

Bestimmung und Analyse der Temperatur von Landoberflächen aus Satellitendaten

F.-S. Olesen, F.-M. Göttsche, IMK

Einleitung

Die Erdoberfläche wird durch Absorption von Sonnenlicht erwärmt. Die aufgenommene Energie – bei dunklen Flächen ist es mehr als bei hellen – wird als fühlbare Wärme, durch Wasserverdunstung als latente Wärme, sowie als Wärmestrahlung zwischen 3,5 und etwa 100 μm wieder abgegeben. Das Wettergeschehen wird wesentlich durch die je nach Landoberfläche verschieden starke Absorption und unterschiedliche Umwandlung der absorbierten Sonnenenergie angetrieben.

Die Landoberflächen-Temperatur (Land Surface Temperature = LST) kann von Radiometern auf geostationären Satelliten (z.B. METEOSAT) über Jahrzehnte großflächig erfasst werden. Da Radiometermessungen aber durch die Atmosphäre beeinflusst werden, sind für die Auswertung der Rohdaten aufwändige Strahlungs-Übertragungs-Rechnun-

gen (SÜR) unter Berücksichtigung der Temperatur- und Feuchtestruktur der Atmosphäre sowie des Emissionsvermögens der Landoberflächen nötig [7]. Um einige Größenordnungen schneller lässt sich die SÜR mit neuronalen Netzen (NN) durchführen. Ziel ist die Ableitung klimatologisch wichtiger Informationen wie z.B. des täglichen Temperaturhubs.

Weltweit finden tiefgreifende Veränderungen der Landnutzung statt. Die Landoberflächen-Temperaturen zusammen mit ebenfalls aus Satellitendaten abgeleiteten Vegetationsparametern erlauben eine objektive und flächendeckende Analyse des Oberflächenzustandes und seiner Veränderungen.

Temperatur von Landoberflächen

LST können entweder mit Thermometern vor Ort gemessen oder von ferne aus der Intensität und

spektralen Verteilung der emittierten Wärmestrahlung abgeleitet werden. Die Messung vor Ort ist in der Praxis fast unmöglich, weil Landoberflächen nicht homogen sind, sondern z.B. aus Boden, Vegetation und der Luft dazwischen bestehen. Selbst in sehr einfachen Fällen, z.B. in der australischen Wüste, ist der mit direkten Temperaturmessungen verbundene Aufwand hoch [6]. Ein Radiometer integriert dagegen über die von beliebig strukturierten Flächen emittierte Strahlung. Allerdings wird vom Satelliten nur die Strahlung in einer Richtung gemessen, was eine Fehlerquelle sein kann. Auch die Atmosphäre zwischen der Oberfläche und dem Satelliten beeinflusst die Messung. Bei der Ableitung der LST müssen diese Fehlerquellen soweit wie möglich berücksichtigt werden. Die realen Bedingungen und das Prinzip der Atmosphärenkorrektur sind in Abb. 1 dargestellt.

