

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurden zwei unterschiedliche Inversionsverfahren unter Anwendung einer impliziten und einer expliziten Atmosphärenkorrektur zur Bestimmung der Konzentrationen und räumlichen Verteilung von Wasserinhaltsstoffen in europäischen Küstengewässern aus Multi-Spektraldaten des MERIS-Instrumentes entwickelt und anhand von zeitgleich zu den Satelliten-Überflügen durchgeführten *in situ* Messungen validiert. Damit leistet die Arbeit einen wesentlichen Beitrag auf dem Gebiet der Verfahrensentwicklung und trägt zum Verständnis von Anwendungsgrenzen operationell einsetzbarer Algorithmen bei. Die durch die entwickelten Verfahren abgeleiteten Wasserinhaltsstoffe sind das Chlorophyll-a, die Gruppe der organischen und anorganischen Schwebstoffe sowie die Gelbstoffabsorption, bei einer Wellenlänge von 443 nm.

Alle Verfahren dieser Arbeit wurden durch einen modellbasierten Ansatz mit Hilfe inverser Modellierung von Strahlungstransportsimulationen aufgebaut. Als inverse Modelle werden in dieser Arbeit künstliche neuronale Netze verwendet, deren Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren auf Basis von *Look-up*-Tabellen in der kontinuierlichen Funktionsapproximation der Ausgabedaten, bei gleichzeitiger Stabilität gegenüber fehlerhaften Eingabedaten, liegen. Darüber hinaus stellt der gewählte Netzwerktyp des Mehrschicht-Perzeptrons einen universellen Approximator dar, mit dem, in Abhängigkeit von der gewählten Anzahl der Zwischenschichtneuronen, theoretisch jeder funktionale Zusammenhang beliebig genau approximiert werden kann. Vorteile gegenüber den Verfahren der nichtlinearen Optimierungstechniken ergeben sich in der kurzen Verarbeitungszeit großer Datenmengen.

Klassische Verfahren zur Bestimmung von Wasserinhaltsstoffen aus satellitengestützten Fernerkundungsdaten basieren auf der Inversion direkt an der Wasseroberfläche abgeleiteter Reflektanzspektren. Hierzu müssen die vom Satelliten am Oberrand der At-

mosphäre gemessenen Spektraldaten zunächst durch Anwendung expliziter Atmosphärenkorrekturverfahren um die Beiträge des atmosphärischen Signals korrigiert werden, da nur das vom Wasserkörper reflektierte Signal Informationen über dessen Inhaltsstoffe trägt. Das dem Signal des Wasserkörpers überlagerte Signal der Atmosphäre kann dabei über 90% des am Oberrand der Atmosphäre gemessenen Gesamtsignals betragen. Die Genauigkeit, mit der die Inhaltsstoffe mit dieser als indirektes oder Zweischritt-Verfahren bezeichneten Methode bestimmt werden können, hängt neben den verwendeten bio-optischen Modellen maßgeblich von der Genauigkeit der verwendeten Atmosphärenkorrekturalgorithmen ab.

Zur Umgehung von Atmosphärenkorrekturfehlern wurden in dieser Arbeit die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen eines direkten Einschnitt-Verfahrens mit impliziter Atmosphärenkorrektur zur Bestimmung der genannten Wasserinhaltsstoffe untersucht. Bei dieser Methode werden die Inhaltsstoffe aus dem am Satelliten gemessenen Reflektanzspektrum am Oberrand der Atmosphäre abgeleitet. Die Ergebnisse dieses Verfahrens wurden anhand von *in situ* gemessenen Wasserinhaltsstoffen validiert und mit einem ebenfalls entwickelten indirekten Verfahren, unter Anwendung einer expliziten Atmosphärenkorrektur, verglichen.

Die Validierung des expliziten Atmosphärenkorrekturverfahrens wurde anhand von *in situ* in der Nordsee gemessenen Reflektanzspektren der Wasseroberfläche durchgeführt. Der Vergleich der *in situ* Messungen mit den durch das Verfahren abgeleiteten Reflektanzen zeigt im Wellenlängenbereich von 412,50 – 708,75 nm eine hohe lineare Korrelation von 0,94, mit einem mittleren RMSE von 0,0028 und einem mittleren absoluten prozentualen Fehler von 18,4%. Ein Vergleich mit dem entsprechenden MERIS-Level2-Produkt der ESA zeigt eine deutliche Verbesserung in der Genauigkeit der abgeleiteten Spektren für das hier entwickelte Verfahren, insbesondere im blauen Spektralbereich, in dem der Fehler des MERIS-Level2-Produktes den Fehler des hier vorgestellten Verfahrens um den Faktor 5 übersteigt. Ab einer Wellenlänge von 560 nm gleichen sich die Ergebnisse beider Verfahren an. Der mittlere absolute prozentuale Fehler für alle Wellenlängen und Meßstationen wurde für das MERIS-Level2-Produkt zu 46,2% und für die abgeleiteten Reflektanzen des entwickelten Atmosphärenkorrekturverfahrens zu 18,9% bestimmt.

