

Detaillierter Blick aus dem All – Meeresalgen global beobachtet

Astrid Bracher

Zusammenfassung

Marines Phytoplankton ist die Basis des marinen Nahrungsnetzes und spielt als biologische Pumpe eine bedeutende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. In diesem Artikel wird die Methode PhytoDOAS vorgestellt, die es ermöglicht, aus Satellitendaten nicht nur die allgemeine Verteilung des Phytoplanktons weltweit zu ermitteln, sondern durch die Nutzung spektral hochaufgelöster Daten auch deren Zusammensetzung nach unterschiedlichen funktionalen Gruppen. Aus den zeitlich hochaufgelösten globalen Karten wird abgeleitet, wie viel an CO₂ gebunden und Sauerstoff und Nahrung durch die Meeresalgen hergestellt wird. Da verschiedene Algengruppen unterschiedliche Funktionen im marinen Ökosystem und dem Kohlenstoffkreislauf haben, sollen die Karten dazu dienen, die zeitlichen Veränderungen zu beobachten und Auswirkungen des Klimawandels besser einschätzen zu können.

Summary

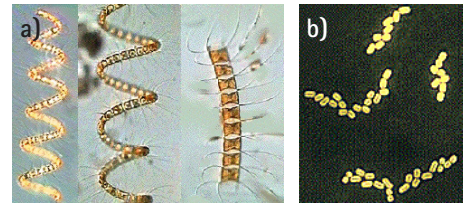
Marine phytoplankton represents the basis of the marine food web and plays an important role as biological pump within the global carbon cycle. This article presents the method PhytoDOAS which enables to retrieve from satellite data not only the general global distribution of phytoplankton, but also by using highly spectrally resolved data their composition in dependence to different functional groups of phytoplankton. It can be derived from these temporally highly resolved global maps how much CO₂ is fixed to organic carbon, and how much oxygen and food is produced by marine microalgae. Since different algae groups have different functions within the marine ecosystem and carbon cycle, the maps will help a lot to observe their temporal changes and to estimate the effect of climate change.

1 Marines Phytoplankton: Lieferant von Nahrung und Sauerstoff für alle Meerestiere und Bremser der Erderwärmung

Meeresalgen sind fast alle mikroskopisch kleine Lebewesen, sog. Phytoplankton (Abb. 1). Sie tragen zwar mit nur ca. 1 bis 2 % zur globalen pflanzlichen Biomasse bei, stellen aber dafür ca. 30 bis 60 % der globalen Primärproduktion. Mit Hilfe von Photosynthese produzieren sie Nahrung und Sauerstoff aus Kohlendioxid (CO₂) und Wasser. Dabei nehmen sie Kohlendioxid auf und entziehen es der Atmosphäre. Ein Teil der Algen wird gefressen und gelangt in die Nahrungskette, andere sinken zum Meeresboden und versenken auf diese Weise Kohlendioxid. Phytoplankton hat daher eine große Bedeutung für den globalen Kohlenstoffkreislauf, da es CO₂ bindet und

Abb. 1:

Phytoplankton – Mikroskopisch kleine Meeresalgen:
a) Kieselalgen



b) Cyanobakterien (*Synechococcus* sp.) (Quelle: Mats Kuylensstierna and Bengt Karlson, SMHI, www.smhi.se/oceanografi/oce_info_data/plankton_checklist/ssshome.htm)

organische Kohlenstoffverbindungen produziert und somit Teile des Ozeans eine Senke für CO₂ darstellen. Damit wird der durch die Menschen verursachte Anstieg von CO₂ in der Luft abgebremst. Dazu kommt die große Bedeutung des marinen Phytoplanktons für das weltweite Fischwachstum, da es die Nahrungsgrundlage für die Fische, bzw. deren Futtertiere darstellt. Phytoplankton ist daher Welternährer und gleichzeitig Bremser des Treibhauseffekts.

Diese Zahlen über den Anteil von Meeresalgen an der globalen Pflanzenproduktion und -biomasse zeigen deutlich, wie ungenau diese Abschätzungen zurzeit noch sind. Da genaue globale Messungen der Primärproduktion im Wasser wegen methodischer Probleme und begrenzter Probennahme nicht möglich sind, wird die globale marine Primärproduktion mit Hilfe von Modellen abgeschätzt, welche auf globalen Datensätzen von Satellitenmessungen und vereinzelter Messungen vor Ort im Meer basieren.

Die optischen Eigenschaften des Wassers beeinflussen die spektrale Zusammensetzung des Lichts, welches von der Erde in die Atmosphäre zurückgestreut wird und von Satellitensensoren gemessen werden kann. Da Phytoplankton meist den Hauptanteil an den absorbierenden Wasserinhaltsstoffen stellt, können durch Satellitenfernerkundung bei geringer oder keiner Wolkenbedeckung durch Vergleich mit direkten Messungen in der Wassersäule Daten gewonnen werden, aus denen, zeitlich und örtlich hochaufgelöst, globale Verteilungen von Algen-Biomasse in den Weltmeeren berechnet werden können. Mit Hilfe der genauen Kenntnis der Absorptionseigenschaften der verschiedenen Algenarten und der Lichtstärke im Wasser kann dann berechnet werden, wie viel CO₂ durch die Meeresalgen im Wasser gebunden wird.

Unsere Arbeitsgruppe PHYTOOPTICS, die eine Kooperation zwischen dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung und dem Institut für Umweltphysik an der Universität Bremen ist, verwendet Messungen der neuen Satelliten-Instrumente MERIS und SCIAMACHY,

um die globalen Abschätzungen von Meeresalgenwachstum und -produktion zu verbessern. Beide Sensoren befinden sich auf dem europäischen Satelliten ENVISAT (Environmental Satellite der ESA). Die Informationen der räumlich hochaufgelösten MERIS- und der spektral hochaufgelösten SCIAMACHY-Daten werden kombiniert genutzt. So können wir erstmalig global die regional unterschiedliche Zusammensetzung und Absorption von Phytoplankton bestimmen.

