

ALBRECHT KESSLER

**Infrarotstrahlungsmessungen auf einer Reise durch
Westafrika und die Sahara**

**1. Mitteilung: Effektive Strahlungstemperaturen verschiedener
Oberflächen**

Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Bundesrepublik Deutschland

Infrarotstrahlungsmessungen auf einer Reise durch Westafrika und die Sahara

1. Mitteilung:

Effektive Strahlungstemperaturen verschiedener Oberflächen

A. Kessler

Mit 3 Abbildungen

Eingegangen am 25. Juli 1973

Zusammenfassung

Auf einer Reise im Februar 1972 durch Nordafrika (Ober-Guinea, Sahara) wurden Messungen der effektiven Strahlungstemperatur von Boden-, Pflanzen- und Blattoberflächen mit einem Radiometer durchgeführt. Die Messungen werden im einzelnen mitgeteilt und im Zusammenhang mit den gleichzeitig gemessenen Lufttemperaturen und mit den allgemeinen klimatischen Verhältnissen diskutiert. Die Blattoberflächentemperaturen verschiedener Pflanzen fügen sich gut in das von Linacre veröffentlichte Diagramm ein.

Summary

Infrared Radiation Measurements on a Travel through West-Africa and the Sahara Part I: Effective Radiation Temperatures of Different Surfaces

During a travel across North Africa (the states of High Guinea and the Sahara) in February 1972 measurements of the effective radiation temperature of soil-, plant- and leaf-surfaces were made with a radiometer. The measurements are published in detail and are discussed together with the air temperatures measured at the same time and the general climatic conditions. The temperatures of leaf-surfaces of different plants correlate very good to the diagram published by Linacre.

1. Einleitung

Auf einer Studienreise im Februar 1972 durch einige westafrikanische Staaten und durch die Sahara auf der Route Niamey, Agades, Tamanrasset, In Salah, El Goléa, Ghardaia wurden Strahlungsmessungen verschiedener Boden- und Pflanzenoberflächen und der Gegenstrahlung in verschiedenen Zenitdistanzen mit einem Radiometer durchgeführt. Gleichzeitig wurden Lufttemperatur und Dampfdruck in etwa 1,80 m Höhe mit einem Aspirationspsychrometer gemessen. Alle Feuchtwerte wurden wegen der großen Fehlermöglichkeit bei geringen Dampfdrücken mit der Luftdruckkorrektur versehen. Da konventionelle und mit Infrarotgeräten durchgeführte Bestimmungen der Oberflächentemperatur aus der Sahara praktisch fehlen — wie jüngst Dubief [4] in seiner Monographie über das Saharaklima vermerkte — werden sie hier im einzelnen mitgeteilt (vgl. Tabelle 2). Es werden zunächst die Messungen der effektiven Strahlungstemperatur verschiedener Oberflächen behandelt. Die übrigen Ergebnisse sollen in einem späteren Beitrag veröffentlicht werden.

Die Auswahl der Meßplätze und der Meßzeiten (in MEZ) mußte den Plänen des Reiseunternehmens untergeordnet werden. Eine ausführliche, physisch-geographische Beschreibung mit zahlreichen Landschaftsbildern der Reiseroute von Niamey bis Ghardaia findet man in der Abhandlung von Mensching, Giessner und Stuckmann [9].

2. Meßgerät und Meßanordnung

Als Meßgerät diente das Strahlungsthermometer KT 13 der Firma Heimann; nähere Angaben über die spektrale Empfindlichkeit des Gerätes enthält eine frühere Arbeit [5]. Das Gerät wurde mit einem einfachen Prüfstrahler unter Verwendung der Thermometer des Aspirationspsychrometers geeicht.

Der von der Sonde gemessene Strahlungsfluß S setzt sich aus der Emission der jeweiligen Meßoberfläche und der von ihr reflektierten Strahlung zusammen. Letztere kann je nach den besonderen Umständen sowohl von der atmosphärischen Gegenstrahlung als auch von der Emission anderer, im „Blickfeld“ der Meßoberfläche liegender Objekte herkommen:

$$S = \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon) G. \quad (1)$$

Das Heimanngerät besitzt einen Emissionsgradregler, mit dessen Hilfe man die „wahre Oberflächentemperatur T_w “ eines Objektes

bestimmen kann, wenn sein ε -Wert bekannt ist und wenn die Messung durch ein Rohr vorgenommen wird, dessen Temperatur etwa der Gerätegehäusetemperatur entspricht. Diese spezielle Meßanordnung ist notwendig, um bei Tag die störende Reflexstrahlung von Sonne und Himmel im unteren Empfindlichkeitsbereich dieses Radiometertyps bei $4\ \mu$ abzublenden. Im übrigen ist die Meßanordnung mit Blende für eine eventuelle ε -Korrektur der Meßwerte später leicht

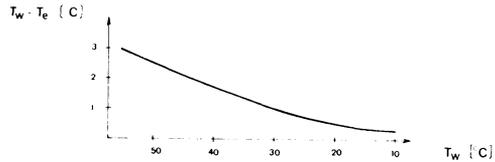


Abb. 1. Differenz zwischen wahrer Oberflächentemperatur und effektiver Strahlungstemperatur ($T_w - T_e$) für $\varepsilon = 0,9$ in Abhängigkeit von der Temperatur

reproduzierbar; außerdem wird die Messung ganz allgemein von den tagesperiodischen Intensitätsänderungen der Gegen- und Umweltstrahlung weitgehend unabhängig gemacht (zum Einfluß der Strahlung aus dem oberen Halbraum auf die Oberflächentemperaturmessung mit Radiometern vgl. [7, 8]).

