

DIE BEDEUTUNG VON ENERGIESTRÖMEN FÜR DAS KLIMA UND DIE AGRARISCHEN STANDORTBEDINGUNGEN

Mit 5 Abbildungen und 4 Tabellen

JOSEF VAN EIMERN

Summary: The significance of energy flows for climate and for its application to considerations of location

Macro-, meso-, and microclimates are shaped through climatic factors of varying type and scale. Climatic factors are understood as the constant physical characteristics of a location, which determine and modify the various forms of energy exchange such as radiation, evapotranspiration and mass exchange. The importance of energy flows, particularly radiation, for climate and therefore for locational assessment, is demonstrated by examples from agroclimatology. Thus, in addition to temperature, radiation conditions are decisive for areas of seed-maize cultivation. The dependence of seed-maize ripeness level on temperature, insolation duration and saturation deficit is demonstrated. On the basis of the May-September values of these indices, which are presented on a partly-mapped basis for the Federal Republic, a map of cultivation zones has been prepared. South Germany's favouring in radiation terms is shown by 8-year mean values for global radiation. Radiation and evapotranspiration are also very important for hay and silage yields. Hop growing areas are also only found in those areas of Germany rich in radiation. In conclusion, a report is given on the influence of landforms on the components of the heat balance equation and the importance of air-exchange for the distribution of diurnal maximum and minimum temperatures in the uplands and the Mittelgebirge explained.

1. Klima und Klimafaktoren

Unter Klima sei in Anlehnung an K. SCHNEIDER-CARIUS (1961) und an J. BLÜTHGEN (1964) die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung aller erdnahen und die Erdoberfläche einschließlich des Bodens und seiner Pflanzendecken beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge in einer für die betreffende Lokalität charakteristischen Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte verstanden.

Wenn in der eben genannten Definition das Wort „Zustand“ der Atmosphäre vorkam, wenn Klimabeschreibungen oft auch „Zustände“ schildern, so muß man sich bewußt bleiben, daß sich die Zustände in der Atmosphäre an sich laufend ändern. Zum Klima eines bestimmten Ortes, auch einer Geländelage oder eines Ökotores gehört nun, daß sich die einzelnen, jedoch vorübergehenden Zustände mehr oder weniger oft wiederholen, daß bevorzugte Vorgänge häufig wiederkehren, welche zu diesen Zuständen führen.

Was ist nun eigentlich die Ursache dessen, daß hier ein anderes Klima herrscht als dort, und daß wir Bereiche wie Makro-, Meso- und Mikroklima unterscheiden. Die von K. KNOCH im Jahre 1930 gemachte Feststellung: „Die Klimaelemente unterliegen dem

Einfluß klimatischer Faktoren“ wird auch heute noch anerkannt. Man sagt auch: Das Klima wird von seinen Faktoren wie geographische Breite, Seehöhe, Lage zu den Land- und Wasserflächen und zu den großen Aktionszentren gestaltet. Solche Klimafaktoren sind aber auch die Richtung, Neigung und Höhererstreckung eines Hanges, das Vorkommen bestimmter Vegetationsdecken wie z. B. ausgedehnte Grünlandflächen, große Wälder und Siedlungen oder die einzelnen Bodenarten. Hier profitiert die Klimatologie zunächst auch von der Geographie, welche auf Karten der verschiedenen Maßstäbe die Verbreitung und Anordnung der einzelnen Faktoren zur Verfügung stellt. Solche Faktoren gibt es nun eben in allen Größenordnungen, angefangen von den Ozeanen und Kontinenten und letztlich aufhörend bei der Verteilung der mehr oder weniger großen Krümel und Schollen auf einem Acker. Eine Unterteilung in Makro-, Meso- und Mikroklima mit allen Zwischenstufen und Übergängen basiert also letztlich auf diesen einzelnen Faktoren und deren Größenordnung. Trotz aller möglichen Größenstufen der Klimabereiche hat deren Einteilung in bestimmte Größenklassen letztlich den Zweck, mit adäquaten Untersuchungsmethoden unsere Kenntniserweiterung über die Wirkungsweise der Klimafaktoren und deren Anwendung in der Praxis zu ermöglichen und zu erleichtern.

Was sind nun aber eigentlich Klimafaktoren? Eine befriedigende Definition konnte ich nicht finden. Um das zu beantworten, müssen wir wissen, was denn wirklich geschieht. Denn in der Atmosphäre herrschen ein dauerndes Geschehen und keine bleibenden Zustände. Das eigentliche Geschehen in der Atmosphäre, aber auch in der Lithosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre sind vom physikalischen Standpunkt aus Energieprozesse. Ohne Unterbrechung findet immer und überall ein gewaltiger Energieaustausch statt. Die Wege, auf denen die Energie ausgetauscht wird, sind mannigfaltig. In der Atmosphäre sind es u. a. die Strahlungen verschiedener Wellenlängen, die Wärmeleitung, der Massenaustausch mit seinen fühlbaren und latenten Wärmeströmen (Wasser- bzw. Wasserdampftransport und Aggregatzustandsänderungen), um nur die wichtigsten zu nennen. Die Klimafaktoren sind nun die physikalischen Gegebenheiten eines Standortes, welche diesen Energieaustausch nach Größe und Richtung bestimmen und laufend abwandeln, welche den gesamten Energiefluß auf die einzelnen genannten Arten der Energieströme in verschiedener und zeitlich veränderlicher Weise, jedoch in einer für den betreffenden Standort typischen Häufigkeitsverteilung

lung aufteilen. Dabei können auch größere Klimateinheiten (z. B. Aktionszentren) selbst als Faktoren für kleinere auftreten. Der großräumige atmosphärische Luftaustausch wirkt auf benachbarte, insbesondere auf kleinere Einheiten. Nicht zu Unrecht hat K. SCHNEIDER-CARIUS 1961 geschrieben: „Der Energieumsatz an der Erdoberfläche schafft die physikalischen Voraussetzungen für die einzelnen Klimateypen.“ Auch das Geländeklima (hier als Topoklima verstanden, zu dessen kartenmäßiger Darstellung Karten topographischen Maßstabes adäquat sind) kann letztlich nur dann verstanden werden, wenn man die Energieströme kennt und versteht, wenn man weiß, wie groß die einzelnen zueinander sind und wie sie von den einzelnen Faktoren beeinflusst werden.

