

ZUR KLIMATOLOGIE DER STRAHLUNGSBILANZ AN DER ERDOBERFLÄCHE

Tages- und Jahresgänge in den Klimaten der Erde*)

Mit 2 Abbildungen, 1 farbigen Beilage (I) und 4 Tabellen

ALBRECHT KESSLER

Summary: Contribution to the climatology of the radiation balance at the earth's surface

With the help of mean hourly sums of the radiation balance at the earth's surface for all months, the daily and annual cycle of events is discussed. A selection of the most important climatic areas of the world is considered. The daily and annual cycles are presented in isopleth form on the coloured diagrams. In this way it is possible to make a simple comparison with the thermoisopleths published by TROLL.

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche gehört zu denjenigen komplexen Klimaelementen, die bisher einer klimatologischen Behandlung nur in begrenztem Umfang zugänglich waren, weil genügend lange Beobachtungsreihen nur von verhältnismäßig wenigen Stellen vorlagen. Trotz dieser Situation sind wir über die großräumige Verteilung etwa der Monatssummen der Strahlungsbilanz jedoch schon recht gut informiert, da es gelang, die Werte aus den sogenannten „primitiven Klimaelementen“ abzuleiten. Die ersten Karten der Strahlungsbilanz für ein größeres Gebiet wurden von SVERDRUP (1943) veröffentlicht, und zwar für den Nordatlantik und Nordpazifik. Aus der großen Zahl ähnlicher Darstellungen, die seitdem erschienen sind, seien hier nur folgende umfangreiche Bearbeitungen herausgegriffen: BUDYKO (1963), ALBRECHT (1965), BERNHARDT und PHILIPPS (1966) und CHANG (1970). Weitere wichtige klimatologische Größen der Strahlungsbilanz wie zeitliche Schwankungen, Extremwerte, die feineren Strukturen des mittleren täglichen Ganges waren mit den erwähnten Methoden nicht zu erhalten. Der Grund dafür liegt vor allem in der auch heute noch mangelnden Kenntnis und der fehlenden laufenden Registrierung und Veröffentlichung der Tagesgänge der Temperatur der Bodenoberfläche bzw. der „tätigen Oberfläche“, die die Emission langwelliger Strahlung charakterisiert, der Tagesgänge der Bewölkung und auch des Dampfdrucks. Seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 hat sich die Datenlage wesentlich gebessert. Das globale Meßnetz für die Strahlungsbilanz wurde erheblich erweitert. Die Daten des Weltnetzes werden seit 1964 von dem Geophysikalischen Hauptobservatorium in Leningrad (Leiter Prof. M. I. BUDYKO) monatlich veröffentlicht.

Basierend auf diesem Material wird in der vorliegenden Studie ein Vergleich der mittleren Tages- und Jahresgänge der Strahlungsbilanz in den verschiedenen Klimagebieten der Erde angestrebt. Vor nunmehr 30 Jahren hat C. TROLL (1943) einen ähnlichen Vergleich für den Temperaturgang der bodennahen Luft angestellt und daraus thermische Klimatypen der Erde abgeleitet (vgl. ferner TROLL 1964 und PAFFEN 1966 und 1967). Es ist sehr reizvoll, die Thermoisoplethendarstellungen bei TROLL (1943, Diagrammtafel) mit den hier vorgelegten Isoplethen der Strahlungsbilanz (vgl. Beil. I) wegen vieler gemeinsamer, aber auch kontrastierender Züge zu vergleichen.

Als Ausgangsmaterial für die Konstruktion der Diagramme dienten mittlere Stundensummen der Strahlungsbilanz. Es wurden die Daten aus folgenden Jahren benutzt, die allerdings nicht immer vollständig waren; besonders große Lücken werden durch Klammern angezeigt; außerdem sind die Gerätetypen verzeichnet, die bei den Messungen verwendet wurden (GD = Gier and Duncle, S = Schulze, F = Funk, M = M 10 [Sowjetunion], O = ohne Angabe).

Yangambi 1957–59 GD, Khormaksar 1964–66 GD, Dakar 1965–68 GD, Poona (1964–66) S, New Delhi 1964–66 F, Qrendi 1964–66 O, Aspendale 1964–71 F, Vladivostok 1964–68 M, Aralskoe More 1964–68 M, Ocean Weather Station P (1967–69) F, Port Stanley 1964–66 GD, Irkutsk 1964–68 M, Hamburg 1964–71 S, Omsk 1964–68 M, Verkhoyansk 1964–68 M, Novolazarevskaya 1964–68 M, Resolute 1964–68 F, Halley Bay 1964–66 GD, Vostok 1966–68 M.

Die Linienführung brachte für die Bereiche mit positiven Werten trotz der z. T. relativ kurzen Meßreihen keine besonderen Probleme. Die großen klimatologischen Züge und Gegensätze traten im allgemeinen deutlich hervor. Im Bereich der positiven Werte wurden die Linien im Abstand von 5 cal/cm² Stunde gezeichnet. Ausnahmen bilden nur Halley Bay und Vostok mit Abständen von 1 cal/cm² Stunde. Bei beiden Stationen besteht die Erdoberfläche während aller Stunden des Jahres aus kompaktem Schnee oder Firnschnee.

Im Bereich mit negativen Werten insbesondere während der Nachtstunden treten nur sehr geringe Unterschiede auf. Deshalb wurde hier für sämtliche Stationen ein Abstand von 1 cal/cm² Stunde gewählt. Im Gegensatz zu den Stunden mit positiver kurzweiliger Bilanz (vgl. Gleichung 2) machen sich während der Nachtstunden mit ausschließlich langwelliger Strahlungsströmen bei kürzeren Meßreihen Unregelmäßigkeiten der Witterung stärker bemerkbar. Es

*) Herrn Prof. Dr. Walter Dammann zum 65. Geburtstag.

wäre auch günstiger, wenn für diesen Bereich wenigstens Halbstundenwerte für Dekadenabstände zur Verfügung ständen. Aus diesem Grunde schieden einige sonst sehr typische Beispiele von vornherein für die Veröffentlichung aus. Einige hier gebotene Beispiele (Wetterschiff P, Port Stanley), auf die aber nicht verzichtet werden sollte, zeigen aus den genannten Gründen noch gewisse Unzulänglichkeiten.

Auf einen weiteren „Schönheitsfehler“, der mit der Aufbereitung des Datenmaterials zusammenhängt, sei kurz hingewiesen. Die verwendeten Stundensummen beziehen sich auf mittlere Ortszeit (MOZ). Wegen des Jahresganges der Zeitgleichung $Z = \text{WOZ} - \text{MOZ}$ mit einer Amplitude von 30 Minuten entspricht z. B. die gerissene Linie des 12 Uhr-Termins in den Diagrammen nicht in allen Monaten dem höchsten täglichen Sonnenstand. An der Äquatorstation Yangambi, für die die Verhältnisse genauer untersucht wurden, pendeln die Tagesmaxima mit nur wenigen Ausnahmen entsprechend der Zeitgleichung zwischen den Stundenwerten 11–12 Uhr und 12–13 Uhr. Um die Darstellungen dem wahren Sonnenstand anzupassen, wird die Einführung von krummlinigen Abszissen notwendig. Beim Zeichnen der Isoplethen wurden diese Verschiebungen möglichst ausgeglichen, die sich in gleicher Weise natürlich auch auf die Nulllinien auswirkten. In späteren Entwürfen, die auf langjährigen Mittelwerten beruhen und die schon deshalb in Einzelheiten genauer sein können, sollte man durch Verschiebung der Monatskolumnen von vornherein den Fehler korrigieren.

