

WELTKARTEN DER RELATION VON FÜHLBARER UND LATENTER WÄRME

Mit 3 Abbildungen und 2 Beilagen (VIII-IX)

WILHELM LAUER und PETER FRANKENBERG

Summary: World maps of the ratio of sensible and latent heat

Based upon the equivalent temperature a formula is given to calculate the ratio of sensible and latent heat. The regional pattern of the July and January ratio is presented in two maps. The maps clearly show the spatial effect of the two main climatic types: aridity and humidity in the tropics, continentality and oceanity in the outer tropics. The ratio can be considered as a very appropriate indicator of bioclimatological phenomena.

Die Wärmekomponente des irdischen Klimas wird in ihrer geographischen Verbreitung im allgemeinen durch Isothermen-Karten wiedergegeben. Die mittleren Temperaturverhältnisse, die darin zum Ausdruck kommen, vertreten jedoch nur eine Komponente der vorhandenen Wärme eines Luftquantums, die „fühlbare“ Wärme. Die weitere Komponente, die „latente Wärme“, wird meist als Energiemaß der aktuellen Verdunstung und selten als Wärmemaß verwendet. Lediglich in der Äquivalenttemperatur läßt sich die Gesamtwärme eines Luftquantums in der gleichen Maßeinheit ausdrücken. KNOCHE hat bereits 1907 Weltkarten der Äquivalenttemperatur entworfen, indem er auch den Anteil latenter Wärme in Grad Celsius ausdrückte und zu den gemessenen Temperaturwerten addierte. In der Folgezeit hat man dann für bioklimatische Fragestellungen (z. B. zur Erfassung der Schwüle) den Ausdruck der äquivalenten Temperatur zu nutzen versucht. KRÜGER (1942) hat erstmals auch Pflanzenareale mit Raummustern der äquivalenten Temperatur in Beziehung gesetzt. Aber schon HANN hatte 1907 festgestellt, daß die Äquivalenttemperatur als *ungeteilte* Größe des Gesamtenergiegehaltes eines Luftquantums für derartige Fragestellungen ungeeignet sei. Erst das Verhältnis von latenter und fühlbarer Wärme liefert den wesentlichen Interpretationsansatz. An einer Klimastation der feucht-gemäßigten Breiten kann z. B. die gleiche Äquivalenttemperatur gemessen werden wie an einer subtropischen Trockenstation. Zerlegt man jedoch an beiden Stationen die Äquivalenttemperatur in ihre Bestandteile, so enthält sie in den feucht-gemäßigten Breiten hohe Anteile latenter Wärme, an der Trockenstation jedoch hohe Anteile fühlbarer Wärme. Nur die Differenzierung des Gesamtwärmemaßes in seine fühlbaren und latenten Komponenten ist daher für ökoklimatische Zwecke ebenso wie für energetische Betrachtungen von Bedeutung.

Es wird im folgenden der Versuch gemacht, die Äquivalenttemperatur als Ausdruck der „Gesamtwärme eines Luftquantums“ in ihre Anteile an „fühlbarer“ und „latenter“

Wärme zu zerlegen und Weltkarten der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme darzustellen (vgl. LAUER & FRANKENBERG 1981), um sie für ökoklimatische Fragestellungen nutzbar machen zu können.

Kartographische Darstellungen von fühlbarer und latenter Wärme fußen auf der recht kompliziert zu berechnenden *Bowen-Ratio* (vgl. das folgende Kapitel), die allerdings die Ströme fühlbarer und latenter Wärme zwischen zwei Meßniveaus zur Grundlage hat. Sie drückt somit nicht den mittleren energetischen Ist-Zustand der Atmosphäre im „Wetterhüttenniveau“ aus. BUDYKO verwendete die *Bowen-Ratio* zur Darstellung energetischer Raummuster der Ströme fühlbarer und latenter Wärme. Im Jahre 1955 veröffentlichte er zum erstenmal einen „Atlas der Wärmebilanz“ der Erdoberfläche (vgl. auch FLOHN 1958). Darin wurden die beiden Glieder des irdischen Wärmehaushaltes getrennt berechnet und Karten der Wärmeabgabe durch die Verdunstung sowie Karten der Abgabe oder Einnahme fühlbarer Wärme abgebildet. Der Atlas der Wärmebilanz erfuhr im Jahre 1963 eine Neuauflage, in die neuere Forschungsergebnisse einbezogen werden konnten. Vor allem konnten die Satellitenmessungen der Strahlungsbilanz berücksichtigt werden (vgl. RASCHKE 1972). Auch später (1978) blieb BUDYKO im wesentlichen bei der getrennten Darstellung der Ströme von fühlbarer und latenter Wärme. Unter Verwendung der *Bowen-Ratio* gelangte er zu einem Strahlungsindex der Trockenheit. In Fortführung der *Budyko-Ratio* entwickelte LETTAU eine „*Dryness-Ratio*“ (vgl. HARE 1977, S. 96–100)