2. Agrarklimatologische Beispiele für die Bedeutung der Energieströme, insbesondere der Strahlung

a) Grünlandwirtschaft

Es ist daher verständlich, daß in der modernen Meteorologie und Klimatologie den Energiebetrachtungen heute immer mehr Raum gewidmet wird. Erinnert sei nur an die Wandkarten von R. GEIGER (1963) zum Klima der Erde, welche die Globalstrahlung, den latenten Wärmestrom der Verdunstung und den von der Meeresoberfläche in die Tiefe fließenden Wärmestrom (bzw. den der umgekehrten Richtung) beschreiben. Die Energieströme beeinflussen nun nicht nur die anderen Klimatelemente wie die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit u. a., sondern haben selbst auch ihre Bedeutung für die Auswirkungen des Klimas. Im folgenden seien nun einige Beispiele genannt, an denen die Bedeutung der Energieströme im Groß- wie im Geländeklimabereich und deren Beeinflussung gezeigt wird. Es seien aber auch Beispiele für die Bedeutung der Energieströme selbst in der angewandten Klimatologie gezeigt.

Vor nicht allzu langer Zeit entstand das große Kartenwerk von H. WALTER und H. LIETH (1960–1967), in dem zur Beschreibung des Klimas, insbesondere des Grades und Jahrganges der Humidität bzw. Aridität Jahrgang und -menge (bzw. -mittel) von Niederschlag und Temperatur verwendet werden. Alle anderen Klimatelemente treten zurück oder werden ganz vernachlässigt, obwohl die Prozesse der Transpiration, Assimilation und Respiration auch Energieprozesse sind. Diese Karten werden gerade für die Verbreitung von Pflanzengesellschaften verwendet. Zwei Beispiele aus der angewandten Agrarklimatologie mögen zeigen, daß derartige Darstellungen unzureichend sind.

Der Alpennordrand und sein Vorland werden von einem ausgedehnten Grünlandgürtel eingenommen. Ein solcher Gürtel kommt auch in den Marschen der Nordseeküste vor. Ein Hauptgrund für das Grünland im Alpenvorland ist die Tatsache, daß bei den dort hohen Niederschlägen das Getreide kaum trocken ge-

erntet werden kann, während in Norddeutschland zusätzlich noch die Wasserversorgung vom hohen Grundwasserstand her eine erhebliche Rolle spielt. Wie lassen sich nun aber die Tatsachen erklären, daß im Allgäu die gleiche Pflanzenmasse bei rund dem halben Düngeraufwand zu erzielen ist wie auf norddeutschen Weiden, und daß das geschnittene Gras in Trockenperioden in Südbayern oft nach zwei Tagen als trockenes Heu eingefahren werden kann, wozu in Nordwestdeutschland in der Regel die zwei- bis dreifache Zeit notwendig ist?

b) Körnermaisbau

Warum wird im Raume München die Witterung des Hochsommers insgesamt nicht als nasser denn in Westdeutschland empfunden, obwohl die Regenhöhen im Sommer in Südbayern merklich höher sind als in Westdeutschland? Warum konnte sich in den letzten 10 Jahren der Körnermaisbau in Südbayern, etwa zwischen München und der Donau, so stark ausdehnen, während der gleiche Mais in gleich warmen Zonen im Westen Deutschlands nicht regelmäßig mähdruschreif wird? Mit den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen ist dieses alles nicht zu erklären. Die Ursache liegt in dem Unterschied zweier Energieströme. Durch erheblich günstigere Strahlungsverhältnisse in Süddeutschland werden ganz andere Verdunstungsverhältnisse geschaffen, was für die Reife wesentlich ist. Denn der Verdunstungsvorgang ist hier als Energieprozeß aufzufassen. Bei gleichen Temperaturen in der Wetterhütte werden sich auch andere Mikroklimata in gleichen Beständen einstellen, wenn die Strahlungsverhältnisse sich unterscheiden.

Die Behauptungen seien zunächst durch einige Tatsachen bewiesen. F. LIESEGANG (1965) hat, um die vom Klima her möglichen Anbauzonen für Körnermais in der Bundesrepublik darzustellen, die in mehreren Jahren an zahlreichen Orten durchgeführten Messungen des Wassergehaltes in den Maiskörnern bei der Ernte mit Klimadaten verglichen. Körnermais gilt als mähdruschreif, wenn der Wassergehalt unter etwa 36 % bzw. 42 % liegt. Die Abb. 1 zeigt, daß der Wassergehalt bei geringerer Mai-September-Temperatur doch auf Werte unter 36 % bzw. 42 % absinken kann, wenn nur die Sonnenscheindauer entsprechend größer ist. Die Sonnenscheindauer ist hier aber nur ein grobes Maß für die Intensität der Globalstrahlung. Eine ähnliche Beziehung fand LIESEGANG, wenn er Lufttemperatur und mittleres Sättigungsdefizit der Luftfeuchte (um 14 Uhr) sowohl für die Monate Mai-September als auch August-September gegenüberstellt.

