

Zum Wärmehaushalt des Grönländischen Inlandeises: Vergleichende Studie im Akkumulations- und Ablationsgebiet

Von Walter Ambach *

Zusammenfassung: An Hand von 2 Meßserien im Ablations- und Akkumulationsgebiet des Grönländischen Inlandeises werden die Energiequellen und Energiesenken für sommerliche Bedingungen vergleichend gegenübergestellt. Die Unterschiede in den Strahlungsströmen und den konvektiven Wärmeströmen werden quantitativ diskutiert. Während bei der Gesamtstrahlungsbilanz die Albedo der Meßstelle von ausschlaggebender Bedeutung ist, wird der Unterschied im konvektiven Wärmestrom vor allem durch den Rauigkeitsparameter bedingt. Ablationsraten werden mit dem Mikroklima korreliert. Auf die Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Ablation wird hingewiesen.

Summary: In the paper, the sources and sinks of energy in the area of ablation and accumulation are compared by 2 series of measurements taken during summers of 1959 and 1967. The differences in the radiation and convective fluxes are discussed. While the albedo of the measurement site is important for the net radiation balance, the differences in the convective fluxes are caused by roughness parameters. Rates of ablation are correlated with microclimatical data. The influence of climatic change on ablation is also described.

EINLEITUNG

Neuerdings sind Meßergebnisse über den Wärmehaushalt von polaren Gletschern wiederum von besonderem Interesse. Verschiedene Autoren haben darauf hingewiesen, daß zufolge des verstärkten Treibhauseffektes, der durch den Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre bedingt ist, eine Erwärmung der Troposphäre resultiert. Dadurch erscheint die Abschmelzung polarer Gletscher in Zukunft möglich zu sein. So hat MERCER (1978) den Abbau des Westantarktischen Eisschildes zufolge einer allgemeinen Temperaturerhöhung diskutiert und AMBACH (in Vorb.) Änderungen im Massenhaushalt des Grönländischen Eisschildes abgeschätzt. In diesem Zusammenhang erscheinen Wärmehaushaltsstudien im neuen Licht, weil durch sie die Bedeutung von Energiequellen und Energiesenken für den Massenhaushalt physikalisch quantitativ analysiert vorliegen.

Die hier diskutierten Wärmehaushaltsstudien wurden während der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition (EGIG) an folgenden zwei Meßstellen durchgeführt:

- Im Ablationsgebiet: Camp IV, EGIG I, 1013 m NN, Sommer 1959
- Im Akkumulationsgebiet: Station Carrefour, EGIG II, 1850 m NN, Sommer 1967

Die Einzelergebnisse sind bereits in den Expeditionsberichten veröffentlicht (AMBACH 1963, 1977a, b). Hier soll eine vergleichende Gegenüberstellung einiger interessanter Meßdaten erfolgen.

VERGLEICH DER KOMPONENTEN DES WÄRMEHAUSHALTS

Tab. 1a, b enthält die Komponenten des Wärmehaushalts als mittlere Tagessummen für Station Carrefour (Akkumulationsgebiet) im Zeitraum von Mitte Mai bis Ende Juli 1967 (insgesamt 70 Tage) und Camp IV (Ablationsgebiet) für 38 Tage mit Eisablation, wobei

* Prof. Dr. Walter Ambach, Institut für Medizinische Physik der Universität, Müllerstr. 44, A—6020 Innsbruck.

EGIG I/1959, Camp IV, 1013 m NN

EIN		AUS		BILANZ
kw	+ 581	kw	- 258	+ 323
lw	+ 566	lw	- 653	- 87
fü	+ 74	la	- 28	+ 46
		ΔT	- 24	- 24
		S	- 258	- 258
Summe EIN	+ 1221	Summe AUS	- 1221	000

EGIG II/1967, Carrefour, 1850 m NN

EIN		AUS		BILANZ
kw	+ 714	kw	- 608	+ 106
lw	+ 483	lw	- 576	- 93
fü	+ 31	la	- 26	+ 5
		ΔT	- 10	- 10
		S	0	0
Summe EIN	+ 1228	Summe AUS	- 1220	+ 8

Tab. 1: Komponenten des Wärmehaushaltes als mittlere Tagessummen (cal/cm²d) eingeteilt nach Energiequellen (ein) und Energiesenken (aus)*). Es bedeuten kw den kurzwelligen Strahlungsstrom, lw den langwelligen Strahlungsstrom, fü den fühlbaren Wärmestrom, la den latenten Wärmestrom, ΔT die zur Eis- bzw. Firnerwärmung verbrauchte Energie, S die zur Eisschmelzung verbrauchte Energie.

Links: Wärmehaushalt für die Meßstelle Camp IV, 1013 m NN, Ablationsgebiet. Die zur Eisschmelzung verbrauchte Wärme wurde als Restglied aus der Energiebilanzgleichung berechnet. Meßperiode: 38 Tage mit Eisablation.

Rechts: Wärmehaushalt für die Meßstelle Carrefour, 1850 m NN, Akkumulationsgebiet. Meßperiode: Mitte Mai bis Ende Juli (70 Tage). Der Restbetrag 8 cal/cm²d ist auf Meßfehler zurückzuführen.

Tab. 1: Components of the heat balance given as averaged daily sums of the sources of energy (in) and of the sinks of energy (out)*). This means: kw: the short wave radiation flux, lw: the long wave radiation flux, fü: the flow of sensible heat, la: the flow of latent heat, ΔT : the energy consumed for heating ice or firn, S: the energy consumed for ice melt.

