

Die Untersuchung des Oderästuars mit Landsat TM - Daten zur räumlichen Differenzierung von Chlorophyll-a und Wassertemperatur

Norbert Amelang

Universität Greifswald, Geographisches Institut, F.-L.-Jahn-Str. 16, 17489 Greifswald

Inhaltsverzeichnis

Die Untersuchung des Oderästuars mit Landsat TM - Daten zur räumlichen Differenzierung von Chlorophyll-a und Wassertemperatur.....	1
1. Einführung.....	1
2. Methodisches Vorgehen.....	2
3. Preprocessing der Fernerkundungsdaten.....	3
3.1 Georeferenzierung.....	4
3.2 Korrektur atmosphärischer Einflüsse.....	4
3.3 Maskierung.....	5
3.4 Sensorabhängige Korrekturen.....	6
3.5 Processing der Fernerkundungs- und Referenzdaten.....	9
4. Ergebnisdiskussion.....	11
4.1 Verteilung von Chlorophyll-a.....	11
4.2 Sea Surface Temperature (SST).....	18
5. Abschließende Bemerkungen.....	21
6. Literatur.....	23

1. Einführung

Im Rahmen des Forschungsverbundes GOAP wurde der Frage nachgegangen, wie die Küstengewässer im Übergangsbereich zwischen Festland und Ostsee auf die eingetragenen Schweb-, Nähr- und Schadstoffe mit Transformation und Sedimentation reagieren. Neben umfangreichen in situ Messungen sowie hydrodynamischen und ökologischen Modellierungen wurden hierzu auch Fernerkundungsdaten ausgewertet. Sie sollen Aussagen zu flächenhaften Strukturen ermöglichen, die durch Schiffsmessungen nur ansatzweise erfaßt werden. Ausgewertet wurden hierzu Daten des Landsat Thematic Mapper. Dabei galt es zu klären, welche Informationen in den Spektralkanälen „zu sehen“ sind, welchen Einfluß Reflexionen vom Gewässerboden haben und wie man die erkannten Parameter quantifizieren kann.

2. Methodisches Vorgehen

Die Ausgangsdaten für die nachfolgende Studie bilden 6 Landsat TM Viertelszenen (94 km*88 km) sowie Meßergebnisse aus dem Landesamt für Umwelt und Natur M/V, Abt. Wasserwirtschaft in Stralsund und aus eigenen Untersuchungen innerhalb des GOAP-Forschungsprojektes. Die in situ gemessenen sea truth Daten lagen meist zeitnah dem Satellitenüberflug, obwohl Einzelabweichungen bis zu mehreren Tagen vorkamen. Die Daten der ca. 15 Referenzstationen waren gut über das gesamte Untersuchungsgebiet einschließlich der Pommerschen Bucht verteilt. Für die fernerkundliche Auswertung standen insbesondere Meßergebnisse zum Chlorophyll-a-Gehalt und zur Wassertemperatur zur Verfügung. Für Seston und Gelbstoffe gibt es einige Vergleichsmessungen.

Die Auswahl der Landsat-Szenen erfolgte auf der Basis einer Recherche nach wolkenfreien Aufnahmen der letzten Jahre (vgl. Tab. 3). Ausschnitte der Szenen 193-22 folgender Termine wurden einer weiteren Bearbeitung unterzogen: 07.07.1989, 18.01.1991, 10.05.1991, 29.07.1991, 28.05.1992, 21.07.1994.

Von den 7 Kanälen des TM sind für Auswertungen über Wasser die Spektralbereiche des sichtbaren Lichtes (Kanäle 1-3) und des Thermalbereichs (Kanal 6) von Bedeutung. In den übrigen Kanälen erfolgt eine weitestgehende Strahlungsabsorption im Wasser. Landsat-Daten haben eine radiometrische Auflösung von 8 Bit (0...255 DN) pro Kanal. Die Sensorempfindlichkeit des TM ist auf Landflächen ausgerichtet, wo die Strahlungswerte eine höhere Dynamik als über Wasser aufweisen. Wie die Abb. 1 zeigt, sind die Unterschiede der spektralen Signale über Wasser sehr gering.

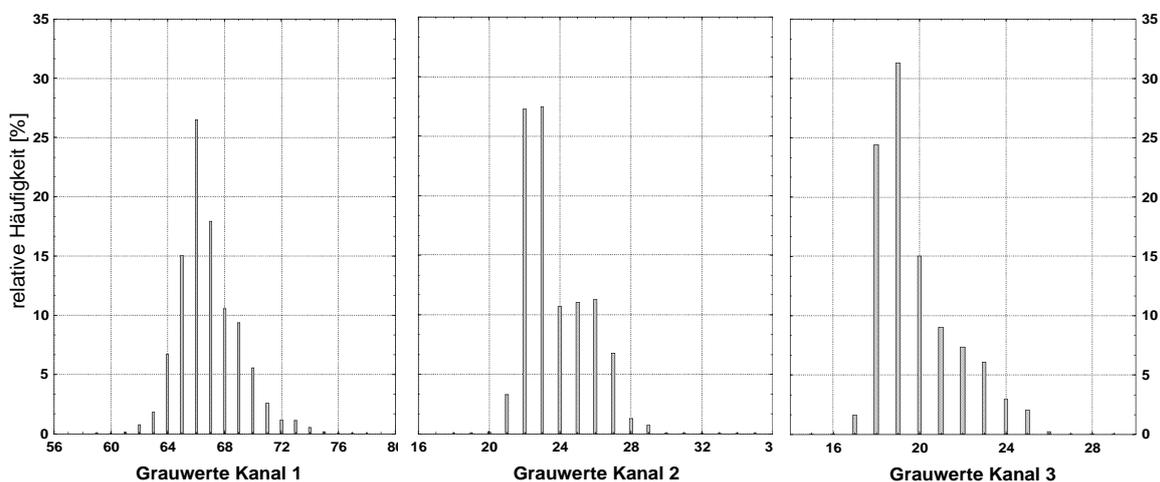


Abb.1: Beispiel für eine Verteilung unkorrigierter Grauwerte über Wasser

In dieser geringen Spannweite der Grauwerte sind einerseits die Informationen über die Wasserinhaltsstoffe enthalten, andererseits sind sie durch Zusatzinformationen (atmosphärische Strahlungseinflüsse, Gewässergrund u. a.) und sensorbedingte Ursachen beeinflusst. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit für ein zielgerichtetes Preprocessing der Fernerkundungsdaten. Der generelle Ablauf der Bearbeitungsschritte am Beispiel der Chlorophyll-a-Berechnung ist in Abb. 2 dargestellt.

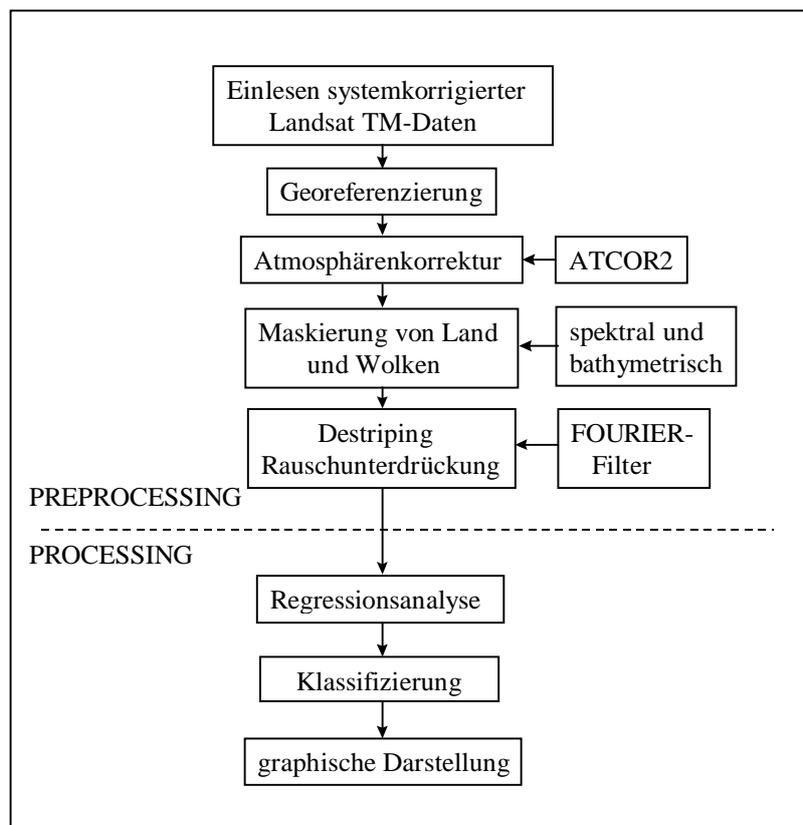


Abb. 2: Fließschema zur Ermittlung von Chlorophyll-a-Verteilungen aus Landsat TM-Daten

3. Preprocessing der Fernerkundungsdaten

Das Preprocessing bereitet die Landsat TM-Daten auf die eigentliche Analyse vor. Dabei soll die Datenqualität derart verbessert werden, daß eine Auswertung entsprechend der jeweiligen Zielstellung, hier zur Erfassung von Wasserparametern, optimal ermöglicht wird. Das Preprocessing baut auf die bereits erfolgte Systemkorrektur der Daten (Nearest Neighbour Algorithmus) auf.