Auf Grund dieser Feststellung wurde neben einer Temperaturkarte Mai-September auch eine Karte des Sättigungsdefizites von 14 Uhr und der Sonnenscheindauer der Zeitspannen Mai-September und August-September gezeichnet. Die Karten der Sonnenscheindauer und des Sättigungsdefizites seien hier wieder-

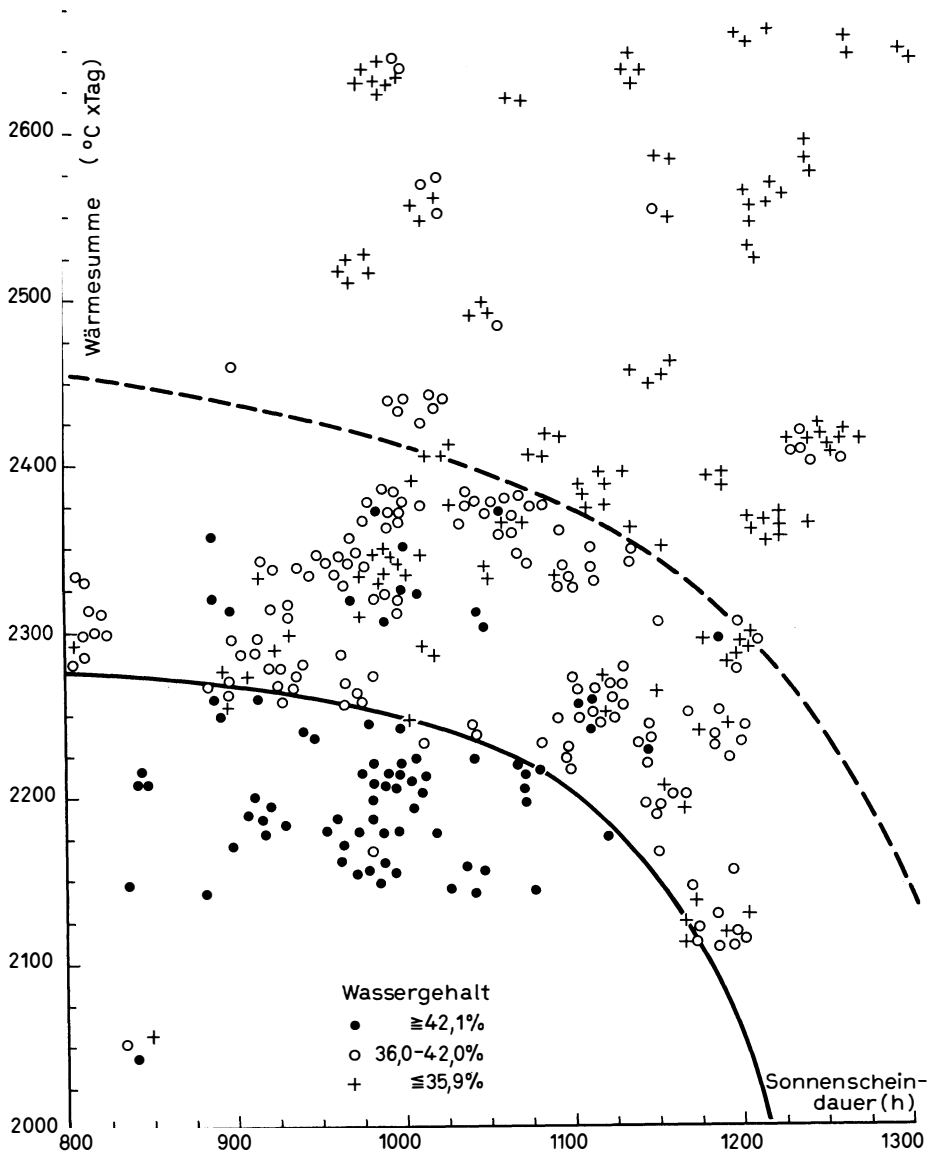


Abb. 1: Wassergehalt im Korn mittelfrüher Maissorten bei der Ernte in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer und Wärmesumme (Lufttemperatur) Mai bis September (nach F. LIESEGANG, 1965)

gegeben. In Einzelheiten ist die hier wiedergegebene Karte der Sonnenscheindauer wegen der Ungenauigkeit der Sonnenscheinautographen sicherlich noch sehr verbesserungsbedürftig. An der Tatsache des wesentlich größeren Strahlungsgenusses in Süddeutschland gegenüber Nord- und Westdeutschland ist jedoch nicht zu zweifeln. Das gilt besonders für die Monate August und September. Wenn der Reifevorgang von Mais auch ein physiologischer ist, so ist dieser auch durch die Wassergehaltsabnahme der Körner, d. h. durch die Verdunstung, erheblich mitbestimmt. Die Energie zur Verdunstung stammt aber in erheblichem Umfang aus der Strahlung. Ohne Berücksichtigung der Strahlung kann letztlich die Verdunstung und damit der

Grad der Humidität eines Klimas nicht ganz verstanden werden. Der Vollständigkeit halber sei auch noch die von LIESEGANG auf Grund der Beziehungen zwischen dem Wassergehalt der Maiskörner bei der Ernte und den meteorologischen Parametern: Lufttemperatur, Sättigungsdefizit der Luftfeuchte um 14 Uhr und Sonnenscheindauer (Mai-September und August bis September) entworfenen Karte der möglichen Maisanbauzonen wiedergegeben. Diese Karte sagt nur aus, wo der Körnermais regelmäßig reif wird, sie sagt jedoch nichts über die Höhe des Ertrages und damit über die Eignung des Standortes für den Maisanbau aus, da dieses auch von der Wasserversorgung abhängt.

