

Physikalisch basierte Prozessierung multispektraler Fernerkundungsdaten von Binnengewässern

Thomas HEEGE¹⁾²⁾, Clivia HÄSE³⁾, Anke BOGNER¹⁾, Nicole PINNEL²⁾

1. Einführung

Die Fernerkundung leistet mit der zeitlich und räumlich aufgelösten Kartierung und Bilanzierung Beiträge zur Erforschung und Überwachung von Gewässern. Fernerkundungsprodukte können zur Bio-Indikation genutzt werden, um den Zustand von Seen zu bewerten. So sind zum Beispiel die per Fernerkundung zugängliche Biomasse oder die Primärproduktion des Phytoplanktons ein wichtiger Indikator für die Trophie und hierüber auch für die Wasserqualität aquatischer Ökosysteme. Das gleiche gilt für die Häufigkeits- und Artenverteilung der Vegetation in Flachwasserbereichen: Flächendeckende Kartierungen werden zur ökologischen Bewertung von Gewässern genutzt. Mit traditionellen Kartierungsmethoden bedeutet dies einen hohen Personal-, Zeit- und Finanzierungsaufwand. Zusätzlich ist die räumliche Auflösung und Flächendeckung bei solchen Einsätzen begrenzt. Daher werden sie an großen Gewässern wie dem Bodensee zusätzlich durch Luftbilder unterstützt, die bislang personalintensiv visuell ausgewertet werden mussten.

Aktuelle Forschungsaktivitäten in der Gewässerfernerkundung konzentrieren sich folglich auf die Entwicklung von übertragbaren und automatisierbaren, volldigitalen Auswertemethoden. Damit Herstellungskosten und die Qualität von Fernerkundungsprodukten kalkulierbar werden, müssen operationelle Prozessketten standardisierte und vergleichbare Datenprodukte erzeugen. Erst dadurch wird eine kosteneffektive Auswertung möglich. In Binnengewässern beeinflusst die Vielfalt der Wasserinhaltsstoffe, der Flachwasserzonen (Vegetationsarten, Wassertiefe, ...), der Aufnahmebedingungen (Atmosphäre, Wasseroberfläche, Aufnahmegeometrie, ...) die über Fernerkundungssysteme messbaren Größen auf sehr komplexe Weise. Daher sind hier physikalisch basierte Verfahren für eine effektive Datenauswertung erforderlich.

In diesem Artikel wird eine physikalisch basierte Prozesskette vorgestellt. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele und multitemporaler Auswertungen sollen die Vorteile der Übertragbarkeit und der

Modularität mit flexiblen Erweiterungsmöglichkeiten, aber auch derzeitige Grenzen verdeutlicht werden. In der Anwendung werden Wasserinhaltsstoffe, die Produktionsraten des Phytoplanktons und die submerse Vegetation in Uferzonen in hoher räumlicher Auflösung kartiert.

2. Modular Inversion Program

Das Modular Inversion Program (MIP) ist eine Entwicklungs- und Prozessierungssoftware für Produkte aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Inversion bedeutet, dass aus den vom Fernerkundungssensor gemessenen Signalen zurückgeschlossen wird auf die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Ursachen: dies sind die optischen Prozesse basierend auf den stofflichen optischen Eigenschaften der Bestandteile in den Medien Atmosphäre und Wasserkörper. Bestandteile wie Wasserinhaltsstoffe können dann über ihre stoffspezifischen optischen Materialkonstanten quantitativ berechnet werden.

Die Architektur des Programm-Systems besteht aus übertragbaren physikalischen Algorithmen, die von den Inversionsprogrammen genutzt werden. Die invertierbaren Parameter sind verschiedene Bestandteile der Atmosphäre, des Wasserkörpers und der Seegrund – oder Bodenbedeckung.

