

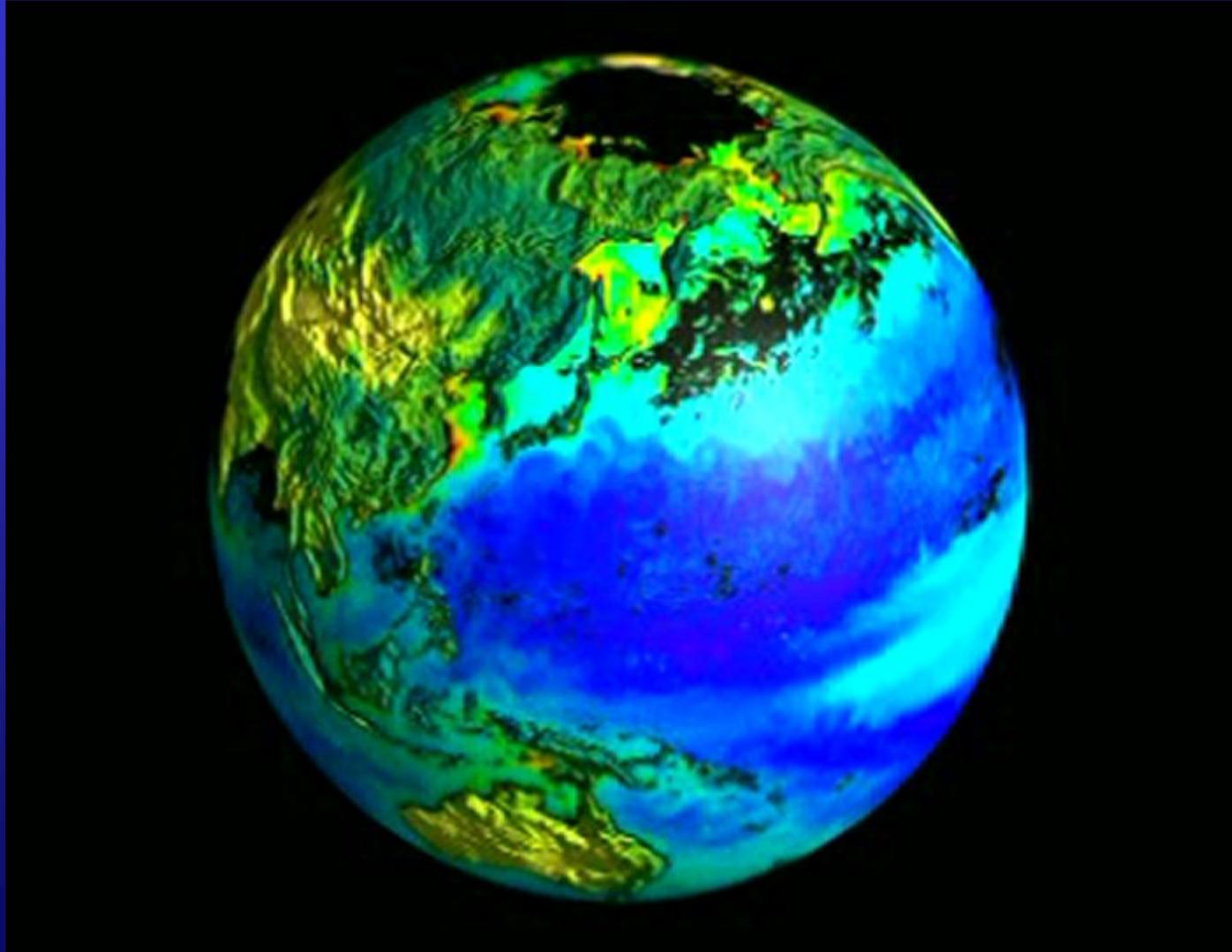
Ableitung von Wasserinhaltsstoffen und Aerosolen im Optischen Spektralbereich

(Ocean Colour Remote Sensing)

Dr. Andreas Neumann
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Methodik der Fernerkundung

mit Beiträgen von H. Krawczyk, P. Gege, S. Thiemann, K. Ebert

1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele



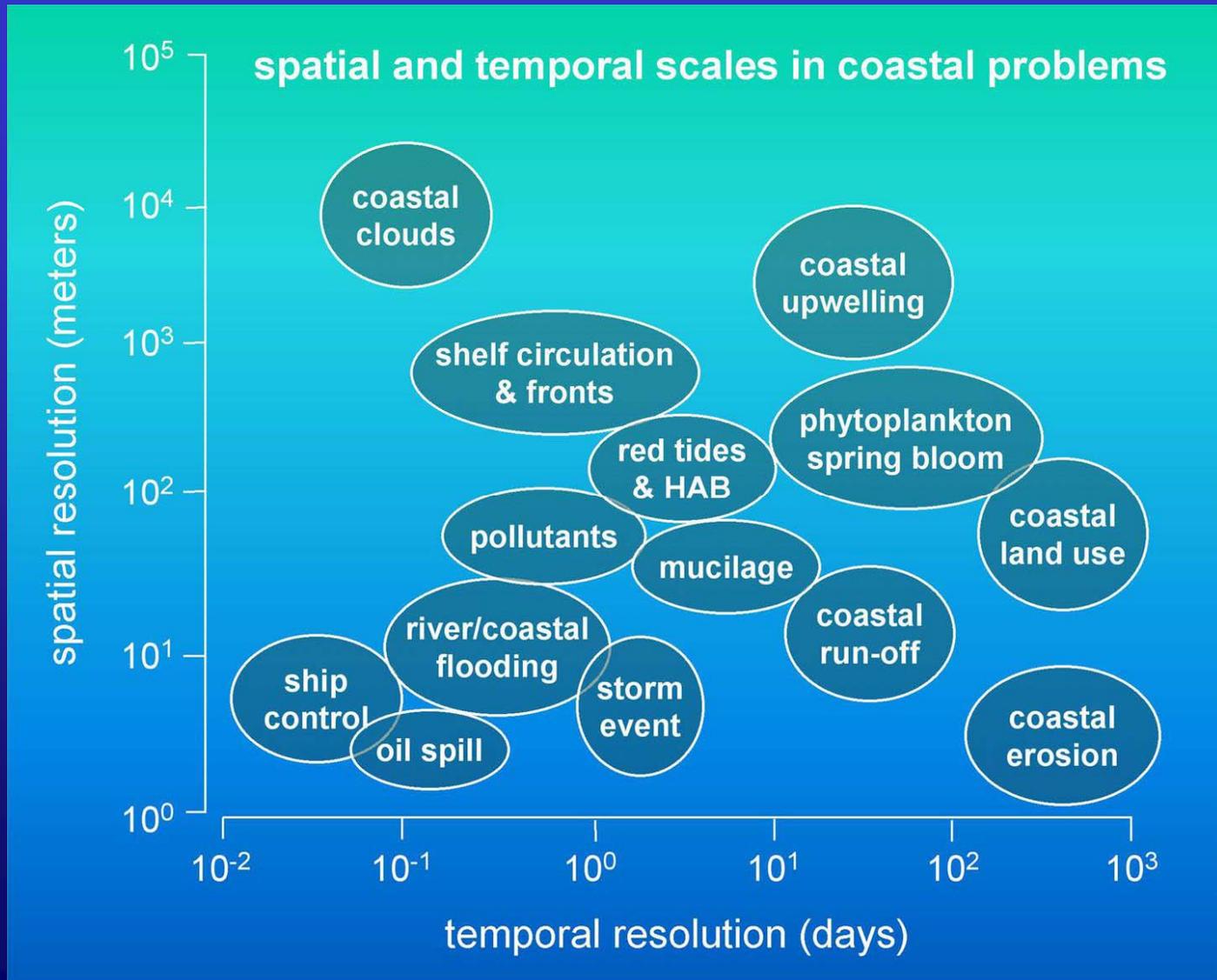
- Die **Ozeane** sind das größte Ökosystem der Erde
- wirken entscheidend in den globalen Kreisläufen (H_2O , CO_2 , Temperatur)
- **Küstenzonen:**
 - ▶ am dichtesten besiedelter Lebensraum, ca. 70% der Weltbevölkerung leben in Küstenzonen
 - ▶ Hauptteil der menschlichen Aktivitäten und damit der antropogenen Umweltbeeinflussung erfolgt in Shelf- und Küstengebieten
 - ▶ essentiell für die Wirtschaft: Fischfang, Bodenschätze, Verkehr, Windenergie, Tourismus, ...
 - ▶ höchste Bioproduktivität, essentiell für marine Biodiversität
 - ▶ „Schnittstelle“ für Stoffflüsse
 - ▶ quantitative Bedeutung für globale Kreisläufe vielfach noch nicht verstanden

Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?

| Was? | Warum? | Wie? |
|---------------------------|---|--------------------------|
| Temperatur | <ul style="list-style-type: none">• Einfluss auf das Klima (global)• Einfluss auf das Wetter (regional)• Wesentlicher Faktor für biologisches Wachstum | Infrarot-Sensoren |
| Wind | <ul style="list-style-type: none">• Wesentlicher Antrieb für Prozesse wie z.B.<ul style="list-style-type: none">- Wellen und Seegang- Durchmischung von Wasserschichten- Strömungen- Stofftransport• Gefahrenquelle für die Schifffahrt | Radar-Sensoren |
| Seegang und Wellen | <ul style="list-style-type: none">• Durchmischung von Wasserschichten• Stofftransport• Gefahrenquelle für die Schifffahrt | Radar-Sensoren |

| Was? | Warum? | Wie? |
|--|--|------------------------------------|
| Phytoplankton | <ul style="list-style-type: none">• Beginn der marinen Nahrungskette, Grundlage für Fischwachstum• Indikator für biologischen und ökologischen Zustand• Quelle und Senke für Kohlendioxid• Gefährliche (toxische) Algenblüten | Optische Sensoren |
| Schwebstoffe und gelöste Substanzen | <ul style="list-style-type: none">• Sedimentation• Schadstofftransport• ökologischer Zustand | Optische Sensoren |
| Eisbedeckung | <ul style="list-style-type: none">• Einfluss auf Klima und Wetter• Indikator für Klima-Veränderungen• Gefahrenquelle für die Schifffahrt | Optische und Radar-Sensoren |
| Aerosole | <ul style="list-style-type: none">• Strahlungsbilanz• Aerosole/Luftverschmutzung• Störfaktor für die Fernerkundung | Optische Sensoren |

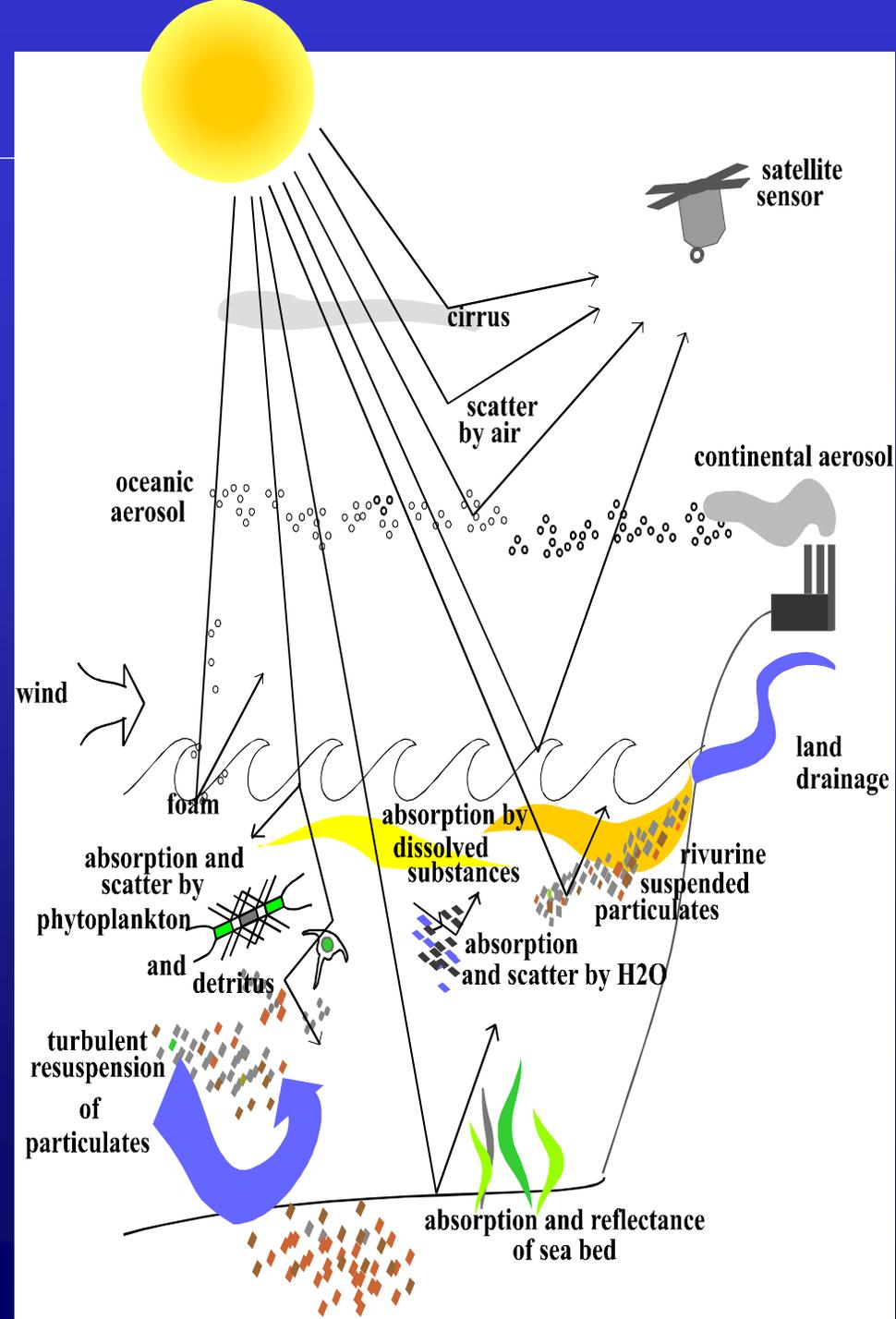
Einführung - Warum Fernerkundung?



1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele

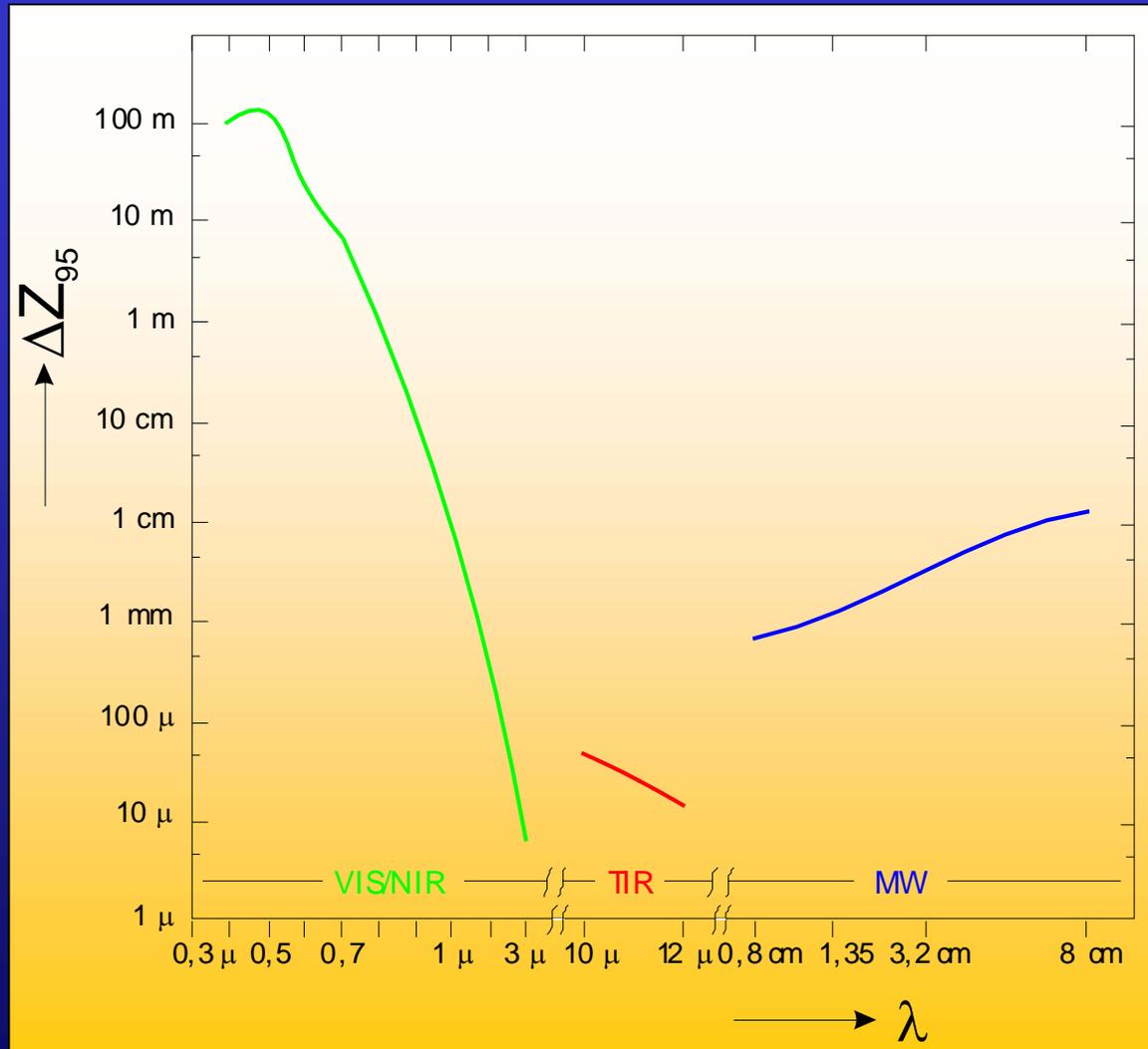
Welche Effekte „sehen“ wir, d.h. können wir für die Fernerkundung benutzen?