Left: Heat balance at site Camp IV, 1013 m NN, area of ablation. The energy consumed for ice melt was calculated from the energy balance as being residual. Period of measurement: 38 days with ice ablation. Right: Heat balance at site Carrefour, 1850 m NN, area of accumulation. Period of measurement: Mid of May until end of July (70 days). The residual of 8 cal/cm²d is due to errors of measurements.

* Umrechnung: 1 cal/cm²d = 0,485 W/m². Conversion: 1 cal/cm²d = 0,485 W/m²

eine Aufteilung in Energiequellen und Energiesenken erfolgt. In Tab. 1a (Akkumulationsgebiet) ergibt die Energiebilanz 8 cal/cm²d (3,9 W/m²) anstatt den Wert Null. Die Differenz ist auf Meßfehler zurückzuführen. Im Falle von Tab. 1b (Ablationsgebiet) wurde die zur Schmelzung verbrauchte Wärme aus der Bilanzgleichung als Restglied ermittelt, so daß sich hier für die Energiebilanz der Wert Null ergibt. Es ist bemerkenswert, daß die beiden Meßstationen im Akkumulations- und Ablationsgebiet fast gleiche Tagessummen für die Energiequellen ergeben. Die Aufteilung auf die einzelnen Komponenten des Wärmehaushaltes ist in beiden Fällen jedoch sehr unterschiedlich.

Die mittleren Tagessummen der Komponenten des Wärmehaushaltes sind für beide Meßreihen in Abb. 1 dargestellt. Daraus sind folgende wesentliche Unterschiede zu erkennen (Index I bezieht sich auf das Ablationsgebiet, Index II auf das Akkumulationsgebiet):

- Die kurzwellige Einstrahlung (GI, GII) ist an der Meßstation II (Akkumulationsgebiet) höher, was auf Unterschiede in der Bewölkung zurückzuführen ist.
- Die langwellige Einstrahlung (AI, AII) ist an der Meßstation II (Akkumulationsgebiet) niedriger, was ebenfalls durch unterschiedliche Bewölkung, in Übereinstimmung mit dem Unterschied in der kurzwelligen Einstrahlung, erklärt werden kann.
- Die reflektierte kurzwellige Strahlung (RI, RII) ist wegen der wesentlich höheren Albedo in Meßstation II (Akkumulationsgebiet) größer.
- Die langwellige Ausstrahlung (EI, EII) ist wegen der niedrigeren mittleren Oberflächentemperatur in Meßstation II (Akkumulationsgebiet) geringer.
- Die fühlbare Wärme (Q_FI, Q_FII) ist wegen der größeren Differenz der Lufttemperatur gegen die schmelzende Eisoberfläche, wegen des größeren Rauigkeitsparameters der Eisoberfläche und wegen der größeren Windgeschwindigkeit in Meßstation I (Ablationsgebiet) größer.
- Die latente Wärme (Q_LI, Q_LII) tritt im Mittel wegen vorherrschender Verdunstung als Energiesenke in Erscheinung, die in beiden Fällen etwa gleich groß ist.

- Die zur Temperaturerhöhung von Eis bzw. Schnee verbrauchte Wärme (Q_{WI} , Q_{WII}) ist wegen der größeren Wärmeleitfähigkeit des Eises im Vergleich mit jener von Schnee an der Meßstelle I größer, obwohl sich an der Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) ein größerer Temperaturgradient einstellt.
- Die zur Schmelzung verbrauchte Wärme (Q_{SI} , Q_{SII}) weist für beide Meßstellen einen markanten Unterschied auf. An Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) ist dieser Wert null, an Meßstelle I (Ablationsgebiet) tritt die zur Schmelzung verbrauchte Wärme als markante Energiesenke in Erscheinung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die zum Schmelzen verbrauchte Wärme in erster Näherung aus dem Unterschied in der Albedo der beiden Oberflächen resultiert. Der Unterschied im Strahlungshaushalt beider Stationen wurde bereits früher vergleichend diskutiert (AMBACH 1973, 1974). Im folgenden wird auf Unterschiede in den konvektiven Wärmeströmen eingegangen.

VERGLEICH KONVEKTIVER WÄRMESTRÖME

Unterschiede in den konvektiven Wärmeströmen im Ablations- und Akkumulationsgebiet sind auf unterschiedliche Rauigkeit der Oberfläche, unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Unterschiede im Gradienten der Lufttemperatur und des Dampfdruckes zurückzuführen. Im Falle einer schmelzenden Oberfläche (Ablationsgebiet) ist die Oberflächentemperatur und der Sättigungsdampfdruck zeitlich konstant, so daß sich größere Gradienten der Lufttemperatur und des Dampfdruckes aufbauen können. Im Falle einer

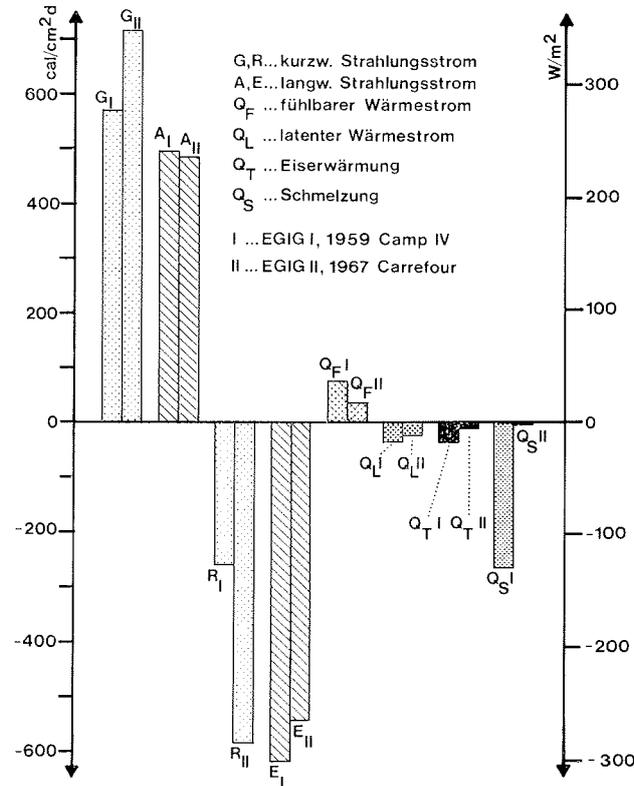


Abb. 1: Mittlere Tagessummen der Komponenten des Wärmehaushaltes für die Meßstelle I (Ablationsgebiet, Index I) und die Meßstelle II (Akkumulationsgebiet, Index II).

