

4 Validierung des Verfahrens

In den vorhergehenden Kapiteln wurde anhand theoretischer Daten gezeigt, dass aus Messungen in den 10 MODIS Kanälen der solare aufwärtsgerichtete Strahlungsfluss am Oberand der Atmosphäre berechnet werden kann.

In dem folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse eines Vergleichs mit realen Daten vorgestellt. Hierfür wurden die aus CERES-Messungen bestimmten solaren Strahlungsflüsse verwendet.

4.1 Die CERES-Produkte

Auf dem TERRA-Satelliten befinden sich zwei identische CERES Instrumente: Flugmodell (FM-1) und Flugmodell (FM-2). Jedes Instrument hat eine räumliche Auflösung von ungefähr 20 km im Nadir.

CERES arbeitet in drei Abtast-Modi: quer zur Flugspur des Satelliten (*cross-track*), entlang der Flugspur des Satelliten (*along-track*) und im *Rotating Azimuth Plane* (RAP). Im RAP-Modus rotiert das Instrument in der Azimut-Ebene und liefert damit Strahldichtemessungen für ein breites Spektrum von Beobachtungswinkeln.

Jeweils ein CERES Instrument läuft im *cross-track* Modus ähnlich wie die ERBE-Scanner, während das andere im *along-track* Modus oder im RAP Modus betrieben wird und damit neue Beobachtungswinkelmessungen gibt (siehe Abbildung 4.1). CERES misst in drei Kanälen das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht und die von der Erde emittierte thermische Strahlung: Es handelt sich dabei um einen kurzwelligen breitbandigen Kanal (0,3 - 5,0 μm) zur Messung des reflektierten Sonnenlichts, um einen langwelligen breitbandigen Kanal zur Messung der von der Erde emittierten Thermalstrahlung im 8-12 μm -Fenster und um einen breitbandigen Kanal im Bereich von 0,3 - 200 μm .

Um die angefangene Klimatologie fortzuführen, wird der solare Strahlungsfluss am Oberand der Atmosphäre mit einem Verfahren, dass im ERBE-Projekt entwickelt wurde, berechnet (Barkstrom, 1984, ES-8 Produkt). Weiterführend wurden neue Verfahren (SSF-Produkt) zur Berechnung des Strahlungsflusses erstellt. Durch die Benutzung von zwei CERES Messgeräten und der Kombination von Messungen mit anderen Instrumenten (z.B. MODIS), die Messungen der Wolkeneigenschaften und der Aerosole ermöglichen, wird eine erhöhte Genauigkeit erreicht.

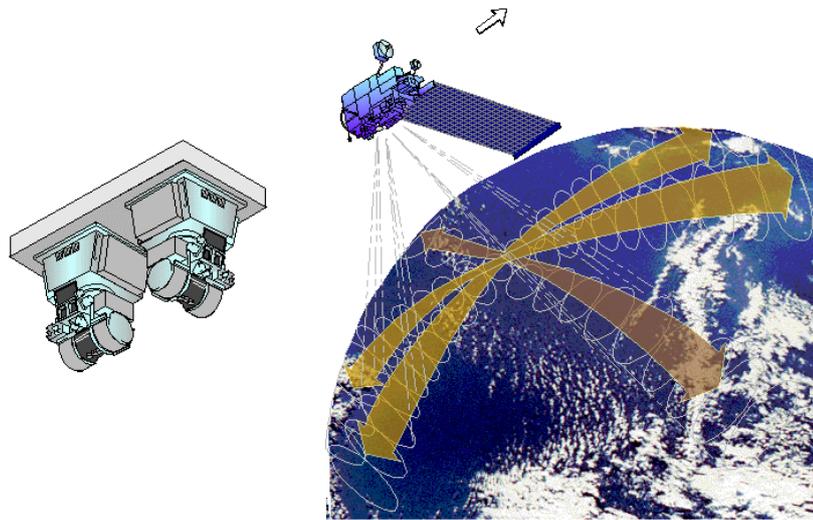


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der *cross-track* und *along-track* Abtastung von CERES (ATBD)

Für den Vergleich wird der solare Strahlungsfluss aus dem CERES/TERRA FM-1 ES-8 Datensatz sowie CERES/TERRA FM-1 SSF 2A und 2B Datensatz verwendet.