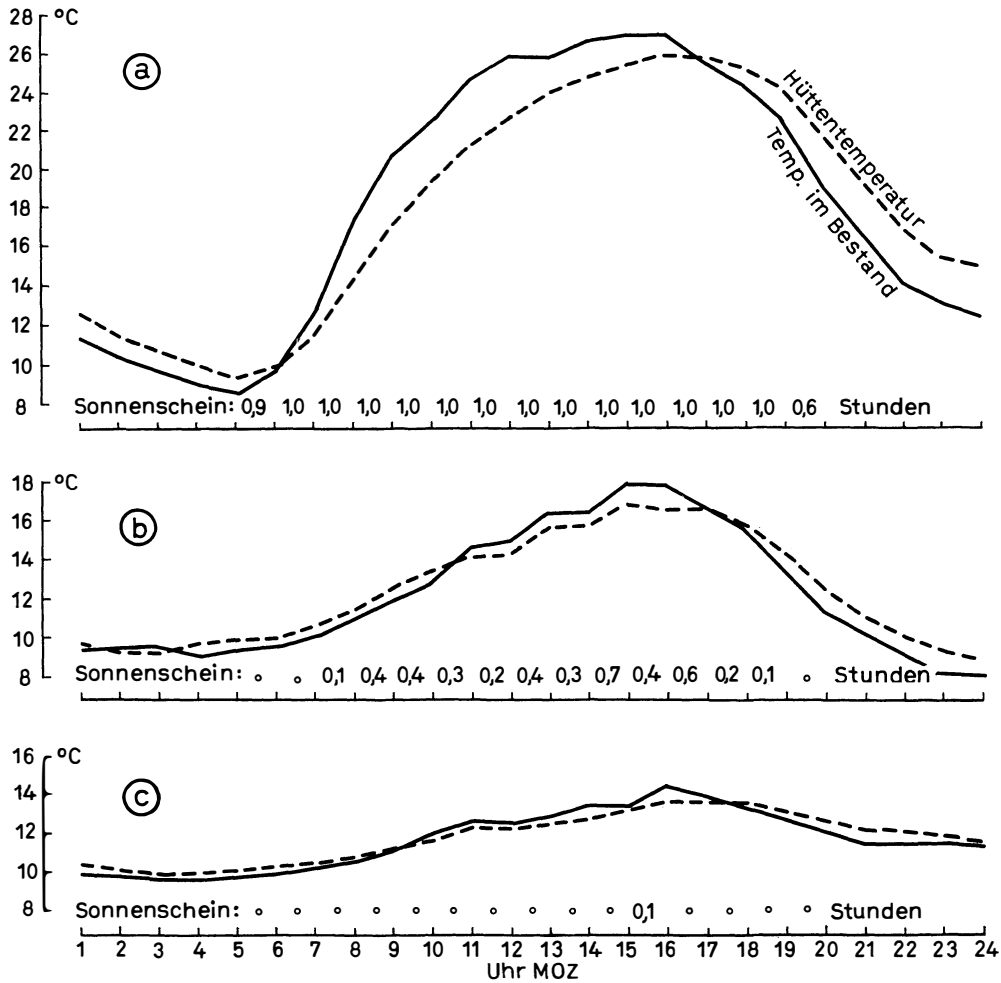


Abb. 2: Lufttemperatur in der Wetterhütte und in einem benachbarten Maisbestand an niederschlagsfreien Tagen bei verschiedener Sonnenscheindauer (nach F. LIESEGANG, 1965)

- a) 26. 7. 1961, Strahlungstag, Sonnenscheindauer 13,5 Stunden, Meßhöhe 100 cm (Kolbenhöhe), Bestandshöhe 145 cm;
- b) 18. 8. 1961, Sonnenscheindauer 4,1 Stunden, Meßhöhe 100 cm (Kolbenhöhe), Bestandshöhe 190 cm;
- c) 9. 9. 1961, bedeckter Tag, Sonnenscheindauer 0,1 Stunden, Meßhöhe 100 cm (Kolbenhöhe), Bestandshöhe 195 cm

In den letzten drei Jahren hat sich diese Karte vielfach bestätigt. Wo jedoch in Nordwestdeutschland der Mais wegen geringerer Spätfrostgefährdung etwa 14 Tage früher gesät werden kann und wo ein leichter Boden sich rascher erwärmt, war auch eine Maisreife in anderen Gebieten zu erzielen als auf der Karte angezeigt war, welche vornehmlich für sandigen Lehm und Lehm Böden gilt.

Daß der Süden Deutschlands hinsichtlich der Strahlungsverhältnisse gegenüber dem Norden und sogar gegenüber manchen Weinbaugebieten (für ebene Flächen) bevorzugt ist, mag auch durch die Tabelle 1 belegt werden.

Die Bevorzugung des Südens ist im Frühsommer am geringsten. In Absolutwerten sind die Unterschiede vom Hochsommer bis zum Frühherbst am größten. Sie sind auch verhältnismäßig groß im Februar bis

April. Relativ (in %) ergeben sich allerdings die größten Unterschiede im Winter. Wenn ein achtjähriges Mittel auch noch nicht allzu repräsentativ ist, so ist doch die Bevorzugung des Südens in der Zeit der Reife vieler Feldfrüchte zu erkennen. Die Bedeutung der Strahlung ist im Wetterdienst voll erkannt. Neben einem z. Z. zwar noch lückigen Meßnetz zur Messung der Globalstrahlung wird daher im agrarmeteorologischen Dienst des Deutschen Wetterdienstes auch ein Meßnetz zur Messung der Strahlungsbilanz (Net-radiation) aufgebaut.

Die angewandte Klimatologie kommt also großräumig zur Beschreibung des Klimas ohne die Betrachtung der Energieströme, insbesondere der Strahlung und der Evapotranspiration nicht mehr aus. Was hier zum Großklima gesagt wurde, gilt aber auch für das Geländeklima, dessen Unterschiede ja vor allem durch