Fig. 1: Averaged daily sums of the components of heat balance for site I (area of ablation, index I) and for site II (area of accumulation, index II).

nicht schmelzenden Oberfläche können sich durch die momentan wirksamen Energiequellen und Energiesenken die Werte der Oberflächentemperatur und des Sättigungsdampfdruckes zeitlich ändern, wodurch im allgemeinen kleinere Werte der Gradienten der Lufttemperatur und des Dampfdruckes resultieren (AMBACH 1976).

Die Windprofile sind durch Unterschiede in den Rauigkeitsparametern der Oberfläche und Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten geprägt. In beiden Meßreihen ergibt sich eine befriedigende halblogarithmische Darstellung der Höhenprofile (Abb. 2). Die

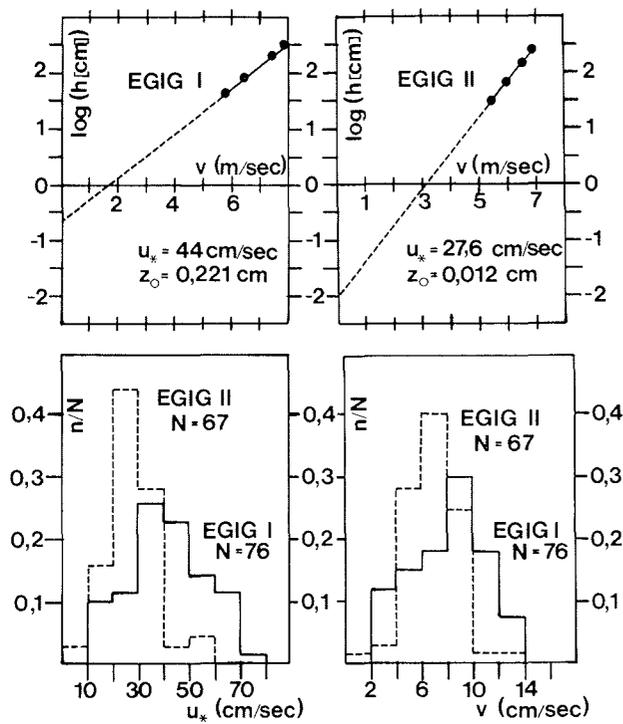


Abb. 2: Oben: Halblogarithmische Darstellung der gemittelten Windprofile für Meßstation I (EGIG I, Ablationsgebiet) und Meßstation II (EGIG II, Akkumulationsgebiet). u_* und z_0 sind die aus den Profilen berechneten Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit und des Rauigkeitsparameters. Unten links: Häufigkeitsverteilung der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* aus täglichen mittleren Windprofilen für Meßstelle I (EGIG I, Ablationsgebiet) und Meßstelle II (EGIG II, Akkumulationsgebiet). Unten rechts: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit für Meßstelle I (EGIG I, Ablationsgebiet) und Meßstelle II (EGIG II, Akkumulationsgebiet). Es sind die Meßwerte der höchsten Anemometer im Profil angeführt.

Fig. 2: Upper graph: Averaged wind profiles given in semi-logarithmical scales for site I (area of ablation, index I) and site II (area of accumulation, index II). u_* and z_0 are the friction velocities and the roughness parameters calculated from the averaged wind profiles. Lower graph, left: Frequency distribution of the averaged friction velocity u_* calculated from daily wind profiles at site I (EGIG I, area of ablation) and site II (EGIG II, area of accumulation). Lower graph, right: Frequency distribution of the wind velocity at site I (EGIG I, area of ablation) and site II (EGIG II, area of accumulation). Data of the highest anemometer above the surface are given.

Häufigkeitsverteilung der Schubspannungsgeschwindigkeiten zeigt für die Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) zufolge des kleineren Rauigkeitsparameters von Schnee und kleineren Windgeschwindigkeiten eine eindeutige Verschiebung des Häufigkeitsmaximums zu niedrigeren Werten. Die Häufigkeitsverteilung der Profilkonstanten k_T im halb-logarithmischen Temperaturprofil

$$T(z) = T_0 + k_T \ln \frac{z}{z_0}$$

mit T_0 als Oberflächentemperatur und z_0 als Rauigkeitsparameter, zeigt für beide Fälle nur geringfügige Unterschiede (Abb. 3). Das Häufigkeitsmaximum tritt bei etwas kleineren Werten der Profilkonstanten an Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) auf, was einem kleineren Gradienten der Lufttemperatur in der oberflächennahen Schicht entspricht.

Die Profilkonstante k_e des halblogarithmischen Dampfdruckprofils

$$e(z) = e_0 + k_e \ln \frac{z}{z_0}$$

mit den analogen Bezeichnungen wie vorhin, zeigt dagegen im Histogramm bezüglich der Streuung der Werte einen deutlichen Unterschied (Abb. 3). An beiden Meßstellen sind jedoch negative Werte vorherrschend, was dem Überwiegen der Verdunstung bei beiden Meßstellen entspricht.