- Thermische Strahlung der Wasseroberfläche
- Strukturen (Rauhigkeit, Wellen) an der Wasseroberfläche
- Lichtreflexionen an der Wasseroberfläche
- Wasserfarbe auf Grund von Streuung und Absorption des Lichtes im Wasser und durch Wasserinhaltsstoffe
- Lichtstreuung an Teilchen in der Atmosphäre (Luftverschmutzung)



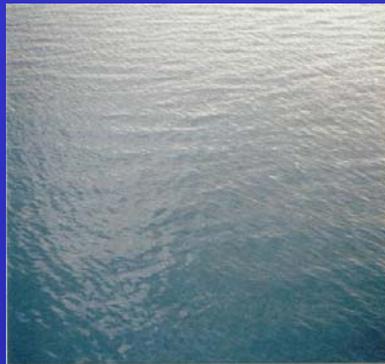
- Wir brauchen Wechselwirkung mit dem Wasserkörper, d.h. die Strahlung muß eindringen und wieder remittiert werden
- Sonne als natürliche Strahlungsquelle
- drei Gruppen von fernerkundbaren Wasserinhaltsstoffen:
 - ▶ **Phytoplankton:** lebende Organismen
 - ▶ **Schwebstoffe:** suspendierte anorganische Stoffe (Mineralien) und/oder totes organisches Material (Detritus)
 - ▶ **Gelbstoff:** gelöste organische Substanzen (Fulvosäuren, Huminstoffe)
- Reflexionen an OF sind Störterme \Rightarrow Konsequenzen für die Auswahl der Beobachtungsgeometrien
- Weiterer Störterm: von Molekülen und Teilchen in der Atmosphäre rückgestreutes Licht \Rightarrow Atmosphärenkorrektur

Grundlagen - Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in Wasser



Schichtdicke ΔZ_{95} , aus der 95% der remittierten Strahlung des klaren Ozeans stammen

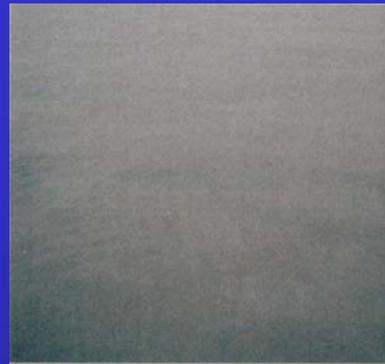
(MONIN '83)



3. TAG Le Havre, Canal Bossière, Hafenwasser



12. TAG New York City, Red Hook Terminal, Hafenwasser



13. TAG Norfolk International Terminal, Hafenwasser



17. TAG Karibik, 21°00'N, 74°16'W



25. TAG Pazifik, 5°34'S, 115°16'W



32. TAG Pazifik, 20°24'S, 153°31'W

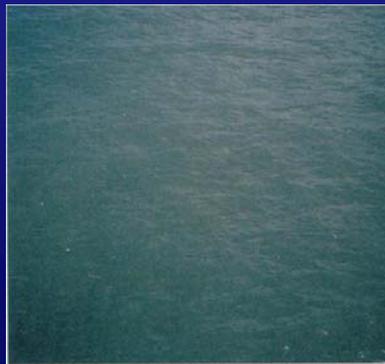


33. TAG Pazifik, 24°59'S, 160°21'W



37. TAG Auckland, Neuseeland, Hafenwasser

Daher: „Ocean Colour“



45. TAG Brisbane, Australien, Fisherman Island, Hafenwasser



64. TAG Indischer Ozean, 5°50'N, 83°02'O, Indikwasser



72. TAG Rotes Meer, 22°54'N, 37°09'O



86. TAG Tilbury, Großbritannien, Themse, Flusswasser

Absorption

$$a(\lambda) = a_W(\lambda) + a_Y(\lambda_0) \cdot \exp\{-S \cdot (\lambda - \lambda_0)\} + C_P \cdot a_P^*(\lambda) + C_X \cdot a_X^*(\lambda)$$

- a_W : Absorption von Wasser
- a_Y : Absorption von Gelbstoff
- C_P : Konzentration von Phytoplankton
- a_P^* : Spezifische Absorption von Phytoplankton
- C_X : Konzentration von Schwebstoff
- a_X^* : Spezifische Absorption von Schwebstoff

Streuung

$$b_b(\lambda) = \frac{1}{2} b_W(\lambda) + C_P \cdot b_{b,P}^* + C_X \cdot b_{b,X}^*$$

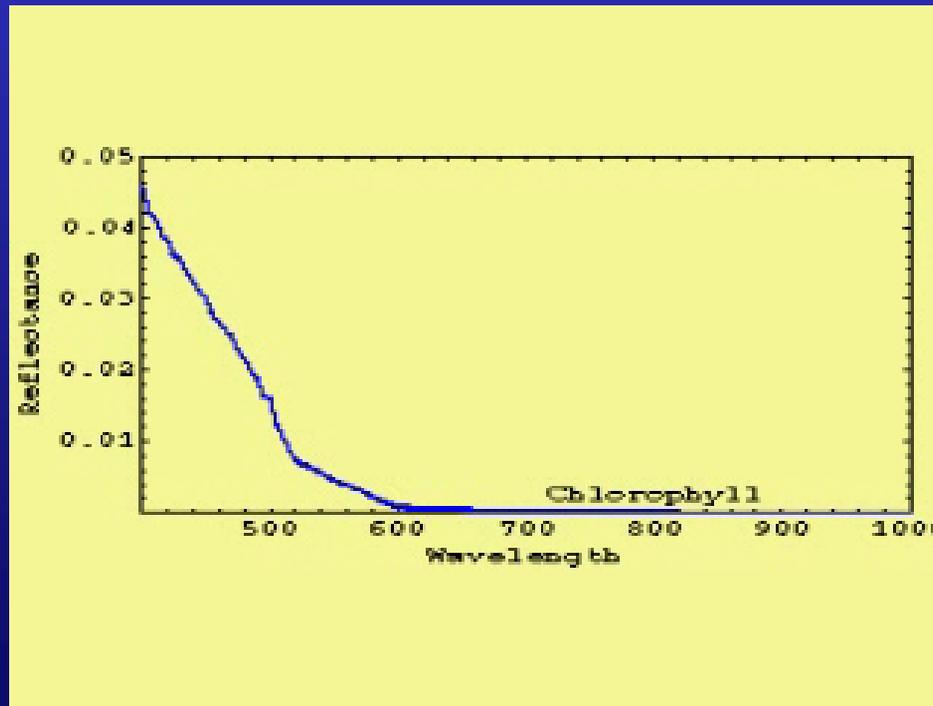
- b_W : Streuung von Wasser
- C_P : Konzentration von Phytoplankton
- $b_{b,P}^*$: Spezifischer Rückstreuoeffizient von Phytoplankton
- C_X : Konzentration von Schwebstoff
- $b_{b,X}^*$: Spezifischer Rückstreuoeffizient von Schwebstoff

Remittiertes Spektrum (Reflektanz)

$$R = \frac{E_u}{E_d} = f \cdot \frac{b_b}{(a + b_b)}$$

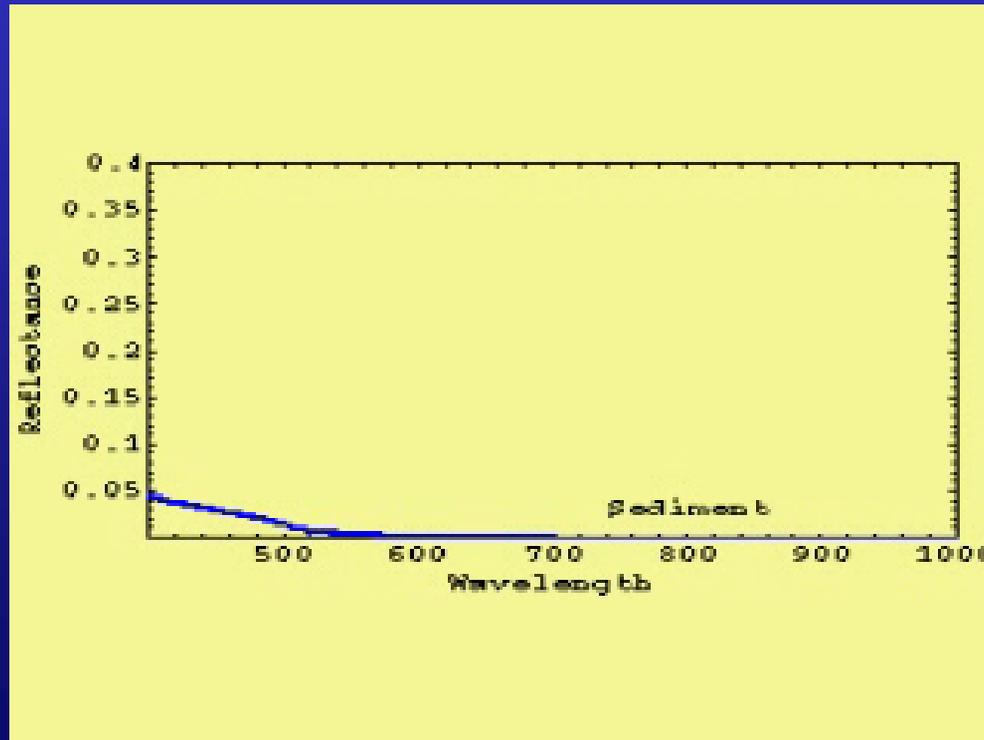
Chlorophyll:

| blau | grün | rot/NIR |
|------------|----------|---------------------------------------|
| Absorption | Streuung | Absorption Streuung Fluoreszenz |



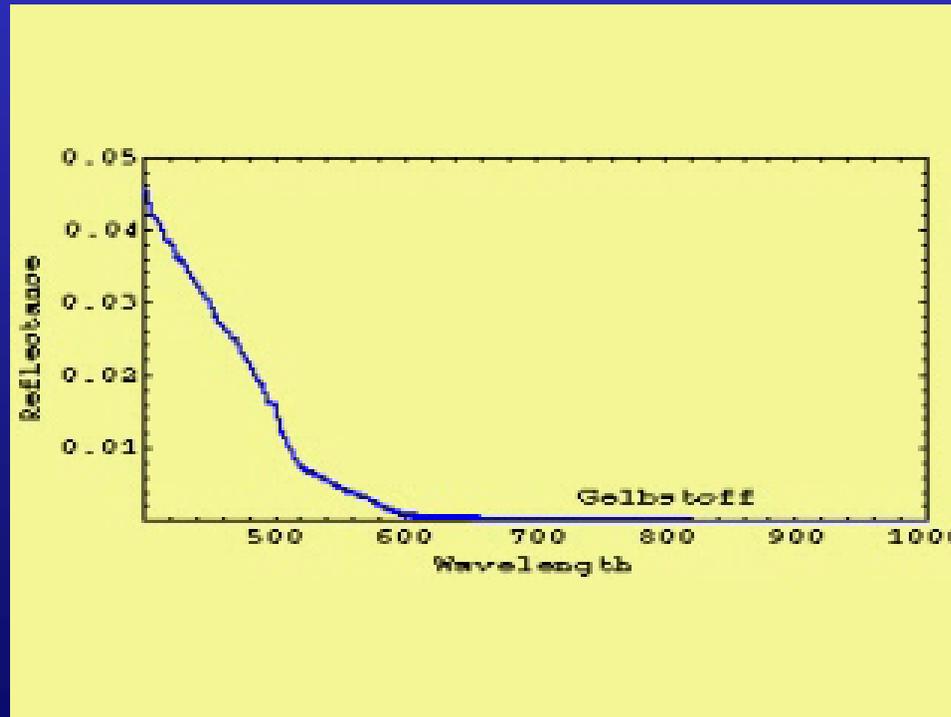
Sediment:

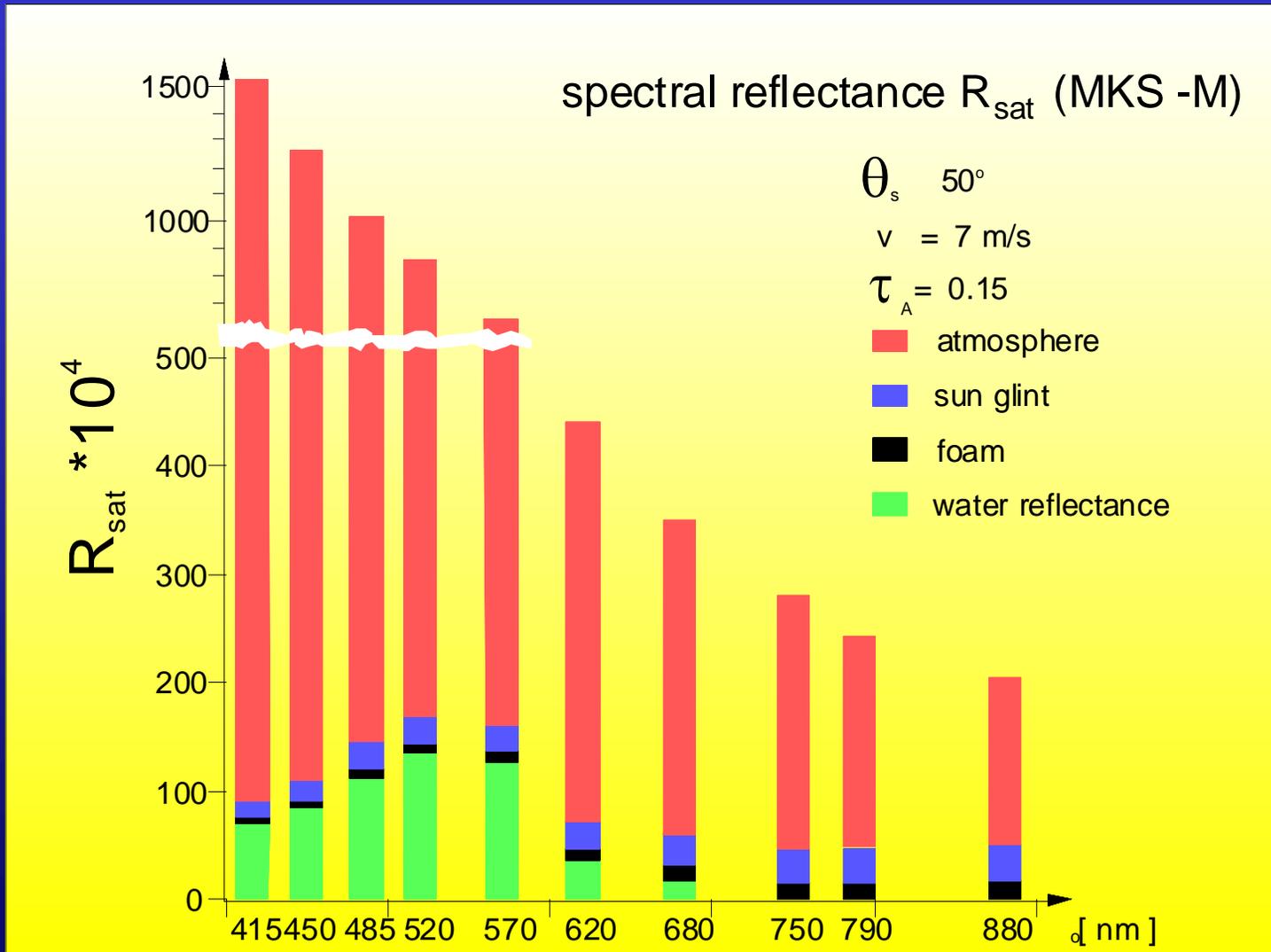
| | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| blau | grün | rot/NIR |
| Streuung | Streuung | Streuung |



Gelbstoff:

| blau | grün | rot/NIR |
|------------|------------|---------|
| Absorption | Absorption | -- |