3.1 Georeferenzierung

Die Georeferenzierung aller Szenen wurde mittels eines Resampling-Verfahrens (polynomischer Ansatz 1. Ordnung) realisiert. Als Referenzsystem wurden Gauss-Krüger-Gitterkoordinaten (Krassowski-Ellipsoid) der amtlichen topographischen Karte (TK50) gewählt. Diese Projektions- und Koordinatenfestlegung bildet die Voraussetzung für das Auffinden der sea truth Meßpunkte sowie für das einheitliche Maskieren der Fernerkundungsdaten.

3.2 Korrektur atmosphärischer Einflüsse

Um Landsat-Daten verschiedener Aufnahmetermine miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, den Einfluß unterschiedlicher atmosphärischer Zustände auf die vom Sensor registrierte Strahlung zu minimieren. Diese Atmosphärenkorrektur ermöglicht das Umrechnen von Grauwerten in Strahlungswerte und damit den Vergleich zu in situ Strahlungsmessungen bzw. die Ankopplung an Strahlungstransfermodelle.

Der Anteil der Strahlung, der aus der Atmosphäre stammt, kann im kurzwelligen Bereich bis zu 90 % betragen (TASSAN 1980). Abbildung 3 verdeutlicht die Problematik an 2 typischen Spektralsignaturen.

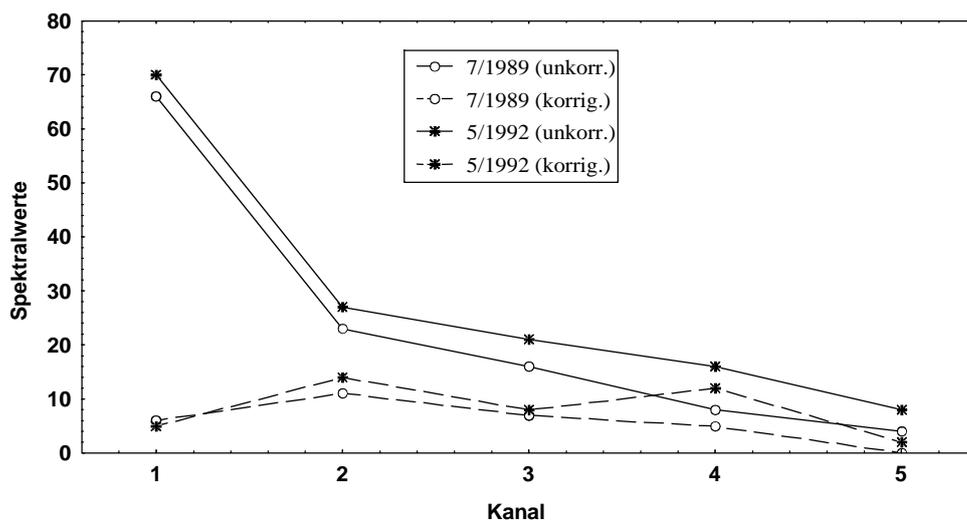


Abb. 3: Vergleich der Spektralwerte über Wasser von 2 Landsat TM-Szenen mit ähnlichem Chlorophyll-a-Gehalt vor und nach der Atmosphärenkorrektur

Zur Atmosphärenkorrektur wurde das Programm ATCOR2 von RICHTER (1996) eingesetzt. Als Basis für den Korrekturalgorithmus stehen Standardwerte für bestimmte atmosphärische Zustände zur Verfügung (Vertikalprofile für Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Ozonkonzentrationen), die entsprechend der meteorologischen Situation während des Satellitenüberfluges einzustellen sind. Weitere Korrekturen sind dann möglich über die Wahl des Aerosoltyps und insbesondere dessen Konzentration über eine Visibility-Größe. Die Höhenlage des Geländes und der jeweilige Sonnenwinkel finden Eingang in die Berechnungen. Um eine optimale Anpassung zeitlich unterschiedlicher Satellitenszenen zu erreichen, wurden randlich des Untersuchungsgebietes gelegene Nadelwaldbereiche ausgewählt, deren Spektralwerte als Referenzsignaturen für alle Szenen dienen.

Die berechneten Reflektanzen werden mit dem Programm wie die Eingangsdaten des TM auf 1 Byte pro Pixel kodiert. Um eine zusätzliche Kontraststreckung der geringen Wertedynamik über Wasser zu erreichen, wurden die Reflektanzen mit dem Faktor 5 versehen. D.h., ein Reflexionswert von 10 % erhält nach der Berechnung die Digital Number DN=50.

Zur Berechnung der Temperaturemission von der Wasseroberfläche wird der Thermalkanal 6 ausgewertet. Da beim Landsat nur dieser Kanal Informationen über die Temperatur beinhaltet, ist die häufig in der Fernerkundung verwendete Mehrkanal-Split-Window-Technik (BARTON 1983) nicht anwendbar. Deshalb muß im Programm ATCOR2 eine Annahme zum Emissionsgrad der Wasseroberfläche gemacht werden. Ausgegangen wurde von einem Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,98$, der den nachfolgenden Berechnungen zugrunde gelegt wird. Zur atmosphärischen Korrektur dieses Spektralkanals wurden jeweils die gleichen Voreinstellungen wie für die übrigen Kanäle gewählt. Die im Modell berechneten Strahlungstemperaturen mußten mittels einer linearen Verschiebung an die sea truth Daten angepaßt werden.

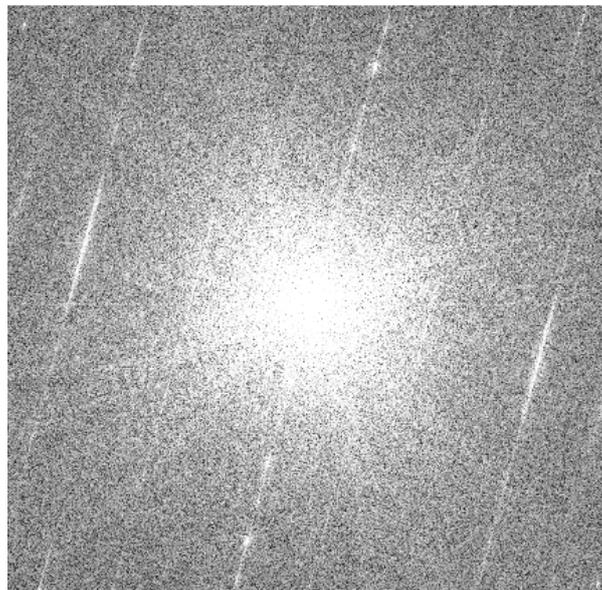
3.3 Maskierung

Die Maskierung hat das Ziel, eine Trennung zwischen Wasserflächen und übrigen Arealen (Land, Wolken) vorzunehmen. Zur einfachen Abdeckung dieser Bereiche reicht eine Maske, die über nutzerspezifische Schwellenwerte des TM-Kanals 5 definiert wird. Da in Flachwasserbereichen aber erhebliche Beeinflussungen des Strahlungssignals durch Reflexionen vom Gewässerboden in den 3 Kanälen des sichtbaren Spektrums zu verzeichnen

sind, wird für diesen Spektralbereich eine zweite Maske genutzt. Sie basiert auf einem bathymetrischen Modell des Untersuchungsgebietes. Hiermit werden alle Land- und Wasserbereiche maskiert, die über einem Höhenniveau von -2 m NN liegen. Die Maskierung ist Voraussetzung für die sich anschließende zielgerichtete Beseitigung sensorbedingter Störungen über Wasserflächen. Daneben dient sie einer besseren Visualisierung der geringen Farbunterschiede des Wassers.

3.4 *Sensorabhängige Korrekturen*

Sensorbedingt treten in Landsat TM-Daten deutliche Streifenstrukturen (Striping) auf, die in Aufnahmerichtung des elektro-mechanischen Scanners verlaufen (Abb.5). Diese Streifen wiederholen sich entsprechend eines Spiegelschwenks alle 16 Zeilen und weisen zusätzliche hell-dunkel Differenzen im Vor- und Rückwärtsscanblock auf (DEKKER und PETERS 1993 u.a.). Zusätzlich wird das gesamte Bild von einem kohärenten Rauschen überlagert, daß auf die Empfindlichkeit der Sensorelektronik zurück geht. SCHNEIDER (1996) beschreibt für den Kanal 3 eine Amplitude von 1-2 DN.



