

3 Ableitung des rückgestreuten Strahlungsflusses aus Radiometermessungen

Einführend sollen hier kurz auf die Verarbeitung der Radiometermessung eingegangen werden. Daran anschließend wird das Verfahren vorgestellt und weitergehend die Gestaltung des Datensatzes selbst beschrieben. Dem folgt eine kurze Vorstellung des benutzten künstlichen Neuronalen Netzes sowie eine Abschätzung der Genauigkeit dieses Inversionsverfahrens. Der Abschluss des Kapitels beinhaltet die Anwendung des Verfahrens auf MODIS Messungen.

3.1 Einführung

Der Strahlungsfluss kann nicht direkt gemessen werden. Satellitengetragene Radiometer messen die von einer beobachteten Szene in Richtung des Detektors reflektierte spektrale Strahldichte. Dieser digitale Messwert, ein sogenannter „*count*“, wird durch eine vorab bestimmte Beziehung in einen gefilterten spektralen Strahldichtewert $L_{f\lambda}$ umgerechnet. Im Idealfall ist dies eine lineare Beziehung der Form $L_{f\lambda} = a \cdot count + b$, wobei a und b gerätespezifische Konstanten sind. Die so gewonnene gefilterte Strahldichte ist jedoch noch abhängig von der spektralen Empfindlichkeitsfunktion des verwendeten Instrumentes. Eine instrumentenunabhängige spektrale Strahldichte L_λ ergibt sich dann durch die Wichtung mit der Empfindlichkeitsfunktion des Radiometers für den gemessenen Kanal.

Die gemessene spektrale Strahldichte $L_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi)$ ist abhängig von der Beobachtungsgeometrie des Systems Sonne-Erde-Satellit. Dies wird durch das Koordinatensystem θ_0, θ und φ definiert (siehe Abb. 3.1). Dabei ist θ_0 der Sonnenzenitwinkel, θ der Satellitenzenitwinkel und φ der relative Azimutwinkel zwischen Satellit und Sonne. Die rückgestreute Strahldichte differiert maßgeblich mit der Richtung aus der die Szene beobachtet wird. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass der abzuleitende Strahlungsfluss sich aus der reflektierten Energie der betrachteten Szene aus allen Raumrichtungen bestimmt. Dabei liegt für eine Satellitenmessungen immer nur eine feste Beobachtungsgeometrie vor.

Der richtungsunabhängige Strahlungsfluss $F_\lambda(\theta_0)$ ergibt sich durch die Integration von $L_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi)$ über dem Halbraum.

$$F_\lambda(\theta_0) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (3.1)$$

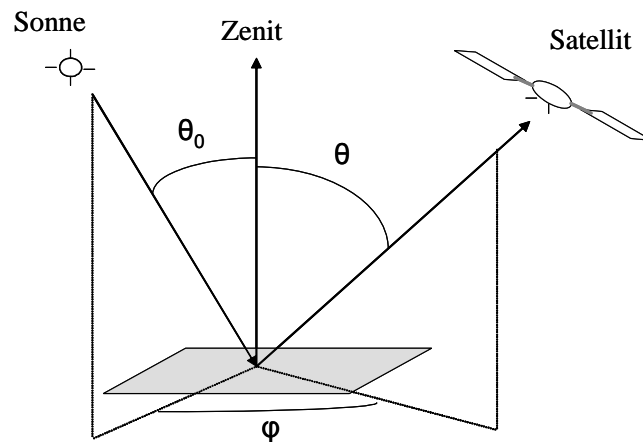


Abb. 3.1: Beobachtungsgeometrie des Sonne-Erde-Satellit Systems

Die richtungsabhängige Reflexionsfunktion R wird definiert als

$$R(\theta_0, \theta, \varphi) \equiv \pi \frac{L_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi)}{F_\lambda(\theta_0)} \quad (3.2)$$

und ist auch eine Funktion des Sonnenzenit-, Satellitenzenit- und relativen Azimutwinkels. Diese Größe wird oft auch als Anisotropiefunktion oder BRDF (*Bidirectional reflectance distribution function*) bezeichnet. Die Reflexionsfunktion beschreibt wie die Strahlung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel reflektiert wird und beinhaltet die spektralen, räumlichen und richtungsabhängigen Variablen. Aus der gemessenen spektralen Strahldichte kann der spektrale Strahlungsfluss wie folgt berechnet werden.

$$F_\lambda(\theta_0) = \frac{\pi \cdot L_\lambda(\theta_0, \theta, \varphi)}{R(\theta_0, \theta, \varphi)} \quad (3.3)$$

Um den Strahlungsfluss aus der gemessenen Strahldichte für die jeweilige Szene zu bestimmen, wird eine *a-priori* Reflexionsfunktion benötigt. Dies ist ein wichtiges Konzept, da die Erdoberfläche und die Atmosphäre eine unbegrenzte Zahl an möglichen Szenen erzeugt. Die Erde kann nur mit einer begrenzten Anzahl von Szenen beschrieben werden. Dabei werden Reflexionsfunktion z.B. für bestimmte Oberflächentypen und Wolkenbedeckungen mit Strahlungstransportmodellen oder aus Messungen mit Radiometern (z.B. POLDER; Viollier, 2002), welche verschiedene Winkelkompositionen messen, erzeugt.

Gerade das aufwärtsgerichtete Strahlungsfeld über Wolken ist stark anisotrop und benötigt azimuthal und zenital aufgelöste Reflexionsfunktionen, welche durch Strahlungstransportsimulationen bestimmt werden können.

Zur Ableitung des kurzwelligen Strahlungsfluss aus den spektralen Strahlungsflüssen sind noch weitere Schritte nötig. Geeignet sind dafür empirische Verfahren und Strahlungstransportsimulation. Die empirische Verfahren beruhen auf gleichzeitigen Messungen mit einem schmalbandigen und einem breitbandigen Instrument. Eine Beschreibung einiger dieser empirischen Verfahren befindet sich z.B. Laszlo *et al.* (1988), Li und Leighton (1992), Hucek und Jacobowitz (1995), Kryvobok und Hollmann (2003).

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren basiert auf Strahlungstransportsimulation. Der Vorteil gegenüber empirischen Verfahren besteht in der Unabhängigkeit von Messungen mit einem breitbandigen Instrument und die damit verbundene Schwierigkeit, die unterschiedlichen Öffnungswinkel und Beobachtungswinkel zu korrigieren. Einen weiteren Vorteil bietet das Radiometer MODIS mit seiner großen Anzahl an schmalbandigen Kanälen. Sie geben zusätzliche Informationen zum spektralen Verhalten der Oberflächentypen, zur Absorption von Gasen in der Atmosphäre sowie zu den mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolken. Diese Überlegungen motivieren, ein modellbasiertes Verfahren zur Ableitung des aufwärtsgerichteten Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre zu entwickeln.