$$D = R/LP$$

(R = Strahlungsbilanz; P = Mittlerer Jahresniederschlag; L = Verdunstungswärme), die HENNING (in: HARE 1977, S. 15–23) zur Darstellung einer Weltkarte benutzte. Sie wird heute zur Beurteilung der Desertifikationsgefährdung verwandt. D. HENNING hat inzwischen einen „Atlas der Wärmebilanz der Kontinente“ fertiggestellt (vgl. HENNING & HENNING 1980). Bei der Ermittlung des Energieterms der Verdunstung bezog D. HENNING die Berechnungsansätze von ALBRECHT (zuletzt 1965) mit ein. ALBRECHT stellte zur Bilanzierung des Wärmehaushaltes der Erdoberfläche Karten des Verhältnisses der an die Luft abgegebenen Wärme (L) und der bei der Verdunstung verbrauchten Wärme (V) dar (L/V). Darauf basierte seine Formel einer „natürlichen Verdunstung“. Gegenüber dem Verfahren von ALBRECHT und der *Bowen-Ratio*, die gleichfalls die Ströme der fühlbaren und la-

tenten Wärme im Auge haben, erfaßt der hier vorgestellte Ansatz der Zerlegung der Äquivalenttemperatur in ihre fühlbaren und latenten Anteile den Energiezustand der Erdoberfläche auf der Basis von Wetterhüttenmessungen. Er hat den Vorteil, über wenige Ausgangsgrößen – Temperatur, relative Feuchte und Luftdruck – die Relationen von fühlbarer und latenter Wärme berechnen zu können. Damit wird es möglich, detaillierte Raummuster der Anteile von fühlbarer und latenter Wärme weltweit darzustellen als Grundlage für räumlich orientierte biogeographische Fragestellungen.

Berechnung einer Ratio von fühlbarer und latenter Wärme über die Äquivalenttemperatur

Die Äquivalenttemperatur entspricht dem „Gesamtwärmegehalt“ eines Luftquantums. Er setzt sich aus der latenten und der fühlbaren Wärme zusammen (LINKE 1922). Dieser Gesamtwärmegehalt ergibt sich nach LINKE (1938) aus dem „Produkt von Temperatur, Dichte und spezifischer Wärme“ eines Gases konstanten Druckes. Dividiert man die Gesamtwärmemenge durch Dichte und spezifische Wärme, so erhält man eine Größe in der Dimension der Temperatur, die man mit LINKE (1938) als Äquivalenttemperatur bezeichnet.

Ausgehend von der Differentialgleichung der potentiellen Temperatur trockener Luft und ihrer Entropie sowie der Entropie feuchter Luft berechnet sich nach LINKE (1938) die „potentielle Äquivalenttemperatur“ bei Temperaturen über 0 °C wie folgt:

$$t_{ae} = \frac{cp'}{cp} \times T + f \times 1548 \frac{E}{p} (1 - 0,001 t),$$

wobei cp die Wärmekapazität trockener Luft, cp' die Wärmekapazität feuchter Luft, T die absolute Temperatur, f die relative Feuchte, E der maximale Dampfdruck, p der Luftdruck und t die Temperatur in °C bedeuten.

Bei Temperaturen unter 0 °C wurde eine andere Formel zur Berechnung der „potentiellen Äquivalenttemperatur“ verwendet (vgl. *Meteorologisches Taschenbuch* 1939). Zur Erstellung der vorliegenden Weltkarten der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme sowie der entsprechenden Diagramme wurde die Äquivalenttemperatur einzelner Monate mit Hilfe von Tabellen im *Meteorologisches Taschenbuch* (1939) für mehr als 1000 Klimastationen der Erde berechnet. Die dazu benötigten Ausgangsdaten von Temperatur, relativer Feuchte und des Luftdrucks haben unter anderem dem Handbuch der Klimastationen der Erde (vgl. MÜLLER et al. 1979) entnommen werden können.

Die Relationen von fühlbarer und latenter Wärme lassen sich mit Hilfe der Äquivalenttemperatur auf relativ einfache Weise bestimmen, indem man die gemessene fühlbare Wärme in Relation zu der Gesamtwärme minus der fühlbaren Wärme, also zu der latenten Wärme setzt:

$$\frac{T}{T_{ae} - T} = \frac{T}{L}.$$

Dabei bedeuten T die absolute Temperatur (Grad Kelvin), T_{ae} die Äquivalenttemperatur (Grad Kelvin), T also auch die fühlbare und L die latente Wärme. Es ist notwendig, diese

Ratio in der Dimension der absoluten Temperatur (Grad Kelvin) zu berechnen, da ihr eine Division zugrunde liegt. Die Relationen von fühlbarer und latenter Wärme stellen sich damit so dar, wie sie vom absoluten Nullpunkt von minus 273 °C aus gegeben sind.

Es wird die insgesamt vorhandene Wärme in ihre latente und fühlbare Komponente zerlegt und nicht die in einem bestimmten Zeitraum zugeführte Wärme, obwohl diese in der Gesamtwärmebilanz enthalten ist. Die beiden Weltkarten geben einen mittleren „Ist-Zustand“ der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme in seiner Raumstruktur wieder. Die Diagramme zeigen entsprechende Jahresgänge für einige Beispielstationen verschiedener Klimazonen.

