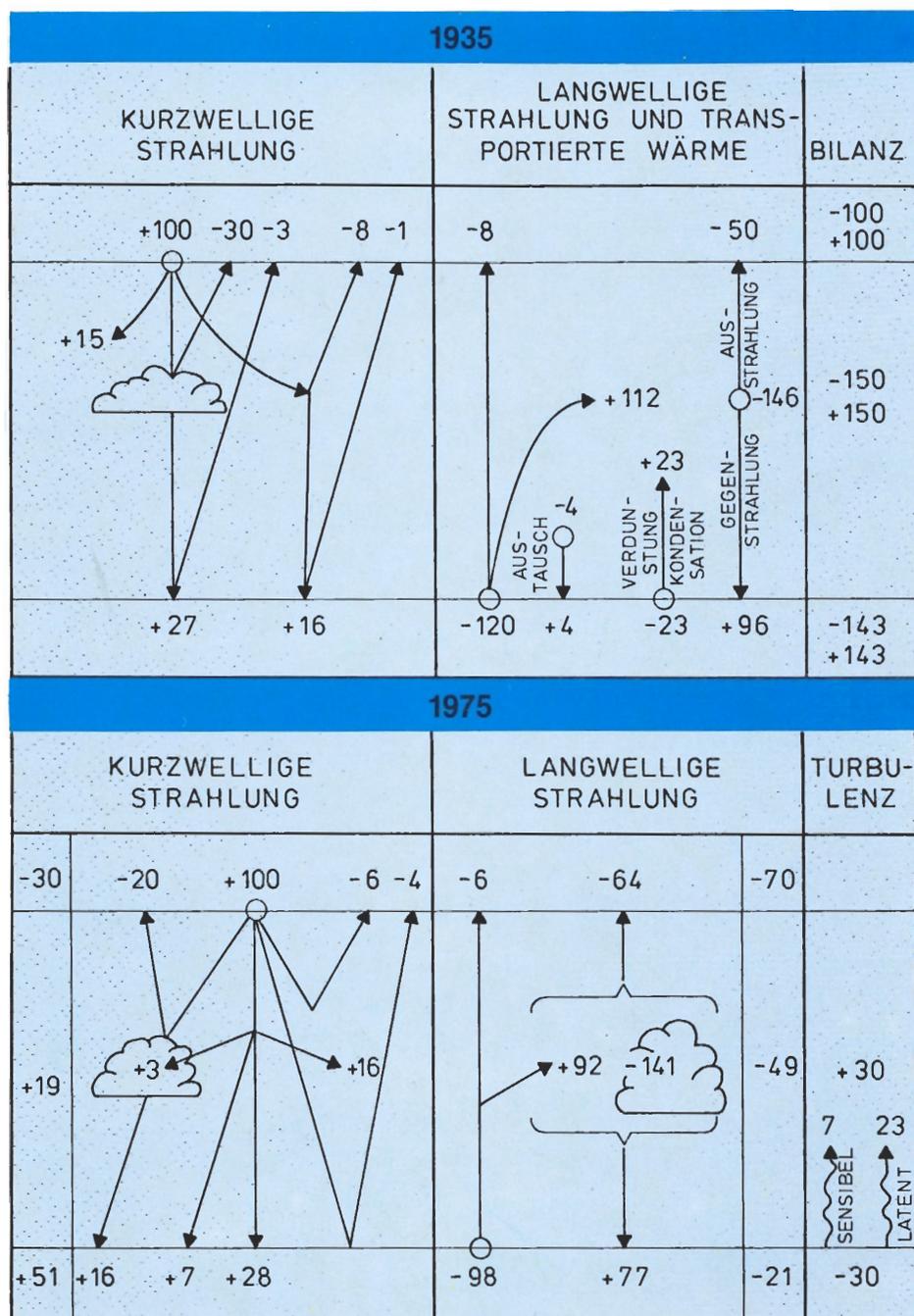


Strahlungstransporte in der Atmosphäre



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

Dipl.-Met. M. Schlegel

Redaktionsausschuß

Prof. Dr. A. Baumgartner (München)

Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)

Prof. Dr. H.-W. Georgii (Frankfurt)

Prof. Dr. H. Hinzpeter (Hamburg)

Dr. H. Reiser (Offenbach)

Dr. R. Simonis (Neustadt a. d. Weinstr.)