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche R ist durch die Energiebilanzgleichung

$$R + B + L + V = 0 \quad \text{oder} \quad -R = B + L + V \quad (1)$$

mit dem Bodenwärmestrom B , dem Strom fühlbarer Wärme L und dem Strom latenter Wärme V verknüpft. Die zweite, oft gewählte Form der Gleichung ist insofern ungünstig, als sie zu der Annahme verleiten könnte, daß die Strahlungsbilanz eine unabhängige Variable ist. Wie aber mittelbar Gleichung (4) zeigt, ist die Strahlungsbilanz in komplexer Weise mit den anderen Energieströmen verknüpft. Man muß schon bis auf die Sonnenstrahlung am Außenrand der Atmosphäre zurückgreifen (vgl. die Kurven Abb. 2), um die unabhängige Variable des Strahlungshaushaltes zu erfassen (vgl. LETTAU 1969). Im Zusammenhang mit der künstlichen, unbeabsichtigten Klimamodifikation durch die Tätigkeit des Menschen hat FLOHN (1970) eindringlich darauf hingewiesen, daß durch diese Energiemengen freigesetzt werden, die nicht mehr zu vernachlässigende Bruchteile von R ausmachen (vgl. auch KESSLER 1968 S. 1ff.). Es ist offenbar an der Zeit, einen Überblick darüber zu gewinnen, was wir unter den natürlichen Verhältnissen zu verstehen haben. Bei der Behandlung landschaftsökologischer Probleme, die heute im Zusammenhang mit der künstlichen Veränderung der Umwelt in den

Blickwinkel allgemeinen Interesses gerückt sind, sollte die Untersuchung der Strahlungsbilanz dann an erster Stelle stehen, wenn Fragen des Energie- und Wasserhaushalts berührt werden, weil die Strahlungsbilanz trotz der oben angedeuteten Einschränkung die wichtigste Größe der Energieumsätze darstellt.

Die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche R setzt sich aus der Differenz zwischen den kurz- und langwelligen zur Erdoberfläche gelangenden Strahlungsströmen ($KW \downarrow$ und $LW \downarrow$) und den von ihr ausgehenden kurz- und langwelligen, teils reflektierten teils emittierten Strahlungsströmen ($KW \uparrow$ und $LW \uparrow$) zusammen:

$$R = (KW \downarrow + LW \downarrow) - (KW \uparrow + LW \uparrow) = (KW \downarrow - KW \uparrow) + (LW \downarrow - LW \uparrow) \quad (2)$$

Da während der Nachtstunden die kurzwellige Bilanz $RK = (KW \downarrow - KW \uparrow) = 0$ wird, reduziert sich die Strahlungsbilanz auf die langwelligen Anteile

$$RL = LW \downarrow - LW \uparrow \quad (3)$$

Die kurzwellige Bilanz setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung Q und der diffusen Himmelsstrahlung q und aus dem an der Erdoberfläche mit der kurzwelligen Albedo α reflektierten Anteil $(Q + q) \alpha$ zusammen:

$$RK = (Q + q) - (Q + q) \alpha = (Q + q) (1 - \alpha).$$

Die langwellige Bilanz kann man in folgende Anteile zerlegen:

1) In die langwellige Emission E der Erdoberfläche. Sie hängt von der Temperatur der Oberfläche ab: $E = \epsilon \sigma T^4$, mit T Oberflächentemperatur in $^{\circ}\text{K}$, σ Stefan-Boltzmann-Konstante und ϵ Emissionsvermögen der Oberfläche.

2) In die Gegenstrahlung aus dem oberen Halbraum G , die von der Temperatur des atmosphärischen Gases und dessen Mengenanteilen an 3atomigen Gasen, im wesentlichen H_2O , CO_2 und O_3 , abhängt. Außerdem geht langwellige, zur Erdoberfläche gerichtete Strahlung von den Wolkenunterflächen aus, die wiederum von deren Temperatur abhängig ist.

3) In den – dem Betrag nach geringen – Anteil der reflektierten Gegenstrahlung $(1 - \epsilon) G$.

Insgesamt kann man schreiben:

$$RL = G - (1 - \epsilon) G - \epsilon \sigma T^4 = \epsilon (G - \sigma T^4). \quad \text{Daraus folgt für die Gesamtstrahlungsbilanz}$$

$$R = (Q + q) (1 - \alpha) + \epsilon (G - \sigma T^4) \quad (4)$$

Die kurzwellige Bilanz RK kann im Sinne unserer Definition nur ≥ 0 sein, da der reflektierte Anteil nicht größer als der eingestrahlte werden kann. Da in der langwelligen Bilanz RL im klimatologischen Mittel, worauf sich alle weiteren Erörterungen beziehen sollen, σT^4 immer größer als G ist, wird die langwellige Bilanz negativ. Daher sind während der Nachtstunden vom Dämmerungsende bis zum Dämmerungs-

beginn die Stundensummen der Gesamtstrahlungsbilanz in allen Klimaten der Erde ohne Ausnahme negativ, was in den Diagrammen (vgl. Beil. I) durch die grünen und blauen Töne angedeutet wird. Der Übergang von positiven zu negativen Werten von R und umgekehrt vollzieht sich sogar mit einer gewissen zeitlichen Verfrühung bzw. Verzögerung vor Sonnenuntergang bzw. nach Sonnenaufgang, weil bei niedriger Sonnenhöhe die kurzwellige Bilanz noch kleiner als die langwellige Ausstrahlung ist. In den Schnee- und Eisklimaten der höheren Breiten mit niedriger Sonnenhöhe wird dieser Effekt durch hohe Albedowerte noch verstärkt, so daß auch während weiterer Tagesstunden die Gesamtstrahlungsbilanz R negativ bleiben kann. Im allgemeinen laufen aber die Nullisoplethen der Strahlungsbilanz in allen Klimagebieten parallel zu den Linien des Sonnenaufgangs und -untergangs. Je nach geographischer Lage, Klimacharakter und Jahreszeit besteht eine zeitliche Differenz zwischen den Linienpaaren von einer halben bis zweieinhalb Stunden, abgesehen von den Jahreszeiten und den Klimabereichen mit hoher kurzweiliger Albedo der Erdoberfläche. Wegen der steileren Neigung der Sonnenbahn zur Horizontlinie in den niederen Breiten

ist dort auch die Zeitdifferenz zwischen dem Strahlungsbilanzwert Null und Sonnenaufgang und -untergang im allgemeinen geringer als in höheren Breiten.

Aus diesen Bemerkungen folgt aber, daß mehr als die Hälfte der Stundensummen des Jahres negative Werte aufweisen müssen. Die grünen und blauen Farbtöne in den Diagrammen überwiegen deutlich. In Tabelle 1 ist die Anzahl der Stundensummen der Strahlungsbilanz R mit positiven Werten angegeben. Die Auszählung basiert auf mittleren monatlichen Stundensummen, deren Jahresmenge demnach $24 \times 12 = 288$ beträgt. In den niederen und mittleren Breiten besteht kein wesentlicher Unterschied. Der Einfluß der kurzen und langen Tage der Mittelbreiten gleicht sich gegenüber den immer ungefähr gleichlangen Tropentagen aus. Hamburg ($53^\circ 38' N$) hat mit 123 Stunden die gleiche Anzahl wie Yangambi ($0^\circ 49' N$). In höheren Breiten nimmt die Zeitdauer mit geringer Sonnenhöhe zu, außerdem macht sich die länger andauernde Schneebedeckung bemerkbar – vergleiche Omsk gegenüber Hamburg –, so daß ein starker Rückgang der positiven Stundensummen zu verzeichnen ist.