Die *Bowen-Ratio* gestattet demgegenüber die Berechnung der Ströme von latenter (LE) und fühlbarer Wärme (K) (vgl. RIJTEMA 1966):

$$\beta = \frac{K}{LE} = \gamma \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \right)$$

wobei γ die Psychrometerkonstante (0,485 mm Hg °C⁻¹), T_s und T_a die Temperatur einer Oberfläche bzw. die Lufttemperatur und e_s bzw. e_a die entsprechenden Dampfdrücke bedeuten.

Der über die Äquivalenttemperatur abgeleitete „Ist-Zustand“ der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme kann auch für kürzere Zeiträume berechnet werden. Daraus lassen sich zeitliche Differenzen der Bilanzen von fühlbarer und latenter Wärme erkennen.

Weltkarten der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme (Beilagen VIII+IX)

Die Raummuster der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme (T/L) sind weltweit für die Monate Januar und Juli in den Beilagen VIII und IX dargestellt. Der Vergleich beider Karten zeigt für die Südhalbkugel nur geringe Veränderungen in der räumlichen Verteilung der Ratio (T/L) zwischen dem Sommermonat Januar und dem Wintermonat Juli. Die relativ kleinen Landmassen der Südhalbkugel stehen ganzjährig unter dem Einfluß der Ozeane. Dies macht bereits deutlich, daß die Ratio von fühlbarer und latenter Wärme insbesondere die Kontinentalitäts- bzw. Ozeanitätsstufung nachzeichnet und zugleich das Verdunstungsverhalten der Räume ausdrückt. Die absoluten Werte der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme zeigen für den Südsommer (Januar) naturgemäß einen höheren Anteil latenter Wärme als für den Südwinter (Juli). Im Sommer ist die Verdunstung aus dem Meere gesteigert und somit wird auch den Landmassen mehr latente Wärme zugeführt.

Dies erweist sich besonders markant bei den großen Landmassen der Nordhalbkugel. Die Differenzen zwischen den Relationen von fühlbarer und latenter Wärme sind dort von Januar zu Juli extrem ausgeprägt. Dies gilt auch für die ausgesprochenen Trockenräume. Im Sommer (Juli) werden die Relationen von fühlbarer und latenter Wärme in weiten Teilen der großen Landmassen von Nordamerika und Eurasien gleichmäßig von der Westwinddrift (Polarfront-Jet) geprägt. Sie transportiert große Mengen latenter Wärme bis in die

ozeanfernten Teile der Kontinente. Auch die meernahen Räume der Nordhalbkugel zeigen im Sommer (Juli) höhere Anteile an latenter Wärme als im Winter (Januar), weil die Zufuhr von latenter Wärme wegen der im Sommer größeren Verdunstung in dieser Jahreszeit allgemein gesteigert ist (s. o.).

Im Sommer verlaufen die Linien gleicher Ratiowerte in Nordamerika und in Eurasien eher meridional, womit sie den von Westen nach Osten abnehmenden Einfluß des Transportes latenter Wärme durch die Westwinddrift anzeigen. Da sich im Winter die Westwinddrift nach Süden verlagert, verlaufen die Isolinien von T/L im nördlichen Eurasien dann eher zonal. Damit eignen den Landmassen von Nordamerika und Eurasien gerade in ihren ozeanfernten Räumen extrem hohe Anteile an fühlbarer Wärme. Die absolut niedrigere Gesamtwärme des Winters vermag weniger Feuchte aufzunehmen, so daß in extrem winterkalten Regionen, wie in Nordost-Sibirien, der höchste Überschuß fühlbarer Wärme gegenüber der latenten Wärme festzustellen ist.

Die Glieder der allgemeinen Zirkulation beeinflussen demnach die Relationen von fühlbarer und latenter Wärme in dem Sinne, daß sie den horizontalen Transport latenter Wärme von den Ozeanen in die Landmassen steuern. Folglich zeigen beide Karten in den Tropen den Ostküsteneffekt der Passatströmung in seiner jahreszeitlichen Verlagerung, die sich in einer Heranführung latenter Wärme an die Ostküsten Südamerikas, Südafrikas, Südasiens und Australiens ausdrückt, gesteuert durch die subtropischen Hochdruckgebiete. In den äquatorialen Tropen wird auf der gesamten Erde der Effekt der jahreszeitlichen Verlagerung der ITC (innertropische Konvergenzzone) und damit der Einflußbereich der äquatorialen Westwinde wie der tropischen Monsune gleichfalls in markanter Weise abgebildet.