3.2 Beschreibung des Verfahrens

Zuerst stellt sich die Frage, welche Zusammenhänge zwischen dem rückgestreuten Strahlungsfluss und den physikalischen Parametern der Atmosphäre sowie der Oberfläche der Erde bestehen. Hierbei interessieren vor allem mikrophysikalische Größen der Wolken und das Reflexionsvermögen der Oberflächentypen. In der Abbildung 3.2 sind Ergebnisse der Empfindlichkeitstudien für Wasser- und Eiswolken mit unterschiedlichen optischen Dicken, verschiedenen Oberflächenalbeden sowie der Effektivradius der Wolkenröpfchen oder Eiskristallgrößen gezeigt. Sofern die entsprechenden Parameter nicht variiert werden, liegt die *US Standard Atmosphäre* nach McClatchey *et al.* (1972) über einer Wasseroberfläche zugrunde.

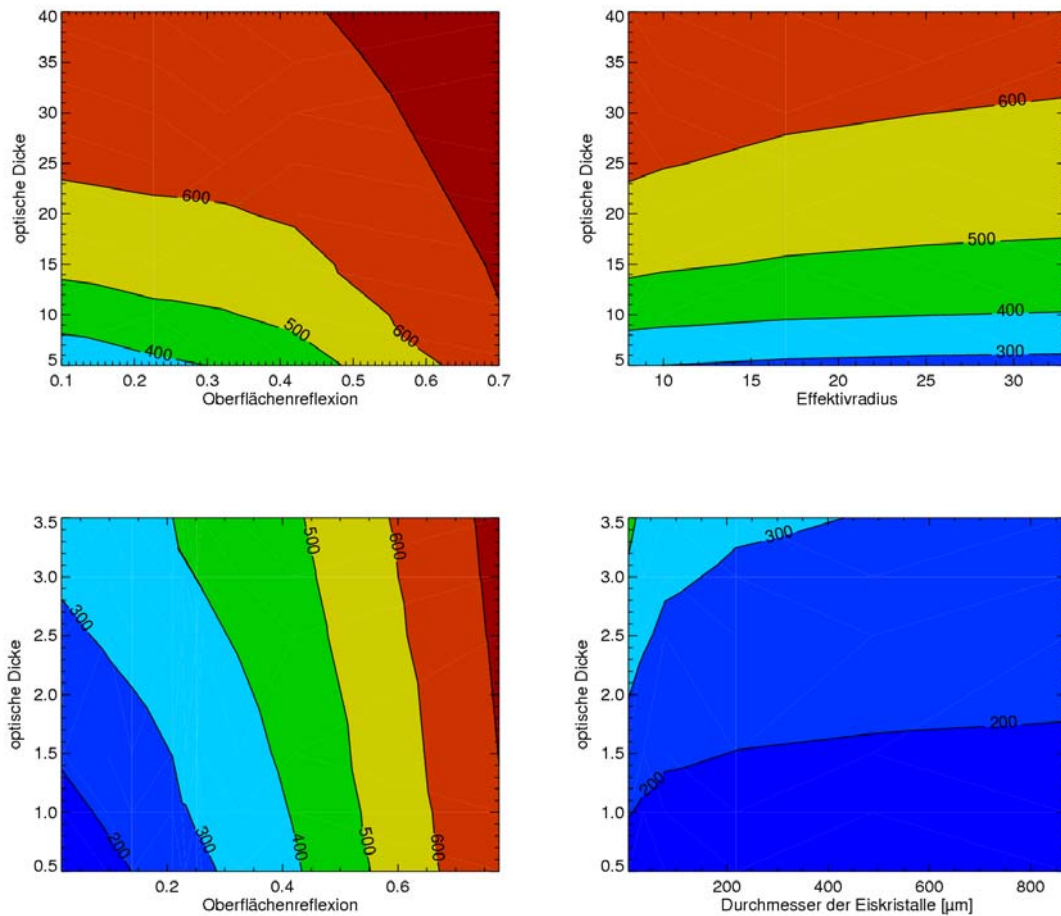


Abb. 3.2: Berechneter rückgestreuter Strahlungsfluss [W/m^2] bei einem Sonnenzenitwinkel von 35° . *obere Reihe*: für Wasserwolken; *untere Reihe*: für Eiswolken; *linke Spalte*: abhängig von der Bodenreflexion und der optischen Dicke; *rechte Spalte*: abhängig vom Effektivradius oder Durchmesser der Eiskristalle und der optischen Dicke

Die Variation der optischen Dicke im Bereich zwischen 5 und 25 macht sich vor allem im rückgestreuten Strahlungsfluss bemerkbar. Mit Abnahme der optischen Dicke bestimmt die Oberflächenalbedo immer mehr den rückgestreuten Strahlungsfluss, erkennbar an der Transparenz der Cirren (siehe Abb. 3.2, unten links). Weiteren Einfluss auf den Strahlungsfluss haben der Effektivradius der Wolkentröpfchen und die Größe der Eiskristalle.

Zur Erfassung der betrachteten Abhängigkeit ist die Wahl der spektralen Position der MODIS Kanäle entscheidend. Um die vorher genannten Parameter zu berücksichtigen, wurden 10 Kanäle ausgewählt (siehe Abb. 2.6).

Die nicht absorbierenden Kanäle 1, 3 und 4 enthalten Informationen zur optischen Dicke der Wolke und können zusätzlich bei optisch dünnen Wolken Informationen zur Oberflächenalbedo erfassen. Die Kanäle 6 und 7 geben Informationen zur Partikelgröße der Wolkenteilchen. Des Weiteren werden zur Charakterisierung des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre die Absorptionskanäle 17, 18 und 19 sowie die Fensterkanäle 2 und 5 benutzt. Die getroffene Auswahl der MODIS-Kanäle ist angelehnt an Ableitungsmethoden für die optische Dicke und den Effektivradius von Platnick *et al.* (2003) und der Bestimmung des Wasserdampfgehaltes nach King *et al.* (2003).