Tabelle 1: Mittlere tägliche Anzahl von Stundensummen der Strahlungsbilanz mit Werten ≥ 0 , ausgezählt auf der Basis monatlicher Mittelwerte

Mean daily number of hourly sums of net radiation with values ≥ 0 , calculated from monthly mean values

Nordhalbkugel	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Südhalbkugel	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jahr
Yangambi	10	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11	10	123
Khormaksar	10	10	10	10	11	11	11	10	10	10	10	10	123
Dakar	9	10	10	10	11	11	11	11	11	11	9	9	123
Poona	9	10	10	11	12	12	11	12	12	10	10	10	129
New Delhi	8	10	10	10	11	12	12	12	11	10	8	8	122
Qrendi	8	9	10	11	12	12	12	12	10	10	8	8	122
Aspendale	8	9	10	12	12	12	12	12	10	11	8	8	124
Vladivostok	6	8	10	12	12	14	14	12	10	10	8	6	122
Aralskoe More	7	8	10	12	12	13	12	12	10	9	8	6	119
Ocean Weather Station P	6	8	10	12	14	14	14	12	11	9	8	6	124
Port Stanley	6	8	10	12	13	14	14	12	10	8	6	4	117
Irkutsk	6	8	10	12	14	14	14	13	11	9	7	4	122
Hamburg	6	8	10	12	14	14	14	13	11	9	7	5	123
Omsk	0	5	9	12	14	14	14	12	10	8	5	0	103
Verkhoyansk	0	0	3	11	16	17	16	14	10	2	0	0	89
Novolazarevskaya	0	0	8	11	16	18	17	14	10	4	0	0	98
Resolute	0	0	5	10	16	20	19	15	10	0	0	0	95
Halley Bay	0	0	0	6	13	14	15	10	5	0	0	0	63
Vostok	0	0	0	13	15	19	19	16	16	0	0	0	98

Die Strukturen im positiven Bereich der Diagramme (vgl. Beilage I)

Betrachten wir zunächst die Strukturen, die durch die kurzweilige Bestrahlung und Reflektion geprägt werden. Gegenüber den solarklimatischen Idealstrukturen, die durch die extraterrestrische Einstrahlung bestimmt werden, treten Änderungen vor allem durch die Bewölkung und durch die unterschiedliche kurzweilige Albedo der Erdoberfläche auf. Hier ist der Hinweis notwendig, daß die Meßgeräte normalerweise auf gewöhnlichen meteorologischen Meßplätzen aufgestellt sind. Dadurch erhalten die Messungen in gewisser Weise eine „mikroklimatische Lokaltönung“, die stärker als bei der Hüttentemperaturmessung ist. Außerdem sind die Strahlungsbilanzwerte dann nicht ohne weiteres repräsentativ für die charakteristischen großräumigen Strahlungsumsätze, wenn sich die allgemeine Vegetationsoberfläche des Gebietes, wie z. B. in Waldgebieten, völlig von derjenigen des Meßplatzes unterscheidet. Diese Gesichtspunkte fallen weniger ins Gewicht für die Meeresoberfläche (vgl. das Wetterschiff P), für die arktischen Stationen, für die Trokengengebiete ohne Vegetation und für die Stationen, deren Meßplatzvegetation und -bodenwasserhaushalt den natürlichen oder charakteristischen, großräumigen Verhältnissen entsprechen. Streng genommen sind die Werte nur dieser Stationen mit den Daten etwa des Wärmehaushaltatlas von BUDYKO (1963) vergleichbar.

In den Tropen existieren durch den zweimaligen Zenitstand der Sonne je zwei Maxima und Minima der Einstrahlung. Bei keinem der hier behandelten Beispiele fallen alle Extremwerte der Einstrahlung mit den Strahlungsbilanzextremwerten zusammen. Hierfür ist vor allem der individuelle Bewölkungsgang verantwortlich. Nur das Winterminimum ist im allgemeinen synchron. Am stärksten wird bei Poona die Wirkung des zweiten Zenitstandes durch die monsunale bedingte Bewölkung unterdrückt. Allgemein fällt auf, daß das erste Strahlungsbilanzmaximum im Jahr ungefähr mit dem ersten Zenitstand zusammenfällt, während sich das zweite Strahlungsbilanzmaximum gegenüber dem zweiten Zenitstand der Sonne stark verspätet und auch weniger intensiv ausgebildet ist. Die höchsten mittäglichen Werte von R in den Tropen sind in den semiariden Gebieten zur Zeit des ersten Zenitstandes zu finden (Dakar, Khormaksar). Bei sehr geringer Bewölkung im Vergleich etwa zu Yangambi im Bereich der immerfeuchten Tropen erreicht in dieser Zeit die kurzweilige Einstrahlung bei beiden Stationen sehr hohe Werte, deren Überschuß gegenüber den Stationen mit starker Bewölkung offensichtlich nicht durch verstärkte langweilige Ausstrahlung wieder vollständig kompensiert werden kann. Hohe Verluste durch langweilige Strahlung treten hier durch Bodenüberhitzung, geringe Bewölkung und verhältnismäßig geringen Wasserdampfgehalt der Luft ein. Die

großen Werte der nächtlichen Ausstrahlung zeigen dies sehr deutlich.

Bei Stationen jenseits der Wendekreise sind die Strukturen der positiven Strahlungsbilanz am stärksten nach den Sonnenstandextremen ausgerichtet. Durch monsunale Vorgänge können sich aber auch hier zweigipflige Strahlungsbilanzextreme ausbilden (vgl. New Delhi, Vladivostok). Bei Qrendi, Aspendale und Aralskoe More läuft aus großklimatischen Gründen der Gang der Himmelsbedeckung invers zur Sonnenhöhe. Dadurch wird das Strahlungsbilanzmaximum während des höchsten Sonnenstandes noch besonders hervorgehoben. Mit 56.9 cal/cm^2 Stunde zwischen 11 und 12 Uhr im Juli wird bei Qrendi die höchste Stundensumme aller ausgewählten Beispiele erreicht, und zwar in einer Position von mehr als 10° Abstand vom nördlichen Wendekreis. Da der Gerätetyp nicht bekannt ist, wäre zu prüfen, ob die Vergleichbarkeit der Messung gesichert ist.

Je weiter man in höhere Breiten gelangt, um so weniger erscheint es möglich, daß durch den Einfluß der Bewölkung mehrere Gipfel von Strahlungsbilanzwerten erzeugt werden können. Die Bewölkungsunterschiede wirken nur noch abschwächend, verstärkend oder etwas verschiebend auf die vom Sonnenstand determinierten Extremstellen. Beispiele dafür sind das kontinental gelegene Omsk und Hamburg, beide auf gleicher Breite.

Während bisher vor allem der Einfluß der Bewölkung diskutiert wurde, sind noch einige Bemerkungen zum Einfluß der kurzweiligen Albedo notwendig. In der zweiten Reihe der Diagrammbeispiele auf der Beilage I mit Stationen um 50° Breite fällt das Wetterschiff P etwas aus dem Rahmen durch hohe positive Werte. Sie kommen in erster Linie durch kleine Albedowerte für Wasseroberflächen im Vergleich zu denjenigen festländischer Oberflächen zustande. Weiterhin ist die langweilige Emission wegen der verhältnismäßig niedrigen Wassertemperaturen abgeschwächt. Der hohe Wasserdampfgehalt über der Meeresoberfläche tut ein übriges zur Verstärkung der Gegenstrahlung. Das Wetterschiff ist im übrigen die einzige Station, bei deren Messung eine Art „Schönwetterauswahl“ stattfindet. Bei Windstärken größer als 7 Beaufort und starker Dünung muß die Messung unterbrochen werden. Instruktiv ist ein Vergleich zwischen Port Stanley und dem Wetterschiff. Sie liegen auf gleicher Breite, haben beide hochozeanisches Klima, nur die Meeresoberflächen sind extrem verschieden: grasbestandene Festlandoberfläche und Meeresoberfläche.