Dr. S. Uhlig (Traben-Trarbach)

Prof. Dr. F. Wippermann (Darmstadt)

Zum Titelbild:

Energiebilanz des Systems Erde-Atmosphäre.

Oben: Abschätzungen im Jahre 1935.

Unten: Abschätzungen im Jahre 1975.

(Weitere Erläuterungen siehe Einleitung).

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) DM 36,—, Einzelheft DM 10,—.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Druck: Schön & Wetzels GmbH, Offenbacher Landstraße 368, 6000 Frankfurt (Main).

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

15. Jahrgang, Heft 2/3, 1985

Thema des Heftes:

Strahlungstransporte in der Atmosphäre

(Fachliche Redaktion: H. Hinzpeter, Hamburg)

Beiträge:	Seite
Einleitung (H. HINZPETER)	1
1 S. BAKAN Grundlagen der Strahlungsübertragung	2
2 E. RASCHKE, B. ROCKEL und R. STUHLMANN Strahlungsgesetze	5
3 H. QUENZEL Allgemeines zur Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie	7
4 H. QUENZEL Streuung an Luftmolekülen und Aerosolpartikeln	7
5 P. WENDLING Streuung des Lichtes an Wassertropfen und Eiskristallen	10
6 H. FISCHER Absorption und Emission	16
7 K. T. KRIEBEL und P. KOEPKE Reflexion und Emission natürlicher Oberflächen	19
8 S. BAKAN Analytische Lösungen der Strahlungsübertragungsgleichung	25
9 W. ZDUNKOWSKI und G. KORB Numerische Methoden zur Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung	26

Grundlagen der Strahlungsübertragung

1 Einführung

Die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung wird durch die Theorie der Strahlungsübertragung quantitativ erfaßt und beschrieben. Dabei spielt die duale Natur der elektromagnetischen Strahlung eine Rolle, da ein Teil der Phänomene sich nur wellenmechanisch (z. B. Rayleigh-, Mie-Streuung), ein anderer nur quantenmechanisch (z. B. Absorption, Planck-Funktion) vollständig verstehen läßt. Je nach Art des Phänomens hat man sich Strahlung entweder als einen unendlich langen ebenen Wellenzug der Frequenz ν oder als die Überlagerung einer immensen Anzahl von Einzelphotonen der Elementarenergie $h\nu$ vorzustellen. Die Streuung an kugelförmigen Teilchen kann z. B. nur durch Wechselwirkung mit einer elektromagnetischen Welle, nicht durch den Stoß mit Einzelphotonen richtig beschrieben werden. Dagegen lassen sich Absorptions- und Emissionsprozesse nur mit Hilfe von Photonen beschreiben, die der diskreten Natur der möglichen atomaren oder molekularen Energiezustände Rechnung tragen.

Da in den meisten Problemen der Strahlungsübertragung zeitliche und räumliche Skalen interessieren, die wesentlich größer als die einzelner Wellen oder Photonen sind, werden geeignete mittlere Größen zur Beschreibung des Strahlungsfeldes, wie z. B. die Strahllichte (s. Abschn. 2), benutzt. Bei der Verknüpfung dieser Feldgrößen in der Strahlungsübertragungsgleichung (s. Abschn. 3) geht die Wirkung der Elementarprozesse nur noch in parameterisierter Form ein (z. B. Absorptionskoeffizient, Planck-Funktion, Streufunktion).

Im folgenden werden diese Grundgrößen definiert, die Strahlungsübertragungsgleichung aufgestellt und einige Spezialfälle diskutiert. Dabei taucht die Schwierigkeit auf, daß die Nomenklatur der bei der Behandlung atmosphärischer Strahlungsprozesse auftretenden Größen trotz mehrerer Ansätze bis heute nicht vereinheitlicht werden konnte, so daß in unterschiedlichen Arbeitsrichtungen noch verschiedene Größen und Symbole traditionell gebräuchlich sind. Immerhin hat die Festlegung auf das SI-System (Système International) zumindest bei den Basiseinheiten eine gewisse Vereinheitlichung gebracht, die sich zu einem gewissen Grad auch auf Strahlungseinheiten ausgewirkt hat. In diesem Heft werden die Autoren bemüht sein, eine konsistente Nomenklatur in Anlehnung an Vorschläge der Strahlungskommission der IAMAP (International Association of Meteorology and Atmospheric Physics) zu benutzen.