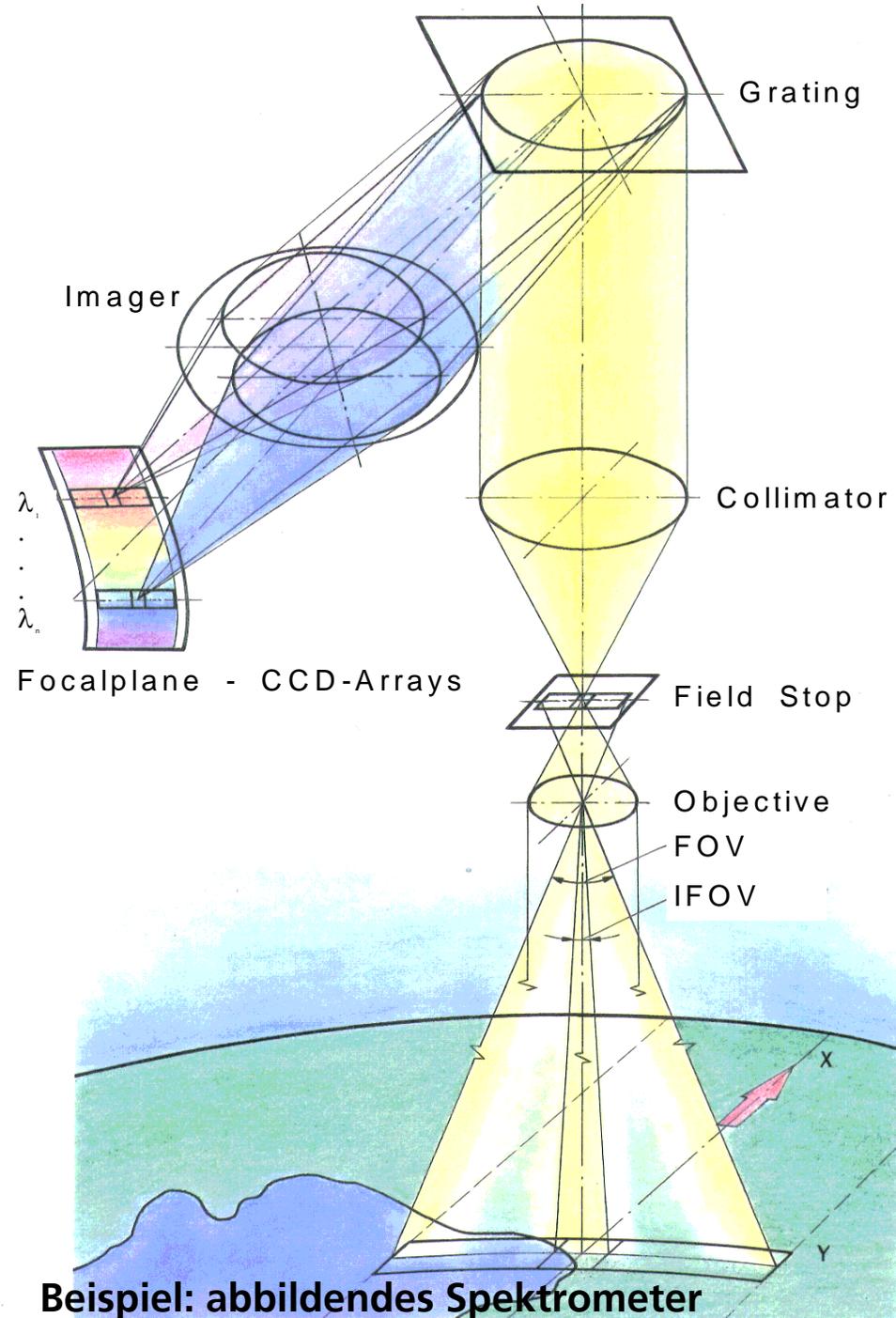


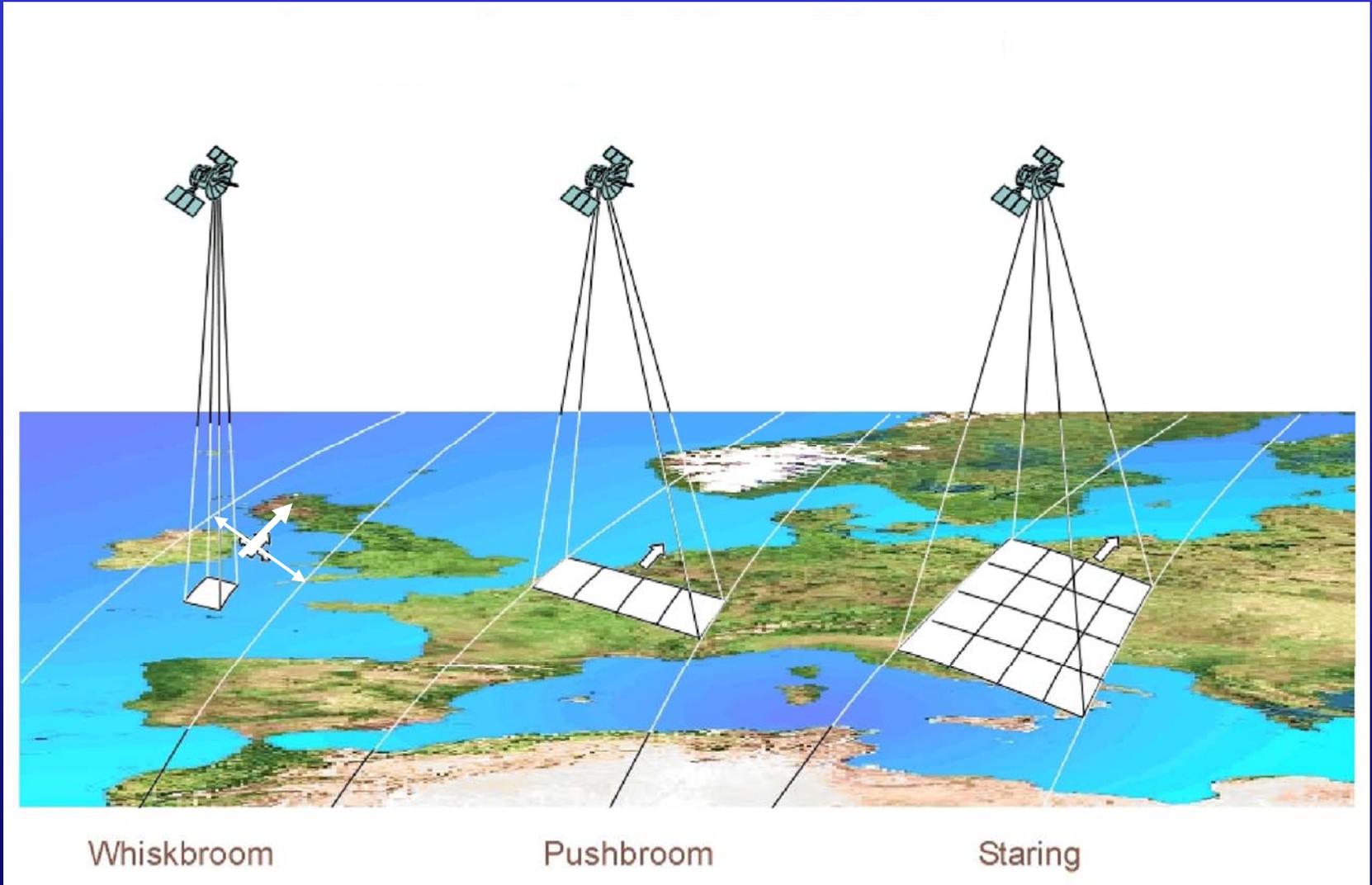
1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele

- **charakteristisch für Ozeane und speziell Küstenzonen: hohe zeitliche und räumliche Dynamik, Skalen von lokal bis global, daher:**
 - ▶ **mittlere bis grobe räumliche Auflösung (500m .. 4km)**
 - ▶ **große Schwadbreite (> 1500 km), hohe Wiederholrate (1 .. 2 Tage)**
 - ▶ **möglichst Schrägsicht (Tilt) um Glitter zu vermeiden**
 - ▶ **hohe spektrale Auflösung im VIS/NIR-Bereich (400 .. 1000nm)**
 - ▶ **radiometrisch absolut kalibriert**
 - **Speziell für Küstenzonen und Binnengewässer:**
 - ▶ **höhere räumliche Auflösung (<100m)**
 - ▶ **geringere Schwadbreite, Tilt für notwendige Wiederholrate**
 - ▶ **höhere spektrale Auflösung im VIS/NIR/SWIR-Bereich (> 20 Kanäle 400 .. 2500nm)**
- ⇒ **Radiometer und Spektrometer auf Satellit und Flugzeug, ergänzt durch Messungen am Boden**

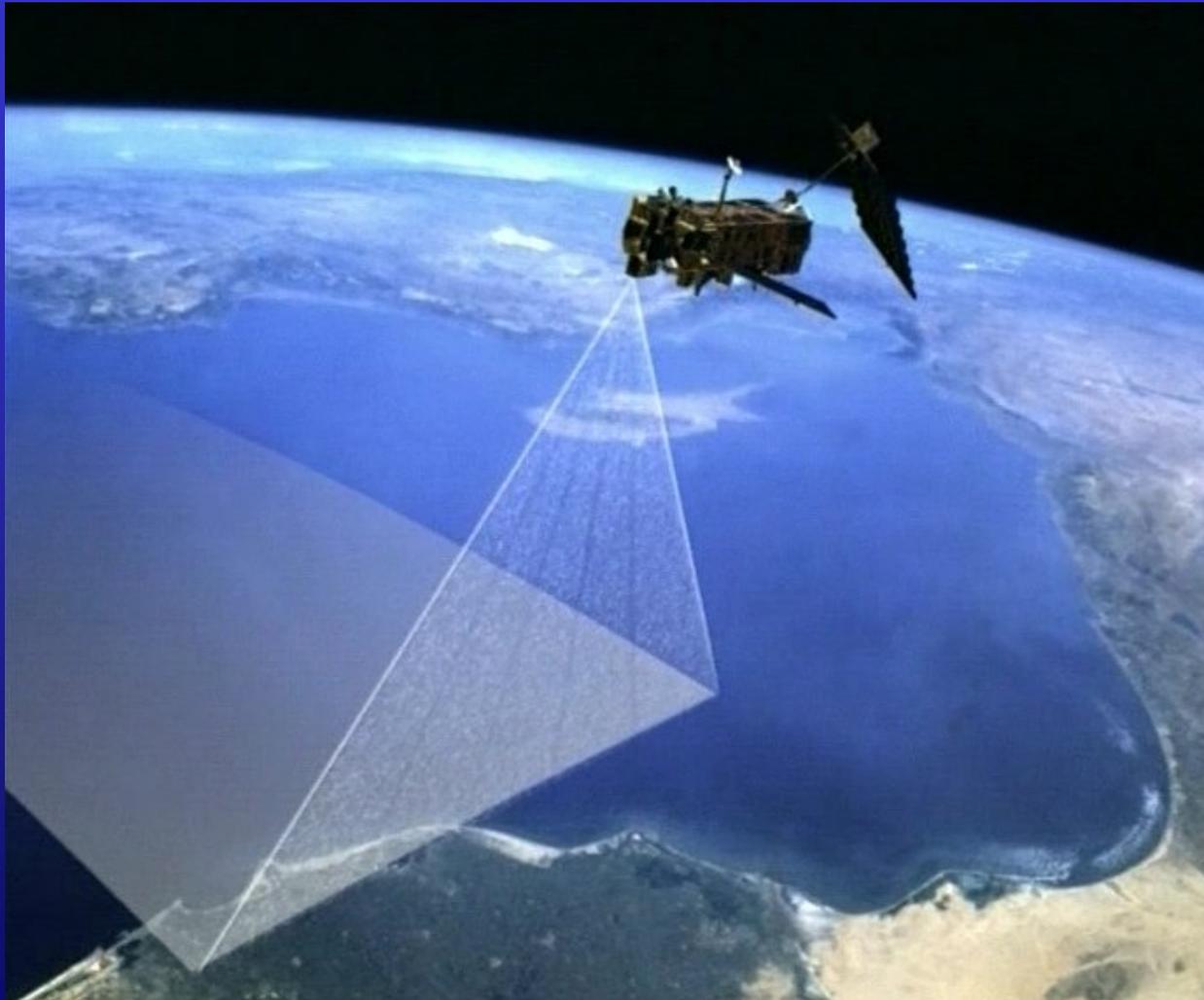
Grundkomponenten eines Spektrometers/Radiometers:

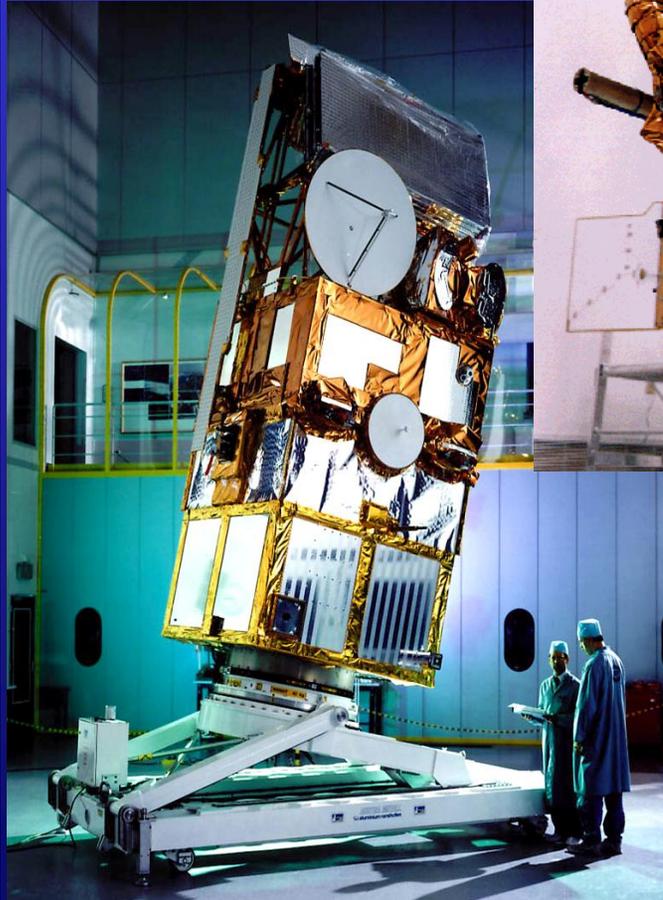
- Eingangsoptik (bei Scanner mit Scanspiegel)
- Eintrittsspalt
- Kollimator
- Polychromator (Gitter, Prisma)
- Abbildungsoptik
- Fokalebene (Einzel-, Zeilen- oder Flächendetektoren)





Wie wird die Erdoberfläche aufgenommen?





SeaWiFS (NASA/Orbital Sciences Corp.)



MODIS auf Terra und Aqua (NASA)

Europäischer Fernerkundungs-Satellit ERS-2 (ESA)

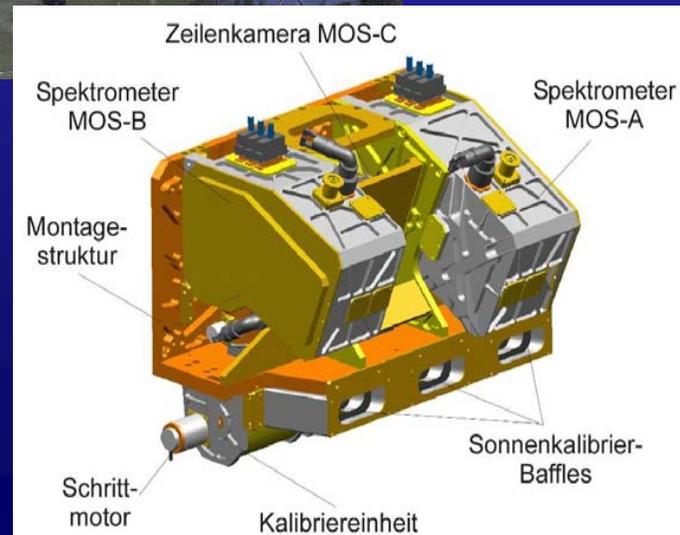
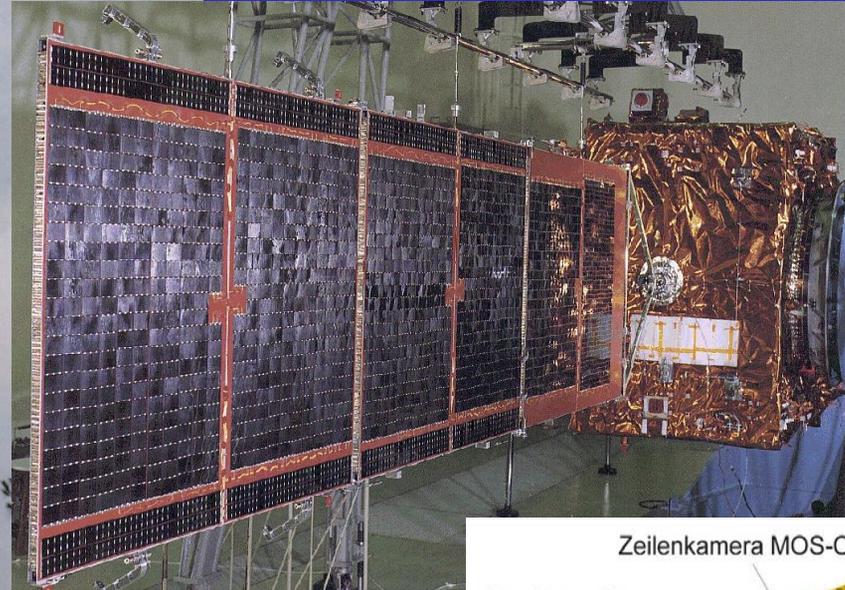
außerdem:

- NOAA (USA)
- IRS-P4 (Indien)
- RadarSat (Kanada)

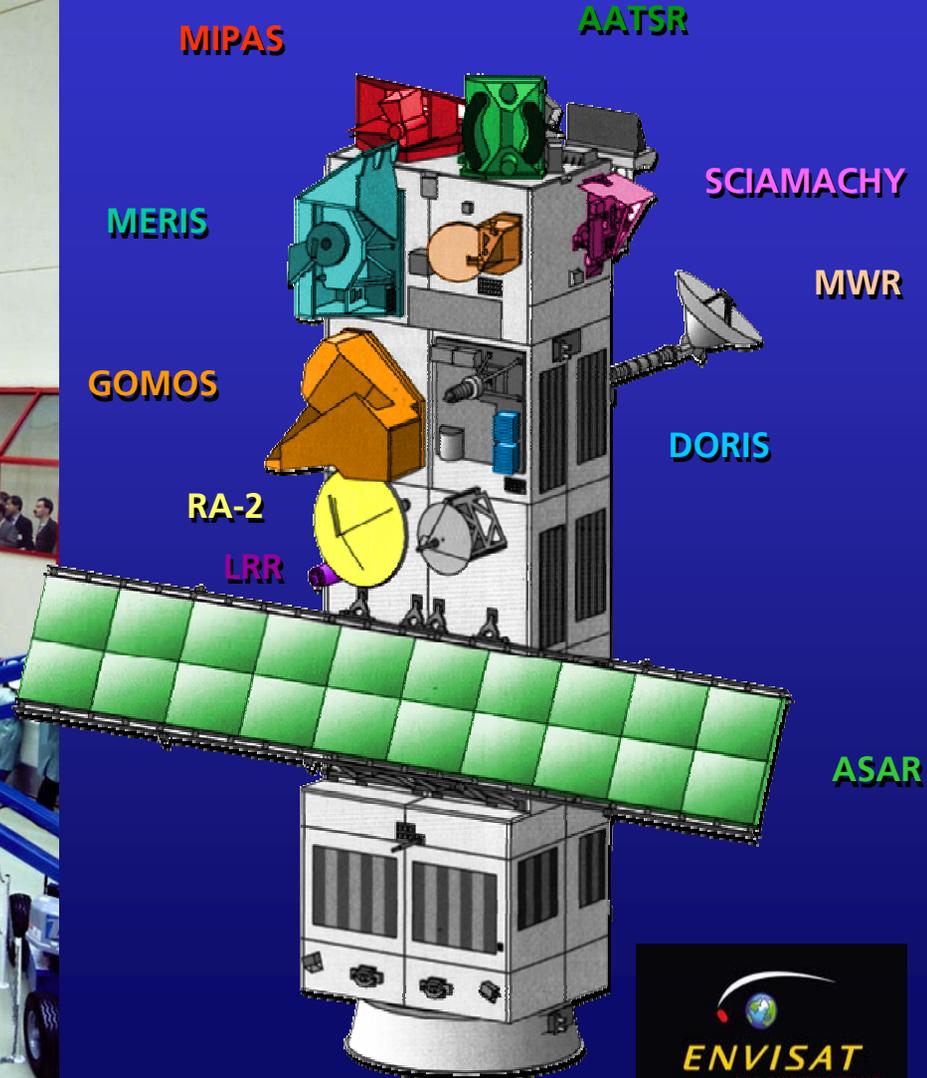
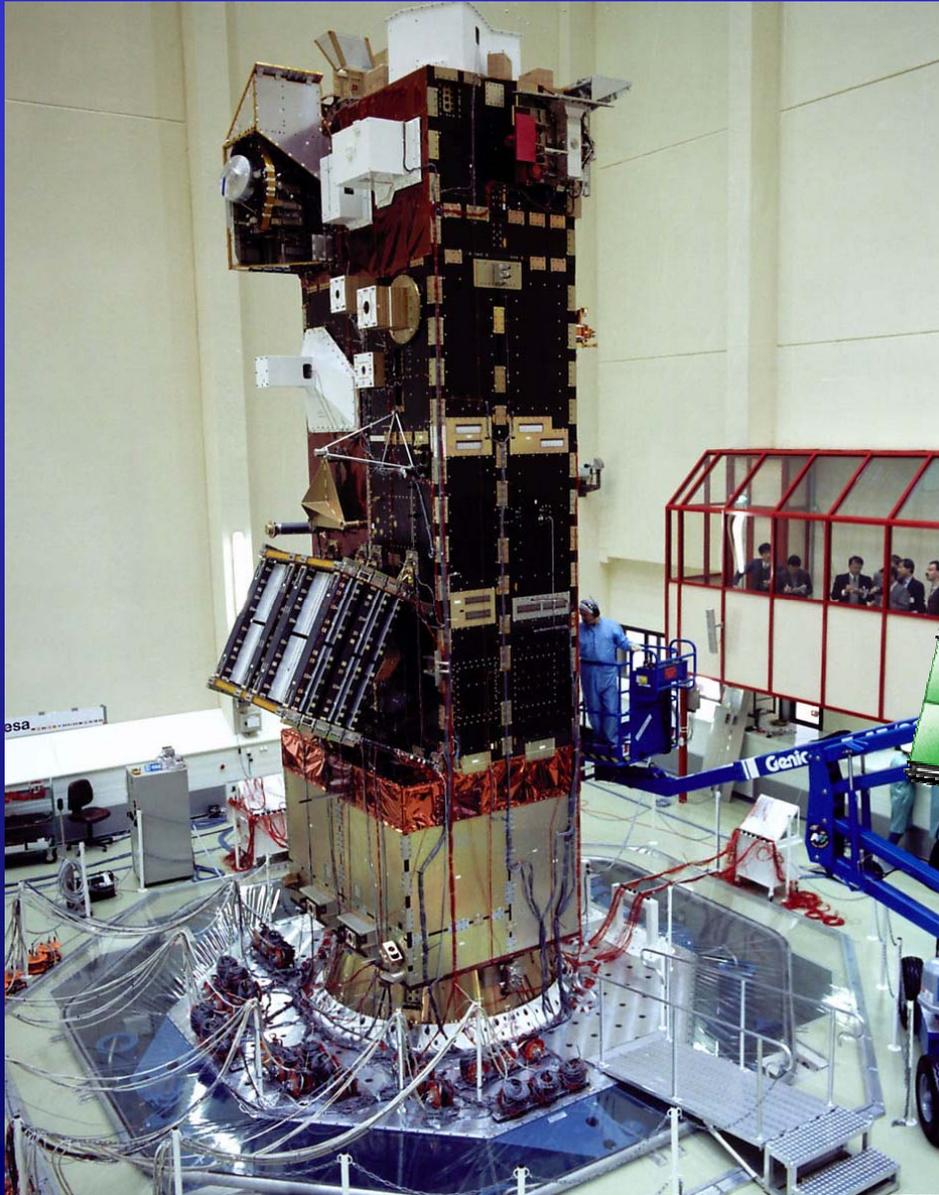
Technik - Abbildendes Spektrometer MOS