Programm-Module existieren zur Berechnung von Aerosolen, zur Korrektur von atmosphärischen Einflüssen und von Wasseroberflächen-Spiegelungen, zur Berechnung von Wasserinhaltsstoff-Konzentrationen, von Produktionsraten des Phytoplanktons, in Flachwasserbereichen auch zur Wasserkörper-Korrektur und zur Klassifikation von submersen Makrophyten und Bodensedimenten. Diese Programm-Module sind teilweise iterativ verknüpft. Sie werden über Kontroll-Dateien gesteuert und erlauben so die Stapel-Verarbeitung von Bilddaten.

Die interne Software-Struktur von MIP ist ebenfalls modular aufgebaut, so dass verschiedene Funktionen sowohl separat wie auch gekoppelt verwendet werden können. Wichtige interne Module sind Programm-

¹⁾ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR Oberpfaffenhofen), Institut für Methodik der Fernerkundung, Postfach 1116, 82230 Wessling, E-Mail: thomas.heege@dlr.de

²⁾ Technische Universität München, Limnologische Forschungsstation Iffeldorf, Hofmark 3, 82393 Iffeldorf

³⁾ GKSS Forschungszentrum GmbH, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht

Bibliotheken der verschiedenen Algorithmen, der mathematischen Funktionen und Optimierungsverfahren für die Inversion, Funktionen für die Interaktion verschiedener Datensätze und für die Nutzung von Daten verschiedenster optischer Fernerkundungssensoren. Aktuelle MIP Entwicklungen konzentrieren sich auf die Prozessierung von hyperspektralen Sensordaten.

3. Bildanalyse und Produkte

Das Prozessierungssystem wurde am Bodensee mit Datensätzen des multispektralen flugzeuggestützten Scanners DAEDALUS AADS 1268 (11 Spektralkanäle, 5 VIS Kanäle bei 435, 485, 560, 615, 660 nm, FOV +/- 43°) getestet. Die DAEDALUS Daten wurden zwischen 1996 und 2002 aufgenommen und am DLR Oberpfaffenhofen prozessiert. Die Vor-Prozessierung (Kalibration, Maskierung, Georeferenzierung) wurde mit der Bildverarbeitungssoftware XDI-BIAS des DLR ausgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse der Inversion und Datenprozessierung.

3.1 Wasserinhaltsstoffe im Bodensee

Im Ost-Teil des Bodensees finden sich häufig große räumliche Konzentrationsunterschiede von Wasserinhaltsstoffen. Abbildung 1 zeigt die aus DAEDALUS-Daten berechneten Wasserinhaltsstoffe für Phytoplankton-Pigmente (P) und Schwebstoffe (S) am 16. April 1996 zum Zeitpunkt der Phytoplankton-Frühjahrsblüte. Auffällig ist die unterschiedliche räumliche Verteilung von P und S: Aufgrund des komplexen, nicht-linearen Zusammenhangs zwischen den Wasserinhaltsstoffen und der Wasserfarbe kann für solche Gewässer nur mit physikalisch basierten Algorithmen eine operationelle und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten erfolgen. Im Nordosten sieht man die höchsten Schwebstoffkonzentrationen, die aus dem Zufluss des Alpenrheins stammen und somit anorganischen Ursprungs sind. Die Phytoplankton-Verteilungen sind größtenteils unabhängig von den Schwebstoffen. Allerdings beobachtet man bei hohen Phytoplankton-Konzentrationen ebenfalls einen leichten Anstieg von Schwebstoffen, da Phytoplankton aus partikulärem Material besteht und hier den organischen Teil der Schwebstoffe bildet. Hohe Konzentrationen von Phytoplankton werden hauptsächlich im südlichen Teil des Bildes und ausgehend von den Flachwasserzonen gefunden. Dies könnte darauf hinweisen, dass sich die Frühjahrsblüte im Bodensee aus den Flachwasserbereichen heraus entwickelt. Eine entsprechende These wird seit Jahrzehnten von Biologen und Hydrophysikern diskutiert, ist jedoch ohne räumlich und zeitlich aufgelöste Messungen, wie sie die Fernerkundung liefern kann, schwer nachzuweisen.