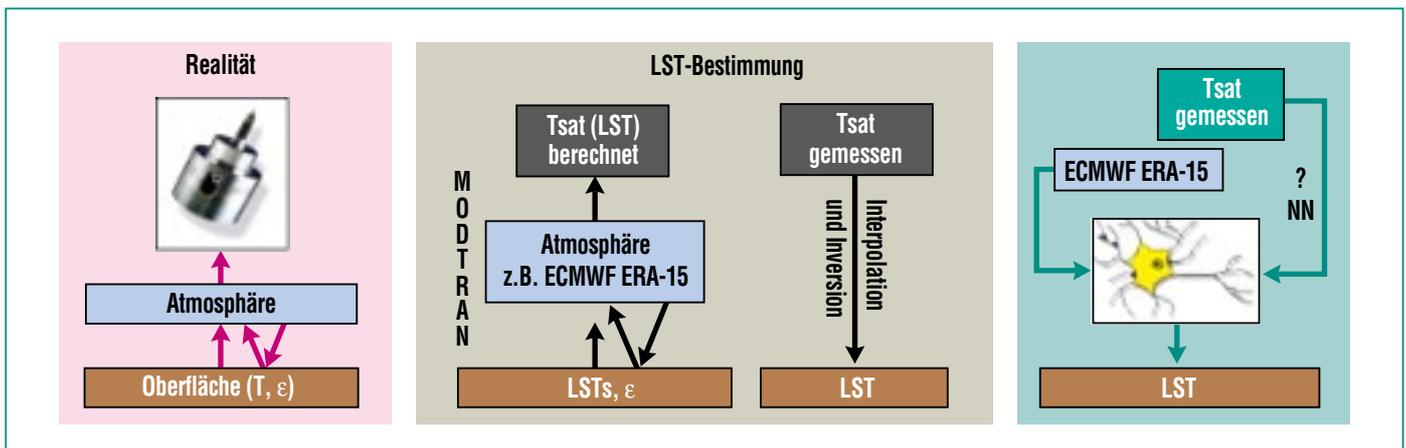


Abb. 1: Bestimmung der Land-Oberflächen-Temperatur (LST). Links die Realität bei wolkenfreien Bedingungen (keine Streuung): Die von der Oberfläche emittierte und reflektierte Strahlung wird auf ihrem Weg zum Satelliten von der Atmosphäre beeinflusst. In der Mitte die Bestimmung der LST mittels SÜR: Für angenommene LST und Emissionsvermögen (ϵ) wird die erwartete Strahlung am Satelliten berechnet. Durch Interpolation mehrerer Szenarien gelangt man zu der zur Strahlungsmessung passenden LST. Rechts: Kann die SÜR und die für die LST Bestimmung nötige Interpolation durch ein sehr schnelles neuronales Netz ersetzt werden? Siehe dazu Abb. 2.

SÜR mit neuronalen Netzen

Bei der Ermittlung der LST muss der Einfluss der Atmosphäre auf die vom Satelliten gemessene Wärmestrahlung durch SÜR z.B. mit dem Computerprogramm MODTRAN berücksichtigt werden. Neuronale Netze (NN) bewältigen diese Aufgabe fast ohne Verlust an Genauigkeit, aber sehr viel schneller [4]. Das mit dem „Stuttgart Neural Network Simulator“ [10] simulierte NN ist ein „Feed-Forward“ Netz, in dem die Neuronen nur von einer Schicht zur nächsten durch Gewichte verbunden sind. Es hat eine Eingabeschicht, 2 Zwischenschichten („hidden layer“) und eine Ausgabeschicht.

Für das Training eines NN sind grundsätzlich größere, repräsentative Datensätze nötig, die für die Eingabegrößen (hier: Zustand der Atmosphäre und einige Bodenparameter) die korrekten Zustände der Ausgabeneuronen (hier LST) enthalten. Aus repräsentativen, atmosphärischen Temperatur- und Feuchteprofilen des TIGR-Datensatzes wurden mit MODTRAN erwartete Messungen am Satelliten berechnet und diese anschließend zum Belernen des NN verwendet, wobei die Gewichte rückwärts bis zur Eingabeschicht angepasst werden [8]. Die Qualität des Netzes wird anhand von Validierungsdaten ermittelt, die den Trainingsdaten zufällig entnommen und nicht zum Belernen verwendet wurden (siehe Abb. 2).

Die „beste“ Topologie wurde mit Hilfe des „evolutionären“ Algorithmus ENZO [1] vermittelt. Dabei wird eine Population von Netzen durch „Evolutionprozesse“ verändert, trainiert, und anschließend Nachkommen der tauglichsten Netze für die nächste Generation erzeugt.

Um das NN an realen Bedingungen zu prüfen, wurden SÜR mit MODTRAN für Analysen des Vorhersagemodells des ECMWF von 1996 durchgeführt. Das NN erreichte einen mittleren Fehler von 0,31°C und ist dabei sehr schnell: Ein Monat CPU-Zeit für MODTRAN schrumpft auf 5 Minuten für das NN (siehe Abb. 2), was klimatologische Anwendungen ermöglicht.