2 Weltweite Beobachtung von Phytoplankton mit Satelliten

Um Phytoplankton weltweit beobachten zu können, werden Satellitendaten genutzt, die wie eine Kamera ein Bild von der Erde aufnehmen und letztendlich die Ozeanfarbe fotografieren (»Ocean-Color«-Sensoren, z.B. die bekannten NASA-Sensoren SeaWiFS und MODIS, oder der ESA-Sensor MERIS). Pflanzen allgemein enthalten Farbstoffe, sog. Pigmente, die das Licht absorbieren und somit die Lichtenergie einfangen, die anschließend in chemische Energie umgewandelt wird. Das wichtigste Pigment ist Chlorophyll a, welches auch bei allen Landpflanzen und Meeresalgen verbreitet ist. Es absorbiert sehr stark im blauen (um 430 nm) und roten (um 680 nm) und sehr schwach im grünen Bereich des Spektrums (Abb. 2). Aufgrund dieser Eigenschaft lässt sich anhand des Verhältnisses der Rückstreuung des Lichts im blauen zum grünen Wellenlängenbereich durch Eichung mit in der Wassersäule gemessenen Daten die Chlorophyll-Konzentration ableiten. Dies stellt eine gute Näherung für den Biomassengehalt des Phytoplanktons dar. Somit werden aus diesen Satellitendaten Karten über die allgemeine Verteilung von Phytoplankton in den Weltozeanen erstellt (siehe Abb. 3). Die räumliche Auflösung liegt dabei bei bis zu 1 km² und Messungen erfolgen weltweit

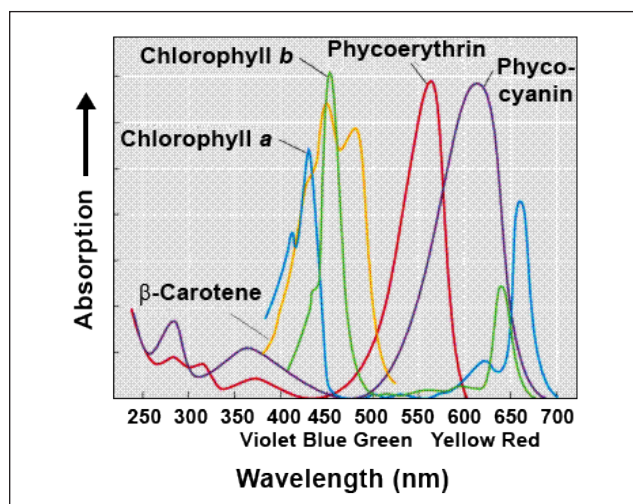


Abb. 2: Die wichtigsten photosynthetischen Pigmente in Algen (und Landpflanzen) (Quelle: www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/pigment.gif)

mindestens alle zwei Tage. Den längsten kontinuierlichen Datensatz liefert bis heute der SeaWiFS Sensor, der seit Herbst 1997 bis heute misst – seit 2002 wird er ergänzt durch den Datensatz der neueren Ocean-Color-Sensoren MODIS auf AQUA und MERIS auf ENVISAT.

Aus diesen Chlorophyll-Satellitendaten kann über Modelle die Produktivität des Phytoplanktons weltweit abgeschätzt werden (siehe Abb. 4 nach dem Model von Behrenfeld und Falkowski 1997), was für die weltweite Modellierung von Stoffflüssen, insbesondere für den Kohlenstoffkreislauf, der wichtigere Parameter ist. Die Phytoplankton-Produktivität ist im Wesentlichen eine Funktion des angebotenen Lichts und der Phytoplankton-Biomasse. Diese beiden Informationen können aus Satellitendaten abgeleitet werden. Die Produktionsrate in Abhängigkeit von Licht und Biomasse unterscheidet sich nach Ort und Zeit in Abhängigkeit von biotischen und abiotischen Faktoren und muss in situ mit Hilfe von

Inkubationen von Wasserproben bestimmt werden, an denen die Sauerstoffentwicklung bzw. der Aufbau von organischem Kohlenstoff über einen bestimmten Zeitraum gemessen wird. Diese mit Hilfe von Satellitendaten erstellten Phytoplankton-Karten ermöglichen es, die Veränderungen von Zusammensetzung, Wachstum und Produktivität des Phytoplanktons und zwar in allen Weltmeeren über längere Zeiträume zu untersuchen. Dabei spielt der Einfluss abiotischer und

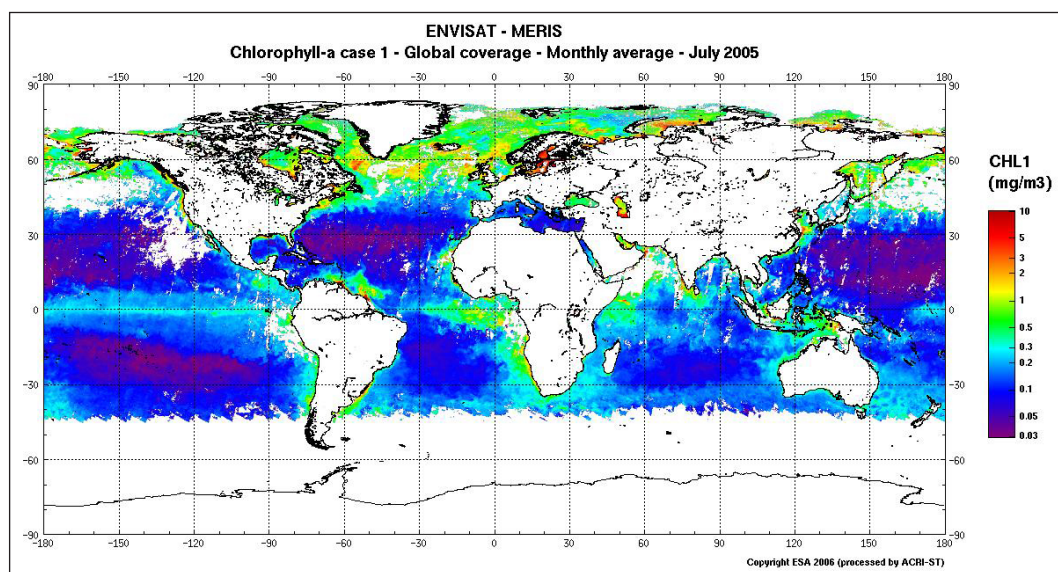


Abb. 3: Globale Phytoplankton-Biomasse (als Chlorophyll-Konzentration) im Juli 2005 aus MERIS Satellitendaten (Quelle: 2007, www.enviport.org/meris/lv3_main.htm; ESA-ACRI-LOV)

