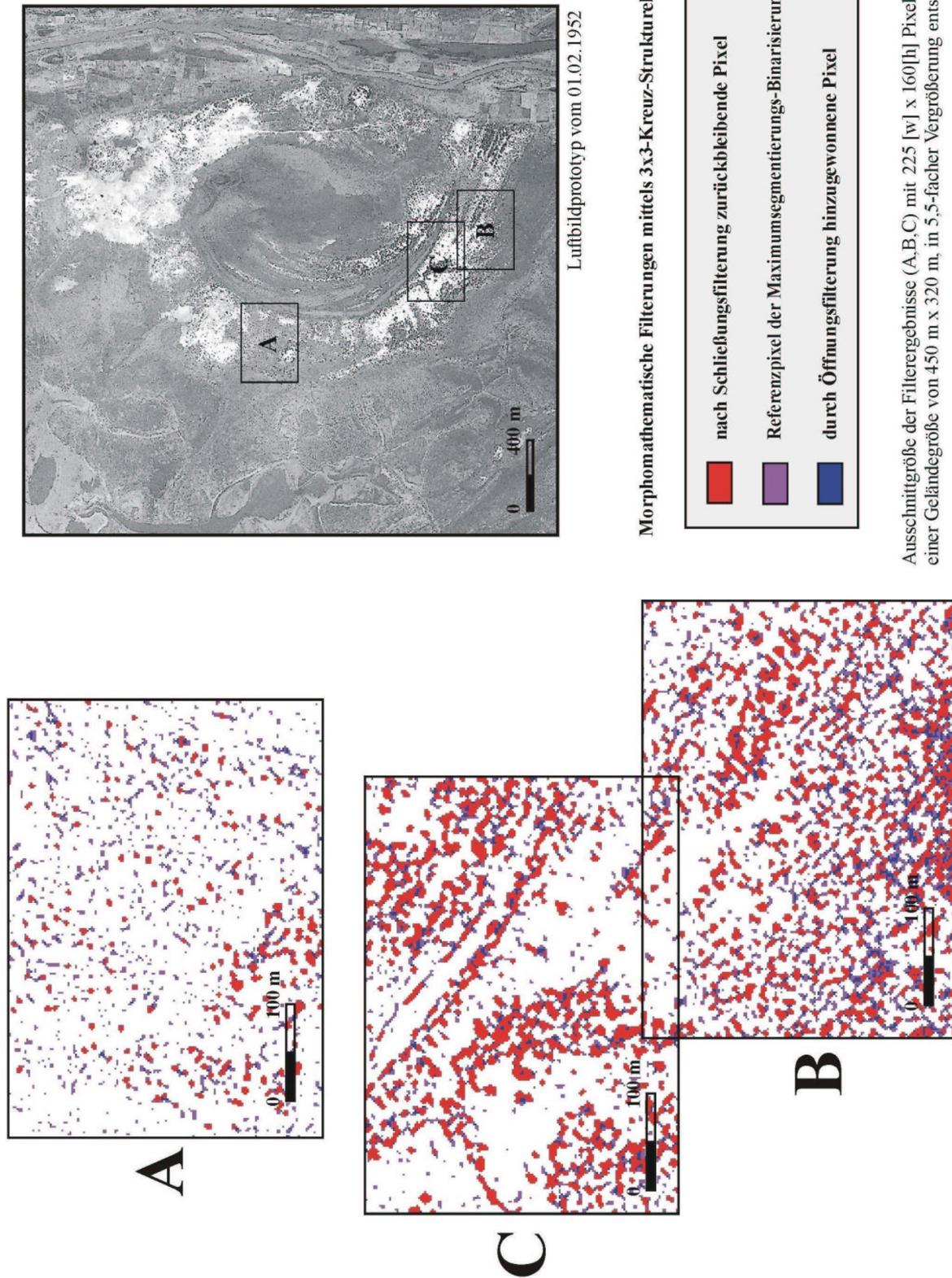


Fig. 3.12d) Morphomathematische Schließungs- und Öffnungsfiterung verschiedener Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel des Luftbildprototyps von 1952
 Design: S. HESS (2002)

Die bereits besprochenen typischen Effekte der Grundoperatoren Erosion und Dilatation zeigen in den ausgewählten Gehölzmusterausschnitten A–C folgendes spezifisches Filterungsverhalten (**Fig. 3.12 c**):

Im Ausschnitt A eines locker verstreuten Gehölzbesatzes eliminiert die Erosion zahlreiche Einzelpixel (Bildrauschen), welche nach der Dilatation die Form des Kreuz-Strukturelements annehmen.

Die vielen kleineren Gehölzgruppen des Ausschnitts B werden durch die Erosion zerteilt und verkleinert, wohingegen die Dilatation selbige zu größeren Objektkonglomeraten zusammenführt.

Größere zusammenhängende Pixelgruppen des Ausschnitts C werden durch die Erosion aufgebrochen und in ihrer Länge verkürzt. Die Dilatation verdickt die länglichen Gehölzbänder und verschmilzt parallele Zwischenräume.

Die zusammengesetzten Operatoren Schließung und Öffnung bewirken folgende visuelle Filterungseffekte (**Fig. 3.12 d**):

Die im Ausschnitt A sichtbaren Einzel- und kleinen Gruppenstrukturen violetter Binarisierungspixel werden in starkem Maße von der Schließung gelöscht.

Die Öffnung hingegen zeigt – infolge des Auffüllens einzelner Lücken zwischen kleinen Einzelstrukturen – ein leicht geglättetes Ergebnis.

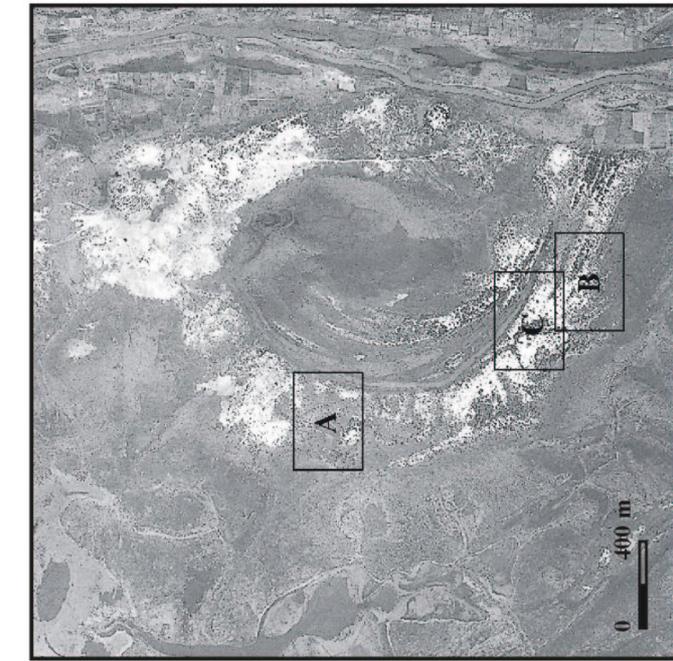
Im Ausschnitt B bricht die Schließung, im Gegensatz zum schrumpfenden, verschmälernden und zerteilenden Effekt der Erosionsfilterung, lediglich dünne Verbindungen auf sowie überstehende Anhängsel an kleinen Gehölzgruppen weg. Die Öffnung bläht die Gehölzgruppen weniger stark auf als die Dilatation, verschließt jedoch die schmalen Spalten zwischen Gehölzgruppen und legt diese zu größeren, rundlichen bis länglichen Konglomeraten zusammen.

Schmale lineare und punktuelle Einzelstrukturen werden im Ausschnitt C durch die Schließung getilgt. Formanhängsel werden gekappt, lineare Formgruppierungen verkürzt. Die Öffnung neigt zum gegenteiligen Effekt des Versiegeln von Kerben, bruchstückhaften und formparallelen Lücken mit dem Effekt der Verkittung und Verlängerung von Gehölzgebilden.

Die Grundoperatoren (**Fig. 3.12 c**) besitzen die Eigenschaft, die Formgeometrie der Gehölzobjekte durch rauhkantige Formverkleinerung infolge von Erosion sowie überglättende Formvergrößerung infolge von Dilatation in unvorteilhafter Weise zu verändern. Demgegenüber verfügen die zusammengesetzten Operatoren (**Fig. 3.12 d**) über den Vorteil einer weitestgehenden Nicht-Beeinflussung der Formgröße. Es tritt weder Schrumpfung durch Schließung noch Aufblähung durch Öffnung auf.

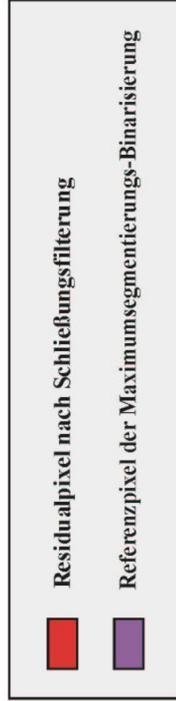
Für die Gehölzextraktion bedeutet dies, daß die Schließung, im Gegensatz zur Erosion eine effektive Eliminierung des Bildrauschens (kleiner Einzelstrukturen), ohne Verkleinerung der Objektformgröße ermöglicht. In vergleichbarem Maße erzielt die Öffnung ein eher stark lückenverschließendes, doch weniger verschmelzendes und formvergrößerndes Ergebnis als die Dilatation.

Die Schließung löst einzelne schmale Objektdetails, insbesondere solitäre Kleinstrukturen des Bildrauschens sowie überstehende Anhängsel und schmale Objektbrücken heraus. Es werden sämtliche Bildstrukturen erfaßt und getilgt, die kleiner als das Strukturelement sind (BOW, 1992).



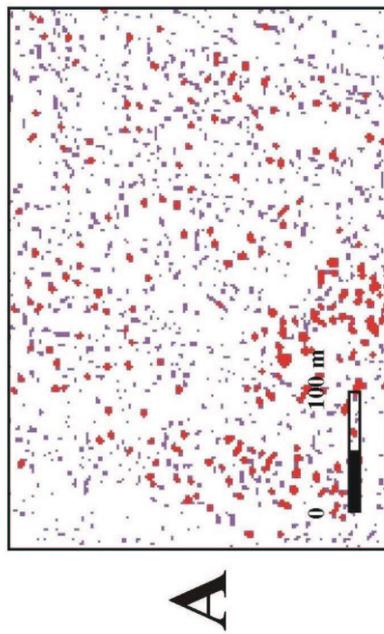
Luftbildprototyp vom 01.02.1952

Schließungsfilterung mit 3 x 3-Kreuzstrukturelement, 0°-Ausrichtung

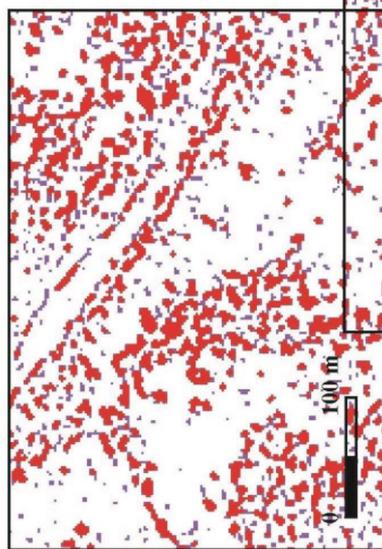


Ausschnittgröße der Filterergebnisse (A,B,C) mit 225 [w] x 160[h] Pixeln, einer Geländegröße von 450 m x 320 m, in 5,5-facher Vergrößerung entsprechend

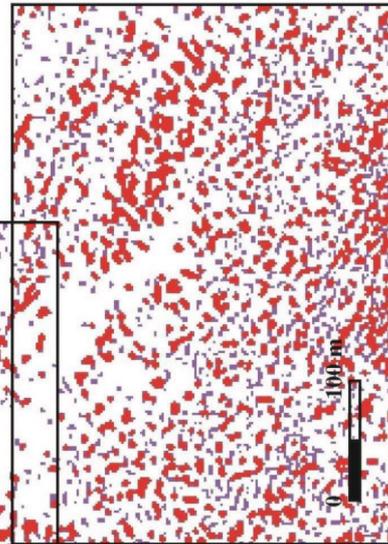
Design: S. HESS (2002)



A



C



B

Fig. 3.12 e) Schließungsfilterung verschiedener Gehölzmuster (A,B,C) am Beispiel des binarisierten Luftbildprototyps von 1952

Die Schließung (*Fig. 3.12 e*) tilgt vorwiegend solitäre Konglomerate ≤ 8 Pixel. Größere Objektstrukturen von bis zu 15 Pixeln werden nur im Falle linearer Einzelgefüge gelöscht. Darüber hinausgehende Pixelgefüge werden nur eliminiert, wenn sie lange Objektbrücken oder -anhänge darstellen.

Unter den zuvor erprobten morphomathematischen Filterungsarten stellt die Schließung – aufgrund der effektiven Herausfilterung des Bildrauschens, bei gleichzeitiger Bewahrung von Formgröße und ungefährender gehölztypischer Formgeometrie und Topologie des Gehölzmustergefüges – den vergleichsweise effizientesten Extraktionsoperator dar.

3.2.4.2.3 Vergleich von Median- und Schließungsfilterung

Zur visuellen Bewertung der Filtereffektivität – hinsichtlich Eliminierung des Bildrauschens und Extraktion von Gehölzobjekten – werden die nicht-linearen Filteroperatoren Median und Schließung in den Gehölzausschnitten A–C in Überlagerung dargestellt. Ihre Wirkung wird zusätzlich im bi-temporalen Vergleich betrachtet (*Fig. 3.13*).

Pixel, die zum Ergebnis der Median- sowie der Schließungsfilterung gehören, sind in gelber Farbe gekennzeichnet. Die Resultate der Medianfilterung (3 x 3 Pixel-Filtermatrix) werden durch die roten Pixel erkennbar, wohingegen die Resultate der Schließungsfilterung (Kreuz der Größe 3 x 3 Pixel) anhand der blauen Pixel sichtbar werden.

Die Medianfilterung glättet und rundet das Ergebnis generell stärker ab, während die Schließungsfilterung ein kantiges Musterungsabbild zurückläßt.

Bei der Eliminierung von Einzelpixeln und kleinen Pixelgruppen übertrifft die Schließungs- die Medianfilterung durch totales Herauslösen isolierter, kleinerer Pixelstörungen. Die Medianfilterung löscht Pixelgruppen < 6 Pixel komplett aus, läßt jedoch im Falle der Filterung von Gruppen ≥ 6 Pixel einzelne Restpixel dieser Größe zurück. Die Schließung vermag sogar die Objektgruppen der Größe < 8 Pixel komplett zu entfernen. Darüber hinaus bricht der Schließungsoperator schmale Verbindungsbrücken weg und bewirkt somit die Zergliederung vormals zusammenhängender Objekte.

Die Medianfilterung konserviert im Ausschnitt A von einzelnen punktuellen, z.T. linearen Kleinstrukturen einen großen Anteil an Rauschstrukturen. Mit Hilfe der Schließungsfilterung können diese erheblich reduziert werden.

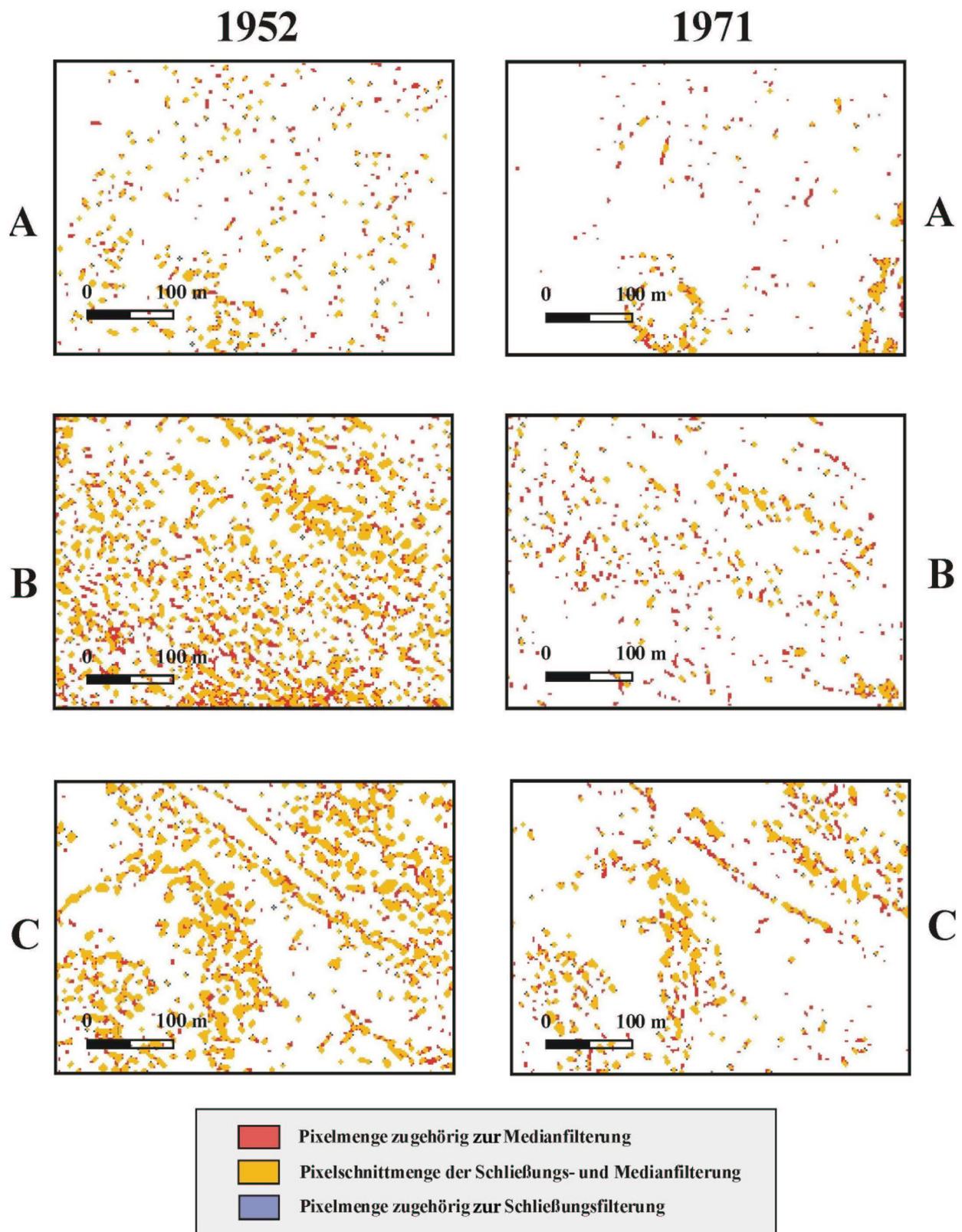
In Ausschnitt B (krümeliges Gehölzgefüge) wird deutlich, daß die Medianfilterung im Gegensatz zur Schließungsfilterung überstehende Formanhängsel nicht löscht, sondern abrundet.

Ausschnitt C zeigt schmale lineare Strukturen und Objektbrücken zwischen Gehölzgruppen, die durch die Medianfilterung konserviert oder durch Einfügen zusätzlicher Pixel glättend verstärkt, von der Schließung jedoch komplett getilgt werden

Die Gehölzbedeckung erscheint in allen drei Gehölzausschnitten (A–C) im Jahr 1971 wesentlich ausgelichteter als im Jahr 1952 mit einer scheinbar stärkeren Zunahme von Einzelstrukturen zu Lasten vormals vorhandener Gruppenstrukturen.

Entgegen der allgemein zu konstatierenden Gehölzdezimierung insbesondere solitärer Einzelstrukturen verfügt im Ausschnitt A eine hügelartige Erhebung im Jahr 1952 über einen lediglich angedeuteten, 1971 bereits deutlich ausgebildeten verdichteten Gehölzring. Ausschnitt B ist durch deutliche Auslichtung der Gehölzmuster kleinerer Gruppen, Ausschnitt C durch Schrumpfung und Ausdünnung zusammenhängender größerer Gruppenstrukturen charakterisiert.

Die Beispielausschnitte A–C deuten zwischen 1952 und 1971 insgesamt auf tendenzielle Auflichtung und Zurückbleiben überwiegend solitärer Gehölzgruppen hin.



Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.13 Bi-temporaler Vergleich zwischen Median- und Schließungsfilterung von Gehölzmustern (A,B,C) der Jahre 1952 und 1971

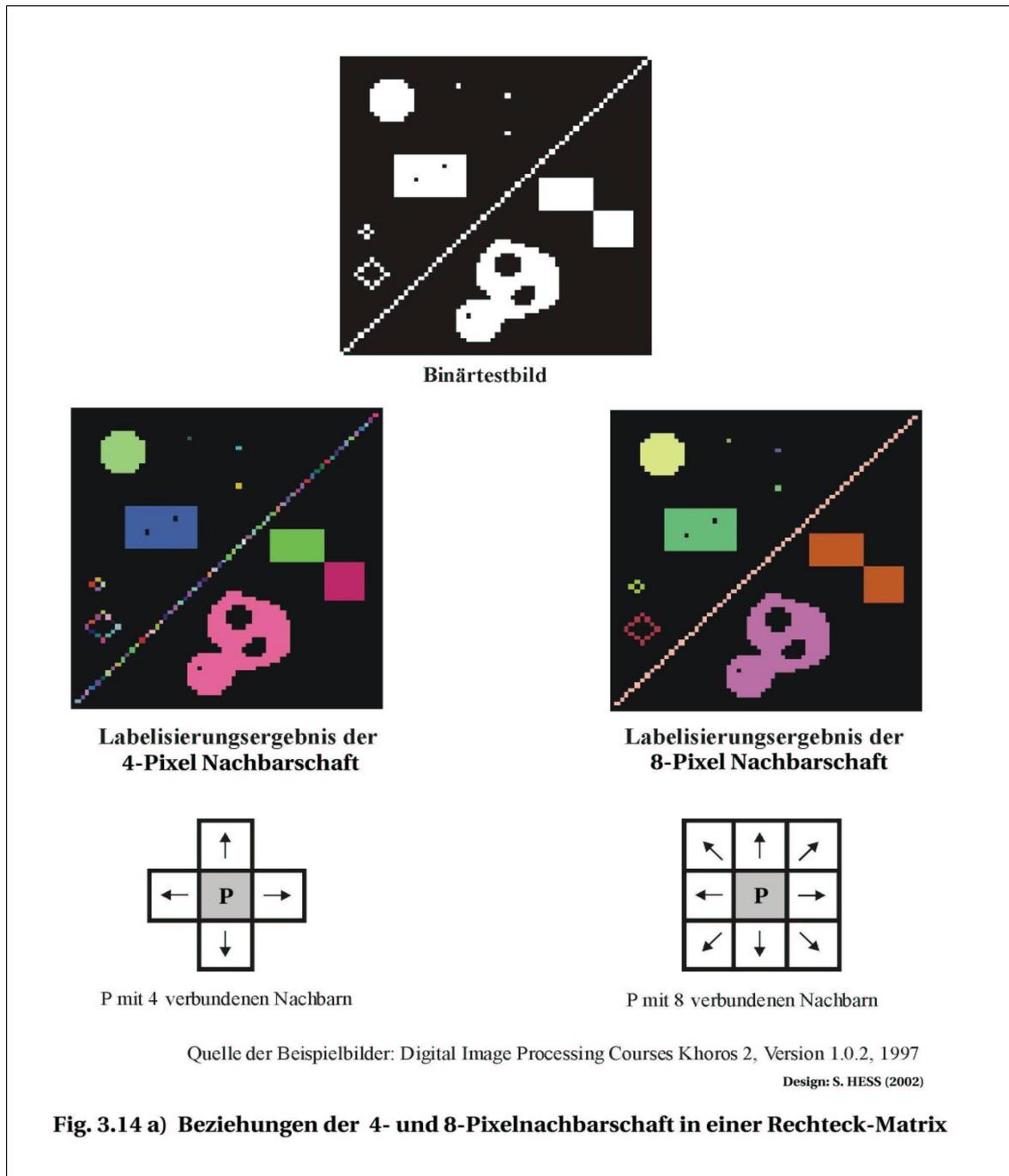
Der im visuellen Luftbildvergleich, gegenüber der Medianfilterung bestätigte intensivere Eliminationseffekt des Bildrauschens überwiegend isolierter, kleiner Einselstrukturen sowie die geringere Tendenz zur Veränderung der Objektform stellt die Schließung als multitemporal robuste Filterungsmethode zur Extraktion von Solitärgehölzen und kleinen Gehölzgruppen heraus.