In den Polargebieten modifizieren vor allem große Albedozahlen von Schnee- und Eisoberflächen die normalen Einstrahlungsstrukturen kurzweiliger Strahlung. In Omsk bleibt R im Winter wegen der anhaltenden Schneedecke zur Mittagszeit negativ im Gegensatz zu den anderen Stationen der gleichen Breite. Die schieläugigen Konturen von Verkhoyansk und Resolute sind eine Auswirkung der erst nur langsam,

Tabelle 2: Kurzwellige Albedo α in %
Shortwave albedo α in %

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Vostok	—	97	85	86	83	82	80	82	81	80	—	—
Novolazarevskaya	—	34	28	30	26	26	22	22	24	25	27	—

später um so schneller dahinschwindenden Schneedecke. Sehr drastisch kommt die Bedeutung der Albedo bei den drei antarktischen Stationen zum Ausdruck (vgl. auch Tabelle 2). In Novolazarevskaya, einer Oase der Antarktis, bildet sich normalerweise während des ganzen Jahres keine Schneedecke aus. Halley Bay liegt auf schneebedecktem Schelfeis, Vostok ist Inlandeisstation, übrigens die höchstgelegene Station unserer Beispiele. Das Strahlungsbilanzmaximum erscheint ähnlich wie bei den anderen Stationen bei Novolazarevskaya im Dezember während der Mittagsstunden (36.9 cal/cm^2 Stunde, 12–13 Uhr). Es ist allerdings ca. 5 mal so hoch. Für fast 71°S ist diese Intensität der Strahlungsbilanz im Vergleich mit den niederen Breiten erstaunlich hoch. Hier wirken mehrere Faktoren in gleicher Richtung. Der Linkesche Trübungsfaktor ist bei großer Reinheit der Atmosphäre und geringem Wasserdampfdruck nur sehr gering. Der extraterrestrische Strahlungsfluß erreicht bei Perihelposition im Dezember sein Maximum. Die langwellige Emission des Bodens ist entsprechend der niedrigen Oberflächentemperatur ebenfalls gering.

Die Strukturen im negativen Bereich der Diagramme (vgl. Beilage I)

Der Bereich mit negativen Strahlungsbilanzwerten überdeckt, wie oben bereits näher ausgeführt wurde, randlich noch Gebiete mit positiver kurzweiliger Bilanz RK zur Zeit niedriger Sonnenhöhe. In den höheren Breiten wird wegen der langanhaltenden Dämmerung der Anteil an Tagesstunden mit positiver kurzweiliger, aber negativer Gesamtstrahlungsbilanz größer. Insgesamt werden aber die großen Züge im negativen Bereich von der langwelligen Bilanz beherrscht. Es steht die Frage im Vordergrund, inwieweit die temperaturabhängige Oberflächenemission kompensiert werden kann von der Gegenstrahlung, die ihrerseits ein Abbild des Wasserhaushaltes der Atmosphäre – ihres Bewölkungsgrades und Wasserdampfgehaltes – ist. Da der CO_2 - und O_3 -Gehalt der Atmosphäre weniger schwankt bzw. der Anteil dieser Gase an der Gegenstrahlung im Vergleich zum Wasserdampf stark zurücktritt, kann sich die Analyse im wesentlichen auf das Zusammenwirken von Oberflächentemperatur, Bewölkung und Wasserdampfgehalt beschränken.

Maximalwerte nächtlicher Ausstrahlung – also negativer Werte der Strahlungsbilanz R – treten in den Trockengebieten oder Trockenzeiten mit geringem Be-

wölkungsanteil auf, weil da die Gegenstrahlung reduziert ist und weil wenigstens auf den Festländern das positive Strahlungssaldo während des Tages wegen der geringen Bodenfeuchte nur für die Erwärmung des Bodens und der Luft verbraucht wird und daher der Boden besonders stark aufgeheizt werden kann (vgl. im tropischen Trockenklima die Station Khormaksar; tropische Klimate mit ausgeprägter Trockenzeit: Dakar, Poona, New Delhi; Trockenklimate oder Trockenzeiten in den Subtropen und in nördlich angrenzenden kontinentalen Räumen: Qrendi, Aralskoe More).

Die monsunalen Typen (Poona, New Delhi, Vladivostok) zeichnen sich dadurch aus, daß der Zeitraum mit größtem nächtlichem Strahlungsverlust noch etwas vor bzw. nach den Extremen mit positiver Bilanz während des Tages verschoben ist. Nicht weniger eindrucksvoll und regelhaft treten die Konturen bei den Stationen hervor, deren Änderungen des nächtlichen Strahlungshaushalts durch die Verschiebung der planetarischen Zirkulationsgürtel bedingt sind (Dakar, Qrendi, Aspendale). Bei den subtropisch-mediterranen Stationen Qrendi und Aspendale koinzidieren positive und negative Extreme. Aspendale präsentiert sich als Vertreter der Südhalbkugel im Vergleich zu Qrendi als ausgeglichener Typ. In Dakar fällt die stärkste nächtliche Ausstrahlung mit dem winterlichen Minimum der positiven Bilanz zusammen. Bei Qrendi läßt sich der Vorrang der Bewölkung vor dem Wasserdampfgehalt bei der Gegenstrahlung demonstrieren. Erst eine geschlossene Wolkendecke schließt bekanntlich das bei Gegenwart von Wasserdampf noch geöffnete „Fenster“ für die Ausstrahlung. Qrendi hat einen Wasserdampfhaushalt, der mit dem Temperaturgang etwa parallel geht: Hohe Werte in den Monaten Juli bis September, tiefe Werte in den Monaten Januar bis März. Der Bewölkungsgang läuft invers dazu und es kommt bei hoher Bodenerwärmung und geringer Himmelsbedeckung zu besonders starker Ausstrahlung. Bei Dakar werden in den Monaten Juli bis Oktober die stärkste Bewölkung und die höchsten Wasserdampfdrucke beobachtet. Durch die regenzeitliche Bodenbefeuchtung und durch den Strahlungsenergieverbrauch für die Verdunstung sind in dieser Zeit einer weiteren Bodenerwärmung trotz steigender Lufttemperaturen bis zum Oktober Grenzen gesetzt. Die Folge davon ist eine Abnahme der nächtlichen Ausstrahlung von Juli bis Oktober. In den innertropischen Regenklimate (vgl. Yangambi) sorgen wäh-

rend des ganzen Jahres relativ hohe Bewölkung, großer Wasserdampfgehalt, ständige Bodenbefeuchtung und hohe Verdunstung mit daraus resultierender abgeschwächter Bodenaufheizung für einen, im Vergleich zu den eben genannten Beispielen (ebenso auch Khor-maksar), stark reduzierten nächtlichen Energieverlust durch Strahlung. Die festländischen Beispiele um 50° Breite (Port Stanley kann noch nicht klar beurteilt werden) haben im Winter geringste Intensitäten der Ausstrahlung. Konträr dazu scheint der Gang beim Wetterschiff P zu verlaufen. Die Verhältnisse dort sind ebenfalls noch etwas schwach durch Daten belegt. Offenbar sind wegen der verhältnismäßig hohen Wassertemperaturen größere negative Bilanzwerte in der kalten Jahreszeit zu erwarten. In Hamburg, wo die Verhältnisse besonders gut belegt sind, kommt das Ausstrahlungsmaximum im Frühjahr durch ein Bewölkungsminimum und durch die häufigen Einbrüche polarer Kaltluftmassen mit geringem Wasserdampfgehalt und hoher Transparenz der Atmosphäre zustande. Als ähnlicher Typ leitet Verkhoyansk zu den polaren Beispielen über.