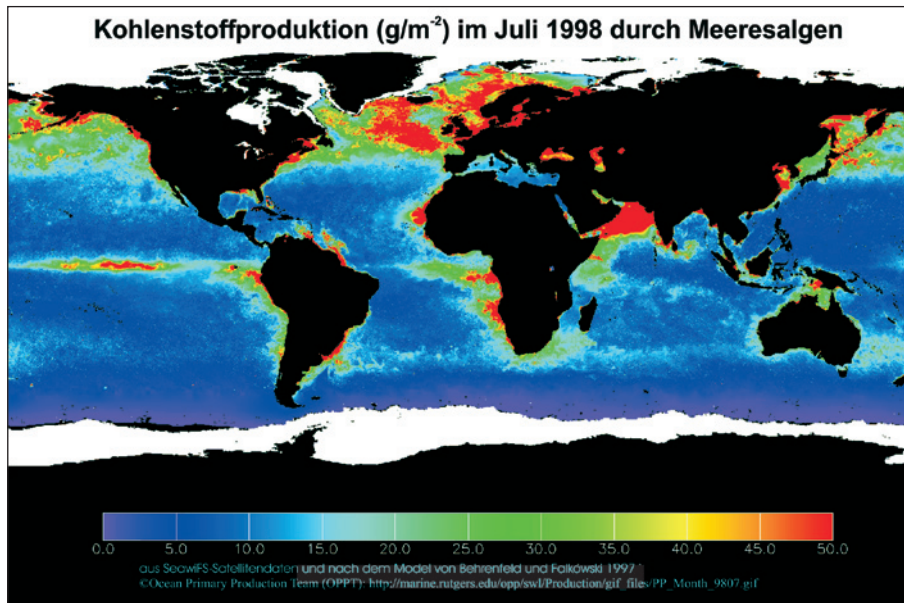


Abb. 4:
Modellierung der globalen marinen monatlichen Primärproduktion für Juli 1998 unter Verwendung der (satellitengestützten) SeaWiFS Chlorophyll-Daten, der für Wolken korrigierten Strahlung an der Wasseroberfläche und der Parameter, die die Abhängigkeit der Photosynthese vom Licht charakterisieren, basierend auf dem Modell von Behrenfeld und Falkowski 1997. (Quelle: OPPT 2003)

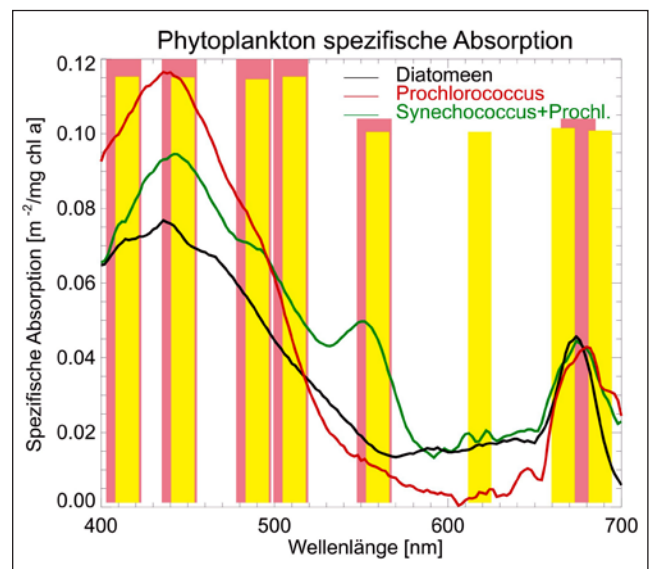
biotischer Faktoren auf das Phytoplankton und dessen Funktion im Ökosystem Meer und im globalen Kohlenstoffkreislauf eine wichtige Rolle.

Darüber hinaus ist es aber auch von Bedeutung, global die Verteilung verschiedener Algengruppen (siehe auch Abb. 1) mit unterschiedlichen Funktionen zu kennen. Diese funktionellen Gruppen von Phytoplankton spielen ganz unterschiedliche Rollen, denn zum Teil sind sie am Aufbau von biogenem Material (wie z. B. die Kieselalgen mit ihren Silikatschalen) beteiligt, können elementaren Stickstoff fixieren (wie die Cyanobakterien, auch Blaualgen genannt). Zudem emittieren sie eine chemische Substanz (Dimethyl-Sulfid), die in der Atmosphäre schrittweise zu Sulfat-Aerosolen oxidiert und so Kondensationskerne für die Wolkenbildung darstellen, oder bilden Kalkschalen, bei deren Aufbau Kohlendioxid freigesetzt wird. Einige Phytoplankton-Arten sind toxisch und rufen daher auch direkte ökonomische Effekte hervor (großflächiges Fischsterben, Sperrung von Badestränden), d. h. sie haben eine ganz unterschiedliche Bedeutung für die biogeochemischen Stoffkreisläufe im marinen Nahrungsnetz und für das Klima. Um auch Auswirkungen des Klimawandels genauer studieren zu können, sind daher Langzeitdatensätze über die Verteilung und Produktivität dieser Gruppen von größter Bedeutung.

Abb. 5: Spektren der spezifischen Pigmentabsorption (bezogen auf die Chlorophyll-Konzentration) von drei unterschiedlichen Phytoplanktongemeinschaften bestehend a) zu 100 % aus Cyanobakterien der Gattung *Synechococcus* sp. (ohne Pigment Phycoerythrin), b) zu 100 % aus Cyanobakterien der Gattung *Synechococcus* sp. (mit Pigment Phycoerythrin) und *Prochlorococcus* und c) zu ca. 80 % aus Kieselalgen (Diatomeen), die restlichen 20 % sind Schaumalgen und geißeltragende Algen. Abb. aus Bracher et al. (2008). Eingezeichnet sind die breiten spektralen Banden, die die Ocean-Color-Sensoren SeaWiFS (rosa) und MERIS (gelb) messen. (Quelle: Bracher et al. 2008)

Leider werden die Datensätze über die globale Verteilung wesentlicher Phytoplanktongruppen bis heute nur durch einige wenige Modelle simuliert auf Grundlage von globalen Satellitendaten über die gesamte Phytoplankton-Biomasse, Oberflächenwassertemperatur, Gesamtstrahlung, Strömungsverhältnisse und den global ungenügend vorhandenen in situ Messdaten über die Phytoplanktongruppen-Zusammensetzung, Nährstoffverteilung, Konsumenten und Sekundärproduzenten im Nahrungsnetz. Allgemein gilt für in situ Messungen, dass sie im Gegensatz zu den Satellitendaten eine viel schlechtere und ungleichmäßig verteilte räumliche und zeitliche Abdeckung haben, was natürlich auch beim Eichen dieser Modelle und der Ableitung der Chlorophyll-Konzentration aus Satellitendaten zu einem gewissen Bias führt.

Warum ist es bis heute nur sehr unzureichend möglich, aus den räumlich relativ hochaufgelösten (bis 1 km²) Satelliten-Daten weitere globale Informationen über die Zusammensetzung des Phytoplanktons zu gewinnen? Es liegt an der limitierten spektralen Auflösung der Daten.