3.2.4.3 Digitale Ermittlung der Gehölzdichte

Der letzte Methodenschritt der rechnerischen Auszählung und Dichteermittlung von Gehölzobjekten in einer Matrix mit vordefinierter Rasterunitsgröße verlangt eine Durchnummerierung der einzelnen Gehölz-Pixelgruppen innerhalb der betreffenden Luftbildausschnitte. Hierzu wird in jedem Luftbildausschnitt eine Etikettierung (labeling) prozessiert. Dabei wird jedes Bildpixel auf die topologische Zugehörigkeit zu einer Objekteinheit (Pixelgruppe) geprüft. All jenen Pixeln, die die demselben Objekt zugehörig erkannt werden, wird als Etikett- oder Labelnummer jeweils der gleiche Zahlenwert zugewiesen. Pixel verschiedener Objekteinheiten erhalten Etikettwerte in durchlaufender Nummerierung. Die Größe eines Objektes lässt sich durch die Anzahl der Pixel mit gleicher Labelnummer ermitteln. Die in Abhängigkeit des a priori bestimmten Nachbarschaftsbeziehungsstyps erzielten Etikettierungsergebnisse werden im Demonstrationsbild der *Fig. 3.14 a* deutlich.

Es lassen sich zwei weit verbreitete Rastergitter-Topologien unterscheiden: Bei der 4-Pixel-Nachbarschaft wird über das Zentralpixel „P“ (*Fig. 3.14 a*) die Objektzugehörigkeit in vier Richtungen geprüft; d.h. alle sich in diesen vier Gitterrichtungen befindenden Pixel werden mit derselben Labelnummer belegt. Bei der 8-Nachbarschaft findet die gleiche Zuordnungsregel in acht Gitterrichtungen Anwendung. Folglich bewirkt die Labelisierung der Beispielbilder in *Fig. 3.14 a* in einer 4-Pixel-Nachbarschaft die Ausgliederung einer wesentlich größeren Zahl an Objekten (86 Objekte + Hintergrundobjekt) als in einer definierten 8-Pixel-Nachbarschaft (10 Objekte + Hintergrundobjekt). Insbesondere benachbarte Pixel, die über die Eckkanten in Verbindung stehen, werden von der 4-Pixel-Nachbarschaft als getrennte Objektpixel markiert, von der 8-Pixel-Nachbarschaft hingegen zu einer linearen Objekteinheit zusammengefasst.

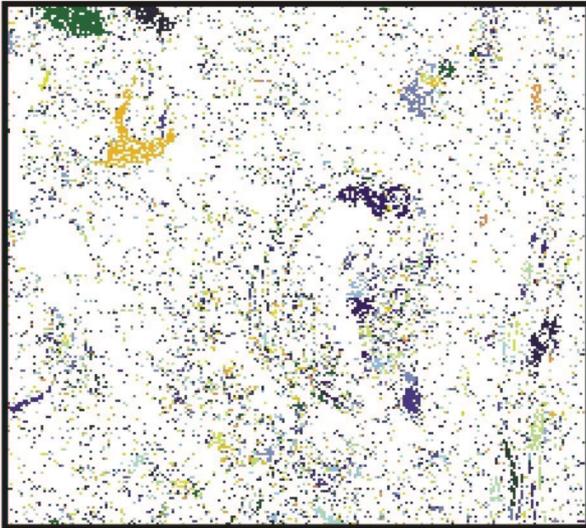
Zur Etikettierung des Inventars schließungsgefilterter Gehölzobjekte wurde die 8-Pixel-Nachbarschaftsbeziehung ausgewählt. Der Einsatz einer 4-Pixel Nachbarschaftsbeziehung kann, aufgrund der im untersuchten Sahelgebiet überwiegend als isolierte Gebilde auftretenden Gehölze, kein objektdiskriminierendes und eindeutigeres Zuweisungsergebnis hervorbringen. Sie wäre dann zielführender, wenn z.B. jedes einzelne Pixel einer einfachen, über die Pixelecken verbundenen, offenen oder geschlossenen Pixellinienstruktur als Einzelgehölz markierbar wäre. Solche selten vorkommenden – in den bearbeiteten Bildausschnitten gehölzuntypischen – Pixelliniengefüge werden durch die Schließungsfilterung bereits im Vorfeld gelöscht.



Die mittels einer 8-Pixel-Nachbarschaft erzeugten und in einer 8-bit Pseudocolorierung mit 256 Farben dargestellten ungefilterten Labelergebnisse (*Fig. 3.14 b*) werden den schließungsgefilterten Resultaten am Beispiel des kontrastschwächsten Luftbildes von 1981 gegenübergestellt.

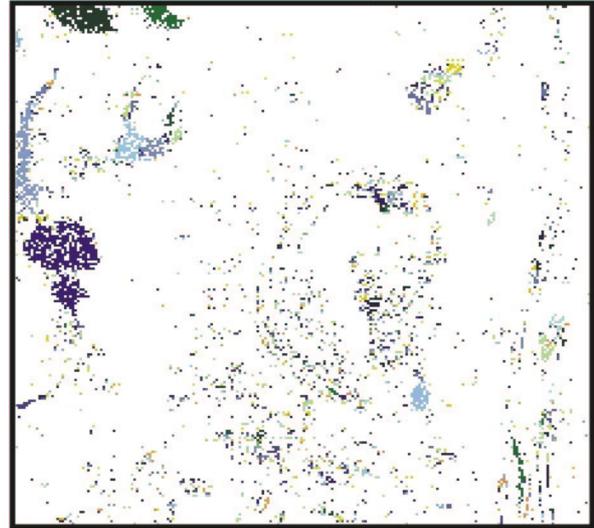
ETIKETTIERUNG (4-Pixel Nachbarschaft)

Anzahl der Labelcluster pro Ausschnitt = 79.233



ungefiltert

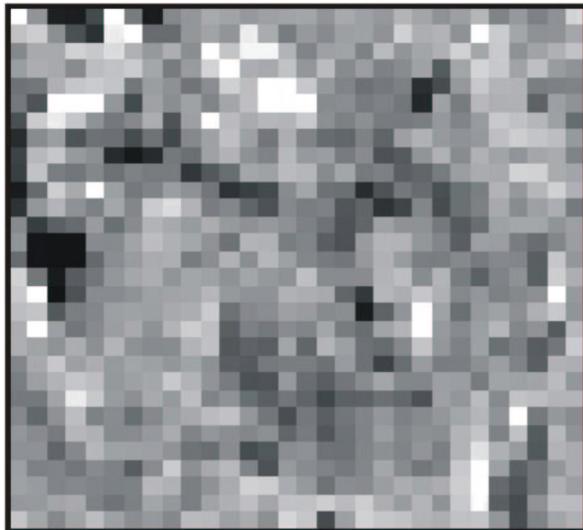
Anzahl der Labelcluster pro Ausschnitt = 11.701



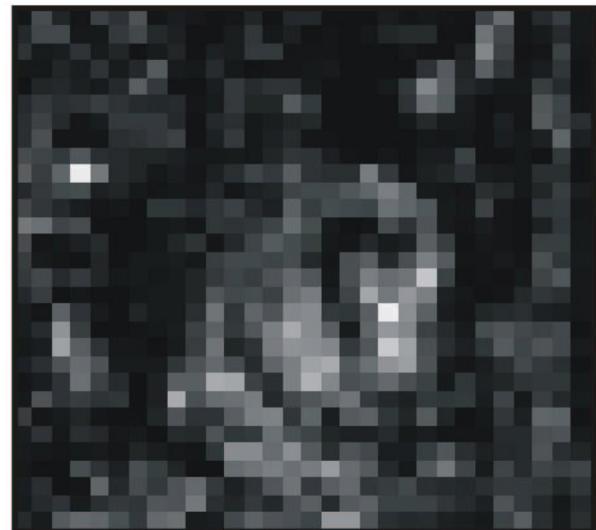
schließungsgefiltert

Zufalls-Farbecolorierung der Labelcluster (8-Pixel Nachbarschaft)
(Mehrfach-Farbbelegung infolge 8-bit Farbtiefe)

RASTERMATRIX DER GEHÖLZOBJEKTDICHTE



ungefiltert



schließungsgefiltert



Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.14 b) Vergleich des ungefilterten und des schließungsgefilterten Ergebnisses der Gehölzdichtevertelung am Beispiel des Luftbildes von 1981

Tab. 3.2 belegt, daß die Schließungsfilterung im Vergleich zu den jeweils korrespondierenden ungefilterten Bildausschnitten im Luftbild von 1952 eine Reduktion der Labelclusterzahl auf 1/4, in jenen von 1971 auf 1/8 sowie im Luftbildexemplar von 1981 auf 1/7 bewirkt.

Diese erhebliche Reduktion von Einzelpixeln und kleinsten Pixelgruppen nach der Schließungsfilterung ist als Ergebnis einer effektiven Rauschunterdrückung zu deuten.

Jahr der Luftbildaufnahme	ungefiltertes Luftbildresultat		schließungsgefiltertes Luftbildresultat	
	Gesamtzahl der Labelcluster pro Luftbildausschnitt	Maximale Anzahl der Gehölzobjekte pro 1 ha	Gesamtzahl der Labelcluster pro Luftbildausschnitt	Maximale Anzahl der Gehölzobjekte pro 1 ha
1952	53.126	103	13.022	48
1971	49.906	124	6.239	29
1981	79.233	146	11.701	54

Tab. 3.2 Labelclusterzahlen der ungefilterten und schließungsgefilterten Bildausschnitte

Für die Kronenflächen ($\pi \times (d/2)^2$) der im Sahelraum weit verbreiteten *Acacia*-Gehölze wird je Gehölzindividuum ein Spektrum von 20 m² bis max. 110 m² nachgewiesen (FRANKLIN & STRAHLER, 1988). Im 2,1 m-Pixelraster der gescannten multitemporalen Luftbilder entsprechen diese Kronenflächen einer Gruppe von ca. 5 bis 25 Pixeln. Diesbezüglich bemessen GIJSBERS et al. (1994) den auf einem Luftbild im Maßstab 1/50.000 detektierbaren Mindestkronendurchmesser eines Baumes auf ca. 50 m², was auf dem hier verwendeten Luftbildmaterial einer näherungsweise quadratisch angeordneten Gruppe von ca. 11–12 Pixeln gleichkäme. Diese Definition unterstützt das Ergebnis und bestätigt die Wirkungsweise der Schließungsfilterung. Mit Blick auf die Ergebnisse von GIJSBERS et al. (1994) bedeutet dies für die digital automatisierte Auswertung, daß es sich bei den kleineren Gruppen mit weniger als 11 Pixeln entweder um junge Bäume oder vielmehr um beim Scannen ins Bild eingebrachte Störungen handelt.

Auch unter den von der Schließungsfilterung effektiv als Bildrauschen eliminierten Strukturen < 8 Pixel ist ein gewisser Anteil der fehlerhaft herausgefilterten, kleinen Pixelgruppierungen solitären Gehölzindividuen zuzuweisen. Eine Gewichtung dieses sowie des allgemeinen Fehlers ist ohne geländeverifiziertes Luftbildmaterial und simulierende Experimente jedoch nicht einschätzbar.

Zur Visualisierung einer kohärenten Graustufenskalierung wurden die Hektarrastergitter-Auszählungen der ungefilterten sowie der schließungsgefilterten Labeldichtewerte einer linearen 8-bit-Stufung mit 256 Grautönen zugewiesen. In Abhängigkeit der erzielten Maximalwerte (**Tab. 3.2**) konnte das ungefilterte labelreichere Ergebnis mit 128 Graustufen, das schließungsgefilterte labelärmere Ergebnis hingegen mit 64 Graustufen belegt werden. Die Erhöhung um ein Gehölz pro Hektar-Raster geht mit der Zunahme einer 8-bit-Graustufe einher. Das ungefilterte Ergebnis fällt durch die Besetzung der höheren Graustufenränge heller aus und beschreibt gegenüber dem stark gedunkelten schließungsgefilterten Ergebnis eine sehr diffuse, ungerichtete Verteilung mit einer höheren Gehölzdichte.

Die auf Geländeaufnahmen beruhenden Erfahrungswerte nach GIJSBERS et al. (1994) belegen für den Sahelraum Dichtewerte der Gehölzindividuen pro Hektar im Bereich von 1–88 Baumgehölzen je Hektar. Von BREMAN & KESSLER (1995) selbst beobachtete sowie von anderen Autoren recherchierte Geländekennwerte bestätigen das bereits vorgenannte Dichteintervall für verschiedene Sahelländer mit 1 bis maximal 90 Bäumen pro Hektar. Die auf dem untersuchten multitemporalen Luftbildausschnitt durch Schließungsfilterung erzielten Maximalwerte der Gehölzobjektdichte ordnen sich mit 29–54 Gehölzobjekte/ 1 ha in den unteren 2/3-Bereich der in der Literatur bezifferten Extremwertspanne ein.

Die Methode der morphomathematischen Schließungsfilterung stellt ihre Leistungsfähigkeit insbesondere für eine Sahelgehölzbedeckung unter Beweis, die sich überwiegend aus Einzelgehölzen und isolierten kleineren Gehölzgruppen konstituiert. Dennoch beinhalten die Resultate über- und unterbewertende Fehler. Es wird unterstellt, daß diese einander insgesamt neutralisieren. So wird z.B. die überbetonte Herausfilterung von Kleinstgehölzen im Zuge der Eliminierung des Bildrauschens, die mangelhafte Diskriminierung zusammenhängender Gehölzgruppen durch die Fehlerfassung von Nicht-Gehölzobjekten kompensiert. Selbst wenn die Fehlerfassung von Nicht-Gehölzobjekten, wie etwa der Feuchtflächen, visuell deutlich sichtbar wird, fällt sie zahlenmäßig nur gering ins Gewicht, da die großen, zusammenhängenden und durch die Schließung kaum aufgebrochenen Flächen einzelne, oft rasterübergreifende Labelcluster belegen. Die Fehlerfassung von Nicht-Gehölzobjekten wie Siedlungs- und Dorfbauten fällt hingegen zahlenmäßig stärker ins Gewicht.

Hinsichtlich der Rauschunterdrückung sowie der Erfassung von größeren zusammenhängenden, unregelmäßig geformten, aus mehreren Pixeln zusammengesetzter Gruppierungen zeigt der Ansatz eine eher wertunterschätzende Tendenz. Inmitten linearer, fließgewässerbegleitender Gehölzbänder oder großer Gehölzverbände ist beispielsweise keine eindeutige Ausdifferenzierung von Einzelgehölzindividuen möglich, so daß eine irrtümliche Markierung als geschlossene Objekteinheit nicht ausgeschlossen werden kann.

Die aus der Schließungsfilterung hervorgegangenen, als Labelcluster etikettierten Gehölzobjekte, wurden in einem Hektar-Quadratgitter maschinell ausgezählt. Jedes Hektar-Rastergitter entspricht in der grautonskalierten Gehölzdichte-Rastermatrix einem Quadratfeld von 50 x 50 Pixeln, was einer Fläche von ca. 100 x 100 m² entspricht. Die von schwarz nach weiß aufhellenden Grauwerte gehen in allen drei Rastermatrizen (*Fig. 3.14 c*) mit einer adäquaten Zunahme der Gehölzdichtewerte von 0 bis maximal 64 Gehölzobjekten/ha einher.

In allen drei Zeitschnitten heben sich aus dem geschwärzten Basisgrund der Gehölzobjektdichte-Rastermatrizen in mehr oder minder starker Intensitätsabweichung ähnliche Verteilungsstrukturen grauer Gehölzdichte-Raster heraus. Der Vergleich der Grundhelligkeit selektiert deutlich den Gehölzstatus von 1971 in seinem extrem gedunkelten, gehölzarmen Erscheinungsbild. Die Gehölzlabeldichte-Matrix von 1952 sticht durch die größte Anzahl grauer Gehölzdichte-Raster hervor. Jene von 1981 zeigt die hier höchste Gehölzdichte durch helle Grauwert-Raster konzentriert auf den Zentralbereich der Fluvialschleife.

Auffallend ist in den Gehölzdichtebeständen von 1971 und besonders von 1981 ein, die Fluvialschleife umringendes Band geschwärzter Rasterquadrate, welches in diesem Bereich als Indikator für Gehölzarmut oder fehlende Gehölze zu interpretieren ist.

Abbildung *Fig. 3.14 d* zur Isoflächendarstellung und der direkten Superposition auf zugehörigem Luftbildhintergrund ermöglicht die differenziertere Betrachtung und räumliche Lokalisierung der Gehölzdichtezustände. Zur visuellen Prüfung wird der automatisiert zugewiesenen Gehölzdichteverteilung und insbesondere der Ausdehnung der gehölzdichtesten Flächen zunächst die zusammengefaßte Klasse mit mehr als 5 Gehölzobjekten/ha in türkiser Färbung direkt mit dem jeweiligen Luftbildhintergrund überlagert.

Anschließend werden die den einzelnen Gehölzdichteklassen zugewiesenen Labelrasterwerte zur Austrassierung homogener Isoflächen mittels der Nächsten-Nachbar-Methode interpoliert. Die Differenzierung von insgesamt 7 Dichteklassen mit zwischen 0 bis maximal 54 Objekten/ha streuenden Gehölzlabeldichtewerten folgt einer Klassenschrittweite von 10 Gehölzen pro ha. Die Ausgliederung einer zusätzlichen Klasse mit weniger als 5 Gehölzen pro ha charakterisiert die gehölzarmen Flächen.

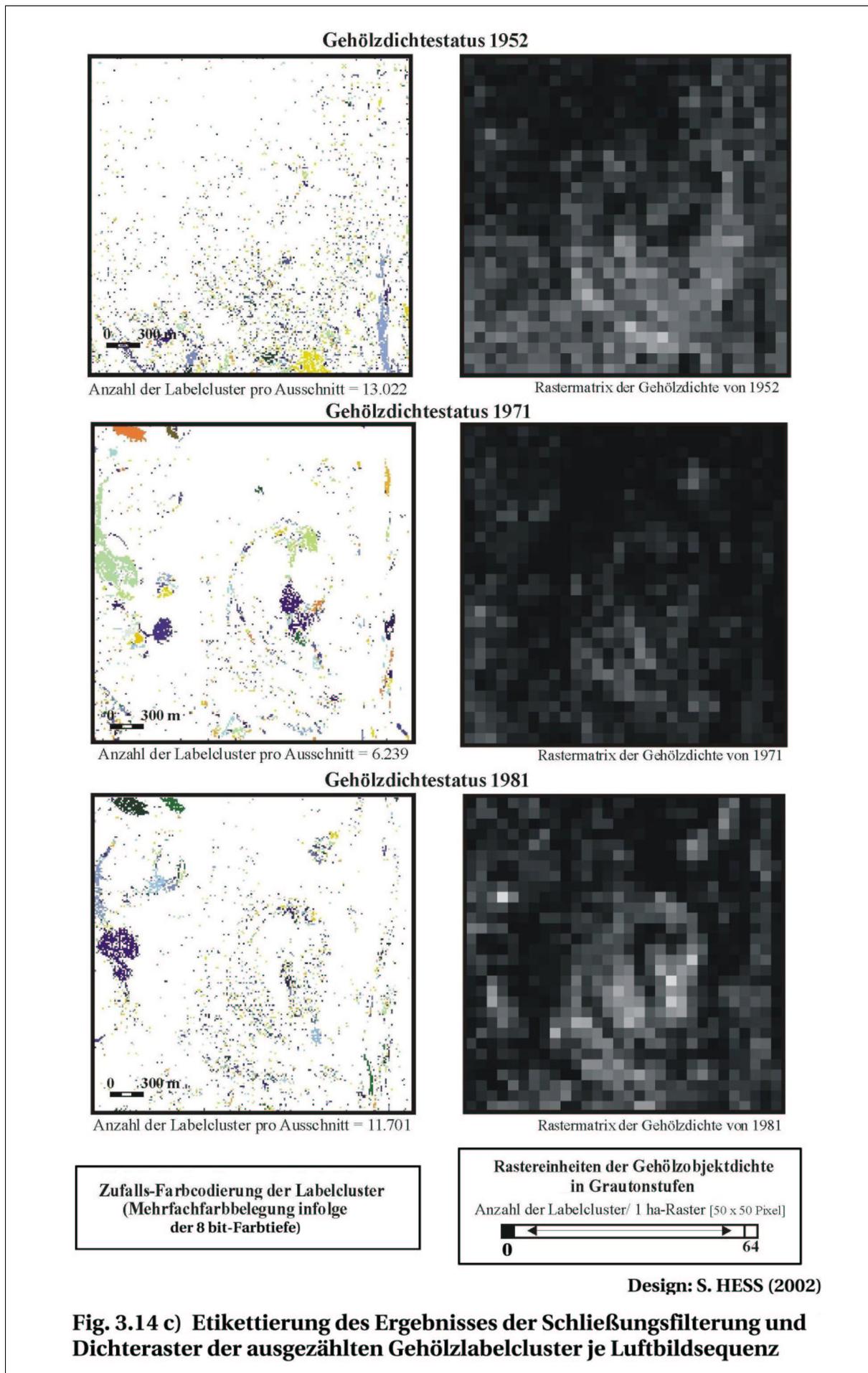
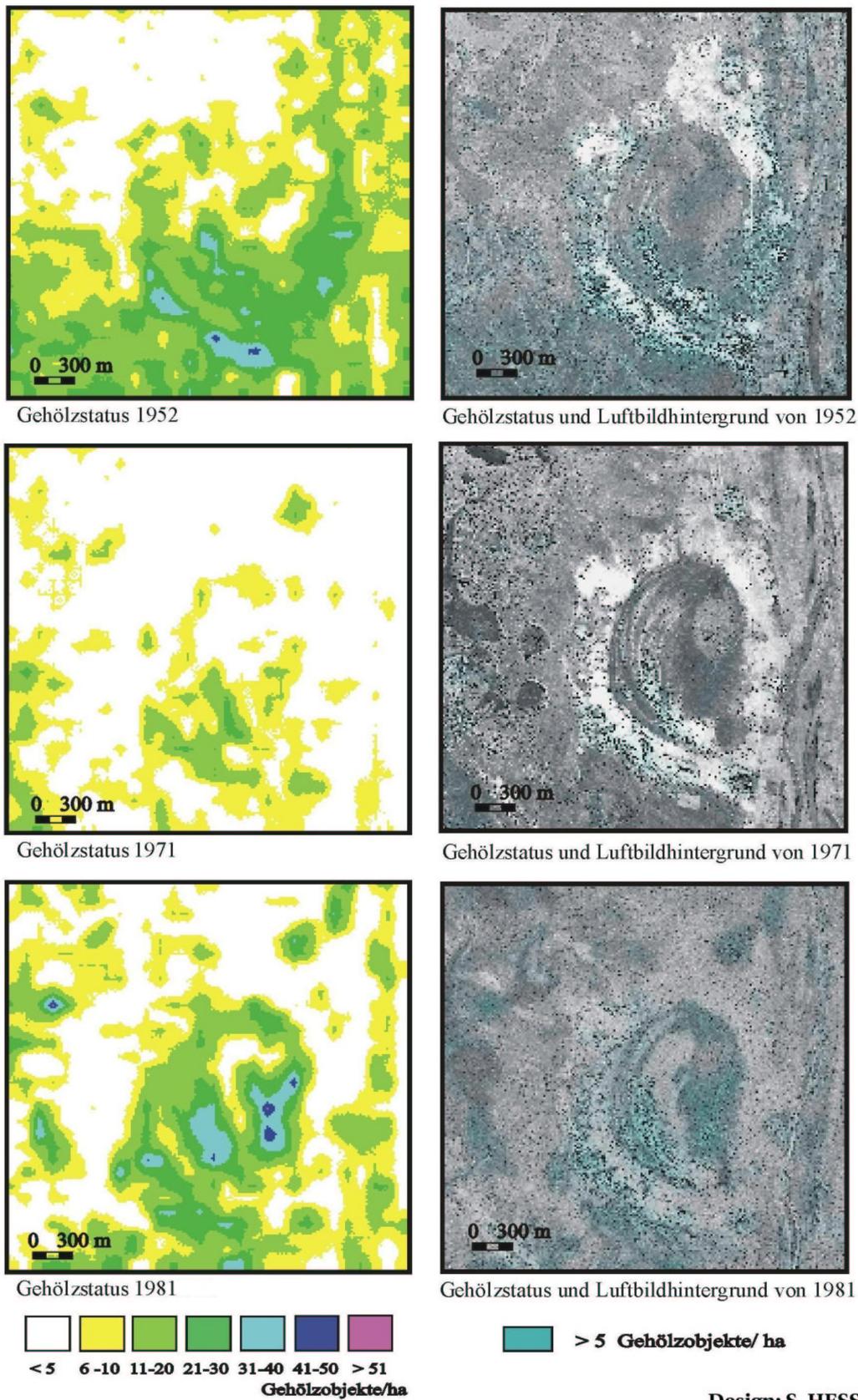


Fig. 3.14 c) Etikettierung des Ergebnisses der Schließungsfilterung und Dichteraster der ausgezählten Gehölzlabelcluster je Luftbildsequenz



Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.14 d) Multitemporale Stati der Gehölzobjektdichte nach Schließung in Isoflächendarstellung und Superposition auf jeweils zeitlichem Luftbildhintergrund

Die entwickelte Methodik scheint in allen drei Luftbilddausschnitten die Gehölzkonzentrationen > 5 Gehölzobjekte/ha inklusive der Fehlannahmen in kohärenter Weise zu erfassen. Darüber hinaus treten anhand dieser graphischen Darstellungsform die angedeuteten Veränderungstendenzen der multitemporalen Gehölzzustände unmittelbar in Erscheinung.