Mit Hilfe des Strahlungstransportmodells MOMO wurde die Datenbasis erzeugt, die anschließend als Grundlage für die Inversion diente. Die einzelnen Schritte des Ablaufs sind in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

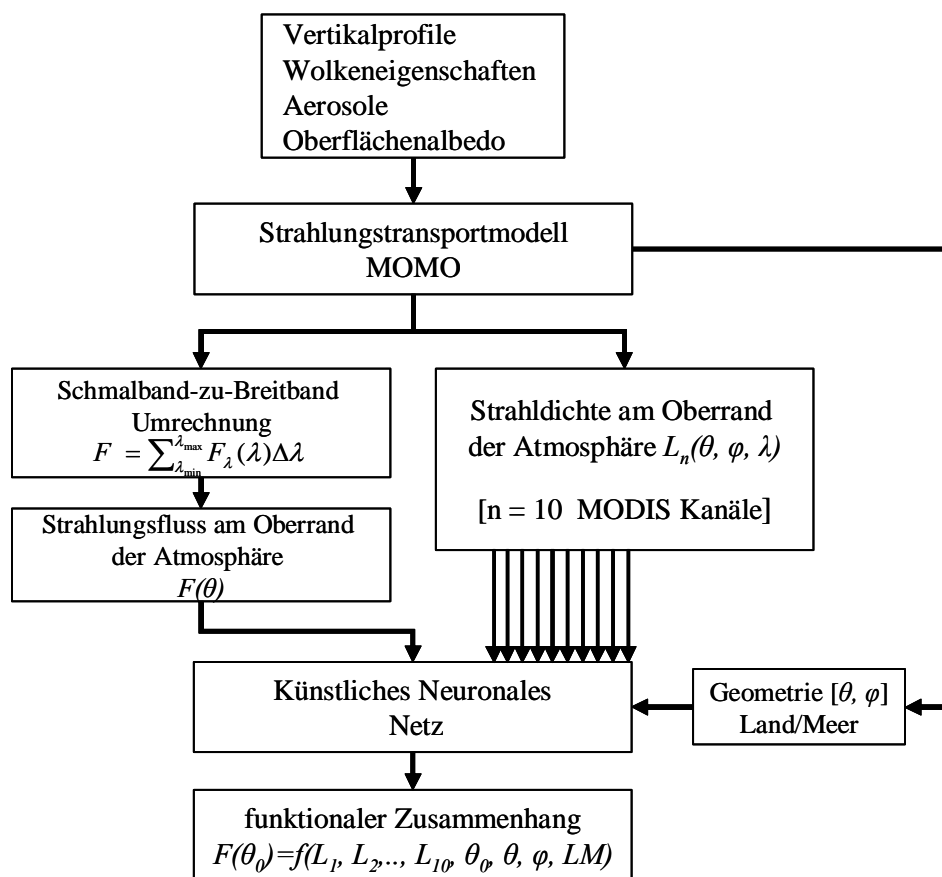


Abb. 3.3: Ablaufdiagramm des Simulations- und Inversionsverfahrens

Zum einen wurden die ausgewählten MODIS Kanäle und zum anderen 200 Spektralkanäle zwischen 200nm und 3700nm simuliert.

Zur Bestimmung der Position und der Bandbreite der Spektralkanäle wurden mehrere Faktoren berücksichtigt. Es handelt sich dabei um die starken Absorptionsbanden der atmosphärischen Gase, die Rayleigh-Streuung, ein streuender Aerosoltyp sowie das Reflexionsvermögen für einen Vegetationstyp (Gras). Hierfür wurde mit Hilfe der „Line by Line“ Methode die Transmission (T) in 0,01nm Intervallschritten ($d\lambda$) berechnet. Die Verteilungsfunktion (siehe Abb. 3.4) ergibt sich aus der Transmissionskurve oder Dichtekurve wie folgt,

$$V(\lambda) = \int_{\lambda=200}^{\lambda=3700} T(\lambda)F_s(\lambda)d\lambda \quad (3.4)$$

wobei (F_s) die direkte Sonneneinstrahlung ist. Für die Lage der Bänder wurde die Verteilungsfunktion in 200 gleiche Teile separiert und die zugehörigen Wellenlängen bestimmt (siehe Abb. 3.4).

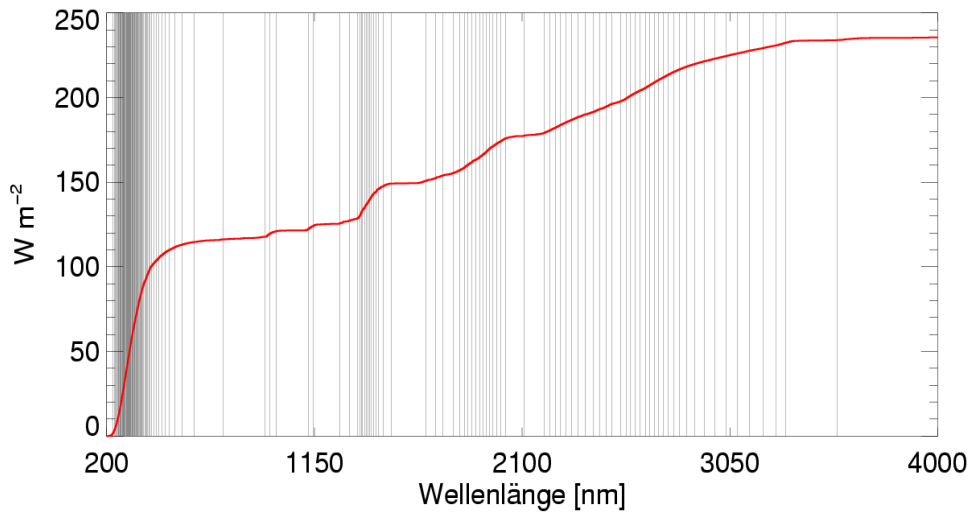


Abb. 3.4: Einteilung des Sonnenspektrums in 200 schmale Bänder (*graue Linien*).
rote Kurve: Verteilungskurve der absorbierten und gestreuten Strahlung

Mit MOMO werden die simulierten Strahldichten (L_λ) der Spektralkanäle und der spektrale Strahlungsfluss (F_λ) ermittelt:

$$F_\lambda(\theta_0) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L_\lambda(\theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (3.5)$$

Danach ergibt sich durch

$$F(\theta_0) = \sum_{\lambda=200}^{\lambda=3700} F_{\lambda}(\theta_0)\Delta\lambda \quad (3.6)$$

der Strahlungsfluss (F). $\Delta\lambda$ ist durch die jeweilige Bandbreite bestimmt.

Die Simulationen wurden für eine große Anzahl von atmosphärischen Zuständen berechnet. Die Auswahl der Fälle wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

3.2.1 Datenbasis für Strahlungstransportsimulationen

Die Auswahl und Zusammensetzung der atmosphärischen Zustände für die Strahlungstransportsimulationen zur Verfahrensentwicklung berücksichtigen nachstehende Überlegungen.