Denn verschiedene Algengruppen besitzen neben Chlorophyll a unterschiedliche photosynthetische Pigmente, die z.T. für die jeweilige Gruppe charakteristisch sind (sog. Markerpigmente). Die von den Pigmenten aufgenommene Strahlung wird als Absorptionsspektrum ermittelt und verändert auch wesentlich die Rückstreuung des Lichts aus dem Ozean, was vom Satelliten gemessen werden kann. Daher ist sowohl die Rückstreuung des Lichts aus dem Ozean als auch das Absorptionsspektrum für verschiedene Algengruppen gruppenspezifisch, bei spektral grob aufgelösten Daten können diese feinen spektralen Unterschiede nicht differenziert werden (Abb. 5). Die unterschiedliche Pigmentzusammensetzung der unterschiedlichen Phytoplanktongruppen führt auch dazu, dass das Verhältnis der Rückstreuung im blauen zum grünen Bereich für die unterschiedlichen natürlichen Phytoplankton-Gemeinschaften nicht konstant ist. Dies induziert auch einen Fehler in den Chlorophyll-Satellitendaten und den daraus abgeleiteten Produktionsraten.

3 Die PhytoDOAS-Methode von IUP/AWI zur globalen Unterscheidung funktioneller Gruppen von Phytoplankton mit Satellitendaten

Ein neuer Schritt, diese Fehler zu reduzieren bzw. die globale Verteilung wesentlicher Phytoplanktongruppen zu extrahieren, ist die in Zusammenarbeit des Instituts für Umweltphysik der Uni Bremen und AWI Bremerhaven entwickelte Auswertungsmethode PhytoDOAS, bei der Satellitendaten des Satellitensensors SCIAMACHY mit sehr guter spektraler (unter 1 nm im sichtbaren Bereich) und weniger guter räumlicher Auflösung verwendet werden. Die für diese Methode notwendigen Feldmessungen wurden von Kooperationspartnern der Abteilungen »Fernerkundung« am Institut für Küstenforschung der GKSS in Geesthacht (Dr. Rüdiger Röttgers) und der »Biologischen Ozeanographie« am Institut für Meereskunde (IFM-GEOMAR) in Kiel (Dr. Ilka Peeken) zur Verfügung gestellt.

Das Scanning Imaging Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY) ist ein 8-Kanal-Gitterspektrometer, das den Spektralbereich von 240 nm bis 2,4 µm mit einer spektralen Auflösung von 0,2 bis 1,5 nm abdeckt. SCIAMACHY wurde gemeinsam mit dem Ocean Color Sensor MERIS im März 2002 auf ENVISAT in eine polare sonnensynchrone Umlaufbahn gebracht (siehe Abb. 6). SCIAMACHY verfügt über vier Beobachtungsmodi: Okkultationsmessungen mit Sonne und Mond, die tangentielle Beobachtung des im Limb gestreuten Lichts und die Nadir-Beobachtung des von der Atmosphäre und Erdoberfläche zurückgestreuten Sonnenlichtes. SCIAMACHY-Messungen werden hauptsächlich genutzt, um Informationen über die Zusammensetzung und Dynamik der Erdatmosphäre zu gewinnen, hier in dieser Arbeitsgruppe werden die Messungen genutzt, um Informationen über den Ozean zu erhalten und dafür wer-

den nur die SCIAMACHY-Nadir-Messungen ausgewertet. Die Nadir-Messungen liefern typischerweise eine räumliche Auflösung von 30 × 60 km². Innerhalb eines Tages umkreist SCIAMACHY in 14 Orbits die Erde und nimmt typischerweise ein bis zwei Okkultationsmessungen, 25 Limb-Profile und je nach Spektralbereich zwischen



Abb. 6: Der europäische Umweltsatellit ENVISAT mit dem für die Beobachtung der Meeresalgen relevanten Sensoren MERIS und SCIAMACHY. Envisat befindet sich seit März 2008 im All und bildet die Plattform für insgesamt 10 Sensoren, deren wichtigste Aufgaben die ständige Beobachtung des Klimas, des Ozeans, und der Landfläche der Erde ist. (Quelle: ESA)

2000 und 10.000 Nadir-Messungen auf. Da die Messungen mit Sonnenlicht arbeiten, sind sie mit Ausnahme der Emissionssignale auf die Tagseite des Orbits beschränkt. Aufgrund des sonnensynchronen Orbits von ENVISAT wird jede Breite zu einer festen lokalen Zeit überflogen, die am Äquator bei 10.00 Uhr liegt. SCIAMACHY-Messungen in mittleren und niedrigen Breiten geben eine Vormittagssituation wieder.

Im Hinblick auf die Untersuchung der vom Licht durchleuchteten Schichten der Ozeane mit Hilfe von Satellitensensoren, ist es von Bedeutung, dass in dem von SCIAMACHY abgedeckten Spektralbereich eine Reihe von Molekülen, zum einen atmosphärische Spurengase, zum anderen das Wasser selbst und die Wasserinhaltsstoffe, absorbieren. Da im UV und im Sichtbaren die Lichtstreuung an Luft- und Wassermolekülen und Aerosolen nicht vernachlässigt werden kann, und auch die Reflexion bzw. Streuung am Boden je nach Oberfläche unterschiedliche spektrale Charakteristika hat, können nur diejenigen Moleküle zuverlässig nachgewiesen werden, die relativ schmalbandige Absorptionsstrukturen (< 10 nm) aufweisen: Dazu gehören in dem untersuchten Spektralbereich für die Auswertung von Phytoplankton verschiedene Atmosphärogase (neben Ozon vor allem NO₂, Glyoxal – ein Abbauprodukt auch bei Biomasseverbrennung –, Wasserdampf und O₄) und im offenen Ozean (fernab der Küsten

ohne terrigenen Eintrag) nur das Phytoplankton und das Wasser selbst. (Anmerkung: Bis jetzt beschränkt sich auch die Anwendung von PhytoDOAS auf den offenen Ozean. Hier bestimmt im Wesentlichen die Variation des Phytoplanktons die Variation der Gesamtaborption – sog. CASE-1 Gewässer). Für die verschiedenen Datenprodukte von SCIAMACHY werden jeweils ganz unterschiedliche Algorithmen verwendet (ein Überblick wird in Bovensmann et al. 1999 gegeben). Bei der Mehrzahl von ihnen handelt es sich aber um Abwandlungen der differentiellen Optischen Absorptions-Spektroskopie (DOAS), eine Methode, die auch bei Fernerkundungsmessungen vom Boden, von Flugzeugen und von Ballonen aus verwendet wird. Dieser Ansatz berücksichtigt nur Änderungen der Absorption mit der Wellenlänge und kann so auf eine absolute radiometrische Kalibration der Messungen verzichten. Darüber hinaus wirken sich Störungen durch Aerosole weniger auf das Ergebnis aus.