Die differenzierte Betrachtung gemäß der vordefinierten Gehölzdichteklassen zeigt in allen Ausschnitten ein Gefüge einzelner konzentrischer Kerne höchster Gehölzdichtewerte, welche nach außen hin unregelmäßig ausfransen. In allen Ausschnitten werden die höchsten Gehölzdichtekonzentrationen durchgängig auf den Wällen im Mündungsbereich der Fluvialschleife erzielt; im Jahre 1952 mit 40–50 Gehölzen/ha, 1971 mit 10–20 Gehölzen/ha und 1981 mit 30–40 Gehölzen/ha.

Darüber hinaus nehmen im Jahr 1952 die Klassen > 20 –30 und > 30 –40 den größten Flächenanteil ein. Das Fehlen der Spitzenklasse > 30 Gehölzobjekte/ha korreliert mit der im Zeitschnitt von 1971 zu verzeichnenden geringen Gehölzbedeckungsdichte. Den größten Flächenanteil nehmen die Klassen der geringsten Gehölzdichte mit < 5 Gehölzen/ha und > 5 –10 Gehölzen/ha ein.

Im Ausschnitt von 1981, in welchem alle Klassen vertreten sind, gewinnt die Klasse der über 10–20 Gehölze/ha im Vergleich zu 1971 an Fläche.

1981 weist das Gesamtgefüge aller Klassen im Gegensatz zum zerfransten Gefüge von 1952 und zum kontrahierten Gefüge von 1971 eine konzentrische Geometrieausprägung auf.

Mit Hilfe von Differenzbildern werden die Tendenzen der Gehölzdichtedynamik (**Fig. 3.15**) für drei Evolutionsetappen – die Teiletappen 1952–1971 und 1971–1981 sowie die Gesamtetappe 1952–1981 – herausgestellt.

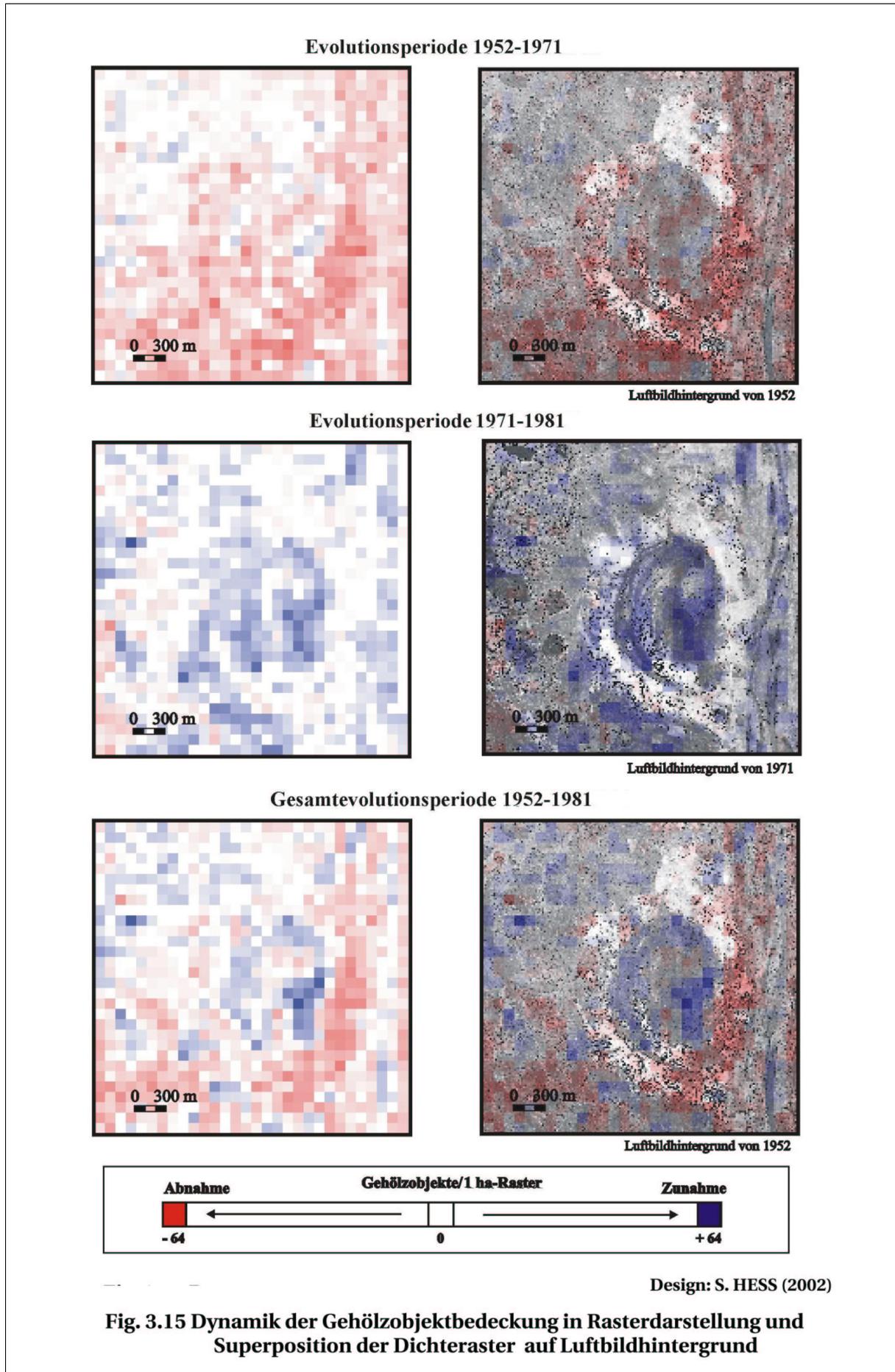
Zur räumlich präzisen Präsentation der im Hektarrastergitter errechneten Dichtewerte wird die Rasterdarstellung bevorzugt. Dort wird die Gehölzdichte–Abnahme durch eine zwischen den Werten -1 bis -64 zunehmende Rottönung, die Gehölzdichte–Zunahme durch eine zwischen den Werten $+1$ bis $+64$ zunehmende Blaufärbung gekennzeichnet. Die Gehölzdichte–Stagnation ist durch den weiß gehaltenen 0–Wert definiert.

Die Evolutionsperiode 1952–1971 wird im gesamten Luftbilddausschnitt fast ausschließlich von Gehölzdichteabnahme dominiert, während von 1971–1981 eindeutig die gegenläufige Dynamik einer Gehölzdichte–Zunahme erkennbar wird.

Die Regression der Gehölzdichte von 1952–1971 konzentriert sich auf die Wallbereiche und Regionen südlich der Fluvialschleife, wo höchste Abnahmewerte zu verzeichnen sind.

Die Progression der Gehölzdichte in der Periode 1971–1981 betrifft vor allem die Beckenzone im Inneren der Fluvialschleife, in der sich dem Luftbildanalyseergebnis zufolge erneut Gehölze angesiedelt haben. Dort werden die höchsten Zunahmewerte im gesamten Luftbilddausschnitt erzielt. Zudem ist eine Gehölzzunahme entlang von Fließ- und Stehgewässern zu verzeichnen.

Die zwischen 1952 und 1971 weiter in den Süden und zwischen 1971 bis 1981 weiter in den Westen der Fluvialschleife vorgedrungenen Agrarparzellen lassen keine direkte anthropogene Überformung der Gehölzdynamik erkennen. Die vergleichsweise schwachen Veränderungen der Gehölzdynamik im Bereich der Agrarparzellegefüge halten tendenziell mit der allgemeinen Dynamikbewegung der übrigen Flächen mit.



Zusammenfassend kann konstatiert werden, daß auf dem Luftbildmaterial im Zeitraum der gesamten Evolutionsperiode von 1952 bis 1981 im Bereich der Fluvialwälle eine deutliche Abnahme, in Becken- und Senkenbereichen eine Zunahme der Gehölzdichte erkennbar ist.

Die anhand des Bildmaterials belegte Abnahme der Gehölzobjektdichte zwischen 1952 und 1971 deutet auf anthropogen verursachte Veränderung aufgrund von Zunahme oder Intensivierung der Landnutzung hin.

Die Zunahme der Gehölzdichte 1971 bis 1981 ist insbesondere in senkenartigen Reliefbereichen möglicherweise als Folge der Dürren der 70-er Jahre sowie einer generell zunehmenden Trockenheit zu interpretieren. Die geringere Überschwemmungsintensität brachte darüber hinaus vermutlich infolge der zeitlich eingeschränkten Überflutung und günstigerer Grundwasserbedingungen auf ehemals regelmäßig überschwemmten Flächen des inneren Deltabereichs, neue und potentielle Gehölzbesiedlungsflächen hervor.

Auch andere Autoren (BILLE, 1977; BOUDET, 1979) verzeichnen zwischen 1970 und 1980 eine Progression der Gehölzbedeckung im südlichen Nordsahelraum. Nach BREMAN & KESSLER (1995) ist diese möglicherweise auf den durch Vegetationsdegradation erhöhten Abfluß des Niederschlagswassers zurückzuführen. Eine Zunahme des Phanerophytenbesatzes als Folge einer Kulturlandschaftsdegradation (ANHUF et al., 1990) kann auf dem vorliegenden Bildmaterial nicht belegt werden.

Die hier gefundenen Ergebnisse und ihre Illustration sprechen das Potential eines neuartigen Indikatormethode an und sind als erste Annäherungen an einen methodischen Ansatz zur quantitativen Messung der Landschaftsdegradation zu werten. Zur Verifizierung der Hypothesen ist die zusätzliche Auswertung historischen Datenmaterials anderer semi-arider Räume erforderlich.

3.2.5 Automatische Extraktion von Kantenstrukturen

Beim Zusammenfallen von Kanten mit Positionen des lokalen Maximums geometrischer und physikalischer Signalwechsel haben sich Methoden zur automatischen Kantenextraktion im Bereich der Mustererkennung und 3D-Bildanalyse erfolgreich etablieren können (DIP Courses, KHOROS 2.2, 1993–1997).

Die nachfolgend vorgestellten Luftbildexperimente zur Analyse des Agrarstrukturgefüges versuchen, einen weiteren Indikator anthropogen bedingter Landschaftsveränderungen hervorzubringen. Dazu wird die Extraktion der Parzellenränder von vorwiegend traditionell bewirtschafteten Überflutungs- oder Schwimmreisflächen in den weiten Überschwemmungsgebieten des Binnendeltas angestrebt. Die Verwendung von Reissorten variierender Wachstumszyklen ermöglicht den Reisanbau in den unterschiedlichsten Überschwemmungsniveaus des Kleinreliefs (MOHR, 1969). Während der Trockenzeit werden die abgeernteten Naßreisparzellen als Weideflächen genutzt (BARTH, 1986). Die zu dieser Zeit aufgenommenen Luftbild-Zeitschnitte zeigen den Zustand der Feldparzellen Anfang Februar (1952, 1971) in der Phase der Vegetationsruhe oder bereits vorbereitender Erdarbeiten. Die Aufnahme Anfang Mai (1981) kennzeichnet den Beginn der Aussaat und Umpflanzung in die sukzessive austrocknenden Seen (MOHR, 1969).

Die Parzellen heben sich von ihrer Umgebung durch eine mehr oder weniger starke Variabilität des Grautonkontrasts ab. Die Grautonabweichungen lassen unterschiedliche Feuchtigkeitsverhältnisse oder Stadien der Feldbearbeitung vermuten. Andere Parzellen sind aufgrund ihrer ränderbegleitenden Gehölzumsäumungen deutlich austrassierbar. Der überwiegende Teil der Parzellen läßt sich erst nach Vergrößerung am Bildschirm, anhand der sie abgrenzenden, schmalen Wege oder baulichen Flutkontrollanlagen erkennen. Hingegen stellt sich die Identifikation von Schwimmreisflächen, inmitten der im ganzjährig wasserführenden Seebecken anhand der Luftbilder als äußerst schwierig bis unmöglich heraus.

Anhand dieses Fallbeispiels soll das Leistungsvermögen maschineller automatisierter Methoden zur effizienten Erfassung des Parzellierungs- und Formgefüges von Agrarfluren auf hochauflösendem Luftbildmaterial vorgestellt werden. Alternativ zur üblichen radiometrischen Detektion von Agrarflächen auf multispektralem Satellitenmaterial werden hier lineare Gradienten-Filterungsmethoden zur Erfassung der Agrarrandstrukturen auf einkanaligen panchromatischen Luftbildern experimentiert.

3.2.5.1 Agrarkantenextraktion mittels Gradientenoperatoren

Die linien- und kantenorientierte Segmentierung von Strukturinformationen zum Parzellenkantengefüge ist nicht mittels punkthafter Operationen, sondern durch die Betrachtung der Grauwertrelationen benachbarter Pixel, d.h. Untersuchung der Bildumgebung auf Bilddiskontinuitäten, wie z.B. Grauertrampen oder -sprünge, zu erzielen (JÄHNE, 1995).

Eine Grauwertkante ist durch den Betrag und die Vorzugsrichtung des Grau- oder Helligkeitsgradienten charakterisiert. So weist ein homogener Bildbereich einen niedrigen Gradienten mit einem 0 angenäherten oder erreichenden Wert auf, während eine Kante durch einen hohen Gradienten definiert ist (HABERÄCKER, 1991).

Da eine Grauwertkante oftmals breiter als ein Bildpixel ist, entscheiden hinsichtlich der Kantenzugehörigkeit eines Pixels die umliegenden Nachbarschaften mit. Der errechnete Mittelwert des Gradientenbetrags in einem vordefinierten Filterfenster wird mit den in der 4-Pixel- oder 8-Pixel-benachbarten Umgebung berechneten Mittelwerten verglichen. Liegt beispielsweise der Mittelwert über dem festgesetzten Gradienten-Schwellenwert, wird das betreffende Pixel der Kante zugeordnet. Das Ergebnis zeigt schließlich im graphischen Resultat Linien, die als beidseitig von parallelen, nicht zu weit voneinander liegenden Kanten begrenzter Gebilde, definiert sind (HABERÄCKER, 1991).

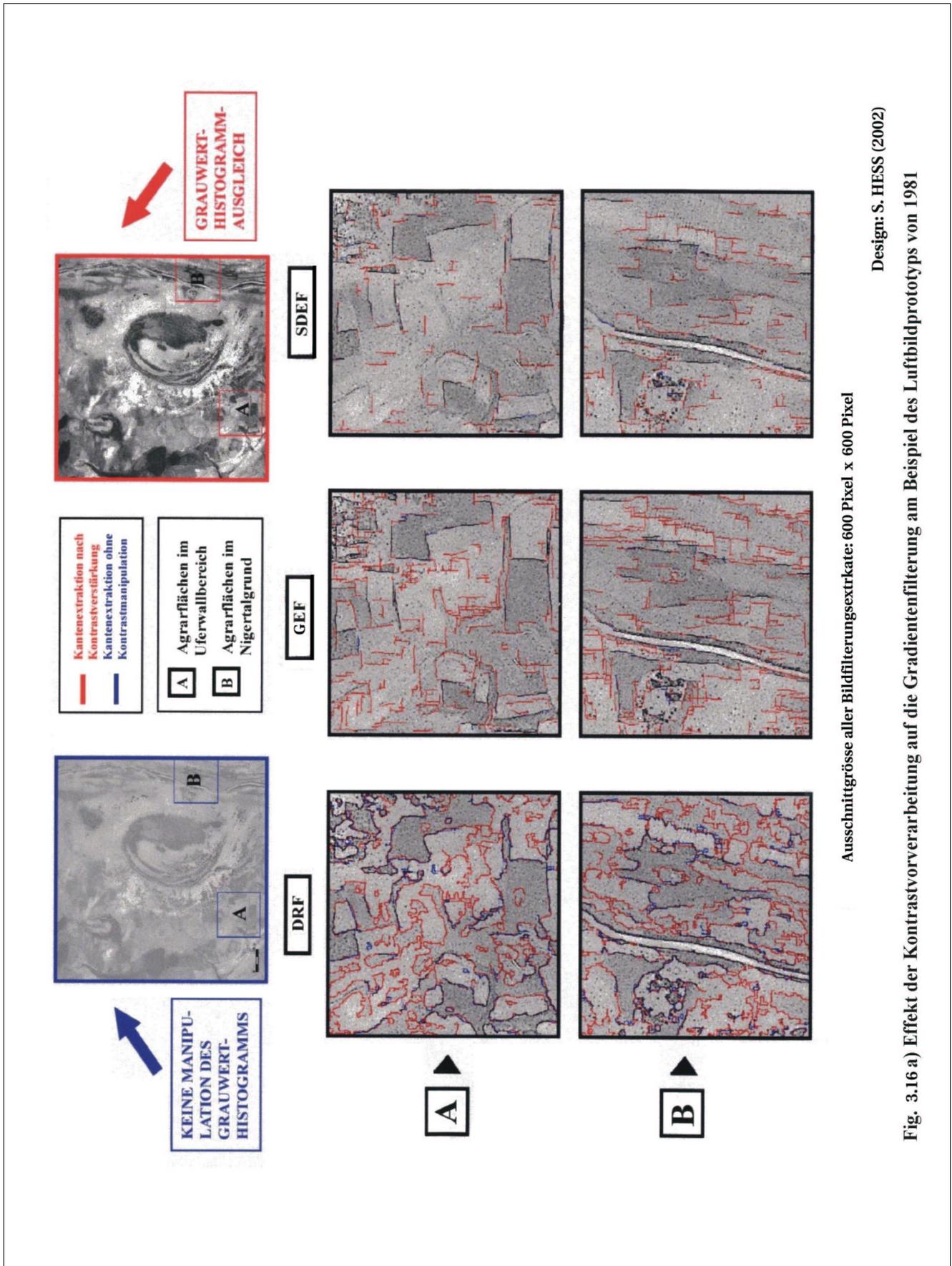
Während ein linearer Glättungsfilter das Rauschen der hohen Bildfrequenzen durch Mittelung größerer Pixelnachbarschaftsräume (Integrationsrechnung) herabsetzt, wird im Fall der Extraktionsfilterung (Differentialrechnung) eine vorbereitende Hochpass-Filterung zur Hervorhebung und Schärfung der Kantenstrukturen erforderlich, welche jedoch unerwünschte Rauschstrukturen mitverstärkt.

Die einfachste Methode stellt die Berechnung der absoluten oder der auf der Euklidischen Distanz basierten maximalen Differenz direkt benachbarter Bildpunkte in x- und y-Richtung dar. Gegenüber dem Bildrauschen verhält sich jedoch insbesondere diese Methode sehr anfällig. Zu dessen Dämpfung wird daher alternativ die erste Ableitung einer stetigen Funktion oder Variablen in x- oder y-Richtung angewandt oder der Nulldurchgang der zweiten Ableitung berechnet. Dieser wird nachfolgend durch die symmetrischen Ableitungsoperatoren nach CASTAN (1993-97) vorgeführt.

Die richtungsabhängigen lokalen Differentiationsoperatoren verschiedener Algorithmen, wie z.B. Sobel, Laplace, Prewitt, Roberts und Isotropic, erweisen sich, aufgrund ihrer Rauschanfälligkeit und der betonten Hervorhebung ausschließlich vertikaler und horizontaler Grauwertgradienten sowie der unpräzisen Lokalisierung der Kanten, allesamt als weniger geeignete Extraktionsfilter.

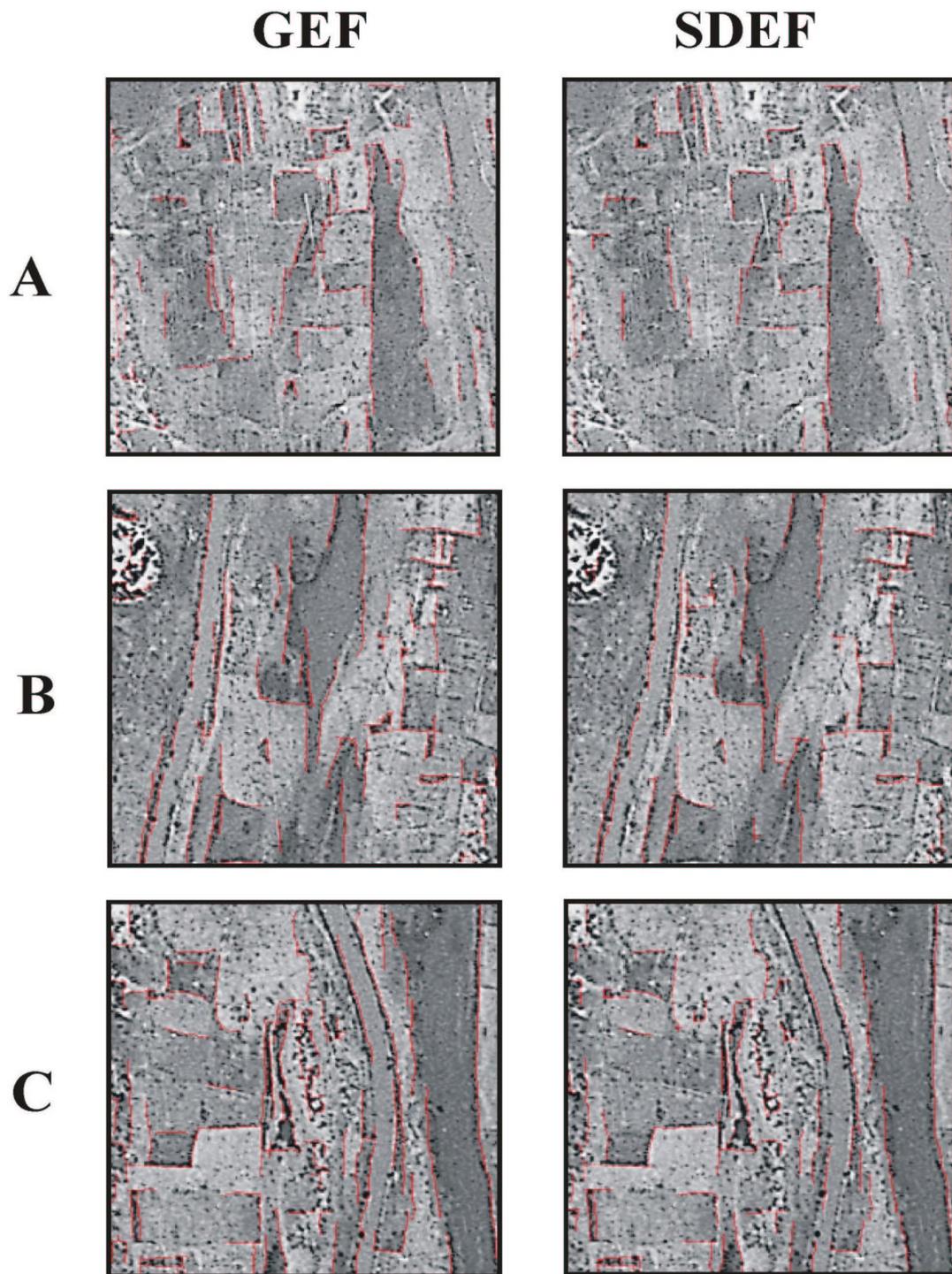
Im Fallbeispiel wird zur Extraktion von Agrarparzellenkanten die Leistungsfähigkeit der von CASTAN (1993-97) entwickelten, exponentiellen Kantenextraktionsfilter zweier symmetrischer Ableitungsoperatoren – GEF (First Derivative Operator for Symmetric Exponential Filter) und SDEF (Second Derivative Operator for Symmetric Exponential Filter) sowie des rekursiven Differenzoperators DRF (Optimal Difference FILTER) getestet. Die Stärke dieser Filter ist eine optimale Rauschunterdrückung bei gleichzeitig hochpräziser Lokalisierung der Kanten.