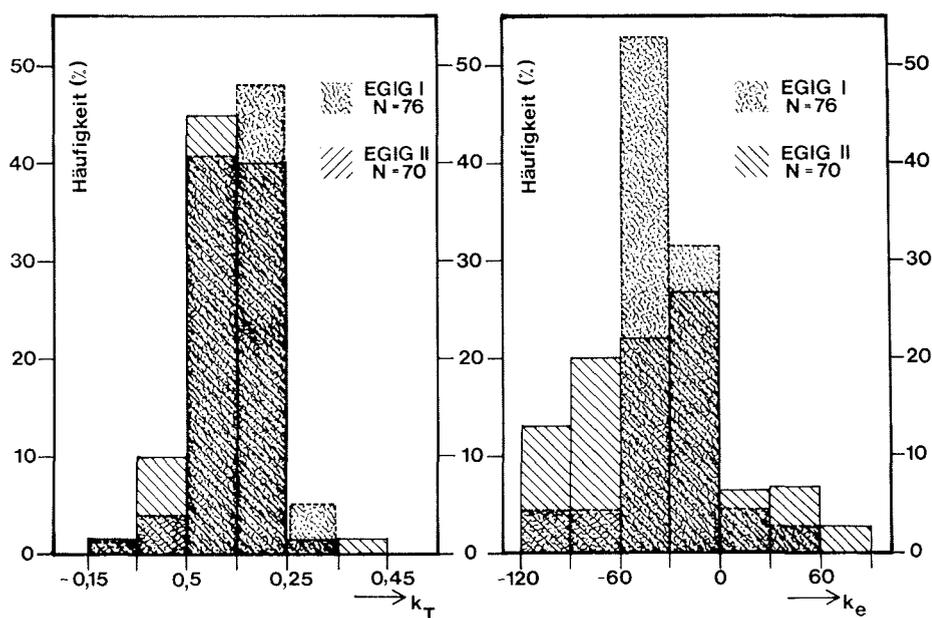


Abb. 3: Links: Häufigkeitsverteilung der Profilkonstanten k_T für das halblogarithmische Temperaturprofil, berechnet aus täglichen Mittelwerten der Temperatur in 2 Höhen über der Oberfläche für Meßstelle I (EGIG I, Ablationsgebiet) und Meßstelle II (EGIG II, Akkumulationsgebiet). Zur Bedeutung der Profilkonstanten k_T siehe Text.
Rechts: Häufigkeitsverteilung der Profilkonstanten k_e für das halblogarithmische Temperaturprofil, berechnet aus täglichen Mittelwerten des Dampfdruckes in 2 Höhen über der Oberfläche für Meßstelle I (EGIG I, Ablationsgebiet) und Meßstelle II (EGIG II, Akkumulationsgebiet). Zur Bedeutung der Profilkonstanten k_e siehe Text.

Fig. 3: Left: Frequency distribution of the parameter k_T of the temperature profile, calculated from the daily averaged temperatures of 2 heights above the surface for site I (EGIG I, area of ablation) and site II (EGIG II) area accumulation). For the meaning of the parameter k_T see text.

Right: Frequency distribution of the parameter k_e of the profile of the vapour pressure, calculated from the daily averaged values of the vapour pressure of 2 heights above the surface for site I (EGIG I, area of ablation) and site II (EGIG II, area of accumulation). For the meaning of the parameter k_e see text.

Die Profilkonstante k_T und k_e sind als Parameter der jeweiligen Gradienten aufzufassen. Der Zusammenhang zwischen Profilkonstante und Gradient ist durch folgende einfache Ausdrücke gegeben:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{k_T}{z} \quad \text{und} \quad \frac{de}{dz} = \frac{k_e}{z}$$

Wegen der kleinen Werte der Gradienten und der großen Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit kann bei beiden Meßreihen als Näherung ein adiabatisches Profil angenommen werden.

VERGLEICH DES STRALUNGSHAUSHALTES

Die Unterschiede des Strahlungshaushaltes im Ablations- und Akkumulationsgebiet sind besonders signifikant und wurden in einer eigenen Arbeit bereits eingehend diskutiert

(AMBACH 1973). Zufolge der höheren Albedo der Schneeoberfläche kommen im Akkumulationsgebiet nur kleine Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz vor. Bei hoher Albedo ergibt sich außerdem, daß die Tagessumme der Gesamtstrahlungsbilanz mit zunehmender Bewölkung zunimmt, ein Effekt, der als Strahlungsparadoxon bezeichnet wurde und auf den überwiegenden Einfluß der langwelligen Strahlungsströme im Strahlungshaushalt zurückzuführen ist (AMBACH 1974).

Die Tagessummen der Strahlungsströme sind in Abb. 4 vergleichend für beide Meßreihen gegenübergestellt. Die Abbildung enthält auch eine Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz, durch die das unterschiedliche Strahlungsklima beider Stationen ausgedrückt wird.