Bei der DOAS-Methode (entwickelt von Perner und Platt 1979) wird in einem ausgewählten Wellenlängenbereich (hier ca. 430 bis ca. 500 nm und ca. 530 bis ca. 590 nm) der Quotient der vom Satellitensensor gemessenen Rückstreuung der Sonnenstrahlung von der Erde zur Sonnenstrahlung oberhalb der Erdatmosphäre angefittet, so dass er der Summe aller Absorptionen aller in dem relevanten Wellenlängenbereich relevanten Moleküle und Streuprozesse entspricht. Dabei werden die breitbandigen Absorptions- und Streuprozesse mit Hilfe eines Polynom niedriger Ordnung approximiert und nur die schmalbandigen (sog. differentiellen) Absorptionsquerschnitte der relevanten Absorber und Streuquerschnitte der inelastischen Streuung des Sonnenlichts an Luftmolekülen (sog. Ring-Effekt) und Wassermolekülen (sog. Vibrations-Raman-Streuung oder Wasser-Ring) gehen explizit ein. Durch den Fit kann für jeden relevanten und mitgefitteten Absorber die Konzentration im beobachteten Lichtweg abgeleitet werden, bzw. die Stärke der inelastischen Streuung an Luft- und Wassermolekülen. Bei der PhytoDOAS-Methode werden neben den o. g. atmosphärischen relevanten Absorbern und dem Ring-Effekt, auch das Phytoplankton, das Wasser selbst und der Wasser-Ring im DOAS-Fit berücksichtigt (siehe Vountas et al. 2007). Daraus kann dann für das Phytoplankton die Absorptionsstärke innerhalb der vom Satelliten beobachteten Wassersäule bestimmt werden. Um herauszufinden, wie tief der Sensor wirklich ins Wasser blicken kann, wird die sog. Licht-Eindringtiefe aus der mit DOAS bestimmten Stärke des Wasser-Ring-Effekts abgeleitet. Aus Phytoplankton-Absorptionsstärke und Licht-Eindringtiefe kann dann die Konzentration des Phytoplanktons berechnet werden.

Um nun verschiedene Algengruppen ableiten zu können, werden die für unterschiedliche Gruppen charakteristischen Absorptionsquerschnitte nacheinander im PhytoDOAS angefittet. Diese Absorptionsspektren und deren Zuordnung zu bestimmten Phytoplanktongruppen werden »im Feld« auf Schiffsexpeditionen mit den vom

deutschen Forschungsschiff Polarstern (siehe Abb. 7) genommenen Wasserproben an der Wasseroberfläche direkt bestimmt. Die Absorption wird bestimmt durch Abfüllen der Wasserproben in eine Messerkammer, in der ein Photometer die Absorption ohne weitere Streueffekte messen kann (sog. PSICAM-Methode nach Röttgers et al. 2005)



Abb. 7: Deutsches Forschungsschiff Polarstern, von dem aus die in situ Messungen zur Absorption und Zusammensetzung des Phytoplanktons zu verschiedenen Jahreszeiten in verschiedenen Gebieten des Atlantiks ausgeführt werden. (Quelle: AWI)

oder die Proben werden filtriert und die Filter anschließend in einem Spektrophotometer vermessen. Diese Arbeiten wurden von der Arbeitsgruppe Fernerkundung am Institut für Küstenforschung des GKSS Forschungszentrums ausgeführt. Um die Zusammensetzung der Phytoplanktongruppen in den Wasserproben zu bestimmen, wird die Pigmentzusammensetzung durch High-Liquid-Pressure-Chromatography (HPLC) bestimmt. Anhand der Markerpigmente werden die wesentlichen Phytoplanktongruppen abgeleitet. Diese Arbeiten wurden sowohl von der Arbeitsgruppe an der GKSS als auch am Forschungsbereich Marine Biogeochemie des Leibniz-Instituts für Meereswissenschaften an der Universität Kiel (IFM-Geomar) ausgeführt.

4 Weltweite Karten über Verteilungen der gesamten Phytoplankton-Biomasse von Blaualgen und Kieselalgen vom Satelliten aus gesehen

Im Folgenden sollen erste Ergebnisse über die weltweite Verteilung von Phytoplankton mit Hilfe der PhytoDOAS-Methode ausgewerteter Satellitendaten des Sensors SCIAMACHY gezeigt werden.

Abb. 8 (von Vountas et al. 2007) zeigt für den offenen Ozean die mittlere globale Phytoplankton-Verteilung als Biomasse (Chlorophyll-Konzentration) für eine »durchschnittlich« vorkommende Phytoplankton-Gemeinschaft, deren Absorptionseigenschaften als Grundlage für den empirischen Algorithmus der herkömmlichen Ocean-Color-Daten von SeaWiFS, MODIS und Meris dient. Die Abbildung zeigt die Biomasse für den gleichen Zeitraum