Zur Validation der Fernerkundungsdaten wurden in situ Wasserproben während verschiedener DAEDALUS Überflüge entnommen und auf die optisch do-

minanten Wasserinhaltsstoffe S (Schwebstoffe), P (Phytoplankton-Pigmente, hier Chlorophyll a und Phäophytin), Y (Gelbstoffe – gelöste farbgebende Stoffe) analysiert. Auf der anderen Seite wurden die multitemporalen Fernerkundungsdatensätze alle in der gleichen Weise und unabhängig von den in situ Messungen prozessiert. Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen den in situ Daten und den Fernerkundungsdaten für verschiedene Befliegungstermine und an verschiedenen Messpunkten im See. Die Standardabweichung für Schwebstoff liegt bei 0.6 mg/l (22%), für Chlorophyll bei 1 µg/l (17%). Dies ist ein relative geringer Fehler angesichts der Tatsache, dass die Wasserproben zum Teil mit einer zeitlichen Diskrepanz von bis zu 5 Stunden von den Überflügen entnommen wurden. Eine Differenzierung zwischen Gelbstoff und Chlorophyll war mit den Daten des DAEDALUS Scanners nicht möglich, da seine spektrale Auflösung mit nur vier nutzbaren Kanälen im sichtbaren Spektralbereich zu gering ist. Darum musste im Inversionsalgorithmus der Gelbstoff konstant gehalten werden. Im Fall der Klarwasserphase am 30.5.96 mit hohen Schwankungen von Detritus und Gelbstoff im Bodensee konnte daher kein zuverlässiges Ergebnis für die Phytoplankton-Verteilung berechnet werden. Mit hyperspektralen Fernerkundungssensoren, bei denen mehr Spektralkanäle für die Inversion genutzt werden können, sollten die drei optisch dominanten Wasserinhaltsstoffe quantitativ und unabhängig voneinander berechnet werden können.

3.2 Primärproduktion des Phytoplanktons

Zur Berechnung der Produktionsraten des Phytoplanktons wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Gesamtproduktionsrate der Wassersäule aus den der Fernerkundung zugänglichen Parametern berechnet. Die der Fernerkundung zugänglichen Größen sind u. a. die oberflächennahen Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen einschließlich Chlorophyll des Phytoplanktons und die einfallende Sonnenstrahlung (PAR – photosynthetically active radiation). Modellparameter wie die Lichtabschwächung im Wasserkörper werden physikalisch aus diesen Eingabegrößen in der Prozesskette berechnet. Die benötigten physiologischen Parameter des Phytoplanktons, wie die lichtgesättigte Photosyntheserate, wurden aus einem langjährigen Satz von Messungen am Bodensee bestimmt. Aufgrund ihrer deutlich geringeren Schwankungsbreite verglichen mit der Chlorophyllkonzentration konnten die physiologischen Parameter ohne größere Einbuße in der Genauigkeit als konstant angesetzt werden. Ob dieses Verfahren auf andere Gewässer übertragbar ist, muss im Einzelfall anhand von Messungen überprüft werden.

Für das Anwendungsbeispiel in Abbildung 2 wird die Fernerkundungsaufnahme vom 16. April 1996 (siehe Abbildung 1) zur Berechnung der Produktionsraten verwendet. Beim Vergleich mit den Verteilungsstruk-