Halley Bay und Vostok haben trotz minimalem Wasserdampfgehalt und geringer Trübung vor allem wegen der äußerst niedrigen Oberflächentemperaturen nur geringe Intensitäten der Ausstrahlung aufzuweisen. Die Temperaturinversion der unteren Atmosphäre mildert ebenfalls den Strahlungsverlust. Bei niedriger Bewölkung kann es daher sogar kurzzeitig zu positiven Werten der langwelligen Bilanz RL kommen. Die monatlichen Schwankungen der Ausstrahlung während der Polarnacht sind gleichfalls unbedeutend. Die

Oase Novolazarevskaya fällt wegen der besonderen Oberflächenverhältnisse wieder aus dem Rahmen.

Besonderheiten des Tagesganges

Sieht man einmal vom engeren Polargebiet ab, so fallen bei allen Stationen und in allen Monaten ohne Ausnahme die Stundensummen mit höchster positiver oder geringster negativer Bilanz auf die Zeit von 11–12 oder 12–13 Uhr. Auch der zweithöchste Wert ist mit nur wenigen, wahrscheinlich nicht charakteristischen Ausnahmen in diesem Zeitraum zu finden. Das bedeutet, daß die Kurve der Strahlungsbilanz im Tagesbereich auf der Basis von Stundensummen in allen Klimaten eingipflig ist. Das ist allerdings nicht so zu verstehen, daß in Klimaten mit ausgeprägtem, zeitlich begrenztem, mittäglichem Maximum konvektiver Bewölkung nicht doch durch eine entsprechende Depression der Einstrahlung ein doppeltes Maximum zustande kommen kann. Eine genaue Analyse ist nur mit kleineren Zeitintervallen möglich (Halbstunden- oder Zehnminutensummen). Ausnahmen dieser Regel im Bereich negativer Bilanzwerte zeigen bemerkenswerterweise einige Stationen des Polargebietes im Winter oder während der Polarnacht. Tabelle 3 enthält die winterlichen Stundensummen von Verkhoyansk. Besonders deutlich zeigt sich die Abweichung im November.

Eine Regelmäßigkeit findet man mit entsprechender Ausnahme der Polargebiete auch beim Minimum der täglichen Strahlungsbilanzkurve. Je nach Jahreszeit und geographischer Breite wird dieses etwa 3–9 Stun-

Tabelle 3: Mittlere Stundensummen der Strahlungsbilanz R in cal/cm^2 Stunde im Winter für Verkhoyansk
(1 bedeutet für die Stunde von 0 bis 1)
Mean values of hourly sums of net radiation R in cal/cm^2 hour in winter from Verkhoyansk (1 means sum from 0 to 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Okt.	−1.4	−1.6	−1.5	−1.5	−1.5	−1.4	−1.4	−1.5	−1.3	−0.8	−0.6	0.0
Nov.	−1.1	−1.0	−1.1	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.1	−1.3	−1.5	−1.5
Dez.	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−0.9	−0.9	−1.0	−1.0	−1.0	−1.1
Jan.	−0.8	−0.8	−0.8	−0.8	−0.7	−0.7	−0.8	−0.8	−0.8	−0.9	−0.8	−0.8
Feb.	−0.7	−0.8	−0.8	−0.8	−0.7	−0.7	−0.8	−0.8	−0.8	−0.7	−0.8	−0.9
März	−1.3	−1.2	−1.2	−1.2	−1.1	−1.1	−0.9	−0.7	−0.6	−0.4	−0.1	+0.2
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Okt.	+0.1	−0.3	−0.7	−1.3	−1.7	−1.7	−1.8	−1.7	−1.7	−1.7	−1.6	−1.6
Nov.	−1.7	−1.6	−1.4	−1.2	−1.2	−1.1	−1.2	−1.1	−1.1	−1.0	−1.1	−1.0
Dez.	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.0	−1.1	−1.0
Jan.	−0.8	−0.8	−0.8	−0.9	−0.8	−0.8	−0.8	−0.6	−0.7	−0.6	−0.6	−0.6
Feb.	−0.8	−0.9	−0.9	−0.8	−0.8	−0.8	−0.8	−0.8	−0.8	−0.8	−0.7	−0.8
März	+0.3	+0.2	−0.1	−0.7	−1.1	−1.5	−1.7	−1.6	−1.4	−1.4	−1.3	−1.3

den nach dem Tagesmaximum erreicht. Dadurch verläuft der Tagesgang der Strahlungsbilanz in allen Klimaten und allen Jahreszeiten asymmetrisch. Verstärkt wird die Ungleichheit noch durch die verhältnismäßig kleinen Werte während der Nacht. Durch die nächtliche Abkühlung der Bodenoberfläche verringert sich im Laufe der Nacht die Emission und infolgedessen die Ausstrahlung. Die im allgemeinen nach oben spitz zulaufenden Isoplethen der Diagramme verdeutlichen

diesen bekannten Vorgang. Auf die Erörterung weiterer Einzelheiten soll hier verzichtet werden. Ausnahmen von dem geschilderten nächtlichen Verlauf der Strahlungsbilanzkurve müssen sich allerdings dort einstellen, wo die nächtliche Bewölkungskurve charakteristische Extremwerte zeigt, z. B. während bestimmter Jahreszeiten in einigen Gebieten der Weltmeere mit strahlungsbedingter nächtlicher Konvektion und Niederschlagsbildung. Hinweise dafür lassen sich wäh-

Tabelle 4: Durchschnittliche Monatsmittel der Tagessummen der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche in cal/cm² Tag
Monthly mean values of daily sums of net radiation in cal/cm² day

(unter den Werten steht die Anzahl der Monate, die im betreffenden Zeitraum für die Mittelwertbildung zur Verfügung stand)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Yangambi 1957-59	208 2	243 2	259 2	241 2	236 2	198 2	164 3	185 3	213 3	214 3	231 3	179 3
Khormaksar 1964-67	188 3	220 3	256 3	286 4	277 4	247 4	240 4	254 3	250 3	229 3	188 3	176 3
Dakar 1965-70	104 5	175 6	207 6	239 6	262 6	247 6	248 6	257 2	263 1	199 4	129 5	93 5
Poona 1964-66	125 2	191 2	204 2	258 2	282 2	220 1	197 1	207 3	240 1	193 1	133 1	107 1
New Delhi 1964-66	75 2	98 3	143 3	195 3	234 3	226 2	231 1	262 1	229 1	155 2	73 3	45 2
Qrendi 1964-68	31 5	83 5	162 5	229 5	277 5	296 5	302 5	254 5	189 5	117 5	42 5	20 5
Aspendale 1964-70	291 5	247 4	172 6	93 6	39 6	14 6	21 6	62 6	124 6	185 7	257 7	280 6
Vladivostok 1964-70	-23 7	11 7	114 7	211 7	245 7	256 7	238 7	204 7	182 7	96 7	19 7	-26 7
Aralskoe More 1964-70	-5 5	22 7	104 7	173 7	240 7	256 7	250 7	206 7	127 7	55 7	5 7	-16 7
Ocean Weather Station P 1967-69	-8 1	36 1	140 2	245 2	330 1	335 1	288 2	221 1		61 1		-38 1
Port Stanley 1964-66	257 3	182 3	107 3	44 3	-15 3	-46 3	-26 3	12 3	75 3	162 3	235 3	276 3
Irkutsk 1964-70	-24 7	0 7	100 7	186 7	264 7	298 7	269 7	193 7	129 7	44 7	-16 7	-23 7
Hamburg 1964-71	-14 8	3 8	65 8	148 8	220 8	258 8	238 8	187 8	106 8	35 8	-6 8	-21 8
Omsk 1964-70	-41 7	-39 7	13 7	155 7	238 7	272 7	268 7	187 7	102 7	18 7	-32 7	-42 7
Verkhoyansk 1964-70	-20 7	-20 6	-21 6	19 7	182 7	270 7	226 7	132 7	47 7	-30 6	-28 7	-22 7
Novolazarevskaya 1964-69	317 6	172 6	26 6	-67 6	-94 6	-91 6	-92 6	-88 6	-17 6	109 6	257 5	376 6
Resolute 1964-70	-64 6	-62 7	-49 7	4 6	86 6	202 7	197 7	112 7	3 7	-52 7	-63 7	-59 7
Halley Bay 1964-68	44 5	5 5	-21 5	-40 5	-43 5	-49 5	-53 5	-44 5	-39 5	-14 5	24 5	49 5
Vostok 1966-69	90 2	48 3	-16 4	-32 4	-28 4	-36 4	-36 4	-31 4	-19 3	17 3	57 3	76 3