Für die Ableitung des Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre spielen all jene Größen eine Rolle, die einen Einfluss auf den Strahlungsfluss nehmen können. Folgende Parameter werden deshalb als Variablen in der Berechnung der Fälle benutzt (siehe Abb. 3.5). Dabei ist die Qualität und der Gültigkeitsraum des Verfahrens von der Auswahl der Fälle abhängig. In den nächsten Schritten werden die Variablen vorgestellt.

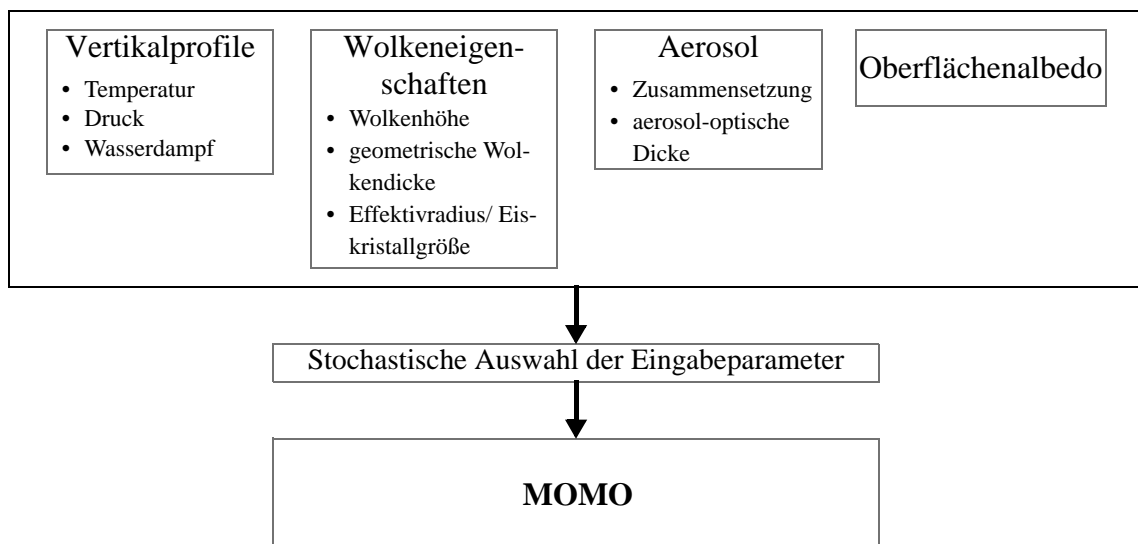


Abb. 3.5: Schema der benutzten variablen Größen für die Strahlungstransportsimulation

Die Profile der Temperatur, des Druckes und des Wasserdampfes sind durch gemessene Radiosondenaufstiege vorgeschrieben worden. Als Datensatz standen weltweite Radiosondenaufstiege für das Jahr 2002 zur Verfügung. Es wurden nur Aufstiege verwendet, die das Druckniveau von 200hPa oder höher erreichten, welche insgesamt 144 Profile erfüllten. Die Modellatmosphäre wurde in 21 Schichten eingeteilt, an denen die Radiosondenaufstiege angepaßt wurden.

Bei den Wolken wurde zwischen Eis- und Wasserwolken unterschieden. Mischphasen wurden nicht berücksichtigt. Weiter wurde vorausgesetzt, dass Wolken über ihre gesamte vertikale Erstreckung homogen in der Zusammensetzung sind. Eiswolken wurden nur bei einer Unterkantentemperatur unterhalb des Gefrierpunktes verwendet.

In Tabelle 3.1 sind die benutzten Wolkenarten mit ihren strahlungswirksamen Eigenschaften zusammengefasst. Die Einteilung der Wolken wie auch die Variationsbereiche der strahlungswirksamen Eigenschaften erfolgten in Anlehnung an die Wolkenklassifizierung von Stephens (1978) und die Wolkenstatistik des *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP). Die verwendeten Daten für die Cirruswolken stammen aus Modellstudien von Macke *et al.* (1996). Es wurde hier ein fraktales Polykristall benutzt (siehe Kap. 2.2). Mit Extinktion wird in der Tabelle das Verhältnis der optischen zur geometrischen Dicke bezeichnet.

Nr.	Wolkenart	Effektivradius [μm] / Durchmesser	Extinktion [km^{-1}]	optische Dicke
1	Stratus I	17	15-70	2-20
2	Stratus II	10	15-30	2-8
3	Stratocumulus I	17	15-40	2-30
4	Stratocumulus II	10	15-60	2-45
5	Nimbostratus	17	20-90	100-250
6	Altostratus	8	30-80	8-22
7	Cumulus	25	25-130	8-45
8	Cumulonimbus	33	25-130	150-350
9	Alto cumulus	8	16-70	8-45
10	Cirrus	6-870	2-10	< 3.6

Tab.3.1: Wolkenarten und die zugelassene Variation der wichtigsten Parameter

Die Zusammensetzung der benutzten Aerosole (Tab. 1) sowie die Oberflächenalbedo wurden im Kapitel 2 vorgestellt. Die optische Dicke der einzelnen Aerosoltypen wurde mit

- Maritim: 0,05-0,2
- Kontinental: 0,05-0,5
- Wüstenstaub: 0,1-1
- Hintergrundaerosol und stratosphärisches Aerosol: $< 0,1$

variiert.

Weiterhin wurde der Bodendruck zwischen 980 hPa und 1020 hPa variiert.

Die Festlegung der Parameter orientiert sich an den natürlichen Gegebenheiten. Dabei ist es nicht möglich, sämtliche Kombinationen zu berechnen. Zur Festlegung der Szenarien wurden für eine vorgegebene Anzahl von Fällen die Parameter stochastisch selektiert, das heißt, die unabhängigen Variablen wurden per Zufallsgenerator ausgewählt. Durch die zufällige Auswahl der Parameter konnte eine hinreichende Füllung des relevanten Datenraums erreicht werden.

Es wurde eine Gesamtanzahl von 2.600 Fällen durch das stochastische Auswahlverfahren definiert und mit MOMO für die definierten Spektralkanäle simuliert. Zusammenfassend ergeben sich damit 520.000 Simulationen. Die Berechnungen beinhalten des Weiteren die Kombination der Winkelstützstellen aus 17 Sonnenzenitwinkeln und 17 Beobachtungszeitwinkeln.

3.2.2 Inversion durch ein künstliches Neuronales Netz

Als eines der möglichen Inversionsverfahren wurde ein künstliches Neuronales Netz (NN) ausgewählt. Der Vorteil eines Neuronalen Netzes liegt in der Bearbeitung von großen Datenmengen, in der Berücksichtigung der nicht linearen Prozesse und in der Interpolation zwischen den gewählten Parametern.