Da die Reisebedingungen es nicht gestatteten, die ε -Werte jeweils an Ort und Stelle genau zu bestimmen, wurde der Regler bei sämtlichen Messungen auf $\varepsilon = 1$ gestellt und durch eine schwarze Gummiblende von Gehäusetemperatur gemessen. Die auf diese Weise erhaltene „effektive Strahlungstemperatur T_e “ liegt unter der wahren Oberflächentemperatur T_w der Objekte. Die größten Differenzen zwischen wahrer Oberflächentemperatur und effektiver Strahlungstemperatur ($T_w - T_e$) der vorliegenden Meßserie sind bei Sandoberflächen ($\varepsilon = 0,9$) zu erwarten. In Abb. 1 ist ($T_w - T_e$) in Abhängigkeit von der Temperatur für $\varepsilon = 0,9$ bei Benutzung einer Blende von Gehäusetemperatur aufgetragen.

3. Klimadaten und besondere Wetterverhältnisse

Um eine Verbindung zwischen den Einzelmessungen und den Beobachtungen der Klimastationen herzustellen, werden in Tabelle 1 langjährige Mittelwerte und aktuelle Werte der Monate Januar und Februar 1972 mitgeteilt.

Der Monat Februar zählt in der Sudan-Sahel-Zone noch zur winterlichen Trockenzeit. Die Februarniederschläge von 1972 fielen erst nach der Durchreise. Mit

Tabelle 1. Klimadaten für Januar und Februar 1972 und Abweichungen (Δ) vom langjährigen Mittelwert

	Februar 1972							Januar 1972				
	T	ΔT	e	Δe	AN	N	ΔN	G	S	AN	N	ΔN
Accra	28.3	+0.6	21.8	0.0	3	37	0	456	105	0	0	-16
Cotonou	28.6	+0.7	24.2	+1.2	2	95	+44			2	11	-25
Parakou	28.6	+0.4	11.9	+0.7	1	1	-11			0	0	-3
Kandi	28.1	+0.5	8.5	+1.2	0	1	0			0	0	0
Niamey	28.0	+0.9	5.0	—	0	0	0			0	0	< 0.5
Tahoua	27.1	+1.0	3.1	—	0	0	0			0	0	-1
Agadez	23.6	+0.9	4.0	—	0	0	< 0.5			0	0	< 0.5
Tamanrasset	15.7	+1.1	4.6	+1.9	0			498	112	0	< 0.5	
In Salah	16.6	+0.3	4.3	-0.1	0				103	0	0	
El Goléa	12.1	+0.4	4.4	-0.8	0	1			102	1	1	

(T = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$, e = Dampfdruck in mm, AN = Anzahl der Tage mit Niederschlag ≥ 1 mm, N = Niederschlagssumme, G = langjähriger Mittelwert der Globalstrahlung in cal/cm^2 Tag, S = Sonnenscheindauer in Prozent des langjährigen Mittelwertes)

Ausnahme von Cotonou waren auch im Januar 1972 längs der Reiseroute keine Niederschläge gefallen. Abgesehen von der engeren Küstenzone war die Bewölkung während der Reise nur sehr gering (vgl. Tab. 2). Meist herrschte wolkenloses Strahlungswetter. Am 12. Februar wurde bei NE-Winden mit Geschwindigkeiten von etwa 6–7 m/s während des Vormittags und Nachmittags im Raume In Waggeur — In Gall eine starke Staubtrübung der Atmosphäre beobachtet. Die Sichtweite ging um 9.50 Uhr auf 1 km zurück.

Eine weitere markante Wetteränderung trat am 23. Februar bei In Salah ein. Im Bereich eines Randtiefs war der Himmel um 14 Uhr zu neun Zehntel bedeckt. Bei einer Lufttemperatur von $31,4^{\circ}\text{C}$, einem minimalen Dampfdruck von 1,6 mm Hg, einer relativen Feuchte von 5 % und Südwinden mit etwa 5 m/s klagten viele Reiseteilnehmer über *Schwüle*empfindung, übrigens zum ersten Mal während der Wüstendurchquerung. Die allgemeine Stimmung war gereizt. Für die außergewöhnliche Schwülesituation ist eine Teilursache vor allem in einer beträchtlichen Erhöhung der langwelligen Gegenstrahlung gegenüber den vorangegangenen zwei Wochen durch den raschen Wolkenaufzug (auf neun Zehntel Bedeckung) zu suchen. Im Laufe des Nachmittags drehte der Wind auf W mit einem merklichen Temperatursturz infolge eines Kaltlufteinbruchs. Am Abend fiel während eines Gewitters etwas Niederschlag.