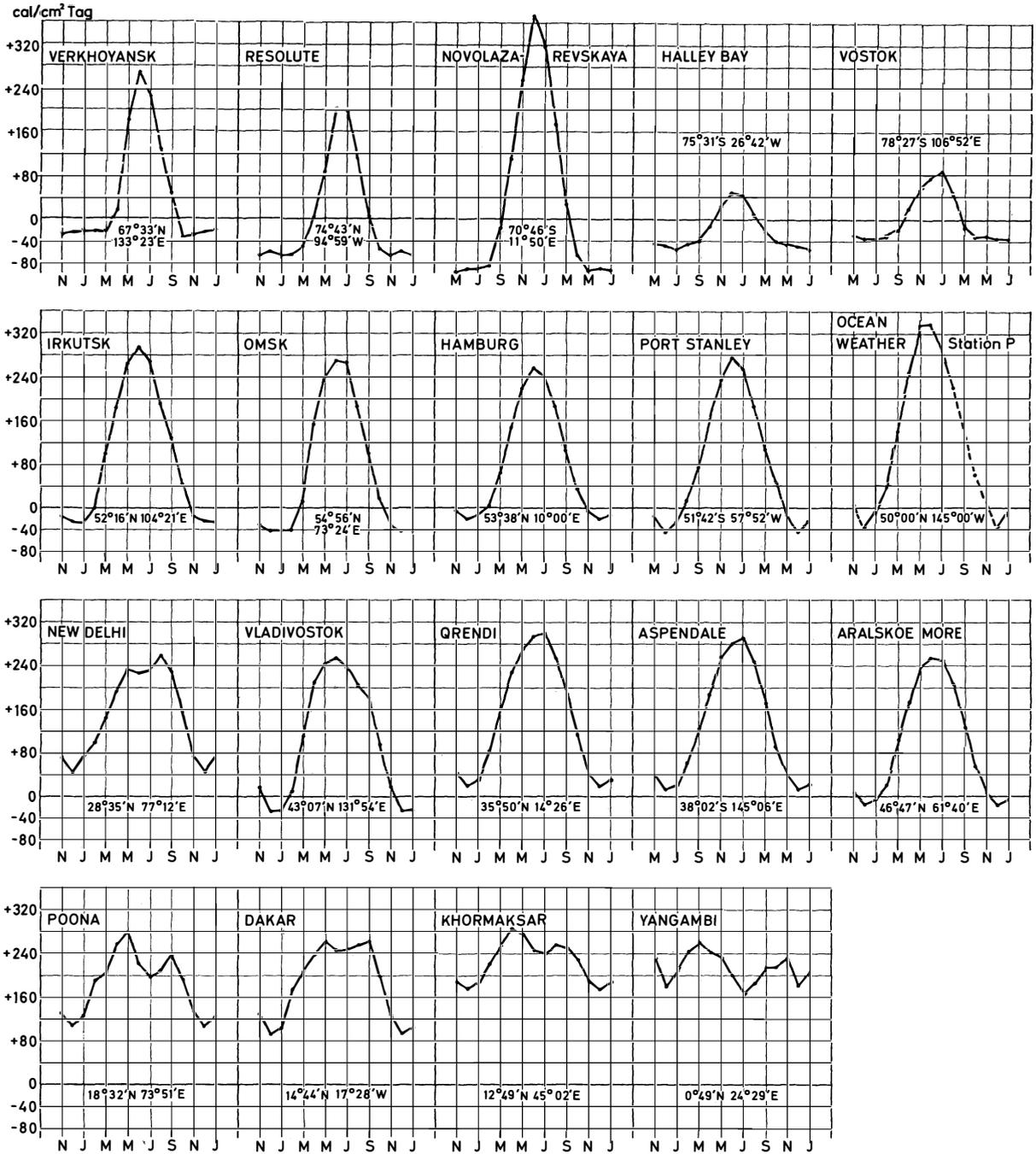


Abb. 1: Der Jahresgang der Strahlungsbilanz R
 (Durchschnittliche Monatsmittel der Tagessummen der Strahlungsbilanz in cal/cm² Tag)
 Annual variation of net radiation R
 (Monthly mean values of daily sums of net radiation in cal/cm² day)

rend der Winter- und Frühjahrsmonate beim Wetter-
 schiff P trotz der kurzen Meßreihe finden. Durch die-
 se Prozesse entsteht in der Strahlungsbilanzkurve ein
 sekundäres, aber noch im Negativen liegendes Maxi-

num. Es müssen längere Meßreihen abgewartet wer-
 den, um die Frage auch für die maritim beeinflussten
 Festlandsstationen eingehender behandeln zu kön-
 nen.

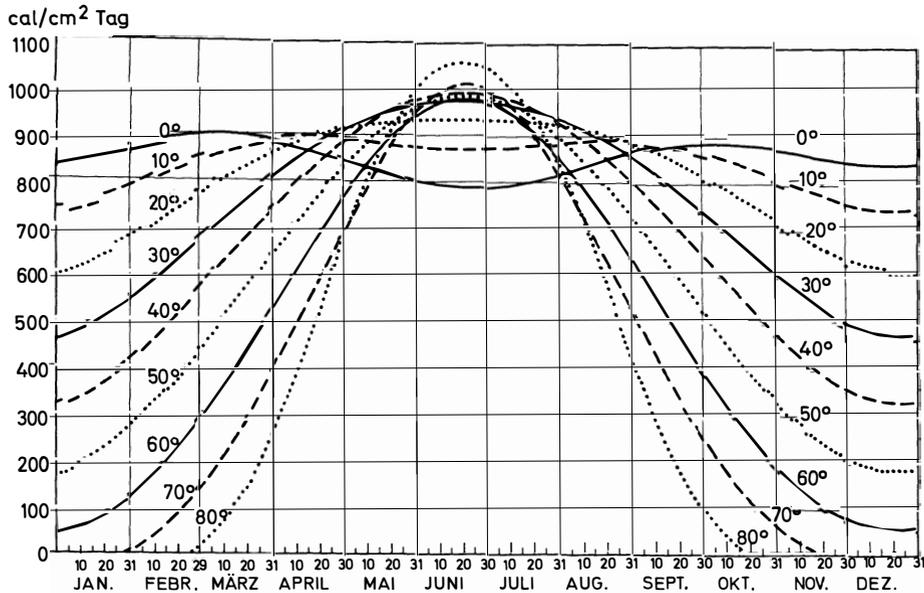


Abb. 2: Tagessummen der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke einer horizontalen Fläche für verschiedene geographische Breiten der Nordhalbkugel, berechnet für eine Solarkonstante von $1.94 \text{ cal/cm}^2 \text{ min.}$ (aus COLLMANN)
Daily sums of the extraterrestrial radiation