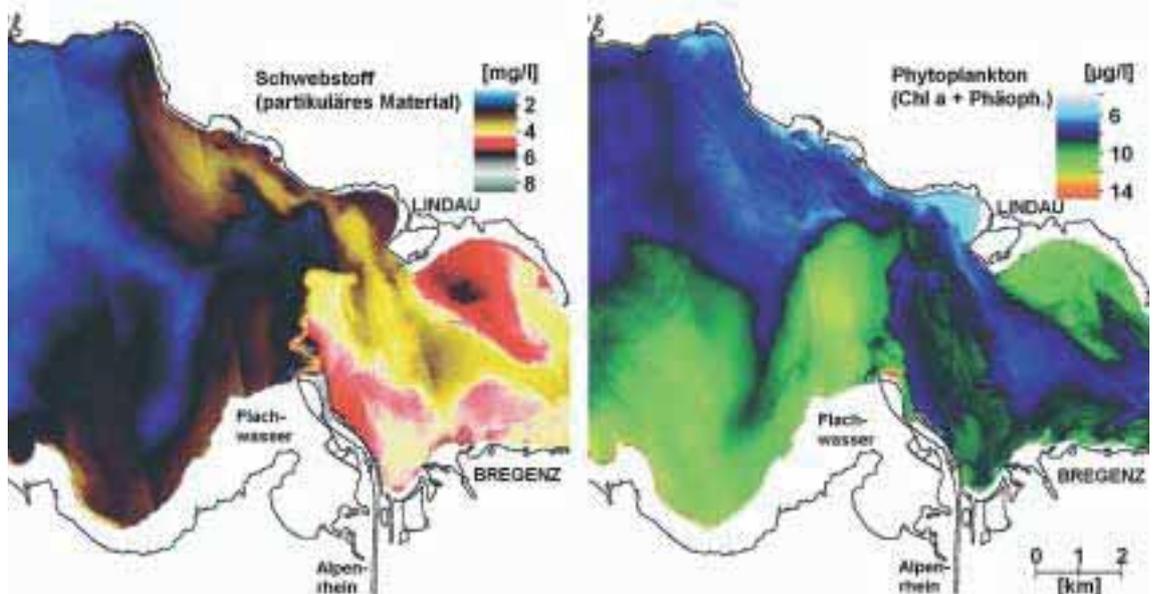


Abbildung 1

Verteilung der Wasserinhaltsstoffe Schwebstoff und Phytoplankton-Pigmente im östlichen Bodensee am 16.4.1996, 12:30 MEZ

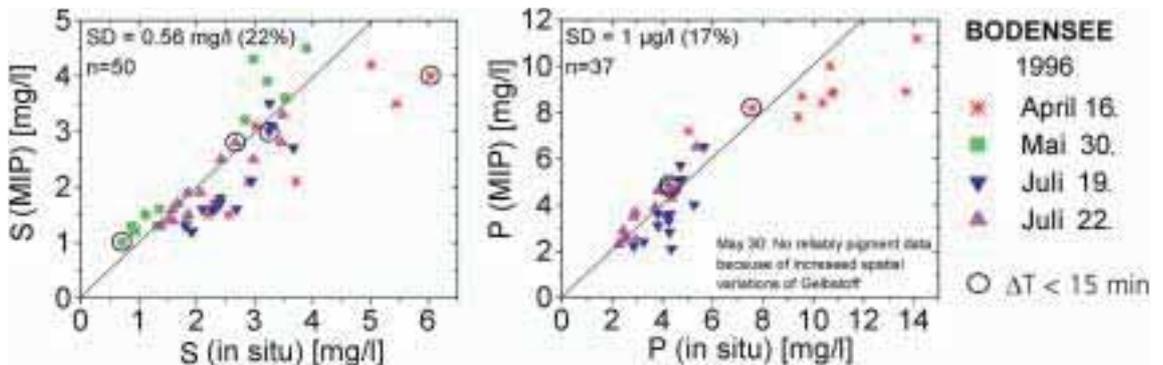


Abbildung 2

Vergleich der Konzentrationen von Schwebstoff und Phytoplankton-Pigmenten (Chlorophyll a und Phäophytin) zwischen Fernerkundungsmessungen (berechnet mit MIP) und Laboranalysen von Wasserproben

turen der Wasserinhaltsstoffe aus Abbildung 1 werden die zwei wichtigsten Einflussfaktoren auf die Primärproduktion veranschaulicht: A) Mit steigendem Chlorophyll-Gehalt (P) steigt die Produktion. B) Die Wassertrübung – im Nord-Osten der Szene vorrangig durch anorganische Schwebstoffe verursacht – verringert das verfügbare Licht und damit die Produktionsraten. Dieser Effekt ist auch im Bereich der erhöhten Phytoplankton-Konzentrationen östlich der Insel Lindau dominant.

Die Validation der auf Fernerkundungsdaten angewandten Methode zur Berechnung der Primärproduktion steht noch aus. Bei Verwendung der Methode mit entsprechenden in situ gemessenen Eingabedaten aus dem langjährigen Bodensee-Datensatz wurde ein mittlerer Fehler von 22% für die Berechnung der Produktionsraten gegenüber den in situ-Inkubationen (Radiocarbon-Methode) bestimmt.