Start am 21. März 1996

Forschungsschwerpunkt:
Küstenzonen

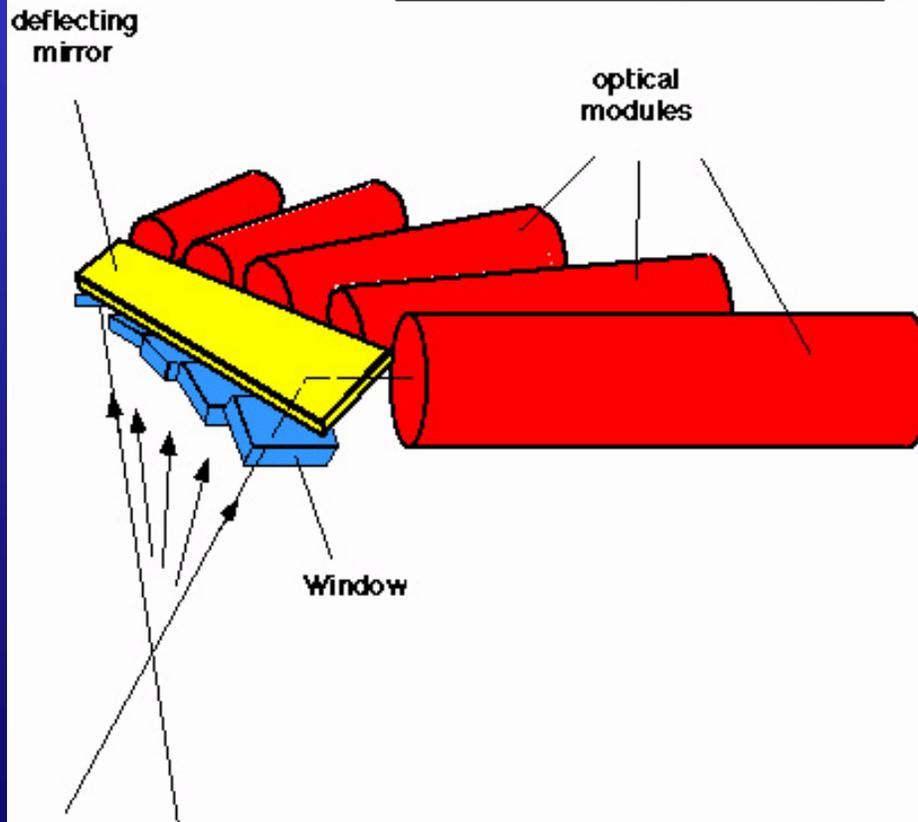


Technik - ESA Umweltsatellit ENVISAT



Instrument Concept

Modular Design Concept



Total FOV = 68.5°

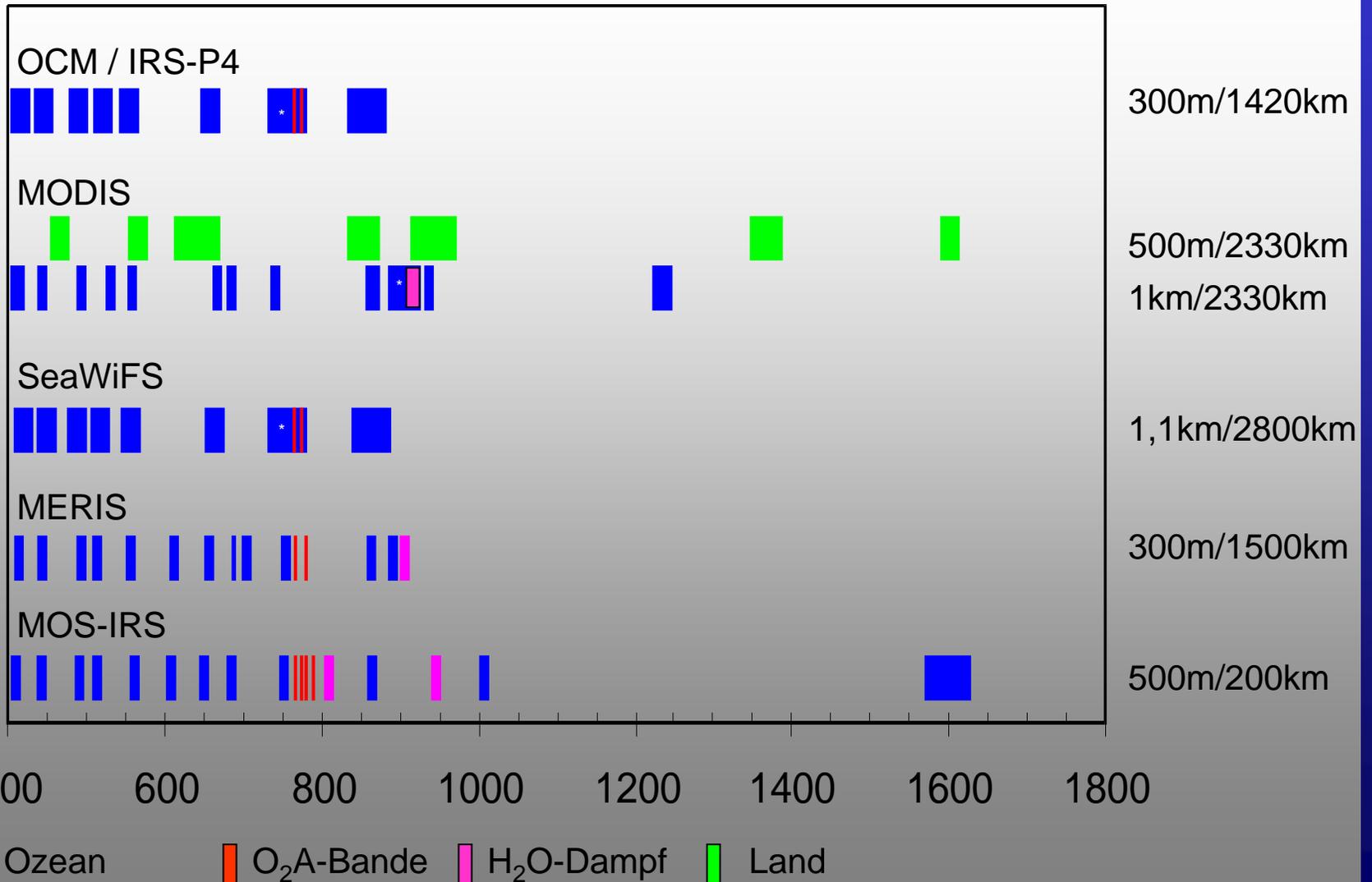
5 Modules

- 14° FOV
- Ground Imager
- Spectrometer

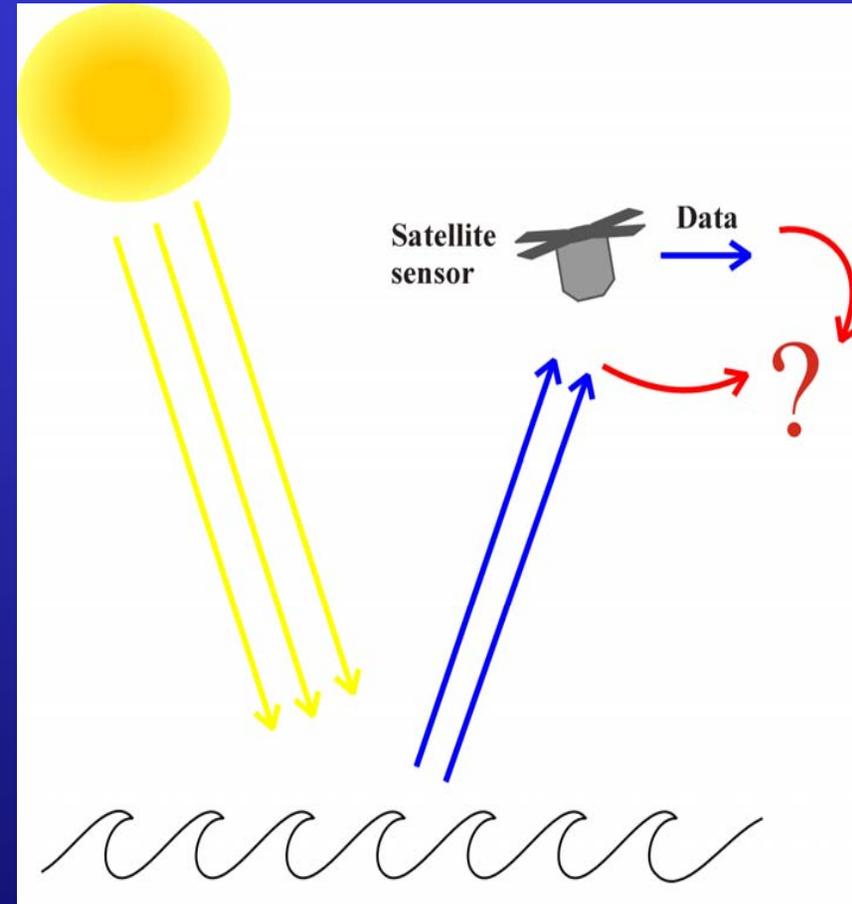
Deflecting Mirror

Polarisation Scrambling Window

Auflösung(Nadir)/
Schwad



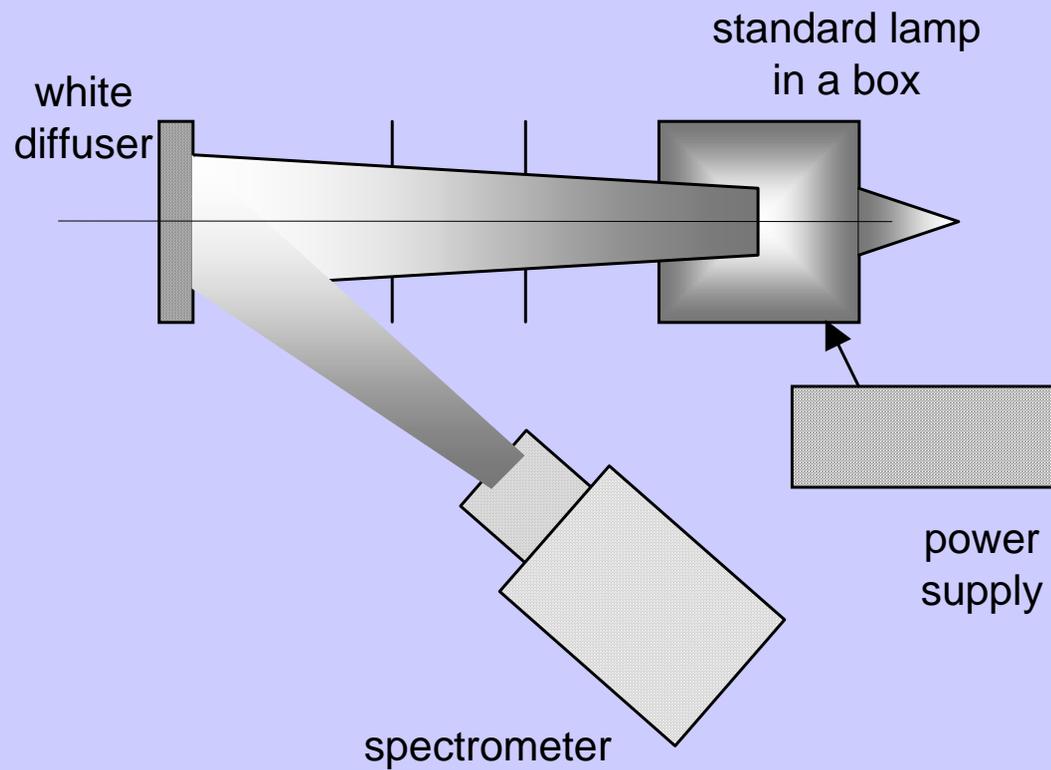
- **Kalibration: Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Sensorausgangssignal (Spannung, counts) und den absoluten physikalischen Größen (Strahlung) am Sensoreingang, d.h. der kompletten Übertragungsfunktion**
- **Bestimmung der spektralen, radiometrischen und räumlichen Sensorcharakteristika**
- **entscheidende Voraussetzung für die Nutzung der Daten in quantitativen Auswerteverfahren**



Parameter: Apparatfunktion, Halbwertsbreite, Dunkelsignal, ~variation, Empfindlichkeit, Dynamikbereich, radiometrische Auflösung, SNR, Linearität, Homogenität, Polarisationsempfindlichkeit, ...

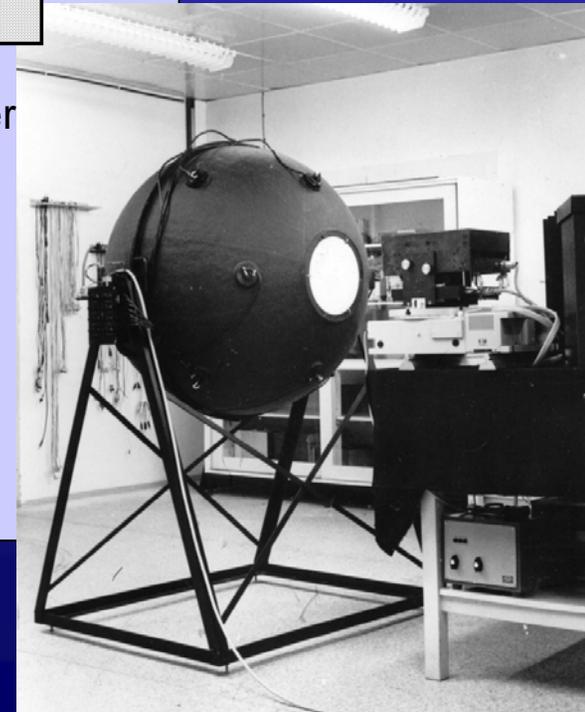
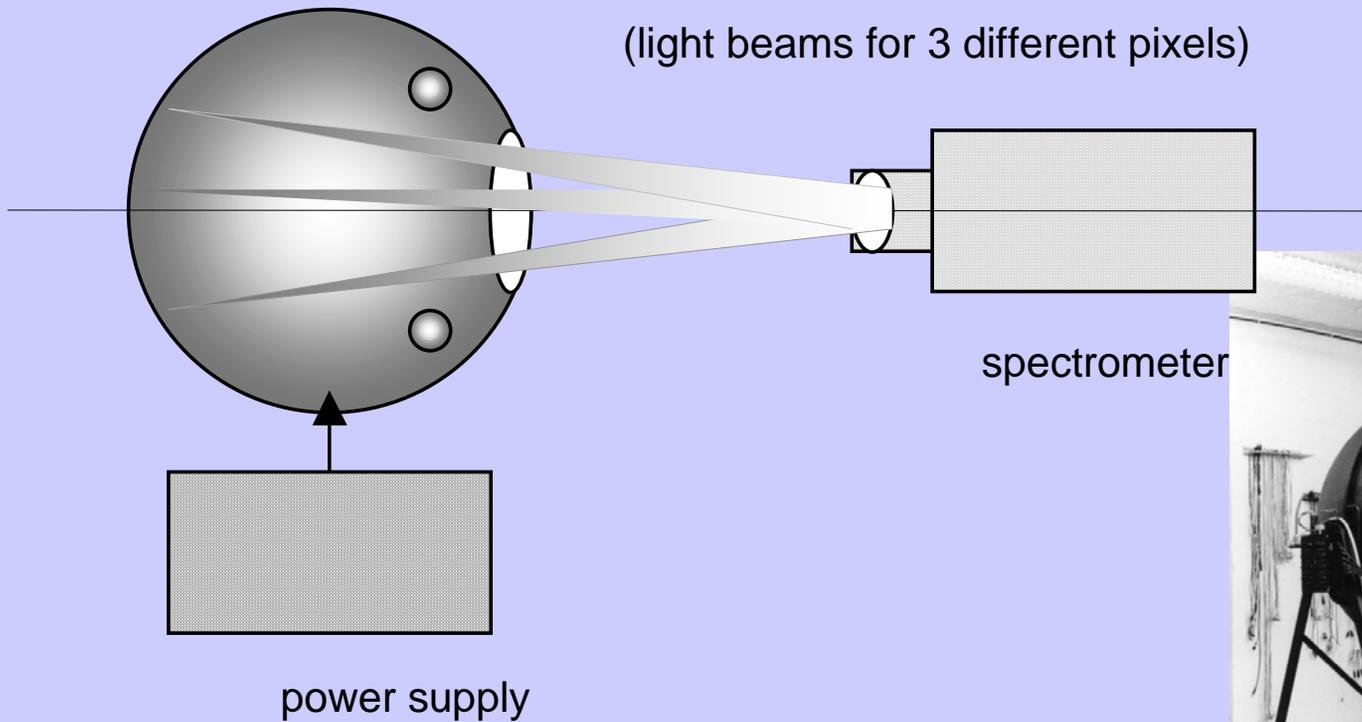
Radianz