Hinweise zum Jahresgang (vgl. Abb. 1, 2 und Tabelle 4)

Im Hinblick auf den Jahresgang der mittleren Tagessummen der Strahlungsbilanz R können wir uns kurzfassen. TERJUNG (1970) hat mit Hilfe des Wärmehaushaltatlas von BUDYKO die Typen des Jahresganges eingehend untersucht. Die hier bearbeiteten Beispiele setzen sich aus ein- und zweigipfligen Kurven zusammen. Die zweigipfligen Typen findet man nur in den Tropen und Subtropen (Yangambi, Khormaksar, Dakar, Poona; jenseits des Wendekreises – New Delhi). Sie werden entweder durch den zweimaligen Zenitstand der Sonne oder durch monsunale oder allgemein zirkulationsbedingte Vorgänge hervorgerufen, die über Bewölkung und Wasserdampfgehalt der Luft auf die kurzweilige und auf die langweilige Bilanz einwirken. Außerdem können sich Mischtypen ausbilden, bei denen die Positionen der von der Sonnenhöhe bedingten Extreme von den übrigen Effekten auf andere Monate verschoben werden (Poona). Je größer die Entfernung von den Tropen im mathematischen Sinne wird, um so weniger sind auch die Zirkulationsvorgänge imstande, die während des Sommersolstitiums kulminierende Strahlungsbilanzkurve noch in eine echte zweigipflige Kurve zu verwandeln (vgl. Vladivostok). Verschiebungen des Maximums auf einen Nachbarmonat sind allerdings möglich. Analog wie bei den Tageskurven gilt natürlich auch hier, daß beim Übergang von Monats- auf Dekaden- oder Tagesmittel weitere Feinheiten zutage treten würden. Mit Ausnahme bei äquatornahen (Yangambi) und po-

laren Stationen (Verkhoyansk, Novolazarevskaya) stellt sich im allgemeinen das Minimum im Monat des Wintersolstitiums ein. In Äquatornähe kann durch örtliche Besonderheiten des Witterungsablaufes das Minimum in die Zeit des zweiten niedrigen Sonnenstandes fallen (Yangambi als nordhemisphärische Station statt im Dezember im Juli). Für die mittleren monatlichen Tagessummen von R arktischer Stationen während der Wintermonate gilt, was eingangs schon im Zusammenhang mit der Repräsentativität der IsoPLETHENKONTUREN im negativen Bereich allgemein gesagt wurde, daß offenbar die Meßreihen noch etwas zu kurz sind. Im „kernlosen“ antarktischen Winter sind die Unterschiede der Tagessummen nur sehr gering und daher ist das Minimum noch nicht eindeutig bestimmbar. Eine Besonderheit deutet sich bei Verkhoyansk, Resolute und Novolazarevskaya an, die ein Äquivalent zu dem üblichen Tagesgang der Strahlungsbilanz in niederen und mittleren Breiten mit asymmetrisch, bereits in den Abendstunden liegendem Minimum darstellt. Das Minimum der mittleren Tagessummen fällt schon in den Spätherbst, was offenbar auf die Wirkung der noch verhältnismäßig hochliegenden Oberflächentemperaturen zurückzuführen ist. Was die absoluten Extremwerte der mittleren Tagessummen der Strahlungsbilanz angeht, so findet man sie wie bei den absoluten Extremwerten der mittleren Stundensummen bei ein und derselben Station: Novolazarevskaya, mittlere Tagessummen ($\text{cal/cm}^2 \text{ Tag}$) im Dezember $+376.3$, im Mai -94.3 ; Qrendi, mittlere Stundensummen ($\text{cal/cm}^2 \text{ Stunde}$) im Juli 11–12 Uhr $+56.9$, 19–20 Uhr -9.5 .

Zum Schluß möchte ich nicht versäumen, den Herren Dr. Bultot, Institut Royal Météorologique de Belgique, Brüssel und Dr. Collmann, Observatorium des Deutschen Wetterdienstes, Hamburg, meinen besonderen Dank auszusprechen, die mir die Daten von Yagambi und Hamburg zugänglich gemacht haben.

Literatur

- ALBRECHT, F.: Untersuchungen des Wärme- und Wasserhaushaltes der südlichen Kontinente. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 99, 1965.
- BERLIAND, T. G. (Hrsg.): Solar radiation and radiation balance data, Annual Data 1964–1968, Leningrad 1970.
- BERNHARDT, F. und PHILIPPS, H.: Die räumliche und zeitliche Verteilung der Einstrahlung, der Ausstrahlung und der Strahlungsbilanz im Meeresniveau. Abh. Meteorol. Dienstes der DDR, Nr. 77, 1966.
- BUDYKO, M. I. (Hrsg.): Atlas teplovogo balansa zemnogo shara, Moskau 1963.
- CHANG, J.: Global distribution of net radiation according to a new formula. Annals Assoc. American Geographers, Vol. 60, 1970.
- COLLMANN, W.: Diagramme zum Strahlungsklima Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 42, 1958.
- DUPRIEZ, G. L.: Contribution à l'étude du bilan du rayonnement total et de ses composantes en région équatoriale africaine. Académie Royale des Sciences D'Outre-Mer, Bulletin des Scéances 1964.
- FLOHN, H.: Produzieren wir unser eigenes Klima? Meteorol. Rundschau 23. Jg., 1970.
- GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1961.
- KESSLER, A.: Globalbilanzen von Klimaelementen. Ein Beitrag zur allgemeinen Klimatologie der Erde. Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Technischen Universität Hannover Nr. 3, 1968.
- LETTAU, H.: Evapotranspiration climatology. Monthly Weather Review, Vol. 97, 1969.
- PAFFEN, K. H.: Die täglichen Temperaturschwankungen als geographisches Klimacharakteristikum. Erdkunde Bd. 20, 1966.
- : Das Verhältnis der tages- zur jahreszeitlichen Temperaturschwankung. Erdkunde Bd. 21, 1967.
- ROBINSON, G. D.: Surface measurements of solar and terrestrial radiation during the IGY and IGC. Annals of the Intern. Geophys. Year Vol. 32, 1964.
- SCHWERDTFEGER, W.: The Climate of the Antarctic. World Survey of Climatology Vol. 14, 1970.
- SVERDRUP, H. U.: Oceanography for meteorologists, New York 1943.
- TERJUNG, W. H.: Toward a climatic classification based on net radiation. Proceedings Association American Geographers Vol. 2, 1970.
- TROLL, C.: Thermische Klimatypen der Erde. Petermanns Geogr. Mitteilungen Jg. 1943.
- u. PAFFEN, K. H.: Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. Erdkunde Bd. 18, 1964.
- USSR Chief Administration of the Hydro-Meteorol. Service, Voeikov Main Geophys. Observatory: Solar radiation and radiation balance data, 1964 ff.

UNTERSUCHUNGEN ZUR JUNGTERTIÄREN FLÄCHENBILDUNG, VERWITTERUNG UND KLIMAENTWICKLUNG IM SÜDÖSTLICHEN TAUNUS UND IN DER WETTERAU*)

Mit 3 Abbildungen

ERHARD BIBUS

Summary: Research into the formation of young tertiary flattened levels, weathering and climatic development in the southeastern region of the Taunus and the Wetterau.