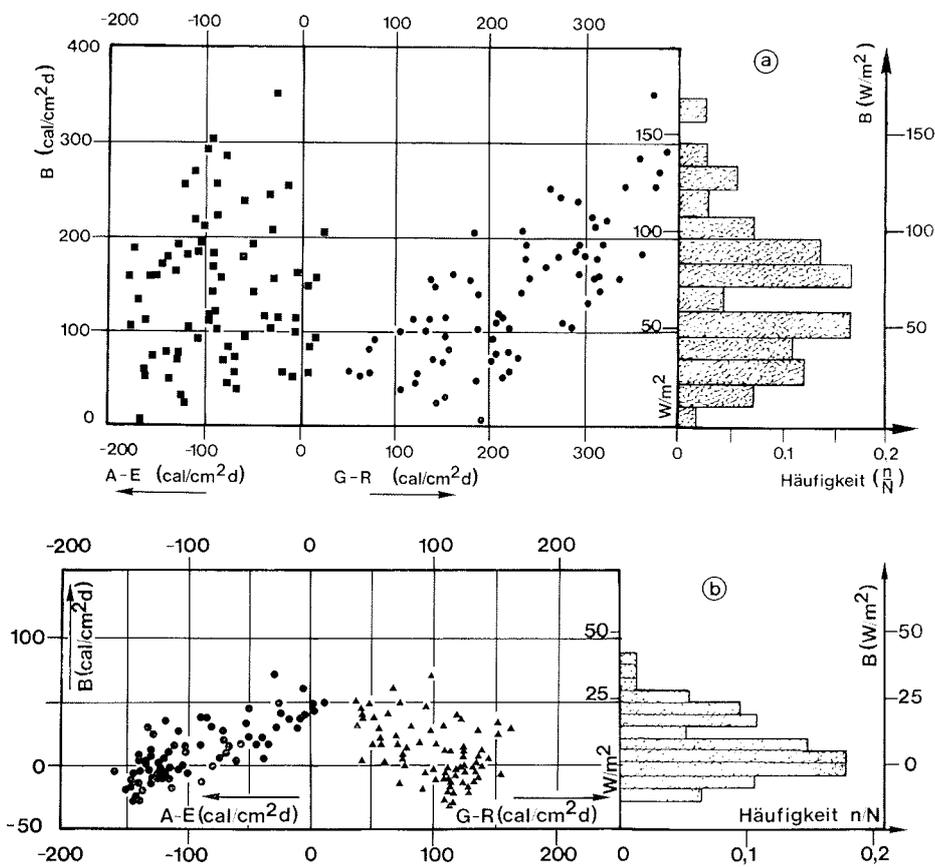


Abb. 4: Kombinierte Darstellung der Abhängigkeit der Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz B von der langwelligen Strahlungsbilanz $A-E$ und der kurzwelligen Strahlungsbilanz $G-R$. Der rechte Diagrammteil zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz. Obere und untere Darstellung haben verschiedene Skalen für B .

- a) Meßstelle I (Camp IV, Ablationsgebiet, 1013 m NN, EGIG I)
 b) Meßstelle II (Carrefour, Akkumulationsgebiet, 1850 m NN, EGIG II).

Fig. 4: Net radiation balance versus long wave radiation balance $A-E$ and short wave radiation balance $G-R$. The right histogram gives the frequency distribution of the daily sums of the net radiation balance. The upper graph and the lower graph have different scales for B .

- a) Site I (Camp IV, area of ablation, 1013 m NN, EGIG I)
 b) Site II (Carrefour, area of accumulation, 1850 m NN, EGIG II).

EIS- UND FIRNERWÄRMUNG

Die zur Eis- und Firnerwärmung verbrauchte Energie wird durch Wärmeleitung den tieferen Schichten zugeführt. Die Erwärmung der tiefer liegenden Eis- und Firnschichten kann als Wärmeleitungsproblem behandelt werden. Auf Grund der schlechten Wärmeleitung in Eis und Schnee kommen keine starken zeitlichen Schwankungen vor. Der zur Erwärmung verbrauchte Energiebetrag wird durch die Wärmeleitfähigkeit und durch den Temperaturgradienten bestimmt.

Ein Vergleich des zur Eis- bzw. Firnerwärmung verbrauchten Energiebetrages ergibt im Mittel an Meßstelle I (Ablationsgebiet) $24 \text{ cal/cm}^2\text{d}$ ($11,6 \text{ W/m}^2$) und an Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) $10 \text{ cal/cm}^2\text{d}$ ($4,8 \text{ W/m}^2$). Der größere Wert an Meßstelle I (Ablationsgebiet) ist auf die größere Wärmeleitfähigkeit von Eis im Vergleich zu Schnee zurückzuführen, obwohl an Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) größere Temperaturgradienten auftreten. In Abb. 5 sind Temperaturprofile beider Stationen gezeichnet. Die Fläche zwischen zwei Profilen ist bei Berücksichtigung der verschiedenen Dichte ein Maß für die zur Erwärmung verbrauchte Energie.