Um aus den gemessenen Strahldichten den Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre abzuleiten, werden Anisotropie-Modelle benutzt (siehe Kapitel 3.1). Diese sind abhängig von der Beobachtungsgeometrie, dem Bodentyp und dem atmosphärischen Zustand.

Das ADM wird definiert aus einer Fassung Anisotropiekorrekturfaktoren für spezielle Szenen und deren Beobachtungsgeometrie. Die drei benutzten Datensätze beruhen auf unterschiedlichen ADMs.

Die ES-8 Daten sind mit dem empirischen ADM, welches für ERBE entwickelt wurde, berechnet (Barkstrom, 1984).

Die Szenen werden in 12 Klassen unterteilt. Zuerst wird der Untergrund nach seinem geographischen Typ klassifiziert: Land, Ozean, Schnee, Wüste oder Land-Ozean Mischung für ein $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ Gitter.

Danach werden vier Wolkenklassen (wolkenfrei, 5-50% bewölkt, 50-95% bewölkt, bedeckt) mit der *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) Methode bestimmt (Wielicki und Green, 1989). Sie benutzt die Eigenschaft der Wolken, kalt und hell zu sein. Für ein gemessenes kurzwelliges und langwelliges Strahldichtepaar wird aus einer *a priori* Statistik, welche aus einer Klassifizierung der Nimbus-7 Messungen entwickelt wurde, die Wolkenklasse bestimmt.

Die Messungen des CERES-Instrumentes auf TRMM über den Tropen wurden benutzt,

um ein komplexeres ADM (Beta2-TRMM) zu erzeugen (Loeb, 2003a,b). Dieses ADM wurde erst einmal für die Ableitung des CERES-TERRA Edition 1A SSF Produktes verwendet, während ein neuer Satz an globalen ADMs für Terra entwickelt wurde. Der neue globale CERES/TERRA ADM Satz basiert auf 32 Monate CERES-TERRA Edition 1A SSF Messungen. Dieser wurde zum Erzeugen der Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre für das CERES-TERRA Edition 2A Produkt benutzt. Das ADM wird aktuell von Loeb (2005) und anderen Wissenschaftlern aus den aktuellen CERES-Messungen auf TERRA immer wieder verbessert. Der aktuelle Satz von ADM fließt in die Edition 2B ein, so dass in Zukunft weitere neue Ergebnisse vorliegen werden. Für den Vergleich wurden Edition 2A und 2B verwendet.

Gegenüber den ERBE ADMs bestehen die Szenen z.Z. aus max. 602 Klassen. Die Szenen für das SSF Produkt beruhen auf der Kombination der CERES-Messungen mit den räumlich und spektral höher aufgelösten MODIS-Messungen. Hierfür werden in dem Sichtbereich einer CERES-Messung die jeweiligen MODIS-Pixel zugeordnet (siehe Abb. 4.2). Jeder MODIS-Pixel ist mit einem Untergrundtyp definiert. Die zugeordneten Untergrundtypen beruhen auf der IGBP (*International Geosphere Biosphere Program*) Einteilung, wobei CERES die Untergrundtypen in 20 Klassen separiert. Desweiteren werden die Wolkenparameter von MODIS benutzt, um die Wolkenklassen festzulegen. Ein wesentlicher Unterschied zu der ERBE-Klassifizierung ist die Berücksichtigung der Wolkenparameter wie z.B. die optische Dicke der Wolke. Die Klassen der MODIS-Pixel in einem CERES-Messpunkt werden mit Hilfe der *Point Spread Function* (PSF, siehe Abb. 4.3 und Anhang A) von CERES gewichtet.