Die *symmetrischen exponentiellen Ableitungsfilter* GEF und SDEF unterscheiden sich durch ihre Filterungskriterien: Während das GEF eine Kante durch die mit der ersten Ableitung erzielten Maximumwerte definiert, bedient sich das SDEF des Nulldurchgangs der zweiten Ableitung.



Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.16 a) Effekt der Kontrastvorverarbeitung auf die Gradientenfilterung am Beispiel des Luftbildprototyps von 1981



Größe der ausgewählten Ausschnitte A-C: 250 x 250 Pixel (~ 500 m x 500 m)

Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.16 b) Kantenextraktion mittels First (GEF) und Second (SDEF) Derivative Operator for Symmetric Exponential Filter nach CASTAN (1993-97) für drei verschiedene Agrarparzellenausschnitte des Luftbilds von 1952

Der *rekursive Differenzfilter* DRF, ein IIR- (Infinite Impulse Reponse) Filter definiert einen rekursiven Algorithmus, welcher Antwortsignale auf der Basis endlich vieler Koeffizienten in einer Fenstermatrix unendlicher Größe produziert.

Die der Extraktionsfilterung vorangehende Hochpaßfilterung hebt die zu extrahierenden Grauwertgradienten bereits im Bild hervor. Anhand **Fig. 3.16 a** wird am Beispiel des sehr kontrastschwachen Luftbildausschnitts von 1981 die Wirkung eines zusätzlich vor der Hochpaßfilterung prozessierten, kontrastverstärkenden Histogrammausgleichs deutlich. In beiden Ausschnittextrakten (A, B) bewirkt die Kontrastverstärkung mittels eines Histogrammausgleichs – dargestellt in roter Farbe – im Vergleich zum nicht manipulierten Ergebnis – dargestellt in blauer Farbe – eine wesentlich diffizilere und elementreichere Kantenextraktion. Zusätzlich zum Informationsgewinn einer vollständigen Erfassung der Parzellenumrandung werden dennoch ebenfalls zahlreiche kleinere, nicht zur Parzellenumrandung gehörende Kantenelemente erfaßt.

Der DRF-Operator umschließt die homogenen Grauwertflächen in glättender Weise, so auch entlang nicht bildorthogonal verlaufender Kanten. GEF und SDEF bringen ein wesentlich eckigeres, weniger strukturverbundenes Ergebnis mit stärker bildorthogonal orientierten Kantenbruchstücken hervor.

Aufgrund der geradlinigen Konturzeichnung wird den beiden Ableitungsfilterungen, GEF und SDEF, gegenüber der Extraktion von Parzellenrändern der Vorzug zu gegeben.

Der Vergleich der Operatoren GEF und SDEF untereinander (**Fig. 3.16 b**) am Beispiel dreier Agrarparzellenausschnitte des Luftbilds von 1952 zeigt keinen wesentlichen Unterschied ihrer Wirkungsweise: Beide Filter produzieren sehr ähnliche Extraktionsresultate.

Zur Erzielung optimaler Extraktionsergebnisse wurden als optimale Wertedefinition für beide Operatoren folgende Parameter experimentiert:

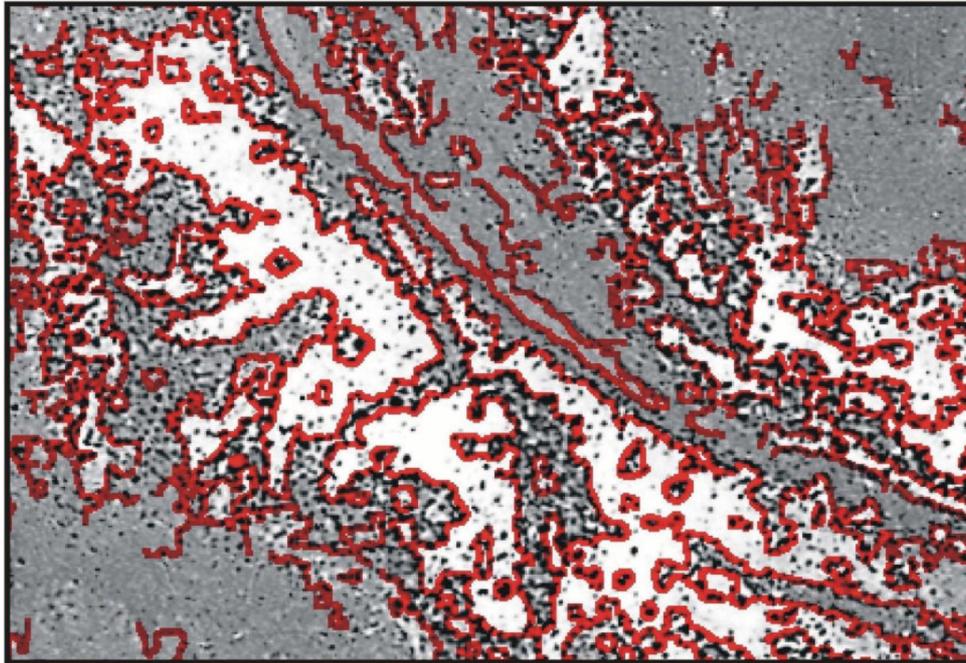
- Filterkoeffizient: a_0 [0.0–1.0] = 0.8
- Hysterese-(Trägheits-)Schwellenwerte T_1 und T_2 [0–255]: $T_1 = 15$, $T_2 = 10$,
- Minimumlänge eines Segments [0–100.000] $ML = 20$ Pixel

Beide Filterungsarten setzen in charakteristischer Weise eine zwischen zwei Grauwertflächen detektierte Kante immer auf der Seite des höheren Kontrastunterschieds ab. Entlang einer schwärzlichen Gehölzlinie fällt die Kantenzzeichnung auf die hellere Seite der angrenzenden Flächen.

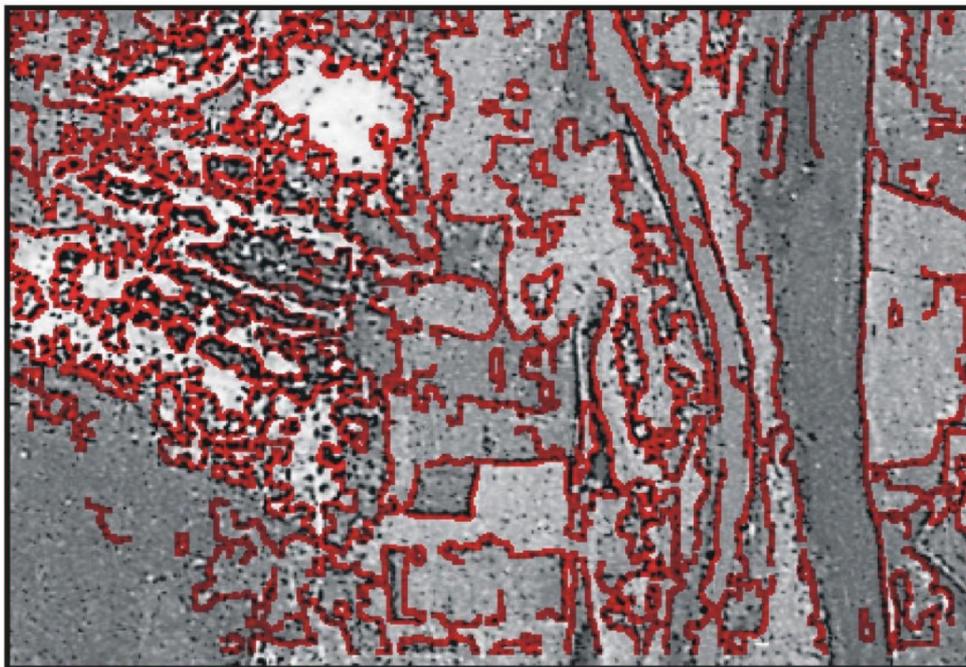
Die Filter umzeichnen jedoch nicht nur Feldflächen, sondern in formtreuer Weise auch die Ränder feuchter Senken oder temporär austrocknender Fließgewässer. Der GEF-Operator tendiert zu einer vollständigen Extrahierung der Kanten. Dies stellt jedoch per se keinen Informationsgewinn dar. Beide Filteroperatoren können eine Austrassierung der Parzellenränder nur insoweit leisten, sofern sie wertemäßig erkennbar sind. Beide Filter erreichen hier insgesamt eher ein lückenhaftes, die Umrandung von Parzellenflächen andeutendes Ergebnis. Die fehlende Extraktion an einzelnen Stellen entlang vorhandener Flächenkontraste von Kanten ist möglicherweise auf einen für den Schwellenwert des Grauwertgradienten zu geringen Filterparameter zurückzuführen.

Ein weniger lückenhaftes und geschlosseneres, jedoch wesentlich unruhigeres und weniger geglättetes Kantenfilterungsergebnis liefert der DRF-Operator (**Fig. 3.16 c**). Optimale Extraktionsergebnisse wurden mit folgender Wertekombination unter der Parametereinstellung einer Fenstergröße von 11 x 11 Pixeln erzielt:

- Filterkoeffizienten a_1 , a_2 [0.0–1.0]: $a_1 = a_2 = 0.8$
- Hysterese-Schwellenwerte T_1 , T_2 [0–255]: $T_1 = 12$, $T_2 = 15$
- Minimumlänge eines Segments [0–100.000]: $ML = 25$ Pixel



Ausschnitt im Bereich des Gehölzbesatzes



Ausschnitt im Bereich von Agrarparzellen

Größe der ausgewählten Ausschnitte: 450 [w] x 320 [h] Pixel (~ 900 m x 640 m)

Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.16 c) Kantenextraktion mittels des Optimal Difference Recursive Filter (DRF) nach CASTAN (1993-97) für zwei verschiedene Testausschnitte des Luftbilds von 1952

Der DRF-Operator eignet sich zur automatischen, relativ lückenlosen Umrandung grautonkontrastierter Flächen. Insbesondere lassen sich durch ihn im vorliegenden Falle verschiedene Gehölztexturen voneinander abgrenzen. Im oberen Testausschnitt werden die relativ gehölzarmen Uferwallkuppen inklusive kleiner Gehölzinseln deutlich von den diese durchschneidenden, feuchten und gehölzdichteren Durchgangsfurchen diskriminiert. Der untere Bildausschnitt zeigt die lokalgenaue und – im Vergleich zu den Ableitungsoperatoren SDEF und GEF – wesentlich lückenlosere Verfolgung von Parzellenkanten. Es werden Einheiten unterschiedlicher Reflexionseigenschaften, wie z.B. Feuchtigkeit und Rauigkeit des Bodenuntergrunds, nachgezeichnet. Eine Helligkeitszunahme der Grautonuancierung im Luftbild deutet auf eine Abnahme der Feuchtigkeit und Zunahme der Grobkörnigkeit des Bodenmaterials hin. Die edaphischen und hypsometrischen Faktoren des Bodenmaterials beeinflussen wiederum in starkem Maße das Dichtegefüge der Gehölztexturen. Der Extraktionsalgorithmus erfasst andererseits jedoch auch unerwünschte Kantenbruchstücke entlang von Bildgradienten, die keine geschlossene Objektfläche bilden.

3.2.5.2 Ermittlung von Strukturveränderungen

Bei dem Versuch eines multitemporalen Vergleichs hinsichtlich der Veränderung des Agrargefüges, sind bei der Interpretation der Bildergebnisse unterschiedliche saisonale Klimaereignisse und Bedingungen des Kalenders für die Feldbearbeitung zu berücksichtigen. In beiden Luftbild-Testausschnitten (*Fig. 3.7 a*) von Februar 1952 und 1971 sind im Bereich des Niger-Hochflutbetts mit Naßreis bestellte Parzellen zu erkennen. Sie weisen eine mehr oder weniger geradlinig umrandete Rechteckform auf und verbinden sich als solche zu einem ausgedehnten Mosaik regelmäßig angeordneter kleiner Parzellenblöcke. Ihre durchschnittliche Flächengröße läßt sich visuell auf 20 – 40 m² abschätzen. Der Ausschnitt von 1981 zeigt hingegen flächengrößere Parzellen unregelmäßiger Formausprägung und ungeordneterer Gefügeanordnung, die sich weniger in direkter Flußauennähe als vielmehr im südlichen bis westlichen Bereich der Fluvialschleife ausbreiten.

Die zur Trockenzeit aufgenommenen kontrastreichen Bildschnitte von 1952 und 1971 gewährleiten gute Objekterkennbarkeit und optimale saisonale Überdeckung. Hingegen weist der Bildschnitt von 1981 – möglicherweise infolge atmosphärischer Trübung durch Harmattanstaub – eine kontrastschwache Objekterkennbarkeit auf. Das Stadium der Feldbearbeitung geht zu Anfang Februar generell mit einer die Einsaat vorbereitenden Bepflügung oder Urbarmachung neuer Reisparzellen, einher. Hingegen ist zu einem späteren Termin Anfang Mai, d.h. zum Zeitpunkt des Bildschnitts von 1981, üblicherweise die Einsaat von Reis bereits im Gange. Zudem wird aus den nicht mehr überschwemmten Bereichen in hydrologisch begünstigte Tümpelsenken umgepflanzt. Trotz der unterschiedlichen Grautönung verschiedener Parzellenflächen bleibt die Wiedererkennung und Korrelierung mit unterschiedlichen Bearbeitungszuständen der Feldparzellen uneindeutig.

Drei in jedem der Zeitschnitte (rot: 1952, blau: 1972 und grün: 1971) identische Agrarparzellenextrakte (A–C) verdeutlichen in *Fig. 3.17 a* die Ergebnisse des GEF-Operators, in *Fig. 3.17 b* die des DRF-Operators.

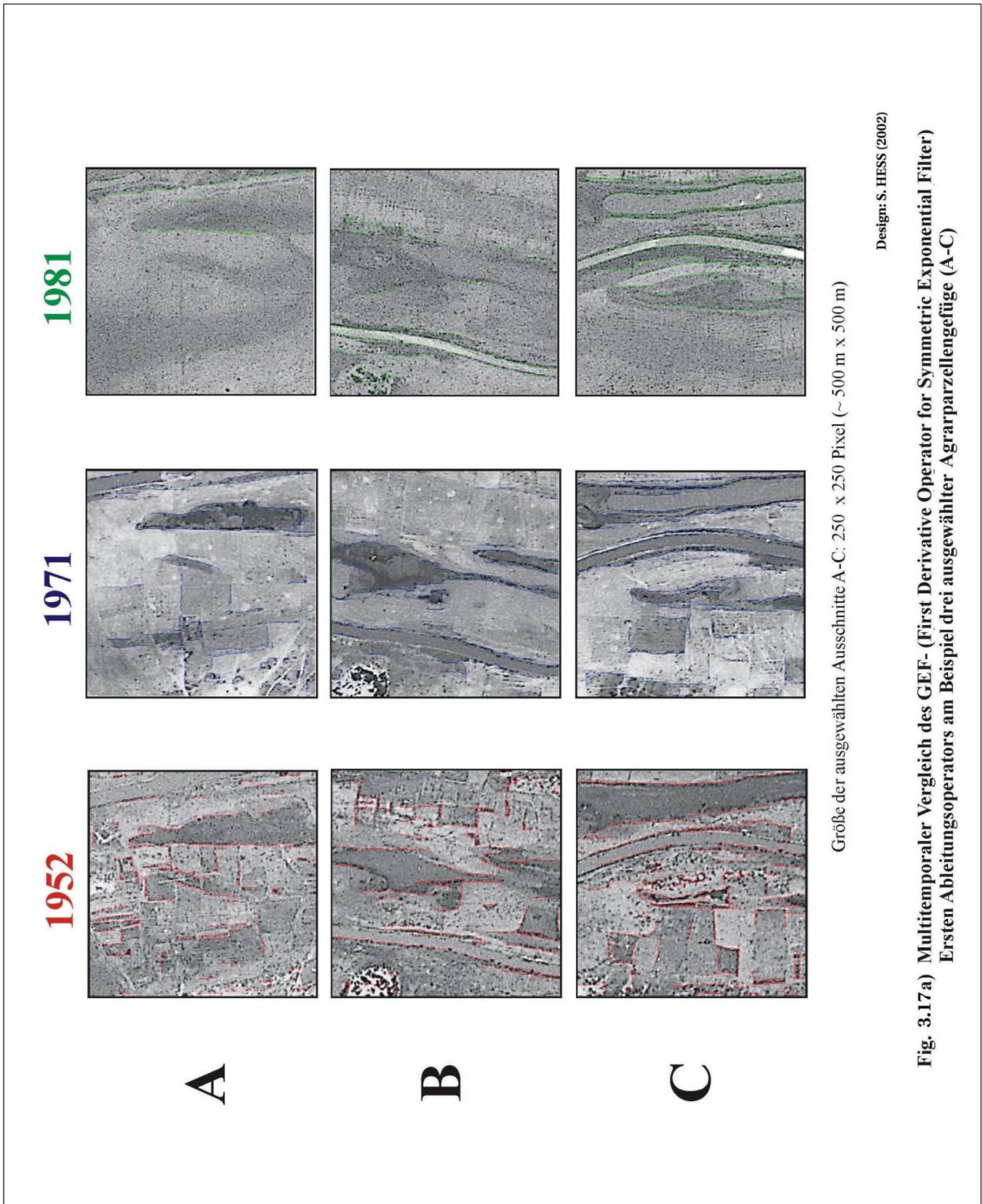
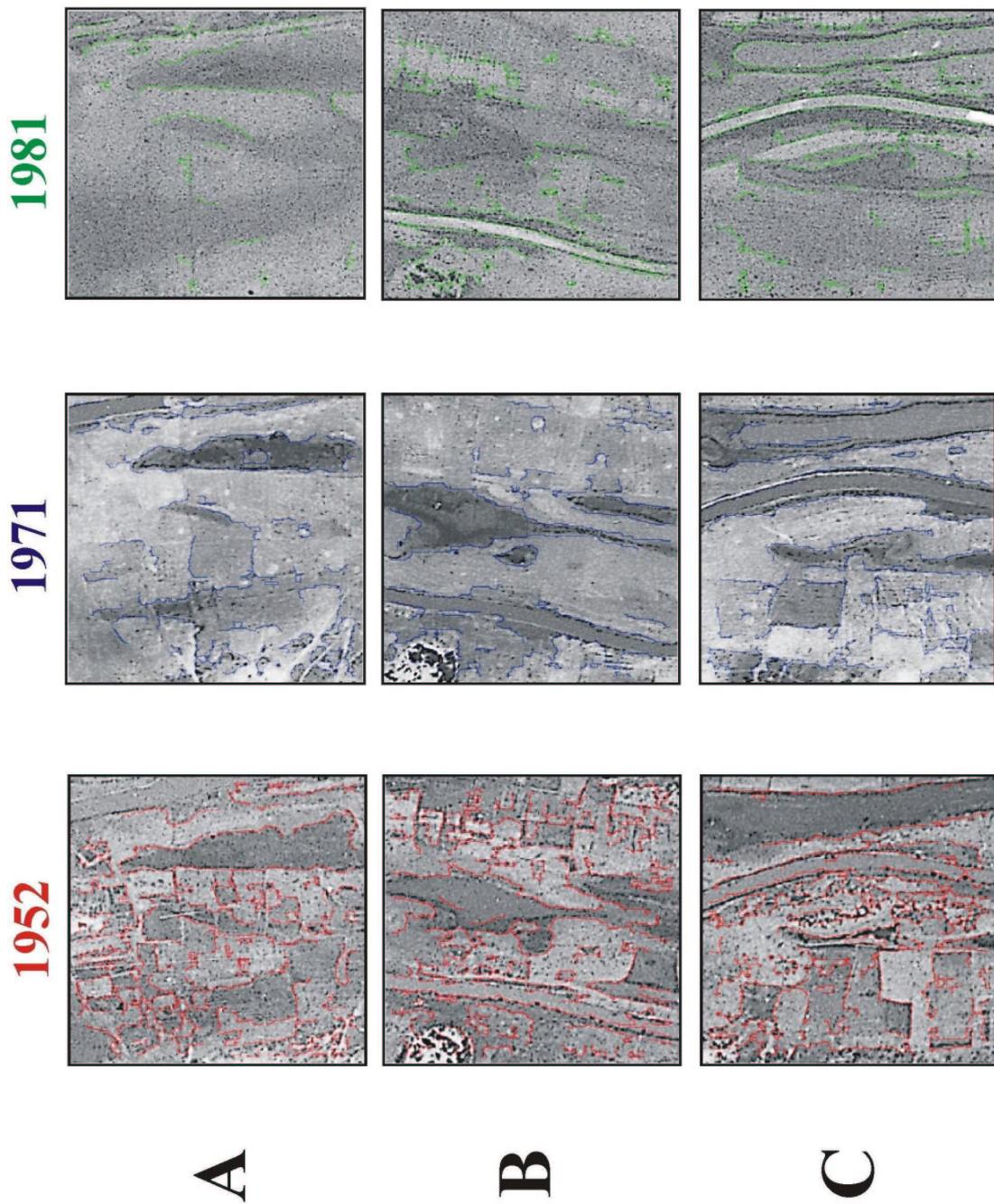


Fig. 3.17a) Multitemporaler Vergleich des GEF- (First Derivative Operator for Symmetric Exponential Filter) Ersten Ableitungsoperators am Beispiel drei ausgewählter Agrarparzellengefüge (A-C)



Größe der ausgewählten Ausschnitte A-C: 250 x 250 Pixel (~ 500 m x 500 m)

Design: S. HESS (2002)

Fig. 3.17 b) Multitemporaler Vergleich des DRF- (Optimal Difference Recursive Filter) Gradientenoperators am Beispiel drei ausgewählter Agrarparzellengefüge (A-C)

Innerhalb der insgesamt nicht vorverbesserten Parzellenbilddauschnitte werden die Kanten, sowohl mittels des GEF- als auch des DRF-Filters entlang der stärksten Bildgradienten in mit ähnlicher Wirkung herausgehoben. Das schwächste Extraktionsresultat beider Operatoren resultiert aus dem kontrastärmsten Luftbild von 1981. Wie bereits in Kapitel 3.2.5.1 dargelegt, zeichnet der DRF die Kanten um die Feldparzellen sowie andere flächige kontraststarke Objekte in wesentlich weniger lückenhafter Weise nach, nimmt jedoch auch nicht relevante Linienbruchstücke ins Filterungsergebnis auf. Der einerseits die Veränderungen des Parzellegefüges herausstellende multitemporale Vergleich hebt andererseits auch Fehler hervor. Die Erkennung und Abgrenzung linearer Kanten hängt in den einzelnen Bildzeitschnitten vom Aufnahmeforment des Luftbilds ab. Die Saisonalität beeinflusst in starkem Maße den Kontrastreichtum der Bodenbedeckung und des Bodenuntergrunds.

In einer multitemporalen Gegegenüberstellung zeigen beide Filter 1952 – abgesehen von technischer Filterleistungsfähigkeit und saisonalen Aspekten – in ähnlicher Tendenz ein noch recht kleinparzelliertes, vielfach gehölzumsäumtes Gefüge. 1971 erscheinen die visuell nur sehr schlecht erfaßbaren Feldparzellen zu größeren zusammengelegt. Deutlich fällt die wesentlich geringere Gehölzumsäumung entlang der Agrarränder auf. Gehölzsäume erzeugen einen starken Bildgradienten. Wo sie allerdings fehlen, müssen zur Kantenausgliederung alternativ genügend starke Grauwertkontraste zwischen den Feldflächen vorhanden sein. Sind die Kontraste zwischen den Parzellen ebenfalls sehr schwach, wie stellenweise in den Ausschnitten von 1971 der Fall, können Kanten mittels der verwendeten Algorithmen nicht erfaßt werden.