- mit Lampe + Diffusor

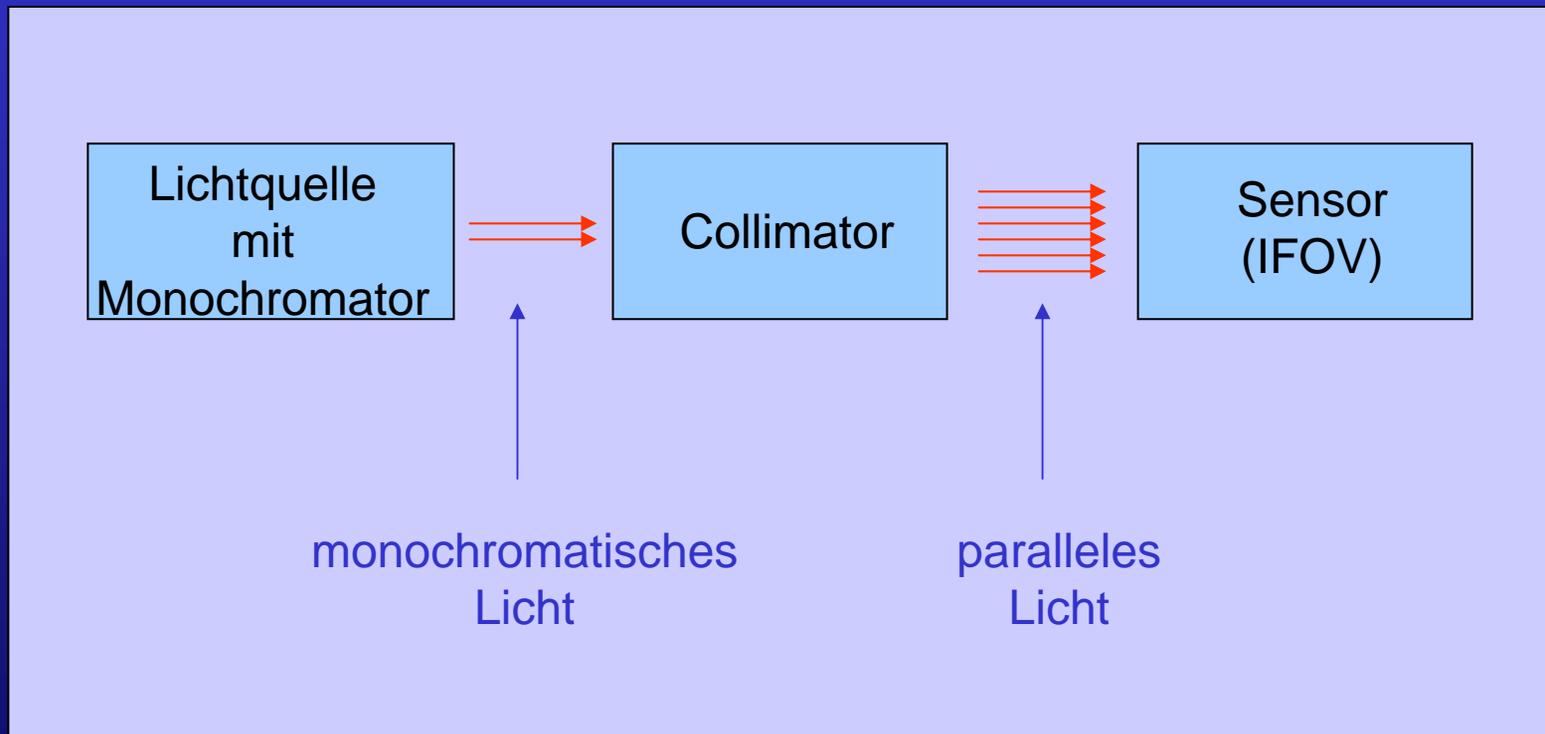


Radianz

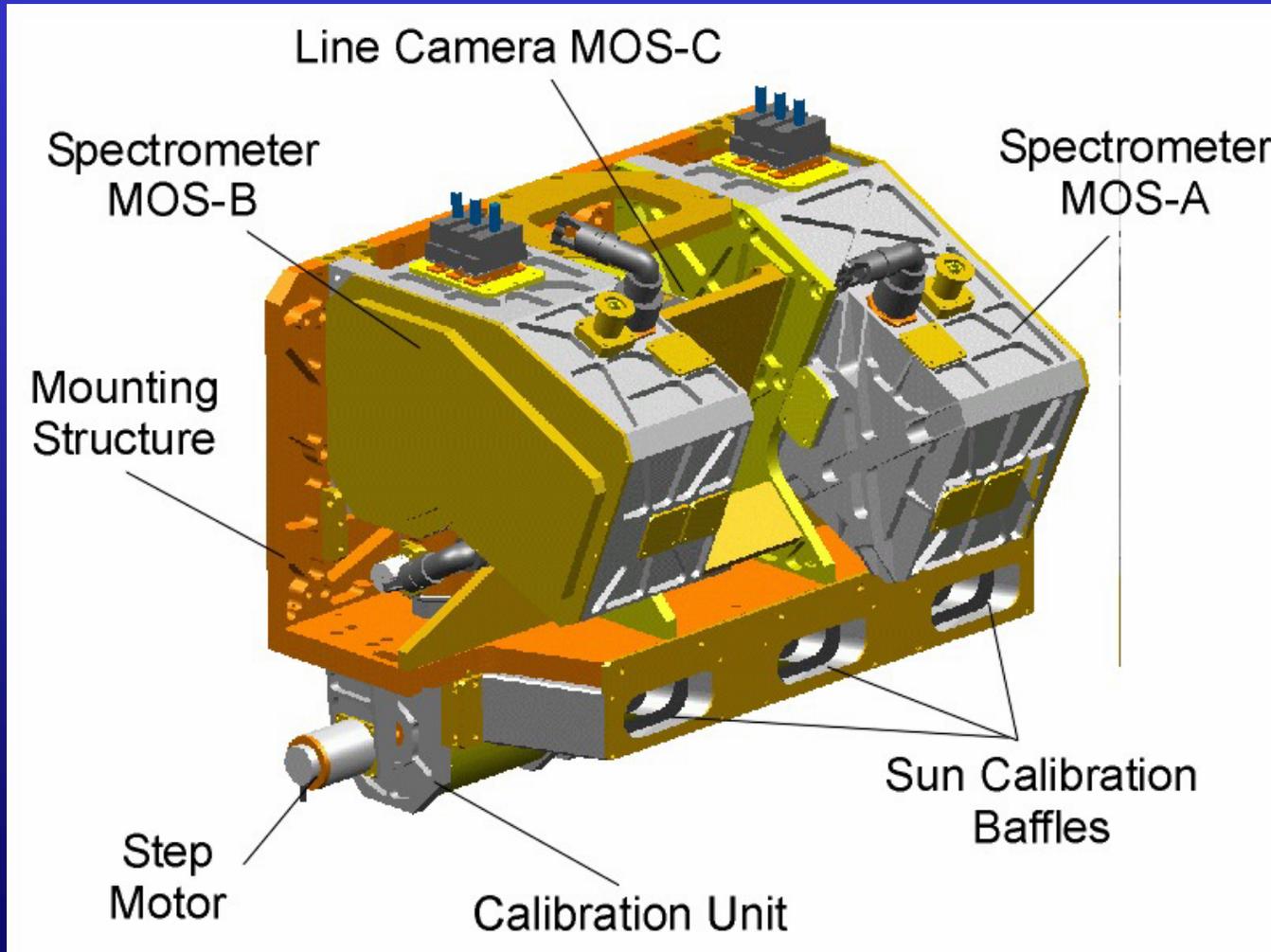
- Mit Ulbricht-Kugel



Spektrale Kalibration



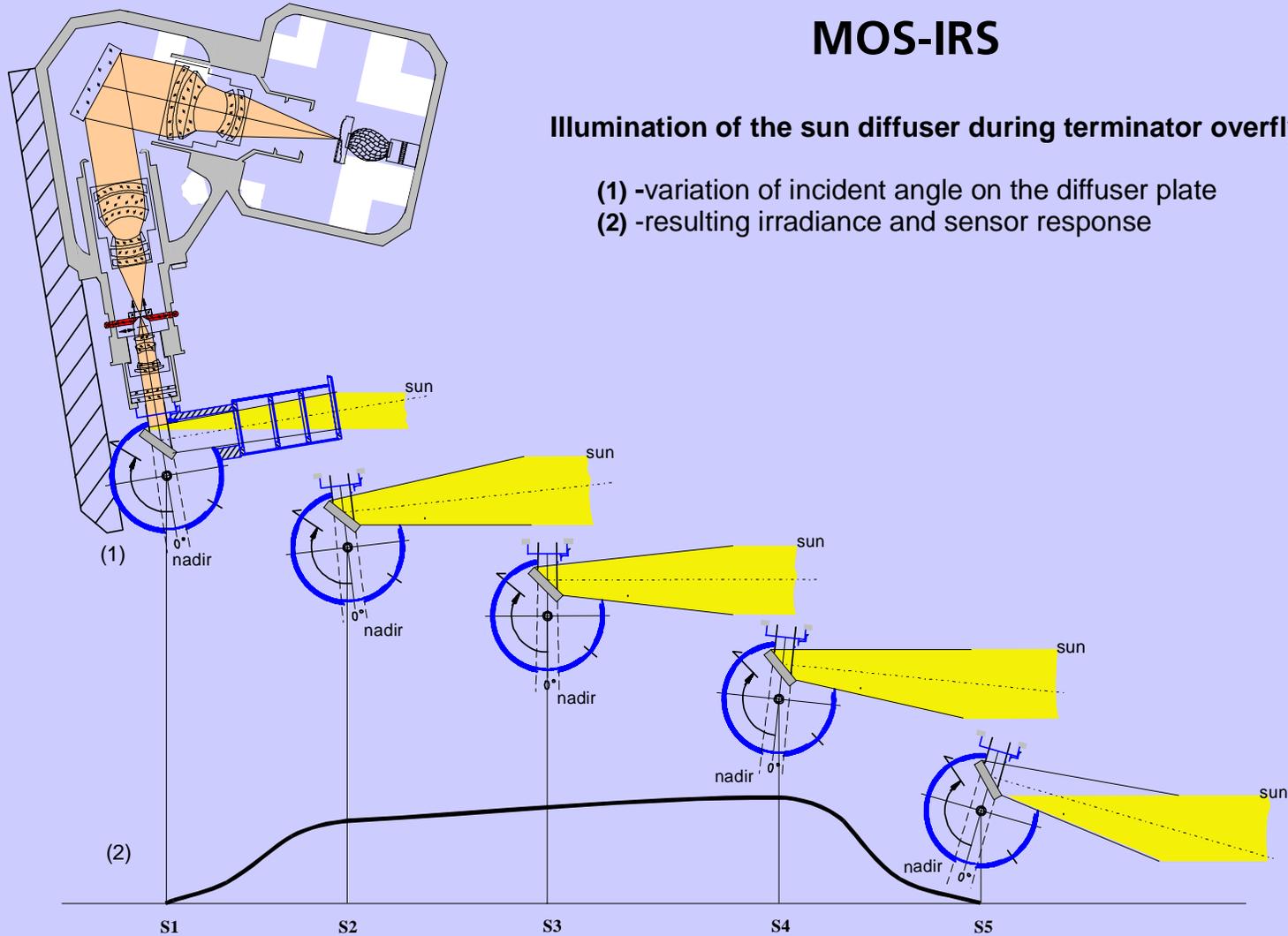
- **Umfaßt alle Mittel und Messungen im Orbit zur Überwachung und/oder Aktualisierung von Sensorparametern**
- **Notwendig, da alle Sensoren ihre Eigenschaften während der Missionsdauer verändern, z.B. durch:**
 - ▶ „normale“ Alterung optischer und elektronischer Baugruppen
 - ▶ Kontaminierung optischer Bauteile im Orbit
 - ▶ Einfluß von Sonnenlicht und Strahlung (UV, Teilchen)
 - ▶ Einfluß von Teilchenstrahlung auf Detektoren
- **Grundvoraussetzung für Nutzbarkeit der Daten**
- **Basis für laufende Korrektur der Daten bei der Prozessierung**
- **Möglichkeiten:**
 - ▶ mitgeführte Strahlungsnormale (Lampen, LEDs, Schwarzkörper)
 - ▶ extraterrestrische Sonnenstrahlung, Mond



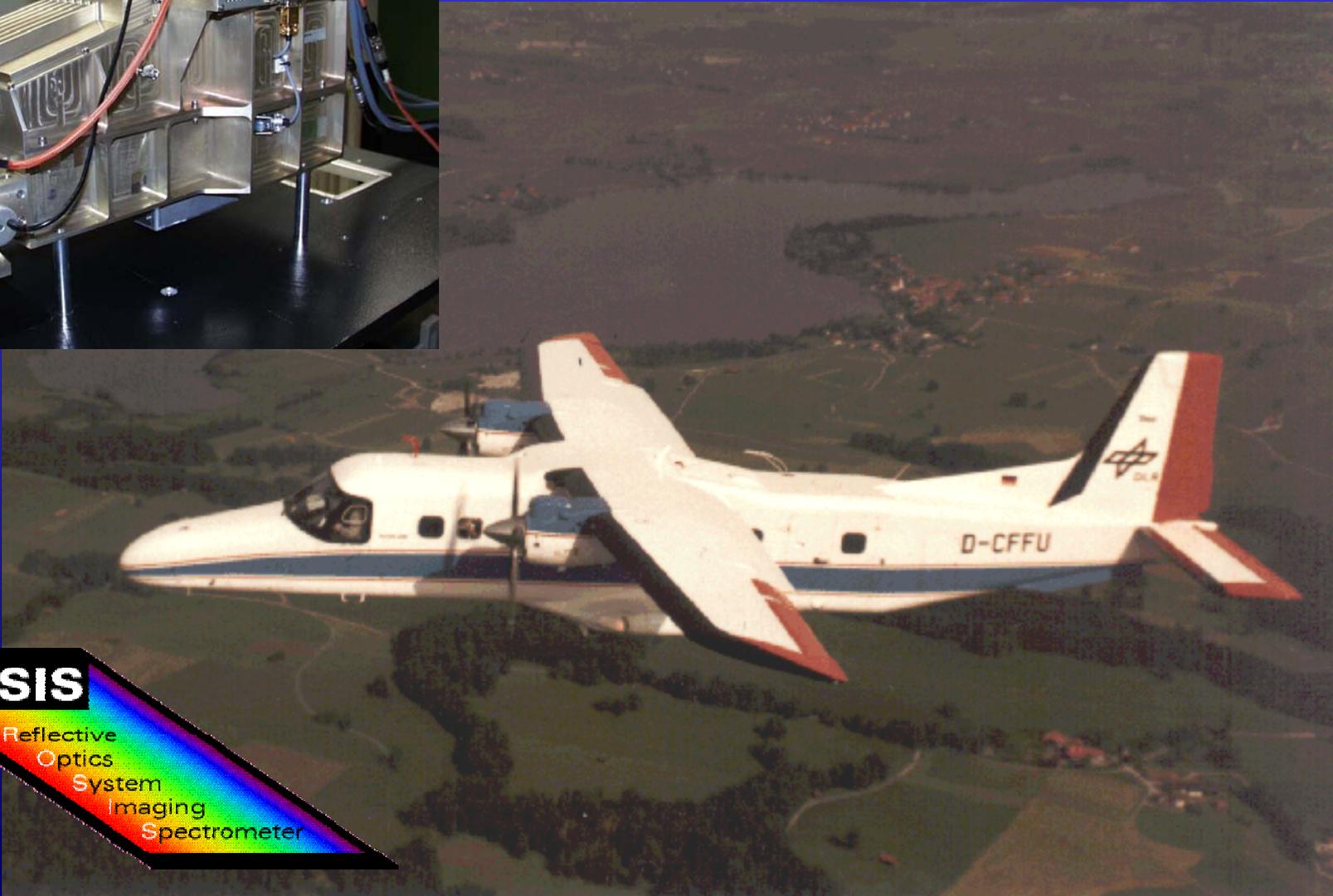
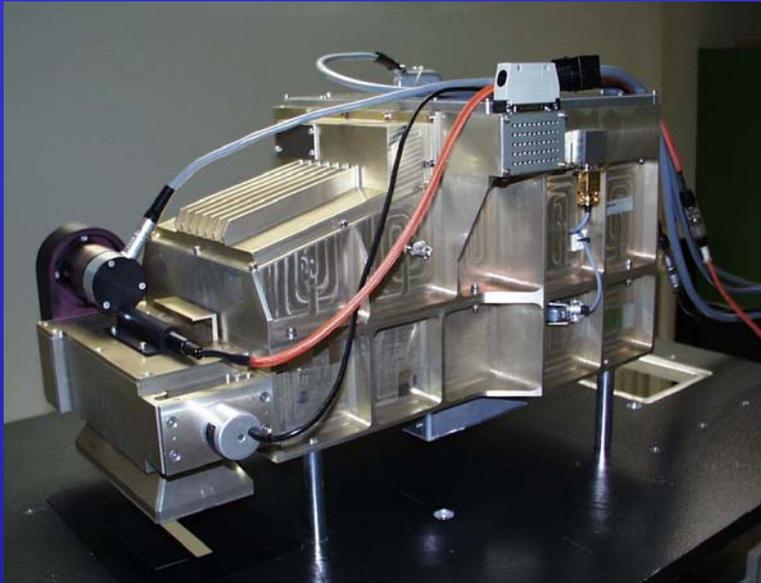
MOS-IRS