Für diese Untersuchung wurde ein Mehrschicht-Perzeptron (MLP) herangezogen. Die Struktur des MLP ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Das benutzte MLP besteht aus drei Schichten: einer Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht und einer Ausgabeschicht. Die Elemente dieser Schichten werden auch als Neuronen bezeichnet. Die Anzahl der Neuronen in der Eingabe- und Ausgabeschicht wird durch das physikalische Problem bestimmt. Für die Bestimmung der optimalen Anzahl der Neuronen in der verborgenen Schicht gibt es kein Patentrezept. Eine hohe Anzahl von Neuronen verbessert die Anpassungsfähigkeit an die Trainingsmenge, vergrößert aber den Interpolationsfehler. Dagegen tritt der umgekehrte Effekt beim Herabsetzen ein. Zwischen der Eingabeschicht und der

verborgenen Schicht sowie zwischen der verborgenen Schicht und der Ausgabeschicht sind Verbindungsgewichte (w_{ij}) vorhanden, die die Vernetzungsmatrix W_{in} und W_{out} bilden. Die Verarbeitung der Eingabevektoren (\vec{x}) in einem MLP geschieht in mehreren Schritten. Zuerst werden die Elemente (x_i) des Eingabevektors an die Neuronen in der verborgenen Schicht weitergegeben, gewichtet addiert, desweiteren mit einer Aktivierungsfunktion (σ) transformiert und an die folgenden Neuronen (t_j) weitergeleitet.

$$t_j = \sigma\left(\sum w_{ij}x_i\right) \quad (3.7)$$

Die Aktivierungsfunktion, die Sigmoidfunktion, wird durch folgenden Ausdruck definiert:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-cx}} \quad (3.8)$$

Für den Lernprozess wird ein Trainingsdatensatz definiert, der aus Eingabevektoren (\vec{x}) und den dazugehörigen Ausgabevektoren (\vec{y}) besteht. Das Ziel des Lernens ist, dass für neue Eingabevektoren, die der Trainingsmenge ähnlich sind, richtige Ergebnisse erzeugt werden. Die verwendete Lernmethode benutzt den *backpropagation*-Algorithmus. Dieses numerische Verfahren sucht das Minimum der Fehlerfunktion (E) mit dem Gradientenabstiegsverfahren. Dazu werden die erzeugten Ausgabewerte (t_i) mit den zu lernenden Zielgrößen (y_i) durch Berechnung der Fehlerfunktion verglichen.

$$E(w_i) = \sum (t_i - y_i)^2 \quad (3.9)$$

Zu Beginn werden die Gewichte zufällig initialisiert. Danach wird der Gradient der Fehlerfunktion in Abhängigkeit von den gegenwärtigen Gewichten berechnet und korrigiert. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis das künstliche Neuronale Netz für einen Testdatensatz ein Ergebnis mit einer genügenden Genauigkeit erzeugt. Der Testdatensatz muss von dem Trainingsdatensatz unabhängig sein. Das benutzte Programm zum Erstellen und Trainieren eines Neuronalen Netzes wurde von Preusker (2001) entwickelt.

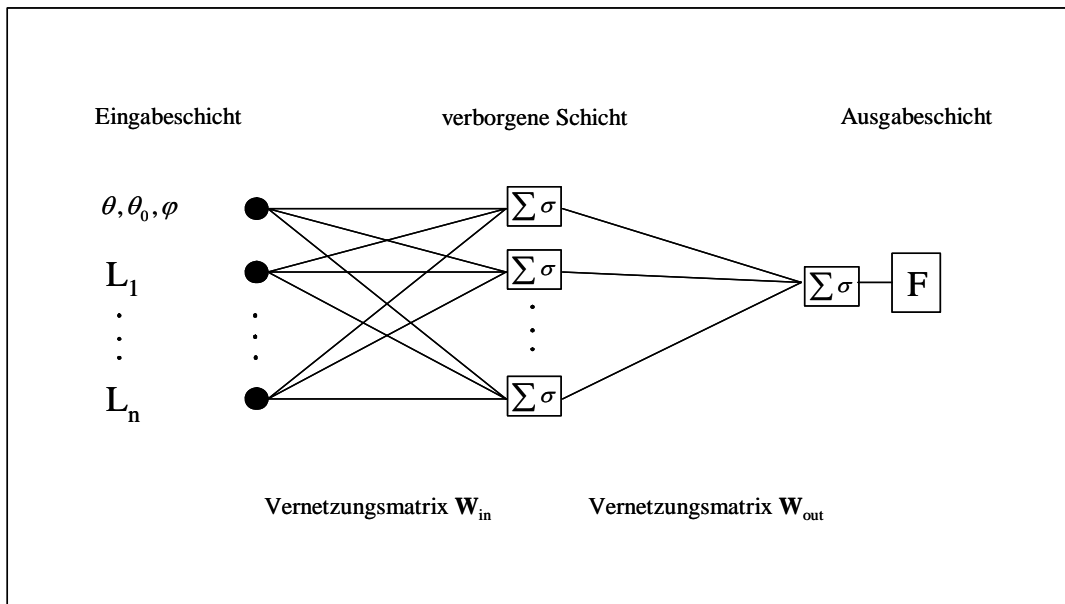


Abb. 3.6: Struktur des verwendeten künstlichen Neuronales Netzes zur Ableitung des Strahlungsflusses (F)

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurden die Trainingsdaten für das Neuronale Netz erzeugt. Der Eingabevektor (\vec{x}) setzt sich aus den Strahldichten der MODIS-Kanäle, welche nicht durch Wasserdampf beeinflusst sind, dem Verhältnis der Strahldichten aus den MODIS-Wasserdampfkanälen (L_{17}, L_{18}, L_{19}) zu den Fensterkanälen (L_2 und L_5), dem solaren Zenitwinkel, dem Beobachtungswinkel, dem Azimutwinkel und einer Landmaske (LM) zusammen.

$$\vec{x} = \left(L_1, L_3, L_4, L_6, L_7, \frac{L_{17}}{L_2 + L_5}, \frac{L_{18}}{L_2 + L_5}, \frac{L_{19}}{L_2 + L_5}, \cos \theta_0, 1/\cos \theta + 1/(\cos \theta_0), \sin \theta_0 \cos \varphi, LM \right)$$

Durch den dazugehörigen Ausgabevektor (\vec{y}) wird der aufwärtsgerichtete solare Strahlungsfluss (F) am Oberrand der Atmosphäre vorgegeben.