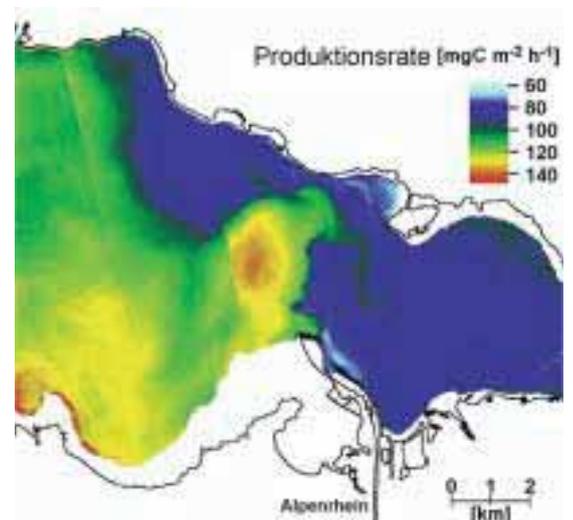


Abbildung 3

Verteilung der Produktionsraten des Phytoplanktons im Bodensee am 16.4.1996

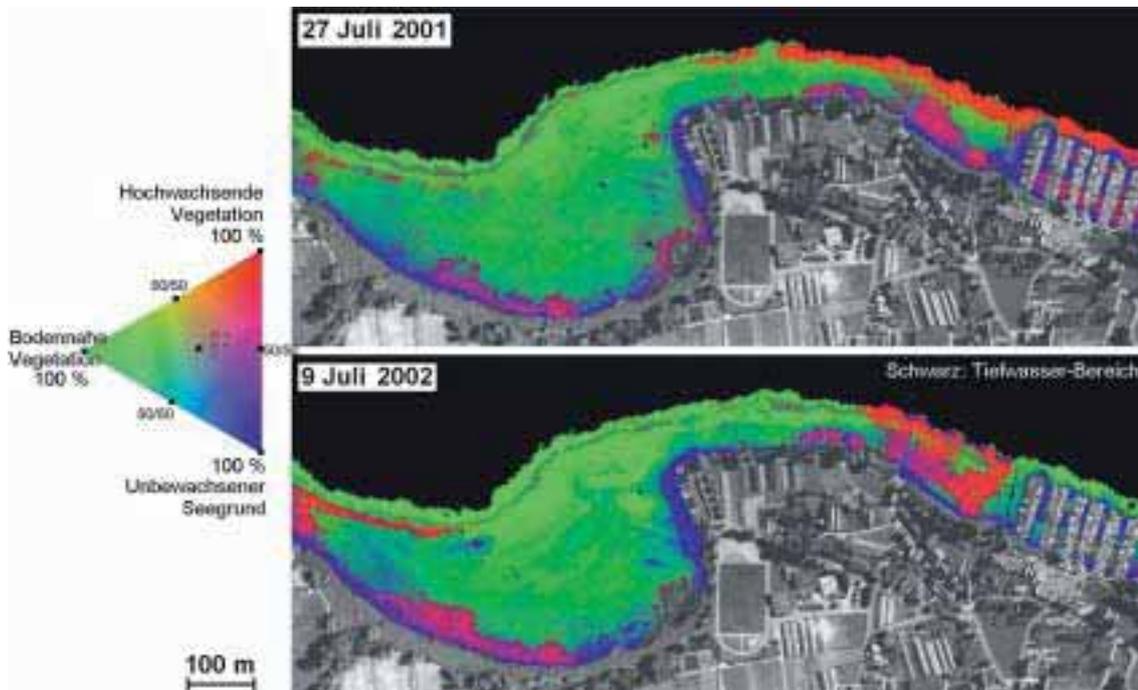


Abbildung 4

Bedeckung des Seegrundes im Flachwasserbereich nördlich der Insel Reichenau. Vergleich der Prozessierungsergebnisse von DAEDALUS-Aufnahmen im Juli 2001 und 2002