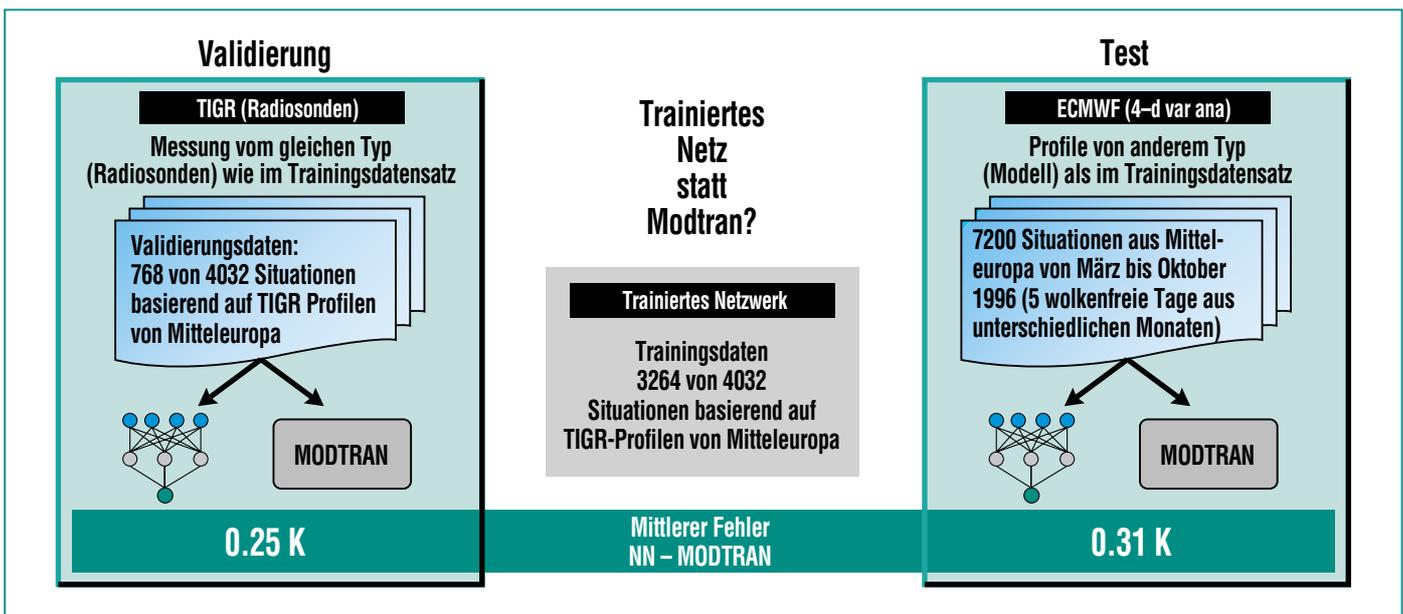


Abb. 2: Validierung und Test des NN. Das Netz wurde mit 3264 Situationen trainiert. Jede Situation ist eine Kombination aus Temperatur- und Feuchteprofil sowie angenommenen Werten für LST-Emissionsvermögen und Weg durch die Atmosphäre. Links die Abweichung der Ausgabe des Netzes von den Sollwerten, also der SÜR mit MODTRAN für den Validierungsdatensatz: Das NN ist in der Lage, MODTRAN-Rechnungen für Radiosonden mit der vorgegebenen Genauigkeit zu ersetzen. Rechts ein Test für das mit Radiosondenprofilen trainierte NN mit Profilen aus ECMWF-Analysen. Der Test zeigt, dass das NN die MODTRAN-Rechnungen mit einer Abweichung von 0,31 K bei einem Geschwindigkeitsvorteil von ca. 10.000 ersetzen kann.