Die Ausschnitte des Jahres 1981 zeigten ein kleinparzelliertes Strukturgefüge, welches dem von 1952 sehr ähnlich scheint. Weitere Interpretationen zum Gefüge der Agrarparzellen sind aufgrund der verminderten Erkennbarkeit nicht möglich. Dennoch kann bereits eine Kausalität zwischen der von 1952 nach 1981 stetig abnehmenden Zahl an extrahierten Kanten und der Ausdehnung der Agrarparzellenflächen vermutet werden.

Der durch verschiedene pluvio- und hydrometrische Risiken beeinflusste Reisanbau unterliegt starken raumzeitlichen Veränderungen. Die Austrocknung der Saat kann z.B. durch eine zu schnell ablaufende Flutwelle bedingt sein, die ausbleibende Keimung durch zu geringe Niederschläge oder eine zu spät einsetzende oder zu schwache Flut verursacht werden. Weitere Gefahren bestehen im Ertrinken der Reispflanzen oder in Ernteverlusten durch Fischfraß. Ernteverluste können auch mit einer zu früh, d.h. vor dem Wurzeltrieb oder einer zu schnell ankommenden Flut in Verbindung stehen (BERTRAND, 1974). Neben der Niederschlagsvariabilität und dem wechselnden Flutverlauf kann auch eine zu starke Unkrautwucherung die Verlegung von Reisfeldern erfordern (MOHR, 1969). Aufgrund der komplexen Beziehungen und fehlender Referenzdaten muß eine abschließende Erklärung der Veränderung des beobachteten Agrarparzellegefüges offen bleiben.

Dennoch demonstrieren die verwendeten Filteroperatoren bezüglich der Extraktion der Formumrisse von Bildobjekten, wie hier der Kanten von Agrarfeldrändern, zweifellos eine hohe technische Leistungsfähigkeit.

Insbesondere tritt der DRF in seiner Eigenschaft aufgrund einer formtreuen und lokalpräzisen Konturierung von geschlossenen Objekt- oder Texturrändern unter den drei erprobten Operatoren hervor. Die Abgrenzung des Feldparzellegefüges stellt nur eine unter einer Vielzahl denkbarer Anwendungen dar.

3.3 Diskussion und Schlußfolgerungen

In Entwicklungsländern mit vielfach fehlendem oder defizitärem kartographischem Kataster bietet die Luftbilderfassung und -auswertung eine schnelle und kostengünstige Möglichkeit zur Aufnahme topographischer und thematischer Rauminformationen. Eine luftbildgestützte

Erfassung in großem Aufnahmemaßstab bedarf zur Erzielung einer großen Flächenabdeckung effizienter Prozessierungsverfahren, um die anfallende hohe Anzahl an Luftbildern in angemessener Zeit verarbeiten zu können.

Die für lokalräumliche Langzeitstudien essentielle quantitative Erfassung multitemporaler Detailobjekte und Inventarstadien erfordert die Entwicklung neuartiger, computergestützter Methoden der automatisierten Objekterkennung und -extraktion.

MATERIAL

Die insbesondere zur Untersuchung der Sahelgehölzbedeckungsdynamik aus dem Bereich des Nigerbinnendeltas exemplarisch ausgewählte, multitemporale Befliegungsserie stellt eine repräsentative Auswahl historischer, für große Gebietsareale des westafrikanischen Sahels, real verfügbarer Luftbildprodukte dar. Das vorhandene Luftbildmaterial einer sich über drei Dekaden (1952 bis 1981) erstreckenden Beobachtungsperiode erfaßt in der Gesamtbilanz allerdings nur wenige Zeitschnitte (in weitflächiger Abdeckung überwiegend zu Anfang der 50-er und 70-er, oftmals auch der 80-er Jahre vorhanden). Eine solche, zeitlich frequenzarme Datenbasis schränkt die eindeutige Konstatierbarkeit langfristiger Evolutionsprozesse a priori ein und ermöglicht vielmehr eine retrospektive Einschätzung von Evolutionstendenzen.

Dennoch bieten die mittels analoger Monospektraltechnik aufgenommenen, historischen Luftbilddaten im Vergleich zu gebiets- und zeitsynchron aufgenommenen Satellitendaten den größten zeitlichen Rückblick bei gleichzeitig weit höherer räumlicher Auflösung und Erkennbarkeit von Objektdetails. Eine erfolgversprechende Detektierung lokaler bis regionaler Veränderungen der Sahelräume aufgrund anthropogenem Wirtschaftens verlangt zudem dringend nach raumhochauflösendem Aufnahmemaßmaterial.

Die temporale Skala des verfügbaren Luftbildmaterials westafrikanischer Länder deckt vorwiegend historische, jedoch kaum aktuelle Zeiträume großflächig ab. Eine kontinuierliche Laufendhaltung und Aktualisierung bestehenden, historischen Luftbildmaterials ist in den meisten ehemaligen AOF-Ländern kaum vorfindbar oder wurde spätestens nach der kolonialen Unabhängigkeit endgültig aufgegeben. So standen damit auch keine Luftbilddaten aktuelleren Datums als jene von 1981 im Gebiet des Nigerbinnendeltas, bzw. jene von 1984 nur für ein eingeschränktes Delta-Teilgebiet zur Verfügung.

Während die regionale bis lokale Fernerkundungsanwendung einerseits teure Geländeaufnahmen zu minimieren versucht, werden solche Geländedaten häufig zur absoluten Verifikation weniger hochauflösender Satellitendaten notwendig. Der Einsatz von Luftbildern oder ihrer modernen Nachfolgevariante raumhochauflösender, multispektraler Satellitendaten (z.B. IKONOS) verspricht nicht nur die Konsolidierung und Fortentwicklung bisher auf historischer Luftbilddatenbasis entwickelter Methodenansätze. Dieses räumlich hochauflösende Material läßt sich darüber hinaus, anstelle kostenintensiver Geländeaufnahmen, als komplementäre Referenzdatenbasis zur Auswertung weniger hochauflösender Satellitendaten nutzen.

Aus dem Verwendungspotential dieser Satellitendaten leitet sich damit für die hier relevante Thematik weiterer Forschungsbedarf zur Etablierung übertragbarer Methoden der multitemporalen Homogenisierung und zur Analyse von heterogenem Aufnahmemaßmaterial – hier der radiometrischen Satellitendaten auf historischen Luftbilddaten – ab. Zur Klärung dieses Problems entwickelt die Autorin Lösungsansätze zur Luftbildsimulation einer aktuellen Geländesituation, zur Überprüfung einer rückwirkenden Transferierbarkeit des aktuell simulierten Luftbildmaterials auf entsprechende historische Luftbilddaten sowie neuartige hochauflösende Satellitendaten. Erste Aufnahmeversuche eines definierten Geländeausschnitts – mittels einer an einem Rokaku-Drachen befestigten Kompakt-Kleinbildkamera – wurden bereits in der mit Einzelgehölzen besiedelten Region des Causse Méjan (Süd-Frankreich) realisiert, konnten bis dato jedoch, aufgrund technischer Mängel, noch nicht zu einer stabilen, präsentablen Form vollendet werden.

METHODE

Die Auswertung historischer Fernerkundungsdaten unterliegt grundsätzlich der Problematik der retrospektiv nicht rekonstruierbaren Geländeverifikation. Die traditionelle Fernerkundungstechnik bedient sich der Auswertung von Digitalwerten zur multispektralen Strahlungswertanalyse, während sich photogrammetrische Auswertung und geometrische Vermessung auf die radiometrische Interpretation von Luftbildinformationen stützen. Hinsichtlich der multitemporalen Vergleichbarkeit besteht für die Auswertung von analogem Luftbildmaterial die Problematik einer rückwirkenden radiometrischen Kalibrierung. Da in vorliegendem Fall auf den historischen Luftbildern nachträglich weder Densimeter-Eichung noch Histogrammanpassung der Schwärzungswerte realisierbar sind, konnten diese keiner radiometrischen Auswertung unterzogen werden. Das Problem der fehlenden multitemporalen Digitalauswertung des radiometrisch nicht homogenisierbaren Luftbildmaterials konnte jedoch mittels Einsatz morphomathematischer, die Formgeometrie der Luftbildobjekte ansprechender Operatoren kompensiert werden.

Im Hinblick auf die Entwicklung eines effizienten Prozessierungsflusses wurde bereits bei der Datenvorverarbeitung die möglichst hohe Automatisierbarkeit und Reproduzierbarkeit, sowie Gewährung einer effizient operationellen Verarbeitung von Massendaten des Methodenentwurfs angestrebt. Mit der Varianzanalyse konnte eine objektivierte Definition der Scanauflösung für die Digitalisierung des analogen Luftbildmaterials gefunden werden. Der über diese Methode ermittelte Wert einer optimalen Scanauflösung war als solcher für die gesamte Befliegungsserie gültig.

Der beim Scanvorgang unweigerlich in das digitalisierte Bildprodukt eingeführte Rauschanteil war, infolge des Fehlens von Geländevergleichsdaten, in seiner Intensität und Verteilung nicht meß- und quantifizierbar.

Im Zusammenhang mit der, die automatisierte Auswertung und Extraktion voraussetzenden visuellen Definition objektdeskriptiver Parameter, bringt die Digitalisierung des analogen Luftbildmaterials – bei bloßer Vergrößerung am Bildschirm – bereits eine wesentlich verbesserte visuelle Detailerkennbarkeit. Dieser durch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und die Körnigkeit des Luftfilmmaterials begrenzte Informationsgewinn läßt sich bis auf einen ca. 8-fachen Faktor maximieren. Darüber hinausgehende Vergrößerungen erbringen keine zusätzlichen Detailinformationen.

Entgegen der herkömmlichen, subjektiven Bestimmung des Binarisierungsschwellenwerts wurde, speziell mit der Maximum-Segmentierungs-Binarisierung (HESS & BERGES, 2000), ein neuartiges, automatisches Prozessierungsverfahren zur vorverarbeitenden Objektsegmentation auf digital gewandelter Luftbildbasis gefunden.

ERGEBNISSE

Trotz der zuvor beschriebenen Fehlextraktionen zeigen die Filterungsexperimente mittels morphomathematischer Operatoren sowie der von CASTAN et al. (1993–97) entwickelten Gradientenoperatoren auf den Luftbildern eine hohe Leistungsfähigkeit zur semi-automatischen Extraktion und Quantifizierung gesuchter Bildobjektstrukturen wie Solitärgehölze und Agrarfeldkanten.

Wenngleich die hier exemplarisch über digitale Luftbildfilterung im Testausschnitt des Nigerbinnendeltas gewonnenen Gehölzdichtewerte denen von Feldbeobachtungen in vergleichbaren Sahelregionen ähnlich sind, bleibt dennoch die genaue Gehölzerkennung und -zuweisung ohne gesicherte Verifikationsbasis an Geländedaten zweifelhaft. Die gewonnenen Dichtewerte können daher keine absoluten Werte repräsentieren.

Bei dieser Studie stand die Methodenentwicklung im Vordergrund. Trotz problematischer Prämissen nicht vorhandener Geländeverifikationsdaten, nicht rekonstruierbarer

radiometrischer Informationen sowie fehlender oder mangelhafter statistischer oder kartographischer Referenzdaten, konnte ein Methodenansatz zur automatisierten multitemporalen Objekterkennung und -extraktion auf Luftbilddatenbasis entwickelt werden.

Bezüglich der gewonnenen Ergebnissen und Objektfehlerfassungen bedarf dieser Ansatz absichernder Geländereferenzdaten sowie weiterer bildtechnischer Verbesserungen und Korrekturen. Einerseits können Experimente zur Luftbildsimulation in Kombination mit simultan zu diesen stattfindenden, fundierten Messungen der Gehölzverteilung auf stichprobenartig ausgewählten Geländeausschnitten zu einer sicheren Gehölzausweisung beitragen. Andererseits sind die Ergebnisse dieser Experimente wiederum zur Untersuchung der retrospektiven Transferierbarkeit der Methode weiterverwendbar.

Im Weiteren ist die entwickelte Methode auf regionale Stabilität hinsichtlich einer großflächigen automatischen Erfassung der Gehölzdichte mit Hilfe von Luftbilddaten anderer Regionen des westafrikanischen Sahels und letztendlich weiterer semi-arider Erdräume zu testen.

In diesem Stadium der noch unzureichend geklärten Erfassungspräzision und Erprobung der räumlichen Transferierbarkeit kann noch kein Anspruch auf eine absolute operationelle Methode erhoben werden. Die bisher erzielten Ergebnisse weisen bereits auf die Grenzen der Automatisierbarkeit innerhalb des Erkennungsprozesses hin. Innerhalb desselben behält der subjektiv behaftete, visuelle Interpretationsvorgang seine Bedeutung einerseits zur Definition der auszugrenzenden Objektparameter und andererseits als interaktives Verifikationswerkzeug im automatischen Auswertungsprozess.

Der entwickelte Bildverarbeitungs-Methodenentwurf ermöglicht – unter Verwendung einer präzisen und repräsentativen Gelände(trainings-)datenbasis – die weiträumige und operationelle Bereitstellung absoluter Daten zur Inventarisierung der Evolutionsstadien und Dynamik der Gehölzdichte in semi-ariden Räumen mit geringer Gehölzbedeckung. Es steht weiterhin zu erwarten, daß nach Ausreifung und Absicherung der Methodik, gerade in Gebieten mit spärlicher Vegetationsausstattung die hier entwickelten digitalen Ansätze der nicht-digitalen, klassischen Bildinterpretation in Geschwindigkeit und Präzision überlegen sind. Feine Veränderungen der Gehölzbedeckung, welche dem bloßen „Interpretenauge“ oft verborgen bleiben, werden von entsprechend geeigneten Bildoperationen erfaßt.

3.4 Technische Zukunftsperspektiven der fernerkundlich raumhochauflösenden Datenaufnahme

Bei der räumlich hochauflösenden Fernerkundung steht die photo-chemische, monospektrale Aufnahme mit analogem Speichermedium eines, im sichtbaren bis nahen Infrarotbereich (0.4 – 1,0 μm) strahlungsempfindlichen Photofilms – der digital erfassenden, opto-elektronisch multispektralen Scanaufnahme gegenüber.

Trotz der Nachteile der rückwirkend nicht möglichen und für aktuelles Aufnahmematerial erschwerten radiometrischen Kalibrierung photochemischer Bildprodukte, des weithin undifferenzierten oder eingeschränkten Spektralbereichs sowie des zur digitalen Weiterverarbeitung erforderlichen, aber nicht praktikablen Analog-Digital-Datentransfers – bringt das photochemische Aufnahmeverfahren den großen Vorteil eines vergleichsweise geringen analogen Speicheraufwands. Die per flugzeuggetragenem System aus niedriger Flughöhe oder per Satellit aus Weltraumhöhe aufgenommenen raumhochauflösenden Daten decken eine größere Szenenfläche ab. Im Vergleich zum bisherigen, technisch komplizierten Rücktransport des Photofilms vom Trägersystem aus dem Weltraum zur Erde, wird heute vermehrt die moderne Videobild-Echtzeitdatenübertragung eingesetzt. Dennoch arbeitet die NASA aktuell an einem aus ca. 30.000 km Höhe aufnehmenden analogen Photokamerasystem an Bord des Leichtflugzeugs HELIOS. Eine zweite Datenaufnahme-Mission mit maximal 96 h Flugdauer ist für 2003 geplant

(<http://www.dfrc.nasa.gov/Projects/Erast/helios.html>, Seitenstand: 01.11.2001).

Angesichts der Entwicklung bisheriger (satelliten- und flugzeuggetragener) Aufnahmesysteme bis hin zu hochmodernen Aufklärungssystemen unbemannter Flugkörper, bleibt die Transferier- und Anwendbarkeit des auf historischem Luftbildmaterial entwickelten Methodenansatzes auf von unbemannten Flugzeugaufklärungssystemen produzierten hochmodernen Datenmaterial eine große Herausforderung. Damit steht dieser auf Datentransferierbarkeit ausgerichtete Methodenansatz derzeit voll im Trend der aktuellen und zukünftigen Bilddatenproduktionsentwicklung und weist den Bedarf nach weiteren automatisierenden Auswertungsmethoden für das zukünftige hohe Datenaufkommen solcher räumlich und spektral hochauflösender Bildprodukte.

a) Satellitengetragene Aufnahmesysteme

Bei satellitengetragenen optischen Aufnahmesystemen ist zwischen analogen Photokamerasystemen und digitalen Scannersystemen zu differenzieren.

Bei analogen Photokamerasystemen wird die Raumauflösung mittels des Bildmaßstabs, bei den digitalen Zeilenabtastern im Pixelmaß definiert. Erfahrungsgemäß geht aus einer Pixelauflösung von ca. 80 m, z.B. bei Landsat MSS, ein analoges Produkt im Maßstab von ca. 1/500.000 hervor. Aus einem Luftbild im Maßstab von 1/50.000 kann unter Berücksichtigung der bereits diskutierten Digitalisierungskriterien ohne weiteres ein digitales Bildprodukt einer Pixelauflösung von 2 m erzeugt werden.

Satelliten-Photokameras:

Die Weltraumphotographie der 60er Jahre bis aktuell hat Photoprodukte von Photokameras an Bord folgender Raumstationen und -fähren zu bieten:

Keyhole (freigegebene Daten: 1960–1972), Mercury (1961–63), Gemini (1965–66), Apollo (1968–72), Sojus (1967–1997), Skylab (1973–79), Space Shuttle (1981–2002), Spacelab (1983–97), MIR (1986–2001 mit KFA-Kameras) und ISS (International Space Station, 2001–02).

Insbesondere in der Endphase der Ära des Kalten Kriegs zwischen 1981 bis 1987 war das Interesse an panchromatischen Weltraumphotos sowohl von amerikanischer als auch von russischer Seite besonders groß.

Monospektrale (510–760 nm) Weltraum-Satellitenphotos wurden in dieser Zeit von zwei auf dem russischen KOMETA/SPIN2-Satelliten installierten und miteinander operierenden, stellaren Photokameras TK-350 ($f = 35$ cm) und KVR-1000 ($f = 100$ cm) aufgenommen. Während des 45 Tage-Satellitenorbits in einer Flughöhe von 220 km brachte die KVR-1000 Kamera ca. 20 Mio. km² Erdoberfläche im Photomaßstab 1/220.000 (Format: 18 cm), bzw. einer Pixelauflösung von 2 m (Szene: 40 km x 180 km) zur Aufnahme. Die stereoskopische TK-350 Kamera erfasste ca. 50 Mio. km² Erdoberfläche im Photomaßstab 1/660.000 (Format: 30 cm x 45 cm), bzw. einer Pixelauflösung von 10 m (200 km x 300 km). Ein an Bord getragenes Laser-Altimeter sowie ein Flugpositionierungssystem ermöglichten die Erzeugung georeferenzierter Photoprodukte mit einer horizontalen Genauigkeit von 7–10 m (TK-350), bzw. 3–5 m (KVR-1000). Diese Technik erweist sich besonders in Gebieten, in welchen keine Bodenkontrollpunkte auffindbar sind, als wertvoll.

(<http://www.airesearch.com.au/spin2prf.htm>, Stand: 24.02.2001)

Mit der Freigabe durch den US-amerikanischen Präsidenten Clinton sind seit Februar 1995 historische, raumhochauflösende US-Weltraumphotoprodukte von 1960 bis 1972 öffentlich zugänglich. Diese, innerhalb der US-Spionagesatelliten-Programme der Kalten Krieg-Ära, *Corona*, *Argon* und *Lanyard* aufgenommenen Bildprodukte, dienten zur Aufklärung der nuklearen Waffeninfrastruktur von Russland, China, Israel und anderer Länder. Seit 1959 (erste gelungene Aufnahmen ab August 1960) sind mehr als 860.000 hochauflösende Photoprodukte hauptsächlich über Asien und Osteuropa von insgesamt über 100

verschiedenen Trägermodellen des Photographischen CIA-Aufklärungssatelliten (Declassified Intelligence Photo-Reconnaissance US Satellite) KEYHOLE (KH) der Serien *Corona* mit KH 1-4A/B, *Argon* mit KH 5 und *Lanyard* mit KH 6 bis aktuell KH-12 (auch als KH-11B oder KH-11/Improved bezeichnet) erhältlich.

Die ersten Systeme (KH-1, KH-2, KH-3 und KH-6) waren mit einer einzelnen Panorama-Kamera oder Rahmenkamera (KH-5) bestückt, während spätere Systeme (KH-4, KH-4A und KH-4B) schließlich zwei Panorama-Kameras mit einem Trennungswinkel von 30 Grad an Bord führten. Die Produkte der verschiedenen Kamerasysteme liegen mit Auflösungen von (140,2 m für KH-5), 7,6 m bis 10 Zentimeter (KH-12). Die hohe Raumauflösung aus Weltraumhöhe wird durch den weiten Aufnahmewinkel der photographischen KH-Kamerasysteme ermöglicht und letztendlich durch die feine „photographische Körnung“ bedingt. Der vom jeweiligen KH-Satellitenträger (film return satellite) aus einer Flughöhe von 335–1000 km aufgenommene Photofilm wird stets mittels eines Fallschirms zur Erde zurücktransportiert und dort von einem, an Bord eines Flugzeugträgers getragenen Fangnetz, aufgefangen. Der am 20.12.1996 in der KH-Serie zuletzt gestartete Satellit KH-12/3 befindet sich bis dato im Umlauf.

Das Originalfilmmaterial wird in den US-Nationalarchiven (National Archives and Records Administration, NARA) in Washington DC aufbewahrt. Ein automatischer Filmindeks der gesamten KH-Filmsammlung kann beim USGS in Sioux Falls (South Dakota, USA) vom USGS Global Land Information System (GLIS) bezogen werden. Das KH-Bildmaterial wird in Form von Positiv-, Negativfilm und Kontaktabzügen (auch als Vergrößerung) vom USGS EROS Data Center (EDC) kommerziell vertrieben.

(<http://www.fas.org/spp/military/program/imint/kh-11.htm>, Abfragestand: 07.06.2001,

<http://www.fas.org/spp/military/program/imint/kh-12.htm>, Abfragestand: 27.09.2000)

Satelliten-Scanner:

Der nach dem Fehlstart im April 1999 des ersten IKONOS-1 Satelliten schließlich von der Earth Resource Surveys Incorporation im September des gleichen Jahres gestartete IKONOS-2 Satellit liefert aus ca. 700 km Höhe raumhochauflösende Satellitenszenen (11 x 11 km²) einer Pixelauflösung von je 4 m in den vier multispektralen Kanälen (VIS-VNIR) und von 1 m im panchromatischen Kanal (VIS-VNIR). (<http://www.spaceimaging.com>, Abfragestand: 15.06.2001).

Die aus dem Fehlstart des EARLYBIRD Ende 1997 im Jahre 2001 hervorgegangene kommerzielle US-Satellitenserie QUICKBIRD der Earthwatch Incorporated begann im vierten Quartal 2001 mit dem Betrieb von QUICKBIRD-2. Dieser Satellit wird Bilddaten in spektral und räumlich fast identischer Auflösung wie IKONOS, jedoch in größerer Szenenabdeckung (22 x 22 km²) als dieser liefern. (<http://satellites.satellus.se/quickbird.asp>, Abfragestand: 15.11.2001)

Die US-Satellitenserie ORBVIEW wurde von Orbital Imaging Corporation erstmals im Jahre 1995 gestartet. Das Sensorsystem des neuesten ORBVIEW-4 Satelliten wird neben den bereits auch bei IKONOS-2 und QUICKBIRD-2 erhältlichen einkanaligen panchromatischen 1 m-Daten sowie vierkanaligen multispektralen 4 m-Daten zusätzlich hyperspektrale Daten aus 200 Kanälen des Spektralbereichs 450–2000 nm in einer Pixelauflösung von 20 m anbieten. Die Szenenabdeckungen (8 x 8 km² für die panchromatischen und multispektralen Daten, 5 x 5 km² für die hyperspektralen Daten) sind wesentlich kleiner als bei IKONOS und QUICKBIRD (http://www.orbimage.com/corp/orbimage_system/ov4, Stand: 24.09.2001)

Wesentlich leistungsfähiger als die vorgenannten kommerziellen, aktuellen raumhochauflösenden Satellitensysteme IKONOS, ORBVIEW und QUICKBIRD erweisen sich die bereits vorgenannten US-amerikanischen KEYHOLE-Spionagesatelliten *KH-1 bis 12* (VIS & IR) oder *LACROSSE* (RADAR), der aus einigen hundert Kilometern Flughöhe noch Objekte in Zentimeter Größe abbilden kann (NEUNECK & SCHEFFRAN, 2000).

b) Unbemannte Flugträgersysteme

Die unbemannte flugträgergestützte Fernerkundung im Bereich sehr hoher Raumauflösung weist den zukünftigen Trend nicht nur wegen des wegfallenden Pilotenrisikos und der größeren Kostenattraktivität (geringere Betriebskosten), sondern auch wegen der Bereitstellung multisensoriell-zeitsynchron aufgenommener Echtzeit-Daten.