3.3 Unterwasser-Vegetation in Flachwasser-Bereichen

Abbildung 4 zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Kartierung von submersen Makrophyten im Flachwasserbereich um die Insel Reichenau (Bodensee). Spezielle MIP-Module korrigieren in dieser Anwendung den Einfluss der Wassersäule auf das Reflexionssignal, ermöglichen die Berechnung der Reflexionseigenschaften des Seegrundes und interpretieren diese Spektren dann als Mischsignal aus verschiedenen Sediment- oder Bewuchsklassen. Im Ergebnisbild werden Klassen von bodennahen Makrophyten (*Characeen*) in der Farbe grün, von hoch wachsenden Makrophyten (hier: hauptsächlich *Potamogeton perfoliatus* & *pectinatus*) in rot und unbedeckte Seegrund-Sedimente in blau dargestellt (siehe Farbdreieck in Abbildung 4). Mischungen der drei Farben entsprechen den Mischungs-Verhältnissen der Bodenbedeckung zwischen den drei Klassen. Jeder Bildpunkt enthält also Informationen über den Bedeckungsgrad aller Klassen gleichzeitig, wobei die Summe der Bodenbedeckung immer 100 Prozent ist. Aufgrund der unterschiedlichen Wuchshöhe und dem Einfluss der Wassersäule auf das Signal konnten die beiden Makrophytengruppen der Characeen und der Gattung *Potamogeton* sehr gut unterschieden werden trotz der spektralen Limitierungen des DAEDALUS Sensors.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt eines dreijährigen Datensatzes der Seegrund-Bedeckung in den Flachwasserzonen der Insel Reichenau. Wiederum wurden die multitemporalen DAEDALUS-Datensätze in einem automatisierbaren Verfahrensablauf pro-

zessiert. In der Abbildung können zwischen den Jahren 2001 und 2002 kleine räumliche Veränderungen im Bewuchs der submersen Vegetation erkannt werden, jedoch bleiben wichtige Merkmale bestehen. Der Bodenbewuchs konnte unter den Bedingungen zum Befliegungszeitpunkt bis zu einer Wassertiefe von 4,5 m kartiert werden. Dies entspricht in etwa der maximalen optischen Tiefe, aus der plausible Reflexionsspektren nach der Wasserkorrektur hergeleitet werden können. Obwohl zur Prozessierung (noch) Zusatzdaten über die Bodentiefe benötigt werden, zeigt die multitemporale Auswertung, dass die Datenverarbeitung und Auswertung stabile und vergleichbare Ergebnisse hervorbringt. Alle wesentlichen Strukturen werden richtig erkannt. Eine systematische Validation ist neben der Weiterentwicklung des Systems Inhalt der derzeit laufenden Projekte in Kooperation mit den Universitäten Hohenheim und Konstanz.

An der limnologischen Forschungsstation der TU München wird derzeit untersucht, inwieweit sich einige Makrophyten-Arten durch spezifische Signaturen der Reflexionsspektren mit Hyperspektralsensoren unterscheiden lassen. Solche Informationen kämen einer Verbesserung von Bio-Indikationsbestimmungen mit Fernerkundungsmethoden zugute. Damit könnte die Fernerkundung Monitoring-Programme, wie sie z. B. für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie erforderlich sind, effektiver unterstützen.

Die Übertragbarkeit und Anwendung der Fernerkundungsmethoden auf unterschiedliche Gewässer in Süddeutschland wird derzeit untersucht. Bereits jetzt lassen die vorliegenden Ergebnisse erwarten, dass phy-

sikalisch basierte Algorithmen in der Fernerkundung eine effektive Operationalisierung der Datenauswertung für verschiedene Gewässertypen und Aufnahmebedingungen ermöglichen werden.