Modellierung des Tagesganges der LST

Die aus IR-Satellitenmessungen abgeleitete Landoberflächen-Temperatur liefert wegen der Wolkenbedeckungen ein in Zeit und Raum lückenhaftes Bild, aus dem lückenlose Datenfelder und Zeitreihen berechnet und aussagekräftige Oberflächentemperaturen abgeleitet werden müssen. Das hierzu verwendete Modell [3] approximiert den Verlauf der Strahlungstemperatur bei andauerndem Sonnenschein durch eine cos-Funktion, während die nächtliche Abkühlung durch eine Exponential-Funktion angenähert wird (Abb. 3). Um die fünf freien Parameter für Zeiträume von 10 Tagen oder einem Monat zu berechnen, werden repräsentative Maximum- und Median-Werte der LST für jeden Bild- und Zeitpunkt bestimmt. Die Anpassung der Parameter ist wenig anfällig gegen Ausreißer, weil ein M-Schätzer verwendet wird. Die Parameter des Modells werden zunächst an die unkorrigierten Strahlungstemperaturen und dann unter Festhalten einiger Parameter an die verfügbaren LST angepasst. So ist es möglich, lückenlose LST mit der 30 Minuten-Auflösung von METEOSAT zu berechnen, auch wenn nur zu vier Zeitpunkten des Tages die atmosphärischen Profile verfügbar sind (ECMWF). Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die thermischen Parameter (siehe Abb. 3, z. B. Tagesamplitude, nächtliche Abkühlungskurve, Zeitpunkt der Höchsttemperatur) zusammen mit weiteren Bodeneigenschaften nach verschiedenen Gesichtspunkten zu analysieren [9].

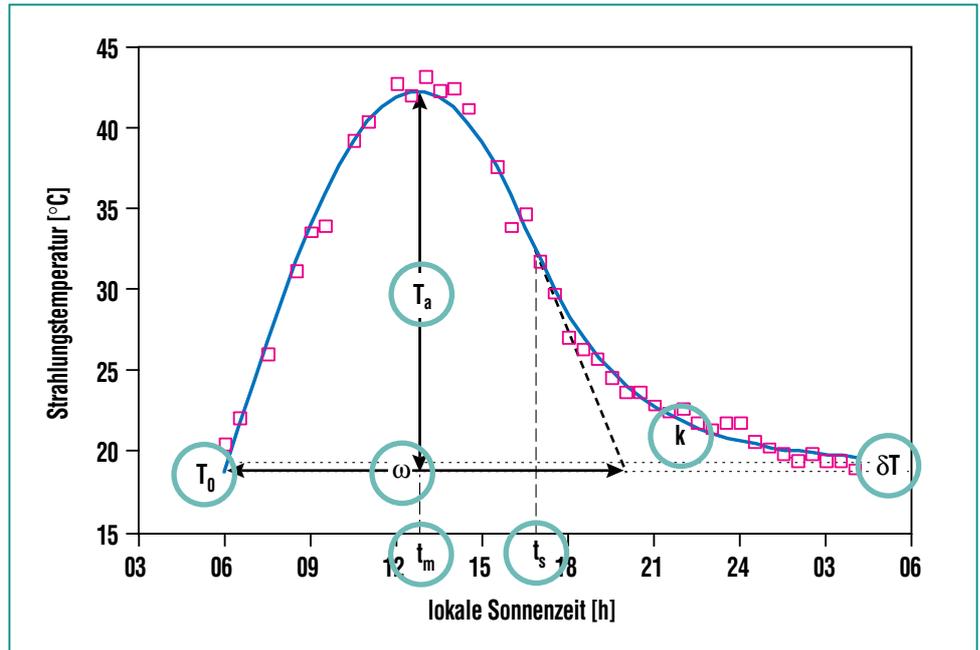


Abb. 3: Modellierung des Tagesganges der Strahlungstemperatur. Für die Zeit des Sonnenscheins wird eine cos-Funktion angepaßt, während die Temperaturabnahme mit einer Exponential-Funktion beschrieben wird. Die 7 Modellparameter sind in Tab. 1 erklärt. In gleicher Weise lassen sich LST modellieren.