Auch die vertikalen Ströme von fühlbarer und latenter Wärme drücken sich in den beiden Weltkarten in ihrem jahreszeitlichen Unterschied insofern aus, als durch Vertikaltransporte von Wasserdampf im Rahmen des kleinen Wasserkreislaufs ständig Umsetzungsprozesse von fühlbarer in

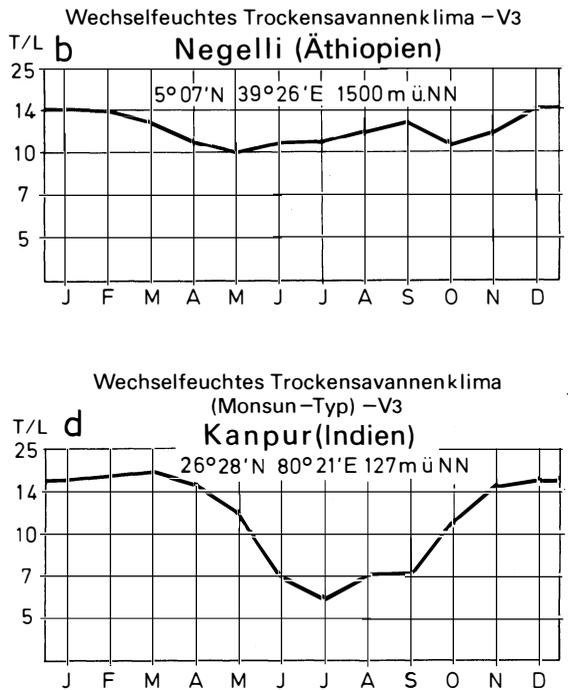
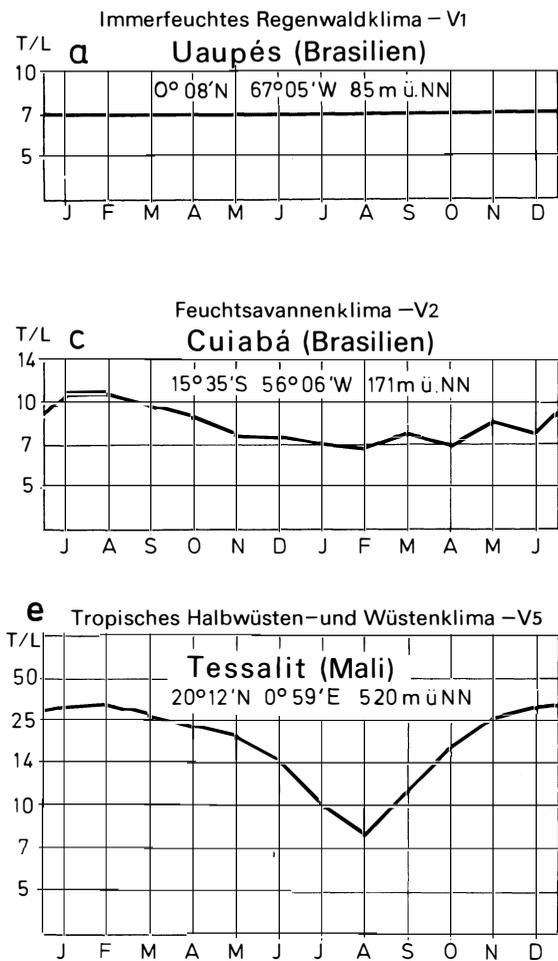


Abb. 1: Diagramme des Jahresganges der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme in tropischen Breiten
 Mean monthly values of the ratio of sensible and latent heat in the tropics

latente Wärme (Verdunstung) und von latenter in fühlbare Wärme (Kondensation) ablaufen. Diese Prozesse gehen in den mittleren Zustand der Ratio (T/L) ein. Dies zeigt sich besonders markant im gesamten Tropenraum einschließlich seiner Höhegebiete.

Der Jahresgang der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme

Anhand einiger Beispieldiagramme wird im folgenden der Jahresgang der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme für

einige Klimastationen dargestellt und interpretiert. Sie repräsentieren 12 verschiedene Klimate nach der Klimaklassifikation von TROLL und PAFFEN (1964).

In der Abb. 1 sind fünf Beispieldiagramme der nordhemisphärischen Tropen zusammengestellt. Die Station Uaupés (Brasilien, Abb. 1a) liegt in den immerfeuchten Tropen. Sie zeigt keinen Jahresgang der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme, weil keine Jahreszeiten ausgeprägt sind. In den wechselfeuchten Tropen (Trocken- bzw. Feuchtsavanne) (Abb. 1b, Negelli; 1c, Cuiabá) prägt der Wechsel von Regen- und Trockenzeit den Jahresgang, indem der Anteil latenter Wärme während der Regenzeit sein Maximum und in