4. Danksagung

Diese Arbeiten wurden bzw. werden gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG in dem Sonderforschungsbereich (SFB) 454 „Bodensee-Litoral“, im SFB 248 „Stoffkreislauf des Bodensees“, vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst in der HighTechOffensive Oberbayern („Einsatz angewandter Gewässerfernerkundung: Pilotprojekt Waging-Tachinger See“, Haushaltsnr. 000290), im Kooperationsvorhaben Universität Hohenheim & DLR Oberpfaffenhofen „EFPLUS“ („Entwicklung von automatisierbaren Fernerkundungsverfahren zur Unterstützung von Planungsprozessen in der Uferzone von Seen“, Projektträger BWPlus/Baden Württemberg, Förderkennzeichen BWC21011) und im ENVOC-Verbundprojekt („A new view of the oceans“), gefördert durch das BMBF und dem HGF-Strategie-Fond. Ein besonderer Dank gilt allen Projektpartnern sowie Prof. M. Tilzer, Dipl. Biol. S. Wolfer (Univ. Konstanz) für die Unterstützung mit in situ Daten, Prof. J. Fischer und Dr. T. Heinemann (Freie Universität Berlin) für die Unterstützung mit dem Matrix Operator Model MOMO und Dipl. Phys. V. Amann (DLR Oberpfaffenhofen) für die Flugplanung und Operation des DAEDALUS-Scanners.

5. Literatur

HEEGE, Thomas (2000):
Flugzeuggestützte Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen am Bodensee. (Dissertation, Freie Universität Berlin), publiziert als DLR-Forschungsbericht Vol.2000-40, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln.

HEEGE, Thomas & Jürgen FISCHER (2004):
Mapping of water constituents in Lake Constance using multispectral airborne scanner data and a physically based processing scheme. *Canadian Journal of Remote Sensing* CJRS, Vol. 30, No. 1, pp. 1-10 (im Druck)

HEEGE, Thomas; Anke BOGNER & Nicole PINNEL (2003):
Mapping of submerged aquatic vegetation with a physically based process chain. *Proc. Remote Sensing 2003*, September 8-12 2003, Barcelona, Spain. Edited by E. Kramer. SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 5233, CD-ROM proceedings

HEEGE, Thomas; Clivia HÄSE, Anke BOGNER & Nicole PINNEL (2003):
Airborne multi-spectral sensing in shallow and deep waters. *Backscatter*, Vol. 14, No.1, pp. 17-19

Anschriften der Verfasser:

Siehe Fußnoten auf Seite 67

Zum Titelbild: Das Bild zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Kartierung von submersen Makrophyten im Flachwasserbereich um die Insel Reichenau (Bodensee). Vergleich der Prozessierungsergebnisse von DAEDALUS- Aufnahmen im Juli 2001 und 2002.

Spezielle MIP-Module korrigieren in dieser Anwendung den Einfluss der Wassersäule auf das Reflexionssignal, ermöglichen die Berechnung der Reflexionseigenschaften des Seegrundes und interpretieren diese Spektren dann als Mischsignal aus verschiedenen Sediment- oder Bewuchsklassen. Im Ergebnisbild werden Klassen von bodennahen Makrophyten (*Characeen*) in der Farbe grün, von hoch wachsenden Makrophyten (hier: hauptsächlich *Potamogeton perfoliatus* & *pectinatus*) in rot und unbedeckte Seegrund-Sedimente in blau dargestellt (siehe Beitrag HEEGE et al. S. 67-71).

Laufener Seminarbeiträge 2/03

Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

ISSN 0175 - 0852

ISBN 3-931175-71-5

Die Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege ist eine dem Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz angehörende Einrichtung.

Die mit dem Verfassernamen gekennzeichneten Beiträge geben nicht in jedem Fall die Meinung der Herausgeber wieder. Die Verfasser sind verantwortlich für die Richtigkeit der in ihren Beiträgen mitgeteilten Tatbestände.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der AutorInnen oder der Herausgeber ist unzulässig.

Schriftleitung und Redaktion: Dr. Notker Mallach (ANL, Ref. 12) in Zusammenarbeit mit Dr. Elisabeth Obermaier

Satz: Fa. Hans Bleicher, Laufen

Druck und Bindung: E. Grauer Offsetdruck, Laufen

Druck auf Recyclingpapier (100% Altpapier)