Die erzeugten Klassen einer Szene wurden den entsprechenden ADMs zugeordnet. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Schritte ist unter anderem in Geier *et al.* (2003) für die benutzten Produkte gegeben.

4.2 Vergleich des hochauflösenden Strahlungsflusses aus MODIS mit CERES

Zunächst wird ein Überblick über die Vergleichsstrategie gegeben, bevor sie im Einzelnen erläutert und die Ergebnisse des Vergleiches diskutiert werden.

Da beide Instrumente (MODIS und CERES) sich auf dem gleichen Satelliten befinden, werden die Unterschiede der Beobachtungsgeometrie vernachlässigt. Um den abgeleiteten Strahlungsfluss aus MODIS Messungen mit den Produkten der CERES Messungen zu vergleichen, muss die unterschiedliche räumliche Auflösung berücksichtigt werden.

In Abbildung 4.2 ist schematisch ein Sichtfeld eines CERES-Messpunktes dargestellt. In

Wirklichkeit befinden sich noch mehr MODIS-Bildelemente in einem CERES-Sichtfeld. Um künstlich die Auflösung von MODIS auf eine CERES-Auflösung zu verschlechtern, wurde mit Hilfe der *Point Spread Function* von CERES jedes Bildelement der MODIS-Messung gewichtet. Hierzu wurde jedes Bildelement als ein zentrales Bildelement in dem CERES-Sichtfeld betrachtet und diesem seine benachbarten Bildelemente zugeordnet. Im nächsten Schritt wurde zu jedem CERES-Messpunkt der dichteste MODIS-Messpunkt ausgewählt. Als ein zusätzliches Auswahlkriterium wurde die Wolkenmaske von MODIS (MOD-35) verwendet, um nur solche CERES-Messpunkte auszuwählen, die komplett bewölkt waren.

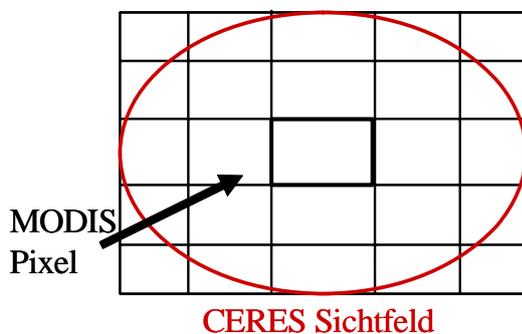


Abb. 4.2: Schema eines Blickfeldes von CERES mit angeordneten MODIS Pixeln

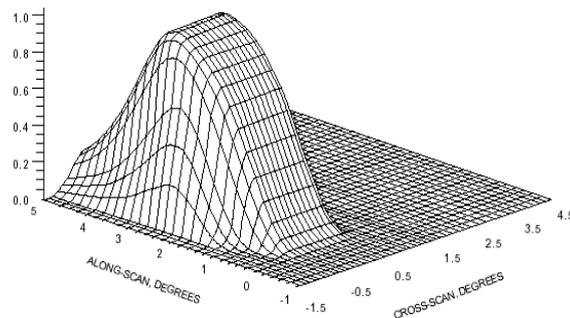


Abb. 4.3: PSF-CERES 2-dim Bessel-Funktion (Smith, 1994)

Integration über CERES Sichtfeld (FOV):

Um den Strahlungsfluss aus MODIS Messungen mit CERES Messungen zu vergleichen, werden MODIS - Messpunkte (x) in dem jeweiligen CERES-Sichtfeld mit der PSF gewichtet und über diesem integriert. Der gewichtete Durchschnittswert \bar{x} ist gegeben durch:

$$\bar{x} = \int_{FOV} w(\delta, \beta) x(\delta, \beta) d\delta d\beta \quad (4.1)$$

wobei $w(\delta, \beta)$ das berechnete Gewicht aus dem Integral der PSF über einem Winkelpaar berechnet wird (siehe Anhang A). δ und β sind die Koordinaten eines MODIS-Messpunktes in dem CERES-Sichtbereich. Die PSF ist mit den Instrumentöffnungswinkeln δ

