



SONDENSYSTEM ZUR MESSUNG VON STREU- UND ABSORPTIONSKOEFFIZIENTEN SOWIE WEITERER EIGENSCHAFTEN DES MEERWASSERS. DIESE MESSUNGEN WERDEN ZUR AUSWERTUNG UND ÜBERPRÜFUNG DER MERIS-DATEN VERWENDET. SENSORSYSTEM FOR MEASURING SCATTERING- AND ABSORPTION COEFFICIENTS AND FURTHER PROPERTIES OF SEAWATER. THESE MEASUREMENTS ARE USED FOR THE EVALUATION AND VALIDATION OF MERIS DATA.

Die Farbe des Küstenwassers

Seit Menschengedenken wird die Farbe des Meerwassers als ein wichtiges Merkmal genutzt, aus dem sich Informationen über die Beschaffenheit des Wassers und seine Inhaltsstoffe ableiten lassen. Für Fischer war die vom Phytoplankton verursachte Grünfärbung Zeichen für reiche Fischvorkommen. Seefahrer konnten die Landnähe aus der Farbe erkennen und benutzten sie zur Navigation. Seit rund 100 Jahren ist auch die Meeresforschung an den optischen Prozessen im Wasser interessiert, die die Meeresfarbe bestimmen.

Heute verwendet man abbildende Spektrometer auf Erdkundungssatelliten, um Informationen über die weltweite Verteilung des Phytoplanktons im Laufe der Jahreszeiten zu gewinnen, die Primärproduktion und damit den Kohlenstofffluss zu bestimmen, die Fischerei zu optimieren und die Wasserqualität in Küstenregionen zu überwachen.

Eines dieser Messgeräte ist das abbildende Spektrometer MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), das auf dem Umweltsatelliten ENVISAT der europäischen Weltraumbehörde ESA eingesetzt wird. Es ist seit dem Start von ENVISAT im Frühjahr 2002 im Dienst. Seine Besonderheit sind 15 Spektralkanäle im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich und die für die Küstenforschung geeignete räumliche Auflösung von 300 Metern.

Sie erlauben es, nicht nur die Phytoplanktonkonzentration im offenen Ozean zu bestimmen sondern auch weite Schwebstoffe und organische Substanzen, die im Küstenbereich in hohen Konzentrationen auftreten können.

Das Institut für Küstenforschung war seit Beginn an der Entwicklung von MERIS beteiligt. Bereits 1985 wurden die ersten Studien federführend von GKSS zusammen mit Partnern im Auftrag der ESA durchgeführt. Seitdem ist GKSS in den wichtigen Gremien der ESA bei der Entwicklung und der Überwachung der Sensor- und Datenqualität vertreten.

Eine Aufgabe der GKSS Wissenschaftler war es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem man aus den Reflexionsspektren von MERIS die Absorptions- und Streukoeffizienten



KONTROLLRAUM ZUR STEUERUNG DES SONDENSYSTEMS AUF DEM FORSCHUNGSSCHIFF "HEINCKE". AUF DEM BILD WOLFGANG SCHÖNFELD UND DR. RÜDIGER RÖTTGERS (VORN).
CONTROL ROOM FOR OPERATING THE SENSOR-SYSTEM ON BOARD THE RESEARCH VESSEL "HEINCKE" WITH WOLFGANG SCHÖNFELD AND DR. RÜDIGER RÖTTGERS (IN FRONT).

und die Konzentrationen von Phytoplankton und Schwebstoffen bestimmen kann. Dieses Auswerteverfahren ist seit dem Start im ESA Datenauswertezentrum in Frascati bei Rom in Betrieb und wird, wie alle Prozeduren, durch die Quality Working Group ständig überprüft und von GKSS optimiert.

Grundlage für die Analyse der Reflexionsspektren sind die Absorptions- und Streueigenschaften der im Wasser vorhandenen Substanzen. Da nur das sichtbare Licht genügend tief in das Wasser eindringt, wird hauptsächlich der Spektralbereich 400 – 700 nm für die Fernerkundung der Wasserinhaltsstoffe genutzt.