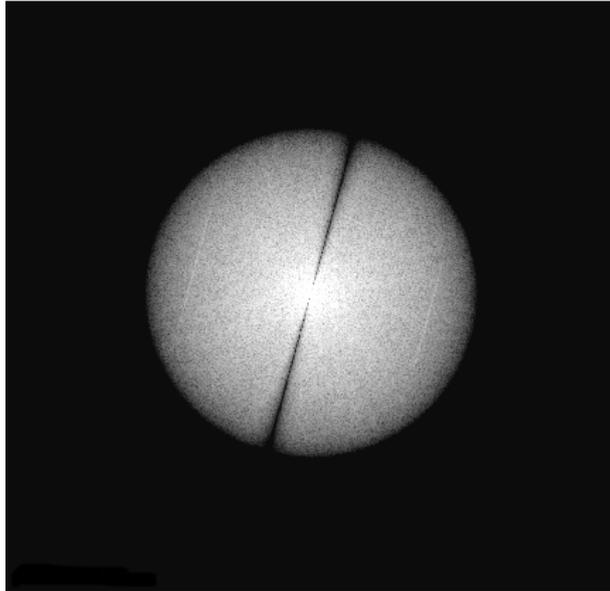
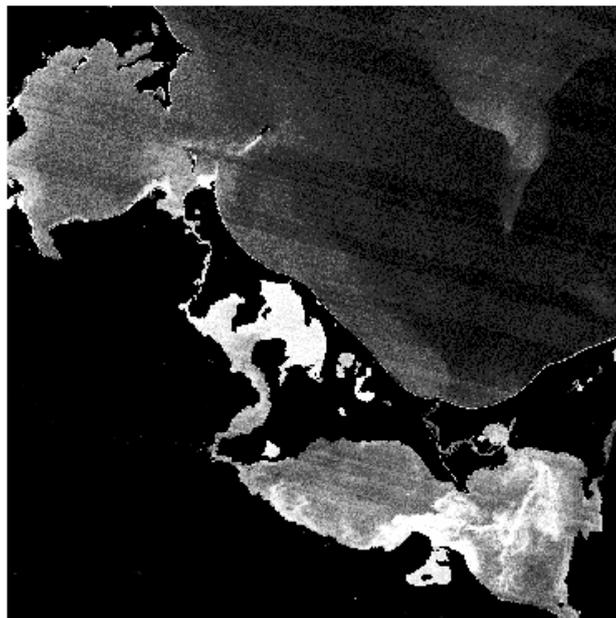


Abb. 4: Darstellung der Landsat-Szene aus Abb. 6 im Fourier-Raum vor und nach der Filterung



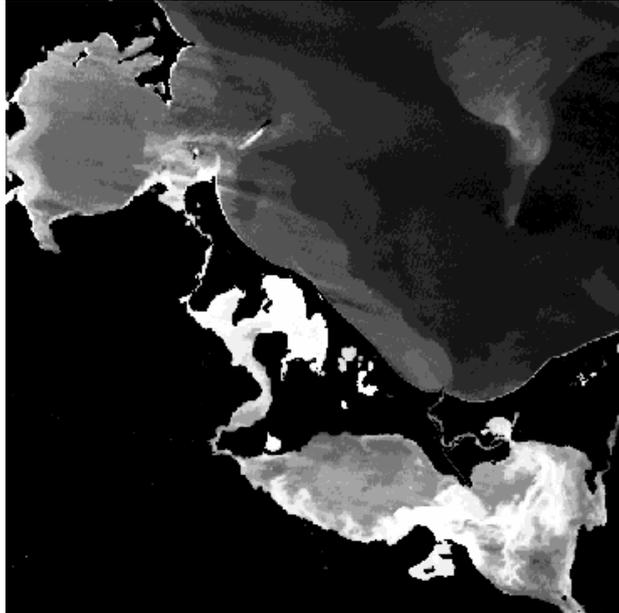


Abb. 5: TM-Szene vor und nach der Filterung

Zur Entfernung der Streifen und des Rauschens werden die Bilddaten der Kanäle 1-3 in den FOURIER-Raum transformiert. Sichtbar sind die periodisch wiederkehrenden Fehler als Streifen bestimmter Frequenz (Abb. 4). Beide Störungen werden mit Spezialfilter entfernt. Das Destriping erfolgt mittels einer keilförmigen Maske, die durch den Nullpunkt im Frequenzraum verläuft (Keilöffnung 10 grad., Neigungswinkel 74,9 grad.). Die noch verbleibenden Rauschanteile, die in 4 Wellenlängen auftreten ((BROCKMANN 1993, SCHNEIDER 1996), werden mit einem Tiefpaß-Hanning-Filter ($R=400$) entfernt. Der kombinierte Effekt beider Filter wird in den Abb. 4 und 5 deutlich.

Neben der visuell erkennbaren Verbesserung der Bildqualität läßt sich diese auch analytisch durch den Vergleich der Variationsbreite der Reflektanzen der Einzelkanäle vor und nach der Filterung nachweisen (Abb. 6). Beachtenswert hierbei ist, daß eine Filterung im Ortsraum scheinbar gleiche Resultate erzielt wie die im Frequenzraum. Allerdings können bei der räumlichen Filterung lokale Strukturen verwischt werden.

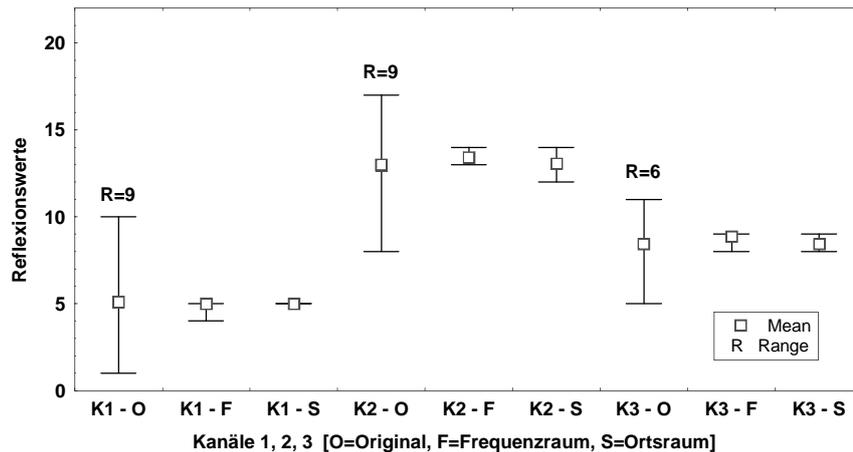


Abb. 6: Wirkung unterschiedlicher Filter im Frequenz- (frequency) und Ortsraum (spatial domain) zur Beseitigung von Striping und Rauschen beim Landsat TM

Die auch im Thermalkanal vorhandenen Streifen konnten im FOURIER-Raum nicht entfernt werden. Deshalb wurden die Daten des Kanals 6 im Ortsraum geglättet. Das verwendete low pass Filter weist dem jeweils prozessierten Pixel den Mittelwert aus einer 16*16 Pixelumgebung zu. Die Störungen konnten erfolgreich beseitigt werden. Ein möglicher Verlust kleinräumiger Temperaturmuster konnte nicht festgestellt werden, ist aber nicht auszuschließen. Die Ursache hierfür mag in den relativ deutlichen Temperaturunterschieden innerhalb des Untersuchungsgebietes liegen und auch darin, daß bei der Mittelwertberechnung wegen der geringeren geometrischen Auflösung des Thermalkanals (120 m) theoretisch bei jeweils 4 benachbarten Pixeln bezogen auf 30m (Berechnungsgrundlage) gleiche Ausgangswerte vorausgesetzt werden können.

3.5 *Processing der Fernerkundungs- und Referenzdaten*

Grundlage der Berechnungen bilden Regressionsanalysen zwischen den in situ Meßdaten vom Schiff und den Reflektanzen des Satellitenbildes. Obwohl aus der Literatur bekannt ist (GORDON und MOREL 1983, TOPLISS et al. 1990, SATHYENDRANATH et al. 1989, ZIMMERMANN 1991 u.v.a.), daß sich alle TM-Kanäle des sichtbaren Spektrums für die Quantifizierung optisch relevanter Wasserinhaltsstoffe eignen, kann im Falle des Untersuchungsgebietes nur der Kanal 3 ausgewertet werden. In den Kanälen 1 und 2 wird in weiten Küstengebieten das aus dem Wasserkörper stammende Strahlungssignal durch Bodenreflexionen stark überlagert (Abb. 9).