und β definiert, da der Sichtbereich im sphärischen Raum konstant bleibt. Hingegen wächst der Sichtbereich am Boden vom Minimum im Nadir zu einer großen Fläche bei flachen Beobachterwinkeln. Bei einer ovalen Fläche beträgt die Länge und Breite im Nadir-Bereich für TERRA 38x31km, und für einen Beobachterwinkel von 70° wächst die Länge und die Breite bis zu 253x70km an.

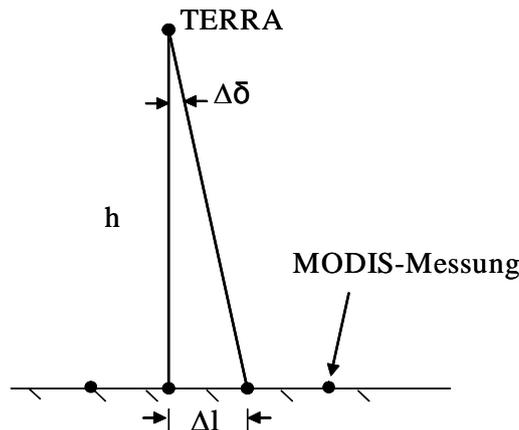


Abb. 4.4: Schema für die Einteilung des CERES-Sichtbereichs in ein δ - β Gitter

Der CERES-Sichtbereich wurde nun in ein δ - β Gitter aufgeteilt. Das Gitter wurde für die Nadir Messungen erzeugt (siehe Skizze 4.4). Für TERRA beträgt $h = 705$ km und MODIS $\Delta l = 1$ km, so dass

$$\Delta\delta = \tan\left(\frac{\Delta l}{h}\right)^{-1} = 0,08^\circ \text{ ist. Mit}$$

$\Delta\delta = 0,08^\circ$ und $\Delta\beta = 0,08^\circ$ sind die Gitterabstände definiert. Weiterhin wird angenommen, dass innerhalb einer Gitterbox die MODIS-Messung $x(\delta, \beta)$ konstant ist.

Diese Integration wurde für den abgeleiteten Strahlungsfluss sowie für

die MODIS Wolkenmaske durchgeführt, um die gewichteten Durchschnittswerte für die CERES-Auflösung zu bestimmen.

In der folgenden Abbildung 4.5 ist exemplarisch der solare Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre am 10. Februar 2002 für die Nordhemisphäre dargestellt.

Die linke Abbildung zeigt den Strahlungsfluss aus MODIS-Messungen. Die rechte Abbildung zeigt das Ergebnis der Wichtung der MODIS-Bildelemente mit der CERES-PSF.

Die als Auswahlkriterium benutzte Wolkenmaske (MOD35) von MODIS wurde ebenfalls mit der PSF gewichtet.

Die in der Abbildung 4.6 dargestellte gewichtete Wolkenmaske veranschaulicht den Bedeckungsgrad des CERES-Sichtbereiches für das jeweilige zentrale MODIS-Bildelement. Werte kleiner Eins sind nicht komplett im CERES-Sichtbereich bewölkt. Für den Vergleich des abgeleiteten solaren Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre aus MODIS-Messungen mit CERES-ES8 und SSF Daten werden nur vollständig im CERES-Sichtbereich bewölkte MODIS-Bildelemente ausgewählt (Siehe Abb. 4.6, rechts).

Als Ergebnis des ganzen Prozesses steht dann der Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre in der Auflösung des CERES-Instrumentes zur Verfügung.