$$\vec{y} = F$$

Die benötigten Trainings- und Testdatensätze wurden stochastisch aus der durch Simulationen erzeugten Datenbasis entnommen. Die Anzahl der entnommenen Eingabe- und Ausgabevektoren wurde anhand des berechneten relativen Fehlers abgeschätzt. Hierfür wurden die Gesamtvarianz (s^2) der simulierten Strahldichte für einen MODIS-Kanal und

die Stichprobenvarianzen ($s^2(i)$) berechnet.

$$s^2 = \frac{\sum (L(\varphi, \theta_0) - \bar{L})^2}{n_{max} - 1} \quad (3.10)$$

Die Differenz der Varianzen ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Ab einer Anzahl von 10.000 Elementen nimmt der relative Fehler nur noch langsam ab und strebt gegen Null.

$$\Delta = \frac{(s^2(i) - s^2)}{s^2} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

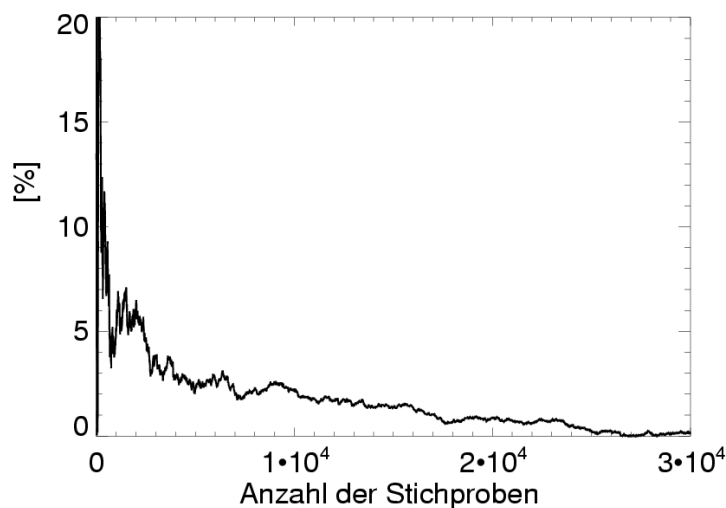


Abb. 3.7: Relativer Fehler der Gesamtvarianz zur Stichprobenvarianz

Aus der simulierten Datenbasis wurden 30.000 Eingabe- und Ausgabevektoren für das *training* verwendet. Die mittlere Abweichung (*RMSE*, siehe Kap. 3.2.2.1) beim Erzeugen des Neuronalen Netzes zum Ableiten des solaren Strahlungsflusses betrug 7% und die Korrelation zwischen der Netzausgabe und dem Testdatensatz 0,98.

3.2.2.1 Genauigkeit der Inversion

Mit dem Ziel, die erreichbare Genauigkeit des künstlichen Neuronalen Netzes einzuschätzen, wurde die Empfindlichkeit gegenüber der Beobachtungsgeometrie und dem Sonnenstand sowie gegenüber dem Radiometerrauschen untersucht.

Als Maß für die Genauigkeit des Verfahrens wurde der *RE* (relative Fehler), der *RMSE* (*root mean square error*) und der *BIAS* verwendet. Ist x' die abgeleitete Größe und x_R eine Referenzgröße, so ergibt sich der relative Fehler zu

$$RE = \frac{(x' - x_R)}{x_R} \quad (3.12)$$

Der *RMSE* wiederum, definiert als

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x' - x_R)^2}{n}} \quad (3.13)$$

ist ein Maß für die Variation der abgeleiteten Größe und einheitengleich zum abgeschätzten Parameter. Daher stellt er eine sehr anschauliche Größe für die erreichte Genauigkeit dar. Der *BIAS* beschreibt die mittlere Abweichung.

$$BIAS = \frac{\sum (x' - x_R)}{n} \quad (3.14)$$

Die Genauigkeit des Inversionsverfahrens wird mit zufällig ausgewählten Ergebnissen aus den Strahlungstransportsimulationen bestimmt. Der Vergleich wird nicht unmittelbar mit dem Strahlungsfluss durchgeführt, sondern mit der Albedo (A), die man unter Berücksichtigung des Sonnenzenitwinkels und der solaren Einstrahlung (S_0) berechnen kann:

$$A = S_0 F(\theta_0) \cos \theta_0 \quad (3.15)$$

Durch diese Umwandlung wird die direkte Abhängigkeit des Strahlungsflusses vom Sonnenzenitwinkel eliminiert.

Aus den 20.000 ausgewählten Simulationen wurden die Fehlergrößen *RMSE* und *BIAS* berechnet. Der Vergleich wird als eine Funktion des Sonnenzenitwinkels θ_0 und des Beobachtungszenitwinkels θ in Abbildung 3.8 dargestellt. Der *RMSE* liegt zwischen 1% und 4%, wobei die größte Abweichung bei hohen Sonnenzenitwinkeln auftreten. Der *BIAS* ist größtenteils Null und erreicht bei hohen Sonnenzenitwinkeln negative Werte, d.h. für hohe Sonnenzenitwinkel überschätzt die Inversion die Albedo bis zu 3%.

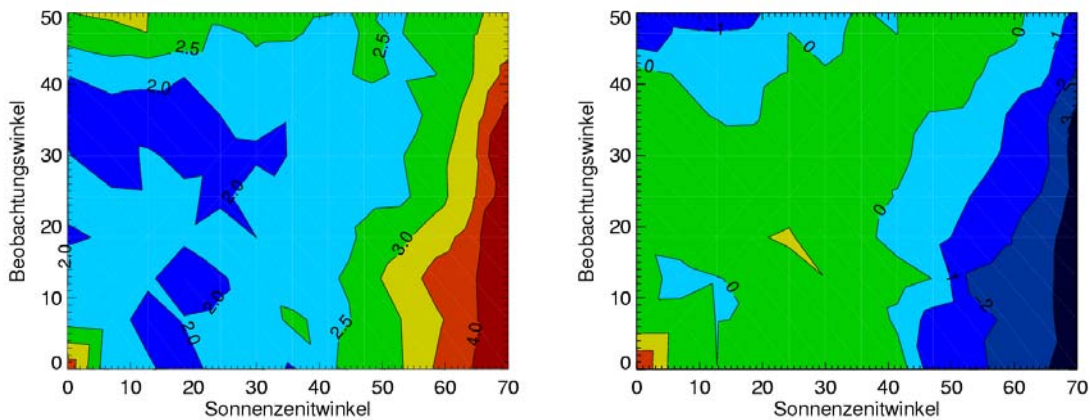


Abb. 3.8: Genauigkeit der Inversion dargestellt durch *RMSE* (links) und den *BIAS* (rechts) für die Ableitung der Albedo [%] als eine Funktion des Beobachtungswinkels θ und des Sonnenzenitwinkels θ_0

3.2.2.2 Empfindlichkeit gegenüber Radiometerrauschen

Um eine Aussage über die tatsächliche Genauigkeit eines Fernerkundungsverfahrens zu erzielen, muss das immer vorhandene Radiometerrauschen betrachtet werden. Es muss dabei zwischen verschiedenen Typen des Rauschens unterschieden werden. Neben dem signalunabhängigen Rauschen gibt es auch ein signalabhängiges Rauschen, welches am Detektor selbst entsteht. Als signalunabhängiges Rauschen ist typisch das Rauschen des Dunkelstroms zu nennen, welches hier vernachlässigt werden kann.