Die in die Regression eingehenden Reflexionswerte des Kanals 3 wurden aus den georeferenzierten Szenen am Ort der sea truth Datengewinnung ermittelt. Hierzu wurde der Mittelwert der Reflektanzen in einem 10*10 Pixel großem Fenster um Meßpunkt herum erfaßt. Die pro Szene gefundene Beziehung zum Chlorophyll-a Gehalt läßt sich am besten mittels einer Exponentialgleichung der allgemeinen Form

$$\text{Chl.-a} = a * \exp^{(b * K3)}$$

mit Chl.-a Gehalt an Chlorophyll-a [$\mu\text{g/l}$]

\exp e

K3 Reflektanzen des Kanals 3

a, b Regressionskoeffizienten

darstellen.

Nach der Berechnung der Einzelszenen wurden alle gemessenen Chlorophyll-a-Daten und Reflektanzen des Kanals 3 aus allen Szenen einer gemeinsamen Regressionsanalyse unterzogen (Tab. 1, Abb. 10). Damit soll das Vorhandensein einer allgemeingültigen Beziehung geprüft werden, mittels der ohne Referenzmessungen Chlorophyll-Quantifizierungen allein aus Landsat-Daten möglich werden.

Tab. 1: Übersicht über die berechneten Regressionsgleichungen bzgl. der untersuchten Szenen

Szenendatum	Regressionsfunktion	Korrelationskoeffizient
07.07.1989	$\text{Chl.-a} = 1,918 * \exp(0,298 * K3)$	R = 0,88
18.01.1991	$\text{Chl.-a} = 0,099 * \exp(0,637 * K3)$	R = 0,89
10.05.1991	$\text{Chl.-a} = 1,2 * \exp(0,644 * K3)$	R = 0,82
29.07.1991	$\text{Chl.-a} = -10 + \exp(2,43 + 0,28 * K3)$	R = 0,7
28.05.1992	$\text{Chl.-a} = 0,907 * \exp(0,322 * K3)$	R = 0,77
21.07.1994	$\text{Chl.-a} = 0,26 * \exp(0,526 * K3)$	R = 0,4
Gesamtverteilung	$\text{Chl.-a} = 2,93 * \exp(0,264 * K3)$	R = 0,69

4. Ergebnisdiskussion

4.1 *Verteilung von Chlorophyll-a*

Die berechneten Verteilungskarten zeigen in guter Auflösung Muster unterschiedlichen Chlorophyll-a-Gehaltes im Untersuchungsgebiet (s. Abb. 7 und 8). Vier Haupträume lassen sich unterscheiden:

- Oderästuar mit Oderhaff und Achterwasser
- Swina river plume
- Greifswalder Bodden
- Pommersche Bucht

Die höchsten Chlorophyll-a-Gehalte findet man generell im Oderästuar. Hier ist auch eine starke Konzentrationsdifferenzierung in verschiedenen Patches zu erkennen, die teils wolkenartige Strukturen aufweisen.