4. Die täglichen Extremwerte der effektiven Strahlungstemperatur

Die winterliche Jahreszeit ließ keine „sensationellen“ Maximaltemperaturen der verschiedenen Oberflächen entstehen (vgl. Tabelle 2 b und Abb. 2). Nur vier Messungen lagen oberhalb 50°C , und zwar nicht in der Sahara, sondern im Bereich der Guineaküste mit dem höchsten Sonnenstand im Reisegebiet. Dort erwärmten sich die Asphaltdecken etwa in dem Maße, wie man es im Sommer in mitteleuropäischen Städten auch beobachten kann (vgl. [5]).

Nach Norden nahmen die mittäglichen Maximumtemperaturen wegen der höheren Breite und größeren Höhenlage im Bereich des Hoggar-Gebirges ab. Die Messungen aus der nördlichen Sahara sind zum Teil durch den Kaltlufteinbruch beeinflusst. Von Süden nach

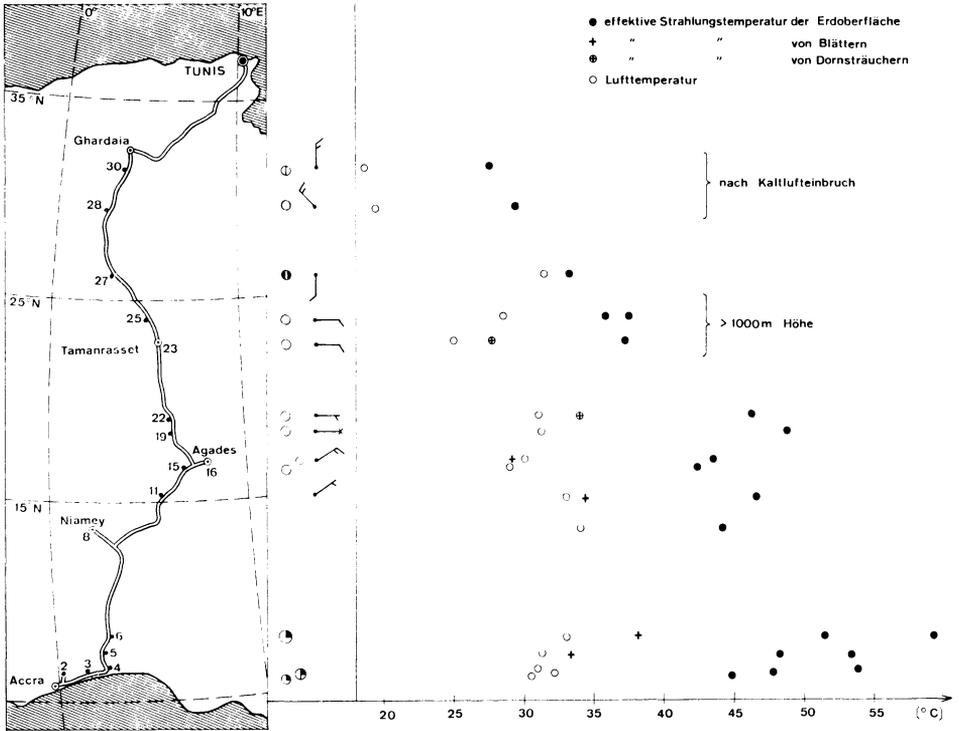


Abb. 2. Mittägliche Maximumtemperaturen (13.30–14.30 MEZ) von Luft, Erdoberfläche, Pflanzen und Blättern in Abhängigkeit von der Geographischen Breite (Zahlen an der Reiseroute vgl. Tab. 2a und 2b, erste Spalte)

Norden verringerte sich auch die Differenz: effektive Strahlungstemperatur der Bodenoberflächen T_e minus Lufttemperatur in 1,8 m Höhe T_l .

Während $(T_e - T_l)$ im Bereich der Guineaküste bei 20°C lag, erreichte sie im Raum Agades und der südlichen Sahara 14°C , um im Hoggar und nördlich davon auf etwa 10°C zurückzugehen. Da auf dem Assekrem in 2640 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s herrschte, war die Differenz $(T_e - T_l)$ etwa gleichgroß wie in Tamanrasset (1400 m Höhe), nämlich $14,2^{\circ}\text{C}$ bzw. $12,2^{\circ}\text{C}$. Bei geringerer

Luftbewegung wäre auf dem Assekrem eine größere Differenz zu erwarten gewesen.

Die Minima der Bodenoberflächentemperaturen traten kurz vor Sonnenaufgang zwischen 6.00 und 7.30 Uhr MEZ ein (vgl. Abb. 3). Bemerkenswerte Unterschiede der Differenz ($T_w - T_l$) wurden zwischen der Küstenregion, wo am Morgen die Lufttemperatur etwa 4° C *unter* der wahren Bodenoberflächentemperatur T_w lag, und der Südsahara — Raum Agades — beobachtet. Dort lagen die Lufttemperaturen am Morgen etwa 4° C *über* den wahren Bodenoberflächentemperaturen. Die Abweichung der bodennahen Temperaturschichtung an der Küste vom Normalfall des nächtlichen Ausstrahlungstyps dürfte in erster Linie von der allgemeinen monsunalen Zirkulation bzw. von See- windeffekten verursacht sein.