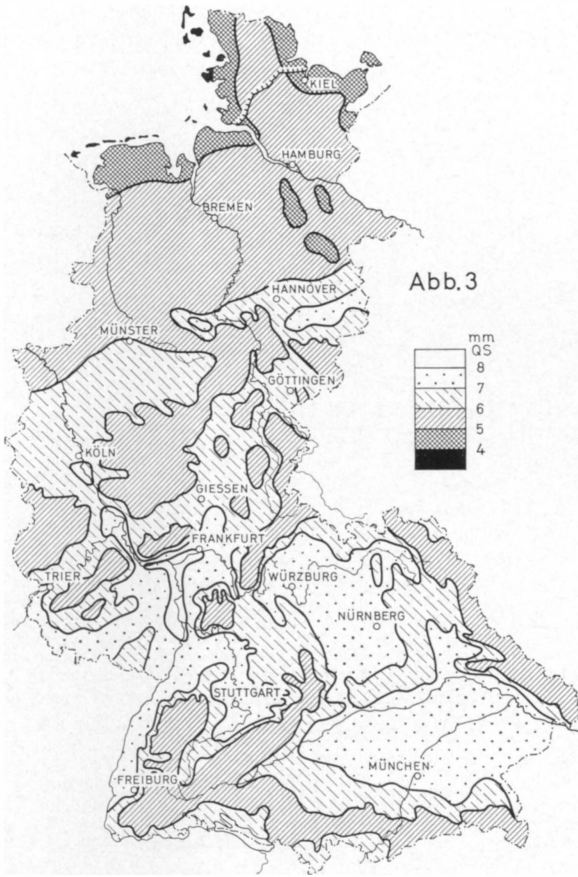


Abb. 3

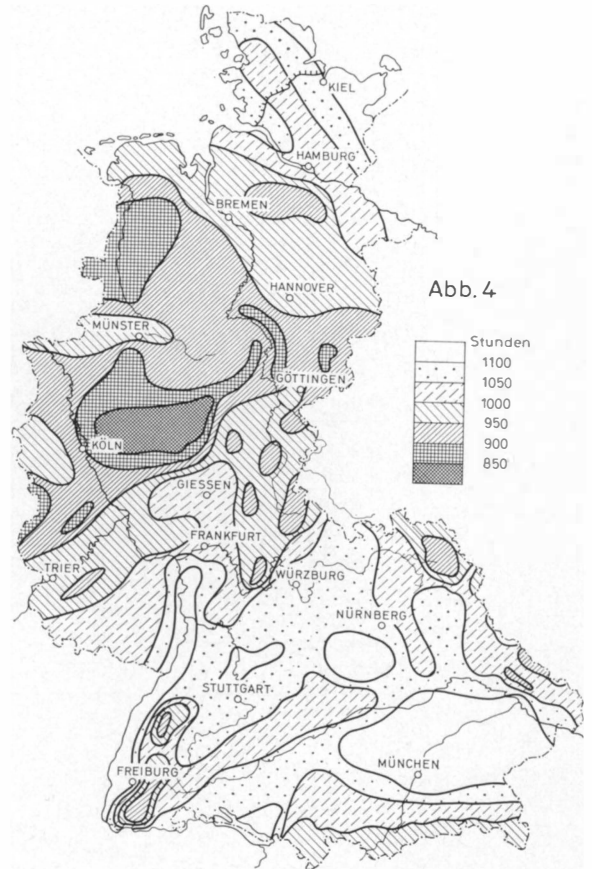


Abb. 4

Abb. 3: Mittleres angenähertes Sättigungsdefizit um 14 Uhr MOZ, August–September. Mittel 1881–1930

Abb. 4: Mittlere Sonnenscheindauer Mai–September, nach Unterlagen von BROSE/SCHIRMER in F. LIESEGANG, 1965. Mittel 1949–1958

Tabelle 1: Mittlere Tagessummen der Globalstrahlung (1960–1967)¹⁾

Ort	Höhe ²⁾ (m)	Monat												Jahres-Ø
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
a) in cal/cm ² Tag														
Hamburg-Fu.	22	47	103	181	288	378	447	378	319	243	130	61	36	218
Braunschweig-V.	97	54	109	191	282	376	439	378	326	246	142	62	42	221
Würzburg-St.	263	74	138	216	322	413	465	436	374	282	168	81	57	252
Weihenstephan	499	96	155	234	322	403	465	462	380	304	196	94	73	266
H.-Peißenberg	1007	127	187	276	356	414	485	485	420	345	233	128	99	296
b) in % der Tagessumme von Weihenstephan														
Hamburg		49	67	77	87	94	96	84	84	80	66	65	49	82
Braunschweig		56	70	82	85	93	95	84	86	81	73	66	58	83
Würzburg		77	89	92	97	102	100	94	98	93	86	86	78	95
H.-Peißenberg		133	121	118	107	103	104	105	110	114	119	136	136	111
c) Differenz: Weihenstephan—Hamburg in cal/cm ² Tag														
		49	52	53	44	25	18	84	61	61	56	33	37	48

¹⁾ Nach dem „Deutschen Meteorologischen Jahrbuch“, 1960–1964, und den „Monatlichen Witterungsberichten des Deutschen Wetterdienstes“, 1965–1967.

²⁾ Höhe des Instrumentes über NN.

Fu. = Fuhlsbüttel, V. = Völkenrode, St. = Stein.

unterschiedliche Energieströme verursacht werden. Als Agrarmeteorologe sieht man das Geländeklima vor allem unter folgenden Gesichtspunkten: In welchen Geländelagen sind Schäden an Boden und Pflanze

durch die Witterung zu befürchten? und: Ermöglicht eine Geländelage den Anbau einer bestimmten Pflanzenart, so daß regelmäßig ein hoher Ertrag bei hoher Qualität zu erzielen ist?

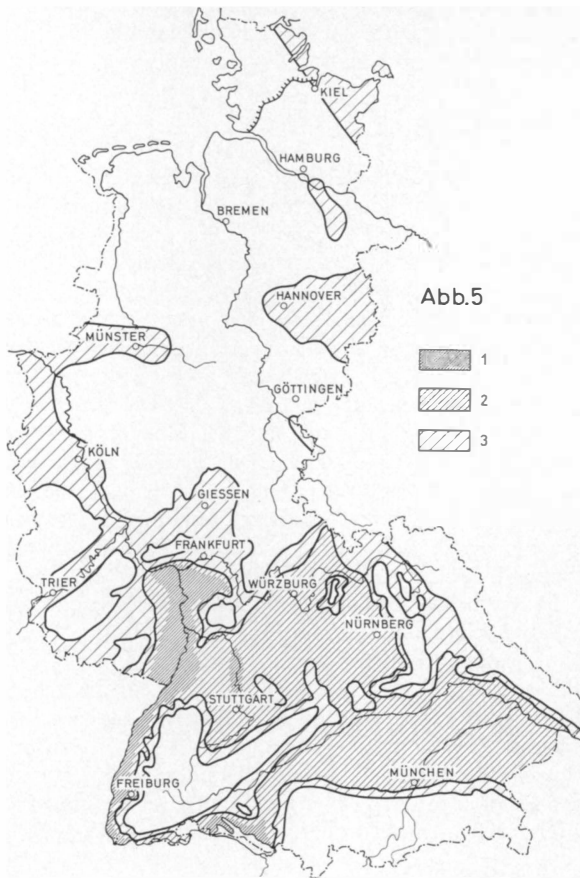


Abb. 5: Körnermais-Anbauzonen in Westdeutschland, in denen eine regelmäßige Reife zu erwarten ist (nach F. LIESEGANG, 1965)