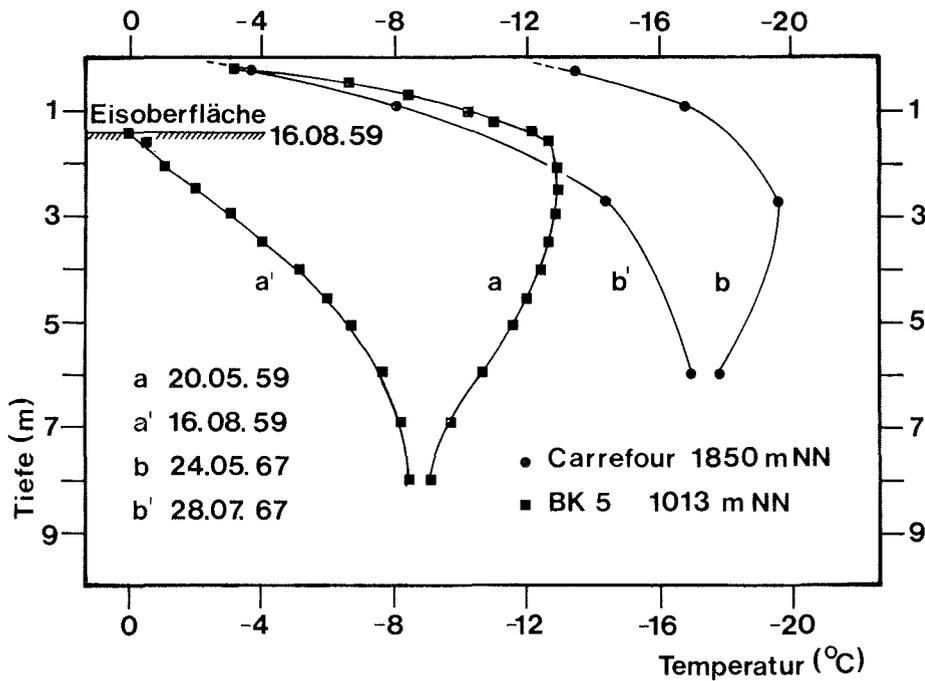


Abb. 5: Temperaturtiefenprofile an Meßstelle I (Camp IV, 1013 m NN, Ablationsgebiet, EGIG I) und Meßstelle II (Carrefour, 1850 m NN, Akkumulationsgebiet, EGIG II).

Fig. 5: Profiles of temperatures in snow resp. ice at site I (Camp IV, 1013 m NN, area of ablation, EGIG I) and site II (Carrefour, 1850 m NN, area of accumulation, EGIG II).

EISABLATION UND MIKROKLIMA

Für die Meßstelle I (Ablationsgebiet) wurden täglich Werte der Eisablation nach dem Gesichtspunkte starke, mittlere und geringe Ablationsrate in drei Gruppen eingeteilt und mit den entsprechenden mittleren Klimawerten wie Gesamtstrahlungsbilanz \bar{B} , Lufttempe-

ratur \bar{T} , Windgeschwindigkeit \bar{v} und Dampfdruck \bar{e} , gruppenweise verglichen. Die Mittelwerte der Eisablationsraten in den drei angeführten Gruppen sind in Abb. 6 durch 3 verschiedene Säulenarten gekennzeichnet. Es zeigt sich eine sinngemäße Beziehung zwischen den Ablationsraten \bar{h} und den Klimadaten \bar{B} , \bar{T} , \bar{v} , \bar{e} . Der größte Wert der Ablationsrate (linke Säule) entspricht dem größten Wert der Gesamtstrahlungsbilanz, der höchsten Lufttemperatur, der größten Windgeschwindigkeit und dem höchsten Dampfdruck, der wiederum der geringsten Verdunstungsrate entspricht.

Für die drei Gruppen von Ablationsraten werden auch die Mittelwerte der Komponenten des Wärmehaushaltes angegeben (Abb. 6). Die mittleren Tagessummen der Gesamtstrahlungsbilanz \bar{B} , des konvektiven Wärmestromes (\bar{Q}_{F+L}) und des Energieverbrauchs zur Eisermwärmung \bar{Q}_T korrelieren ebenfalls sinngemäß mit der mittleren Tagessumme für die zur Schmelzung verbrauchte Wärme \bar{Q}_S . Der größte Wert von \bar{Q}_S entspricht dem

Abb. 6: Oben: Vergleich von Ablationsraten \bar{h} (cm Eis/h) für große, mittlere und geringe Ablationsraten (linke, mittlere und rechte Säule) mit jeweiligen Klimadaten wie Gesamtstrahlungsbilanz \bar{B} , Lufttemperatur \bar{T} , Windgeschwindigkeit \bar{v} und Dampfdruck \bar{e} . Angaben gleich schraffierter Säulen entsprechen einander. Meßstelle I, Ablationsgebiet (Camp IV, 1013 m NN, EGIS I).
Unten: Mittlere Tagessummen folgender Komponenten des Wärmehaushaltes für große, mittlere und geringe Ablationsraten (linke, mittlere und rechte Säule): Gesamtstrahlungsbilanz \bar{B} , fühlbarer und latenter Wärmestrom \bar{Q}_{F+L} , Energie zur Eisermwärmung \bar{Q}_T und Wärme zur Eisschmelzung \bar{Q}_S . Angaben gleich schraffierter Säulen entsprechen einander. Meßstelle I, Ablationsgebiet (Camp IV, 1013 m NN, EGIS I).

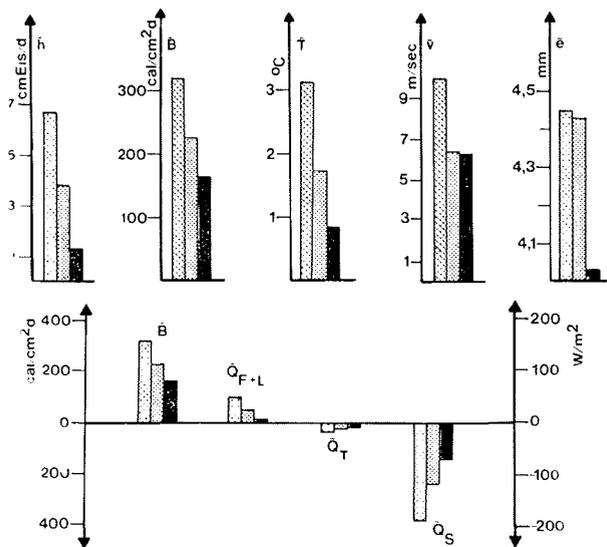


Fig. 6: Upper graph: Comparison of rate of ablation h (cm ice/h) for high, medium and low rates (left, central and right column) with data showing net ablation balance B , air temperature T , wind velocity v and vapour pressure e . Data of columns hatched alike correspond. Site I, area of ablation (Camp IV, 1013 m NN, EGIS I).
Lower graph: Averaged daily sums of the following components of the energy balance for high, medium

and low rates of ablation (left, central and right column). This means: B : the net radiation balance, Q_{F+L} : the flow of sensible and latent heat, Q_T : the energy of ice heating, Q_S : the energy of ice melt. Data of columns hatched alike correspond. Site I, area of ablation (Camp IV, 1013 m NN, EGIS I).

größten Wert von \bar{B} , \bar{Q}_{F+L} und \bar{Q}_T . Große Werte der Eisablationsrate ergeben sich bei großen Werten der Gesamtstrahlungsbilanz und großen Werten des konvektiven Wärmestromes.