Illumination of the sun diffuser during terminator overfly

- (1) -variation of incident angle on the diffuser plate
- (2) -resulting irradiance and sensor response



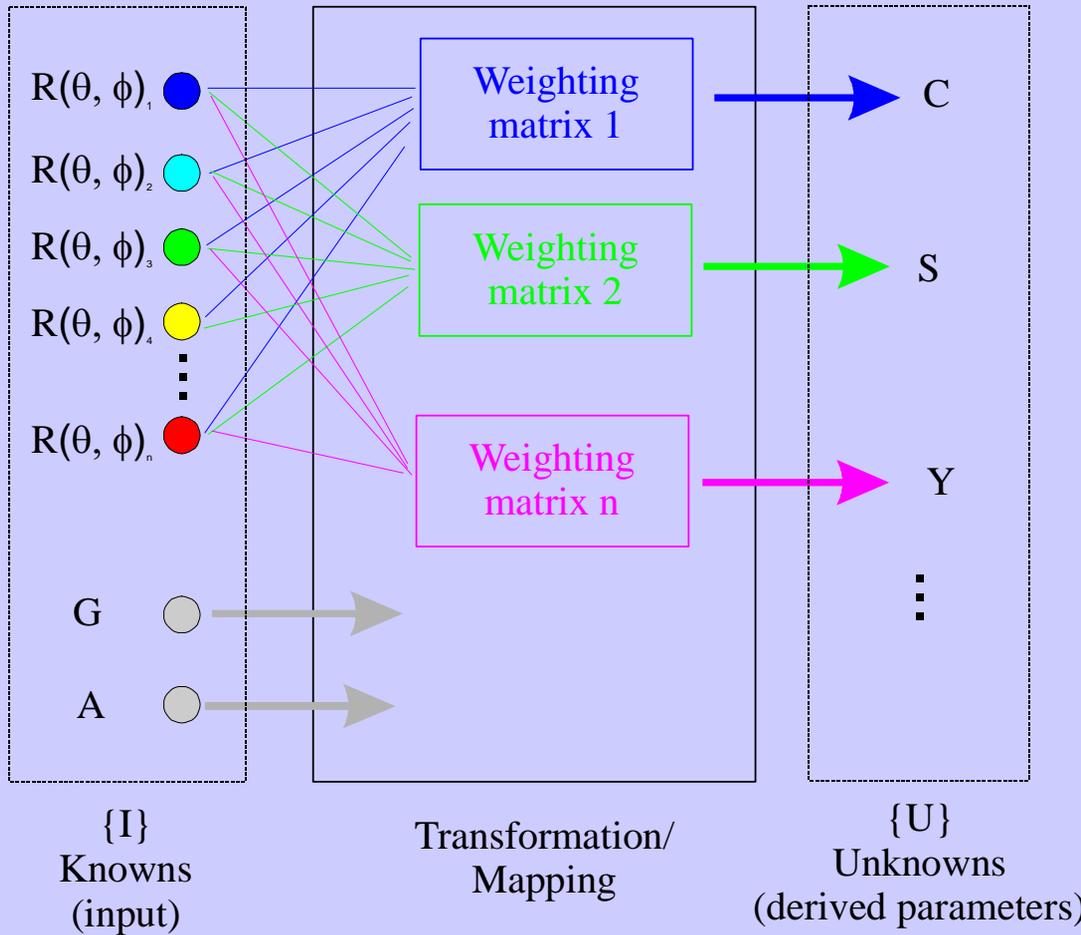
Für höhere räumliche Auflösungen



ROISIS

Reflective
Optics
System
Imaging
Spectrometer

1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele



! Die inverse Aufgabe ist analytisch nicht lösbar

? Wie viele und welche Parameter lassen sich ableiten

? Welche und wie viele Spektralkanäle werden für welchen Parameter benötigt

? Was ist der „optimale“ Algorithmus

- **Empirische Verfahren = Korrelation zwischen in-situ Meßwerten und Sensorstrahldichten**
 - ▶ **typisches Beispiel: Kanalverhältnisse, „Farbindizes“**
 - ▶ **nutzen nicht den vorhandenen Informationsgehalt (2-3 Kanäle)**
 - ▶ **problematisch bei mehreren co-variierenden Parametern (multivariate Meßwerte)**
- **Modellbasierte Verfahren = multivariate Inversion physikalischer Modelle**
 - ▶ **Beispiele: Neuronale Netze, Hauptkomponenten, spectral matching**
 - ▶ **nutzen vollen vorhandenen Informationsgehalt (alle Kanäle)**
 - ▶ **leicht anzupassen und zu optimieren**

Empirische

- ▶ basieren auf statistisch ermitteltem Zusammenhang zwischen Meßgröße und Sensorsignalen
- ▶ repräsentativer Datensatz **nötig** (zeitgleich, muß Dynamikbereich abdecken)

Vorteile

- ▶ einfache und schnelle Auswertung von Bilddaten
- ▶ kein Modell nötig
- ▶ robust

Nachteile

- ▶ nicht immer anwendbar
- ▶ viele Meßdaten nötig
- ▶ Übertragbarkeit ungewiß (manchmal nur für eine Kampagne anwendbar)

Analytische

- ▶ können alle spektrale Information nutzen
- ▶ basieren auf **physikalischem Modell** (Strahlungstransfer)

Vorteile

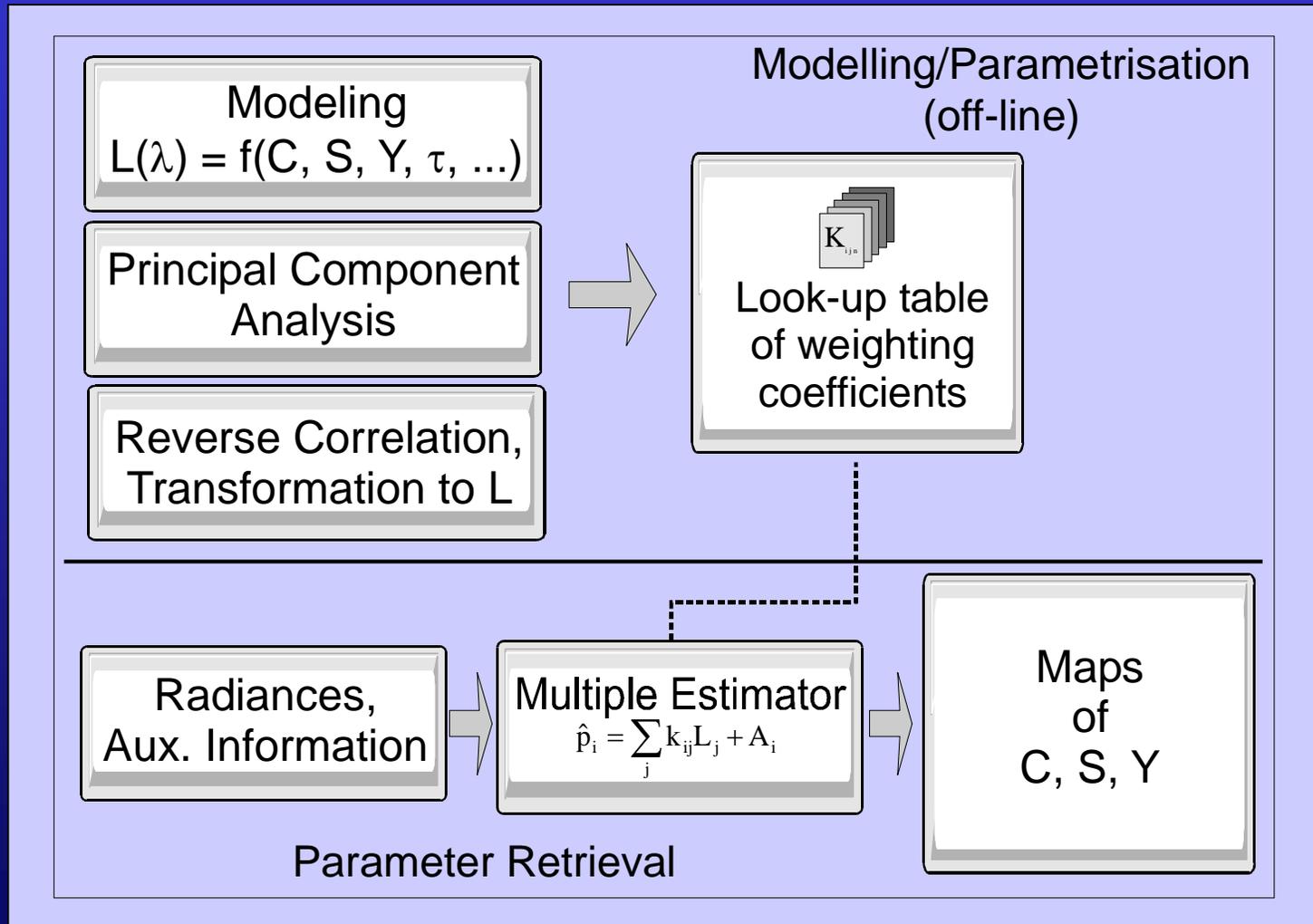
- ▶ großer Gültigkeitsbereich
- ▶ Genauigkeit abschätzbar
- ▶ physikalische Interpretation

Nachteile

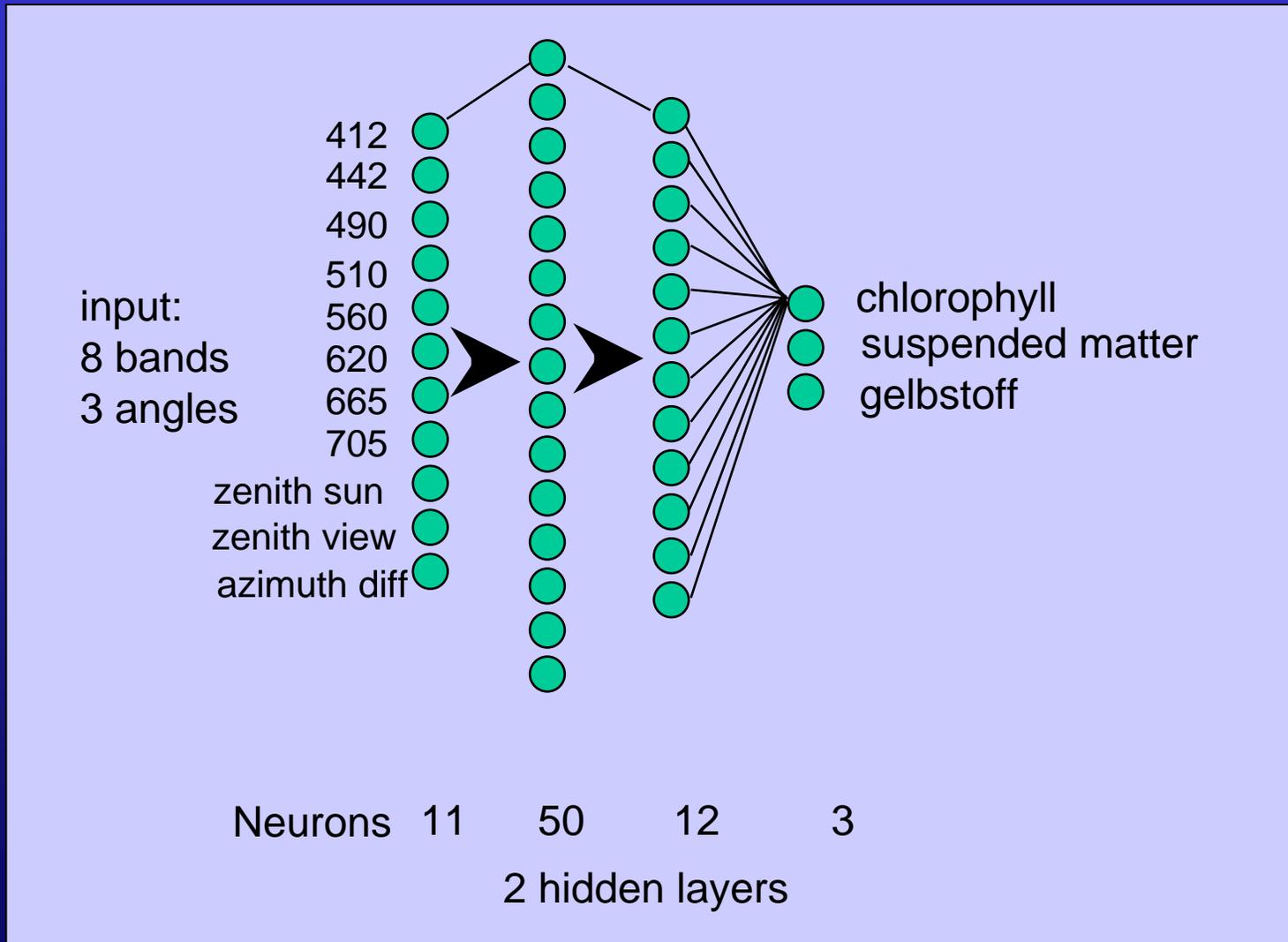
- ▶ **verlässliche Information über Materialeigenschaften nötig** (IOPs)
- ▶ **rechenzeitaufwendig**
- ▶ **sensitiv bzgl. Kalibration**

Auswerteverfahren - Grundprinzip Modellinversion





Auswerteverfahren - Beispiel Neuronales Netz



- Signalkomponenten am Satelliten (TOA):

$$L_{\text{sat}} = L_{\text{W}} + L_{\text{A}} + L_{\text{R}} + L_{\text{G}} + L_{\text{M}}$$

**Störterme,
keine Information
über Wasserkörper**

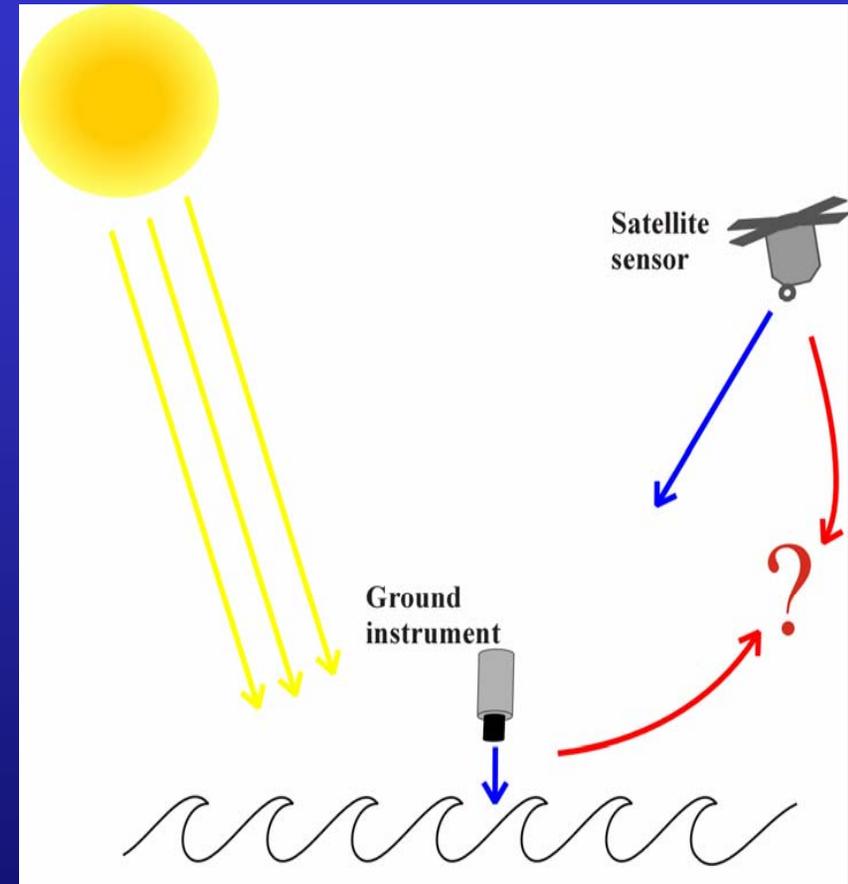
▶ mit

- L_{sat} - top-of-atmosphere Radianz am Satellitensensor
- L_{W} - water leaving radiance, das Nutzsignal
- L_{A} - aerosol path radiance, verursacht durch Streuung an Teilchen
- L_{R} - Rayleigh path radiance, Streuung an Luftmolekülen
- L_{G} - Glitter, direkte Reflexion von Sonnen- und Himmelslicht
- L_{M} - zusätzliche Störsignale auf Grund von Mehrfachwechselwirkungen

- die Störterme müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden durch
 - ▶ **Atmosphärenkorrektur** (Berechnung von L_{W} aus dem Satellitensignal) oder
 - ▶ **gekoppelte Inversion** (Berücksichtigung aller Signalanteile in einem Algorithmus)