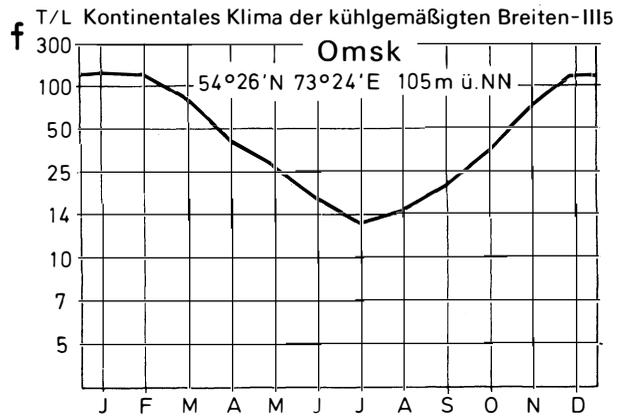
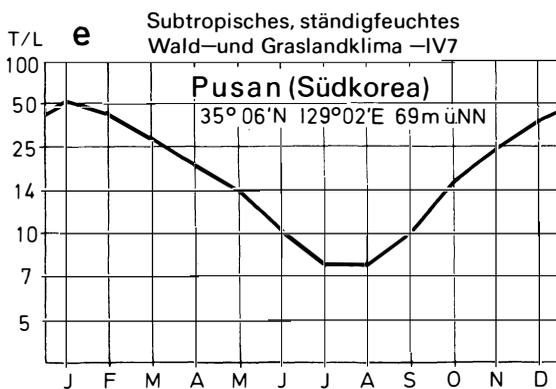
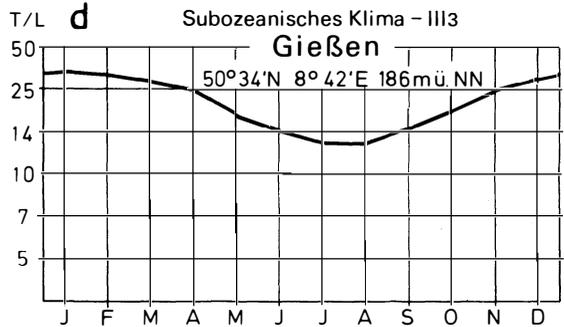
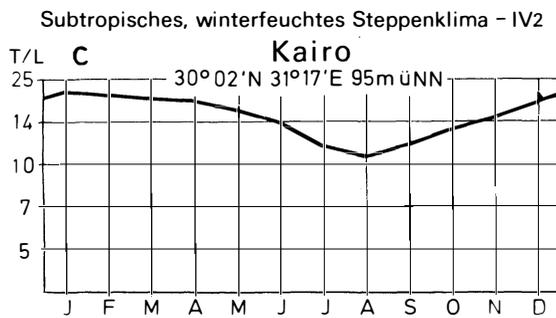
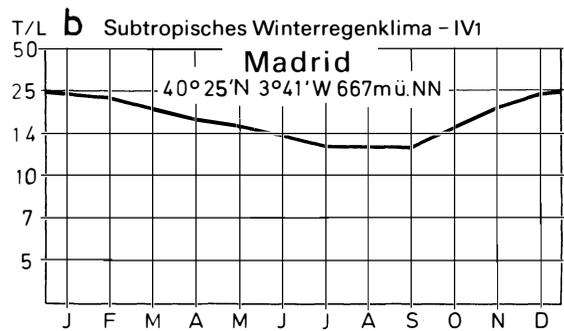
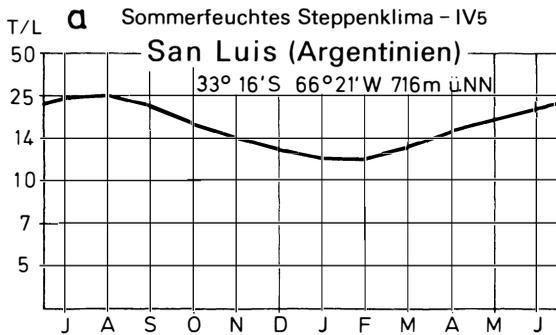


Abb. 2: Diagramme des Jahresganges der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme in subtropischen und gemäßigten Breiten
 Mean monthly values of the ratio of sensible and latent heat in subtropical and middle latitudes

der Trockenzeit sein Minimum erreicht. An der Station Negelli (Äthiopien) folgt der Anteil latenter Wärme am Gesamtwärmegehalt der Luft den beiden Regenmaxima in den Monaten April bis Mai/Juni und in den Monaten Oktober/November. In der „kleinen Trockenzeit“ ist der Anteil an fühlbarer Wärme ähnlich hoch wie in der „großen Trockenzeit“ des Winters.

Die Monsunklimate Indiens (Abb. 1d, Kanpur) weisen einen scharf ausgeprägten Jahresgang der Relationen von fühlbarer und latenter Wärme aus. Die Trockenzeit von November bis April hebt sich mit einem hohen Anteil an fühlbarer Wärme markant von der Monsunphase zwischen Mai und September/Oktober mit einem Maximum des Anteils an latenter Wärme im Monat Juli ab.

Die sahelische Klimastation Tessalit (Abb. 1e), im randtropischen Afrika gelegen, hat nur im August einen hohen Anteil an latenter Wärme, wenn diese Klimastation kurzfristig unter den Einfluß der innertropischen Konvergenzzone gerät.

Die in Abb. 2 zusammengestellten sechs Diagramme zeigen den Jahresgang der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme in den subtropischen und gemäßigten Breiten (logarithmischer Maßstab!).