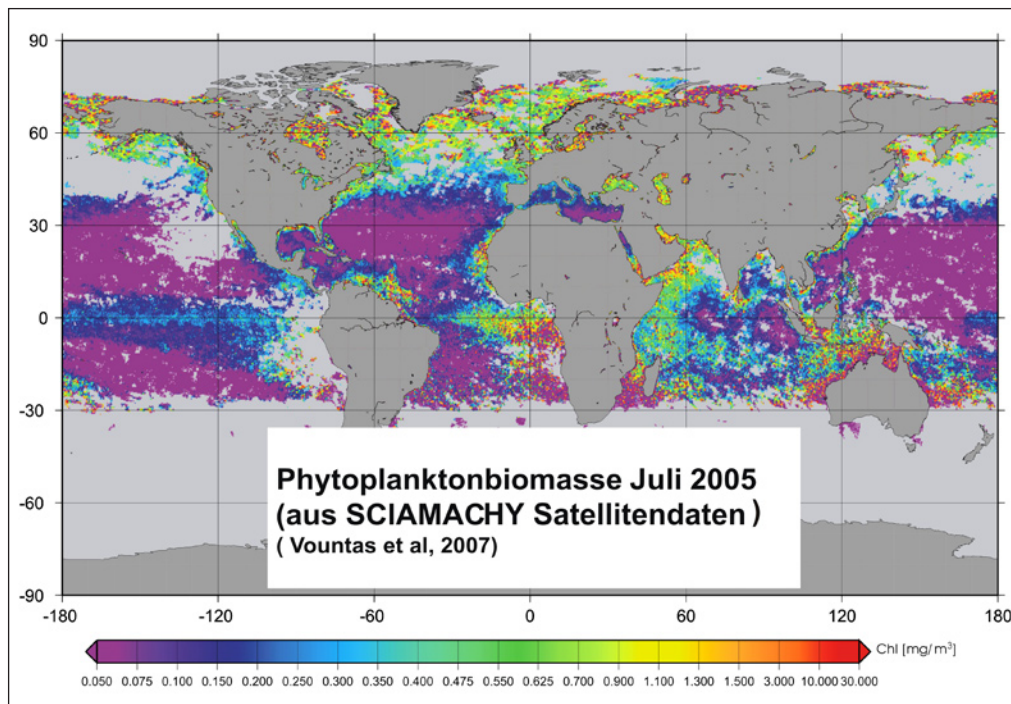


Abb. 8: Globale Phytoplankton-Biomasse im Juli 2005 mit PhytoDOAS aus SCIAMACHY Satellitendaten berechnet (Quelle: Vountas et al. 2007)

der in Abb. 3 dargestellten aus MERIS-Daten abgeleiteten Chlorophyll-Werte. Im Großen und Ganzen stimmen die Verteilungen überein, was bemerkenswert ist, denn der Ansatz der Methoden (Verhältnis der für die Atmosphäre korrigierten Reflektion zweier Wellenlängen für die MERIS-Auswertung und Analyse der differentiellen Signale innerhalb eines ca. 70 nm abdeckenden Bereichs des SCIAMACHY-Spektrums) ist völlig verschieden. Allgemein typisch für die globale Verteilung des Phytoplanktons – insbesondere für die Jahreszeit (Sommer in der Nord- und Winter in der Südhemisphäre) – ist, dass oligotrophe Gebiete (d. h. Gebiete mit wenig Phytoplankton-Biomasse, $<0.1 \mu\text{g/l}$) im Bereich des subtropischen Pazifik und Atlantik und indischen Ozean liegen, was v. a. an dem Mangel an Stickstoff und Phosphor im Meerwasser liegt, der das Wachstum des Phytoplanktons limitiert. Große Wasserwirbel, bei denen kaltes, nährstoffreiches Meerwasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche befördert wird, wirken wie ein kurzzeitig bestehendes Auftriebsgebiet und führen zu einer explosionsartigen Vermehrung des Phytoplanktons. Diese Auftriebsgebiete liegen unter anderem an den Westküsten Afrikas und Südamerikas. Auch in den arktischen Gewässern und in den Gewässern der gemäßigten nördlichen Breite (oberhalb von 40°N) sind Algenblüten typisch für die Sommermonate, in denen ausreichende Lichtverhältnisse und höhere Wassertemperaturen das Algenwachstum bei guten Nährstoffbedingungen begünstigen.

Cyanobakterien (Bsp. Abb. 1b) sind Prokaryoten, die zur Umwandlung anorganischer in organische Verbindungen Photosynthese betreiben. Sie besitzen das Pigment Phycocyanin, so dass Cyanobakterien auch als Blaualgen (blue-greens) bezeichnet werden. Abb. 9 zeigt

die globale Verteilung im nordhemisphärischen Herbst, bzw. südhemisphärischen Frühjahr für Cyanobakterien. Die Cyanobakterien kommen vor allem in den warmen Meeren der Subtropen und Tropen vor, etwa in weiten Teilen des Pazifiks, der Arabischen See oder vor der Westküste Afrikas. Ein großer Teil von ihnen bringt wesentliche Mengen von biologisch verfügbarem Stickstoff in den Ozean ein. Viele dieser Mikroorganismen, wie zum Beispiel das Cyanobakterium *Trichodesmium*, fixieren elementaren Stickstoff (N_2), der im Wasser gelöst ist, und wandeln diesen in Nitrat um. Das düngt das Oberflächenwasser und erhöht die Produktivität der Ozeane. Davon profitiert

die ganze Nahrungskette und es beeinflusst nicht zuletzt das Klima.

Andererseits wachsen diese Algen auch in anderen Gewässern mit einem ruhigen Wassersystem besonders gut, vor allem in Binnenseen und im Brackwasser bei erhöhten Wassertemperaturen, die überwiegend im Sommer erreicht werden und bei hohen Nährstoffgehalten, insbesondere von Stickstoff und Phosphor, die vor allem in dicht besiedelten Gegenden durch häusliche, industrielle und auch landwirtschaftliche Abwässer bedingt sind. Unter diesen Bedingungen kann es zur Bildung von Algentepichen kommen, welche mit einer Verfärbung der Gewässeroberfläche und der Bildung von »off-flavor«-Gerüchen, hervorgerufen durch Abbauprodukte des Fettsäure- und Aminosäurestoffwechsels, einhergehen. Das größte Problem stellt allerdings die Bildung von Substanzen mit stark toxischer Wirkung gegenüber Menschen und Tieren dar, denn cyanobakterielle Toxine können über das Trinkwasser, aber auch über Produkte von Aquakulturen wie Muscheln, Krebse und Fische aufgenommen werden, wobei es zu schweren Erkrankungen kommen kann.

In den letzten Jahrzehnten häufen sich Berichte über das Auftreten cyanobakterieller Algenblüten auch in der gemäßigten Klimazone. Als Ursachen hierfür kommen sowohl klimatische Faktoren wie das »global warming« als auch die bereits beschriebenen günstigeren Wachstumsbedingungen in bestimmten Gewässern in Betracht. Anhand des Heiligensees in Berlin konnte bereits zwischen 1975 und 1992 gezeigt werden, dass mehrere aufeinander folgende milde Winter (1988–1992) eine signifikante Erhöhung der Wassertemperatur und eine daraus resultierende Zunahme an Phytoplankton-Masse mit Ver-

lagerung der Phytoplankton-Spezies in Richtung Cyanobakterien bewirkten.