Tabelle 2a. Angaben über die Meßorte der Tabelle 2b (1. Spalte)

Nr. in Tab. 2 b	Ort	Koordinaten	Höhe (m)
1.	Accra	0 10 W, 5 30 N	50
2.	Voltastausee, Akosombo	0 00, 6 20 N	180
3.	Lome	1 10 E, 6 00 N	50
4.	Cotonou	2 30 E, 6 20 N	40
5.	Abomey	2 00 E, 7 10 N	260
6.	Bei Chalagoye	2 30 E, 8 10 N	270
7.	Kandi	3 00 E, 11 00 N	280
8.	Niamey	2 00 E, 13 30 N	220
9.	Vorort Niamey	2 00 E, 13 30 N	240
10.	Bei Birni Nkonni	5 30 E, 14 00 N	300
11.	Bei Tahoua	5 30 E, 15 00 N	400
12.	Bei In Waggeur	6 40 E, 16 10 N	520
13.	Bei In Waggeur	6 40 E, 16 30 N	450
14.	In Gall	7 00 E, 16 50 N	470
15.	Bei In Gall	7 10 E, 16 50 N	460
16.	Agades	8 00 E, 17 00 N	520
17.	Tegguidam-Adrar	7 20 E, 17 00 N	400
18.	Bei In-Abangarit	6 00 E, 18 10 N	350
19.	Bei In-Abangarit	6 00 E, 18 40 N	360
20.	Bei In-Guezzam	5 50 E, 19 00 N	380
21.	Bei In-Guezzam	5 50 E, 19 10 N	380
22.	Bei In-Guezzam	5 50 E, 19 20 N	360
23.	Tamanrasset	5 30 E, 22 50 N	1400
24.	Assekrem	5 30 E, 23 20 N	2640
25.	Bei In Ecker	5 00 E, 24 00 N	1060
26.	Arakslucht	3 40 E, 25 20 N	630
27.	Bei In-Salah	3 20 E, 26 30 N	360
28.	Bei Fort Miribel	2 50 E, 29 20 N	640
29.	Bei El Golea	3 00 E, 30 20 N	390
30.	Bei Ghardaia	3 30 E, 31 00 N	390
31.	Zelfana	4 10 E, 32 30 N	340