Zur detaillierten Validierung des expliziten Atmosphärenkorrekturverfahrens wurden die durch den Algorithmus zusätzlich ausgegebenen aerosoloptischen Tiefen an 4 Wellenlängen mit *in situ* Sonnenphotometermessungen der AERONET-Station auf der Insel Helgoland verglichen. Als Ergebnis der Validierung wurde ein mittlerer RMSE in Einheiten der aerosoloptischen Tiefe von 0,074 mit einer positiven linearen Korrelation von 0,85

bestimmt. Der mittlere absolute prozentuale Fehler für alle Meßtage ergab eine Abweichung von 40% für die Wellenlängen 440 nm und 550 nm. Für die Wellenlängen 670 nm und 870 nm wurde ein relativer Fehler von 66% bzw. 96% ermittelt. Anhand der abgeleiteten räumlichen Verteilungsmuster der aerosoloptischen Tiefen und der Reflektanzen für eine beispielhaft ausgewählte und durch das Atmosphärenkorrekturverfahren invertierte MERIS-Aufnahme über Bereichen der Nord- und Ostsee wurde eine gute Trennung von Atmosphäre und Wasserkörper demonstriert.

Für eine Validierung der Verfahren zur Bestimmung der Wasserinhaltsstoffe wurden *in situ* gemessene Konzentrationen in der Nord- und Ostsee sowie im Mittelmeer, vor der Küste Israels, und im Golf von Cádiz, vor der Küste Spaniens, verwendet. Der Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der Chlorophyll-a-Konzentration zeigt eine höhere Genauigkeit für das Zweischritt-Verfahren, unter Anwendung der validierten expliziten Atmosphärenkorrektur, mit einem mittleren Fehler von 39,6% im Vergleich zum besten Ergebnis des Einschritt-Verfahrens mit einem Fehler von 50,4%. Größere Abweichungen in der Bestimmung der Chlorophyll-a-Konzentration im Vergleich zu den *in situ* Messungen zeigen sich für die küstennahen Meßstationen mit hohen Schwebstoffkonzentrationen. Konzentrationen von weniger als 1 mg m^{-3} Chlorophyll-a lassen sich genauer durch das indirekte Zweischritt-Verfahren, unter Anwendung einer expliziten Atmosphärenkorrektur, bestimmen. Die Verfahren zur Bestimmung des Gesamtschwebstoffs sowie der Gelbstoffabsorption weisen im Vergleich zu den durchgeführten *in situ* Messungen einen großen Bias auf. Beide Verfahren unterschätzen die *in situ* gemessenen Konzentrationen stets. Die für alle Meßstationen mittlere Genauigkeit der Konzentrationsbestimmung des Einschritt-Verfahrens beträgt 59,5% für den Gesamtschwebstoff und 71% für die Gelbstoffabsorption. Für das Zweischritt-Verfahren beträgt die Genauigkeit für die genannten Inhaltsstoffe 54,5% und 72,6%.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß sich die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe im Bereich der Küstengewässer auch aus dem vom Satelliten am Oberrand der Atmosphäre gemessenen Signal bestimmen lassen. Beide Verfahren zeigen vergleichbar gute Ergebnisse, sodaß eine Genauigkeitssteigerung durch das implizite Inversionsverfahren nicht nachgewiesen werden konnte. Für die optisch komplexen Küstengewässer liegen die erzielten Genauigkeiten der Verfahren im Bereich der Größenordnung der erwarteten Ungenauigkeiten der einzelnen Fehlerquellen.

Die Genauigkeit der Verfahren wird durch eine Vielzahl von Fehlerquellen beeinflusst. Im wesentlichen sind dies verbleibende Ungenauigkeiten der Atmosphärenkorrektur, in den Verfahren dieser Arbeit nicht berücksichtigte physikalische Effekte sowie die Un-

genauigkeit der *in situ* Messungen selbst. Auffallend ist die im Vergleich zu den *in situ* Messungen systematische Unterschätzung der Schwebstoffkonzentrationen und der Gelbstoffabsorption beider Verfahren, sodaß als Ursache alleinige Fehler der Atmosphärenkorrektur auszuschließen sind.