Die detaillierte Abhängigkeit der Eisablationsrate von \bar{T} , \bar{v} und \bar{B} ist in Abb. 7 dargestellt. Die Zunahme der Eisablationsrate mit steigender Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Gesamtstrahlungsbilanz ist erkennbar, wobei dieses Ergebnis wegen des zusätzlichen Einflusses des latenten Wärmestromes gestört ist.

Für die gesamte Meßperiode sind die Komponenten des Wärmehaushaltes an der Meßstelle I (Ablationsgebiet) als Tagessummen in Abb. 8 gezeichnet.

Der zur Eisermwärmung verbrauchte Energiebetrag ist über die Meßperiode an Meßstelle I (Ablationsgebiet) annähernd zeitlich konstant und im Vergleich zur Schmelzwärme ge-

ring. Aus der Abbildung ist durch Vergleich der Energiequellen und Energiesenken ersichtlich, daß der als Schmelzwärme verbrauchte Energiebetrag Q_S hauptsächlich durch die kurzweilige Strahlungsbilanz moduliert wird.

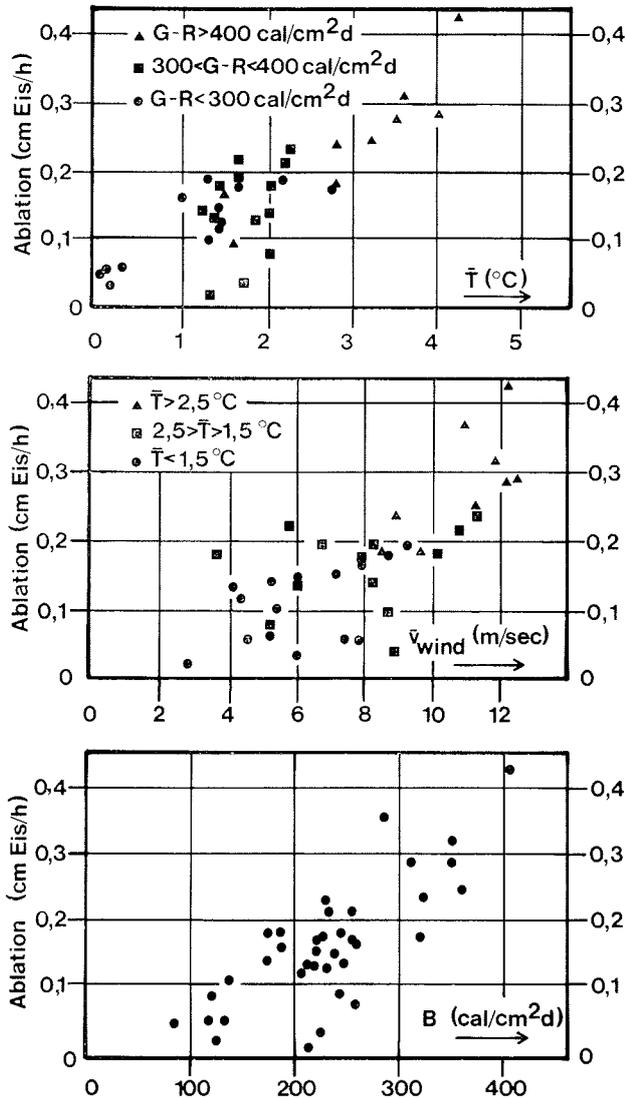


Abb. 7: Abhängigkeit der Eisablationsrate, berechnet aus Tagessummen der Eisablation in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Gesamtstrahlungsbilanz ($1 \text{ cal/cm}^2\text{d} = 0,485 \text{ W/m}^2$). Meßstelle I (Ablationsgebiet, Camp IV, 1013 m NN, EGIG I).

Fig. 7: Rate of ice ablation, calculated from daily sums of ice ablation versus air temperature, wind velocity and net radiation balance ($1 \text{ cal/cm}^2\text{d} = 0,485 \text{ W/m}^2$). Site I (area of ablation, Camp IV, 1013 m NN, EGIG I).

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Ein grundlegendes Problem von Wärmehaushaltsstudien ist die Tatsache, daß die Messung der Energiequellen und Energiesenken des Wärmehaushaltes immer nur lokal für eine Meßstelle erfolgen kann. Für bestimmte Fragestellungen interessiert jedoch nicht nur der Wärmehaushalt einer eng begrenzten Meßstelle, sondern eines möglichst ausgedehnten Gebietes über das Inlandeis. Solche Fragestellungen kommen z. B. im Zusam-

menhang mit dem Problem der Massenbilanz bei Klimaänderung vor. Voraussetzung zur Abschätzung des Wärmehaushaltes eines ausgedehnten Gebietes ist jedoch die detaillierte Kenntnis des Wärmehaushaltes charakteristischer Meßstellen. Durch einen Vergleich von Meßergebnissen aus dem Ablations- und Akkumulationsgebiet können die grundlegenden Unterschiede im Wärmehaushalt einer schmelzenden Eisoberfläche und einer kalten Schneeoberfläche diskutiert werden. Diese Unterschiede sind hauptsächlich durch die verschiedene Albedo und den verschiedenen Rauigkeitsparameter der Oberfläche bedingt.