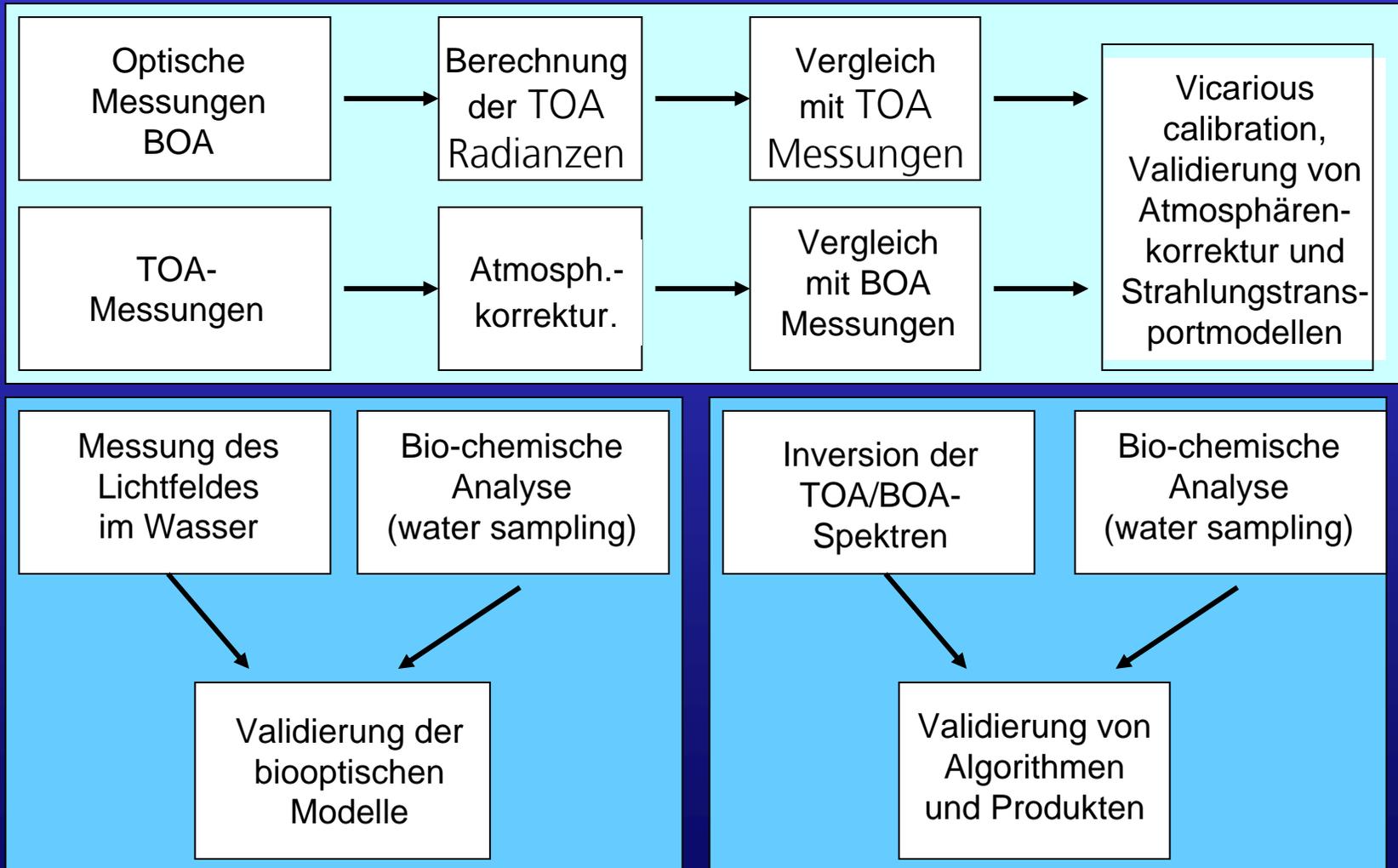
1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele

- **Validierung:** Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Satellitendaten und Messungen am Boden (radiometrische oder Sensor-Validierung) sowie die Verifikation von Modellen, Algorithmen und abgeleiteten geo-physikalischen Parametern (Algorithmen- oder Produkt-Validierung)
- Ziel: Qualitätsbewertung der Fernerkundungsdaten, Verbesserung der Modelle und Algorithmen

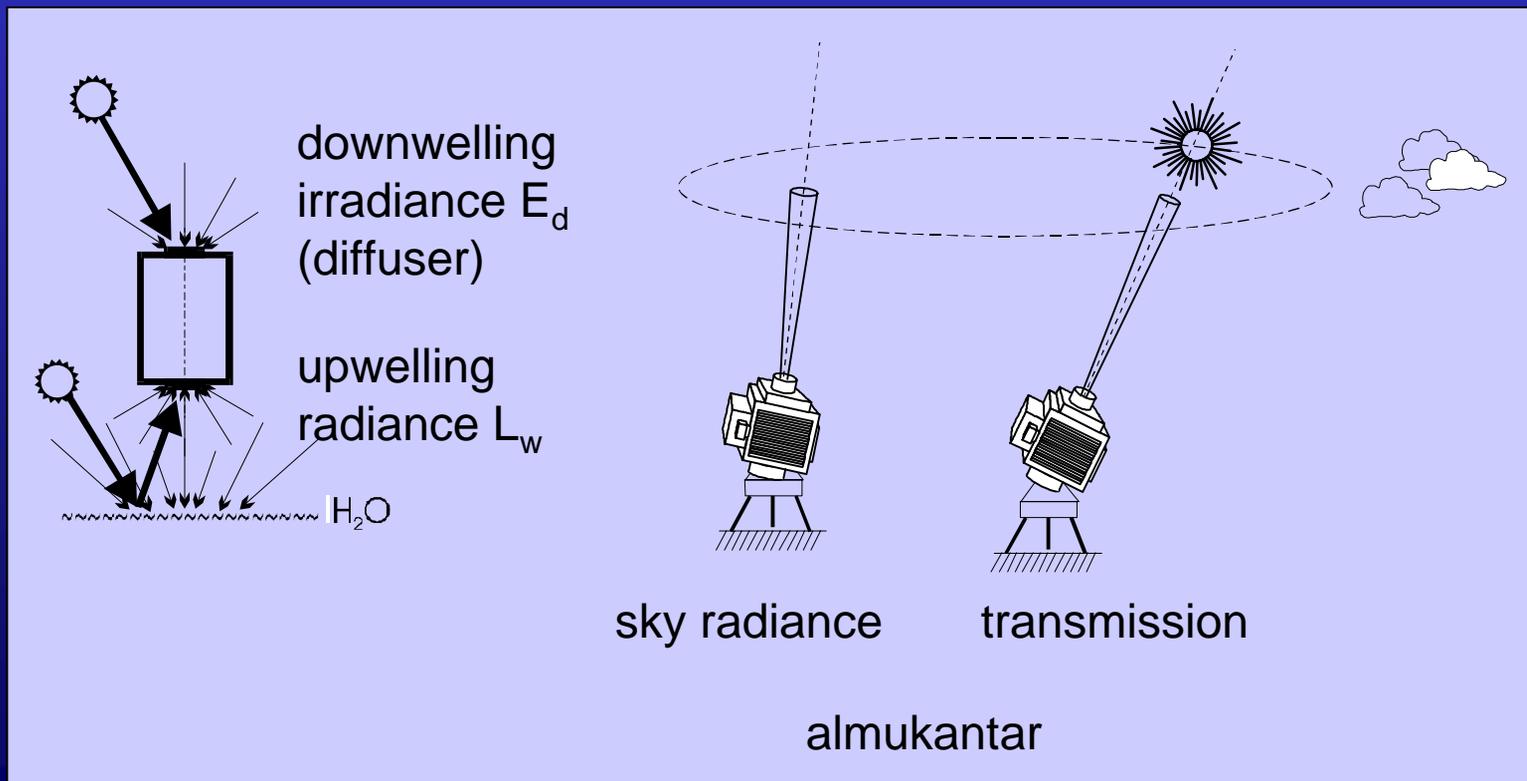


⇒ Schließungsexperiment: Messung der Strahlungsfelder in der Atmosphäre und im Wasserkörper sowie bio-chemische Analyse der Inhaltsstoffe synchron zu Satellitenüberflug

Validierung - Grundprinzipien



- Zum Einsatz kommen verschiedene Spektrometer im VIS/NIR-Bereich mit angepaßten Aufnahmegeometrien, spektralen und radiometrischen Parametern an Bord von Schiffen und an Land
- im Labor spektrophotometrische Analysen, Taxonomie von Wasserproben

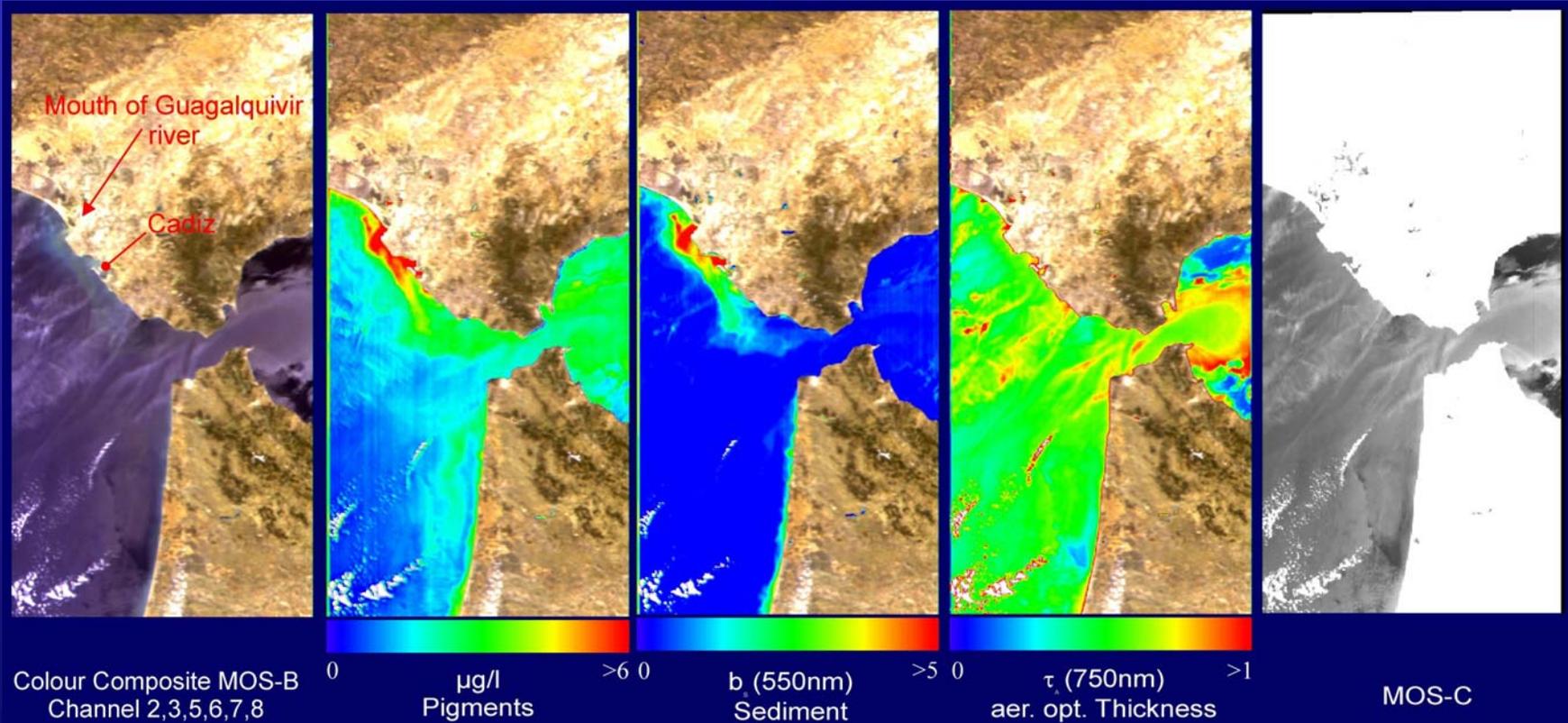


Validierung - Meßkampagnen

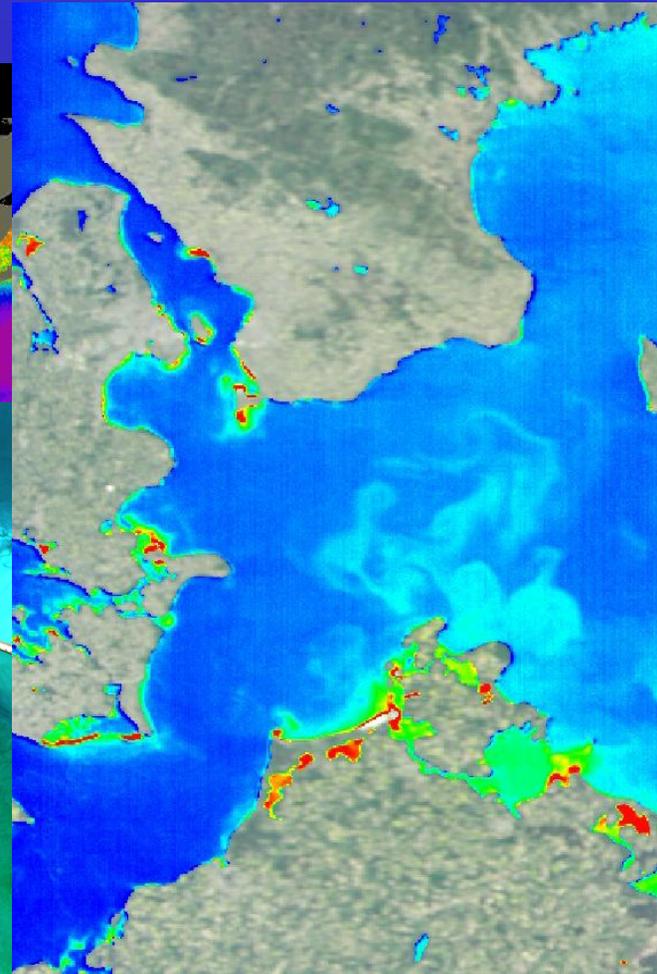
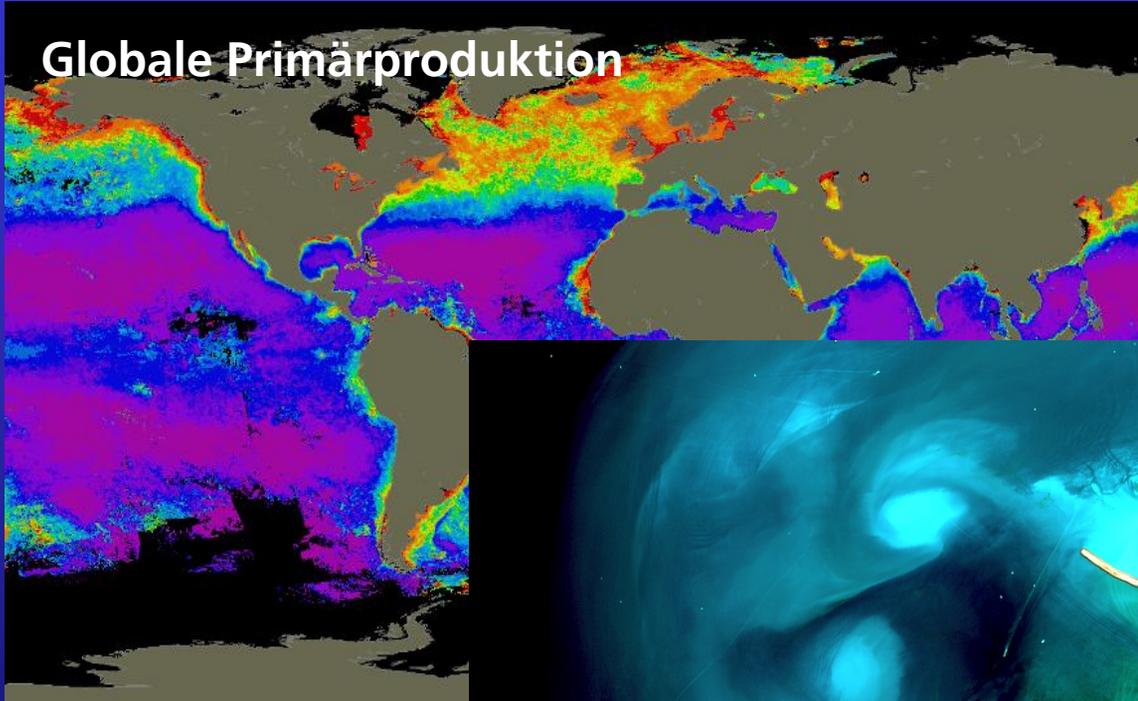


1. Einführung - Warum interessieren uns die Ozeane?
2. Grundlagen - Spektralbereiche, Streuung, Absorption ...
3. Technik - Sensoren und Missionen
4. Auswerteverfahren - ein Überblick
5. Validierung von Fernerkundungsdaten
6. Beispiele

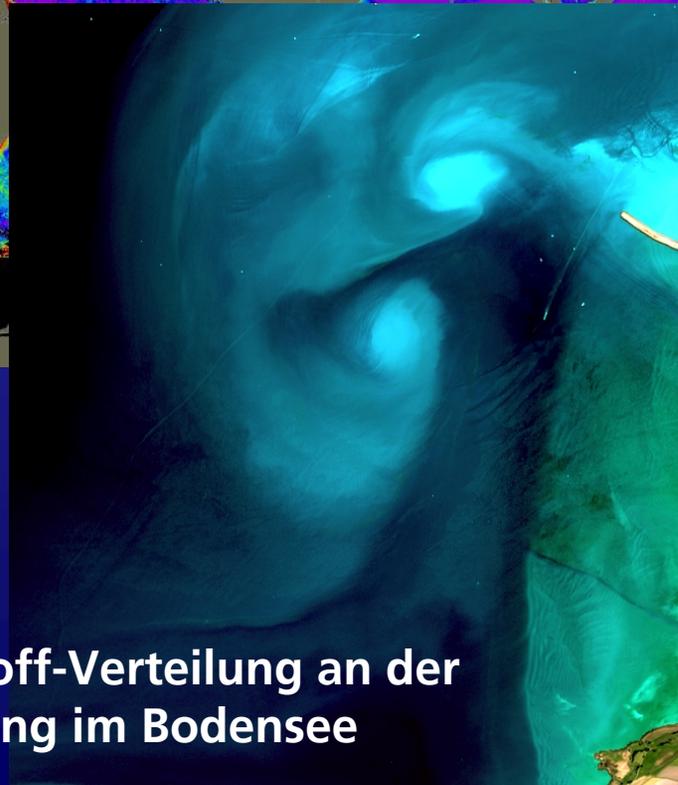
MOS-IRS, Straße von Gibraltar



Globale Primärproduktion



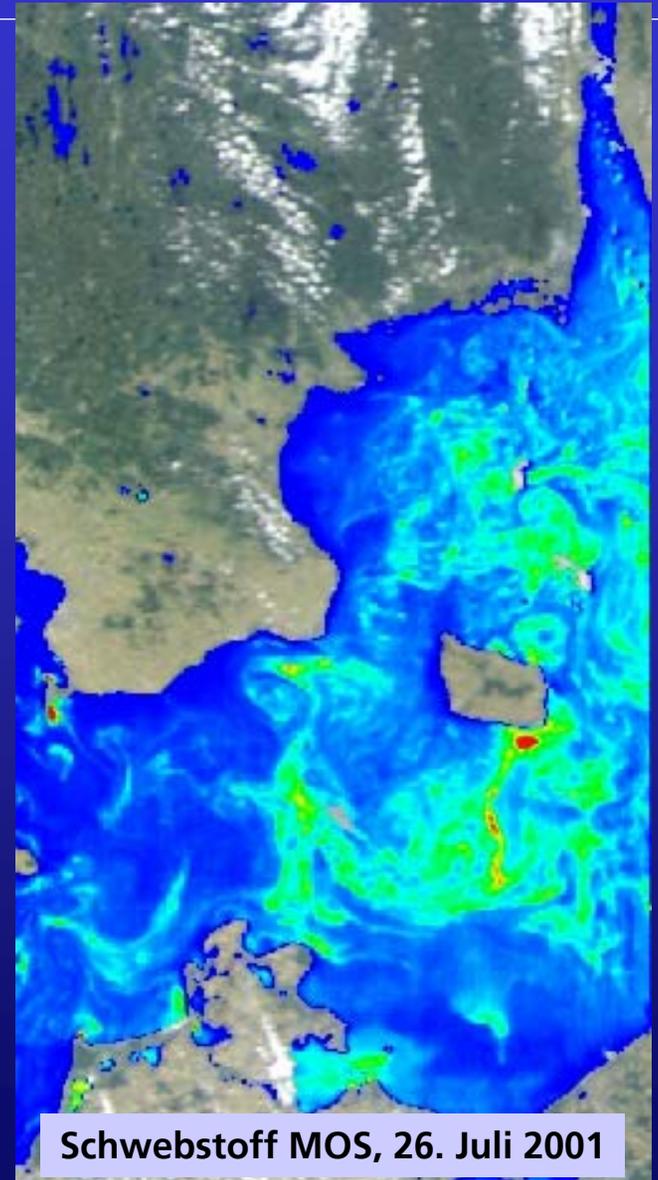
Lokale Schwebstoff-Verteilung an der Rheinmündung im Bodensee