Unter den unbemannten Flugaufklärungssystemen wird einerseits zwischen in großer Flughöhe (max. 18–20 km) und großer Flugweite (bis ca. 25.000 km) operierenden strategischen und andererseits in geringer Flughöhe (max. 4–5 km) und geringerer Flugweite (bis ca. 100 km) gesteuerten, taktischen Flugkörpern unterschieden.

Alle diejenigen wieder zurückgewinnbaren unbemannten Flugkörper, welche ein das Zielobjekt nicht beeinflussendes Instrument an Bord mitführen, werden als Drohnen bezeichnet. Die Startmodi von Drohnen reichen entsprechend ihrer Konstruktion und Größe von einer Flugzeugpiste, Katapultrampe, Starthilferakete bis zum Wurf aus der Hand (BIASS & BRAYBROOK, 2001).

Die hochtechnisierte Kriegsführung bedient sich bereits solcher unbemannter, mit digitalen Kameras ausgerüsteter taktischer Aufklärungsdrohnen. Nach einem Katapultstart von einer mobilen Rampe aus kann eine Drohne, von einer Bodenstation ferngesteuert, in ihr Zielgebiet gelenkt werden. In der internationalen Militärstrategie besteht eine große Konkurrenz dieser hochentwickelten Aufklärungssysteme zu Leichtflugzeugen, welche extrem lange über dem Zielgebiet kreisen und per Video-Echtzeit-Übertragung Ziele anpeilen können. Die High-Tech-Perfektion ist bereits von der Fertigung zweitaktmotor-angetriebener bis hin zu Prototypen solarstrombetriebener ultraleichter Drohnen gediehen.

Vermeehrt erhalten unbemannte Flugkörper Eingang in den zivilen Bereich, z.B. mit dem von der NASA etablierten Programm: „Flugzeugträger- und Sensortechnologie für die Umweltforschung (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology, ERAST)“, das zur Entwicklung zukünftiger dauerhafter Erd- und Umweltbeobachtungssysteme aus großer Flughöhe etabliert wurde.

Bei der flugzeuggestützten Aufzeichnung aus dem Weltraum in zeitsynchroner Echtzeit-Aufnahme ist die Orbital-Photographie im Vorteil durch:

1. Aufnahme eines großen Flächenareals in hoher Detailauflösung,
2. geringen analogen Speicherbedarf und -aufwand der zu erfassenden großen Mengen an Rauminformationen auf Photofilmmaterial,
3. mäßigen Kostenaufwand.

Die NASA arbeitet an der Entwicklung solarbetriebener Flugzeugträger, deren Betriebsenergie durch Photovoltaik bereitgestellt wird. Diese sehr leichten Flugträger erlauben allerdings ausschließlich den Transport von optisch-photographischen Systemen mit geringem Energiebedarf und Gewicht. Aktiv emittierende Radarsensoren eignen sich nicht, da sie durch die Aussendung von Mikrowellen zu viel der an Bord produzierten Betriebsenergie aufzehren.

Eine ausführliche Darstellung des aktuellen internationalen Angebots an unbemannten Flugkörpern (UAV) zum Einsatz als Sensor-Plattform ist in der dokumentarischen Erfassung von BIASS & BRAYBROOK (2001) zu finden.

Folgende Tabelle zeigt im Vergleich drei der größten, von der NASA für die raumhochauflösende Bildaufklärung entwickelten Modelle unbemannter Flugträgersysteme, aufgelistet in abnehmender Maximal-Betriebsdauer. Die Modelle waren auf dem Airsalon in Paris im Mai 2001 ausgestellt.

<i>Modell</i>	<i>max. Flugdauer</i>	<i>max. Flughöhe</i>	<i>Onboard Kamerasysteme räuml. Auflösung:(side/spot mode)</i>	<i>Antrieb</i>
Global Hawk	42 h	20 km (65000 ft)	Kodak digital CCD camera: opto-elektron. VIS (1 m/ 0,3 m) Raytheon thermal imager: IR: (1 m/ 0,3 m) SideAperturRadar/MTI: (1 m)	Rolls-Royce ALL AE3007H Turbofan-Motor
Predator (RQ-1)	40 h	13 – 16 km (20000 ft)	Video-AperturTV Video-AperturIRSynthet. SideAperturRadar	700 PS-Rotax- Turbopropeller Motor
Proteus	18 h	19 km	opto-elektron. VIS opto-elektron. IR	Twin-Turbofan- Motor

(Quelle: <http://www.dfrc.nasa.gov/PAO/PAIS/HTML/FS-020-DFRC.html>, Seitenstand: 27.09.2001)

Tab. 3.3 Technische Daten verschiedener unbemannter NASA-Echtzeitaufklärungsdrohnen

Das am 28.02.1998 erstmalig gestartete, unbemannte US-Langstrecken-Aufklärungsflugzeug „GLOBAL HAWK“ (**Fig. 3.18 a**) kann, als größter und schwerster unbemannter Flugkörper eine Flugstrecke von maximal 25.000 km in einer Flughöhe von 20 km für maximal ca. 42 Stunden autonom überdauern. Die an Bord mitgeführten Sensoren, ein opto-elektronischer (EO) im Simultanbetrieb mit einem Infrarot (IR)-Sensor sowie ein AperturRadar (SAR)-Sensor können pro Befliegung ca. 40.000 miles² in 1 m-Auflösung und 1900 Bilder in 0,3 m-Auflösung produzieren (http://www.fas.org/irp/program/collect/global_hawk.htm, Abfragestand: 05/2002)

Bei dem Drohnen-Modell der EADS, „EAGLE-1“ (**Fig. 3.18 b**), handelt es sich um eine europäische Militärausführung.

Das Modell des US-Aufklärers einer mittleren Flughöhe und langen Flugdauer, „RQ-1A/B PREDATOR“ (**Fig. 3.18 c**), verfügt über drei verschiedene Aufnahmesensoren (NEUNECK & SCHEFFRAN, 2000; http://www.af.mil/news/factsheets/RQ_1_Predator_Unmanned_Aerial.html, Abfragestand: 27.09.01):

1. ein *optoelektronischer Scanner*
zur direkten Übertragung von hochwertigen Video-Bildern,
2. ein *Infrarotsensor*
zur Aufspürung von Hitzequellen und
3. ein *Radar mit synthetischer Apertur*
zur zeilenweisen Bodenabtastung bei Dunkelheit und Bewölkung

Ein weiteres, innerhalb des NASA-Programms ERAST eingesetztes Langstrecken-Leichtflugzeug (ca. 2720 kg), 'PROTEUS High-Altitude Aircraft' (**Fig. 4.18 d**), kann optional von einem Piloten gesteuert oder mittels eines bodenstationsgeleiteten Autopilot-Aufnahmesystems aus einer Flughöhe von ca. 18–20 km in maximal 18 Stunden kommerzielle Daten aufnehmen. Die an Bord gespeicherten Daten werden über ein kommunikationssatelliten-basiertes Funkantennensystem zur Bodenstationen übermittelt. Die Ausstattung des Flugkörpers erlaubt die Durchführung von Missionen zur Atmosphärenforschung, Bodenobjekterkennung, kommerziellen Bildaufnahme etc.. Für seine Konstruktion waren eine extrem hohe Betriebsverlässlichkeit, geringe Betriebskosten und die Nutzbarkeit von Flughäfen mit minimaler Ausstattung ausschlaggebend (<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/Proteus/HTML/EC99-45110-7.html>, Seitenstand:17.06.01)

Mit dem fortschreitenden Einsatz unbemannter militärischer Flugkörper in den Zivilbereich, z.B. zur Katastrophenbekämpfung, hat eine neue Ära der intelligenten, fernerkundlichen Aufklärung begonnen.



Fig. 3.18 a) "GLOBAL HAWK", Seiten- (links) und Frontansicht (rechts), Airsalon Paris-Bourget, Photos: S.Hess



Fig. 3.18 b) "EAGLE 1", Seiten- (links) und Frontansicht (rechts), Airsalon Paris-Bourget, Photos: S.Hess



Fig. 3.18 c) "RQ-1A/B PREDATOR", Seitenansicht, Airsalon Juni 2001, Paris-Bourget, Photo: S.Hess



NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photolindex.html>
 NASA Photo: EC99-45110-8 Date: July 26, 1999 Photo by: Patrick Wright
 ERAST Program Proteus Aircraft in Flight

Fig. 3.18 d) "PROTEUS High Altitude Aircraft"

IV. SYNTHESE UND SCHLUBBETRACHTUNG

4.1 Datenkollekte

Die ausgiebige Recherche nach Dokumenten und Daten in verschiedenen Bibliotheken und Institutionen in Frankreich, Mali, Deutschland und Holland (s. Kapitel 1.3.2) hat ein umgekehrt proportionales Verhältnis ihrer Verwendbarkeit hervorgebracht. Während eine Unzahl an Veröffentlichungen der 70er und 80er Jahre zur Sahelproblematik und einige, vor allem französischsprachige Publikationen zum Nigerbinnendelta existieren, sieht die Situation zur Verfügbarkeit an wissenschaftlich auswertbaren Dokumenten und Daten desolat aus.

Die Archivierung von Luftbilddaten für die ehemaligen französischen Kolonialstaaten Westafrikas wurde bis zum Ende der Kolonialisierung 1960 beim IGN in Paris–St. Mandé geführt. Nach 1960 aufgenommenes Luftbildmaterial wird bei den kartographischen Abteilungen der einzelnen afrikanischen Länder vorgehalten. Der Erwerb von Material ab 1960 zwingt bisher zu einer Reise in das jeweilige afrikanische Land. Sowohl in Mali als auch in Frankreich ist die Funktionsfähigkeit des Luftbild- und Kartenarchivierungssystems als uneffizient zu reklamieren. Luftbildmaterial mußte jeweils vor Ort unter großem Zeitaufwand aus den bis dato analog vorliegenden Befliegungsplänen und Bild-Indexverzeichnissen herausgelesen werden. Der Aufbau eines geokodierten Abfragesystems mit angeschlossener Luftbild-Indexdatenbank würde bei gleichzeitigem Zugang über das Internet eine erhebliche Zeit- und Wegersparnis und vor allem eine koordinatengenaue, präzise Materialauswahl ermöglichen. An dieser Stelle sei angemerkt, daß die Autorin erst bei der dritten Vorsprache beim IGN in St. Mandé einen kundigen Kollegen der Vertriebsabteilung angetroffen hatte, um die vielgesuchten Orthophoto-Karten des Nigerbinnendeltas von 1982 zu erhalten. In Mali sah die Situation ärger aus. Eine Vorauszahlung der bestellten Luftbilder war unumgänglich, um der zuständigen, Luftbilder reproduzierenden Behörde in Bamako den Kauf von Chemikalien und Photopapier zu avancieren.

Ein benutzerfreundlicher Internetzugang könnte zur Recherche des exakt gewünschten Aufnahmematerials beitragen und damit z.B. die Problematik nicht ausreichend informierter Verantwortlicher bei den betreffenden Vertriebs-Zuständigkeiten umgehen helfen. Dies würde sich insbesondere bei Anreisen speziell zum Materialerwerb aus weiter Ferne bezahlt machen.

Bei der Suche nach Satellitenbildmaterial schloß die nicht vorhandene Finanzierungsunterstützung den Kauf aktueller kommerzieller Fernerkundungsprodukte aus. Die zusätzlich erfolglose Nachfrage zur kostenfreien Bereitstellung von aktuellen Daten führte schließlich zur Auswahl an historischem Fernerkundungsmaterial.

Mehr als 10 Jahre alte Landsat MSS-Daten werden mittlerweile von verschiedenen Anbietern zu Archivpreisen von ca. 200,- \$ pro Komplettszene (für eine aktuelle Komplettszene von MSS zu 1000,- \$, von SPOT-XS zu 2000,- EUR, von SPOT-P zu 2700,- EUR, von Landsat-TM zu 4000,- \$) vertrieben. Für diese Studie konnten bei PRODIG in Paris zwei historische Datenserien – eine multitemporale panchromatische Luftbild- und eine multispektrale MSS-Serie für lokal beschränkte Beispielausschnitte des Nigerbinnendeltas – kompiliert und entliehen werden. Das historische Fernerkundungsmaterial bietet einen retrospektiven Rückblick, der für Trendanalysen von Landschaftsveränderungen benötigt wird. In ihrer retrospektiven Aussagekraft werden historische Fernerkundungsdaten zukünftig stets ihre wertvolle Bedeutung beibehalten.

Kartenmaterial wurde beim IGN und der Société Géologique in Paris, der Bibliothek des MDRE in Bamako und der Gesellschaft zu Erdkunde in Berlin gesichtet und z.T. akquiriert.

Beim deutschen Seefahrtsamt in Hamburg wurden digitale Klimadatenreihen und beim DNSI in Bamako Agrarstatistiken in analoger Form erworben, wobei jedoch letztere nicht verwertet werden konnten.

4.2 Datenqualität

Abgesehen von der Nicht-Verfügbarkeit regional- bis loklräumlicher Daten, lagen im Internet bis zum aktuellen Zeitpunkt Daten überwiegend in bereits interpretierter Form vor. Bei der Zusammenstellung und Analyse fernerkundlicher Zeitreihen sind Originaldaten unter präziser Berücksichtigung ihrer räumlichen, temporalen, sensorischen und spektralen Eigenschaften zwingend erforderlich.

Die Größe des aufzunehmenden Objekts oder Prozeßphänomens entscheidet über den benötigten Aufnahmemaßstab bzw. die erforderliche Raumauflösung. Ein Objekt (z.B. Fluß) kleiner als ein Pixel kann generell nur in sehr kontraststarkem Milieu noch als solches wiedergegeben werden. Während die sahelische Vegetation in ihren geringen Bedeckungsgraden unter ca. 20 % auf MSS-Bildszenen im 79 m-Raster nur in groben Strukturen aufnehmbar ist, kann sie auf im 2m-Raster eingescannten historischen Luftbildern als Einzelindividuen erfaßt werden.

Weiterhin ist die temporale Aufnahmefrequenz entscheidend. Bei Luftbildern ist diese von der Befliegungshäufigkeit abhängig und bietet für die vorliegende Serie vier Termine der Jahre 1952, 1971, 1981 und 1984. Bei den MSS-Produkten wird die Aufnahmefrequenz von der Orbithöhe des Satelliten bestimmt. Für Landsat MSS werden in einer Repetitionsrate von 16 Tagen Daten geliefert, deren Auswertbarkeit letztendlich vom Grad der Wolkenbedeckung abhängt. Hier konnten MSS-Daten von drei Aufnahmetermen, 1972, 1974 und 1982 akquiriert werden.

Im Vergleich mit den Landsat-MSS-Bildern beschränkt sich die spektrale Eigenschaft der panchromatischen analogen Luftbilder auf den gesamten visiblen Bereich. Panchromatische IR-Luftbilder waren nur zum monotemporalen Aufnahmetermin von 1971 verfügbar. Bei den hier von zwei unterschiedlichen Landsat Sensoren MSS-1 und MSS-3 stammenden vierkanaligen Bilddaten wird zusätzlich der Bereich des Nahen Infrarots erfaßt. Radiometrische Informationen sind in digitaler Form nur beim digitalen Satellitenbild-, nicht auf dem analogen Luftbildmaterial verfügbar und auf letzterem auch nicht rekonstruierbar.

Zur absoluten geometrischen Korrektur ist eine topographische Kartenreferenz, im Falle von MSS-Daten mindestens besseren Aufnahmemaßstab als 1/ 250.000 und für die Luftbilder mindestens in deren Aufnahmemaßstab, hier im Kartenmaßstab von 1/ 50.000 (für das Nigerbinnendelta nicht existent) notwendig. Aufgrund des experimentellen Charakters der Methodik-Untersuchungen wurde auf eine absolute Korrektur verzichtet, war eine relative Referenzierung ausreichend. Da thematische Karteninformationen für das Nigerbinnendelta nicht genauer als 1/500.000 erhältlich waren, konnten die Untersuchungen von dieser Seite keine Informationsstützung erfahren. Beim Einsatz thematischer Karten ist zudem sorgfältig auf die zu ihrer Herstellung verwendete Art der Datenerhebung zu achten. Die Verifizierbarkeit der kartographischen Datenerhebung ist oftmals nicht rekonstruierbar.

Die von der Datenkollekte stark abhängige Datenqualität zeigt für die Klimadatenreihen Malis große Lücken auf, die mit der mangelhaften Infra- und Versorgungsstruktur in Mali zu begründen sind.

Zuverlässige Statistikdaten fehlen wegen einer schwierig zu erreichenden Bevölkerung aufgrund Sprach- und Übersetzungsproblemen, Analphabetismus etc. sowie wegen politisch herbeigeführter Datenverfälschungen. Damit waren Klima-, wie Statistikdatentypen als komplementäre Informationsstütze zu den Fernerkundungsanalysen nicht disponibel.

Das Schlüsselproblem bei temporalen Vergleichsanalysen ist die *Datenvergleichbarkeit*. Für das Untersuchungsgebiet konnte eine nur sehr zeitschnittarme, heterogene Struktur an Fernerkundungsdaten kompiliert werden.

Anstelle der Anwendung bereits erprobter Methodenroutinen zwang das vorliegende Material zur Entwicklung eigener neuer Datengewinnungsmethoden. Aus dieser Datenmangel-situation hat sich letztendlich der Untersuchungsgegenstand, die eigenhändige Erhebung regional bis lokalräumlicher Daten, heraus entwickelt.

Im Verhältnis zum enormen Aufwand der Datenrecherche im Vorfeld der Studie ist die Datenausbeute und –qualität als sehr dürftig und heterogen zu bewerten, dies besonders in Anbetracht der bereits investierten hohen Summen von Regierungs- und Nicht-Regierungsorganisationen für die Beschaffung und Bereitstellung von Daten im Nigerbinnendelta in zahlreichen Projekten.

4.3 Methoden und Ergebnisse

Zur methodischen Umsetzung kam in dieser Studie ausschließlich Freie Software zum Einsatz. Dies begründet sich nicht allein mit der lizenzfreien Nutzbarkeit, sondern vielmehr mit der bei nicht–proprietären, offenen Systemen gegebenen Einsehbarkeit des Programm–Quellcodes, der flexiblen Anpassbarkeit und Weiterentwickelbarkeit der Software an individuelle wissenschaftliche Ansprüche. Für die Luftbildexperimente wurde die freie Bildverarbeitungssoftware *KHOROS* eingesetzt, für die atmosphärischen Simulationen der freie Programmcode zum radiativen Strahlungstransfer *STREAMER*, zur Verarbeitung geokodierter Daten das freie GIS–Verarbeitungssystem *GRASS* sowie zusätzliche unterstützende C–Programme.

Beide fernerkundlichen Studien zur multitemporalen Erfassung der Landschaftsdynamik sehen sich mit dem Problem der Homogenität und der Eliminierbarkeit von ergebnisverfälschenden Artefakten konfrontiert. Bei den MSS–Bilddaten war ein präprozessierender Methodenstandard zur kontrollierten Unterdrückung des – die Landschaftveränderungsergebnisse verfälschenden – atmosphärischen und radiometrischen Bildrauschens auszuarbeiten. Simulationsversuche zur atmosphärischen Modellierung der multitemporalen MSS–Signalantworten belegten eine unsystematische, weder einschätzbare, noch rekonstruierbare Zeitinstabilität der ersten MSS–Sensoren. Die Effekte des atmosphärischen Rauschens bewirken generell am Satelliten infolge der atmosphärischen Aerosol–Rayleighstreuung verfälschte, generell erhöhte Eingangssignale. Die auf den historischen Landsat MSS–Daten berechneten SAVI–Ratiowerte zeigten im Bereich einer modellsimulierten aerosoloptischen Dicke von 0 bis 66 % ein unsystematisches Verhalten. Eine Erhöhung der aerosoloptischen Dicke über den Wert von 66 % brachte weiterhin ein atmosphärisches Schwellenwertphänomen hervor. Dieses äußerte sich am Satelliten durch erheblich verminderte Signale der vom Boden reflektierten Objektsignalantworten bei extrem stark getrübt, schliesslich für die Sonnenstrahlung undurchlässig gewordenen Atmosphäre. Während die ergebnisverfälschende Rauschproblematik auf den Luftbildern bewältigt werden konnte, belegten die Simulationsergebnisse für die MSS–Daten eine nicht kontrollierbare Sensor–Instabilität, unzureichende radiometrische Qualität und damit Nicht–Verwendbarkeit für multitemporale Vergleichsanalysen, insbesondere –wie PECH et al. (1986b) diskutieren – zur Erfassung sensibler Vegetationsveränderungsphänomene.

Die Beantwortbarkeit der Frage nach dem minimalen Objektdetailgrad, mit welchem mittels des Landsat MSS–Sensors unverfälschte Daten von Bodenveränderungsphänomenen aufnehmbar sind, wurde mit dieser Feststellung überwunden.

Die zu Anfang der Studie intensive Auseinandersetzung mit der visuellen Interpretation der multitemporalen Luftbildprodukte brachte folgende Erkenntnisse hervor: Diese Methode

stellte sich als teuer und zeitaufwendig heraus. Darüberhinaus führt sie – wegen der individuellen visuellen Wahrnehmung und der Abhängigkeit vom Grad der Geländekenntnis des/der jeweiligen Auswerters/in – zu subjektiven und nicht reproduzierbaren Ergebnissen. Aus dieser Erkenntnis und den radiometrischen Problemen bei der Analyse der Landsat–MSS–Daten entstand zum einen die Motivation zur Etablierung einer automatisierten, computergestützten Auswertungsmethode, die kostengünstig von verschiedenen Experten objektiv nachvollziehbare und – unter Kenntnis der Prämissen – identisch reproduzierbare Ergebnisse auf historischen Luftbildern liefert. Die nicht mögliche radiometrische Auswertbarkeit panchromatischer Luftbilder führte zur Hinwendung zu morpho–mathematischen Methoden. Diese können in der Analyse der geometrischen Form (z.B. Längen– und Ausrichtungsmessung von Dünen etc.) noch Ergebnisse hervorbringen, wenn radiometrische Verfahren bereits versagt haben. Zur semi–automatischen Extraktion von Gehölzveränderungen auf historischen Luftbildern waren letztere zunächst mittels Scannen in eine digitale Form zu transferieren. Die zum Scannen optimale Pixelauflösung wurde mittels des, sich aus dem Verhältnis von bildstatistischer Varianz zu Pixelauflösung (dpi) ergebenden Schwellenwerts bestimmt.

Zur weiteren Anwendung objektextrahierender Filterverfahren ist zunächst die Umwandlung des Grauwertbildes in ein Binärbild vorzunehmen. Dies wurde in automatisierter Form durch das hier neuartig entwickelte Verfahren der Maximumsegmentierungs–Binarisierung geleistet, mittels der ebenfalls die Luftbildqualität automatisch geprüft werden kann. Dem beim Scannen unweigerlich eingeschleppten, fälschlich als Einzelgehölze fehlinterpretierten Bildrauschen wurde mit räumlichen Bildfilterungsverfahren entgegen gewirkt. Zur Erzielung eines "reinen" Gehölz–Extraktionsergebnisses wurden Nachbarschafts– und morpho–mathematische Bildfilterungsverfahren gegeneinander experimentiert. Aus den Filterungsversuchen geht die morphomathematische Schließung als optimales Filterungsverfahren zur kontrollierten Unterdrückung des Bildrauschens bei gleichzeitigen Erfassen der Gehölzobjekte hervor.

Der hier auf historischem Luftbildmaterial entwickelte semi–automatisch morpho–mathematische Methodenfluß stellt einen vielversprechend effizienten und modernen Ansatz zur digital–automatisierten Gehölz–Quantifizierung dar.