An der subtropischen Sommerregenstation San Luis (Abb. 2a) in Argentinien, an der der Anteil latenter Wärme im Sommer sein Maximum erreicht, wirken die Gänge der thermischen und hygrischen Jahreszeiten gleichsinnig, da die Regen in der warmen Jahreszeit fallen. Dennoch scheint der thermische Jahresgang den entscheidenden Einfluß auf die Ratio von fühlbarer und latenter Wärme auszuüben, da selbst in den winterfeuchten Subtropen der Gang der Ratio dem Gang der thermischen Jahreszeit folgt. Die Klimastationen Madrid und Kairo (Abb. 2b, 2c) weisen dies aus. Obwohl beide Stationen in der Winterregenzone gelegen sind, erreicht im Sommer die latente Wärme ihr Maximum. Im Winter, während der Regenzeit, die im Randwüstenbereich von Kairo nur schwach ausgeprägt ist, liegt der Anteil an fühlbarer Wärme deutlich über den Sommerwerten. Die hohe Feuchtekapazität der wärmeren sommerlichen Luft und die dann gesteigerte Verdunstungskraft wiegen die winterliche Advektion feuchter Luft, die durch die Westwindströmung geliefert wird, auf. Danach korrespondiert der Jahresgang der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme in allen subtropischen Breiten mit dem Gang der thermischen Jahreszeiten. In den Tropen ist er streng an den hygrisch bestimmten Gang der Jahreszeiten gebunden.

In den ganzjährig feuchten Mittelbreiten (vgl. Abb. 2d, Gießen) verhält sich die Gangkurve ähnlich wie in den Subtropen. Auch die Quotienten liegen in der gleichen Größenordnung. Je schärfer der Gang der thermischen Jahreszeiten ausgeprägt ist, um so größer sind die Differenzen sommerlicher und winterlicher Ratiowerte von fühlbarer und latenter Wärme (vgl. Abb. 2e, 2f: Busan, Korea; Omsk, UdSSR). Der Anteil an latenter Wärme ist im Sommer im kühlgemäßigt-kontinentalen Omsk ähnlich dem Anteil von Gießen oder San Luis; im gemäßigt-sommermaritimen südkoreanischen Raum von Busan erreicht er sogar Werte tropischer Breiten. Im Winter zeigt der Anteil an fühlbarer Wärme an

beiden Stationen jedoch extrem hohe Werte. Die latente Wärme wird dann fast voll unterdrückt.

Im extrem winterkalten und sommerwarmen Borealklima von Werchojansk (Abb. 3) ist der Anteil an latenter Wärme im Sommer ähnlich hoch wie in den gemäßigten und in den subtropischen Breiten. Im Winter erweist sich an diesem Kältepol Sibiriens der Anteil an latenter Wärme als extrem gering. Die Luft kann dort im Winter kaum noch Feuchtigkeit, d. h. nur eine sehr geringe Menge an latenter Wärme aufnehmen. Es ist anzunehmen, daß sich mit Annäherung an die Pole die Ratio-Kurven wegen der sehr geringen Sommerwärme stark abflachen.

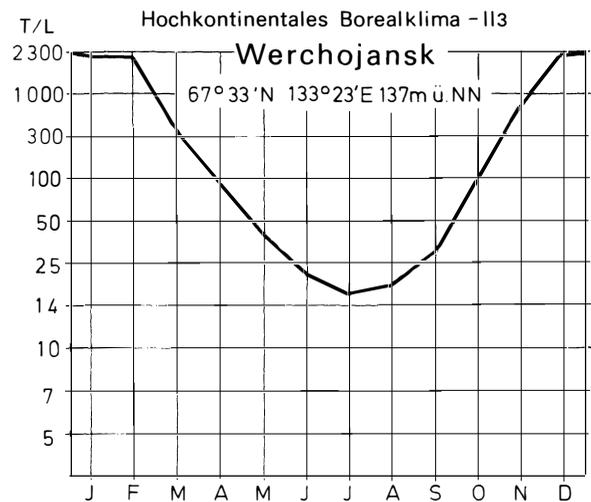


Abb. 3: Diagramm des Jahresganges der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme im sibirischen Borealklima

Mean monthly values of the ratio of sensible and latent heat in boreal latitudes

Schlußbetrachtung

Abgesehen von dem strahlungsbedingten Wärmeniveauabfall zwischen dem Äquator und den Polen zeigen die Karten und Jahresgang-Diagramme des Verhältnisses von fühlbarer und latenter Wärme deutlich die räumliche Wirksamkeit der beiden wesentlichsten Klimatypen der Erde an:

1. Aridität und Humidität in den Tropen
2. Kontinentalität und Ozeanität in den Außertropen

In den Tropen steuern die humiden und ariden Jahreszeiten die Relationen des Wärmehaushaltes, in den Ektropen vorwiegend die thermische Kontinentalität. Die Ratio von fühlbarer und latenter Wärme integriert die inhaltliche Bestimmung der beiden Klimatypen.