Das Rauschen wird quantitativ durch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) angegeben. Vor dem Start des Radiometers wurde das Rauschniveau der verschiedenen MODIS-Kanäle gemessen (Barbieri, 1997). Der Rauschbeitrag beträgt maximal 1,4% im Kanal 5 (1,24 μm) und minimal 0,1% im Kanal 8 (0,41 μm). In Tabelle 3.2 ist für die benutzten Kanäle das Signal-Rausch-Verhältnis angegeben. Zur Überprüfung der Empfindlichkeit des hier vorgestellten Verfahrens auf dieses Rauschen werden die gemessenen Rauschbeiträge zu den simulierten MODIS-Kanälen addiert. Dafür wird zuerst der Rauschwert (Δr_n) für jeden Kanal bestimmt und dann zu den simulierten Strahldichten (L_n) addiert.

$$\Delta r_n = \frac{L_n}{SNR} \quad (3.16)$$

$$L_{n,\Delta r} = L_n \pm \Delta r_n \quad (3.17)$$

Anschließend wird der Fehler (RE_n) des abgeleiteten Strahlungsflusses mit Radiometerauschen, bezogen auf den berechneten Strahlungsfluss ohne Rauschen, bestimmt.

$$RE_n = \frac{F_{\Delta r_n} - F}{F} \cdot 100\% \quad (3.18)$$

Die durchgeführte Empfindlichkeitsstudie zeigt, dass der Einfluss des Sensorrauschens sehr klein ist. Es wird auch keine Abhängigkeit zu der Intensität des abgeleiteten Strahlungsflusses beobachtet. In der Tabelle 3.2 ist der relative Fehler des abgeleiteten Strahlungsflusses durch Hinzufügen des Signalrauschens der einzelnen MODIS Bänder angegeben. Wenn alle Bänder verrauscht sind, beträgt der relative Fehler insgesamt 0,39%.

MODIS Band Nr.	Signal-Rausch-Verhältnis (1/SNR) in %	Fehler durch das Signalrauschen im aufwärtsgerichteten Strahlungsfluss in %
1	0,5	0,16
2	0,2	0,23
3	0,33	0,07
4	0,33	0,08
5	1,4	0,14
6	0,25	0,14
7	1,0	0,27
17	0,25	0,17
18	1,0	0,08
19	0,2	0,07

Tab.3.2: Reziprokes Signal-Rausch-Verhältnis in Prozent für die benutzten MODIS Kanäle (Xiong, 2006) und der berechnete Fehler

3.3 Anwendung des Verfahrens auf MODIS Daten

An einem Beispiel für einen MODIS-Überflug am 13. September 2001 soll die Anwendung des Verfahrens vorgestellt werden. Die benutzten MODIS L1b Daten beinhalten neben den Strahldichten die geographische Position der Pixel und die

Beobachtungsgeometrie. Mit Hilfe einer Land-See-Maske wird zunächst entschieden, ob es sich um eine Wasser- oder Landoberfläche handelt. Zusätzlich wird eine Wolkenmaske benutzt, um die bewölkten Pixel von den wolkenfreien Pixeln zu unterscheiden. Auf die durch diese Art vorselektierten Pixel kann der Strahlungsflussalgorithmus angewendet werden.

Die synoptische Situation zum Zeitpunkt des Beispiels:

Am 13.09.2001 bestimmt ein Tiefdruckgebiet mit Kern nördlich Großbritanniens mit seinem Frontensystem das Wettergeschehen Mitteleuropas. Wie auf der 850hPa-Wetterkarte (Abb. 3.9) zu erkennen ist, reicht eine Warmfront von der Nordsee bis zu den Alpen. Auf ihrer Vorderseite bildet sich konvektive Bewölkung mit starken Niederschlägen. Weitere Wolkenfelder werden durch einen Tiefdruckwirbel, welcher von Weißrußland nordnordwestwärts zum Seegebiet bei Stockholm wandert, verursacht.

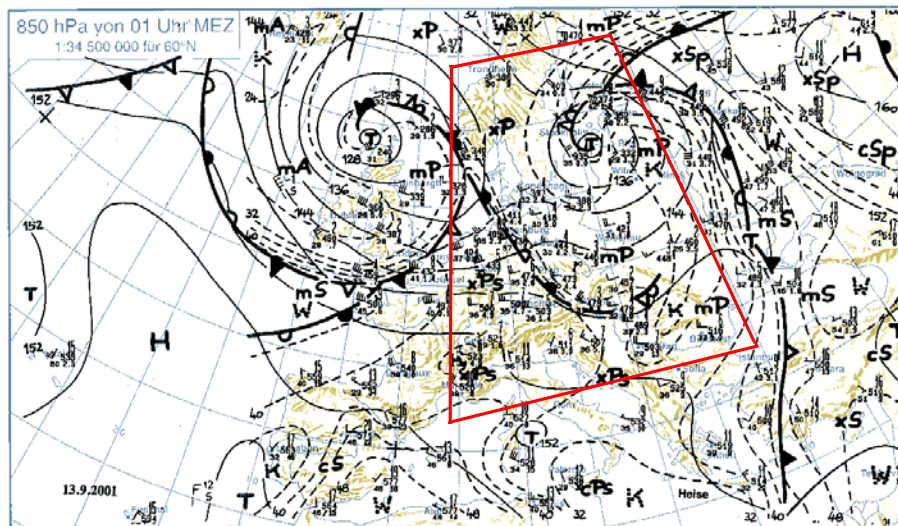


Abb. 3.9: 850 hPa Wetterkarte vom 13.09.2001 (aus Berliner Wetterkarte)