Zur Erzielung flächendeckender Gehölzdichte–Ergebnisse konnte eine Transferierung der Methode durch eine Korrelation der Gehölzbedeckung im gesamten Deltagebiet mit dem NDVI, bzw. dem SAVI, nicht realisiert werden. Diese Beziehung ist nach ESTEVE (1998) nicht eindeutig definierbar und schon gar nicht auf der Basis zeitinstabiler Landsat MSS–Daten.

Eine nachträglich retrospektive Erfassung von Geländeparametern zur Kontrolle der Luftbild–Computerberechnungen ist nicht möglich. Zur Bewertung der Operationalität des entwickelten Ansatzes, d.h. zur Verifizierung seiner großflächigen Anwendbarkeit, bleibt dennoch ein aktuelles Austesten der auf historischem Material entwickelten Methode auf repräsentativen Sahelgehölzflächen unter Verwendung aktueller hochauflösender Fernerkundungsdaten. Im Falle der nachgewiesenen Stabilität des automatisierten, computergestützten Ansatzes wäre eine kostengünstige, flächendeckende und objektivierte Erfassung des gesamten Nigerbinnendeltas zu den historischen Aufnahmeperioden Anfang der 50er, 70er und evtl. Anfang der 80er Jahre in hoher Raumauflösung realisierbar.

Die größte und schwierigste Forschungs Herausforderung stellt die Etablierung von Langzeitbeobachtungs–Testflächen vor Ort dar. Der Aufbau einer Testflächen–Infrastruktur und –Datenbank erfordert eine nachvollziehbare und eindeutig dokumentierte Kollekte an klimatischen, pedologischen, botanischen etc. Geländedaten. Noch wichtiger erscheint dabei die Entwicklung von Methodenstandards, die zur Aufnahme und Verarbeitung der gewonnenen Geländedaten dringend notwendig sind.

Die Erfüllung beider Bedingungen würde einen ersten, realen Schritt hin zum Verständnis des hochkomplexen Feuchtgebietssystems darstellen. Während die Erhebung von Klimaparametern am Boden durch automatische Meßtechniken relativ gut beherrscht wird, läßt die automatisierte Geländedatenerfassung von botanischen Parametern über digitale

Instrumente und Messnetze technische Einschränkungen erkennen. Alternativ dazu ist die Finanzierung einer intensiven Geländeforschung, wie der von jahrelang in den Sahelländern vor Ort tätig gewesenen Wissenschaftlern – z.B. in den 70er Jahren noch der Fall – heute von den, die Sahelforschung und Entwicklung unterstützenden Organen nicht mehr gegeben. Wenn der ursprüngliche Zweck der Forschung im westafrikanischen Sahel vor der Kolonialzeit die Entdeckung neuer unbekannter Erdräume war, so hatte die Forschung zur Kolonialzeit die Aufgabe, der wirtschaftlichen Entwicklung beizutragen. Heute, in der postkolonialen Zeit besteht sie in der Stabilitätssicherung des komplexen Sahelökosystemgefüges.

Die Entwicklung an fernerkundlich effizienten und kostengünstigen, weitmöglichst automatisierten Raumdatenerfassungsverfahren steht just in diesem aktuellen Forschungsbedarf.

4.4 Datenstandards und Datentransferierbarkeit

Grundsätzlich steht den Methoden zur Erfassung von Felddaten zur Bildauswertung und zur mathematisch-statistischen Auswertung das Problem der Standardisierbarkeit der Datenaufnahme gegenüber. Dieser Aspekt ist in der geowissenschaftlichen Forschung zu favorisieren, da zur Erzeugung kohärenter Datenbanksysteme eine Struktur aus homogenen, in ihrer Qualität vergleichbaren, lückenlosen Datenserien notwendig ist.

Das Problem der Datenstandards beginnt bereits beim Einlesen von Satellitenbildformaten. Eine Schwierigkeit bei den ersten historischen Landsat MSS-Daten war die Dekodierung des nicht standardisierten Datenformats NDF. Die ab 1978 folgenden Modelle weisen schließlich die leicht einzulesenden BIP, BIL und schließlich BSQ-Formate auf. In der meteorologischen Satellitenbildverarbeitung, die eine Analyse von Massendaten in kürzester Zeit erfordert, werden vom WMO die Datenstandards der Formate BUFR (z.B. zukünftig für NOAA-Windprofil-Daten) und GRIB (Datenübertragungsformat rasterbasierter Vorhersagemodelle) garantiert (BERGÈS, 2002). Die erdbeobachtende Satellitenbeobachtung war bisher auf eine Verarbeitung von kleinen Datenvolumen ausgerichtet und daher bisher nicht auf die Verfügbarkeit von Formatstandards angewiesen. Mit dem Einsatz hyperspektraler und raumhochauflösender Sensorsysteme wird sich jedoch auch in der erdbeobachtenden Satellitenbildverarbeitung der Bedarf an Datenformatstandards zur Massendatenverarbeitung und -übertragung abzeichnen.

Da die auf historischen Luftbildern erzielten Gehölzdichte-Ergebnisse retrospektiv im Gelände nicht verifizierbar sind, wird eine Überprüfung zur Transferierbarkeit des Methodenansatzes auf aktuelle, raumhochauflösenden Bilddaten moderner Satelliten, wie IKONOS, QUICKBIRD etc. vorgeschlagen. Dazu sind Geländedaten möglichst zeitsynchron zu einem Bilddatenabgleich vorzunehmen.

Zur Erfassung und zum Abgleich von Einzelgehölz-Stichproben hat sich die Autorin mit ersten Versuchen zur photographischen Aufnahme mittels einer, an einem Flugdrachen befestigten, zeitautomatisch ausgelösten Kompaktkamera beholfen. Die im Bereich der spärlichen, sahelähnlichen Einzelgehölzbedeckung des Causse Méjan in Süd-Frankreich gestarteten Experimente sind zu einer stabilen Aufnahmemethode weiterzuentwickeln.

4.5 Zukünftige Datensysteme und Forschungsausblick

Für die fernerkundlich-retrospektive Forschung ist die digitale Verfügbarmachung von bisher überwiegend in analoger Form vorliegender Luftbildprodukte bedeutsam. Die Erstellung von standardisierten Konzepten zur Verarbeitung (Scannen) und Bereitstellung von Fernerkundungsdaten in digitaler und geocodierter Form stellt eine wichtige zukünftige Aufgabe für die Luftbildvertriebs-Institutionen dar.

Die öffentliche Bereitstellung wissenschaftlicher Daten im Internet verspricht nicht nur den Vorteil einer vereinfachten Zugänglichkeit, sondern auch neue Dimensionen eines wissenschaftlichen Datenaustauschs. Außerdem lassen die in Internetdatenbanken eingespeisten Daten durch die positive Kontrolle infolge der Datenöffnung gegenüber der Fachwelt auf eine höhere Datenqualität hoffen. Die Bereitstellung eines Datennetzes aus verschiedenen Datenbanken und Originaldaten (Fernerkundungsprodukte, Statistiken, Geländedaten etc.), von Inventar- und Indikatordaten sowie von Monitoring-/Forecasting-Daten wird bereits in Form eines weltweiten Länder-Datenbanksystemen von FAO und USAID vorangetrieben. Nach den Angaben der betreffenden Organisationen hat das Datennetz mit der globalen Verfügbarkeit bereits seine Grenzen der räumlichen Datenqualität erreicht. Die Organisationen reklamieren die nicht vorhandenen Daten regionalräumlicher Dimension. Zur Erhebung solcher Daten sind Monitoring-Methoden zu entwickeln, die die Informationen der zu erfassenden Objekte von jenen externer Variation (z.B. atmosphärischen Effekten) zu differenzieren vermögen und die mit weniger präzise oder ohne geometrische Referenzierung auskommen (SINGH, 1989).

Ein wissenschaftliches Datennetz für die Sahelländer verlangt allerdings zur erfolgreichen Analyse von Landschaftsveränderungen eine Datenqualität regionaler bis lokalräumlicher Dimension.

Nach Angaben des WORLD RESOURCES INSTITUTE (1994) sind über 2 Billionen Menschen allein von Brennholz als Energiequelle zum Kochen und Heizen abhängig. Feuerholz stellt insgesamt über 52 % des Energiebedarfs im subsaharischen Afrika. In Mali wird der aktuelle Holzverbrauch auf ca. 5 Millionen t/ Jahr geschätzt, der einer jährlichen Abholzung von 400.000 Hektar entspricht (WORLD BANK, 1994).

Die Befürchtungen gehen dahin, daß durch die Migrationsbewegung vom Land in die Stadt der Pro-Kopf-Bedarf an Energie ansteigen wird. Schätzungen der WORLD BANK (1993) sagen voraus, dass sich im Jahre 2005 ca. 35 % der Bevölkerung des Sahels in urbanen Regionen konzentrieren werden. Nach dem World Resources Institute werden im Jahre 2025 in den Entwicklungsländern voraussichtlich 4 Billionen Menschen (= Weltbevölkerung von 1975) in städtischen Gebieten leben. Dies deutet auf eine neue Degradationsproblematik und -gefahr für die Sahel- und Entwicklungsländer, die einer vorsorglichen und vorausschauenden sowie einer auf sorgfältigen Expertisen beruhenden, Raum- und Energiepolitik bedarf.

Im Nigerbinnendelta resultieren Probleme aus dem Nebeneinander von traditionellen und modernen Bewirtschaftungsmethoden. Für die Zukunft ist keine Zunahme der Viehhaltung und darauf aufbauender Wirtschaftsaktivitäten zu erwarten (Gefahr von Epidemien, geringe Milchproduktion der Rinder, keine Ledervermarktung wegen des Brandmarkens der Rinder). Erfolgversprechender erscheint eine Einschränkung der Viehwirtschaft zugunsten der Fischerei. Die zur Konservierung durch Räuchern benötigte Energie wird allerdings generell durch Holz bereitgestellt. Mit der Bevölkerungszunahme wird zudem der Energieverbrauch in sahelischen Agglomerationen ansteigen. Daraus folgt eine, insbesondere in den wenig bevölkerten ländlichen Räumen vermutlich ansteigende Gehölzentnahme. Der hier gewählte Untersuchungsgegenstand zur Entwicklung von effizienten, semi-automatischen Aufnahme-techniken der Gehölzdynamik in sensiblen semi-ariden Ökosystemen auf der Basis von Luftbildern zeigt einmal mehr seine hochbrisante Aktualität.

ZUSAMMENFASSUNG

Langzeitbeobachtungsstudien zur Landschaftsdynamik in Sahelländern stehen generell einem defizitären Angebot an quantitativen Rauminformationen gegenüber. Der im Sahelland Mali vorgefundene lokal- bis regionalräumliche Datenmangel führte zu einer methodologischen Studie, die die Entwicklung von Verfahren zur multi-temporalen Erfassung und Analyse von Landschaftsveränderungsdaten beinhaltet. Für den Raum Westafrika existiert in großer Flächenüberdeckung historisches Fernerkundungsmaterial in Form hochauflösender Luftbilder ab den 50er Jahren und erste erdbeobachtende Satellitendaten von Landsat-MSS ab den 70er Jahren. Multitemporale Langzeitanalysen verlangen zur digitalen Reproduzierbarkeit, zur Datenvergleich- und Objekterfaßbarkeit die a priori-Betrachtung der Datenbeschaffenheit und -qualität.

Zwei, ohne verfügbare, noch rekonstruierbare Bodenkontrolldaten entwickelte Methodenansätze zeigen nicht nur die Möglichkeiten, sondern auch die Grenzen eindeutiger radiometrischer und morphometrischer Bildinformationsgewinnung. Innerhalb des Überschwemmungsunstraums des Nigerbinnendeltas im Zentrum Malis stellen sich zwei Teilstudien zur Extraktion von quantitativen Sahelvegetationsdaten den radiometrischen und atmosphärischen Problemen:

1. Präprozessierende Homogenisierung von multitemporalen MSS-Archivdaten mit Simulationen zur Wirksamkeit atmosphärischer und sensorbedingter Effekte
2. Entwicklung einer Methode zur semi-automatischen Erfassung und Quantifizierung der Dynamik der Gehölzbedeckungsdichte auf panchromatischen Archiv-Luftbildern

Die erste Teilstudie stellt historische Landsat-MSS-Satellitenbilddaten für multi-temporale Analysen der Landschaftsdynamik als unbrauchbar heraus. In der zweiten Teilstudie wird der eigens, mittels morphomathematischer Filteroperationen für die automatische Mustererkennung und Quantifizierung von Sahelgehölzobjekten entwickelte Methodenansatz präsentiert.

Abschließend wird die Forderung nach kosten- und zeiteffizienten Methodenstandards hinsichtlich ihrer Repräsentativität für die Langzeitbeobachtung des Ressourceninventars semi-arider Räume sowie der operationellen Transferierbarkeit auf Datenmaterial moderner Fernerkundungssensoren diskutiert.

ABSTRACT

Long-time monitoring of landscape dynamics in Sahel countries are confronted to a lack of quantitative spatial information in general. This lack of local to regional level data has induced to a methodological study, dealing with the development of methods for acquisition and analysis of multi-temporal data to landscape changes. Historical remote sensing data are covering with huge sheets the region of Westafrika. There are high resolution aerial photographs from up to the 50ies so as some first earth observation satellite data of Landsat MSS from up to the 70ies.

Multitemporal long-time monitoring requires respective to digital data reproductivity, data comparability and object extraction the a-priori consideration of data property and quality.

Two methods, developed without available, nor reproducible soil control data are showing not only the potential, but also the limits of radiometric and morphometric information gain of image data. Within the favoured inonndation area of the Internal Niger Delta of central Mali two partial studies are treating the radiometric and atmospheric problems related to the extraction of quantitative data of Sahelian wood objects :

- 1. Preprocessing homogenization of multitemporal MSS archive data with simulations of the impact of atmospheric and sensor-induced effects*
- 2. Development of a method to semi-automatic recognition and quantification of dynamics of wood cover density on panchromatic historical aerial photographs*

The first partial study exposes Landsat MSS historical satellite data as unsuitable for multi-temporal analyses of landscape dynamis. The second partial study presents the development of a special method to automated wood cover recognition and quantification by the use of morpho-mathematic filter operations.

Finally, the postulation of cost- and time efficient method standards is discussed in view of a representativity to long-time monitoring of reource inventories in semi-arid regions, so as of the operational transferability between historical remote sensing data and such data of modern sensors.

LITERATUR

- ALBERTZ J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Eine Einführung in die Fernerkundung, Darmstadt.
- ALBERTZ J. (2001): Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Aufl., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- D'ALMEIDA G.A. (1987): On the variability of desert aerosol radiative characteristics. *Journal of geophysical Research*, 92: 3017–2026.
- ÅNGSTROM A. K. (1961): Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, 13(2): 214–223.
- ANHUF D. et al. (1990): Veränderungen der realen Bodenbedeckung im Sahel de Republik Niger (Regionen Tahoua und Niamey) zwischen 1955 und 1975. *Erdkunde*, 44: 195–209.
- ANHUF D. (1994) Vegetationsdegradierung in den Tropen am Beispiel Afrika. Ausmaß und Folgen. *Abhandlung der Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Math.-Naturw. Klasse. Nr. 2*, Stuttgart: 135–154.
- ARNOLD E. (Hrsg.) (1997): World Atlas of Desertification. UNEP, London.
- AVERY T.E. & BERLIN G.L. (1992): Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation.– 5th ed., New York [a.o.], Maxwell Macmillan International (Canada) .
- B**ARTH K. (1975): Der Fischfang im Binnendelta des Niger in Mali – Seine Grundlagen, wirtschaftliche Bedeutung und Entwicklung. *Geographische Zeitschrift*, 63(4): 256–275.
- BARTH K. (1977): Der Geokomplex Sahel– Untersuchungen zur Landschaftsökologie im Sahel Malis als Grundlage agrar- und weidewirtschaftlicher Entwicklungsplanung. In: WILHELMY H. et al. (Hrsg.) (1977), *Tübinger Geographische Studien*, 71, Sonderband 12.
- BARTH K. (1978): Ausmaß und Auswirkungen des Bodenabtrags als Folge kulturtechnischer Maßnahmen im Niger–Binnendelta Malis. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Suppl.Bd. 30: 39–54.
- BARTH K. (1986): Mali – Eine geographische Landeskunde. Wissenschaftliche Länderkunden, Bd. 25, Darmstadt:: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- BAUER CH. (1994): Digitale Bildverarbeitung von großräumigen Satellitenbild–Verbänden: Mosaikbildung, multitemporale Analyse und Klassifizierung. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, Reihe D, Bd. 6, FU/TU/TFH, Berlin (Dissertation).
- BERG A. et al. (1981): Pévision des Productions Rizicoles par Télédétection dans le Bassin du Niger en amont du Delta Central du Nigérien, Projet Régional F.E.D., rapport d'activité, Centre de CE de Recherche, Ispra.
- BERG A. (1984): Application of space remote sensing to the prediction of rice production in the Niger basin, International Conference on Space, 24th, Rome, Italy, March 22, 23, 1984, *Proceedings (A85–12536 02–43) Rassegna Internazionale Elettronica Nucleare ed Aerospaziale*, Rome, 1984: 35–45.
- BERG A. & GREGOIRE J.M. (1982): Use of Remote Sensing Techniques for Rice Production Forecasting in West Africa. *Proceedings of an EARSeL–ESA Symposium_Igls*, Austria, 20–21 April 1982 5ESA SP–175, June 1982).
- BERG A. & GREGOIRE J.M. (1984): Remote Sensing in West Africa. *The Courier*, 84: 70–72
- BERGÈS J–C. (1993): Comtes rendus de l'atelier d'estimation de pluie 02.–04.12.1993, AGRHYMET (Niamey, Niger), unofficial paper.
- BERGÈS J–C. (2002): Support of WMO binary formats. Congress paper of the GRASS User conference 2002 in

Trento (print on CDROM), html: http://grass.its.it/conferences/conf_trento_2002.html, letzter Seitenstand: 09.09.2002.

BERTRAND R. (1974): Les systèmes de paysages des plaines inondables du delta vif du moyen Niger (Mali) – Une application de la cartographie morphopédologique en vue de l'aménagement hydroagricole. *L'Agronomie Tropicale*, 2–3: 154–211.

BETZER P.R. (1988): Long Range Transport of Giant Mineral Aerosol Particles, *Nature* 336, 568–571.

BIASS E.H. & BRAYBROOK.R. (2001): The UAV as Sensor Platform – from Pioneer to Global Hawk. *Armada International*, 5: 1–12.

BIED-CHARRETON M. et al. (1977): Etude du delta central du fleuve Niger – Projet "Saphyr" (Satellite Project Hydrology Research). *Proceedings of the 4th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Québec City, may 1977:341–354.

BILLE J.C. (1977): Woody forage species in the Sahel: their biology and use. 1st Int. Rangeland Congress, Denver. p. 392–395.

BLANCK J.P. & TRICART J. (1991): Quelques types de dégradation des milieux sahéliens. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Suppl.–Bd. 83: 17 – 21.

BOSSARD M. & GUYOT L. (1987): Using Landsat MSS quick-look images to monitor changing phenomena in Africa, *Photo Interpretation*, 26, July–Aug. 1987: 17–20.

BOUDET G. (1979): Quelques observations sur les fluctuations du couvert végétal sahélien au Gourma malien et leurs conséquences pour une stratégie de gestion sylvo-pastoral. *Bois et Forêts des Tropiques*, 184: 31–44.

BOUYER S. & DABIN N. (1963): Etudes pédologiques du Delta Central du Niger. *L'Agronomie Tropicale*, 12: 1300–1304.

BOW S.–T. (1992): Pattern recognition and Image Processing. New York.

BRAUN-BLANQUET J. (1964): Pflanzensoziologie. 3. Aufl., Wien.

BREMAN H. & KESSLER J.J. (1995): Woody plants in agro-ecosystems of semi-arid regions with an emphasis on the sahelian countries. Berlin.

CAMPBELL J.B. (2002): Introduction to remote sensing. 3.ed., London, New York: Guilford Press.

CAMPBELL J.B. (1996): Introduction to remote sensing. 2.ed., London, new York: Guilford Press.

CARRÈRE J. (1982): Le modèle mathématique du fleuve Niger. *Bulletin d'Information de l'IGN*, 45(2): 33–35.

CASELLES V. & LOPEZ GARZIA M.J. (1989): An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 1127–1134.

CHANDRASEKHAR S. (1950): Radiative transfer. Oxford University Press.

CHARNEY J.G. (1975): Dynamics of deserts and drought in the Sahel. In: World Meteorological Organization (1975): The physical basis of climate and climate modelling. GARP Publications Series no. 16, Geneva, Switzerland, 171–175.

CHEVALIÈRE A. (1934): Etude sur les prairies l'Ouest Africain. *Rév. Botanique appl. et Agric. Tropic.*, 14: 17–48.

COINER J.C. (1980): Using Landsat to monitor changes in vegetation cover induced by desertification processes. *Proceedings of the 14th International Symposium of Remote Sensing of Environment*, Costa Rica, 1980 (Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute of Michigan: 1341–1351.

COLWELL R.N. (ed.) (1983): Manual of Remote Sensing. 2nd Edition, I. Theory, instruments and techniques. II.

Interpretation and applications. Falls Church, Virginia. (American. Society of Photogrammetry).

COSNEFROY H. et al. (1996): Selection and characterisation of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 58: 101–114.

CRACKNELL A.P. (2001): Remote sensing and climate change : role of earth observation. London: Springer.

CRIST E.P. & CICONE R.C. (1984): A physically-based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap, *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(3).

CSAPLOVICS E. (1992): Methoden der regionalen Fernerkundung. Anwendung im Sahel Afrikas, Berlin, New York: Springer.

CSE (Centre de suivi écologique) & MEPN (Ministère de l'Environnement et de la protection de la nature) (1996): L'imagerie NOAA/ AVHRR dans la veille environnementale. Dakar.

DAVE J.V. (1978): Extensive data sets of diffuse radiation in realistic atmospheric models with aerosols and common absorbing gases. *Solar Energy*, 21: 361–369.

DAVE J.V. (1980): Effect of atmospheric conditions on remote sensing of vegetation parameters. *Remote Sensing of Environment*, 10: 87–99.

DAVE J.V. (1981): Influence of illumination and viewing geometry and atmospheric composition on the « tasseled cap » transformation of Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 11: 37–55.

DIAZ H.F. & MARKGRAF V. (2000): El Niño and the southern oscillation – multiscale variability and global and regional impacts. Melbourne, Madrid: Cambridge University Press.

DILLIGEARD E.X. et al. (1996): Spot calibration of XS1, XS2 channels using Rayleigh scattering over oceans. *SPIE*, 2957.

DINGUIRARD E.X. & SLATER S. (1997): Optical Sensors calibration. in: GUYOT G. & PHULPIN T.(eds.) (1997): Physical measurements and signatures in remote sensing. Vol. 1, A.A.Balkema: Rotterdam & Brookfield: 9–17.

DUVERNOY I. (1999): Des photographes aériennes numérisées pour estimer la progression de l'embroussaillement par le buis sur le Causse-Méjan, *Bulletin SFPT*, 156: 13–19.

EHRlich D. et al. (1997): Biomass burning and broad-scale land-cover changes in West-Africa. *Remote Sensing of Environment*, 61: 201–209.

ELLINGTON R.G. et al. (1991): The intercomparison of radiation codes used in climate models. *Journal of Geophysical Research*, 96 (D5): 8929–8953.

ELVIDGE C.D. et al. (1995): Relative Radiometric Normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) Data Using an Automatic Scattergram-Controlled Regression. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(10): 1255–1260.

ESTÈVE P. et al. (1998): Tropical dry ecosystems modelling and monitoring from space. *Ecological Modelling*, 108: 175–188.

FERRANTI L. et al. (1999): The effect of land-surface feedbacks on the monsoon circulation, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 125: 1527–1550.

FOLLAND C.K. et al. (1986): Sahel rainfall and worldwide temperatures, 1901–85. *Nature*, 320: 602–607.

FORSTER B.C. (1984): Derivation of atmospheric correction procedures for LANDSAT MSS with particular reference to urban data. *International Journal of Remote Sensing*, 5(5): 799–817.

FOWLER M.J.F. (1996): Declassified intelligence satellite photographs, *AARGnews*, 13: 30–35.