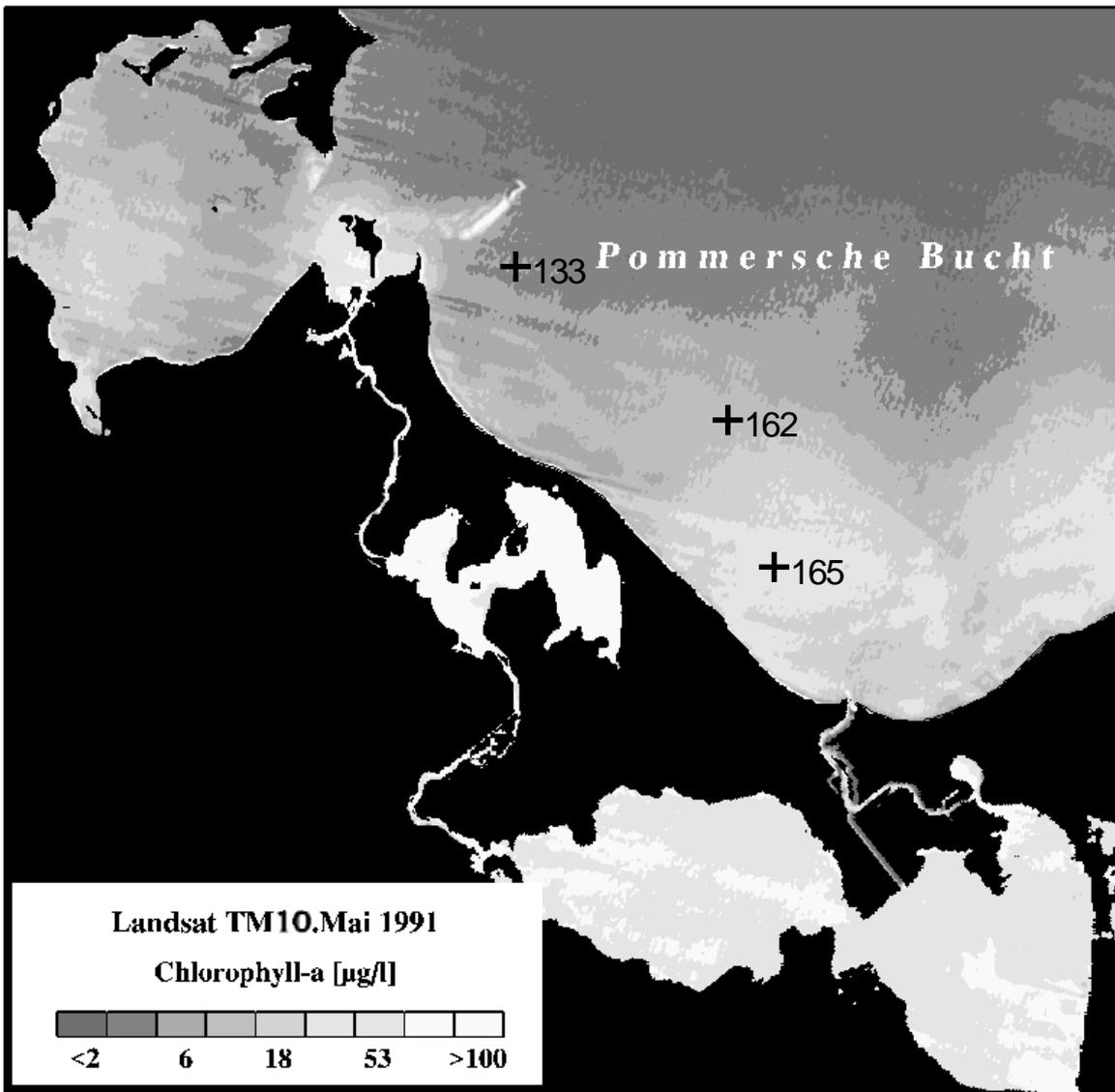


Abb. 7: Klassifizierte [Landsat TM-Teilszene](#) vom 10.05.1991

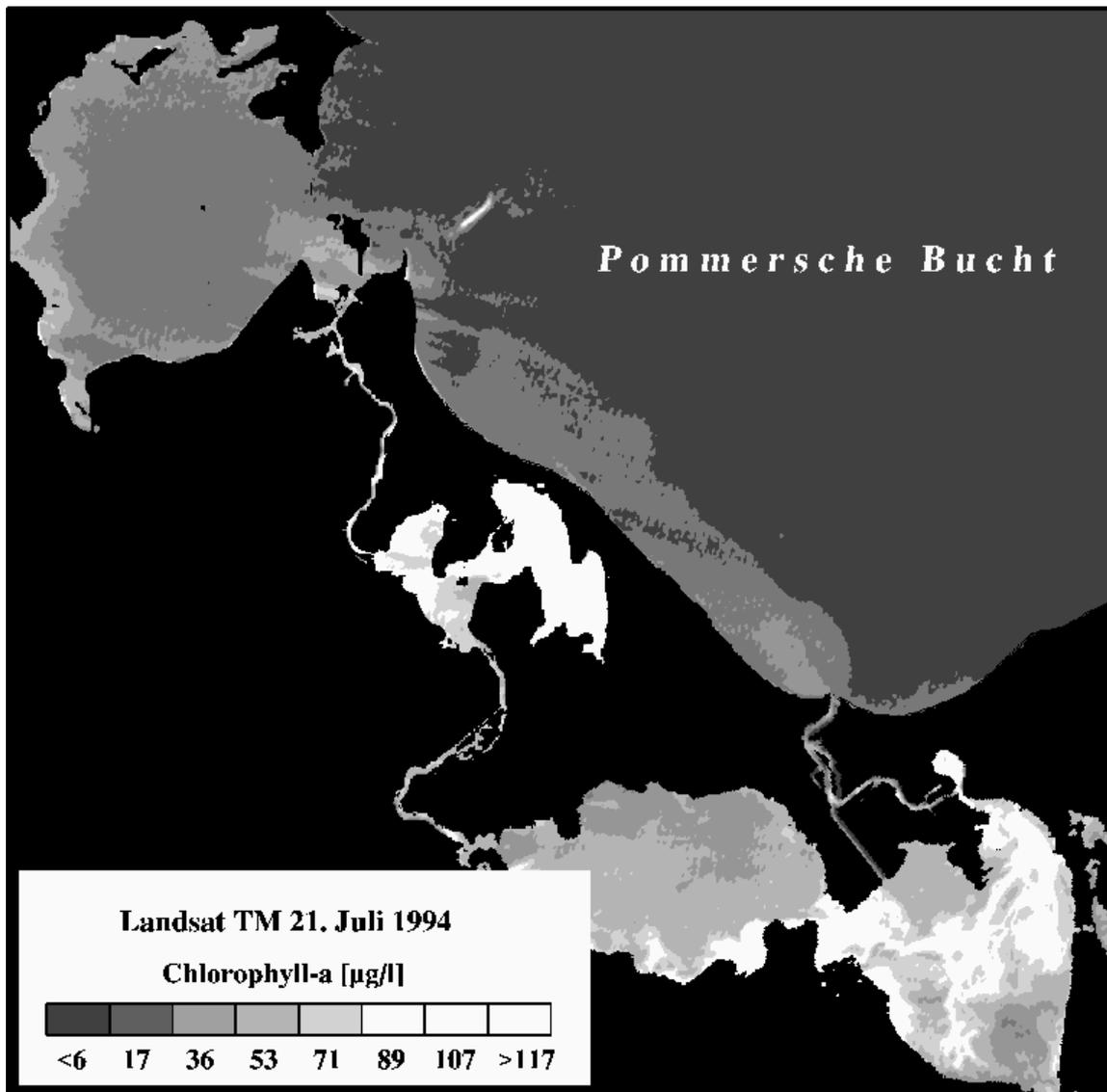


Abb. 8: Klassifizierte [Landsat TM-Teilszene](#) vom 21. Juli 1994

Ca. 2/3 des Oderwassers werden über die Swina in die Pommersche Bucht abgeleitet. An der Ausstromfahne erkennt man die großen Mengen an Phytoplankton, die aus dem hochproduktiven Haff in die Ostsee gelangen. In den Hauptproduktionszeiten des Planktons ist das über die Swina ausströmende Wasser wärmer als das Ostseewasser (vgl. Abb. 12 und 13). Die Folge davon ist eine Schichtung des warmen, chlorophyllangereicherten Haffwassers über das kalte Ostseewasser. Die Durchmischung beider Wasserkörper erfolgt allmählich, oft erst in großer Entfernung vom Einstrom. Vergleiche mit Ergebnissen aus Meßkampagnen des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde aus den Jahren 1991 und 1994 zeigen diesbezüglich gute Übereinstimmungen (POLLEHNE et al. 1995, SIEGEL et al. 1996).

Neben der bekannten Tatsache, daß der Greifswalder Bodden durch nährstoffreiches Wasser aus dem Peenestrom belastet wird, zeigen verschiedene Chlorophyll-Verteilungen ([07.07.1989](#), [28.05.1992](#), [21.07.1994](#)), welche aus TM-Szenen berechnet wurden, aber auch den möglichen Eintrag von Swina-Wasser über die Pommersche Bucht in den Greifswalder Bodden. Voraussetzung dafür sind östliche Windlagen. An der Usedomer Außenküste zu findende hohe Chlorophyll-Konzentrationen von der Swina-Mündung bis zum Greifswalder Bodden weisen darauf hin. Dabei kommt es aber weniger zum Transport von Phytoplankton als von nährstoffreichem Wasser. Die Zusammensetzung des Phytoplanktons ändert sich mit der Erhöhung des Salzgehaltes infolge von Durchmischungsprozessen. So finden wir im Mai 1991 bezogen auf die Biomasse [$\mu\text{g C/l}$] an Station 165 (s. Abb. 7) noch 20 % Süßwasserphytoplankter, an Station 162 noch ca. 1% und Station 133 keine mehr (WASMUND 1997 unveröff.). Allgemeine Beziehungen zwischen der Lage der river plume der Swina und der Windrichtung haben SIEGEL et al. (1996) an NOAA-Daten nachgewiesen. Der Greifswalder Bodden zeigt deutlich geringere Gehalte an Chlorophyll-a als das Oderästuar. Er läßt sich aber von der Pommerschen Bucht mit den geringsten Konzentrationen außerhalb der Ausstromfahne deutlich abgrenzen.

Zur Berechnung der Tab. 2 wurde beim Chlorophyll-a eine vertikal homogene Verteilung vorausgesetzt. Hinsichtlich der Swina-plume wurde eine Maximaltiefe des freien Wasserkörpers von 5m angenommen (SIEGEL et al. 1996). Diese gesetzten Bedingungen können aus dem Satellitenbild allerdings nicht ermittelt werden. Damit wird ein Problem angedeutet, das aus der 2-dimensionalen Erfassung 3-dimensionaler Sachverhalte resultiert. Gleichartige Schwierigkeiten treffen auch auf die Bewertung der SST zu.

Die den Chlorophyll-Karten zugrunde liegenden Berechnungen beruhen nur auf den vorprozessierten Reflektanzen des Kanals 3 als unabhängige Variable. In der Literatur werden dagegen häufig als sogenannter Pigmentindex die Kombinationen der Kanäle K1/K2 oder K3/K2 verwendet (SCHNEIDER 1996, ZIMMERMANN 1991 u. a.). Das war bei den hier durchgeführten Berechnungen nicht möglich. Da die untersuchten Gewässer insgesamt relativ flach sind, weisen sie in weiten Teilen eine in den Kanälen 1 und 2 zu erkennende Strahlungsreflexion des Gewässerbodens auf. Diese überlagert das vom Wasserinhaltsstoff abhängige Signal so stark, daß eine Differenzierung nicht möglich ist. Besonders starke Reflexionen vom Gewässerboden sind im Kanal 2 zu verzeichnen (Abb. 9). Der von ihm

belegte Spektralbereich (520-600 nm) stellt hinsichtlich des Absorptionsverhaltens des Wassers einen Übergangsbereich dar.

Tab. 2: Aus Landsat TM-Daten berechnete Chlorophyll-a-Anteile einzelner Gewässer des Untersuchungsgebietes

Datum	Swina - river plume				Oderhaff	Greifsw. B.
	Chlorophyll-a [t]	Fläche [km ²]	Volumen [km ³]	Länge [km] / Breite [km]	Chlorophyll-a [t]	Chlorophyll-a [t]
07.07.1989	69	754	3,7	50 / 15	184	47
18.01.1991	6	283	1,4	20 / 12	29	6
10.05.1991	69	747	3,6	80 / 13 ^(*)	125	26
29.07.1991	29	204	1,0	25 / 8	136	55
28.05.1992	7	151	0,7	24 / 6	76	45
21.07.1994	20	255	1,2	45 / 5	152	49
mittlere relative Verhältniss e	28 %				100 %	32 %

^(*) river plume nicht vollständig im Satellitenbild erfaßt

Seine Flanken sind durch höhere Lichtabsorption infolge der Eigenschaften von gelösten organischen Stoffen (Gelbstoffe), Chlorophyll-a, Seston und des Wassers selbst gekennzeichnet. Das Bodenreflexionssignal ändert sich jedoch nicht konstant zur Wassertiefe. Regionale Differenzierungen treten durch variierende Gelbstoffkonzentration, farbliche Unterschiede des Gewässerbodens und wechselnde Chlorophyll-a-(Seston-)Gehalte auf.