2 Radiometrische Größen

Die im folgenden verwendete Geometrie ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei Problemen der atmosphärischen Strahlungsübertragung wird meist der Winkel $\vartheta = 0$ mit der Richtung zum Zenit gleichgesetzt und ϑ als Zenitwinkel bezeichnet. Häufig wird nicht ϑ selbst, sondern die Größe $\mu = \cos \vartheta$ zur Beschreibung der Zenitwinkelabhängigkeit benutzt. Tabelle 1 faßt die wesentlichen radiometrischen Grundgrößen zusammen, zeigt ihre gebräuchlichen bzw. empfohlenen Symbole und Einheiten, sowie die Beziehungen zueinander. Als Grundgröße zur Beschreibung von Strahlungsfeldern sollte die

Strahllichte L angesehen werden. Sie ist definiert als die Energie, die pro Raumwinkeleinheit und pro Zeiteinheit eine Einheitsfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durchströmt. Diese Größe erlaubt die Beschreibung der Orts- und Richtungsabhängigkeit eines Strahlungsfeldes. Aus ihrer Kenntnis lassen sich alle energetisch interessanten Größen eindeutig bestimmen.

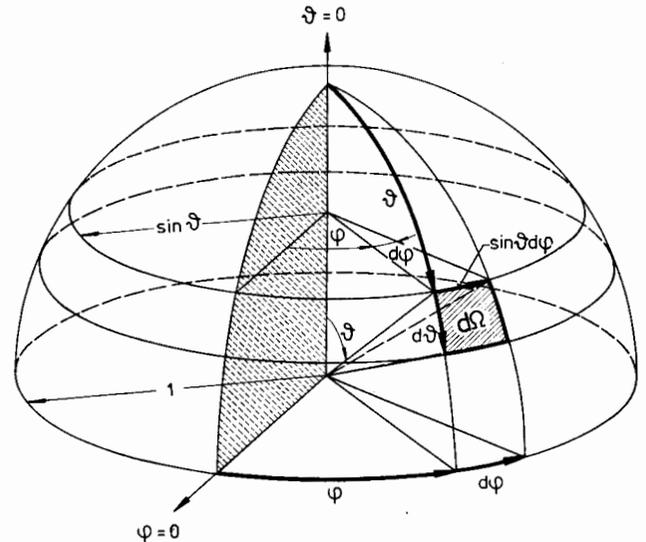


Abb. 1: Definition der üblichen Geometrie, Raumrichtungen und des Raumwinkelementes $d\Omega$

Die Strahlungsflußdichte durch eine Fläche, deren Normale in Richtung $\vartheta = 0$ zeigt, ist z. B. gegeben durch

$$F^+ = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} L(\vartheta, \varphi) \cos \vartheta \, d\Omega = \int_0^1 \int_0^{2\pi} L(\mu, \varphi) \mu \, d\mu \, d\varphi \quad (1)$$

F^+ gibt die gesamte Energie an, die pro Zeiteinheit durch eine Einheitsfläche tritt und eine Komponente in Richtung der Flächennormalen besitzt ($0 \leq \vartheta \leq \pi/2$). Die entsprechende Definition gilt auch für die Flußdichte in die entgegengesetzte Richtung F^- die durch $\pi/2 \leq \vartheta \leq \pi$ charakterisiert ist. Das entsprechende Integral über alle Raumrichtungen ergibt die Nettoflußdichte F_N , die den Nettoenergiefluß durch die betrachtete Fläche darstellt:

$$F_N = F^+ - F^- \quad (2)$$

Diese Größe ist es, deren Divergenz den Einfluß der Strahlung angibt. Da in vielen Anwendungen von einer horizontal homogenen Schichtung der Erdatmosphäre ausgegangen wird, so daß keine horizontalen Nettoflüsse auftreten und die Divergenz durch $\partial F_N / \partial z$ gegeben ist, liefert diese einen Quellterm in der Energiegleichung.