- 1 mögliche Anbauggebiete mittelspäter Hybridmaissorten;
- 2 mögliche Anbauggebiete mittelfrüher Hybridmaissorten;
- 3 Anbauggebiete für z. Z. noch in Prüfung stehende frühe Hybridmaissorten

c) Mähweidenertrag

Es ist nichts Neues, daß die Feldfrüchte in einem feuchten Jahr auf den wärmeren Süd- und Westhängen besser gedeihen als auf den kühleren Nord- und Osthängen, da die ersteren immer noch etwas besser abtrocknen. Umgekehrt ist es in Dürre Jahren. Dann kann auf den wärmeren Hängen alles verdorrt sein, während die kühleren Nordhänge noch begrünt sind. Eine Klimabetrachtung muß aber beides und auch noch die vielen anderen, mehr oder weniger normalen Jahre mit berücksichtigen. Dann stellt sich aber heraus, daß je nach dem Witterungsverlauf ganz verschiedene Klimatelemente für die Ertragsunterschiede verantwortlich werden. Dadurch wird die Beurteilung der Eignung von Geländelagen erschwert. Das Geländeklima wird oft nur nach kurzen Meßreihen beurteilt, obwohl zum Klima viele Jahre notwendig sind. Es sei davor gewarnt, immer gleich nach kurzfristigen Messungen schon von Klima zu sprechen, wenn auch zugestanden werden muß, daß geländeklimatische Aufnahmen nur selten jahrelang durchgeführt werden können. An einem Beispiel sei gezeigt, daß für den Ertrag von Pflanzenbeständen je nach der Jahreswitterung verschiedene Witterungselemente entscheidend werden und daß auch hier die Energieströme eine Rolle spielen.

Im Rahmen einer Dissertation wurde von E. PAHL (1968) das Wachstum von Mähweiden in Abhängigkeit von der Witterung untersucht. Dabei wurden u. a. auf dem Weihenstephaner Staatsgut Dürnast drei größere Weideparzellen abgesteckt, deren Zuwachs alle drei Wochen durch Schnitt und Wägung vom Beginn bis zum Ende der Vegetationszeit bestimmt wurde. Zu Anfang jeder Woche wurde eine der drei Parzellen geschnitten. Ein Ergebnis ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen Zuwachs von Gras mit N-Düngung und Klimatelementen in Weihenstephan-Dürnast

Jahr	n	N	BF	G	T _{min}	T _{max}	T _{min}	BT ₂₀	w. E.	p. E.	(E-e) ₁₄
1964	22	0,48	0,92	0,31	-0,40	-0,53	-0,34	-0,63	-0,67	0,16	-0,57
1965	22	0,14	0,20	0,10	-0,26	-0,33	-0,25	-0,37	-0,02	-0,02	-0,29
1966	25	0,25	0,60	0,10	-0,31	-0,36	-0,28	-0,38	0,05	0,05	-0,08
1967	25	0,06	0,28	0,54	0,09	-0,04	0,07	-0,02	0,53	0,47	0,07
1964-1966	69	0,32	0,60	0,18	-0,31	-0,37	-0,29	-0,45	0,39	0,07	-0,32
Grüenschwaige											
1967	25	0,13	-	0,71	0,34	0,26	0,26	-	-	0,66	0,44

Halbfette Ziffern = gesichert mit p = 1%, kursive Ziffern = gesichert mit p = 5%.

N = Niederschlag, BF = Bodenfeuchte 0-20 cm Tiefe, G = Globalstrahlung, T = Lufttemperatur, BT₂₀ = Bodentemperatur in 20 cm Tiefe, w.E. bzw. p.E. = wirkliche bzw. potentielle Evapotranspiration, (E-e)₁₄ = Sättigungsdefizit der Luftfeuchte, 14 Uhr.

Im Jahre 1964 mit einem trockenen Hochsommer wurde das Wachstum eindeutig von der Bodenfeuchte in 0–20 cm Tiefe und der wirklichen Evapotranspiration bestimmt, einen deutlichen Einfluß hatte auch noch der Niederschlag. Globalstrahlung und Mitteltemperatur für sich waren anscheinend ohne Bedeutung.

Im Jahre 1965 war überhaupt keine Korrelation zu irgendeinem Klimaelement festzustellen. 1966 bestand nur eine signifikante Beziehung zur Bodenfeuchte, 1967 dagegen wird das Wachstum von der Strahlung, von der wirklichen und auch von der potentiellen Evapotranspiration, also von zwei Energieströmen, bestimmt.

Warum sind nun in den einzelnen Jahren verschiedene Klimaelemente für die Ertragsunterschiede verantwortlich und welche Klimaelemente sind daher bei der klimatologischen Bewertung eines Standortes als maßgebend für dessen Gunst oder Ungunst zum Anbau einer bestimmten Feldfrucht anzusehen. Dabei sei in diesem Zusammenhang zunächst davon abgesehen, daß zwischen manchen klimatologischen Elementen eine Interkorrelation besteht. Im Jahre 1964, welches durch einen trockenen und warmen Sommer gekennzeichnet war, schwankte die Bodenfeuchte von 100 % bis herab zu 35 % der nutzbaren Kapazität. Der Boden war von Ende Juli bis Ende August stark ausgetrocknet. Gleichzeitig wurde damit die wirkliche Evapotranspiration erheblich eingeschränkt. Der hohe Strahlungsgenuß konnte gar nicht ausgenutzt werden. Die negative Korrelation zur Tageshöchsttemperatur ist auf eine negative Interkorrelation von Bodenfeuchte und Tageshöchsttemperatur zurückzuführen. Im nassen Jahr 1965 lag die Bodenfeuchte fast während der gesamten Vegetationszeit über oder nahe der Feldkapazität. Das Wachstum litt insgesamt unter Bodenluftmangel. Da keine großen Bodenfeuchteunterschiede auftraten, gab es auch keine Korrelation zu ihr. Im Jahre 1966 sank die Bodenfeuchte im Juni auf 50 mm und im September–Oktober auf etwa 40 mm unter der Feldkapazität, lag sonst aber nahe der Feldkapazität, im Juli–August sogar längere Zeit über der Feldkapazität. Die Korrelation zur Bodenfeuchte ist also wieder eindeutig, allerdings nicht zur Evapotranspiration. Im Jahre 1967 waren die Niederschläge zwar nicht allzu hoch, sie waren aber so gut verteilt, daß die Bodenfeuchte nur zwischen den Werten der Feldkapazität und etwa 50 mm darunter schwankte. Es bestand also laufend eine gute Bodenwasserversorgung ohne Bodenvernässung. Nun treten eindeutig die Strahlung und die Evapotranspiration als entscheidende Faktoren für die Wachstumsunterschiede auf. In Grünschwaipe aber, wo der hohe Grundwasserstand fast immer für eine ausreichende Wasserversorgung sorgt, wird die potentielle Evapotranspiration, d. h. das Energieangebot zur Verdunstung bestimmend.