Tabelle 2 b

A	B	C	D	E	F	G	H	Art der Oberfläche	Bemerkungen
1.	2/ 8.30	26.5	81	21.1			30.4	Asphalt	unbeschatteter Standort
2.	2/14.00	32.2	44	15.9	4/10		47.8	Asphalt	unbeschatteter Standort
3.	3/14.30	30.6	71	23.5	2/10		44.8	Asphalt	unbeschatteter Standort
3.	4/ 8.30	26.0	89	22.5	2/10		29.9	Asphalt	unbeschatteter Standort
4.	4/14.15	31.0	69	23.3			53.8	Asphalt	unbeschatteter Standort
5.	5/14.00	31.2	42	14.3			48.2	Asphalt	unbeschatteter Standort
5.	"	"	"	"			53.4	Bodenstreu	aus Nußschalen
5.	"	"	"	"			33.3	Hibiscusblatt	waagrecht, 1,40 m Höhe, unbeschattet
5.	5/21.00	26.8	75	19.9			32.6	Asphalt	
5.	"	"	"	"			28.4	Bodenstreu	aus Nußschalen
5.	"	"	"	"			27.0	Hibiscusblatt	
5.	6/ 5.30	24.3	91	20.8			27.7	Asphalt	
5.	"	"	"	"			25.7	Bodenstreu	aus Nußschalen
5.	"	"	"	"			24.0	Hibiscusblatt	mit einzelnen Tautropfen
6.	6/13.45	33.0	33	12.8	3/10		51.5	Piste	unbeschattete, festgefahren
6.	"	"	"	"	"		59.2	Pistenrand	Feinsand
6.	"	"	"	"	"		38.1	Blatt	Nachtschattengewächs, 1,10 m Höhe
7.	7/11.15	31.4	14	4.8	0/10		44.1	Asphalt	
7.	"	"	"	"	"		45.4	Piste	mit Sand
7.	"	"	"	"	"		42.9	Agavenblatt	unbeschattete, 1,00 m Höhe
7.	"	"	"	"	"		36.2	Mangoblatt	unbeschattete, 1,70 m Höhe
8.	8/ 8.30	20.6	22	4.0			21.3	Sand	im Schatten
8.	8/14.00	34.0	6	2.2			44.1	Sand	unbeschattet
8.	10/ 8.00	21.0	18	3.3	1/10		21.5	Sand	im Schatten
9.	10/10.30	30.2	7	2.2	1/10		38.2	Asphalt	
9.	"	"	"	"	"		38.6	Piste	mit Sand
10.	10/21.45	24.0	14	3.1			23.7	Piste	mit Sand
10.	11/ 7.20	20.1	15	2.7	1/10		18.0	Piste	mit Sand
10.	"	"	"	"	"		19.0	Blatt	Strauch, 1,20 m Höhe
11.	11/12.45	33.0	5	1.9	Ca	3-4 NE			
11.	11/13.20						46.6	Piste	mit Sand
11.	"						34.3	Blatt	Satansapfel, 1,00 m Höhe
12.	11/20.45	23.0	7	1.5			22.7	Sand	
12.	12/ 6.20	16.5	17	2.5	0/10	5 NE			
13.	12/ 9.50	23.0	13	2.8	0/10	6-7 NE	28.0	Sand	Staubsturm, Sichtweite 1 km
14.	12/11.40	28.0	10	2.9					Staubsturm
15.	12/13.20	29.0	6	1.8	0/10		42.4	Piste	mit Sand, Staubsturm
16.		siehe Abb. 3							
17.	15/	siehe Tab. 4							
18.	16/10.15	24.0	21	4.7	0/10	< 0.5			
19.	16/14.20	31.2	7	2.4	0/10	< 0.2	48.8	Grobsand	
19.	16/17.00	31.5	6	2.0	0/10		39.6	Grobsand	
20.	17/ 7.50	12.4	18	1.9	0/10		14.0	Grobsand	
21.	17/ 9.50	22.8	10	2.1	0/10		29.7	Grobsand	
22.	17/13.50	31.0	7	2.2	0/10	3 E	46.3	Grobsand	
22.	"	"	"	"	"	"	34.0	Dornstrauch	20 cm hoch, ohne Blende
23.	20/ 7.30	8.5	23	1.7	0/10		8.0	Sand	
23.	21/13.30	25.0	5	1.2	0/10	3-4	37.2	Grobsand	
23.	"	"	"	"	"	"	27.7	Dornstrauch	1 m Höhe, ohne Blende
24.	20/13.00	12.4	19	2.1		20 SW	26.6	Feinschutt	
25.	22/14.45	28.6	5	1.6	0/10	4	35.9	Staubboden	
25.	"	"	"	"	"	"	17.5	Gneisoberfläche	
26.	22/21.00	16.4	19	2.7			17.7	Feinsand	
27.	23/14.00	31.4	6	1.6	9/10	5 S	33.2	Feinsand	keine Sonne
28.	24/14.30	19.4	27	4.6	0/10	6-7	29.4	Sand	
29.	24/21.00	14.4	40	5.1	0/10		13.0	Grobsand	
30.	25/14.00	18.4	32	5.1	1/10	6-8	27.5	Feinsand	unbeschattet
31.	25/21.45	12.6	40	4.4			12.6	Staubboden	

- A Laufende Nummer des Meßortes (siehe Tabelle 2 a)
- B Tag im Februar 1972 und Uhrzeit in MEZ
- C Lufttemperatur in 1,8 m Höhe in °C
- D Relative Feuchte in %
- E Dampfdruck in mm Hg
- F Bewölkung in Zehnteln
- G Windgeschwindigkeit in m/s, Windrichtung
- H Effektive Strahlungstemperatur T_e in °C

Bei einem Vergleich der gemittelten Meßwerte des weiteren Guinea-küstenbereiches (*K*) und der Südsahara (*S*) in Tabelle 3 fällt außerdem auf, daß in der Sahara trotz kleinerer Werte der Strahlungsbilanz die Lufttemperatur mittags etwa gleichhoch aufgeheizt wird und daß die Amplitude des täglichen Temperaturverlaufs für Luft und Boden dort bedeutend größer ist. Zunächst liegt die Vermutung nahe, daß ein verhältnismäßig hoher Energiebetrag in der feuchteren südlichen Zone zur Verdunstung verbraucht wird, während man am Südsaum der Sahara in dieser Jahreszeit *V* gleich null setzen kann. Nun kann man aber auch in der Küstenregion in einem Trockenjahr am Ende der Trockenzeit keine allzu großen Verdunstungswerte

Tabelle 3. Gewichtete Temperaturmittelwerte in °C aus dem Guineaküstenbereich (*K*) und aus der Südsahara (*S*)

	<i>K</i>	<i>S</i>
Minimum der Lufttemperatur am Morgen	27	11
Minimum der wahren Bodenoberflächen- temperatur am Morgen	31	7
Maximum der Lufttemperatur am Mittag	32	31
Maximum der wahren Bodenoberflächen- temperatur am Mittag	52	47

mehr ansetzen. Ein beträchtlicher Energieanteil dürfte im Küstenbereich zur Erwärmung der mit dem Seewind herantransportierten Luft verbraucht werden.

Benutzt man die üblichen Symbole für die Glieder der Wärmeausgleichsgleichung mit den Indizes *K* (Küste) und *S* (Sahara), so lassen sich etwa folgende Abschätzungen machen.