Kieselalgen (oder auch: Diatomeen) sind ein Teil des Phytoplanktons. Sie stellen rund ein Drittel aller pflanzlichen Planktonarten. Diatomeen besitzen eine Schale aus Silikat (einem Salz der Kieselsäure). Diese Schale besteht aus zwei Teilen, welche mit breiten Gürtelbändern verbunden sind (siehe Abb. 1a). Die Silikatschale ist ein Skelett, das die Pflanzen davor schützt, von Kleinkrebsen gefressen zu werden und, wie vermutet wird, bildet sie auch einen Schutz gegen Parasiten und Krankheitserreger. Viele Diatomeen haben neben dem Panzer auch noch stachelartige Auswüchse (Abb. 1a), die sie auch als zusätzlichen Fraßschutz und als Schwebhilfe benutzen. Diese Arten leben vor allem in den oberen Hundert Metern, in der Nähe der Meeresoberfläche, da sie für ihr Wachstum Licht benötigen. Wenn Diatomeen absterben, können ihre Silikatschalen miteinander verklumpen und als sog. »Aggregate« einige 10 bis 100 Meter pro Tag in die Tiefe rieseln. (Ob sie unten ankommen, hängt unter anderem von der Löslichkeit der Kieselsäure ab.) Am Meeresboden lagern sich die Schalen dann ab und tragen so einen geringen Teil zum Sediment bei, das insgesamt um nur ca. 1 cm pro 1.000 Jahre anwächst.

In Abb. 10 ist die globale Verteilung von Kieselalgen dargestellt. Allgemein ist bekannt, dass Kieselalgen fast überall vorkommen, wo es genug Nährstoffe (Phosphate und Stickstoffverbindungen) und im Wasser gelöste Kieselsäuren gibt. Das ist zum einen dort der Fall, wo kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Ozeanoberfläche gebracht wird, z.B. in Auftriebsgebieten und in hohen Breiten, wo das Meer durch Abkühlung und Stürme im Winter durchmischt wurde. Zum anderen ist der Nährstoffreichtum in Küstennähe groß, und zwar in den Mündungs-

gebieten der Flüsse, wo durch Festlandsabfluss ein steter Nachschub existiert. Folglich kommen Kieselalgen also häufiger in den kühlen Gewässern der hohen Breiten und in Küstengebieten vor (insbesondere im Südpolarmeer, wie auf Abb. 10 deutlich zu sehen, da hier viel Kieselsäure im Wasser gelöst ist). Insbesondere im Frühling finden im Ozean große Diatomeen-Blüten statt, da das Wasser während des Winters aus der Tiefe mit Nährstoffen angereichert wurde und wieder ausreichend

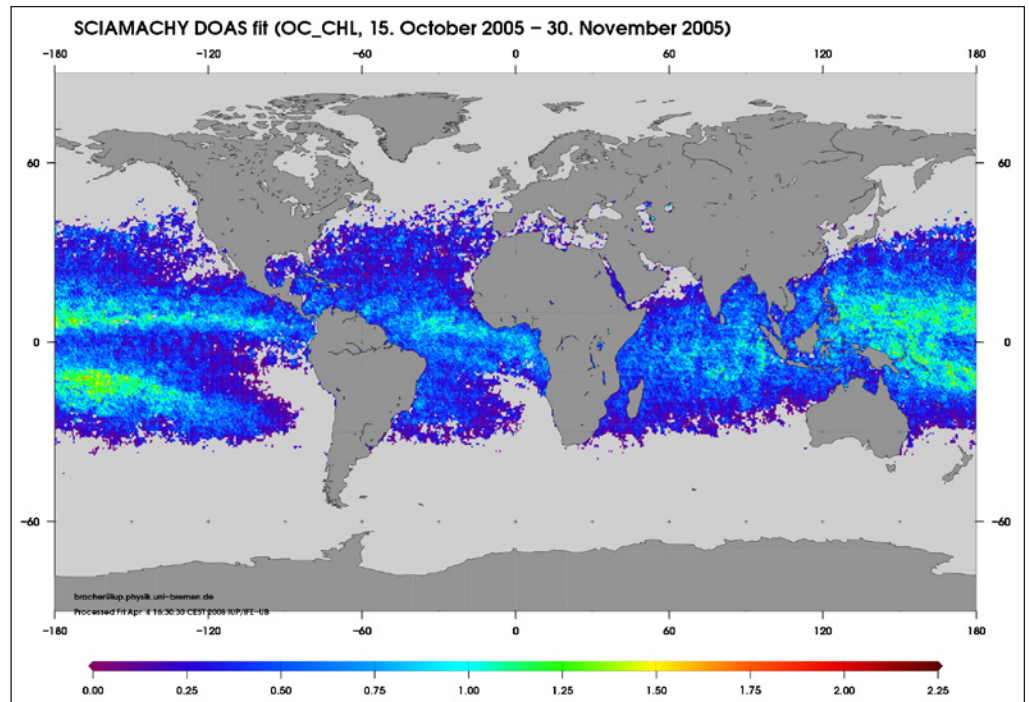


Abb. 9: Globale Verteilung von Cyanobakterien (die Einheit ist die relative Absorptionsstärke) (Quelle: Bracher et al. 2008)

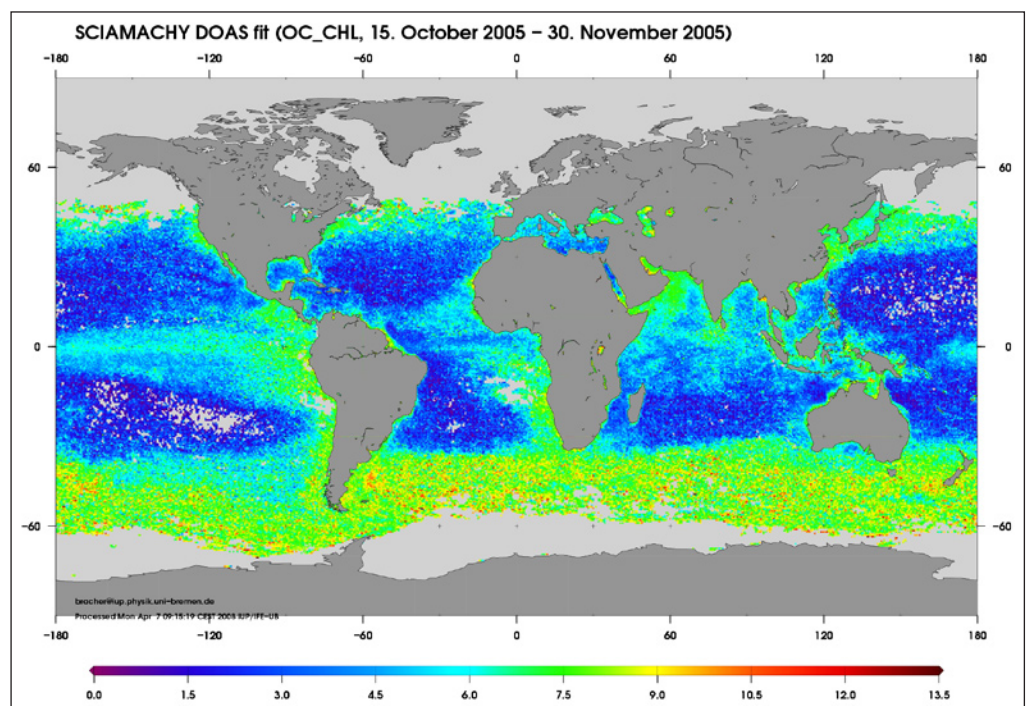


Abb. 10: Globale Verteilung von Kieselalgen (die Einheit ist die relative Absorptionsstärke) (Quelle: Bracher et al. 2008)