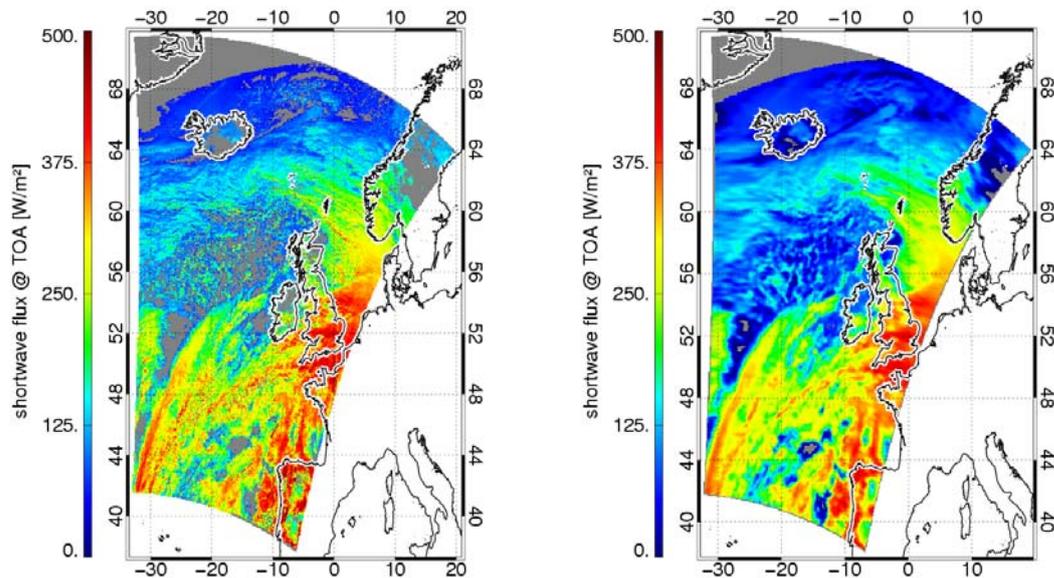


Abb. 4.5: Überflug von MODIS am 10.02.2002. Links: abgeleiteter Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre, Rechts: mit der CERES PSF gewichteter Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre.

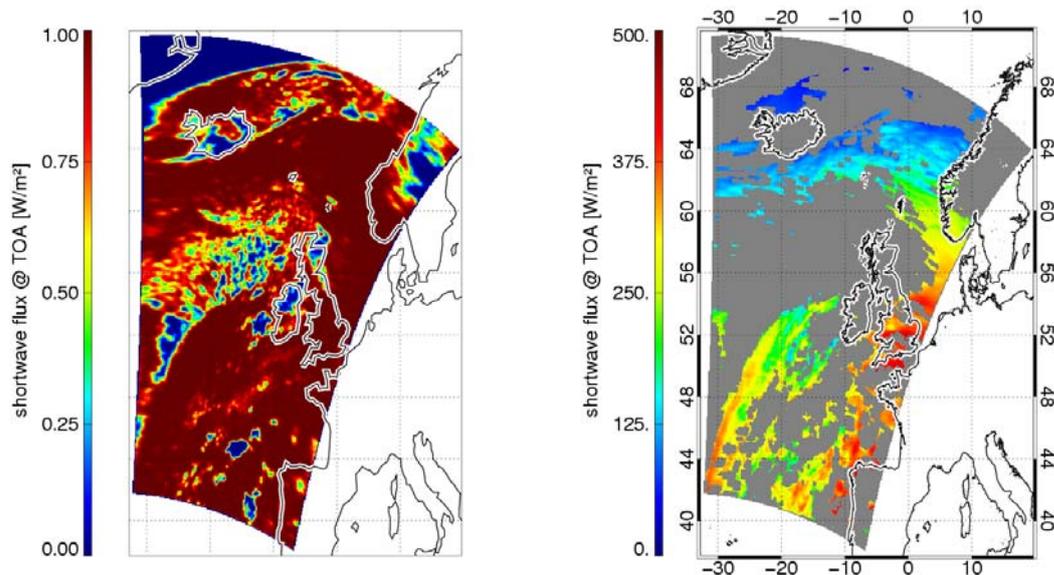


Abb. 4.6: Überflug MODIS am 10.02.2002 Links: mit der CERES PSF gewichtete MOD35 Wolkenmaske, Rechts: der gewichtete Strahlungsfluss für Wolkenmaske gleich eins.

4.3 Ergebnisse der Validierung

Die Genauigkeit der benutzten CERES-Produkte ergibt sich aus dem Kalibrationsfehler und dem Fehler für die Umrechnung der gemessenen Strahldichten in den Strahlungsfluss. Hierbei ist wichtig, welches ADM zugrunde liegt. Wielicki *et al.* (1995) schätzten für die CERES-Instrumente einen Kalibrationsfehler von $3,0 \text{ W/m}^2$ und einen Umrechnungsfehler mit einem neu entwickelten CERES-ADM von $12,5 \text{ W/m}^2$. Insgesamt wird für den augenblicklichen Strahlungsfluss ein Fehler von $12,9 \text{ W/m}^2$ angegeben.

In der Tabelle 4.1 sind die aus der Literatur abgeschätzten Fehler zusammengefasst. Bei der Angabe von Fehlern wird immer in wolkenfreie Fälle und alle Fälle unterschieden. Für ausschließlich Wolkenfälle werden keine Fehlerangaben gemacht.

Loeb *et al.* (2003b) haben für die CERES-Messungen auf dem TRMM-Satelliten für das SSF-Produkt einen Fehler von $10,3 \text{ W/m}^2$ und für das Produkt mit dem ERBE-ADM einen Fehler von $24,4 \text{ W/m}^2$ berechnet und damit eine deutliche Verbesserung mit dem entwickelten CERES-ADM erzielt.

Sowohl der absolute Fehler (um einen Faktor zwei) als auch die Streuung sind verringert. Die Verbesserung des CERES-ADM vom SSF2A zu dem SSF2B Produkt ist momentan noch Untersuchungsgegenstand, und deshalb gibt es bisher keine Fehlerabschätzung.

| | gesamt | | wolkenfrei | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | ERBE-ADM | CERES-ADM | ERBE-ADM | CERES-ADM |
| ERBE/CERES Wielicki <i>et al.</i> (1995) | $37,5 \text{ W/m}^2$ | $12,9 \text{ W/m}^2$ | | |
| TRMM, Loeb <i>et al.</i> (2003b) | $24,4 \text{ W/m}^2$ | $10,3 \text{ W/m}^2$ | $12,3 \text{ W/m}^2$ | $8,7 \text{ W/m}^2$ |
| TERRA, für die mittleren Breiten Wielicki <i>et al.</i> (1996) | | $13,5 \text{ W/m}^2$ | | $7,3 \text{ W/m}^2$ |
| Tab.4.1: Fehlerabschätzung für den augenblicklichen solaren Strahlungsfluss | | | | |

Der Vergleich wurde aus 12 Überflugterminen über der Nordhemisphäre aus dem Jahr 2002 zusammengestellt.

Für jeden Monat wurde ein Tag gewählt, damit die Spannbreite der jährlichen Schwankung des solaren Strahlungsflusses mit erfasst wird. In den Abbildungen 4.7, 4.8 und 4.9 ist der Vergleich als Streudiagramm und Histogramm wiedergegeben.

Bei Auswertung der Histogramme ist eine qualitative Entwicklung der CERES-Produkte erkennbar. In Abb. 4.9 ist bei den MODIS-Messungen eine höhere Anzahl von niedrigen Strahlungsflüssen sichtbar. Diese Verschiebung der Häufigkeitsverteilung wird auch im *BIAS* deutlich (Tab. 4.2).

Die erwähnte Abnahme der Streuung durch die Verbesserung des ERBE-ADM zu CE-

RES-ADM wird auch in diesem Vergleich deutlich. Die Standardabweichung der Differenz für die untersuchten Bildelemente beträgt mit dem ES8-Produkt $37,9 \text{ W/m}^2$ und mit den SSF2B-Produkt $29,7 \text{ W/m}^2$ (Tab. 4.2).

Es ist zu erkennen, dass auch unter Berücksichtigung der Fehlerangaben eine leichte Unterschätzung des abgeleiteten Strahlungsflusses aus MODIS-Messungen zu beobachten ist. Hierbei ist angenommen worden, dass der Fehler der Wolkenerkennung und die unterschiedlichen Beobachtungswinkel der Instrumente vernachlässigt werden können.

Zusammenfassend sind die Fehlerquellen des Vergleichs:

- Unsicherheiten durch die Wolkenmaske (MOD35)
- Fehler durch die Umrechnung der MODIS-Bildelemente auf die CERES Auflösung

Die Wolkenmaske von MODIS (MOD35) ist generell konservativ für wolkenfreie Fälle. Dies bedeutet, dass sie eher wolkenfreie Fälle als bewölkte missklassifiziert. Eine solche Missklassifizierung würde in den meisten Fällen bei der Mittelung der MODIS Bildelemente zu einer Unterschätzung führen. Insgesamt zeigt der Vergleich die Funktionsfähigkeit des Verfahrens für MODIS Messungen.

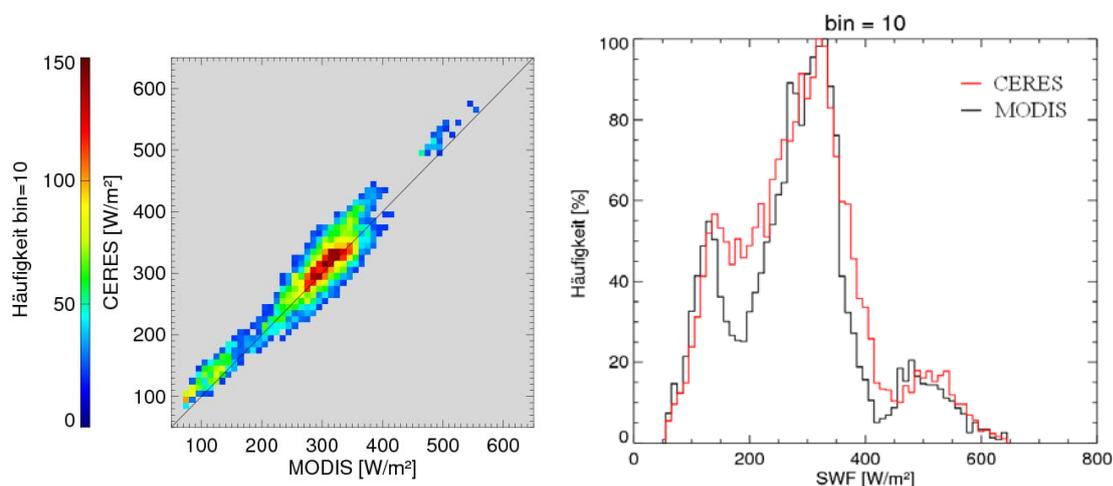


Abb. 4.7: Links: Streudiagramm des CERES ES-8 Produktes und dem aus MODIS-Messungen abgeleiteten Strahlungsfluss, Anzahl der Bildelemente 23528; Rechts: Histogramm