Allerdings tritt nur um die 1% der in das Wasser eindringenden Strahlung wieder aus dem Wasser heraus. An den Sensor werden daher extrem hohe Anforderungen bezüglich Empfindlichkeit und Signal/Rausch-Verhalten gestellt. Zudem muss der Weg durch die Atmosphäre genau berechnet werden, ebenso die von der Atmosphäre rückgestreute störende Strahlung, die in der Regel um ein Vielfaches größer ist als die vom Wasser reflektierte.

Im Küstenbereich bestimmt eine Vielzahl von Substanzen das rückgestreute Strahldichtespektrum. Aufgabe des Auswerteverfahrens ist es, umgekehrt aus dem Spektrum auf die optischen Komponenten zu schließen bzw. auf die Art und Konzentration von Substanzen. Hierfür werden im Falle von MERIS aus der Reflektanz von 9 spektralen Bändern im Bereich 412 – 708 nm drei Komponenten bestimmt: (1) Streuung durch alle Partikel im Wasser, (2) Absorption durch Phytoplankton-Pigmente, (3) Absorption durch hu-

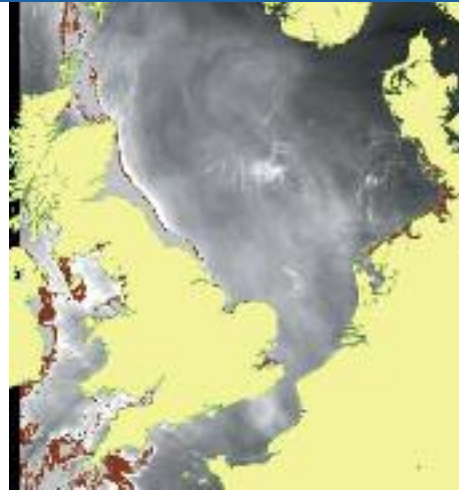
minartige Substanzen (Gelbstoffe). Grundlage hierfür sind Daten von vielen Messungen, die von GKSS und Partnern überwiegend in der Nordsee mit seiner breiten Palette an verschiedenartigen Substanzen durchgeführt wurden. Hierbei werden aufwendige optische SONDENSYSTEME eingesetzt und Wasserproben analysiert.

Um die quantitative Beziehung zwischen dem Reflexionsspektrum und diesen Komponenten zu finden, werden Spektren mit einem Strahlungstransportmodell simuliert. Hierbei wird der Weg der Sonnenstrahlung in das Wasser und zurück zum Sensor im Computer unter Berücksichtigung verschiedener Sonnen- und Beobachtungswinkel sowie verschiedener Gemische der Substanzen im Wasser nachgebildet. Aufgrund eines auf diese Weise berechneten Datensatzes von mehr als 20 000 Spektren wird ein neuronales Netz trainiert. Es empfängt auf der Eingangsseite die Reflektanzen in den 9 Spektralkanälen sowie die Beobachtungs- und Sonnenwinkel und liefert auf der Ausgangsseite die Streukoeffizienten der Partikel und die Absorptionskoeffizienten für Phytoplanktonpigmente und Huminstoffe, die anschließend in Konzentrationen umgerechnet werden.