Die Witterung wirkt also sehr komplex auf das

Wachstum. Das geschieht aber auch auf verschiedenen Geländestandorten. Bei dieser Bewertung müßten wir demnach wohl alle genannten Klimaelemente heranziehen. Die Bedingungen eines einzelnen Jahres werden es aber wohl nur in Ausnahmefällen gestatten, den für viele Jahre gültigen Klimaunterschied zwischen verschiedenen Standorten zu ermitteln.

d) H o p f e n b a u

Eine andere Standortfrage mag zeigen, daß es gerade wegen des Jahresverlaufes des Strahlungsunterschiedes auch auf die Lage der eigentlichen Wachstumszeit einer Pflanzenart innerhalb der gesamten Vegetationszeit ankommt. Daß für den Wein bestimmte Geländelagen bevorzugt werden, ist allbekannt. Für eine andere Sonderkultur, nämlich den Hopfen, finden wir dieses jedoch nicht bestätigt. Im Hopfenanbaugebiet der Hallertau im bayerischen tertiären Hügelland fällt auf, daß die Hopfengärten an Südhängen wie an Nordhängen, in Talmulden wie auf Berg Rücken anzutreffen sind. Nur die nach Westen gerichteten Steilhänge der asymmetrischen Täler sind die einzigen Standorte ohne Hopfen, was aber wohl nur arbeitstechnische Gründe hat.

Es ist bekannt, daß die Bildung des Bitterstoffhaltigen Humulon des Hopfens in erheblichem Maße von der kurzwelligen Sonnen- und Himmelstrahlung abhängt. Die der Sonne am Rande und an der Oberfläche eines Hopfengartens ausgesetzten Dolden haben einen höheren Bitterstoffgehalt als die im Innern des Gartens hängenden Dolden. Trotzdem pflanzt man den Hopfen nicht nur wie den Wein an die sonnigeren Südhänge, wofür es wohl zwei klimatologische Gründe gibt.

Außer in der Hallertau gibt es noch die Hopfenanbaugebiete bei Spalt in Mittelfranken, bei Tettngang nahe dem Bodensee und einige kleinere bei Heidelberg, Bergzabern und Hersbruck. Aus der eingangs gezeigten Karte der Sonnenscheindauer Mai–September läßt sich feststellen, daß die Hopfenanbaugebiete sich nur in den sehr sonnenscheinreichen Gegenden Deutschlands befinden, die gleichzeitig auch im Sommer recht hohe Temperaturen aufzuweisen haben. Das gilt auch für den Hopfenbau in anderen Ländern (Kent, Böhmen). Das Bedürfnis an Strahlung wird also schon durch diese Tatsache wohl gedeckt. Daß das Strahlungsklima allerdings die einzige Ursache für die Standortwahl des Hopfens sei, ist allerdings nicht anzunehmen. Nun besteht aber noch ein weiterer Grund, warum man nicht unbedingt mit dem Hopfen auf die Südhänge zu gehen braucht. Die Wachstumszeit des Hopfens reicht von Ende April bis etwa zum 20.–25. August. Ab Anfang Juli hat der Hopfen seine endgültige Höhe erreicht und die Doldenbildung setzt ein. Für die Qualitätsausbildung des Weines dagegen ist aber vor allem der Strahlungsgenuß von Mitte August bis etwa Mitte Oktober maßgebend.

Tabelle 3: Besonnung in kcal/cm² der Ebene sowie von einem Süd- und einem Nordhang von 10° Neigung in 50° n. Br. nach A. MORGEN (1957)

	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Dez.	Jahr
Ebene	8,8	13,4	17,6	18,6	18,8	15,6	10,8	2,0	122,4
S	11,2	15,2	19,0	19,5	19,8	17,3	12,9	3,5	142,4
N	7,1	11,8	16,2	17,8	17,9	14,2	9,2	0,7	105,1
S-N	4,1	3,4	2,8	1,7	1,9	3,1	3,7	2,8	37,3
S-N in % v. Ebene	47	25	16	9	10	20	34	140	30

Die Hangklimaunterschiede machen sich um diese Zeit jedoch wesentlich stärker bemerkbar als im Juli. Die Strahlungsunterschiede der landwirtschaftlich genutzten Hänge werden im Juni und Dezember meist überschätzt, im März und September vielfach unterschätzt.

Wenn man bedenkt, daß die Hänge etwa gleichviel Himmelsstrahlung erhalten, und daß die wirkliche Sonnenscheindauer im Sommer nur etwa die Hälfte der astronomisch möglichen ist, so werden die Unterschiede gerade im Juni-Juli zwischen den Hängen noch erheblich geringer. Nach F. SAUBERER und O. HÄRTEL (1959) beträgt für niedrigere Lagen in 50° Breite der Anteil der Himmelsstrahlung an der Globalstrahlung im Sommer 51 % und im Herbst 52 %. Legt man dieses zugrunde, so muß ein Südhang von 10° Neigung im Juni im Mittel nur etwa 4-5 %, im September aber um 17-18 % mehr Globalstrahlung erhalten als ein Nordhang gleicher Neigung.