T_0	Starttemperatur am Morgen	Anpassung an Messung
T_a	Amplitude	Anpassung an Messung
T_m	Zeitpunkt des Maximums	Anpassung an Messung
ω	Sonnenscheindauer	Aus astronomischen Daten
t_s	Sonnenuntergang (Start der e-Funktion)	Anpassung an Messung
k	Abklingkonstante in der Nacht	Aus Stetigkeitsbedingung
δT	die Temperaturdifferenz am Ende des Modell-Tages	Anpassung an Messung

Tab. 1: Bedeutung der Parameter des Modells zur Beschreibung des Tagesganges der Temperatur. Zur Stabilisierung der Anpassung der Parameter wurde die Stetigkeit und Differenzierbarkeit des Modells am Übergang von cos zur Exponential-Funktion als zusätzliche Zwangsbedingung angenommen. Unter dieser Annahme kann die Abklingkonstante berechnet werden. Ferner wurde die Sonnenscheindauer aus astronomischen Daten berechnet. Die verbleibenden 5 Parameter werden den Messungen angepaßt.

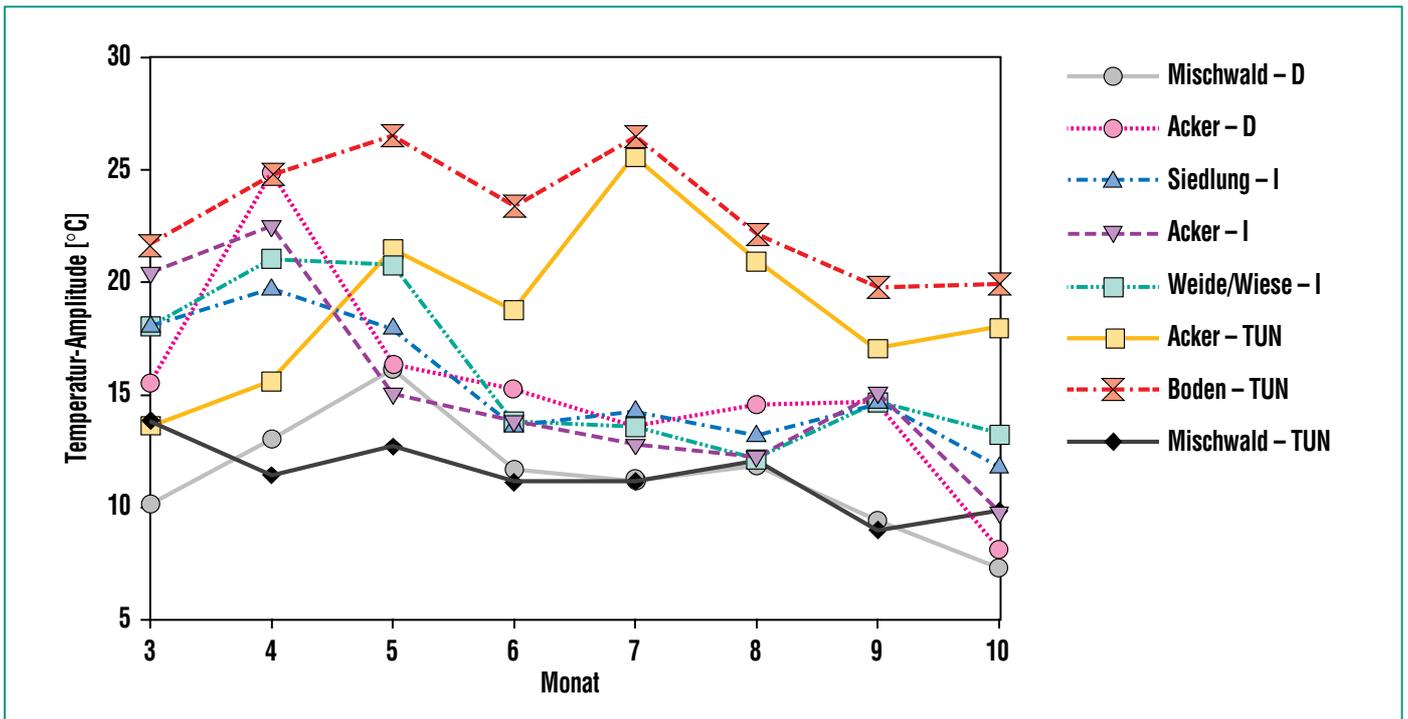


Abb. 4: Die Amplitude der Landtemperatur von März bis Oktober 1996 für verschiedene Oberflächen in Deutschland (D), Italien (I) und Tunesien (TUN). Oberflächentypen: Mischwald, Ackerfläche, Siedlung, Weide/Wiese, nackter Boden.

In Abb. 4 sind Temperatur-Amplituden für einige Landoberflächen-Klassen in Abhängigkeit der Jahreszeit aufgetragen. Sie sind kaum vom saisonalen Verlauf des Sonnenstandes abhängig. Stark ausgeprägt ist dagegen die Antwort auf Änderungen des Bewuchses, wie die Klasse landwirtschaftlich genutzte Fläche („crop-land“) in Tunesien zeigt: Sie verhält sich im Juli nach der Ernte fast wie vegetationsloser Boden („bare ground“). Bemerkenswert ist, dass der Mischwald („mixed forest“) in Tunesien und Deutschland annähernd die gleiche Amplitude zeigt. Für alle Oberflächen in Italien fällt die Amplitude vom Frühjahr zum Sommer ab.

Ausblick