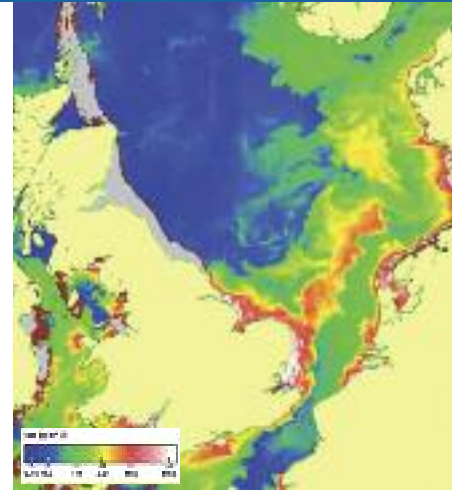
Das neuronale Netz besteht aus einer Vielzahl gleichartiger mathematischer Funktionen, den Neuronen, die miteinander vernetzt sind. Die Koeffizienten der Neuronen werden beim Training so eingestellt, dass das Netz am Ausgang passend zu den Reflexionsspektren die richtigen Streu- und Absorptionskoeffizienten liefert. Bei der Auswertung der Satellitendaten werden die von MERIS gelieferten Spektren Pixel für Pixel an das Netz geliefert und somit die Konzentrationen berechnet.



DIE NORDSEE AM 27.MÄRZ 2007 VON MERIS GESEHEN. THE NORTH SEA AT MARCH 27, 2007 AS SEEN BY MERIS.



DIE VON AERSOLEN HERVORGERUFENE STREUSTRALUNG ÜBER DER NORDSEE (MERIS 27.3.2007). PATH RADIANCE OF THE ATMOSPHERE OVER THE NORTH SEA, MARCH 27, 2007.



DIE AUS DEMSELBEN BILD BERECHNETE SCHWEBSTOFFKONZENTRATION (TROCKENGEWICHT GRAMM PRO KUBIKMETER WASSER). CONCENTRATION OF SUSPENDED MATTER IN GRAMS DRY WEIGHT PER CUBICMETER WATER FROM THE SAME IMAGE.

Zur Korrektur des Einflusses der Atmosphäre wurde von GKSS ebenfalls ein auf neuronalen Netzen basierendes Verfahren entwickelt, das den Einfluss unterschiedlicher Aerosole berücksichtigt sowie die an der Wasseroberfläche reflektierte Sonnen- und Himmelsstrahlung.

Mit einer weiteren Methode wird nach bisher unbekanntem Spektren in MERIS Daten gesucht. Sie geben Aufschluss über neue Phänomene, wie ungewöhnliche Planktonblüten, und zeigen, wie das Auswerteverfahren erweitert werden muss.

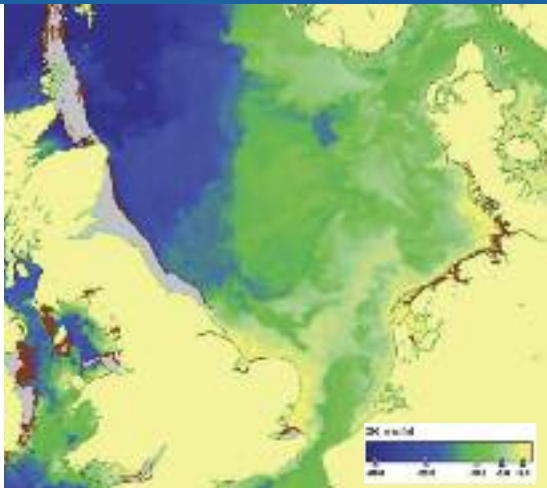
Welche Untersuchungen lassen sich mit den MERIS Daten vornehmen?

Für die Meeresökologie sowie die Fischerei ist das Auftreten von Phytoplankton im Laufe des Jahres von hoher Bedeutung, da es als Primärproduzent die gesamte Nahrungskette im Meer bestimmt. Ebenso wichtig zu wissen sind langfristige Änderungen der zeitlich-räumlichen Verteilung. Betrachtet man während der Frühjahrsblüte die monatlichen Mittelwerte von Verteilungsmustern sind die hohen Konzentrationen im flachen Südtteil der Nordsee auffällig, da hier günstige Lichtbedingungen - aufgrund der geringen Wassertiefe - sowie der hohe Nährstoffgehalt ein ständiges Planktonwachstum ermöglichen. Dagegen zeigen die Daten der tiefen nördlichen Nordsee die typische Abfolge: Planktonblüte im Frühjahr, Minimum im Sommer aufgrund von Nährstoffmangel und Fraß durch Zooplankton, erhöhte Konzentration im Herbst aufgrund der Zufuhr von Nährstoffen, die aus der Tiefe nach der Auflösung der thermischen Schichtung an die durchleuchtete Oberfläche gelangen. In der Norwegische Rinne und im Skagerrak verursacht das aus der Ostsee strömende salzarme Wasser eine Salzgehaltsschichtung. Somit kann das Plankton hier bereits wachsen, wenn in anderen Gebieten der Nordsee aufgrund der totalen Durchmischung Lichtmangel herrscht.