Die Validierung der Atmosphärenkorrektur ergab einen geringen negativen Bias der Reflektanzen von $R = -0,0012$, der eine leichte Unterschätzung der Schwebstoffkonzentrationen erklären läßt. Für den Gelbstoff sollte dies entgegen den erzielten Ergebnissen eher zu einer Überschätzung der Absorption führen. Für den *in situ* gemessenen Konzentrationsbereich der Gelbstoffabsorption zeigen simulierte relative Atmosphärenkorrekturfelder von maximal 20% eine Verdoppelung der absoluten Fehler, so daß die entsprechenden theoretisch zu erwartenden relativen Fehler der Gelbstoffbestimmung etwa 20% für das Zweischnitt-Verfahren und ca. 40% für das Einschnitt-Verfahren betragen sollten. Bei korrelierten Eingangsfehlern der Spektren von bis zu 20% liegt die theoretisch zu erwartende Genauigkeit der Schwebstoffbestimmung für den *in situ* gemessenen Konzentrationsbereich der Schwebstoffe bei 10 – 30% für das Zweischnitt-Verfahren und bei 20 – 40% für das Einschnitt-Verfahren.

Weitere Fehlerquellen bilden einzelne, in den Verfahren dieser Arbeit nicht berücksichtigte physikalische Effekte, wie die von der Windgeschwindigkeit abhängige Schaumbedeckung und die Gelbstofffluoreszenz, deren Vernachlässigung ebenfalls in zu geringen Reflektanzen resultiert. Als Folge daraus kann es zu einer leichten Unterschätzung der Schwebstoffe und einer Überschätzung der Gelbstoffabsorption des Zweischnitt-Verfahrens führen. Bei der Diskussion der Ergebnisse bleibt zu bedenken, daß das verwendete biooptische Modell die Gesamtheit der europäischen Küstengewässer beschreibt und sich daher, wie im Fall der Gelbstoffmessungen, die nur im Bereich der Nordsee vorlagen, unweigerlich Abweichungen für spezielle Regionen ergeben.

Vor dem Hintergrund der erzielten Genauigkeiten der Verfahren müssen ebenso die Fehler der *in situ* Messungen diskutiert werden, die durch die GKSS mit 20% für das Chlorophyll, 15% für den Schwebstoff und etwa 10% für den Gelbstoff angegeben wurden. Darüber hinaus zeigen Ringlaboruntersuchungen, daß es bei der Analyse der Gewässerproben zu erheblichen Abweichungen zwischen den einzelnen Laboren kommt, die in der Größenordnung der erzielten Genauigkeit der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren liegt.

Für eine quantitative Abschätzung von klimarelevanten Austauschprozessen mit der Atmosphäre, wie beispielsweise im Kohlenstoffkreislauf und den Dimethylsulfidflüssen, werden genauere Konzentrationsbestimmungen der Wasserinhaltsstoffe der Küstenzonen

und Randmeere benötigt. Die von der ESA angestrebte Genauigkeit der MERIS-Level2-Produkte wird für die Chlorophyll- und Schwebstoffkonzentrationen mit 30% und für den Gelbstoff mit 50% angegeben.

Zur Verbesserung der Genauigkeit zukünftiger Verfahren sollte die Chlorophyll-a-Fluoreszenz berücksichtigt werden, mit der eine bessere Trennung von Chlorophyll und Gelbstoff zu erwarten ist. Auch sollte überprüft werden, in wieweit die Berücksichtigung einer von der Windgeschwindigkeit abhängigen Schaumbedeckung zu verbesserten Ergebnissen führt. Da die mit dieser Arbeit vorgestellten Verfahren auch auf andere Sensoren übertragbar bleiben, können zusätzliche Kanäle zukünftiger Sensoren die Genauigkeit der Verfahren verbessern. So ließe sich beispielsweise durch einen zusätzlichen Kanal im nahen ultra-violetten Spektralbereich um 380 nm die Bestimmung der Gelbstoffabsorption und die Klassifizierung von absorbierendem Aerosol verbessern. Ebenso könnten zusätzliche Kanäle im infraroten Spektralbereich in den atmosphärischen Fenstern um 1040 nm und 1240 nm zu Verbesserungen der Atmosphärenkorrektur beitragen. Aufgrund der in diesem Spektralbereich hohen Absorption von Wasser wäre das Signal auch für die sedimentgetrübten Küstengewässer vernachlässigbar. Da weite Bereiche der MERIS-Daten durch den direkten Sonnenreflex beeinflusst sind und maskiert werden müssen, sollten zukünftige Verfahren die Bereiche mittleren Glints berücksichtigen. Hierzu können die bereits durchgeführten Simulationen verwendet werden, die den Sonnenreflex bereits implizit enthalten.