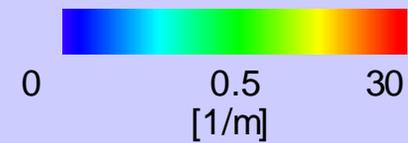
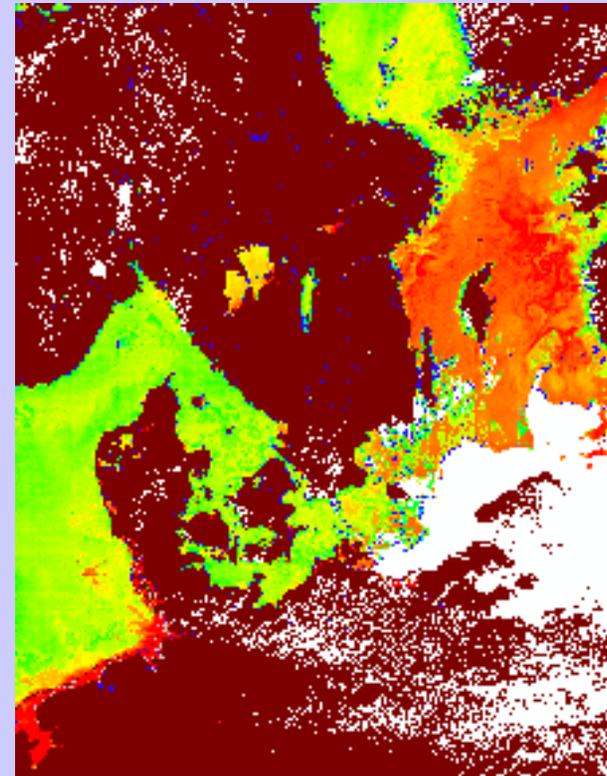
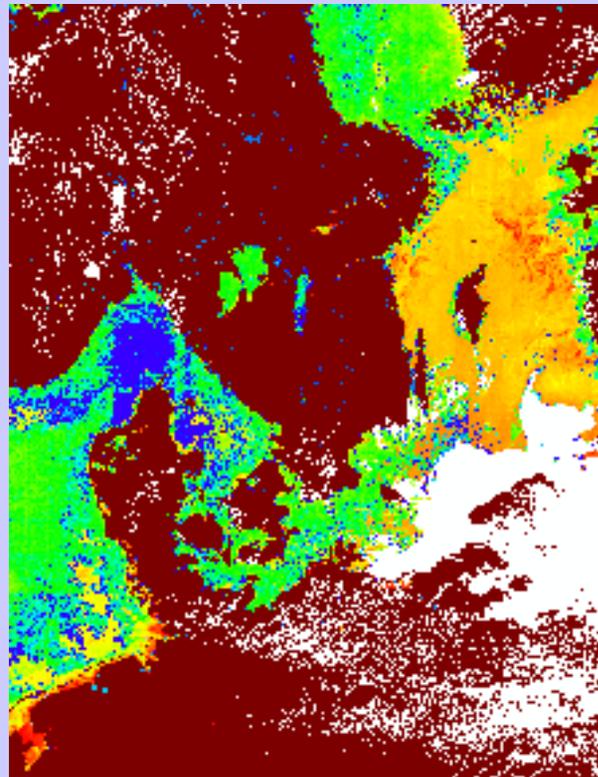
Regionale Algenblüte in der Ostsee



Beispiele - toxische Algenblüten

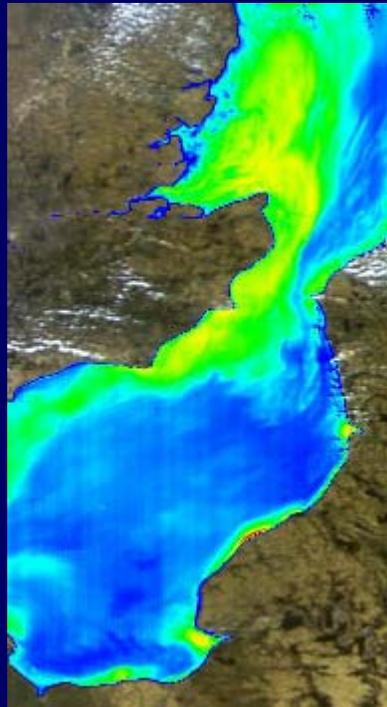


MERIS, Ostsee Juli 2003



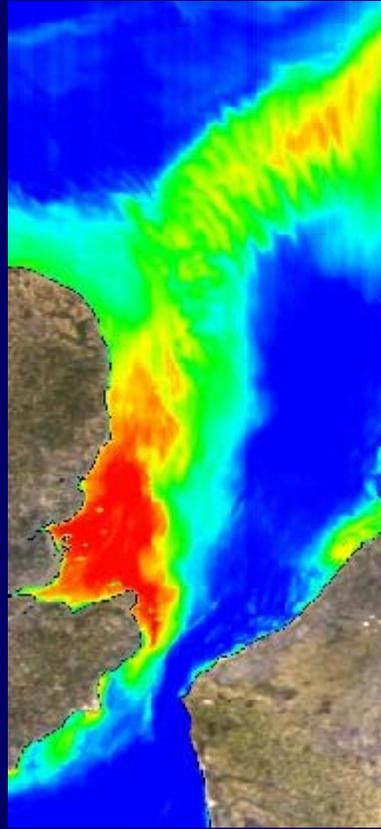
Thames River

16.09.1996



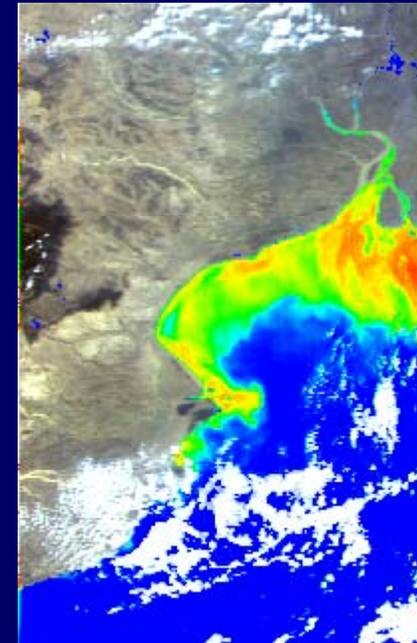
0 $b_s(550\text{ nm})[\text{m}^{-1}]$ > 3
Sediment

01.04.1997



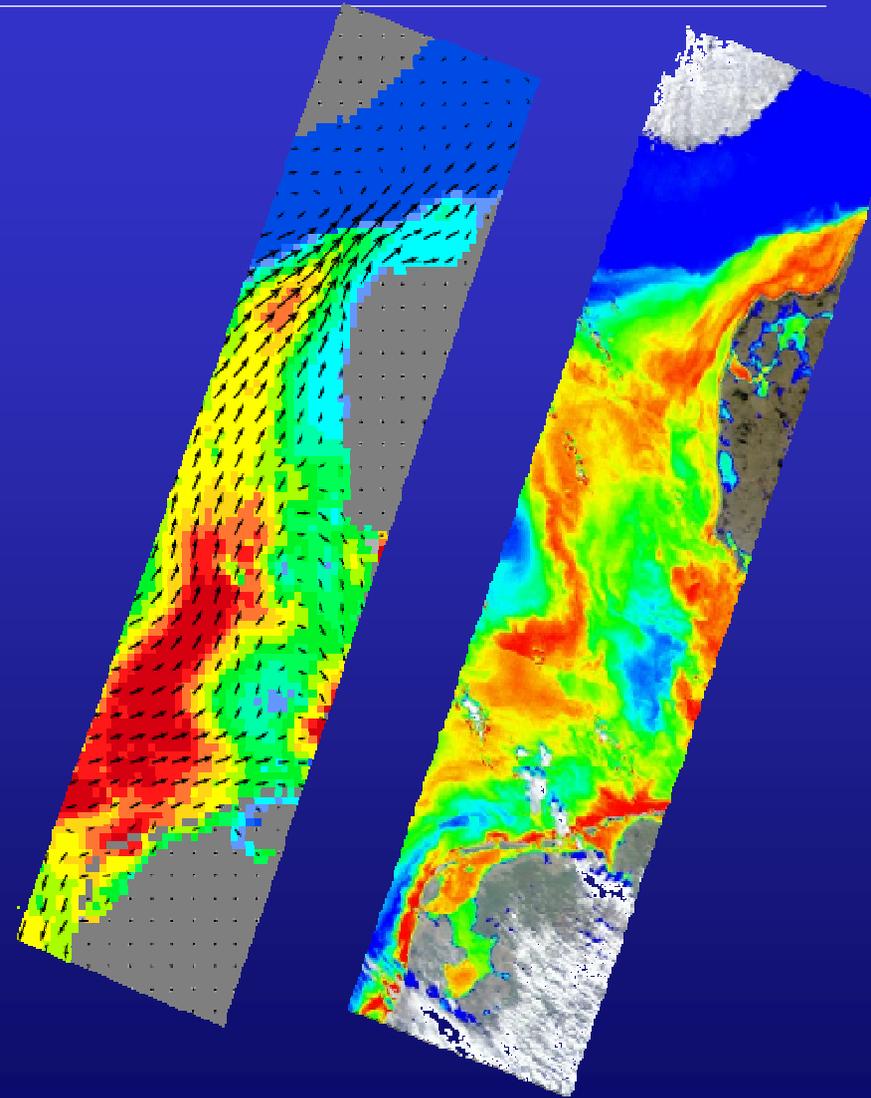
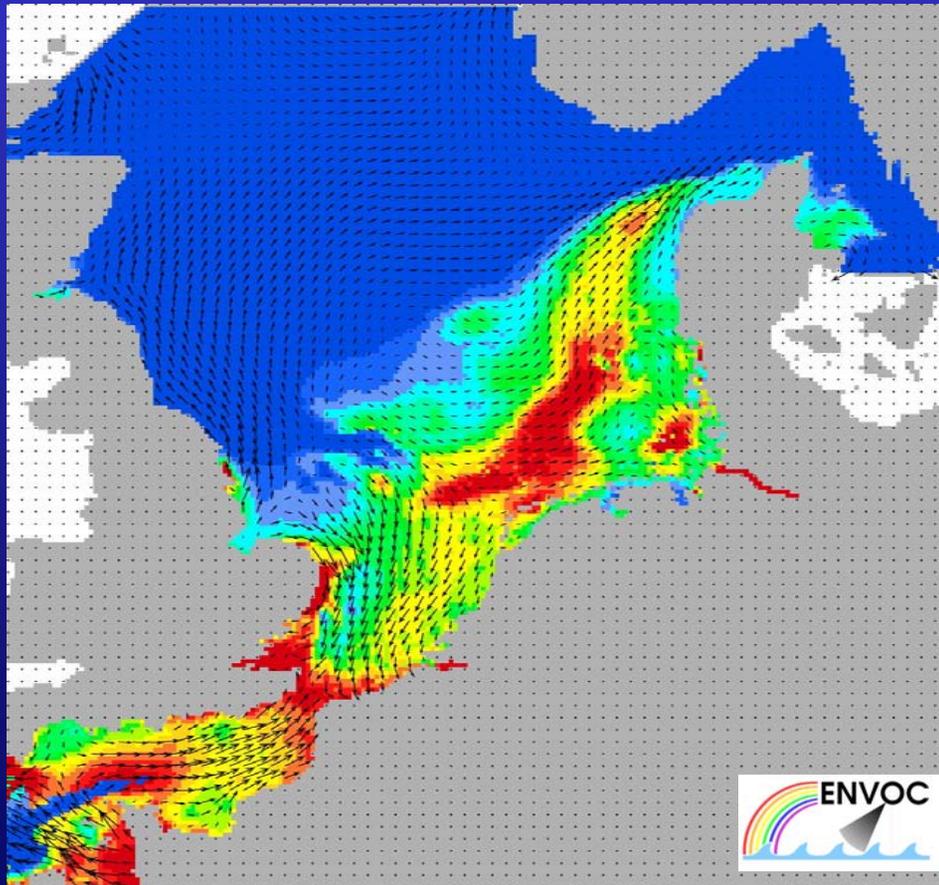
0 $b_s(550\text{ nm})[\text{m}^{-1}]$ > 12
Sediment

Ganges River
06.02.1997

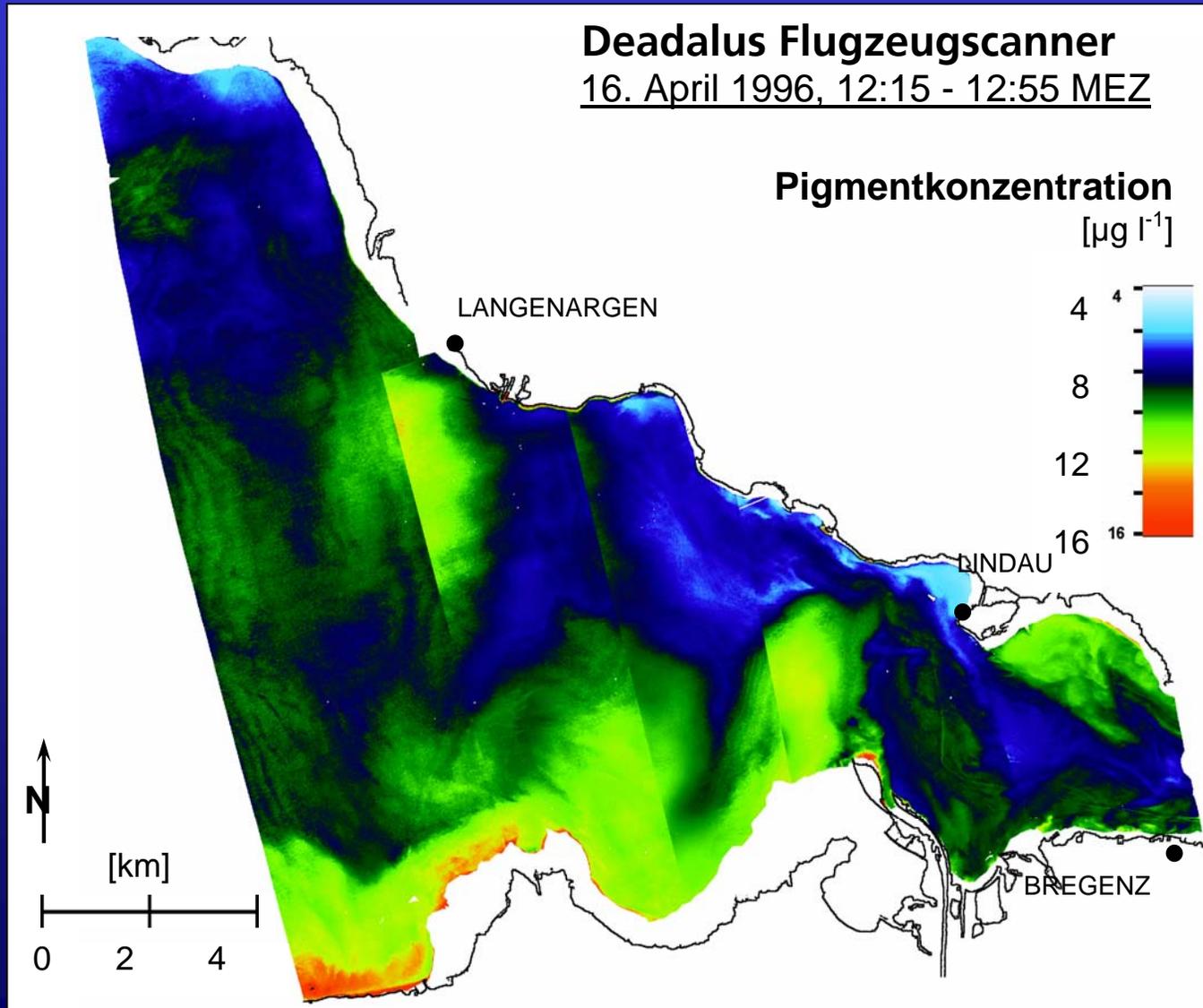


0 $b_s(550\text{ nm})[\text{m}^{-1}]$ > 14
Sediment

MOS-IRS



Vergleich des Modells mit
Schwebstoff abgeleitet aus MOS



- www.caf.dlr.de - DLR Cluster Angewandte Fernerkundung
- www.caf.dlr.de/caf/institut/imf/ - Institut für Methodik der Fernerkundung
- www.ioccg.org/ - International Ocean Colour Coordinating Group
- simbios.gsfc.nasa.gov/ - NASA Ocean Colour Program

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit