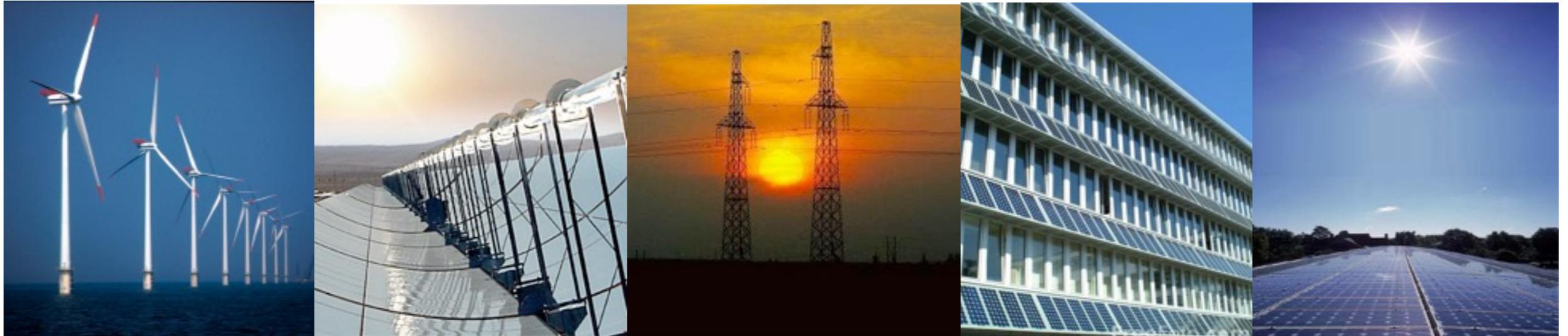

Bestimmung von Solarenergie-Ressourcen

Ein methodischer Überblick



Konferenz 'Energiewirtschaften Norddeutschland'
Hamburg, 17. Juli 2017

Detlev Heinemann

Energy Meteorology Group
Institute of Physics
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Inhalt

- ▶ Energiemeteorologie
- ▶ Bedeutung von Information über Solarenergie-Ressourcen
- ▶ Wodurch sind Solarenergie-Ressourcen bestimmt?
- ▶ Quellen für Solarenergie-Ressourcen:
 - ▶ Satellitendaten
 - ▶ Numerische Modelle
 - ▶ bodengestützte Messungen

Energiemeteorologie

konventionelle
Energien



- ▶ Verfügbarkeit des 'Brennstoffs' bekannt (wenn auch endlich...)
- ▶ Energieflüsse nahezu beliebig einstellbar

erneuerbare
Energien



- ▶ Nahezu unendliche Energiequelle
- ▶ Verfügbarkeit des 'Brennstoffs' unsicher und nur im Mittel gut bekannt

Energiemeteorologie

Direkter Einfluss der Meteorologie auf:

- ▶ **Planung künftiger Kraftwerke**

genaue Kenntnis der potenziell verfügbare Energie aus erneuerbaren Quellen an einem bestimmten Standort („Resource assessment“)

- ▶ **Wirtschaftlicher Betrieb dieser Anlagen**

genaue Vorhersagen über das aktuelle Energieangebot

- ▶ **Entwicklung kommender Generationen von Systemen und Technologien**

detaillierte Spezifikation der relevanten meteorologischen Bedingungen

Beispiele: Turbulenz -> mechanische Lasten bei WEA

Spektrum der Solarstrahlung -> Photovoltaik

Bedeutung von Solarenergie-Ressourcen

- ▶ Zuverlässige Information über die Solarenergie-Ressource ist essentiell für alle Solarenergie-Anwendungen
- ▶ Investitionsentscheidungen erfordern sorgfältige ökonomische Analyse
- ▶ Für Solarenergie-Projekte stellt die Variabilität der Solarstrahlung die grösste Unsicherheit in der Bestimmung der erwarteten Leistung eines Solarstrom-Kraftwerks dar.

Informationen über Solarenergie-Ressourcen werden in folgenden drei Phasen eines Solarenergie-Projektes benötigt:

- ▶ Historische Langzeitdaten für die Standortauswahl
- ▶ Bestimmung der Energieproduktion von Solar-Kraftwerken für Systemdesign und Projekt-Finanzierung
- ▶ Echtzeit-Messungen und Vorhersagen für Anlagenbetrieb und Netzintegration

Welche Ressourcen-Informationen werden benötigt?

Langzeitmittelwerte

Standortauswahl, ökonomische
Bewertung

Schwankungen auf verschiedenen
Zeitskalen: saisonal, täglich

Netzintegration, Kopplung mit
Speichern

Variabilität (Raum, Zeit)

Verteilnetze

spektrale Information

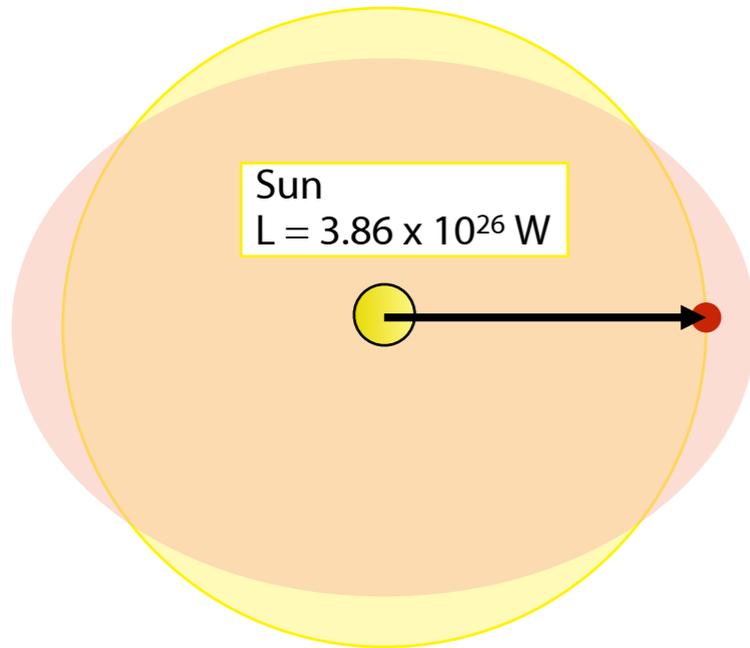
Photovoltaik

Wodurch werden Solarenergie-Ressourcen bestimmt?

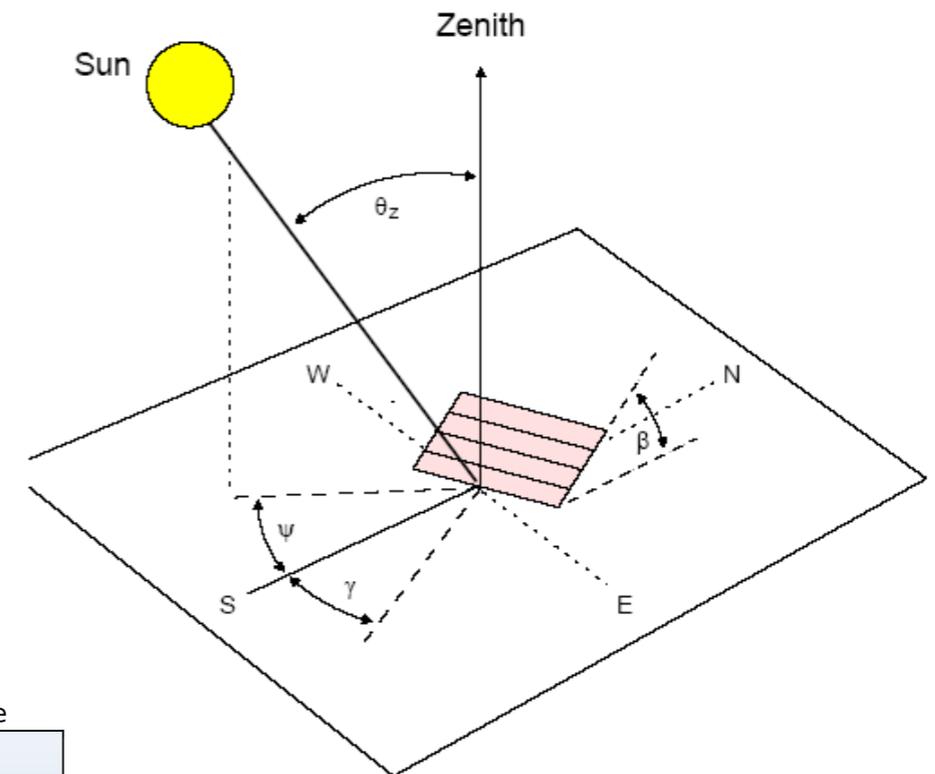
- ▶ **Deterministische Einflüsse**
 - ▶ Solarkonstante
 - ▶ Sonnenstand
 - ▶ permanente atmosphärische Gase
- ▶ **Variable (teilweise stochastische) Einflüsse**
 - ▶ Bewölkung
 - ▶ Aerosole
 - ▶ Wasserdampf, Ozon
- ▶ **Anlagenspezifische Einflüsse**
 - ▶ Schneebedeckung
 - ▶ Abschattung
 - ▶ Verschmutzung

Deterministische Einflüsse auf Solarenergie-Ressourcen

Solarkonstante und Sonnenstand



Extraterrestrische Solarstrahlung

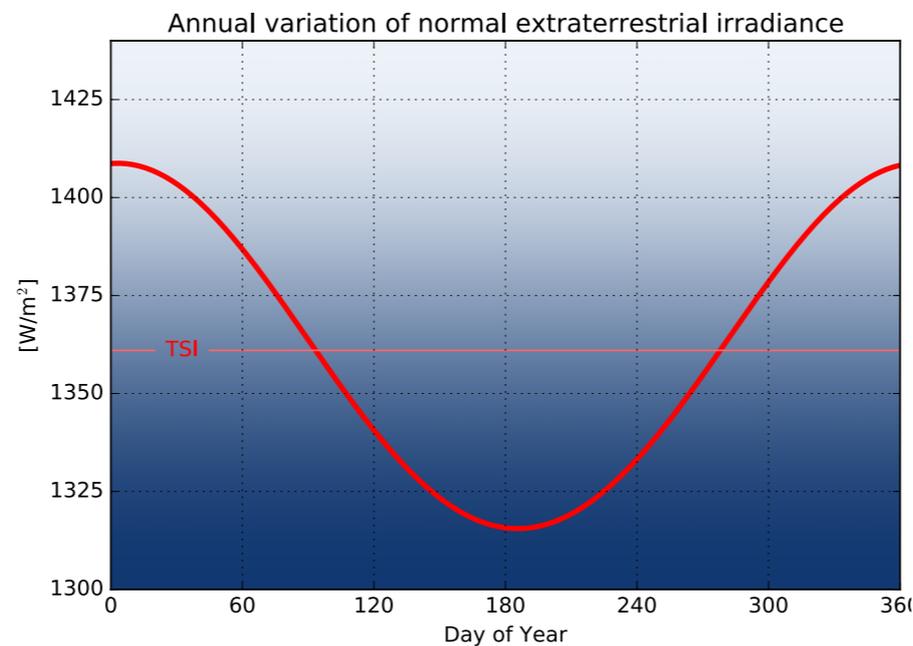


Geometrie zwischen Empfänger und Sonne
 θ : angle of incidence

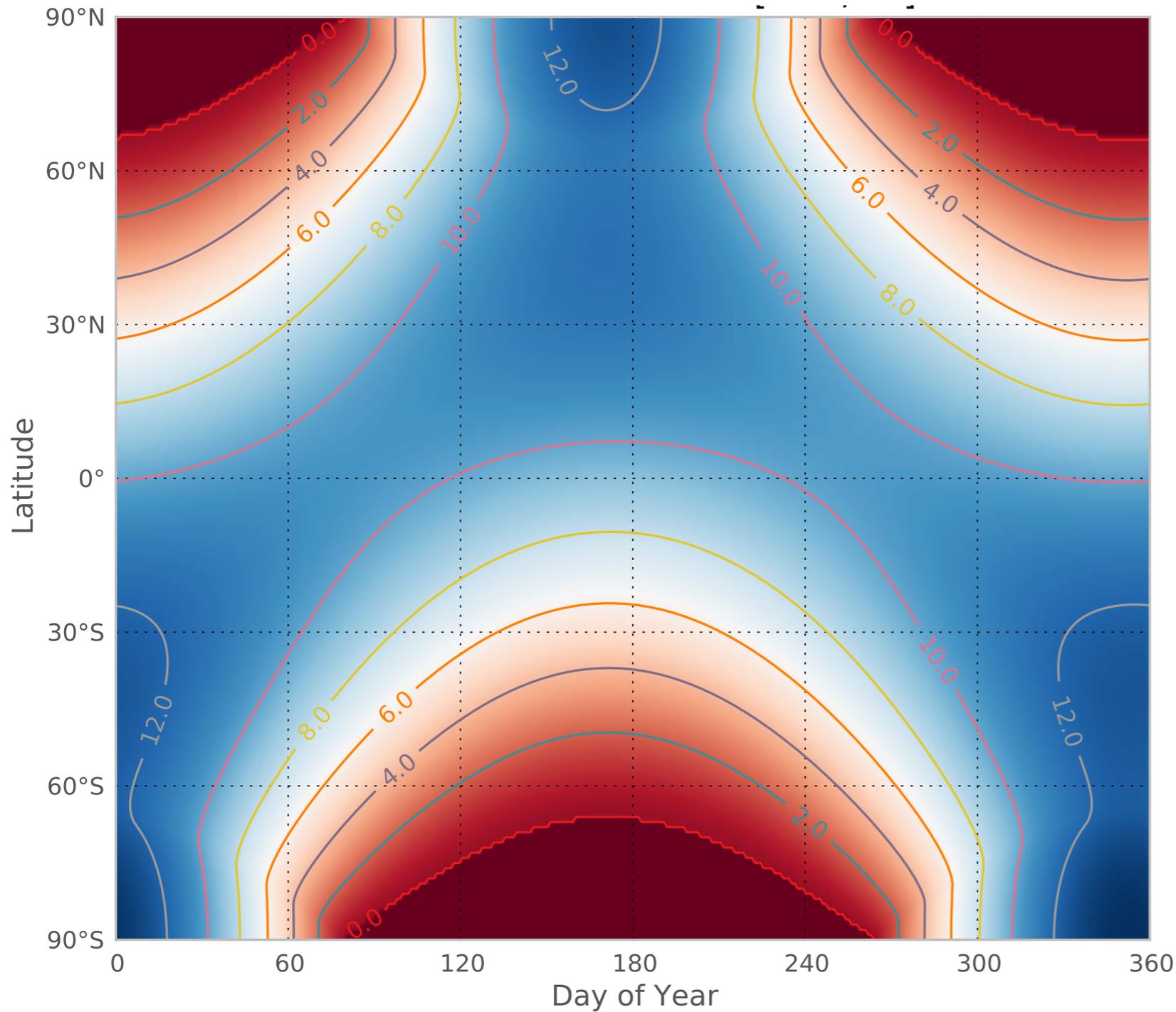
Solarkonstante

Total Solar Irradiance (TSI)

1361 Wm^{-2}

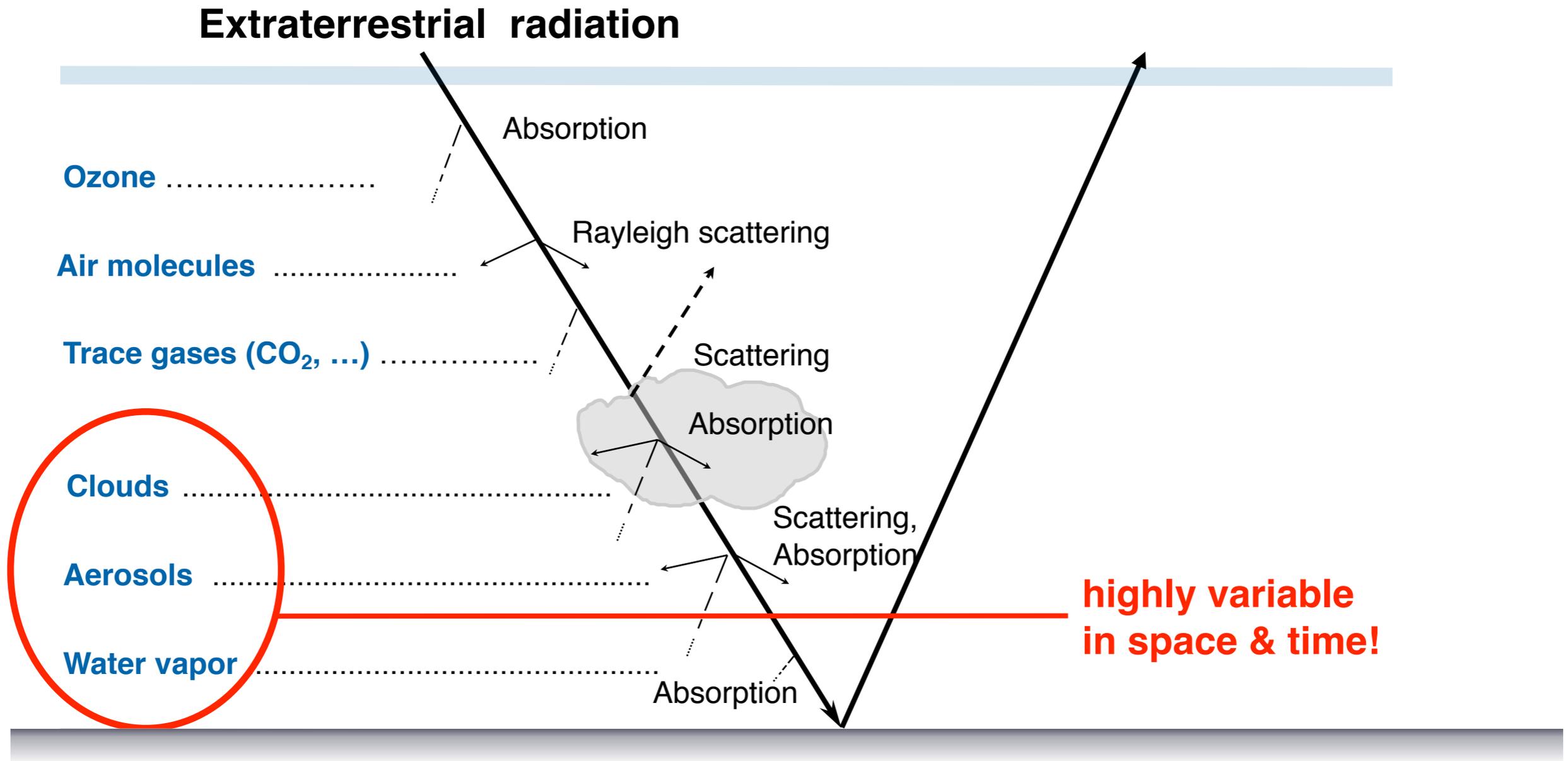


Extraterrestrische Solarstrahlung



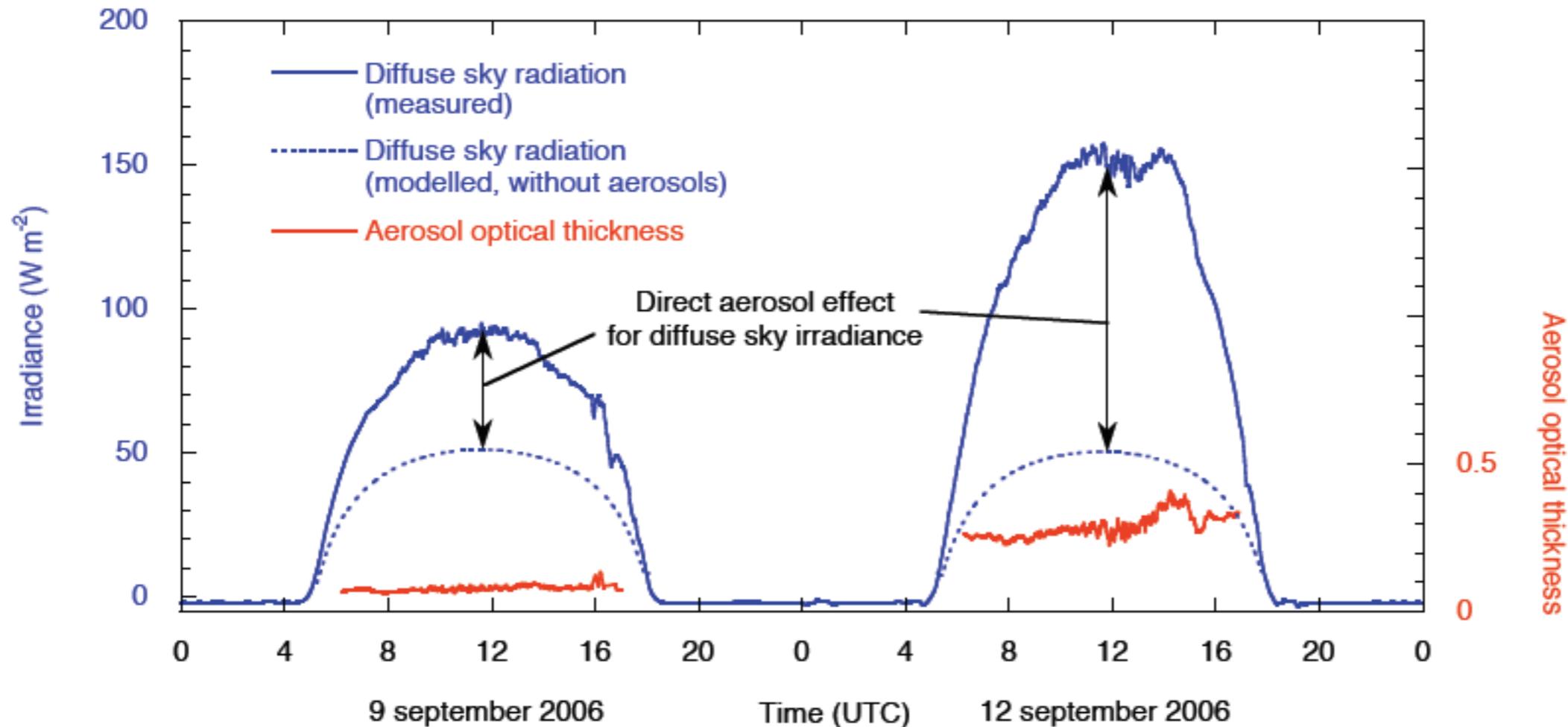
Tagessummen der extraterrestrischen Einstrahlung auf eine horizontale Fläche [kWh/m²]

Atmosphärische Extinktionsprozesse



Aerosole

Einfluss auf Diffusstrahlung

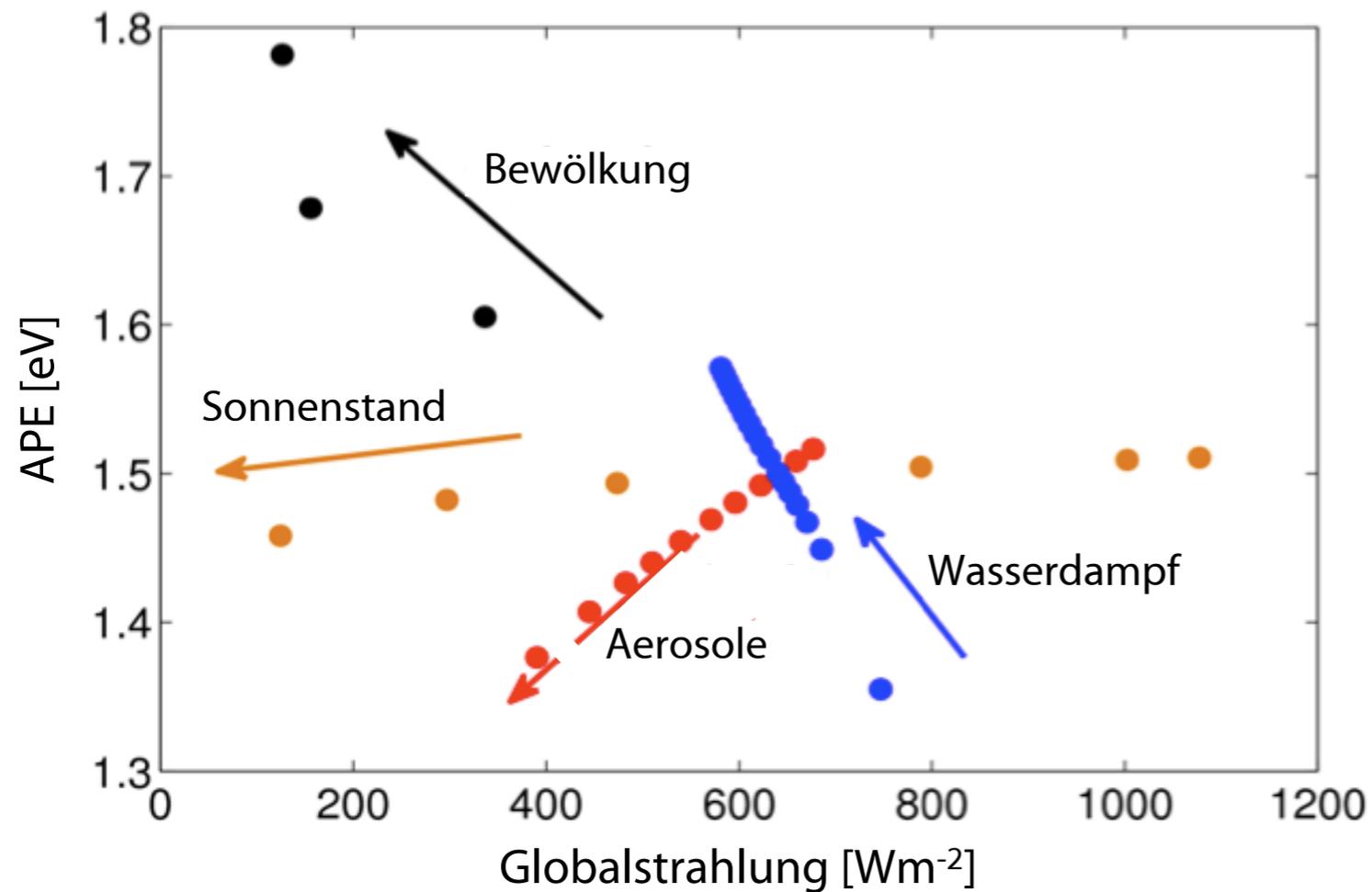


Measurements of diffuse sky radiation and aerosol optical thickness made at BSRN Cabauw, NL, compared to radiative transfer calculations for Rayleigh atmospheres with added water vapour

Quelle: Knap et al. (KNMI), 2006

Spektrale Solarstrahlung

Sensitivität bzgl. atmosphärischer Bedingungen



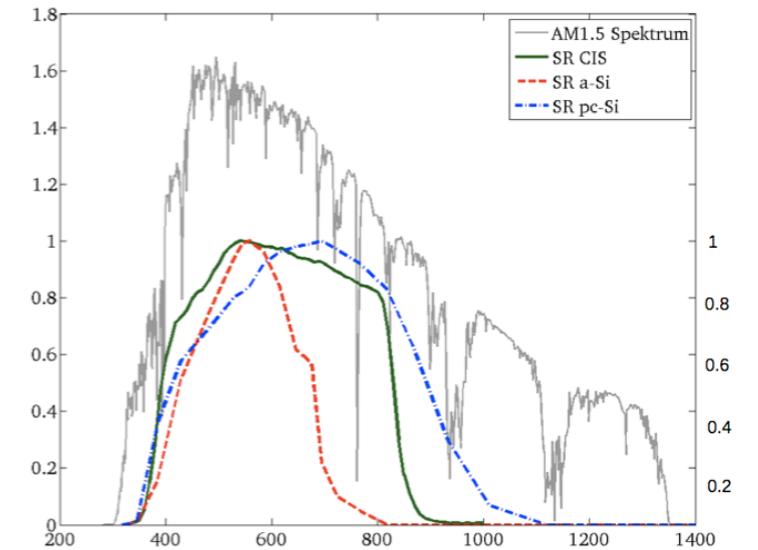
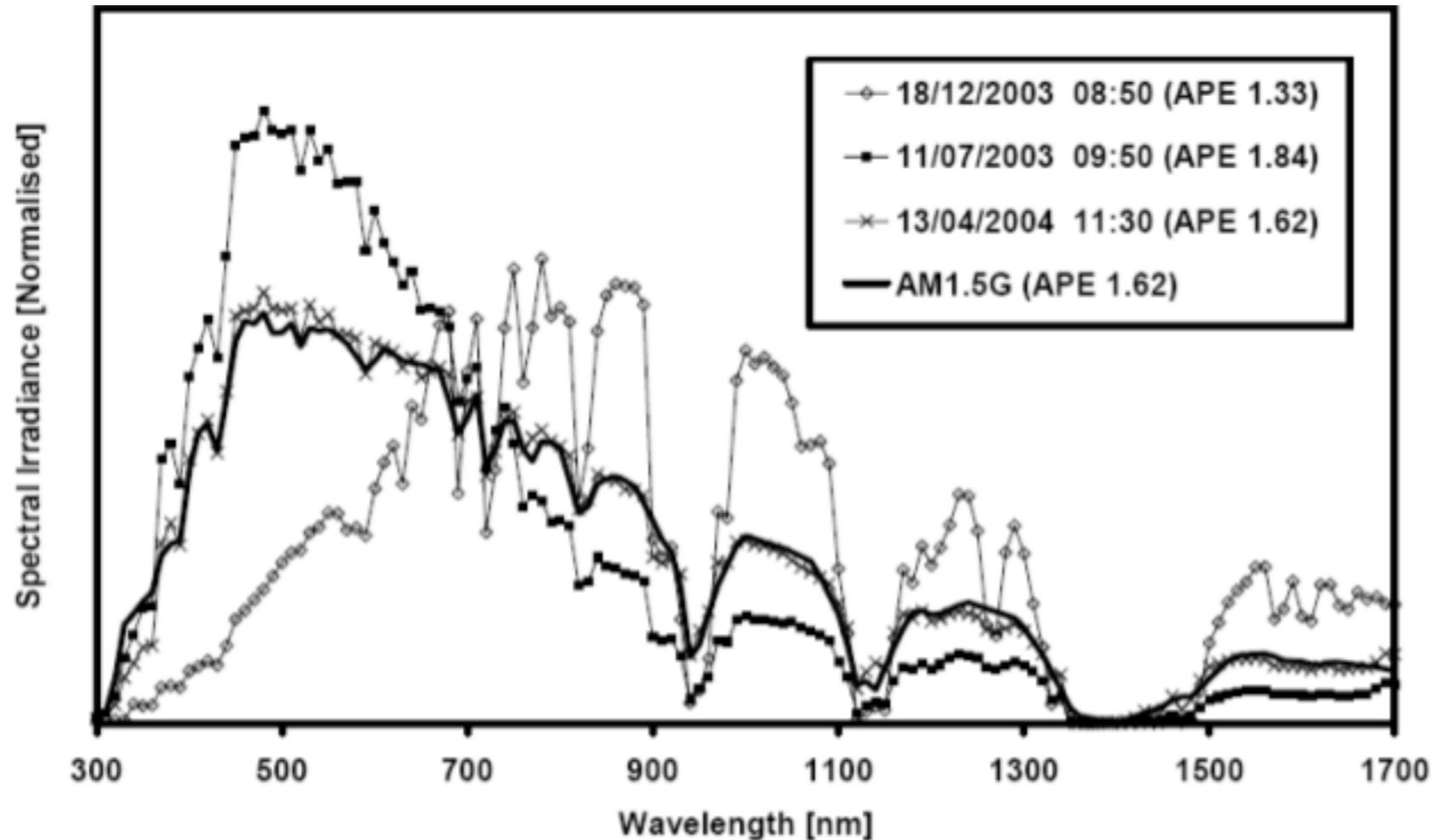
Clouds, water vapor:
shift to shorter wavelengths

Aerosols, air mass:
shift to longer wavelengths

from radiative transfer calculations
(libRadtran)

Spektrale Solarstrahlung

Photovoltaik



Normiertes Spektrum der Globalstrahlung im Vergleich mit einem AM1.5G-Spektrum

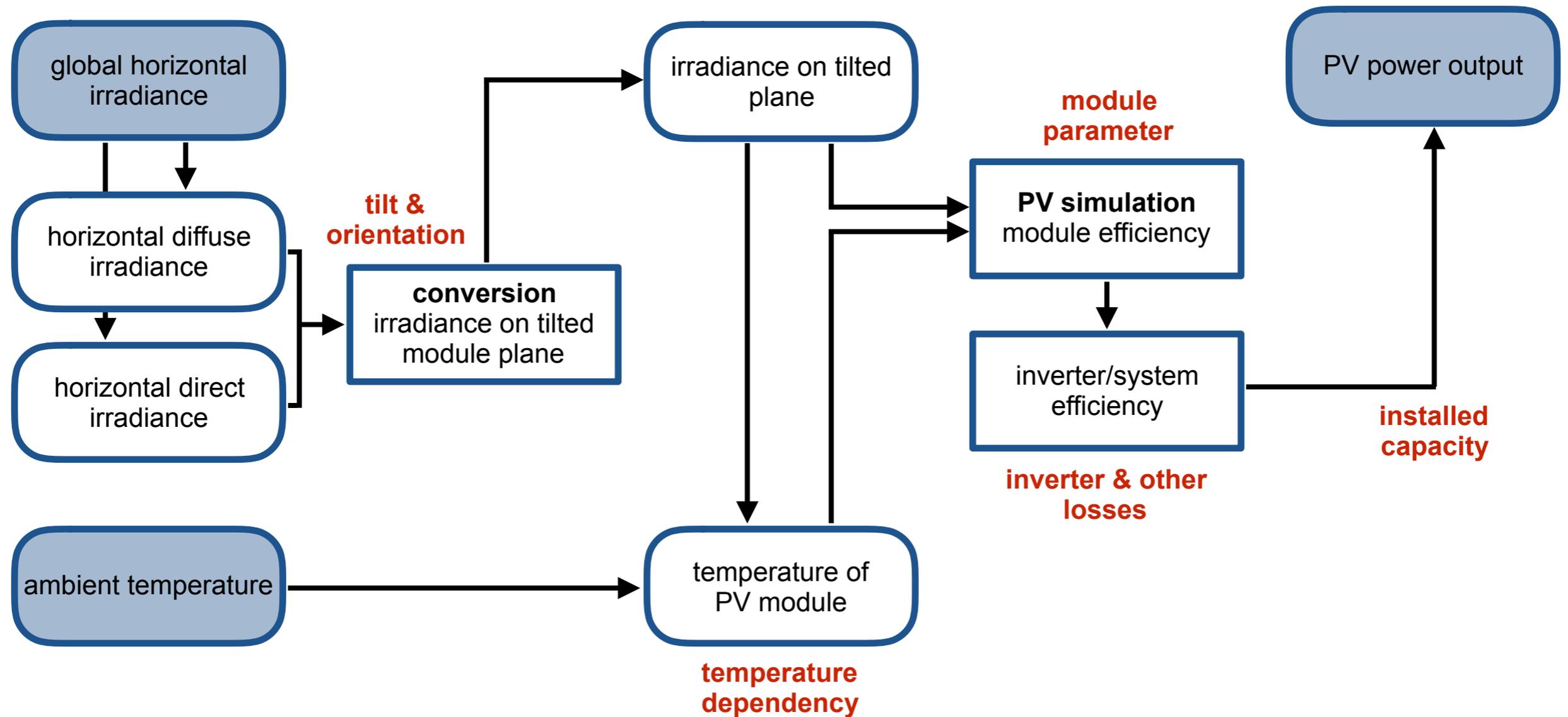
APE (Average photon energy): Mittlere Photonenenergie im Solarpektrum

Location: Loughborough, UK

Source: T. Betts (2004)

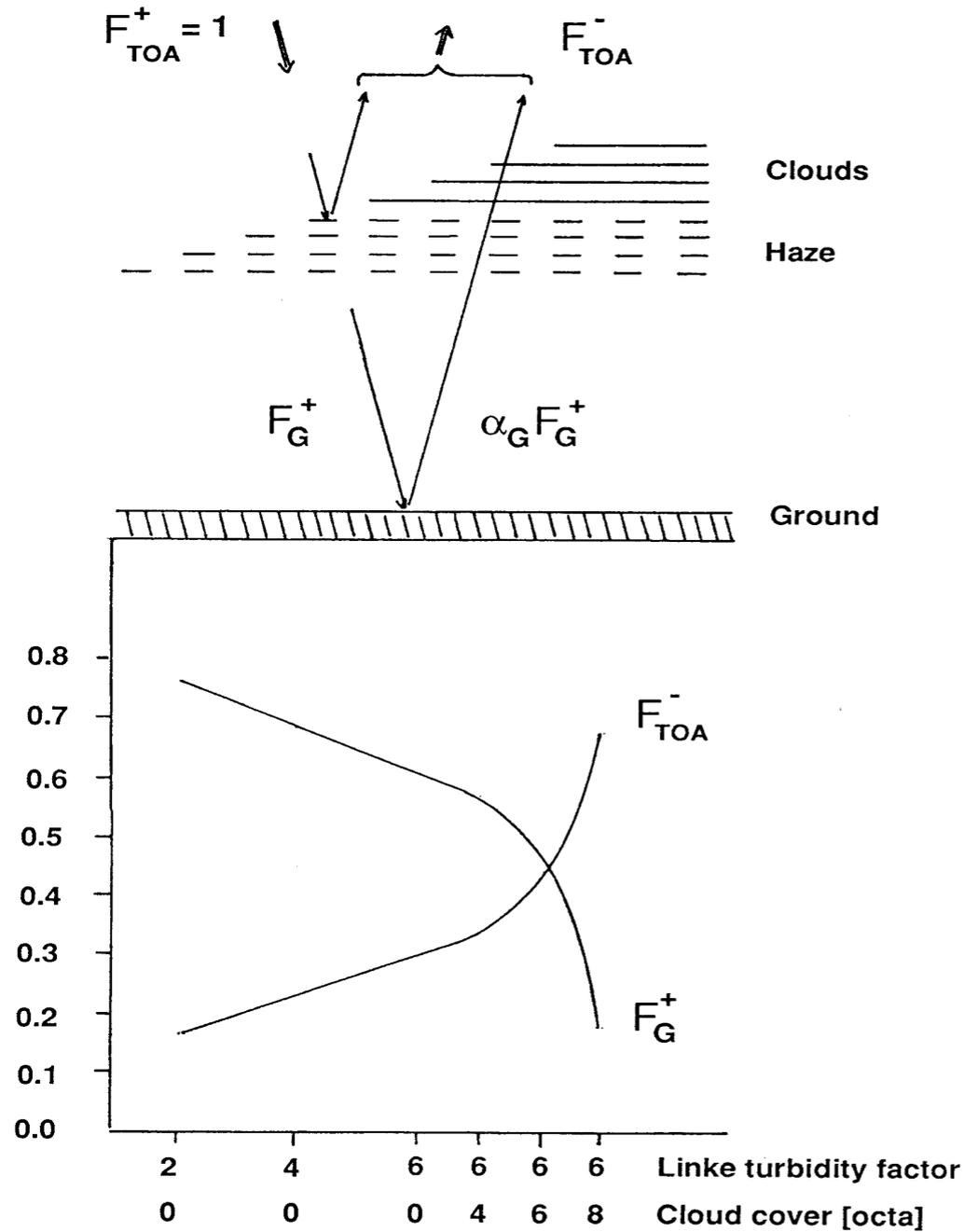
Von Solarstrahlung in (elektrische) Leistung

Simulation der PV-Leistung



Methoden zur Bestimmung der Solarenergie-Ressource

Satelliten-basierte Gewinnung



Prinzip:

Kopplung der Strahlungsfelder am Oberrand der Atmosphäre und am Boden

Bilanz:

$$F_{TOA}^+ - F_{TOA}^- = F_G^+ (1 - \alpha_G) + F_A$$

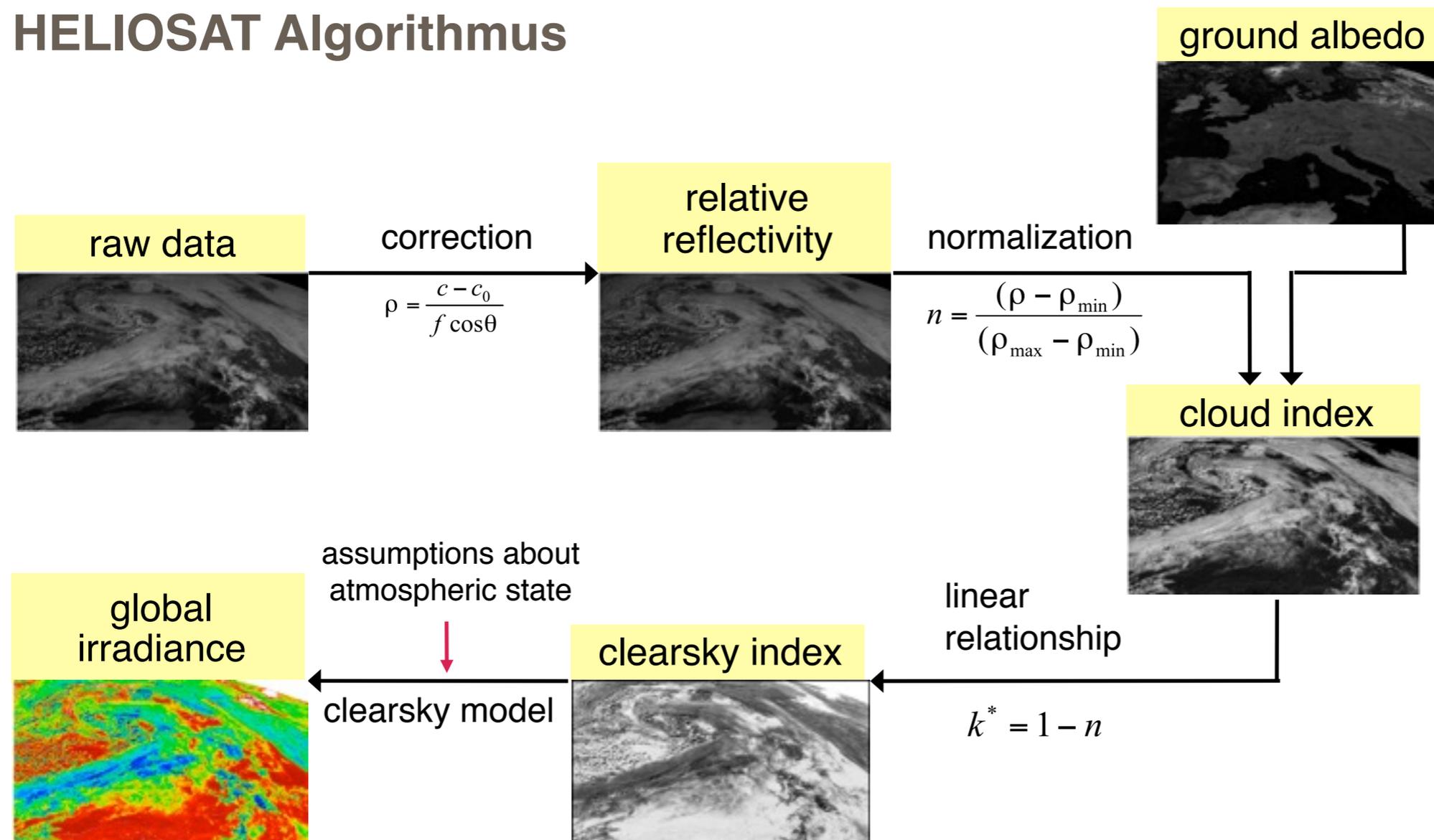
Transmission:

$$\tau = \frac{1 - \alpha_{TOA} - \alpha_A}{1 - \alpha_G}$$

Source: A. Zelenka

Satelliten-basierte Gewinnung

HELIOSAT Algorithmus



HELIOSAT beruht auf zwei operationell verschiedenen Teilen:

- ▶ Clear-sky Einstrahlung aus Modell (Annahmen über Wasserdampf, Aerosol!)
- ▶ Bestimmung des überlagerten Wolkeneinflusses aus Satellitendaten

Modellierung der Solarstrahlung bei klarem Himmel

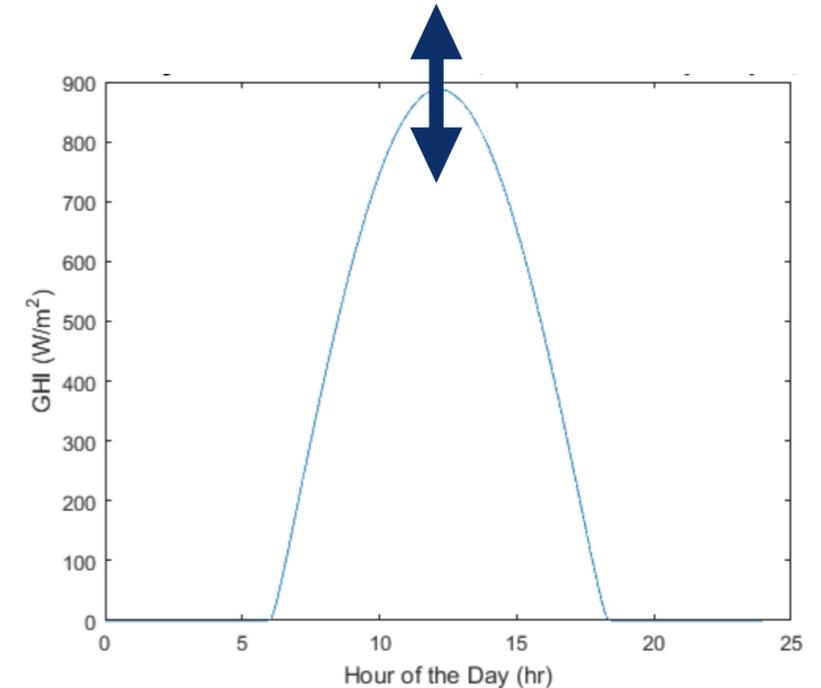
Clear-sky Modell: Modellierung der atmosphärischer Transmission

Atmosphärische Transmission hängt ab von:

- ▶ Geometrie
- ▶ konstante Beiträge: NO_2 , CO_2 , O_2 , N, etc.
- ▶ geringe Abhängigkeit: O_3
- ▶ starke Abhängigkeit: Wasserdampf, Aerosole

Input:

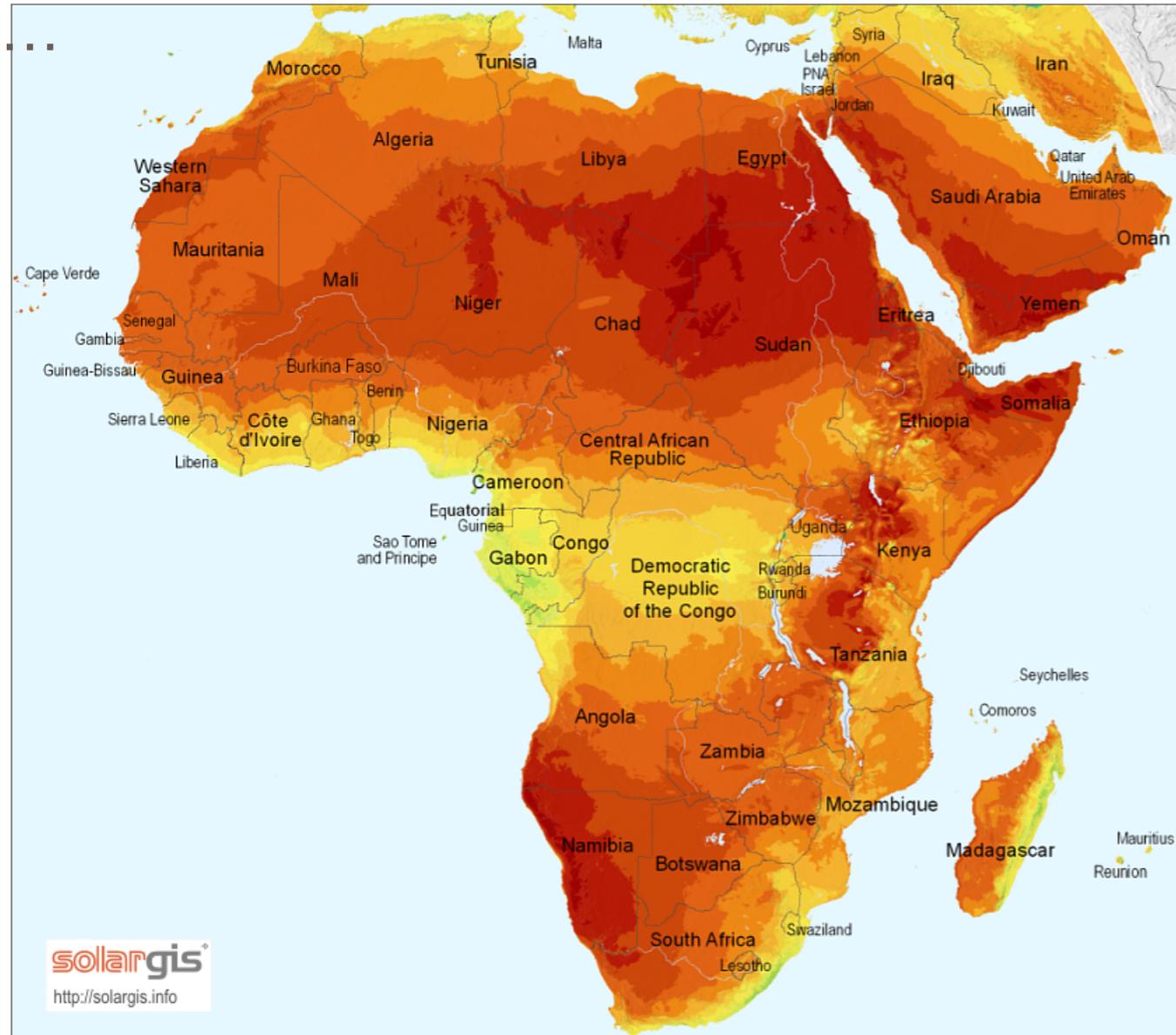
- ▶ Solarkonstante
- ▶ Sonnenhöhe
- ▶ Bodenluftdruck
- ▶ Bodenalbedo
- ▶ precipitable water content
- ▶ Ozongehalt
- ▶ Trübung
- ▶ Aerosol forward scattering ratio



Satelliten-basierte Gewinnung Strahlungskarten

Globalstrahlung

Afrika und Mittlerer Osten

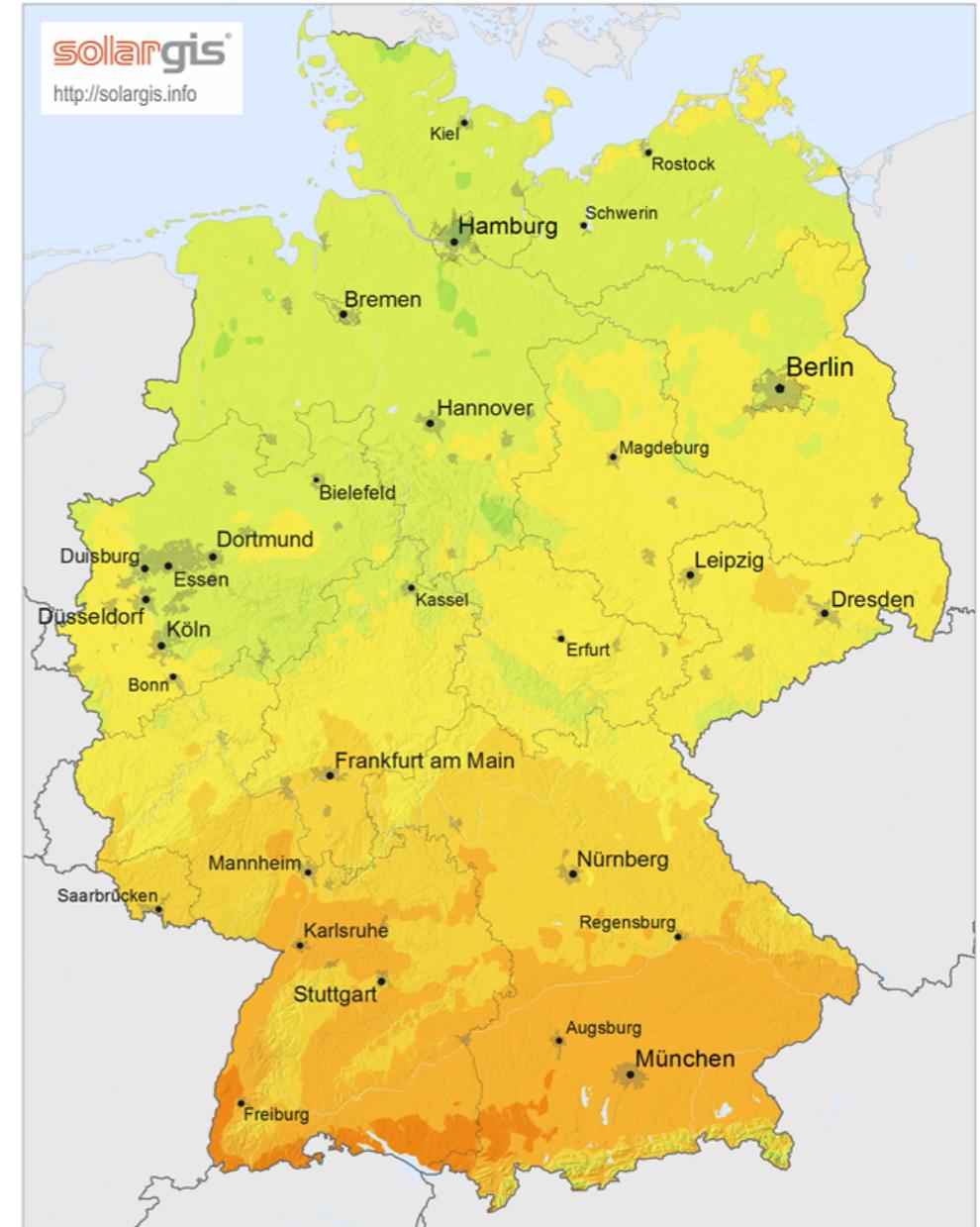


Durchschnittliche jährliche Summe (4/2004 - 3/2010)
 < 1600 1800 2000 2200 2400 > kWh/m²

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

Globalstrahlung

Deutschland

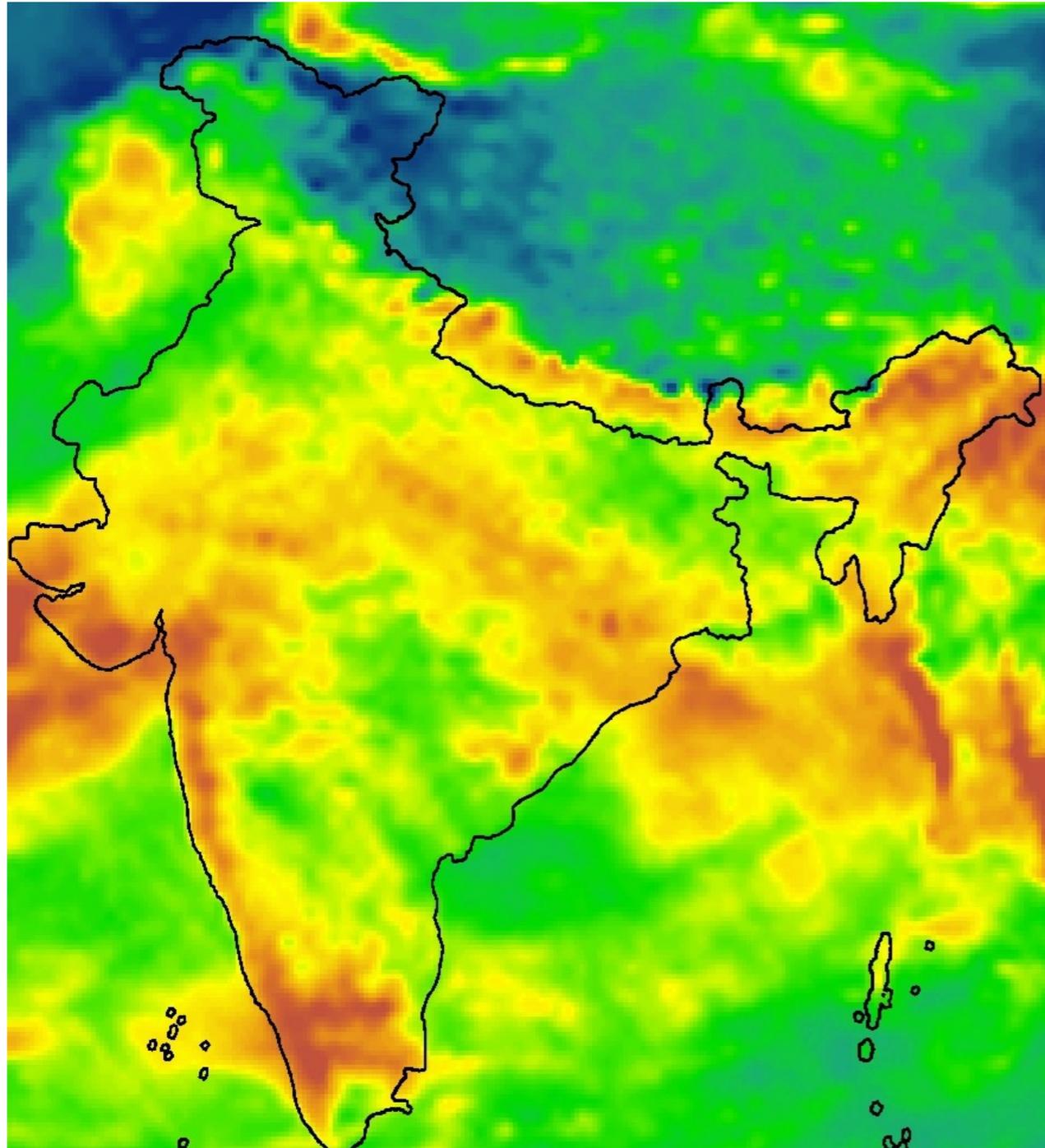


Durchschnittliche jährliche Summe, Periode 1994-2013
 < 1000 1100 1200 > kWh/m²

Solar Karte © 2015 GeoModel Solar

Source: Geomodel Solar

Numerische Wettervorhersage-Modelle



Example:

ECMWF/IFS Day-Ahead Forecast

Model run at 01. 01. 2014, 5.30 AM IST

Forecast parameter:

Solar surface irradiance

Grid size:

0.125° x 0.125° (~14 km)

Data: ECMWF

Processed by S. K. Tripathy

Reanalyse-Verfahren

Globale Wettervorhersagemodelle werden im Reanalyse-Modus betrieben, um die tatsächlichen Beobachtungen zu reproduzieren

Solarstrahlung ist dabei eine diagnostische Variable und wird über ein Strahlungstransport-Modell berechnet. Hierbei dienen sämtliche die Strahlung beeinflussenden atmosphärischen Modellvariablen als Input.

Vorteile: weltweite Abdeckung, zeitlich Abdeckung von mehreren Jahrzehnten, freie Verfügbarkeit

Nachteile: Unsicherheiten eines numerischen Modells (Strahlung, Wolken); Fehler in der Bestimmung von Clear-Sky-Situationen; Aerosol-Klimatologie

Beispiele: MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications), NASA, $0,5^\circ \times 0,65^\circ$, 1h

ERA-Interim, European Center for Medium-range Weather Forecasts, $0,75^\circ \times 0,75^\circ$, 3h, (neu: ERA-5)

Fazit: nur bedingt einsetzbar!

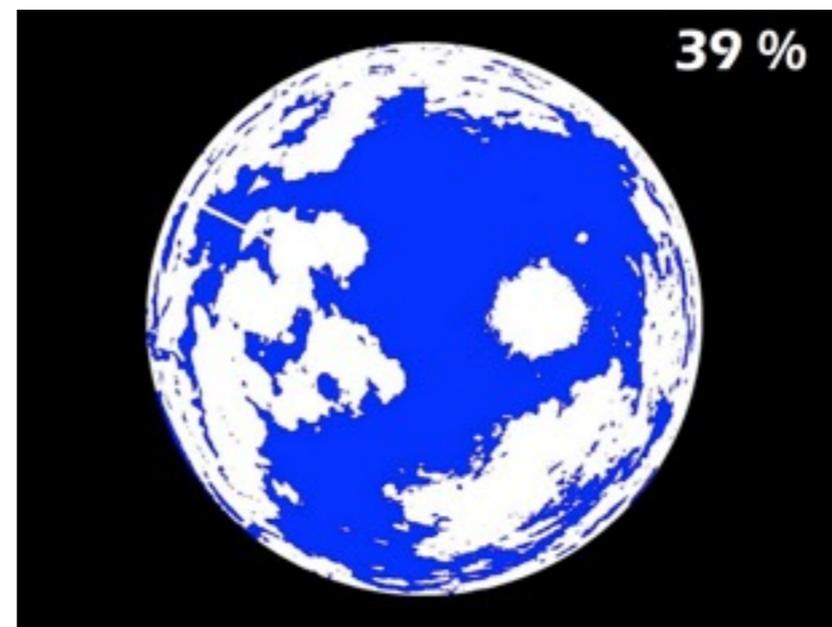
Sky Imager zur Bestimmung der räumlichen Variabilität

Bodengestützte Fernerkundung mit Wolkenkameras



Anwendungen:

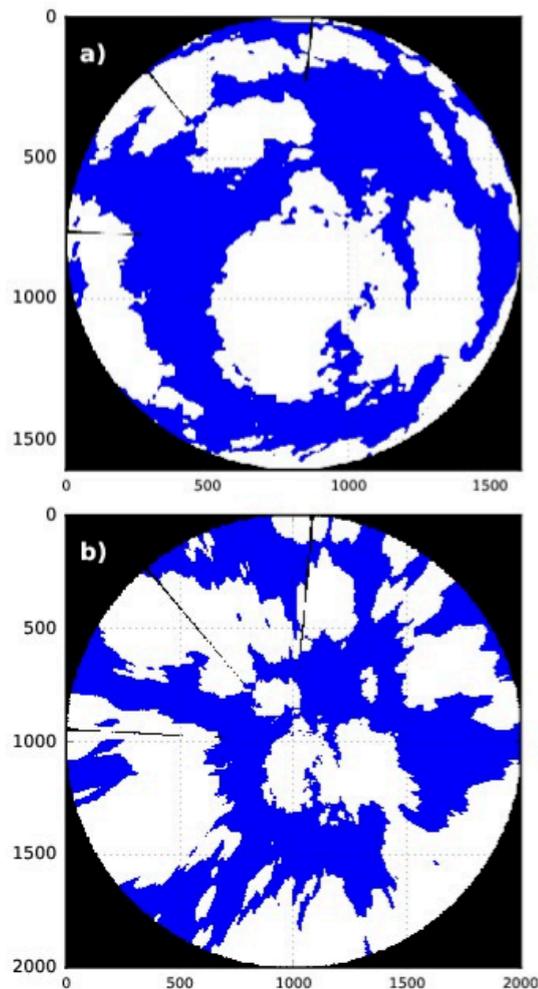
- ▶ räumliche Variabilität in Verteilnetzen
- ▶ Einstrahlungsverteilung in sehr grossen Solarkraftwerken
- ▶ Kurzzeitvorhersage (< 30 min)



Räumliche Variabilität der Solarstrahlung

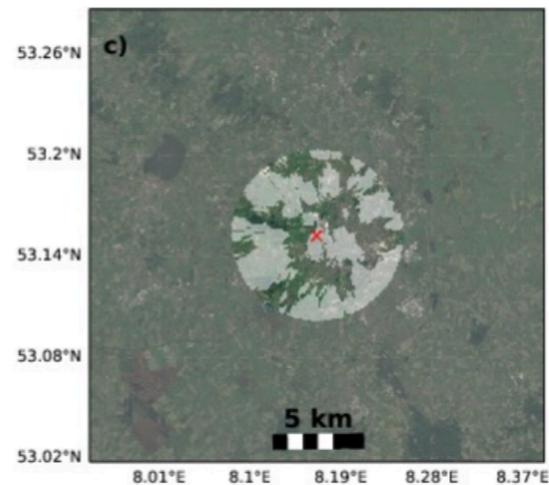
Projektion von Wolkenschatten auf den Erdboden

Linsenabbildungs-Funktion, Wolkenhöhe und Sonnenstand bestimmen die Position der Wolkenschatten

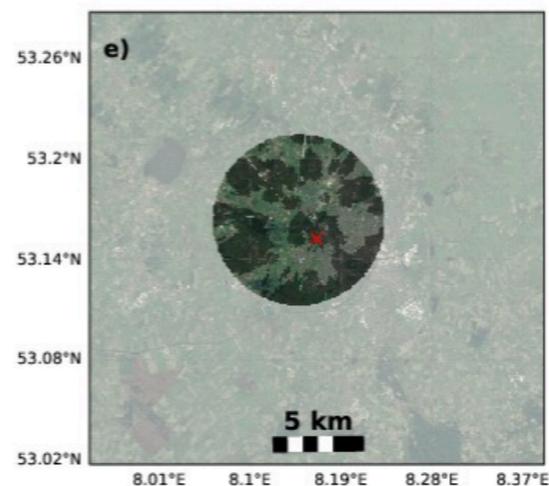


a) raw binary cloud image oriented north

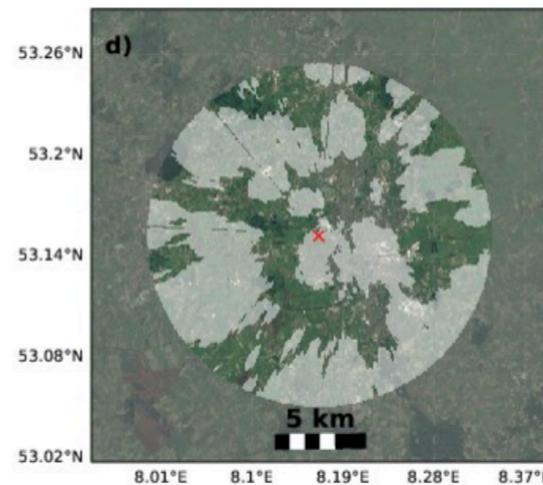
b) cloud projection without CBH information on a regular grid with 2000 pixels