Eine wichtige Anwendung ist die Erkennung außergewöhnlicher Phytoplanktonblüten, wie z.B. Red Tides. Sie werden von rot pigmentierten Algen gebildet, die bei einem Massenvorkommen das Wasser entsprechend rot verfärben. Einige dieser Arten können für andere Meeresorganismen gefährlich sein und in Aquakulturen großen Schaden anrichten. Sie werden dann als HAB bezeichnet (harmful algal blooms). Zu den Algen, die gesundheitliche Schäden verursachen können, gehören die Cyanobakterien, die in der Ostsee während der Sommermonate in hohen Konzentrationen vorkommen und im Satellitenbild spektakuläre Verteilungsmuster bilden.

Ein weiteres Interesse besteht an Informationen über die Verteilung und Ausbreitung von Schwebstoffen. Hierunter werden alle Partikel - einschließlich des Phytoplanktons - zusammengefasst, die größer als ein halber Mikrometer sind. In der Nordsee liegt die mittlere Konzentration um 1 g Trockengewicht pro Kubikmeter Wasser. In Küstenbereich, wie in der Elbmündung, kann sie über 50 g m⁻³ erreichen und in Extremfällen, wie z.B. dem Mündungsgebiet des Yangtse Flusses in China mehrere Kilogramm pro Kubikmeter. Schwebstoffe sind ein Gemisch aus feinst zerriebenen Tonmineralien, organischer Substanz aus abgestorbenen Organismen, Phytoplankton und anderen Mikroben. Sie bilden meist Flocken, die wiederum Substrat für eine Vielzahl von Kleinstlebewesen sind, die zur bio-chemischen Umsetzung der Substanzen beitragen.

Schwebstoffe sind das Material, das aufgrund seiner Schwebfähigkeit über weite Strecken im Meer transportiert wird und damit die Verlagerung von Materie aus Erosionsgebieten zu fernen Senken bewirkt wie auch den Ferntransport und die Ablagerung von Material, das von Organismen gebildet wurde. Hierzu gehören Schwebstoffe, die von den Flüssen ins Meer eingebracht werden und Stäube, die über den Wind das Meer erreichen und es darüber mit Nähr- und Spurenstoffen wie Eisen versorgen. Viele z.T. toxisch



DIE AUS DEM BILD VOM 27.3.2007 BERECHNETE EINDRINGTIEFE DES LICHTES IN METERN. PENETRATION DEPTH OF LIGHT IN METER FOR THE SAME IMAGE OF MARCH 27, 2007.



COCCOLITHOPHORIDEN BLÜTE IM SKAGERRAK, EINER ALGENART MIT KALKPLÄTTCHEN. COCCOLITHOPHORIDE BLOOM IN THE SKAGERRAK, AN ALGAL SPECIES WHICH FORM CALCIUM CARBONATE PLATES