Alle Größen aus Tabelle 1 gelten für beliebige Wellenlängenintervalle. Monochromatische Größen werden mit einem Index λ (Wellenlänge), ν (Frequenz) oder κ (Wellenzahl) versehen und gelten für die infinitesimalen Intervalle auf deren Breite sie bezogen wurden. Der Zusammenhang lautet z. B. für die Strahllichte

$$L(\Delta\lambda) = \int_{\Delta\lambda} L_\lambda d\lambda.$$

Die Strahlung in der Atmosphäre ist als Folge der Streuung teilweise polarisiert. Die Polarisierungseigenschaften des Strahlungsfeldes können mit Hilfe des Stokes-Vektors $\vec{L} = (L, Q, U, V)$ beschrieben werden. Dabei ist L wieder die Strahldichte und Q stellt die Differenz der Strahldichten zweier senkrecht zueinander polarisierter Komponenten dar. U ist ein Maß für die Lage der Polarisierungsebene und V für die Elliptizität der Strahlung. Bei unpolarisiertem Licht ist $Q = U = V = 0$ und nur die Strahldichte $L \neq 0$. Wegen des immensen Aufwandes bei exakten Rechnungen mit polarisierter Strahlung wird vielfach die Polarisierung atmosphärischer Strahlung vernachlässigt und die Strahldichte als einzig interessierende Größe betrachtet.

Die dadurch verursachte Reduktion der Strahldichte ist dieser selbst, der Weglänge ds und dem entsprechenden Volumenkoeffizienten proportional. Für die Extinktion von Strahlung gilt dann der Zusammenhang

$$dL_\lambda = -\sigma_e L_\lambda(\vartheta, \varphi) ds \quad (6)$$

Es muß betont werden, daß alle optischen Eigenschaften der Materie und des Strahlungsfeldes im allgemeinen wellenlängenabhängige Größen sind. Zur Vereinfachung der Ausdrücke werden aber im folgenden die Wellenlängenindizes unterdrückt.

Werden die Strahlungsquellen durch das Symbol J bezeichnet, so kann die differentielle SÜG in der einfachen Form

$$\frac{dL}{ds} = -\sigma_e(L - J) \quad (7)$$

Tab. 1: Zusammenfassung der wichtigsten radiometrischen Größen und ihrer Einheiten

NAME	SYMBOL	EINHEIT	RELATION	DEFINITION
Strahlungsfluß	Φ	W		Strahlungsenergie pro Zeiteinheit durch beliebige Flächen
Strahlungsflußdichte	F	W m ⁻²	$F = \frac{d\Phi}{da}$	Strahlungsfluß durch eine Einheitsfläche
Abgestrahlte Flußdichte	M	W m ⁻²	$M = \frac{d\Phi}{da}$	Von einer Oberfläche abgestrahlte Flußdichte
Eingestrahlte Flußdichte	E	W m ⁻²	$E = \frac{d\Phi}{da}$	Auf eine Oberfläche eingestrahlte Flußdichte
Strahldichte L	L	W m ⁻² sr ⁻¹	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega da \cos\vartheta}$	Strahlungsenergie pro Zeiteinheit, die senkrecht durch eine Einheitsfläche in den Einheitsraumwinkel geht.

3 Die Strahlungsübertragungsgleichung

Der Durchtritt von elektromagnetischer Strahlung durch ein Volumenelement und die dabei auftretenden Veränderungen der Strahldichte werden durch die Strahlungsübertragungsgleichung (SÜG) beschrieben. Diese stellt eine Bilanzgleichung für die ein Volumenelement in die Richtung ϑ, φ durchlaufende Strahlung dar.

Die durch ein infinitesimal kleines Volumen am Ort P in Richtung ϑ, φ durchgehende spektrale Strahldichte $L_\lambda(\vartheta, \varphi)$ wird um dL_λ verändert. Dies kann durch eine Extinktion oder durch eine Erhöhung infolge von Emission oder von gestreuter Strahlung erfolgen. Die Extinktion kann durch Absorption und/oder durch Streuung verursacht sein. Beschrieben wird die Wirkung dieser Prozesse durch den Massenabsorptionskoeffizienten $\tilde{\sigma}_a$ und -streuoeffizienten $\tilde{\sigma}_s$, die zusammen den Massenextinktionskoeffizienten $\tilde{\sigma}_e$ ergeben:

$$\tilde{\sigma}_e = \tilde{\sigma}_a + \tilde{\sigma}_s \quad (\text{Einheit: m}^2/\text{kg}). \quad (4)$$

Das Produkt dieser Größen mit der Dichte ρ des strahlungsaktiven Mediums ergibt die Volumenabsorptions-, -streu- oder -extinktionskoeffizienten