- FRANKLIN J. (1991): Land cover stratification using Landsat Thematic Mapper data in Sahelian and Sudanian woodland and wooded grassland. *Journal of Arid Environments*, 20: 141–163.
- FRANKLIN J. & STRAHLER A.H. (1988): Invertible canopy of reflectance modeling of vegetation structure in semiarid woodland: I.E.E.E. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26: 809–825.
- FRANKLIN J. & HIERNAUX P.H.Y. (1991) : Estimating foliage and woody biomass in Sahelian and Sudanian woodlands using a remote sensing model. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6) : 1387 – 1404.
- GALLAIS J. (1967): Le Delta intérieur du Niger et ses bordures. Étude morphologique. Éditions du Centre national de la recherche scientifique, *Mémoires et documents*, vol. III, avec cartes hors text, Paris.
- GALLAIS J. (1971): Le Delta intérieur du Niger. *L'Information Géographique*, 35(5): 250–252.
- GALLAIS J. (1984): Hommes du Sahel , Paris: Flammarion.
- GIJSBERS H.J.M., KESSLER J.J. & KNEVEL M.K. (1994) : Dynamics and natural regeneration of woody species in farmed parklands in the Sahel region (Province of Passore, Burkina Faso). *Forest Ecology & Management*, 64: 1–12.
- GILLIES J.A. et al. (1996): Dust concentration and particle–size characteristics of an intense dust haze event: Inland Delta region, Mali, West Africa. *Atmospheric Environment*, 30(7): 1081–1090
- GOÏTA K. & ROYER A. (1992): Land surface climatology and land cover change – monitoring since 1973 over a north–Sahelian zone (Ansongo–Mali) using Landsat data, *Geocarto International*, 2: 15–28.
- GONIMA L. (1993): Simple algorithm for the atmospheric correction of reflectance images, *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1179–1187.
- GOUDIE A.S. (1981): Dust storms in space and time. *Progress in Physical Geography*, 7, 502–530.
- GOWARD S.N. & WILLIAMS D. (1997): Landsat and Earth Systems Science: Development of terrestrial monitoring, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(7):887–900.
- GROTEN S.M.E. (1991): Satelliten–Monitoring von Agrar–Ökosystemen im Sahel. Universität Münster (Dissertation).
- GROTEN S.M.E. (1993): From monitoring to management –experiences from NOAA–NDVI application research in semiarid Africa. *Congress paper of the Int. Symposium "Operationalization of Remote Sensing" 19–23 April 1993*, ITC Enschede (Netherlands): 147–158.
- GRUNERT J. (1988): Verwitterung und Bodenbildung in der Süd–Sahara, im Sahel und im Nord–Sudan, mit Beispielen aus Niger, Burkina Faso und Nord–Togo. In: HAGEDORN J. & MENSCHING H. (Hrsg.): Aktuelle Morphodynamik und Morphogenese in den semiariden Randtropen und Subtropen. *Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften Göttingen, Math.–Physik. Klasse III*: 22–43.
- GRUNERT J. & ERDMANN K.H. (1989): Bodenfeuchtemessungen im Sahel der Republik Niger. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 59(I): 167–172.
- GRUNERT J. & ERDMANN K.H. (1992): Die Auswirkungen einer Regenzeit auf das Bodenfeuchteregime im Sahel der Republik Niger. UNESCO–Programm « Der Mensch und die Biosphäre », Dt. Nationalkom., MaB–Mitteilungen, Bonn, 36: 92–118.
- GRUNERT J. & KAPPAS M. (1999): Desertifikation im Sahel Westafrikas – Neuere Forschungsergebnisse aus dem Oudalan im Norden von Burkina Faso. in: MEYER G. & THIMM A. (ed.) (1999): *Naturräume in der Dritten Welt –Ausbeutung, nachhaltige Entwicklung oder Schutz ?*, Interdisziplinärer Arbeitskreis Dritte Welt, Bd. 13, Mainz.
- GUYER J. & LAMBIN E.F. (1993): Land use in an urban hinterland. Ethnography and remote sensing of African Intensification. *American Anthropologist*, 95(4): 839–859.

GUYOT L. (1985): La surveillance des crues de grands fleuves par télédétection satellitaire; l'exemple du fleuve Niger. *Bulletin d'Information I.G.N.*, 85/2, no. 52, Paris: 23–26.

HABERÄCKER, P. (1991): Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und Anwendungen. 4. Aufl. München.

HAGOLLE O. et al. (1996): POLDER in-flight calibration plan, SPIE Proceeding European Symposium on Satellite Remote Sensing III, 23–26 September 1996 – Palazzo dei Congressi, TAORMINA (ITALY)

HALL F.G. et al. (1991): Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35: 11–27.

HARRISON S.P. et al. (2001): The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future. *Earth–Science Reviews*, 54: 43–80.

HEIJMANS H.J.A.M. (1994): Morphological Image Operators. *Advances in Electronics and Electron Physics*. Supplement 24. Boston.

HENRICKSEN B.L. & DURKIN J.W. (1986): Growing period and drought early warning in Africa using Satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1583–1608.

HENRY P. et al. (1993): SPOT multitemporal calibration over stable desert areas. *SPIE*, vol. 1983.

HESS S. (2002): GRASS on the web. Congress paper of the GRASS User conference 2002 in Trento (print on CDROM), URL: http://grass.itc.it/conferences/conf_trento2002.html, letzter Seitenstand: 09.09.2002.

HESS S. & BERGES J.C. (1999): Quantification of wood cover dynamics by computer-assisted analysis of aerial photographs in the Internal Niger Delta (Mali). *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I (5/6)*: 1–18.

HIERNAUX P.H.Y. (1980): L'inventaire du potentiel fourrager des arbres et arbustes d'une région du Sahel malien. Methodes et premières résultats. In: LE HOUEROU H.N. (ed.) (1980): *Browse in Africa. The current state of knowledge*. Adis Abeba.

HIERNAUX P.H.Y. (1984): Recherche d'une solution aux problèmes de l'élevage dans le delta intérieur du Niger au Mali, Vol.1: Les pâturages de la zone d'étude, CIPEA, Adis Abeba & ODEM, Sevre.

HIERNAUX P.H.Y. & JUSTICE C.O. (1986): Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel Malien. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1515–1531.

HOLBEN B.N. et al. (1992): Aerosols retrieval over land from AVHRR Data–Application for atmospheric correction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 212–222, 1992.

HULME M. (2001): Climatic perspectives of Sahelian desiccation: 1973–1998. *Global Environmental Change*, 11: 19–29.

IGN/ORSTOM/SOGREAH (1982): Le modèle mathématique du fleuve Niger. Centre de Documentation du Ministère de la Coopération et du Développement, Paris (document inofficiel).

IGN (1980): Inventaire des données topographiques et cartographiques du Bassin du Fleuve Niger en République du Bénin, du Cameroun, de Côte d'Ivoire, de Guinée, de Haute-Volta, du Mali, du Niger, du Tchad. IGN, Paris.

IGN (ed.) (1990): L'Oeuvre de l'I.G.N. En Afrique, au sud du Sahara et à Madagascar (1945–1985). *Bulletin d'Information de l'IGN*, 58(2): 3–34

JACKSON R.D. et al. (1983): Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, 13: 187–208.

JÄHNE B. (1989): Digitale Bildverarbeitung. Berlin, Heidelberg: Springer.

JÄHNE B. (1995): Digital Image Processing – Concepts, algorithms and scientific applications. Berlin/New York,

Heidelberg: Springer.

JENSEN J.R. (1986): *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice–Hall, Inc., 286 p.

JONG J.G. et al. (1998): A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(2): 143–150.

JUPP D.L.B. et al. (1986): Interpretation of vegetation structure in Landsat MSS imagery: a case study in disturbed semi–arid eucalypt woodland. Part 2. Model based analysis. *Journal of Environmental Management*, 23, 35–57.

JUSTICE C.O. et al. (1991): The effect of water vapour on the NDVI derived for the Sahelian Region from NOAA–AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6), 1165–1188

KADMON, R. & HARARI–KREMER, R. (1999): Studying long–term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 68(2): 164 – 176.

KAPPAS M. (1993): *Fernerkundung nah gebracht – Leitfaden für Geowissenschaftler*. Bonn: Dümmler.

KAPPAS M. (1998): Naturraumpotential und Landnutzung im Oudalan – eine Fallstudie aus dem Sahel Burkina Fasos zur Anwendbarkeit von Fernerkundungsmethoden im regionalen Maßstab. In: *Mannheimer Geographische Arbeiten* (Habilitationsschrift).

KAUFMANN Y.J. (1993): Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance, *Journal of Geophysical Research*, 98: 2677–2692.

KAUTH R.J. & THOMAS G.S. (1976): The Tasseled Cap – a graphic description of the spectral–temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, LARS, Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 4B41–4b51.

KAY S. et al. (1998): Computer–assisted recognition of olive trees in digital imagery. *Proceedings VII Symposium on Research and Environmental Monitoring*, 09/04/98.

KEY J. (1998): Streamer user’s guide, Technical report 96–01, Department of Geography, Boston University.

KHOROS 2 DIP Courses (1997), integrated in software.

KIRCHHOF W. et al. (1984): Evaluation of multitemporal Landsat data for the detection of surface changes in the Sahel zone. *Proceedings of the 8th Canadian Symposium on Remote Sensing in 1984*, Quebec (Canada): 675–684.

KNEIZYS F.X. et al. (1983): Atmospheric Transmittance/ radiance: Computer code LOWTRAN –6, AFGL–TR–83–0187, Air Force Geophysics Lab, Hanscom AFB, MA.

KNEIZYS F.X. et al. (1988): Atmospheric Transmittance/ radiance: Computer code LOWTRAN –7, AFGL–TR–88–0177, Air Force Geophysics Lab, Hanscom AFB, MA.

KOMAR G.J. et al. (1996): The Landsat Program: Toward Landsat 7 and Beyond. Paper presented at the Pecora 13 Symposium, Sioux Falls, South Dakota August 22, 1996 (URL: <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/pecora.html>)

KONSTANTINIDES K. & RASURE J.R. (1994): The Khoros Software Development Environment for Image and Signal Processing. *IEEE Transactions on Image Processing*, 3(3): 243–252.

KRAUS K & SCHNEIDER W (1988): *Fernerkundung. Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Band 1, Bonn: Dümmler.

KRAUS K. (1990): *Fernerkundung. Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Band 2, Bonn: Dümmler.

KRIEBEL K.T. (1978): Average variability of the radiation reflected by vegetated surfaces due to differing irradiations. *Remote Sensing of Environment*, 7:81–83

- KÜBEROW H. (1994): Quantitative und qualitative Erfassung von Vegetationsveränderungen. Ein Beispiel aus dem Südsahel Malis. *Die Erde*, 124: 35–56.
- KÜBEROW H. & HAENISCH H. (1999): Monitoring the dynamics of «tiger bush» (brousse tigrée) in the West African Sahel (Niger) by a combination of Landsat MSS and TM, SPOT, aerial and kite photographs. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2: 77–94.
- LAMBIN E.F. et al. (1993): Agricultural Production Monitoring in the Sahel Using Remote Sensing: Present Possibilities and Research Needs. *Journal of Environmental Management*, 38, 301–322.
- LAMBIN E.F. & EHRLICH D. (1997): Land–cover changes in Sub–Saharian Africa (1982–1991): Application of a Change Index Based on Remotely Sensed Surface Temperature and Vegetation Indices at a Continental Scale. *Remote Sensing of Environment*, 61: 181–200.
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (2000): Remote sensing and image interpretation, 4. ed., New York: Wiley.
- LÖFFLER (1994): Geographie und Fernerkundung: Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten. Stuttgart: Teubner.
- LYON J.G. et al. (1998): A change detection experiment using vegetation indice. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(2):143–150.
- MALO A.R. & NICHOLSON S.E. (1990): A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environment*, 19: 1–24.
- MARKHAM B.L. & BARKER J.L. (1987): Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS Data. *Remote Sensing of Environment*, 22: 39–71.
- MARKHAM B.L. et al. (1996): Landsat–7 ETM+IN–Flight Radiometric Calibration. Workshop on Calibration of Optical and Thermal Sensors, Toulouse.
- MARTONNE (1948): Découverte aérienne du monde. Paris.
- MASRY S.E. et al. (1975): Difference detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(9): 1145–1148.
- MATHESON W. & RINGROSE S. (1994): Assessment of degradation features and their development into the post–drought period in the west–central Sahel using Landsat MSS. *Journal of Arid Environment*, 26: 181–199.
- McCAULEY J.F. et al. (1981): The US dust storm of February 1977. In: PEWE T.L. (1981) (ed.): Desert Dust: Origin, Characteristics and Effects on Man, Special Paper, 186, Boulder: Geol. Soc. Am.: 123–148.
- McTAINSH G.H. et al. (1997): Dust deposition and particle size in Mali, West Africa. *Catena*, 29: 307–322.
- MENZEL D.H. (1970): Astronomy (sky maps and illustration by YU, C.–S.), New York : Random House.
- MILICH L. & WEISS E. (2000): GAC NDVI images: relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of The Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger–Nigeria border (southern Sahel), *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 261 – 280.
- MIKA A.M. (1997): Three Decades of Landsat Instruments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(7): 839–852.
- MOHR, B. (1969): Die Reiskultur in Westafrika. Verbreitung und Anbauformen. München: Weltforum.
- MORAN M.S. et al. (1992): Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output, *Remote Sensing of Environment*, 41: 169–184.

- MORLEY J.G. & MULLER J.-P. (1996): Wetland monitoring using SAR imagery and interferometry. *Proceedings of ISPRS XVIII*, Vienna.
- NELSON R.F. (1985): Sensor-induced variability of Landsat MSS data, *Remote Sensing of Environment*, 18: 35–48.
- NEUNECK G. & SCHEFFRAN J. (2000): Die Grenzen technischer Kreigführung, *Spektrum der Wissenschaft*, 1: 90–96.
- NICHOLSON S.E. et al. (1996): Rainfall in the Sahel during 1994. *Journal of Climate*, 7: 1673–1676.
- NICHOLSON S.E. et al. (1998): Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the West African Sahel, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5): 815–829.
- NICKLING W.G. & GILLIES J.A. (1993): Dust emission and transport in Mali, Africa. *Sedimentology*, 40: 859–868.
- OBEID, M & SEIF, ED (1971): Ecological studies of the vegetation of Sudan. I. *Acacia senegal* (L.) Willd. and its natural regeneration. *Journal of Applied Ecology*, 8: 507–518.
- OTTERMAN J. (1974): Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism. *Science*, 186: 531–533.
- PALMER J.M. (1984): Effective band-widths for Landsat-4 and Landsat-D Multispectral Scanner and Thematic Mapper Subsystems, *IEEE Transactions of Geosciences Remote Sensing*, 22: 33–338.
- PECH, R.P. et al. (1986a). Reflectance modelling and the derivation of vegetation indices for an Australian semi-arid shrubland. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 389–412.
- PECH R.P. et al. (1986b): Calibration of Landsat Data for Sparsely Vegetated Semi-Arid Rangelands.. *International Journal of Remote Sensing*, 7(12): 1729–1750.
- PIELKE (jr.) R.A. (1998): Rethinking the role of adaptation in climate policy. *Global Environmental Change*, 8(2): 159–170.
- POUPON H. (1977): Evolution d'un peuplement d'*Acacia senegal* (L.) Willd. dans une savanne sahélienne au Sénégal de 1972 à 1976. *Cahier ORSTOM Ser. Biol.*, 12(4): 283–291.
- PRICE J.C. (1987): Calibration of Satellite Radiometers and the Comparison of Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 21: 15–27.
- PRINCE, S.D. et al. (1990): Remote Sensing of the Sahelian Environment - Current Status and Future Perspectives. Commission of the European Communities, Directorate General VIII and CTA (Centre for Agricultural and Rural Cooperation), Technical Publications, Brussels. pp 128
- PRINCE, S.D. et al. (1995): The Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-Sahel). *Remote Sensing of Environment*. 51, 215-234.
- PULLAN R.A. (1974): Farmed parklands in West Africa. *Savanna*, 3(2): 119–151.
- QUENSIERE J. et al. (1994): Environnement deltaïque. In: QUENSIERE J. (ed.) (1994): La pêche dans le Delta Central du Niger, Paris: Karthala.
- REMAUDIÈRE G. (1954): Etude écologique de *Locusta migratoria* M. dans la zone d'inondation du Niger en 1950. *Locusta*, 5, 237 p.
- RICHARDS J.A. (1986): Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer Verlag: New York.
- RICHTER R. (1990): A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM, *International Journal of*

Remote Sensing, 11(1):159–166.

ROBINOVE C.J. (1982): Computation with Physical Values from Landsat Digital Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 48(5):781–784.

ROSEMA, A. (1986): Results of the group AGROMET Monitoring project (GAMP), *ESA Journal*, 10 (1): 17–41.; CNT#: ESA–5228/83–JS(SC).

ROSEMA A. & FISELIER J.L. (1990): Meteosat–based evapotranspiration and thermal inertia mapping for monitoring transgression in the Lake Chad region and Niger Delta, *International Journal of Remote Sensing*, 11(5): 741–752.

SCHNEIDER S. (1974): *Luftbild und Luftbildinterpretation*. Berlin:

SCHOTT J.R. et al. (1988): Radiometric scene normalization using pseudovariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26: 1–16.

SCHÜTZ L. (1985): Atmosphärischer Mineralstaub. in: JAENICKE R.(1985): Atmosphärische Spurenstoffe, Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich 1970–1985, *Sonderdruck der DFG*, VCH: 341–357.

SERRA J. (1982): *Image Annalysis and Mathematical Morphology*. Volume 1. London.

SERRA J. (1988): *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Theoretical Advances. Volume 2. London.

SINGH A. (1989): Digital change detection techniques using remotely–sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 10(6): 989–1003.

SIRCOULON J.H.A. (1987): Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. *Proceedings of the Vancouver Symposium "The influence of Climate Change and Climate Variability on the Hydrologic Regime and Water ressources"*, IAHS Publ., 168, August 1987.

SNELL H.E. et al. (1995): Validation of FASE (FASCODE for the environment) and MODTRAN 3: Updates and comparisons with clear–sky measurements. *SPIE Conference 2578 Proceedings*, Paris, 194–204.

SNIJDERS F.L. (1991): Rainfall monitoring based on Meteosat data – a comparison of techniques applied to the Western Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6): 1331–1347.

SONG C. et al. (2001): Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75: 230–244.

STEVEN M.D. & ROLLIN E.M. (1986): Estimation of atmospheric corrections from multiple aircraft imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 7(4): 481–497.

STRASBURGER E. et al. (1991): *Lehrbuch der Botanik*. Gustav Fischer: Stuttgart.

SULTAN B. & JANICOT S. (2000): Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra–seasonal variability. *Geophysical research letters*, 27(20): 3353–3356.

TANRÉ D. et al. (1986) Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5S), *Laboratoire d'Optique Atmospherique*, 262 pp.

TANRÉ D. et al. (1990): Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing* 2(4): 659–668.

THIEL K.H. et al. (1995): Monitoring the ice movements with ERS SAR interferometry in the Antarctic region. *Proc. of second ERS Applications Workshop*, London, UK, Dec. 1995: 219–223.

THOMAS V.L. (1977): Generation and physical characteristics of the Landsat–1, –2 and –3 MSS computer compatible tapes, NASA TM–78018, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 20771.

- TOWNSHEND J.R. & JUSTICE C.O. (1986): Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1435–1446.
- TRICART J. & DE MACEDO N. (1965): Reconnaissance géomorphologique de la vallée moyenne du Niger. IFAN–Dakar.
- TRICART J. et al. (1970): Introduction à l'utilisation des photographies aériennes, tome1: Notions générales données structurales, géomorphologie, Paris.
- TROCHAIN (1940): Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. Mém de l'IFAN, no. 2, Paris.
- TUCKER C.J. et al. (1991): Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990, *Science*, 253: 299–301
- TURNER M.D. & CONGALTON R.G. (1998): Classification of multi-temporal SPOT–XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain, *International Journal of remote sensing*, 19 (1): 21–41
- TURNER R.E. & SPENCER M.M. (1972): Atmospheric model for correction of spacecraft data. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment held in Ann Arbor, University of Michigan on 2–6 October 1972: 895–934.*
- URVOY Y. (1942): Le bassin du Niger. Mém. de l'IFAN, no. 4, Paris.
- VAGELER P. (1944): Niger– und Tschadseegebiete als Bewässerungsländer der afrikanischen Zukunft, *Mitteilungen der Geogr. Ges. in Hamburg*, XLVIII: 291–311.
- VERMOTE E.F. et al. (1994): Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S), Software, Version 4.1, Department of Geography, University of Maryland and Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.S.T.L., available from anonymous ftp (kratmos.gsfc.nasa.gov).
- VERMOTE E.F. & KAUFMAN, Y.J. (1995): Absolute calibration of AVHRR visible and near infrared channels using ocean and cloud views, *International Journal of Remote Sensing*, 16(13): 2317–2340.
- VERMOTE E.F. et al. (1997): Atmospheric correction for shortwave sensors (MODIS, ASTER, MISR, POLDER, SEAWIFS, MERIS, VEGETATION). *Proceedings of the 7th International Symposium on physical measurements and signatures in remote sensing*, Courchevel, France
- VERSTRAETE M.M. (1994): The contribution of remote sensing to monitor vegetation and to evaluate its dynamical aspects. In: VEROUSTRAETE F. & CEULEMANS R. (ed.) (1994): *Vegetation, Modelling and Climatic Change Effects*, SPB Academic Publishing: The Hague, 207–212.
- WAHR J. et al. (2001): Luftbildgestützte Erfassung aktueller und historischer Desertifikationsprozesse bei Chikal im Sahel Nigers. In: Hohenheim University (ed.), *Tagungsband zum Tropentag 2000, Germany*. (http://www.uni-hohenheim.de/~graef/html_person/t2000.htm, Abfragestand: 08/2002)
- WHITEMAN G. & BROWN J.R. (1998): Assessment of a method for mapping woody plant density in a grassland matrix. *Journal of Arid Environments*, 38 : 269 – 282.
- WISPELAERE G. DE (1980): Les photographies aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais. *Cahier ORSTOM*, XVIII (3–4): 155–166.
- WORLD BANK (1993): Africa Technical Department, Review of Policies, Strategies and Programmes in the Traditional Energy Sector, Proceedings of Workshop 1, Bamako, Mali, May 10–12, 1993 (Working–level translation from French, June 1993), p. 23.
- WORLD BANK (1994): Review of Policies, Strategies, and Programmes, p. 60.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE (1994): *World Resources, 1994–95*, Oxford University Press, p. 31.
- YUAN D. & ELVIDGE C.D. (1993): Application of relative radiometric rectification procedure to Landsat data for

use in change detection, *Proceedings of the Workshop on Atmospheric Correction of Landsat Imagery*, The Defense Landsat Program Office, Torrance (California), 29.06–01.07.1993: 162–166.

ZENG N. (1999): Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286: 1537–1540.

FREIE SOFTWARE

Download–Internetadressen freier und aktuell stabiler Quell–Codeversionen unter LINUX zum Abfragestand November 2002:

- GIMP 1.2.3**
(GNU Image Manipulation Program)
- Raster–Graphikverarbeitung
 - > <http://www.gimp.org>
 - > <ftp://ftp.gimp.org/pub/gimp/v1.2/v1.2.3/>.
- GNUPLOT 3.7.1**
- D/3D–Kurvenzeichner
 - > <http://www.gnuplot.vt.edu/>
 - > <ftp://ftp.gnuplot.vt.edu/pub/gnuplot/gnuplot-3.7.1.tar.gz>
- GRASS 5.0**
(Geographic Resources Analysis Support System)
- Raster– und vektorbasiertes Geographisches Informationssystem
 - > <http://grass.itc.it/download.html>
- KHOROS PRO 2001**
(Free Student Version)
- Rasterbildverarbeitungssystem mit visueller Programmiersprache CANTATA
 - > http://www.khoral.com/khoros/kp2001_student/
- STREAMER 2.6.2p**
- Radiatives Transfermodell zur Berechnung der Strahlungsdichte oder Bestrahlungsstärke
 - > <http://stratus.ssec.wisc.edu/streamer/streamer.html>
 - > <http://stratus.ssec.wisc.edu/download.html>
 - > <ftp://stratus.ssec.wisc.edu/pub/streamer2/>