Eine langfristige und großflächige Messung der Landoberflächen-Temperatur ist mit METEOSAT und MSG (Meteosat Second Generation) möglich. Die Korrektur des atmosphärischen Einflusses erfolgt mit NN so schnell, dass über 20 Jahre archivierte METEOSAT-Daten zur klimatologischen Analyse der LST auf kontinentalem Maßstab verwendet werden können. Zusammen mit den aus NOAA-AVHRR-Satellitendaten abgeleiteten Entwicklung des Bewuchses [5] ist eine sonst nicht erreichbare langfristige und horizontal relativ hoch auflösende Analyse möglicher Wüstenbildung und sonstiger Bodenverän-

derungen erreichbar. Die Kombination der NOAA-AVHRR und METEOSAT/MSG-Daten wird so einen wichtigen Beitrag zur Diskussion von Klimaänderungen infolge veränderter Landnutzung liefern [2].

Literatur

- [1] H. Braun, T. Ragg, (1996), *Internal report. Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe. 1996,21. University of Karlsruhe, Institute for logic, complexity, and deduction systems, Germany.*
- [2] F.-M. Götsche, F.-S. Olesen, P. Dash, 2002, *Advances in Space Research (submitted).*
- [3] F.-M. Götsche, F.-S. Olesen, (2001), *Remote Sens. Environ., 76(3): 338-349.*
- [4] F.-M. Götsche, F.-S. Olesen, (2002), *Remote Sens. Environ., 80(1): 157-164.*
- [5] D. Koslowsky, 1996, *Freie Universität Berlin, Meteorologische Abhandlungen, Verlag von Dietrich Reimer, Neue Folge Serie A, Monographien, Band 9, Heft 1, 135 Seiten. Berlin, 1995.*
- [6] A. J. Prata, 1994, *J. Geophys. Res. Vol. 99, No. D6, p. 13,025-13,058 (94JD00409)*
- [7] H.Reutter, F. S. Olesen, H. Fischer, (1994), *Int. J. Remote Sens., 15: 95-104.*
- [8] M. Riedmiller, H. Braun, (1993), *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks (ICNN 93), San Francisco, USA, 1: 586-591.*
- [9] S. Schädlich, F.-M. Götsche, F.-S. Olesen, (2001), *Remote Sens. Environ., 75(1): 39-46.*
- [10] A. Zell, (1994): *Simulation neuronaler Netze, Buch, Oldenbourg-Verlag, München, Germany.*