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s = \tilde{\sigma}_a \rho + \tilde{\sigma}_s \rho \quad (5)$$

geschrieben werden. In kartesischen Koordinaten lautet diese Gleichung

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} L = -\sigma_e(L - J) \quad (8)$$

wobei $\vec{\Omega} = (\sin\vartheta \sin\varphi, \sin\vartheta \cos\varphi, \cos\vartheta)$ der Einheitsvektor der Raumrichtung \vec{s} ist. Ist ein Problem horizontal homogen, so entfallen die horizontalen Gradienten und die vertikale Koordinate wird häufig durch die optische Dicke τ ersetzt. (Nach Empfehlungen der Strahlungskommission soll statt des Symbols τ in Zukunft δ verwendet werden.) Diese ist definiert durch

$$d\tau = -\sigma_e dz \quad (9)$$

und führt zu folgender SÜG:

$$\mu \frac{dL}{d\tau} = L - J \quad (10)$$

Als Quelle von Strahlung in eine bestimmte Richtung ϑ, φ wirken sowohl Streuung als auch Eigenemission. Die durch Streuung hinzukommende Strahldichte wird häufig in zwei Terme aufgespalten. Der erste

$$dJ_1 = \sigma_s ds \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{4\pi} P(\vartheta', \varphi'; \vartheta, \varphi) L(\vartheta', \varphi') \sin\vartheta' d\vartheta' d\varphi' \quad (11)$$

stellt diejenige Energie dar, die durch Streuung diffuser Strahlung in die Richtung ϑ, φ gelangt. Während der Volumenstreu-
koeffizient σ_s angibt, wieviel der einfallenden Strahlung über-
haupt gestreut wird, stellt die Streufunktion $\frac{1}{4\pi} P(\vartheta', \varphi'; \vartheta, \varphi)$
den Anteil der aus Richtung ϑ', φ' einfallenden Strahlung dar,
der in Richtung ϑ, φ umgelenkt wird. Um alle Beiträge diffu-
ser Strahlung zu erfassen, ist über die aus allen Raumrichtun-
gen ϑ', φ' einfallende Strahldichte zu integrieren. Der zweite
Term

$$dJ_2 = \sigma_s ds \frac{1}{4\pi} P(\vartheta_0, \varphi_0; \vartheta, \varphi) (\pi F_0) e^{-\tau/\mu_0} \quad (12)$$

gibt diejenige Energie an, die aus der Richtung der direkten
(ungestreuten) Sonnenstrahlung ϑ_0, φ_0 in die Richtung ϑ, φ
umgelenkt wird. (πF_0) ist die extraterrestrische solare Energie-
dichte, die auf ihrem Weg durch die Atmosphäre zum Streu-
volumen um den Faktor $\exp(-\tau/\mu_0)$, mit $\mu_0 = \cos \vartheta_0$, ge-
schwächt wird, wobei die optische Dicke

$$\tau = \int_z^\infty \sigma_e dz.$$

Auf dem Weg durch das Volumenelement wird die Strahlung
nicht nur durch Streuung sondern auch durch Emission ver-
mehrt. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist diese zusätzliche
Energie proportional zum Produkt aus Planck-Funktion $B(T)$
und Absorptionskoeffizienten

$$dJ_3 = \sigma_a ds B(T). \quad (13)$$

Alle diese Strahlungsquellen sind in der oben eingeführten
Quellstrahldichte J folgendermaßen zusammengefaßt:

$$J \sigma_e ds = dJ_1 + dJ_2 + dJ_3 \quad (14)$$

und

$$J = \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\vartheta', \varphi'; \vartheta, \varphi) L(\vartheta', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta' d\varphi' \quad (15)$$

$$+ \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} P(\vartheta_0, \varphi_0; \vartheta, \varphi) (\pi F_0) e^{-\tau/\mu_0} + (1-\tilde{\omega})B(T)$$

Dabei ist $\tilde{\omega} = \sigma_s/\sigma_e$ die „single scattering albedo“, die angibt,
welcher Anteil der extingierten Strahldichte gerade durch
Streuung verursacht ist.