Für die mittleren Tagessummen der Strahlungsbilanz gilt $R_K > R_S$, weil die Globalstrahlungssummen bei der in beiden Gebieten herrschenden geringen Bewölkung im Süden bei größerer Tageslänge und Sonnenhöhe dort auch größer sind und die kurzwellige Reflexstrahlung in der völlig vegetationslosen Sahara höhere Werte als in den vegetationsbestandenen Küstenbereichen einnimmt. Die langwellige Ausstrahlung ist, wie eine Überschlagsrechnung zeigt, am Morgen in beiden Regionen etwa gleich. Im Süden steht einer großen Emission des Bodens eine verhältnismäßig hohe Gegenstrahlung bei hohem Wasserdampfdruck ($e \sim 20$ mm Hg) gegenüber. Im Norden ist es genau umgekehrt: verringerte Emission bei tiefen Morgentemperaturen und reduzierte Gegenstrahlung bei kleinen Dampfdrücken ($e < 5$ mm Hg). Im Laufe des Vormittags vergrößert sich aber die effektive Ausstrahlung im Norden stärker (Differenz zum Süden etwa $0,04$ kcal/cm² min), weil sich dort die Bodenoberflächen um

den doppelten Betrag erwärmen, während die Dampfdrücke in beiden Bereichen etwa gleichbleiben.

Die mittleren Tagessummen von B_K und B_S dürften etwa gleich sein. Der Gradient Δt Bodentemperatur — Lufttemperatur ist in der Küstenregion im Gegensatz zur Sahara ganztägig positiv und mittags auch noch größer als dort, daher ist unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit $|L_K| > |L_S|$.

Schließlich kann $V_S = 0$ gesetzt werden. Die Verdunstung von der Bodenoberfläche ist im Küstenbereich sicherlich auch nahezu Null. Die Transpiration trägt aber zum Strom latenter Wärme V_K doch noch einen gewissen Betrag bei, daher ist $|V_K| > |V_S| \sim 0$.

5. Mikrostruktur der Temperaturverteilung einer Seriroberfläche

Bei der Thermalquelle Tegguidam-Adrar westlich von Agades im Grenzraum zwischen Halbwüste und Wüste bot sich die Gelegenheit, während des Vormittags des 15. Februar das Bodentemperaturfeld auf engem Raum zu untersuchen.

Vom Tagesbeginn bis zum Ende der Messung war der Himmel wolkenlos. Es herrschte nur geringe Luftbewegung (< 1 m/s). Der spezielle Meßplatz war eine nur flachgewellte Seriroberfläche (Sandfläche, in wechselnder Dicke bedeckt mit einzelnen Geröllen und kantigen Gesteinsstücken unterschiedlicher Größe) ohne Einengung des Horizontes für die direkte Sonnenstrahlung. Als Meßobjekte wurden gewählt: a) ein Pyramidenkanter aus Porphyr mit einer Basiskantenlänge von 12 cm, dessen vier Außenflächen nach den vier Himmelsrichtungen exponiert waren mit einem Innenwinkel von 60° , b) ein verfestigter Feinkies mit horizontaler Oberfläche, c) ein ebenfalls horizontalgelagerter, lockerer Staubboden und d) ein sehr dichter Dornstrauch mit kleinen gefiederten Blättchen (Mimose). Der Dornstrauch wurde von Süden her aus 1 m Entfernung so angepeilt, daß die langwellige Strahlung im wesentlichen nur von den besonnten und beschatteten Pflanzenteilen stammte. Aus technischen Gründen mußte dabei auf die Blende verzichtet werden. Die Temperaturangaben wären deshalb etwas stärker zu reduzieren als bei den übrigen, mit Blende angepeilten Oberflächen. Die Ergebnisse enthält Tabelle 4.

Die zum Teil beträchtlichen Temperaturunterschiede auf geringe Distanz sind die Folge unterschiedlicher Wärmekapazität und -leitfähigkeit, von Expositionsunterschieden für die direkte Sonnenstrahlung und von differierenden Bedingungen für die langwellige Wär-

Tabelle 4. *Effektive Strahlungstemperaturen in °C einer Seriroberfläche auf engem Raum*

	MEZ	9.15	9.20	9.35	9.50	11.10	11.15	11.20
Pyramidenkanter Ostseite		30.4			31.8	43.5		
Pyramidenkanter Südseite		26.6			31.8	43.5		
Pyramidenkanter Westseite . . .		19.9			31.4	38.5		
Pyramidenkanter Nordseite . . .		19.9			31.2	38.5		
Verfestigter Feinkies, horizontal			26.6		33.1		43.8	
lockerer Staubboden, horizontal			32.3		37.7		47.0	47.4
Dornstrauch (Mimose)				24.7				33.3

meabstrahlung und für den Strom fühlbarer Wärme von den einzelnen Oberflächen aus.