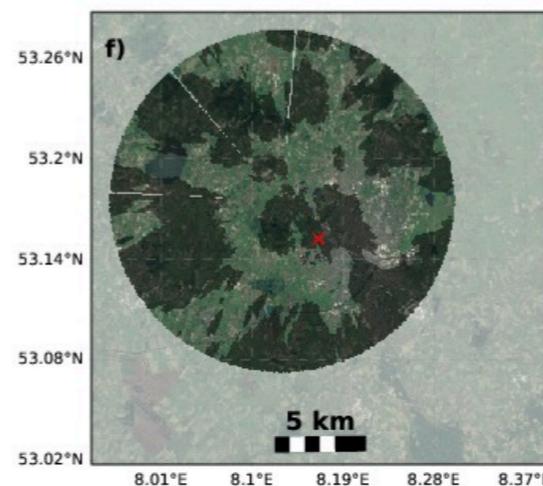
c) cloud projection for CBH=1500 m with grid resolution of 15 m and grid size of 30 km in both directions



d) cloud projection for CBH=2000 m



e) shadow projection for CBH=1500 m



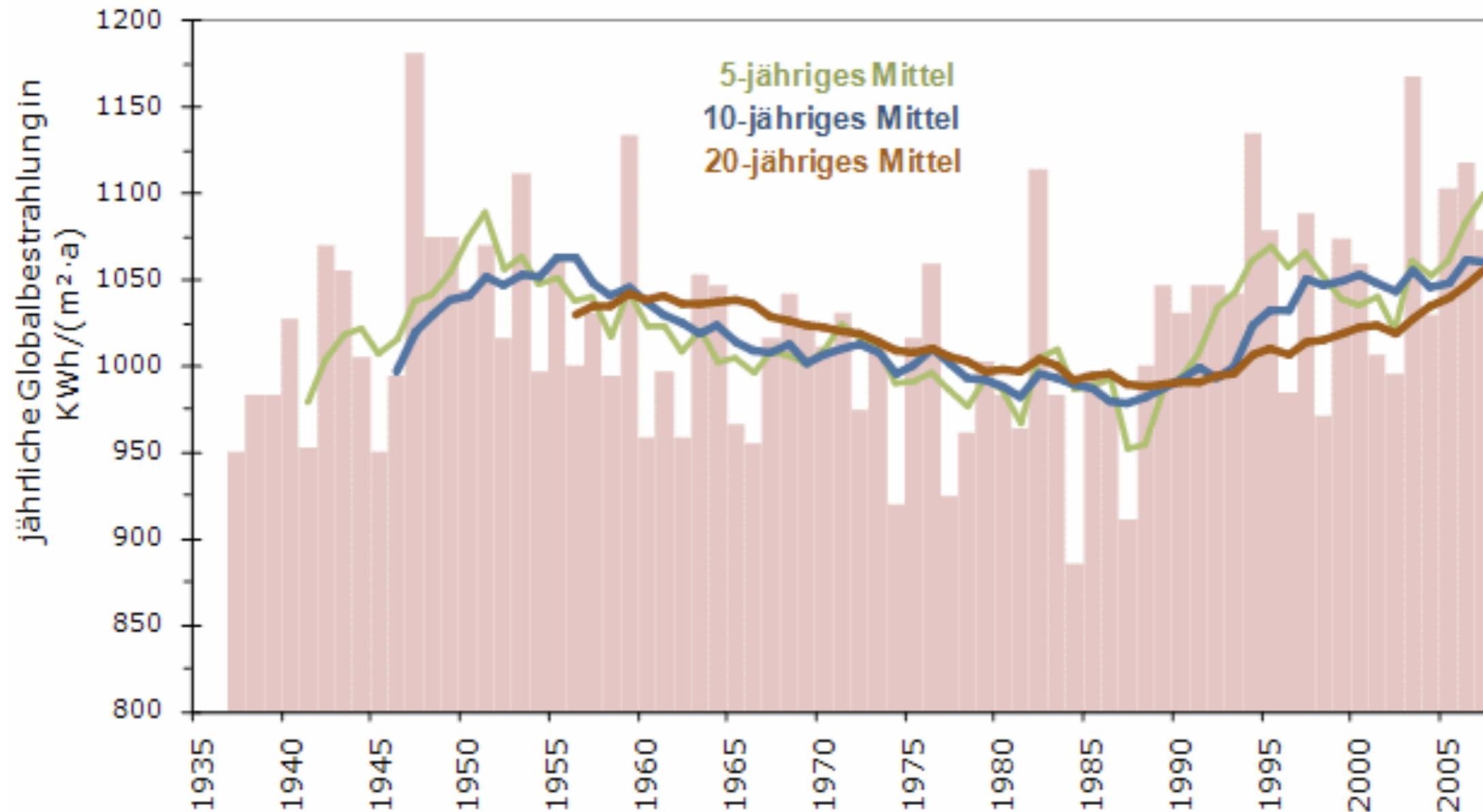
f) shadow projection for CBH=2000 m

Example:
Mixed cloud scene

solar zenith angle: 30°
azimuth angle: 135°

Variabilität der Globalstrahlung

Potsdam, 1937–2007

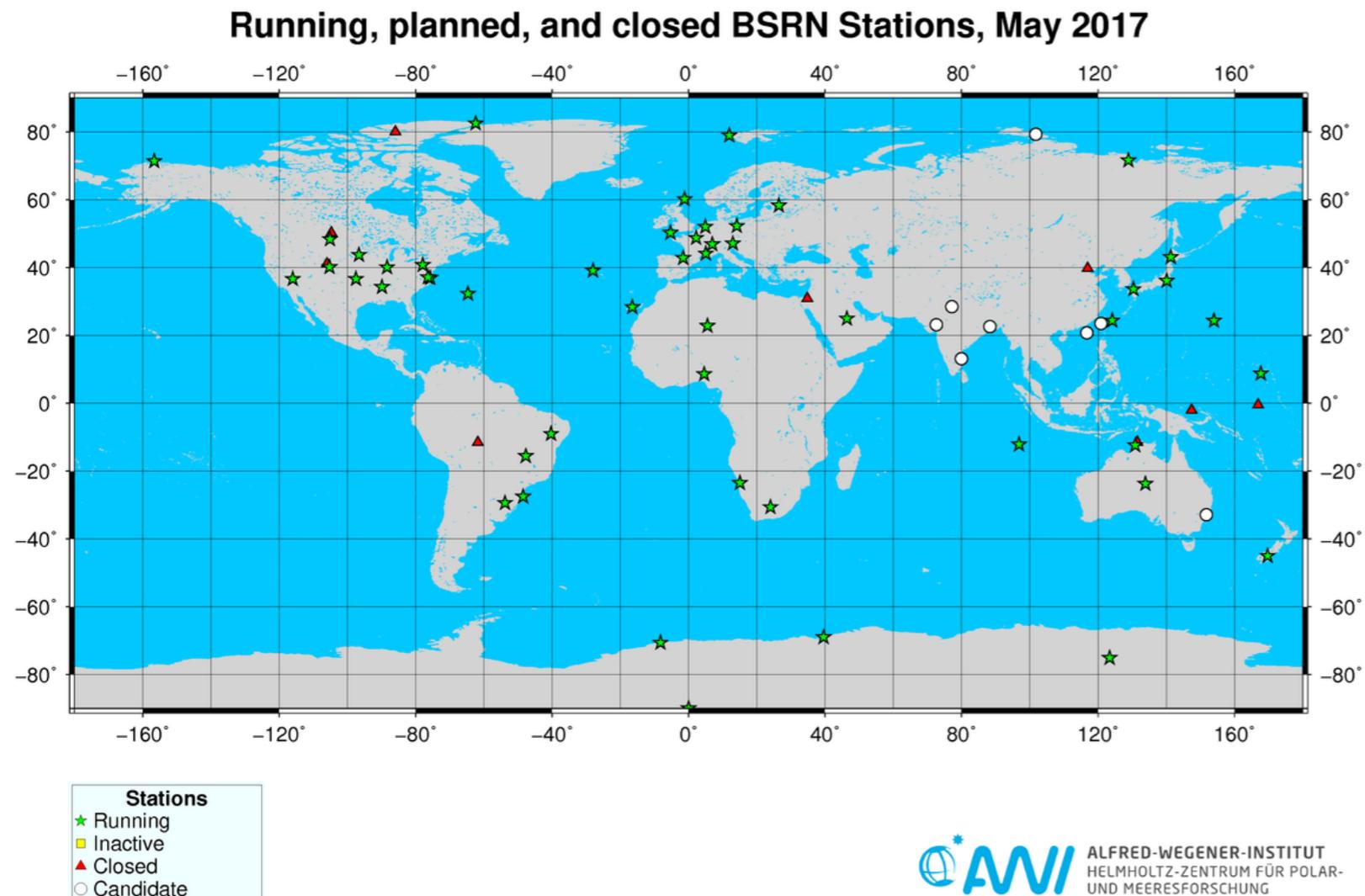


Min: $887 \text{ W}/\text{m}^2$

Max: $1180 \text{ W}/\text{m}^2$

Messungen der Solarstrahlung

- ▶ Zusätzlich zu den vorgestellten Quellen werden hochwertige Messungen von Globalstrahlung, Direktnormalstrahlung, spektraler Solarstrahlung etc. weiterhin als Referenz, für Validierung und Kalibrierung notwendig sein
- ▶ Beispiel: Baseline Surface Radiation Network (BSRN),



Fazit

- ▶ Standard-Quelle für Solarenergie-Ressourcen sind heute Satellitendaten
- ▶ Spezielle Anwendungen erfordern zusätzliche Messungen:
 - ▶ Spektraldaten
 - ▶ räumliche Variabilität
- ▶ Bessere Daten für atmosphärisches Aerosol notwendig
- ▶ Weiterhin Bedarf für hochwertige Pyranometermessungen