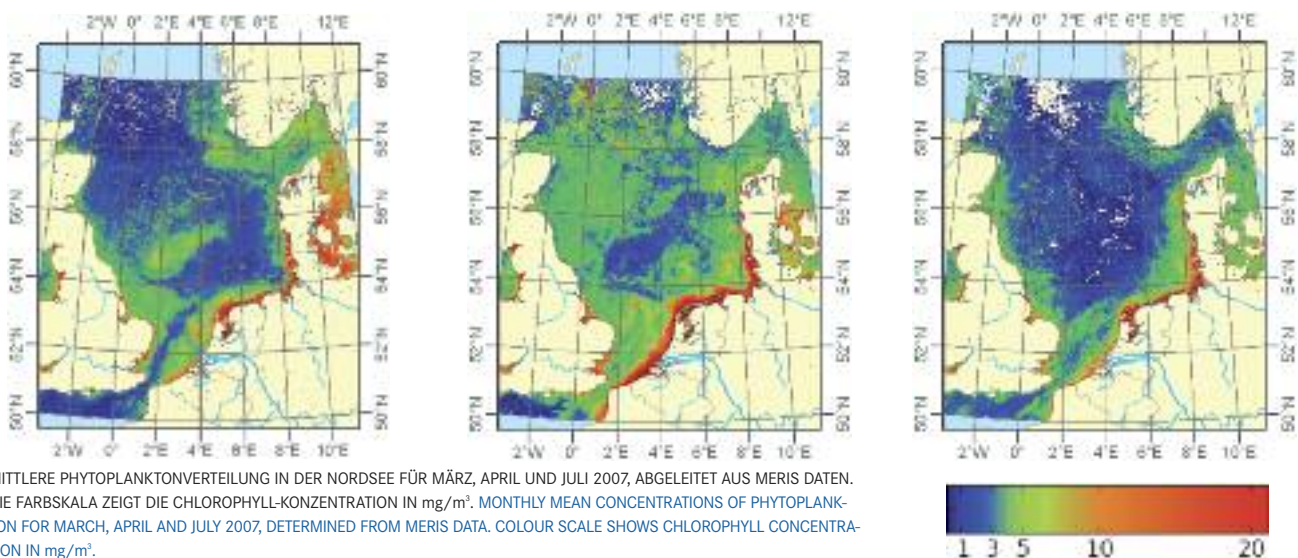
wirkende organische und anorganische Spurenstoffe werden durch Schwebstoffe gebunden, mit ihnen transportiert und durch Sedimentation aus dem Wasserkörper entfernt. Da Schwebstoffe einen großen Teil der Sonnenstrahlung absorbieren oder wieder zurückstreuen, dringt weniger Licht in das Wasser. Folge ist eine geringere Primärproduktion durch das Phytoplankton oder - im Flachwasser - durch am Boden sitzende Algen und Seegras. Dies zieht wiederum eine geringere Sauerstoffbildung durch diese Pflanzen nach sich bei gleichzeitigem höherem Sauerstoffverbrauch durch die biochemischen Umsetzungen am Schwebstoff. Beide Effekte zusammen können daher zu Sauerstoffmangel führen.

Die dritte stoffliche Komponente, die sich aus MERIS Daten ableiten lässt, sind huminartige Kohlenstoffverbindungen, die unter der Bezeichnung Gelbstoffe meist durch Flüsse eingetragen werden. Sie entstehen bei dem Zerfall von Organismen oder aus ihren Ausscheidungsprodukten. Besonders auffällig sind sie in Flüssen oder im Moorwasser aufgrund der Braunfärbung des Wassers. Diese Braunfärbung,

die vom Satelliten gemessen werden kann, rührt von der hohen Absorption von Licht im blauen Spektralbereich her. Gelbstoffe stellen ein erhebliches Kohlenstoffreservoir im Meer dar. Eine für den Stoffkreislauf wichtige Eigenschaft ist ihre Fähigkeit Spurenstoffe, vor allem Schwermetalle, komplex zu binden und damit ihre toxische Wirkung auf Meeresorganismen zu mildern.

Welche Bedeutung haben die Satellitendaten für die Küstenforschung und das Monitoring von Küstengewässern?

Satelliten wie ENVISAT überfliegen die Nordsee in ca. 2 Minuten. Dabei entstehen Karten mit einer hohen räumlichen Auflösung, bei MERIS von 300 Metern. Dies kann durch keine andere Beobachtungstechnik erreicht werden. MERIS nimmt bei einer Streifenbreite von ca. 1200 km die gesamte Erde in 3 Tagen auf. Somit lassen sich z.B. auch räumlich-zeitliche Entwicklungen des Plankton oder die Ausbreitung von Schwebstoffen beobachten.