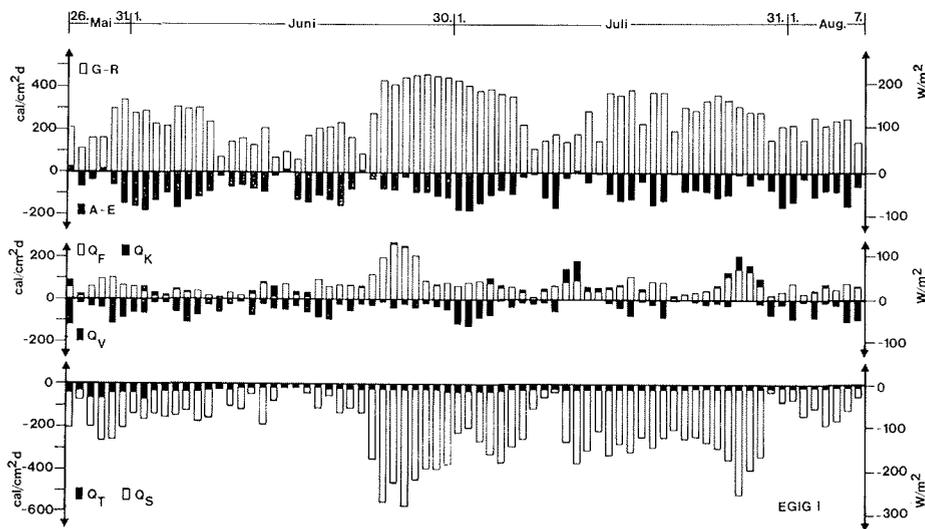


Abb. 8: Tagessummen der Komponenten des Wärmehaushaltes für Meßstelle I (Ablationsgebiet, Camp IV, 1013 m NN, EGIG I). Es bedeuten G—R die kurzweilige Strahlungsbilanz, A—E die langweilige Strahlungsbilanz, Q_F den fühlbaren Wärmestrom, Q_K den positiven latenten Wärmestrom, Q_V den negativen latenten Wärmestrom (Verdunstung), Q_T den Energieverbrauch für Eiswärmung und Q_S den Energieverbrauch für Schmelzung.

Fig. 8: Daily sums of the components of the energy balance for site I (area of ablation, Camp IV, 1013 m NN, EGIG I). This means: G—R the short wave radiation balance, A—E the long wave radiation balance, Q_F the flow of sensible heat, Q_K the flow of positive latent heat, Q_V the flow of negative latent heat (evaporation), Q_T the energy consumed for ice melt.

Bei oberflächlicher Betrachtung der Meßergebnisse ist der Schluß naheliegend, daß eine Änderung der Lufttemperatur keinen entscheidenden Einfluß auf den Wärmehaushalt ausüben kann, weil die Beträge des fühlbaren Wärmestromes relativ zu jenen der kurz- und langwelligen Strahlungsströme klein sind. Der fühlbare Wärmestrom beträgt an der Meßstelle I (Ablationsgebiet) 6,1% der Summe der Energiequellen, an der Meßstelle II (Akkumulationsgebiet) nur 2,5%. Tatsächlich ist jedoch für den Beginn der Schmelzung die Lufttemperatur von entscheidender Bedeutung. Mit Beginn der Schmelzung an der Schneeoberfläche wird durch den freien Wassergehalt die Albedo entscheidend geändert, so daß erst über diesen Umweg der Albedoänderung die kurzweiligen Strahlungsströme für die Ablation wirksam werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Lufttemperatur nicht wesentlich für die spezifische Nettoablationsrate (Tagessummen der Nettoablation einer individuellen Meßstelle) bestimmend ist. Dafür sind vielmehr die kurz- und langwelligen Strahlungsströme als größte Energiequellen und Energiesenken verantwortlich. Die Lufttemperatur beeinflusst jedoch in doppelter Hinsicht die Nettoablation einer großen Fläche: Erstens

durch die Dauer der Ablationsperiode und zweitens durch die Größe der Ablationsfläche, die von der Seehöhe der Gleichgewichtslinie und damit auch von der Lufttemperatur abhängt. Eine Abschätzung der Änderung des Massenhaushaltes des Grönländischen Inlandeises bei Klimaänderung zufolge des Anstiegs der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wurde bereits an anderer Stelle gegeben (AMBACH, in Vorb.).

L i t e r a t u r

- A m b a c h , W. (1963): Untersuchungen zum Energieumsatz in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises, (Camp IV — EGIG, 69°40'05" N, 49°37'58" W). Expeditionsbericht der Internationalen Glaziologischen Grönlandexpedition. — Medd. Grønland 174 (4): 1—311.
- A m b a c h , W. (1976): Zum Wärmehaushalt im Akkumulationsgebiet des Grönländischen Inlandeises: Interpretation der thermischen Stabilität von kalten Schneeschichten. — Polarforschung 46 (1): 46—59.
- A m b a c h , W. (1977): Untersuchungen zum Energieumsatz in der Ablationszone des Grönländischen Inlandeises: Nachtrag. — Medd. Grønland 187 (5), zugleich EGIG Publ. 4 (5).
- A m b a c h , W. (1977): Untersuchungen zum Energieumsatz in der Akkumulationszone des Grönländischen Inlandeises. — Medd. Grønland 187 (7), zugleich EGIG Publ. 4 (7).
- A m b a c h , W. (in Vorb.): Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und Klimaänderung: Mögliche Auswirkungen auf den Grönländischen Eisschild. — Manuskript.
- E m i l i a n i , C. (1969): Interglacial high sea levels and the control of Greenland Ice by the precession of the Equinoxes. — Science 166 (3912): 1503—1504.
- M e r c e r , J. H. (1978): West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: A threat of disaster. — Nature 271 (5643): 321—325.