Durch Integration von Gleichung (7) entlang eines Weges zwi-
schen zwei Punkten P_1 und P_2 erhält man daraus die unmittel-
bar anschauliche integrale Form der SÜG

$$L(P_2) = L(P_1) e^{-\int_{P_1}^{P_2} \sigma_e ds} + \int_{P_1}^{P_2} J(P) e^{-\int_P^{P_2} \sigma_e ds} \sigma_e ds. \quad (16)$$

Sie gibt an, daß die Strahldichte an einem Punkt P_2 gegeben
ist durch die bei P_1 einfallende und auf dem Weg nach P_2 teil-
weise extingierte Strahlung, sowie die von den Quellen auf der
Strecke von P_1 bis P_2 emittierte Energie, die ihrerseits wieder
durch Extinktion geschwächt bei P_2 ankommt.

Die Aufgabe der Strahlungsforschung ist die Festlegung der
Einflußparameter für diese Grundgleichung und die Entwick-
lung der Lösungsmethoden.

4 Lösung der SÜG

Formal stellt die integrale Form (Gl. 16) schon die Lösung der
SÜG dar. Im Spezialfall verschwindender Quellterme ($J = 0$)
ergibt sich das Bouguer-Lambert-Beersche Gesetz der Strahl-
schwächung bei Durchgang durch eine homogene Schicht. Im
allgemeinen Fall hilft die Gleichung (16) nicht weiter, da die
Quellfunktion selbst wieder die eigentlich erst zu berechnende
Strahldichteverteilung enthält (Gl. 15). Die Beiträge 8 bis 10
stellen Lösungsmethoden vor, die für die vollständige Integro-
differentialgleichung entwickelt wurden. Zur praktischen Lö-
sung müssen im allgemeinen die Absorptions- und Streukoeffi-
zienten, die Streufunktion, die extraterrestrische solare Strahl-
ungsflußdichte und die Planck-Funktion bekannt sein.

Zu betonen ist noch einmal, daß die SÜG im allgemeinen nur
für monochromatische Größen gilt und eine Wellenlängenin-
tegration über die spektrale Strahldichte erst nach der Lösung
durchgeführt werden kann. Erst daraus ergibt sich der gesamt-
e Nettofluß, dessen Divergenz den tatsächlichen Energieum-
satz in der Atmosphäre aufgrund von Strahlungsprozessen
darstellt, der in der Energiegleichung benötigt wird.

Hier soll noch kurz erwähnt werden, daß die integrale SÜG
(Gl. 16) im streuungsfreien Fall auch als Grundgleichung der
Fernerkundung von Satelliten zu sehen ist. Die Bedeutung
dieser Gleichung wird vielleicht mit folgendem idealisierten
Beispiel klarer. Betrachtet man die Strahlung die senkrecht
nach oben zu einem Satelliten geht, und nimmt man an, daß
die Quellfunktion von der Höhe unabhängig sei, so lautet die
SÜG sehr einfach

$$L = L_B e^{-\tau_0} + J \int_0^{\tau_0} e^{-\tau} d\tau$$

wobei $\tau_0 = \tau(z = 0)$ die gesamte optische Dicke der Atmo-
sphäre ist.

Da der Erdboden annähernd wie ein schwarzer Körper strahlt,
ist die Strahldichte vom Boden L_B ungefähr durch die Planck-
funktion bei Bodentemperatur B_B gegeben. Die konstante
Quellfunktion in der Schicht ist durch die Planck-Funktion
 $B(\bar{T})$ zu einer mittleren Atmosphärentemperatur \bar{T} gegeben.
Dann lautet die Lösung für die am Satelliten ankommende
Strahldichte

$$L = B_B + (B - B_B) \tau_0 \quad \tau_0 \ll 1$$

$$L = B_B e^{-\tau_0} + B(1 - e^{-\tau_0}) = B \quad \tau_0 \gg 1$$

Bei großer optischer Dicke der Atmosphäre empfängt der Sa-
tellit hauptsächlich aus der Atmosphäre Information. Bei ge-
ringer optischer Dicke läßt sich die Planck-Funktion der
Oberfläche und damit deren Temperatur fast ungestört mes-
sen. Diese prinzipiellen Möglichkeiten werden in der Praxis
der Fernerkundungsmethoden benutzt, um im infraroten
Spektralbereich Informationen über die Temperatur des Erd-
bodens (im Fenster zwischen 10 und 12 μm) und über die der
Atmosphäre (im Bereich der Wasserdampf- und CO_2 -
Absorption) zu erhalten.