Literatur

- ALBRECHT, F.: Untersuchungen des Wärme- und Wasserhaushaltes der südlichen Kontinente. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 99, Offenbach 1965.

- BUDYKO, M. I.: Atlas der Wärmebilanz, Hauptverwaltung des Hydrometeorologischen Dienstes der UdSSR. Leningrad 1955.
- : The heat balance of the Earth. In: GRIBBIN, J. (Hrsg.): Climatic Change. Cambridge, London, New York, Melbourne 1978, S. 65–113.
- FLOHN, H.: Ein russischer Atlas des Wärmehaushaltes der Erdoberfläche. Erdkunde 12, 1958, S. 233–236.
- HANN, J.: Die äquivalente Temperatur als klimatischer Faktor. Meteorologische Zeitschrift 24, 1907, S. 501–504.
- HARE, K. (Hrsg.): Climate and Desertification. Institute for Environmental Studies, University of Toronto. Toronto 1977.
- HENNING, I. und HENNING, D.: Kontinent-Karten der potentiellen Landverdunstung. Meteorologische Rundschau 33, 1980, S. 18–30.
- KNOCHE, W.: Die äquivalente Temperatur, ein einheitlicher Ausdruck der klimatischen Faktoren ‚Lufttemperatur‘ und ‚Luftfeuchtigkeit‘. Meteorologische Zeitschrift 24, 1907, S. 433–444.
- KRÜGER, E.: Die Verteilung der äquivalenten Temperatur auf der Erde und ihre Bedeutung für die Vegetation. Diss. Berlin 1942.
- LAUER, W. und FRANKENBERG, P.: Untersuchungen zur Humidität und Aridität von Afrika. Das Konzept einer potentiellen Landschaftsverdunstung. Bonner Geographische Abhandlungen 66, Bonn 1981.
- LINKE, F.: Das Prött-Theorem. Meteorologische Zeitschrift 39, 1922, S. 267–271.
- : Bedeutung und Berechnung der Äquivalenttemperatur. Meteorologische Zeitschrift 55, 1938, S. 345–350.
- Meteorologisches Taschenbuch. LINKE, F.: (Hrsg.), Bd 4, Leipzig 1939.
- MÜLLER, M.J.; BALTES, K. und WERLE, D. (Mitarbeiter): Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. Forschungsstelle Boden-erosion der Universität Trier, 5. Heft. RICHTER, G. (Hrsg.), Trier 1979.
- RASCHKE, E.: Die Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre. Zeitschrift für Geophysik 38, 1972, S. 967–1000.
- RIJTEMA, P. E.: Transpiration and production of crops in relation to climate and irrigation. Institute for Land and Water Management Research, Bull. 44. Wageningen 1966, S. 45–74.
- TROLL, C.: Karte der Jahreszeitenklimate der Erde. Mit einer farbigen Karte von C. TROLL und KH. PAFFEN, Erdkunde 18, 1964, S. 5–28.

„RIBBON-FOREST“ UND „HECKEN“

Streifenartige Verbreitungsmuster des Baumwuchses an der oberen Waldgrenze in den Rocky Mountains¹⁾

Mit 3 Abbildungen, 12 Photos und 1 Tabelle

FRIEDRICH-KARL HOLTMEIER

Summary: “Ribbon-forest” and “hedges”. Strip-like distribution patterns of trees at the upper timberline in the Rocky Mountains

Within the forest-tundra-ecotone of the Rocky Mountains ribbon-like structures, which can be attributed to the influence of the wind, can be observed locally. The forest strips run either perpendicular or parallel to the prevailing wind direction (West). Those strips which are oriented approximately normally to the prevailing winds seem to be particular to those ranges of the Rocky Mountains which are rich in snow and dominated by strong and permanent winds from the west. These elongated tree-islands are called “ribbons” and the intervening wet and treeless meadows “snow glades”. The “ribbons”, measuring up to some hundred metres in length and formed of trees (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) up to 15 m in height, act as natural snow fences with big snow masses accumulating at their leeward side. Within an area characterized by a more pronounced local relief the distribution of snow must be attributed primarily to the influence of the surface on the windflow just above it, while the effect of the “ribbons” must be considered as a secondary one. The long-lasting snow cover and the resulting ecological consequences are unfavourable to tree-growth and thus keep the “glades” (up to 50 m wide) treeless. The “ribbon-forest” occur most frequently on gently sloping surfaces, more or less on the contour, whereas on steep slopes it is less extensive.

The forest-strips running parallel to the prevailing winds are called “hedges” (measuring up to some ten metres in length). In contrast to the “ribbons” they are common at wind-exposed sites

at both the alpine timberline of other high mountains and the polar forest limit. They are caused by the direct physiological and mechanical influences of the winds, which hamper tree-growth on the windward side. Thus the trees are strongly wind-shaped. By layering the trees spread leeward and form the “hedges”. The narrow wind-channels between the “hedges” are characterized by a lack of snow during winter rather than a great accumulation as in the case of “snow glades”. The great abundance of “hedges” in the Rocky Mountains must be attributed to the permanent influence of westerly winds and to a pronounced ability of the tree-species (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*, *Larix lyallii*) to regenerate and spread by layering. In the Rocky Mountains one also finds “ribbons” formed of close-standing wind-shaped “hedges” at sites which are characterized by a marked micro-relief.