Die großen Temperaturunterschiede in einzelnen, auch nur kleinen Gesteinsstücken besonders während der Morgenstunden (vgl. den Pyramidenkanter um 9.15 Uhr mit größtem Δt zwischen zwei Oberflächen von 10,5°C) und deren schnelle Änderung sind eine Ursache für die starke mechanische Verwitterung im Wüstenklima. Nach 35 Minuten, um 9.50 Uhr, waren die Differenzen fast ausgeglichen. Um 11.10 Uhr stiegen sie wieder auf 5°C an, ein Zeichen für das verwickelte Zusammenspiel zwischen Energiebilanz der Außenflächen und innerer Wärmeleitung. Bei den beiden horizontalen Oberflächen — verfestigtem Feinkies und lockerem Staubboden — mit gleichen Expositionseigenschaften verlief die Temperaturkurve gleichsinnig, jedoch verkleinerte sich die Differenz von 5,7°C auf 3,2°C. Die Temperatur des Dornstrauchs lag mit 33,3°C um 11.20 Uhr in der weiter unten angesprochenen Größenordnung.

Die Inhomogenität des Oberflächentemperaturfeldes auf engem Raum vor allem in den Morgenstunden dürfte die Ursache für eine intensive, freilich meßtechnisch schwer faßbare Mikrokonvektion sein. Die zeitweilig beträchtlichen Temperaturunterschiede zwischen einzelnen Bestandteilen der Seriroberfläche lassen sich mit Fernerkundungsverfahren natürlich nicht messen, so daß ein Vergleich von In-situ-Messungen mit den durch Fernerkundung ermittelten Daten nur in beschränktem Maße sinnvoll ist (über die Interpretation von Satellitendaten aus der Sahara vgl. [3]).

6. Verschiedenes: Arakschlucht, Luftspiegelungen, Blattemperaturen

Sieht man von den Messungen in Abomey im Guineaküstenbereich ab, so lagen vor allem in der Wüste bei Rastplätzen mit wenig eingengtem Horizont die effektiven Strahlungstemperaturen der Bodenoberflächen gegen 21 Uhr bereits unter den Lufttemperaturen. In der

sehr engen Arakschlucht waren dagegen um 21 Uhr die Strahlungstemperaturen T_e einer ebenen Feinsandoberfläche mit $17,7^{\circ}\text{C}$ noch um $1,3^{\circ}\text{C}$ wärmer als die Lufttemperatur. Die östliche, länger von der Sonne bestrahlte, steile Schluchtfelsenwand, die unter einem Winkel von 15° angepeilt wurde, maß $24,1^{\circ}\text{C}$, die westliche $21,9^{\circ}\text{C}$.

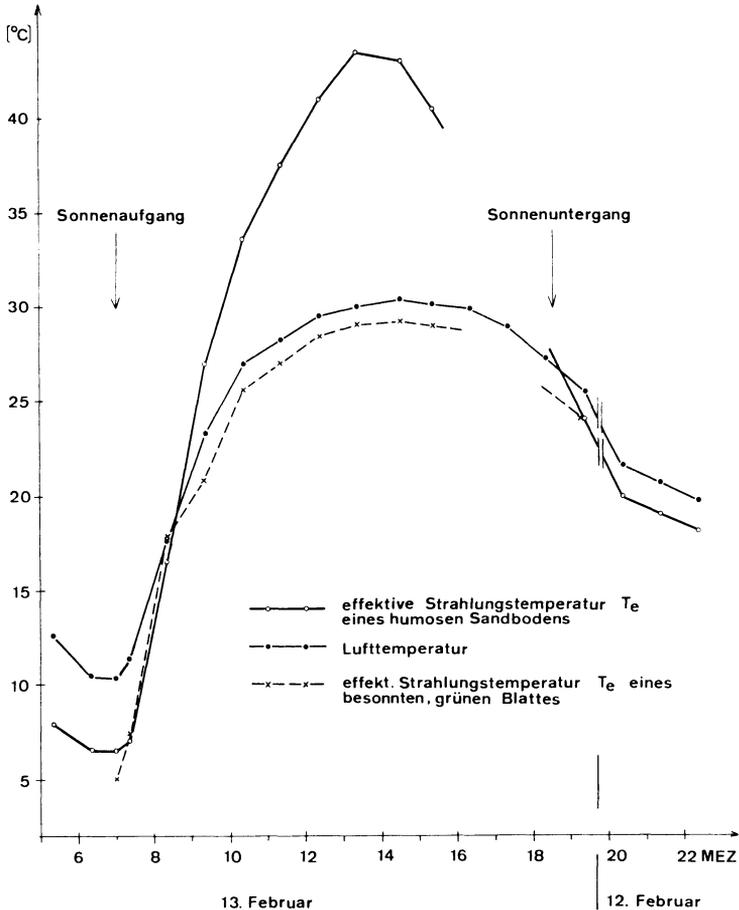


Abb. 3 Tagesgang von Luft-, Blatt- und Erdoberflächentemperatur in Agades, Südsahara

Im Winter schützt sich der erfahrene Saharareisende bei einer Übernachtung unter freiem Himmel gegen die große nächtliche Ausstrahlung bei nur geringen Wasserdampfdrücken bekanntlich am zweckmäßigsten dadurch, daß er Schluchten aufsucht oder sich in die Nähe von Felswänden oder ähnlichen Abschirmungen begibt.