MITTLERE PHYTOPLANKTONVERTEILUNG IN DER NORDSEE FÜR MÄRZ, APRIL UND JULI 2007, ABGELEITET AUS MERIS DATEN. DIE FARBSKALA ZEIGT DIE CHLOROPHYLL-KONZENTRATION IN mg/m³. MONTHLY MEAN CONCENTRATIONS OF PHYTOPLANKTON FOR MARCH, APRIL AND JULY 2007, DETERMINED FROM MERIS DATA. COLOUR SCALE SHOWS CHLOROPHYLL CONCENTRATION IN mg/m³.



KERSTIN HEYMANN BEI DER FILTRATION DER WASSERPROBEN UM SPÄTER DIE ZUSAMMENSETZUNG UND ABSORPTIONSSPEKTREN DER PIGMENTE DES PHYTOPLANKTONS ZU BESTIMMEN. KERSTIN HYMANN IS FILTERING THE WATER SAMPLES FOR FURTHER ANALYSIS OF THE PIGMENTS AND THEIR ABSORPTION SPECTRA.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist es, das Fernfeld zu ermitteln, da beim Monitoring vom Schiff in der Regel nur ein eng begrenztes Gebiet, wie die Deutsche Bucht, aufgenommen wird. Mit Satellitendaten kann z.B. die Verdriftung einer gefährlichen Planktonblüte in der Nordsee verfolgt werden, die durch lokale Beobachtungen nicht erfasst wird. Satellitendaten haben aber auch ihre Grenzen: Bei den optischen Sensoren müssen in bewölkten Gebieten Daten oft über eine Woche oder mehr gesammelt werden, um einen Überblick zu bekommen. Ferner lässt sich nur die oberflächennahe Schicht erfassen. In der Nordsee erhält man Informationen aus einer Tiefe von meist 5 - 10 Metern und auch nur über eine eng begrenzte Anzahl von Variablen. Es ist daher notwendig, weitere Messdaten von anderen Satellitenmessgeräten oder Schiffen und Bojen heranzuziehen.

Zur Verknüpfung verschiedener Daten werden Modelle eingesetzt, die auch die Beobachtungslücken ausfüllen. Im Institut für Küstenforschung werden z.B. die Daten von MERIS mit den Daten des Ferrybox Systems verbunden. Die Ferrybox ist ein automatischer Messcontainer, der auf Fäh- oder Frachtlinienschiffen eingesetzt wird, die regelmäßig die Nordsee durchqueren. Ebenso werden die aus MERIS Daten abgeleiteten Schwebstoffkonzentrationen mit einem Schwebstofftransportmodell verknüpft.

Dr. Roland Doerffer
roland.doerffer@gkss.de

The colour of the coastal sea

Since centuries, if not more, the colour of the ocean has been an important information source. It indicates areas of high fish abundance and was used as a navigation aid. Since about a hundred years the optical properties of the ocean, such as the penetration depth of light, is also of interest to oceanographers. Light plays a key role for all life in the sea, because it is the energy which lets the phytoplankton grow, microscopic small algae, from which all life in the sea up to the whales depends on. Today the colour of the sea, i.e. the spectral reflectance of sun light, is measured from satellites to study the dynamics of the global phytoplankton development, the associated flux of carbon and to monitor the quality of coastal waters. The Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS on the European satellite ENVISAT is particularly dedicated to coastal waters. A GKSS team was and is involved in its development and operation. Task for the GKSS scientists was the development of procedures to determine optical properties and the concentrations of substances in coastal waters. The procedures are based on artificial neural networks for which a large dataset of optical measurements and radiative transfer simulations were used. MERIS data are now utilized to study the temporal-spatial patterns of phytoplankton and to improve suspended matter transport models by data assimilation.