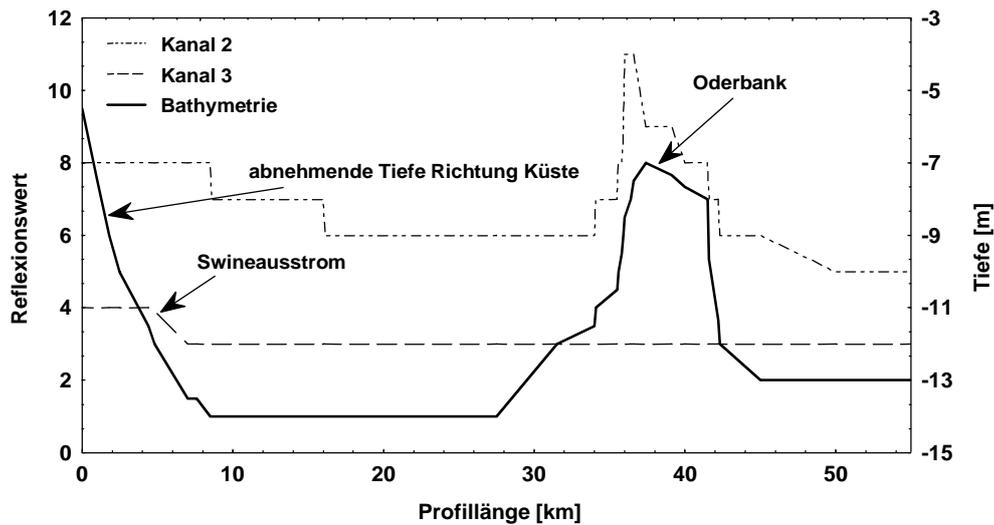


Abb. 9: Spektrales und bathymetrisches Querprofil durch die Pommersche Bucht (SW-NE) auf der Basis von Landsat-Daten vom Juli 1994 und Seekarten

Bei größerer Gewässertiefe und/oder höherem Chlorophyll-a-Gehalt ist keine Bodenreflexion meßbar. Die in diesen Arealen getesteten Kombinationen mehrerer Kanäle zur Chlorophyll-Berechnung brachten hohe Korrelationen. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit und der besseren Darstellbarkeit wurde allerdings darauf verzichtet, in verschiedenen Arealen einer Satellitenszene unterschiedliche Berechnungsterme anzuwenden.

Der für die Berechnungen genutzte Kanal 3 liegt in einem Wellenlängenbereich von 630-690 nm. Hier überlagern sich im gemessenen Strahlungssignal Prozesse der Absorption durch verschiedene Pigmente und der Reflexion.

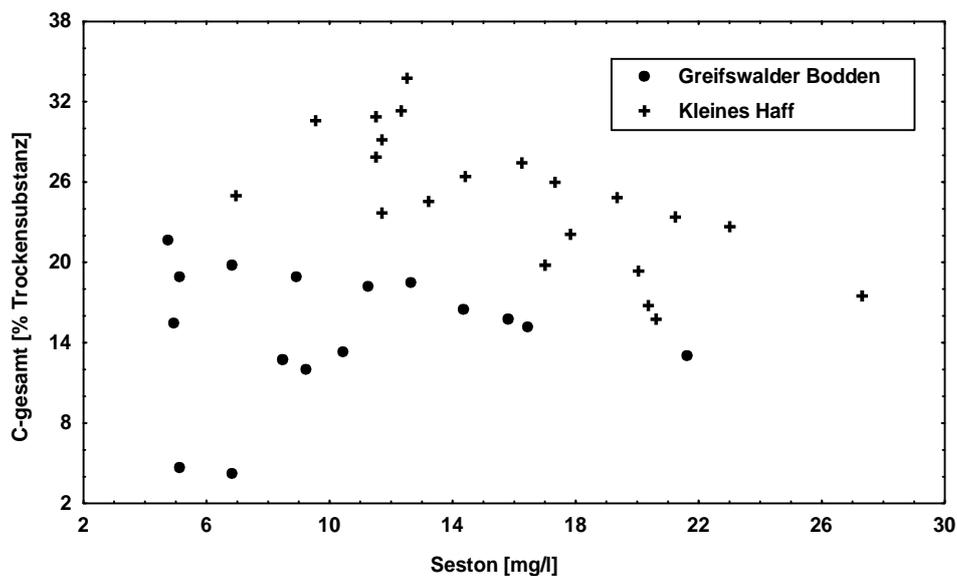


Abb. 10: Kohlenstoffgehalt des Sestons (März-September 1994)

Durch Rückstreuung suspendierten Materials erhöhen sich in diesem Spektralbereich die Reflexionswerte. Dahingegen erzeugt Chlorophyll-a bei 670 nm durch Absorption ein lokales Minimum (SIEGEL et al. 1996). Die geringe spektrale Auflösung von 60 nm dieses TM-Kanals läßt eine differenzierte Bewertung allerdings nicht zu.

Deshalb eignen sich neben den Chlorophyll-a-Konzentrationen als Referenzdaten für den Kanal 3 insbesondere die Schwebstoffgehalte des Wassers. Beide Größen sind eng korreliert. Beachten muß man jedoch, daß im Haff durch Resuspension und Schwebstoffeintrag über die Oder Störungen dieses Zusammenhanges auftreten können. Deutlich wird das u.a. am C-Gehalt des Sestons. Dieser liegt im Greifswalder Bodden im Mittel 10 % niedriger als im Haff (Abb. 10). Ebenso stellen Unterschiede in der Algenartenzusammensetzung oder auch lokale Aufrahmungen infolge von Cyanophyceen-Massenentwicklungen Besonderheiten dar, die bei der Dateninterpretation beachtet werden müssen. Das Problem der nicht zeitgleichen Erfassung der sea truth Daten zum Überflugtermin reduziert sich durch das starke Chlorophyll-a-Gefälle in den Referenzgebieten. Die Regressionskurve verschiebt sich in erster Linie durch Veränderungen in den Großarealen Haff, Pommersche Bucht und Greifswalder Bodden und weniger durch kleinräumige Schwankungen sowie horizontale Bewegungen der Chlorophyll-Patches im Wasser. Eine beachtenswerte Ausnahme ist u.a. eine kurze Klarwasserphase im Frühjahr.

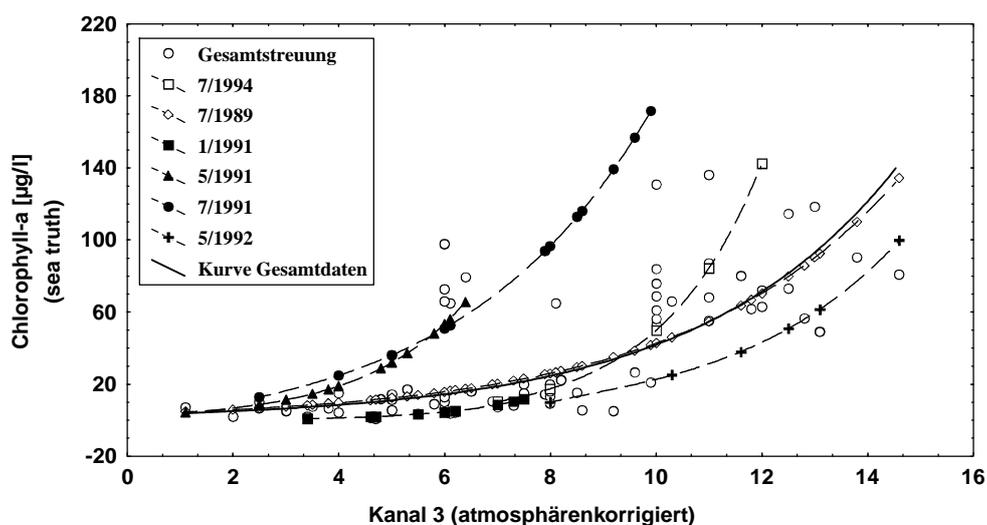


Abb. 11: Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Chlorophyll-a und den Strahlungswerten von Kanal 3

Durch eine gemeinsame Bewertung der sea truth Daten bezüglich aller Landsat TM-Überflüge sollte eine allgemeingültige Beziehung abgeleitet werden, die es ermöglicht, Chlorophyll-a-Gehalte aus TM-Szenen ohne Gegenerkundung zu berechnen (Abb. 11, Tab. 1). Ermittelt wurde die Gleichung

$$\text{Chl.-a} = 2,93 * \exp(0,264 * K3)$$

mit einem Korrelationskoeffizienten von $R = 0,69$. Dieser scheinbar enge Zusammenhang darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß nicht Einzeldaten sondern ganze Satellitenszenen aus dieser Beziehung ausbrechen.

Erste Berechnungen zur Erfassung von Chlorophyll-a-Verteilungen sind mit obiger Gleichung aber durchaus möglich. Ein Hauptproblem beim Vergleich unterschiedlicher Satellitendaten für die Gewinnung allgemeingültiger Beziehungen stellt die Korrektur der atmosphärischen Einflüsse dar. Hier liegen bei der Verfeinerung des Algorithmus die hauptsächlichen Reserven.