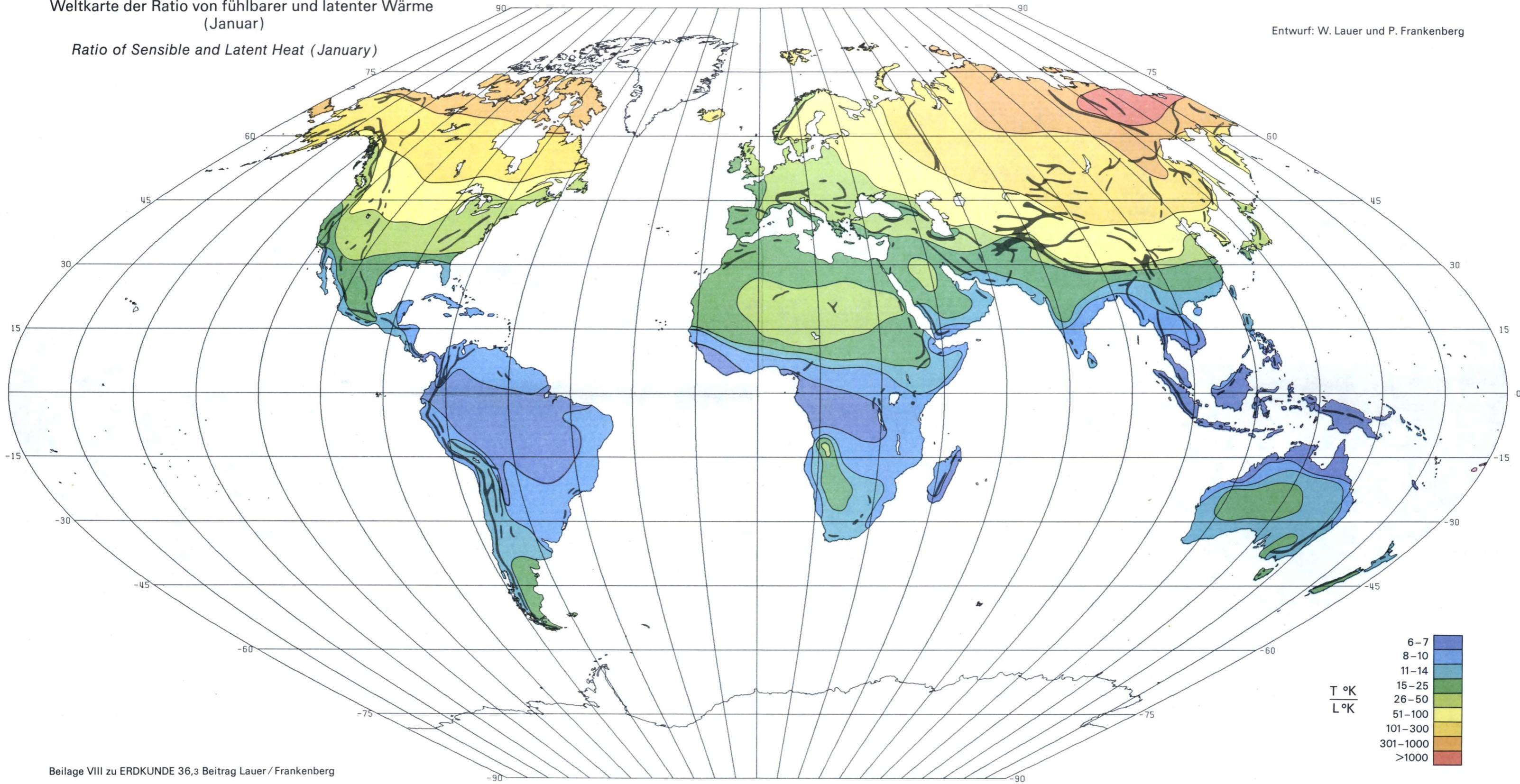
The “ribbon-forest”, as well as the “hedges”, should be regarded as typical features of the climax stage of the development of the plant cover at wind-exposed sites near the upper timberline.

¹⁾ Die diesen Ausführungen zugrundeliegenden Feldstudien in den Rocky Mountains wurden vom Verfasser während mehrerer Geländeaufenthalte durchgeführt, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit Reisebeihilfen unterstützt wurden. Dafür sei auch an dieser Stelle gedankt.

Weltkarte der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme
(Januar)

Entwurf: W. Lauer und P. Frankenberg

Ratio of Sensible and Latent Heat (January)



Weltkarte der Ratio von fühlbarer und latenter Wärme
(Juli)

Ratio of Sensible and Latent Heat (July)

Entwurf: W. Lauer und P. Frankenberg