Starting from the findings of other workers, the author presents as a result of his research in the southeastern periphery of the Rhine Massif, a contribution to the question of weathering and the formation of flattened levels in the late Tertiary. The levels were not formed as a result of valley filling but by continual, phased, incision processes with transport of residual debris over largely decomposed

rock. The autochthonous weathering relicts preserved on the levels differ from fresh rock in their high rate of kaolinite re-formation, SiO₂ enrichment and their Fe and Al losses. Pedological, claymineralogical and chemical investigations showed, for a weathering profile on Devonian clay slates and Middle Upper Miocene basalt, that deep-reaching, lateritic weathering was possible in the late Tertiary. The data were confirmed by several deep borings and could be extrapolated on a supra-regional basis. A weathering-intensive and at least occasionally damp and warm subtropical climate must be regarded as the context for the creation of late Tertiary paleosoils. Appropriate conditions can—in spite of some objections—be shown to have existed in the study area on the basis of paleobotanical investigations. The results reported here stand in partial contradiction to the opinions of J. BIRKENHAUER (1970/1971) a fact which becomes clear in a closing comparison.

*) Herrn Dr. Johannung vom Geologischen Institut der Universität Frankfurt a. M. möchte ich an dieser Stelle für die Anfertigung sämtlicher Röntgenanalysen sowie Frau Kullmann für die Durchführung eines Teiles der chemischen Analysen recht herzlich danken.

Mittlere Tages- und Jahresgänge der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche

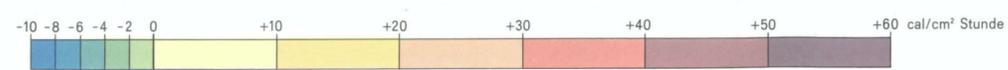
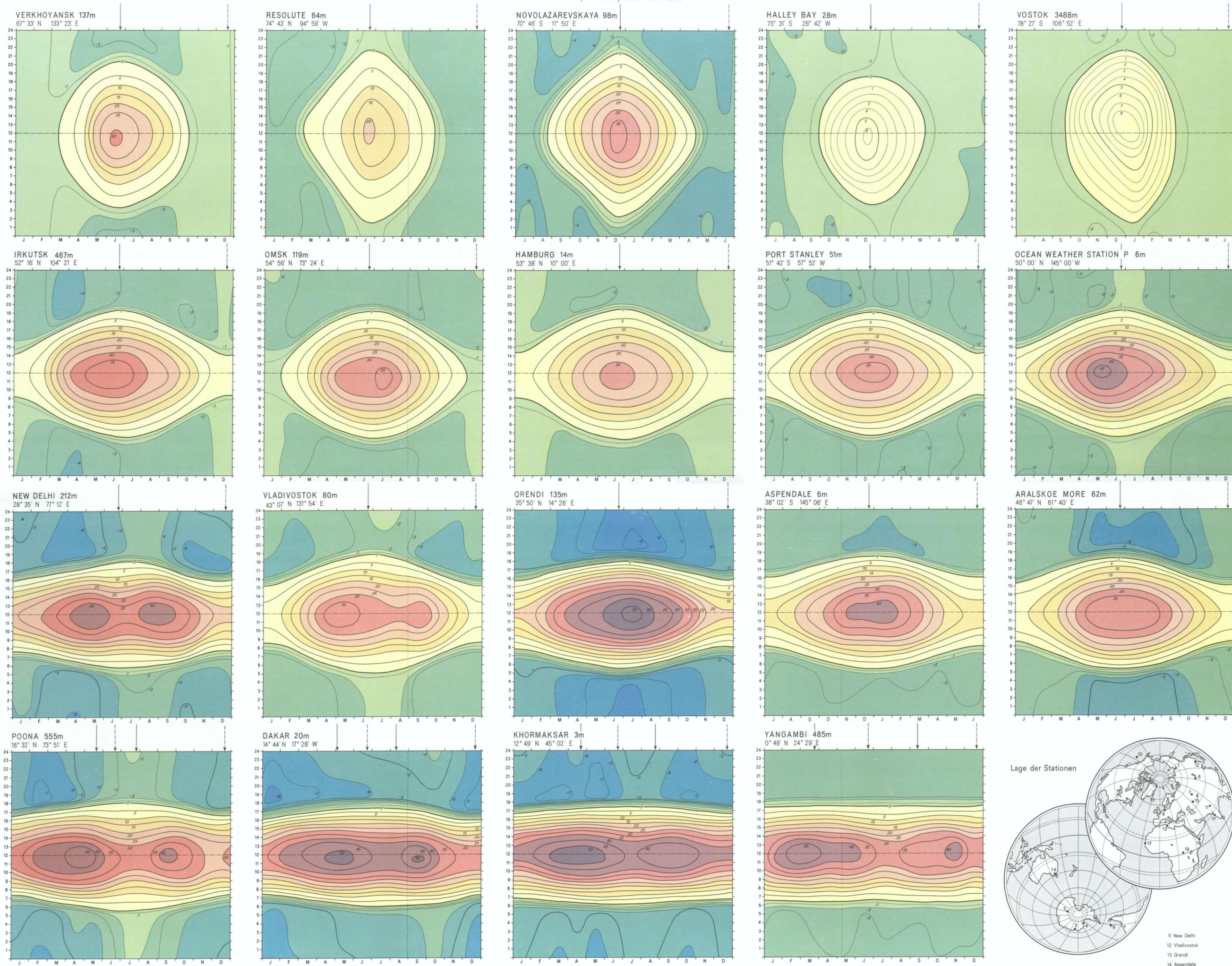
(Isoplethen als Stundensummen in cal/cm² Stunde)

Mean Daily and Annual Variation of Net Radiation at the Ground

(Isopleths hourly sums cal/cm² hour)

Beilage I zu ERDKUNDE XXVII,1 Beitrag Kessler

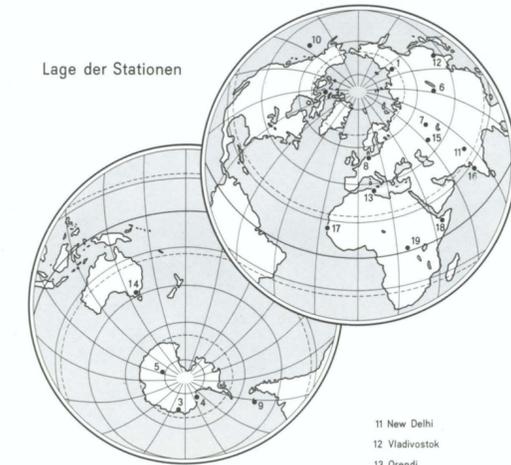
Kartographie: Geographisches Institut der Universität Bonn



Höchster Sonnenstand
Maximum solar altitude

Niedrigster Sonnenstand (oder sekundäres Minimum in den Tropen)
Minimum solar altitude (or second minimum in the tropics)

Entwurf: A. Kessler



Lage der Stationen

- 11 New Delhi
- 12 Vladivostok
- 13 Orendi
- 14 Aspendale
- 15 Aralskoe More
- 16 Poona
- 17 Dakar
- 18 Khormaksar
- 19 Yangambi
- 1 Verkhoyansk
- 2 Resolute
- 3 Novolazarevskaya
- 4 Halley Bay
- 5 Vostok
- 6 Irkutsk
- 7 Omsk
- 8 Hamburg
- 9 Port Stanley
- 10 Ocean Weather Station P