4.2 *Sea Surface Temperature (SST)*

Die vom Satelliten im Thermalkanal 6 (10,4-12,5 μm) aufgezeichnete Temperaturinformation ist ein wichtiger Indikator für hydrodynamische Vorgänge im Wasserkörper (Abb. 12 und 13). Dabei ist zu beachten, daß die SST nur ein Temperatursignal aus einer wenige Mikrometer starken Schicht an der Wasseroberfläche widerspiegelt. Man muß sich aber bewußt sein, daß die Temperatur eine Zustandsgröße in einem 3-dimensionalen Prozeßgefüge ist, die vom Sensor nur 2-dimensional abgebildet wird. Im allgemeinen ist die vom Satelliten gemessene Temperatur durch aufwärts gerichtete Wärmeströme aus dem Wasser etwas niedriger als die üblicherweise vom Schiff gemessene (bulk temperature).

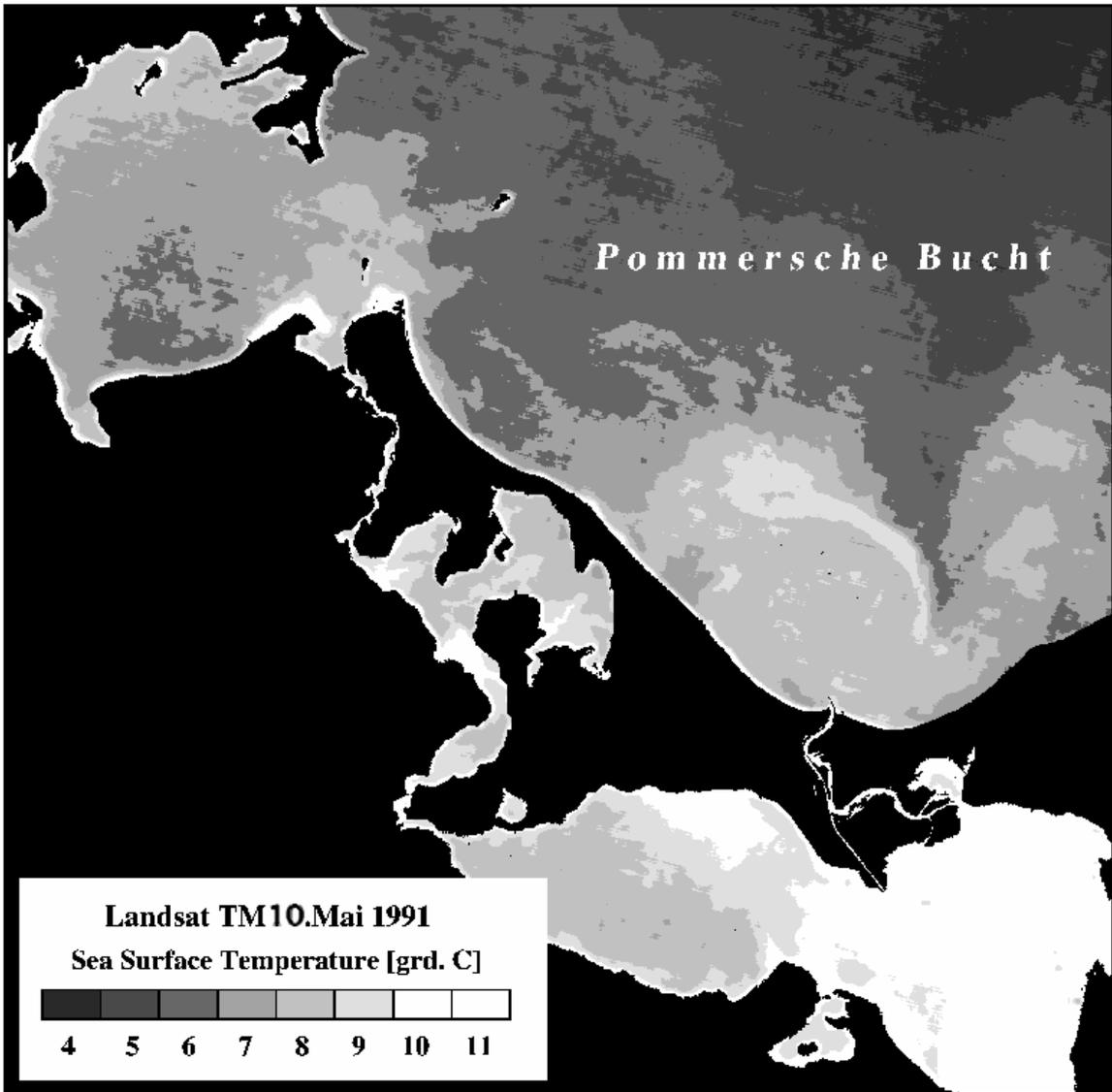


Abb. 12: Aus Landsat TM berechnete [SST-Verteilung vom 10. Mai 1991](#)

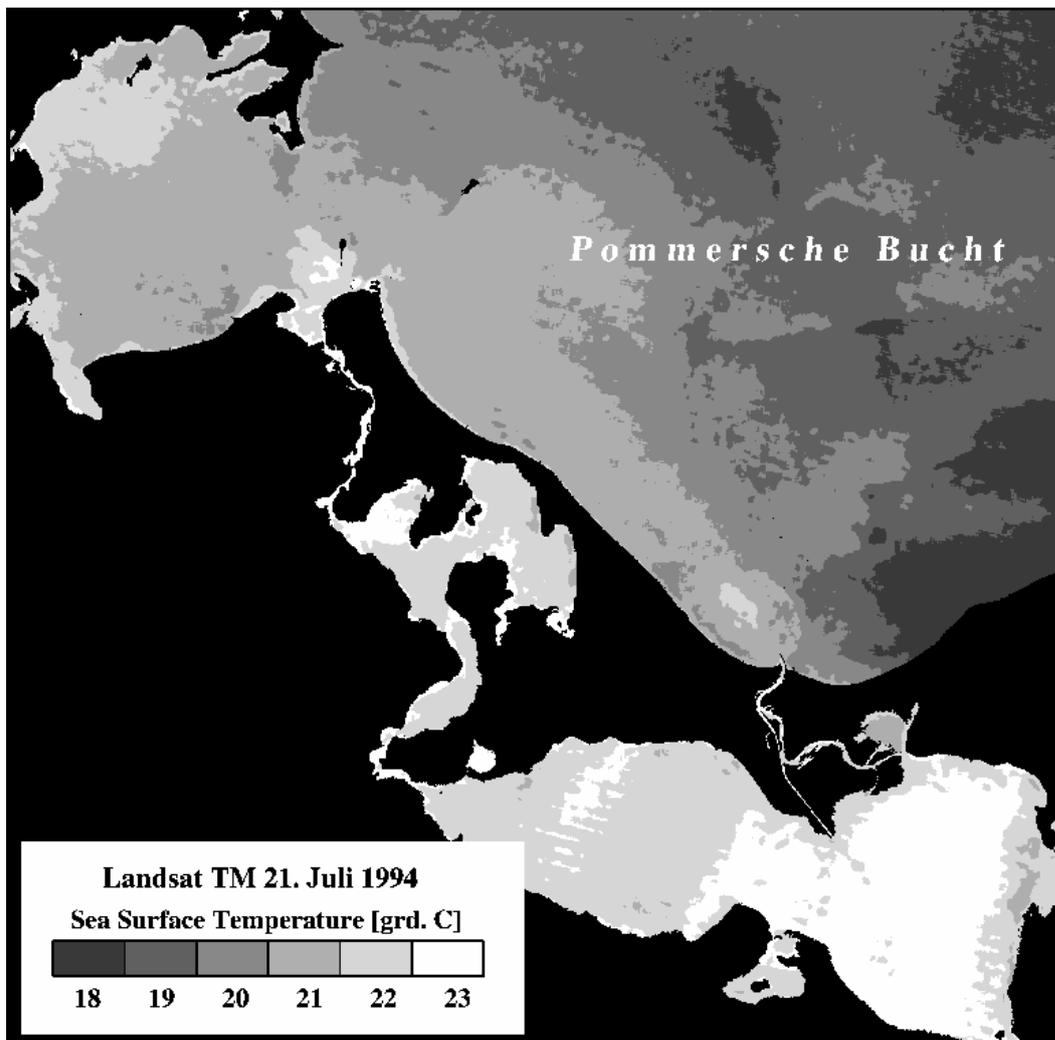


Abb. 13: Aus Landsat TM berechnete [SST-Verteilung vom 21. Juli 1994](#)

Neben den horizontalen Temperaturmustern treten also auch erhebliche vertikale Differenzierungen auf, die durch die SST nicht direkt erfaßt werden können (Abb. 14).