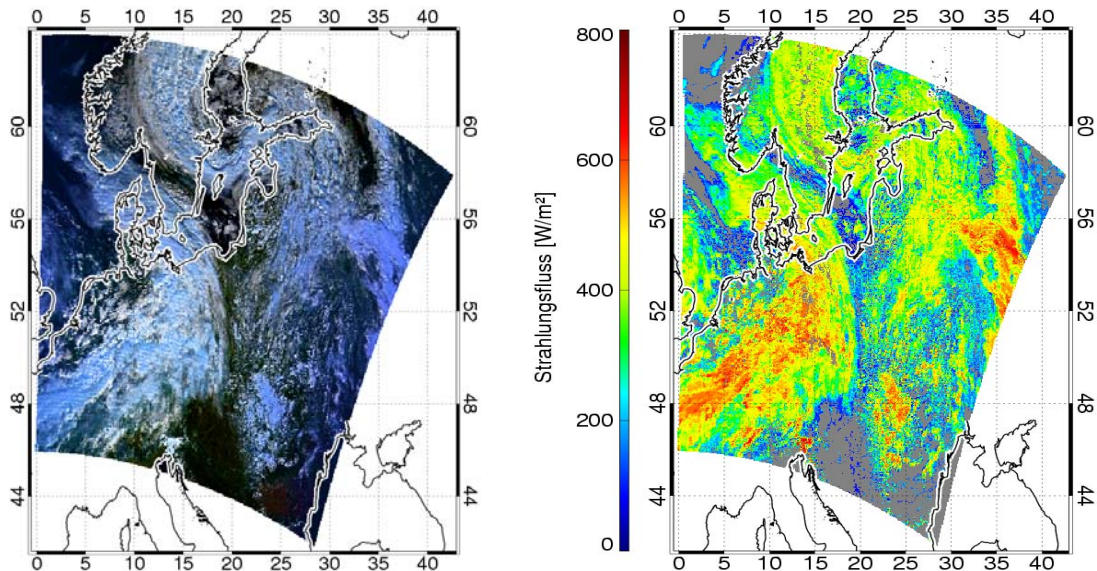


Abb. 3.10: MODIS Szene vom 13.09.2001. *Links*: Farbkomposit-Bild mit den MODIS Messungen der Strahldichten aus Band 1, Band 3 und Band 4; *Rechts*: Abgeleiteter Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre

Die Abbildung 3.10 zeigt auf der linken Seite eine RGB-Darstellung und auf der rechten Seite das Ergebnis des Ableitungsverfahrens für den aufwärtsgerichteten Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre über den Wolken. In der Abbildung (rechts) erscheinen die als nicht bewölkt klassifizierten Pixel in grau. Das ausgeprägte Tief über Nord-West-Europa mit seinem Wolkenband (Cu, Sc) bedeckt Nord-Europa mit starken Konvektionen im Warmsektor des Tiefs, die hohe aufwärtsgerichtete Strahlungsflusswerte aufweisen.

Wolkenmasken

Zur Unterteilung in wolkenfreie Pixel und bewölkte Pixel wurden zwei unterschiedliche Wolkenmasken benutzt. Die FUB-Wolkenmaske wurde für die klimatologischen Untersuchungen benutzt, da so die Datenbasis des Instituts für Weltraumwissenschaften verwendet werden konnte. Sie ist eines der im Rahmen des CLOUDMAP2 Projektes entwickelten Produkte (Stowe *et al.*, 1999). Die FUB-MODIS-Produkte sind nicht global, sondern überdecken Zentral-Europa. Für den Vergleich mit dem CERES-Instrument (siehe Kap. 4) wurde die MOD35 Wolkenmaske benutzt. Diese Wolkenmaske wurde von Ackermann *et al.* (1998) entwickelt.

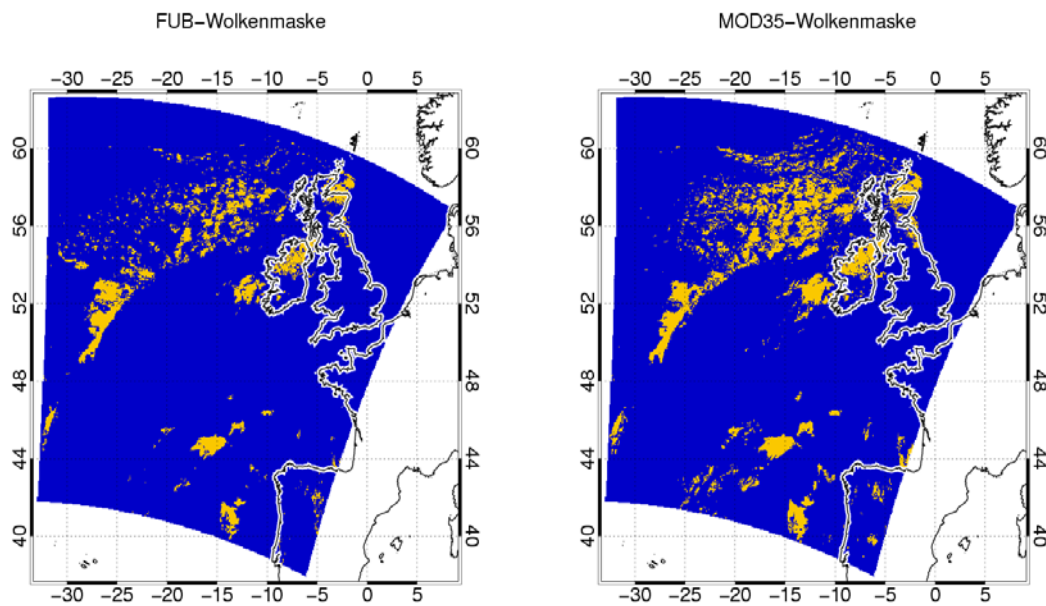


Abb. 3.11: FUB-Wolkenmaske (*links*) und MOD35-Wolkenmaske (*rechts*) für den 07.02.2002; *blau*: bewölktes Bildelement; *gelb*: wolkenfreies Bildelement

In Abbildung 3.11 sind die Wolkenmasken exemplarisch für den 7. Februar 2002 gegenübergestellt. Die FUB-Wolkenmaske hat weniger wolkenfreie Pixel als die MOD35 Wolkenmaske (siehe Tab.3.3). Die berechneten räumlichen Mittelwerte des aufwärtsgerichteten Strahlungsflusses für eine bewölkte Atmosphäre unterscheiden sich um 5 W/m^2 . Der Unterschied der räumlichen Mittelwerte verursacht eine Fehlerquelle von ungefähr 2,5%. Damit wird deutlich, dass bei klimatologischen Untersuchungen der Einfluss der Wolkenmaske zu beachten ist.

	FUB	MOD35
Anzahl der bewölkten Bildelemente	2981362	2818109
Anzahl der unbewölkten Bildelemente	214252	378685
räumlicher Mittelwert des aufwärtsgerichteten Strahlungsflusses [W/m^2]	224	229

Tab.3.3: Vergleich der Wolkenmasken für den MODIS-Überflug am 07.02.2002