In der Südsahara, besonders im Gebiet zwischen Agades und Assamaka, wurden über den sehr flachen, nur wenig gewellten Seriroberflächen regelmäßig Luftspiegelungen beobachtet. Es entstand oft der Eindruck, daß man sich in unmittelbarer Nähe größerer Seen befände. Nach meinen Tagebuchaufzeichnungen begann sich dieses Phänomen der „Luftspiegelung von unten“ von 9.30 Uhr an zu bilden. Abb. 3 zeigt für Agades, mit welchen Temperaturschichtungen man für diese Zeit etwa zu rechnen hat.

In Agades wurde am Rande eines kleinen Oasengartens bei wolkenlosem Himmel der Tagesgang von Luft-, Boden- und Blattemperatur gemessen. Die Bodenoberfläche bestand aus humosem Sand. Das Blatt gehörte zu einem Strauch eines Nachtschattengewächses, zeigte ein frisches, grünes Aussehen, war horizontal ausgerichtet in etwa 1,20 m Höhe und wurde nicht beschattet. Gegen 9 Uhr frischte der Wind auf, steigerte sich um 9.45 Uhr auf 5—7 m/s. Während des Tages hielt die hohe Windgeschwindigkeit an. Gegen 19 Uhr flaute der Wind ab. Die wahre Blattemperatur T_w betrug um 7 Uhr, kurz vor Sonnenaufgang, $5,1^{\circ}\text{C}$ und lag $5,3^{\circ}\text{C}$ unter der Lufttemperatur. Um 8.20 Uhr war das Blatt schon $0,5^{\circ}\text{C}$ wärmer als die Luft. Durch das Auffrischen des Windes, das den Wärmeverlust des Blattes durch die Ströme fühlbarer und latenter Wärme verstärkte, sank schließlich um 9 Uhr die wahre Blattemperatur wieder unter die Lufttemperatur.

Um 13.20 Uhr betrug die Differenz wahre Blattemperatur minus Lufttemperatur $-0,4^{\circ}\text{C}$ (vgl. hierzu die Zusammenstellung bei Linacre [6]).

Tabelle 5. Wahre mittägliche Oberflächentemperaturen T_w unbeschatteter Blätter in $^{\circ}\text{C}$, berechnet aus der effektiven Strahlungstemperatur T_e unter Verwendung eines ϵ -Wertes für Blätter von 0.95

Ort	Uhrzeit	Art	Lufttemperatur T_l	Blattemperatur T_w
Abomey	14.00	Hibiscus	31.2	34.0
Chalagoye . . .	13.45	Nachtschattengewächs	33.0	38.9
Kandi	11.15	Agave	31.4	43.9
Kandi	11.15	Mango	31.4	37.0
Tahoua	13.20	Satansapfel	33.0	35.0
Agades	13.20	Nachtschattengewächs, bewässert	30.0	29.6

In Tabelle 5 sind weitere Blattemperaturen (Werte aus Tabelle 2, jedoch auf wahre Temperaturen korrigiert) zusammengestellt. Diese

Daten fügen sich relativ gut in die von Linacre mitgeteilte Fig. 1 ein, in der die Korrelation zwischen Blatt- und Umgebungstemperatur dargestellt ist.

Literatur

1. U. S. Department of Commerce, NOAA, Environmental Data Service: Monthly Climatic Data for the World, Asheville, 1972.
2. World Meteorological Organization: Climatological Normals for CLIMAT and CLIMAT SHIP Stations for the Period 1931—1960, Geneva, 1962.
3. Buettner, K. J. K., and C. D. Kern: The Determination of Infrared Emissivities of Terrestrial Surfaces. *Journ. Geophys. Res.* 70, 1329—1337 (1965).
4. Dubief, J.: Die Sahara, eine Klima-Wüste, in: H. Schiffers: Die Sahara und ihre Randgebiete, Bd. 1. München: Weltforum, 1971.
5. Kessler, A.: Über den Tagesgang von Oberflächentemperaturen in der Bonner Innenstadt an einem sommerlichen Strahlungstag. *Erdkunde, Arch. für wiss. Geogr.* 25, 13—20 (1971).
6. Linacre, E. T.: Further Notes on a Feature of Leaf and Air Temperatures. *Arch. Met. Geoph. Biokl., B*, 15, 422—436 (1967).
7. Lorenz, D.: Der Einfluß des Absorptionsvermögens von Bodenoberflächen im Langwelligen auf die Messung der Bodenoberflächentemperatur mit Radiometern. *Univ. München, Met. Inst., Wiss. Mitt. Nr. 9*, 19—28 (1964).
8. Lorenz, D.: Zur Messung der Bodenoberflächentemperatur mit Radiometern. *Meteorol. Rundsch.* 18, 40—45 (1965).
9. Mensching, H., K. Gießner und G. Stuckmann: Sudan — Sahel — Sahara. *Jahrb. Geogr. Ges. Hannover, Jahrb. für 1969*, Hannover, 1970.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Albrecht Kessler, Meteorologisches Institut, Werderring 10, D-7800 Freiburg, Bundesrepublik Deutschland.