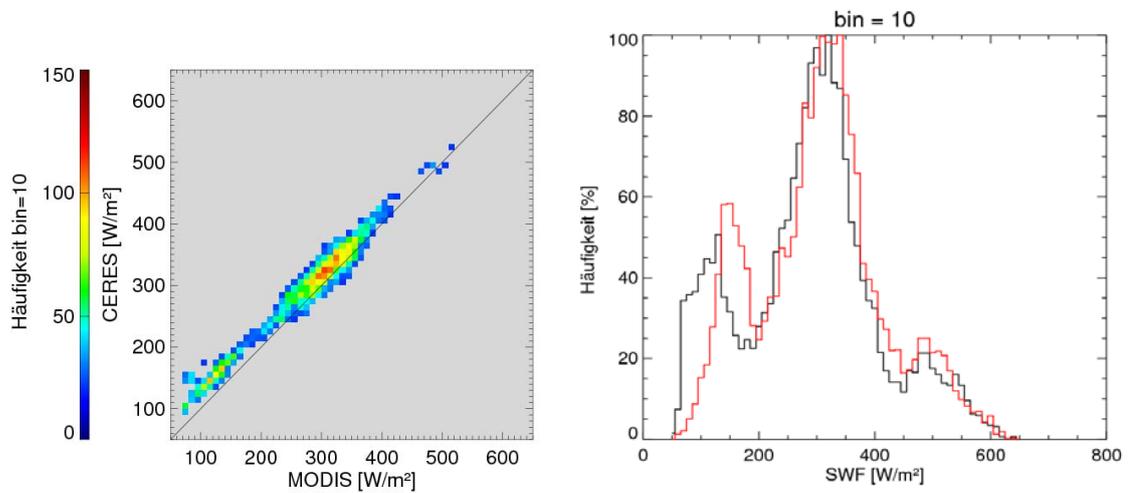


Abb. 4.8: Links: Streudiagramm des CERES SSF-2A Produktes und dem aus MODIS-Messungen abgeleiteten Strahlungsfluss, Anzahl der Bildelemente 11805; Rechts: Histogramm

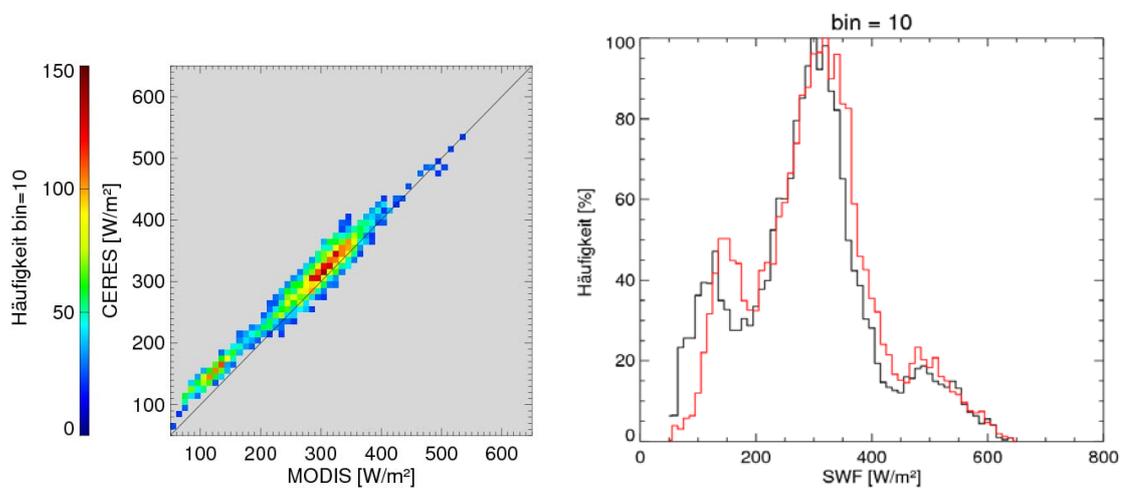


Abb. 4.9: Links: Streudiagramm des CERES-SSF2B und dem aus MODIS-Messungen abgeleiteten Strahlungsfluss, Anzahl der Bildelemente 14062; Rechts: Histogramm

| | ES-8 | SSF 2A | SSF 2B |
|-------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| BIAS | -6,9 W/m ² | -18,25 W/m ² | -15,54 W/m ² |
| RMSE | 37,9 W/m ² | 31,68 W/m ² | 29,7 W/m ² |
| Korrelation | 0,96 | 0,97 | 0,98 |

Tab.4.2: Ergebnisse der Validierung des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung des aufwärtsgerichteten Strahlungsflusses mit MODIS-Messungen anhand von CERES-Messungen