Licht zur Verfügung steht. Im offenen Ozean ist der Vorrat an Kieselsäure und Nährstoffen an der Ozeanoberfläche nach der Blüte dann erschöpft und er beschränkt (»limitiert«) somit das weitere Wachstum. Da in der Tiefe weniger Licht existiert, werden die Nährstoffe dort nicht so schnell verbraucht wie an der Oberfläche. Manche Diatomeen machen sich dies zunutze, indem sie unter anderem auch in lichtarmen Wassertiefen leben, wo sie somit mehr Nährstoffe zur Verfügung haben. Die Biomasse der Kieselalgen wird außerdem durch Copepoden limitiert, kleine Krebse, die einen Teil des Zooplanktons ausmachen und sich von Diatomeen ernähren.

Unsere Satellitenkarten über die Verteilung von Cyanobakterien und Kieselalgen zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen über Phytoplankton-Absorption und -zusammensetzung an räumlich und zeitlich nah kollokierten Wasserproben. Des Weiteren zeigen die globalen mit PhytoDOAS bestimmten Phytoplanktongruppen-Verteilungen ähnliche Muster wie die über Modellsimulationen ermittelten Verteilungen. Diese Modellsimulationen kombinieren globale Ocean-Colour-Biomassendaten mit globalen Datensätzen über Nährstoffverteilungen, Temperaturen an der Wasseroberfläche und Strömungsverhältnisse. Erstmals kann mit PhytoDOAS ein Echtzeitbild über globale Verteilungen von zwei Phytoplanktongruppen gegeben werden, die jeweils eine besondere Rolle im Stickstoff- bzw. Silikat-haushalt spielen und auch unterschiedliche Funktionen im marinen Ökosystem einnehmen.

5 Fazit und Ausblick für weitere Entwicklung und Anwendung

Die am IUP der Uni Bremen und am AWI Bremerhaven entwickelte Methode PhytoDOAS ermöglicht es nun auch für die bedeutenden Phytoplanktongruppen der Kieselalgen und Cyanobakterien weltweit Karten über deren Verteilung im offenen Ozean zu erstellen. Grundlage dafür sind zum einen die von dem Satellitensensor SCIAMACHY auf dem europäischen Satelliten ENVISAT seit 2002 kontinuierlich im UV und sichtbaren Bereich spektral hochaufgelösten Messungen der von der Erde zurückgestrahlten und direkten Sonnenstrahlung. Zum anderen gehen in die Auswertungsmethode im Labor gemessene Absorptionsspektren der verschiedenen Atmosphären-gase und Messungen der Absorptionsspektren der beiden Phytoplanktongruppen an vom Schiff aus im offenen Ozean genommenen Wasserproben ein.

In der für über vier weitere Jahre finanzierten Helmholtz-Hochschulnachwuchsgruppe soll nun auch für andere wichtige Phytoplanktongruppen die globale Auswertung aus spektral hochaufgelösten Satellitendaten entwickelt werden, um dann globale Datensätze von allen Phytoplanktongruppen für den gesamten Messzeitraum der Satellitenmission aufzubauen (10+x Jahre). Eine intensive Validierung der Satellitendaten (»ground

truthing«) mit Hilfe der Schiffsmessungen an natürlichen Phytoplankton-Proben ist geplant. Die Helmholtz-Nachwuchsgruppe nimmt in Kooperation mit GKSS und IFM-Geomar an Expeditionen mit den deutschen Forschungsschiffen Polarstern, Sonne und Maria S. Merian teil, um diese Messungen durchzuführen. Des Weiteren ist auch eine Adaptation der Auswertungsalgorithmen an die Messungen des seit 2007 im All erfolgreich messenden SCIAMACHY Nachfolgers GOME-2 geplant, dessen Mission bis 2020 gesichert finanziert ist. Die aus PhytoDOAS abgeleiteten zusätzlichen biooptischen Parameter sollen genutzt werden, um die Qualität der räumlich gut aufgelösten Ocean Color Satellitendaten und damit auch die Qualität der globalen Primärproduktionsmodellierung zu verbessern.

Mit Hilfe der Daten beider ENVISAT-Instrumente SCIAMACHY und MERIS werden zeitlich und örtlich hochaufgelöste globale Karten erstellt, die die weltweite Verteilung des Phytoplanktons, insbesondere von verschiedenen Algengruppen, sowie dessen Biomasse und Produktivität aufzeigen. Daraus wird ermittelt, wie viel an CO₂ gebunden und Sauerstoff und Nahrung durch die Meeresalgen hergestellt wird. Da verschiedene Algengruppen unterschiedliche Funktionen im marinen Ökosystem und dem Kohlenstoffkreislauf haben, sollen die Karten dazu dienen, die Auswirkungen des Klimawandels besser einschätzen zu können.

Literatur

- Bracher A., Vountas M., Dinter T., Burrows J.P., Röttgers R., Peeken I. (eingereicht): Observation of cyanobacteria and diatoms from space using PhytoDOAS on satellite sensor SCIAMACHY data. *Bio-geosciences*.
- Behrenfeld M.J., Falkowski P.G.: Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentrations. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1–20, 1997.
- Perner, D. and Platt, U.: Detection of nitrous acid in the atmosphere by differential optical absorption, *Geophys. Res. Lett.*, 93, 917–920, 1979.
- Röttgers R., Schönfeld W., Kipp P.-R., Doerffer R.: Practical test of a point-source integrating cavity absorption meter: the performance of different collector assemblies. *Applied Optics* 44(26): 5549–5560, 2005.
- Vountas M., Dinter T., Bracher A., Burrows J.P., Sierk B.: Spectral Studies of Ocean Water with Space-borne Sensor SCIAMACHY using Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). *Ocean Science* 3: 429–440, 2007.

Anschrift der Autorin

Dr. Astrid Bracher
Lehrbeauftragte an der Universität Bremen Fachbereich Physik/Elektrotechnik und Gruppenleiterin der Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe PHYTOOPTICS
Alfred-Wegener-Institute für Polar und Meeresforschung, Fachbereich Klima
Bussestraße 24, 27570 Bremerhaven
astrid.bracher@awi.de