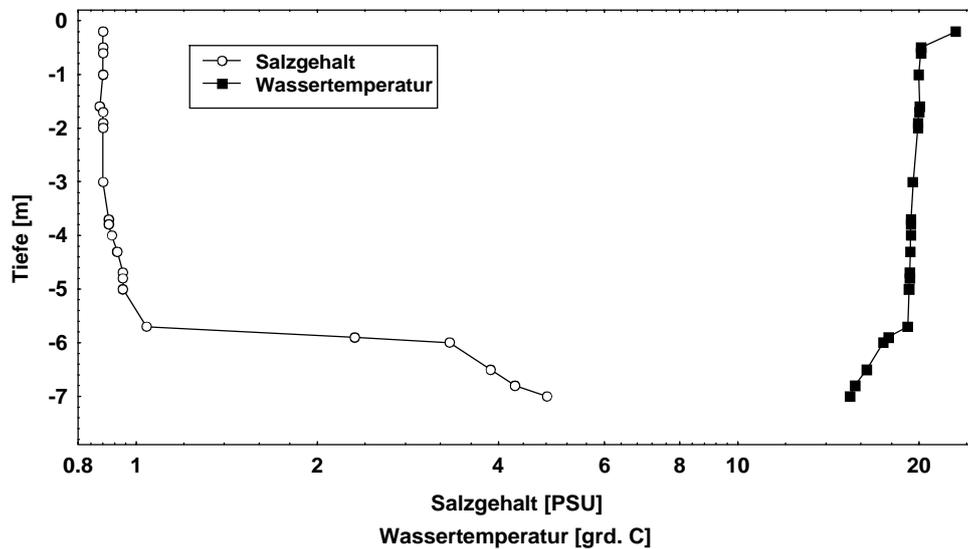


Abb. 14: Ausgewähltes Vertikalprofil im Wasserkörper des Kleinen Haffs

Das können sowohl Einbrüche von Kaltwasser mit gleichzeitigem Salzgehaltsanstieg als auch Temperaturschichtungen durch starke Einstrahlung bei ruhigem Wetter sein. Sichtbar werden tiefere Wasserkörper erst durch ihr Aufsteigen an der Küste z.B. bei ablandigem Wind.

5. Abschließende Bemerkungen

Die Studie hat nachgewiesen, daß Landsat TM-Daten geeignet sind, in den flachen Vorpommerschen Boddengewässern Wasserinhaltsstoffe und die Sea Surface Temperature zu quantifizieren. Damit wird die Möglichkeit gegeben, die Ergebnisse punktueller Schiffs- und Stationsmessungen auf die Fläche des Untersuchungsgebietes auszudehnen. Die spektrale und radiometrische Auflösung des TM-Scanners setzt allerdings Grenzen hinsichtlich der Trennung der Signalinformation bezogen auf Prozesse der Absorption und Reflexion bei unterschiedlichen Inhaltsstoffen. Hinzu kommt, daß die starke Strahlungsreflexion vom Gewässerboden die Kanäle 1 und 2 für Inhaltsstoffe nahezu nicht auswertbar macht.

Ein Versuch der Aufstellung eines Algorithmus zur Bestimmung von Chlorophyll-a-Gehalten aus TM-Daten ohne in situ Referenzmessungen wurde vorgenommen.. Erste Abschätzungen lassen sich damit erreichen. Eine Verbesserung dieses Ansatzes verlangt in erster Linie eine größere Exaktheit bei der Strahlungsangleichung der verschiedenen Szenen über die Korrektur der atmosphärischen Bedingungen.

Wolkenbedeckung pro Viertelszene[] im Untersuchungsgebiet in 10%-Stufen	Anzahl der verfügbaren Szenen 193/22 der Stationen Fucino/Kiruna 1/1990-5/1995
[0] [0]	5
[0] [1]	1
[1] [1]	3
[0] [>1]	2
stärkere Bewölkung	71

Tab. 3: Übersicht über die Wolkenbedeckung bei Landsat TM-Szenen 1990-95 im Untersuchungsgebiet (AMELANG 1995)

Die Möglichkeit des Einsatzes von TM-Daten zur Gewässerbeobachtung wird durch die Repetitionsrate des Sensors von 16 Tagen bestimmt. Die tatsächliche Verfügbarkeit dieser Fernerkundungsbilder über das Untersuchungsgebiet liegt allerdings durch Wolkenbedeckung verursacht bei 2-3 Datensätzen pro Jahr (Tab. 3).

Eine Verbesserung kann hier durch die Einbeziehung anderer Sensoren mit vom Landsat abweichenden Überflugterminen erreicht werden. Inzwischen sind auch im höher auflösenden Bereich kleiner als 30*30 m² eine Vielzahl von Fernerkundungssensoren verfügbar, die multispektral oder panchromatisch in Spektralbereichen arbeiten, die für Küstengewässer informationsrelevant sind.

6. Literatur

- AMELANG, N. (1995): Die Bestimmung von Chlorophyll-a aus Landsat TM-Daten im Greifswalder Bodden und Oderästuar. In: Radtke, U. [Hrsg.]: Vom Südatlantik bis zur Ostsee - neue Ergebnisse der Meeres- und Küstenforschung. Beiträge der 13. Jahrestagung des Arbeitskreises Geographie der Meere und Küsten vom 25. - 27. Mai 1995 in Köln. Kölner Geographische Arbeiten, Bd. 66, S. 233-242.
- BARTON, I. J. (1983): Dual channel satellite measurements of sea surface temperature. In: Quart. J. R. Met. Soc, Bd. 109, S.365-378.
- BROCKMANN, C. (1993): Zur Nutzung des Thematic Mapper für die Ozeanographie. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 93/E/56.
- CYBERSKA, B., LAUER, Z. & A. TRZOSINSKA (1995): Environmental conditions in the polish zone of the southern baltic during 1994. Gdynia.
- DEKKER, A. G. & S. W. M. PETERS (1993): The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. In: Int. J. Remote Sensing, Bd. 14, S. 799-821.
- GORDON, H. R. & A. Y. MOREL (1983): Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A review. In: BARBER, R. T., MOOERS, C. N. K., BOWMAN, M. J. u. B. ZEITZSCHEL [Hrsg.]: Lecture notes on coastal and estuarine studies. New York, Bd. 4.
- LAMPE, R. & H. MEYER (1995): Räumliche und zeitliche Muster der Verteilung von Wasserinhaltsstoffen im Westteil des Oder-Ästuars. In: Wasser & Boden, Bd. 47, S. 14 - 19.
- PASTUSZAK, M., NAGEL, K. & G. NAUSCH (1996): Variability in nutrient distribution in the Pomeranian Bay in September 1993. In: Oceanologia, Bd. 38, S. 195 - 225.
- POLLEHNE, F., BUSCH, S., JOST, G., MEYER-HARMS, B., NAUSCH, M., RECKERMANN, M., SCHAENING, P., SETZKORN, D., WASMUND, N. & Z. WITEK (1995): Primary production patterns and heterotrophic use of organic material in the Pomeranian Bay (southern Baltic). Bulletin of the Sea Fisheries Institute, **136**: 43-60.
- RICHTER, R. (1996): A spatially-adaptive fast atmospheric correction algorithm. ERDAS IMAGINE - ATCOR2. User manual (Version 1.2).
- SATHYENDRANATH, S., PRIEUR, L. & A. MOREL (1989): A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. In: Int. J. Remote Sensing, Bd. 10, S. 1373-1394.
- SCHNEIDER, K. (1996): Die Bestimmung zeitlicher und räumlicher Verteilungsmuster von Chlorophyll und Temperatur im Bodensee mit Fernerkundungsdaten. In: Baume, O. , Birkenhauer, J. , Gierloff-Emden, H.-G. , Mauser, W. , Rögner, K. , Rust, U. u. F. Wieneke [Hrsg.]: Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe B. 23.
- SIEGEL, H., GERTH, M. und T. SCHMIDT (1996): Water exchange in the Pomeranian Bight investigated by satellite data and shipborne measurements. In: Continental shelf research, Bd. 16, S. 1793-1817.
- TASSAN, S. (1980): Application of a global sensitivity analysis model to the retrieval of chlorophyll concentration in water from remotely measured radiance. Proc. 14th Int. Symp. Remote Sensing of the Environment. S. 807-818.
- TOPLISS, B. J., ALMOS, C. L. & P. R. HILL (1990): Algorithms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment. In: Int. J. Remote Sensing, Bd. 11, S. 947-966.

- WASMUND, N. (1997): Protokolle von Phytoplanktonuntersuchungen des Institutes für Ostseeforschung Warnemünde vom Mai 1991 in der Pommerschen Bucht. (unveröff.).
- ZIMMERMANN, G. (1991): Fernerkundung des Ozeans. Probleme der Fernerkundung des Ozeans mit optischen Mitteln. Berlin.