Die Unterschiede im Strahlungsgenuß der landwirtschaftlich genutzten Hänge sind im Sommer somit merklich geringer als die innerhalb Deutschlands an verschiedenen Orten gemessenen Werte der Globalstrahlung ebener Flächen.

3. Energieströme und Geländeklima

Kehren wir zum Problem der Geländeklimafaktoren als den die Energieströme beeinflussenden Klimafaktoren zurück.

Bis heute hat man die Energieströme bei Geländeklimauntersuchungen meines Wissens nur bei der sog. Besonnung berücksichtigt. Um einen Anhalt über den unterschiedlichen Strahlungsgenuß zu bekommen, sind auf der Grundlage des Besonnungsmessers nach A. MORGEN oder auf Grund der von E. C. FRANK und R. LEE (1966) für 30° N bis 50° N erstellten Tabellen der potentiellen Sonnenstrahlung schon manche Karten der optimalen Besonnung der Hänge verschiedener Neigung, Exposition und Horizontalabschirmung gezeichnet worden. Leider reichen die meßtechnischen Grundlagen jedoch noch nicht aus, ähnliche Karten der Strahlungsbilanz zu zeichnen, obwohl schon durch die Albedo erhebliche Unterschiede in den Differenzen der Globalstrahlung bestehen. Geländeklimakarten anderer Energieströme fehlen aber noch ganz. Das Bedürfnis ist allerdings groß, wenn man nur an die unterschiedliche Verdunstung und deren

sehr verschiedenen Jahresgang in den einzelnen Geländelagen denkt.

Energiebetrachtungen haben im Gelände bislang insofern eine Rolle gespielt, als man bestimmte Temperatur- oder Feuchteverteilungen, das Entstehen lokaler Windsysteme auf die Wirkung bestimmter Klimafaktoren, d. s. die Energieströme beeinflussender Faktoren, rein qualitativ zurückführt. So wird z. B. die starke nächtliche Abkühlung von Moorwiesen auf die schlechte Wärmeleitfähigkeit dieses Untergrundes zurückgeführt, d. h. auf eine Minderung des von unten an die ausstrahlende Oberfläche gelangenden Wärmestromes. Oder die Überhitzung des Felsgesteins wird auf ein Fehlen von Wasser und damit auf ein Unterbinden des latenten Wärmestromes, nämlich der Verdunstung, mit zurückgeführt u. ä.

Wie wichtig es zum Verständnis des Geländeklimas aber wäre, auch den Tagesgang der Glieder der Strahlungsbilanz und der vier wichtigsten Glieder der Wärmehaushaltsgleichung zu kennen, sei sowohl an der einzigen Messung, die mir bekannt ist, wie auch an Eigentümlichkeiten des Geländeklimas gezeigt.

K. FIGULA von der landw. Hochschule in Krakau hat in den Beskiden an einem Nord- und an einem Südhang eines von Westen nach Osten verlaufenden Höhenrückens, der mit Gras bestanden war, die Glieder der Wärmehaushaltsgleichung erfaßt. Die Höhe des Rückens war 612 m NN, die beiden Hangstationen waren nur 60 m voneinander entfernt und lagen in 607 m Höhe, wobei der Nordhang eine Neigung von 15° 25', der Südhang von 22° 05' hatte. An sonnigen wolkenlosen Tagen hat er folgende Tagessummen der Energieströme festgestellt (+ = zur Bodenoberfläche, — von der Bodenoberfläche weg gerichtet. Werte in cal/cm² Tag). Gleichzeitig seien die Halbjahreswerte der Wasserhaushaltsgleichung in mm angegeben.

Im gesamten Sommerhalbjahr ist die Verdunstung des Nordhanges nur 12 % geringer als am Südhang, während für wolkenlose Tage der Strahlungsgenuß an direkter Sonnenstrahlung sich um 28 % unterscheidet. Es ist leider nicht festzustellen, in welchem Umfang sich die Strahlungsbilanz im gesamten Vegetationsjahr an beiden Standorten unterscheidet.

Wie unterschiedlich aber die vier Wärmeströme sein können, zeigt die Auswahl der einzelnen Tage: Am 6. Juli wurde die dem Südhang zugestrahelte Wärme

Tabelle 4: Energieströme an zwei benachbarten Hängen in cal/cm² Tag nach K. FIGULA (1964)

		Global- strahlung G	Strahlungs- bilanz Q	B	L	V	V in mm
6.-7. Juli	Nord	+ 430,7	+ 169,4	+ 11,2	+ 11,1	- 191,7	3,4
	Süd	+ 530,3	+ 211,6	+ 13,4	- 104,6	- 119,4	2,0
5.-6. Oktober	Nord	+ 180,4	- 61,7	+ 25,7	+ 51,3	- 15,3	0,3
	Süd	+ 351,5	+ 55,5	+ 20,9	- 11,8	- 64,6	1,1
22.-23. November	Nord	+ 11,8	- 193,5	+ 38,4	+ 155,1	0,0	0,0
	Süd	+ 262,6	- 0,6	+ 14,1	+ 28,5	- 42,0	0,7
Sommerhalbjahr Mai-Oktober (1957-1961)							
		N	A	V	R-B	Strahlung nach A. MORGEN	
	Nord	585,9	148,0	476,0	38,2	74,0 kcal/cm ²	
	Süd	649,0	156,3	521,4	28,7	102,6 kcal/cm ²	

B = Wärmestrom in den bzw. aus dem Boden, L = Wärmestrom in die bzw. aus der Luft, V = Verdunstung, N = Niederschlag, A = Abfluß, R-B = Rücklage minus Aufbrauch. N, A, V, R-B in mm.

beinahe gleichmäßig auf den latenten (V) und fühlbaren (L) Wärmestrom in die Luft verteilt. Am Nordhang ist der Verdunstungswärmestrom (V) wegen der höheren Bodenfeuchte und vielleicht auch, weil das Strahlungsangebot keine zeitweise Einschränkung der Transpiration durch Stomatenschluß verursacht, wesentlich größer als am Südhang. Das Glied (L) hat sogar ein positives Vorzeichen, d. h., es fließt Wärme aus der Luft zur Bodenoberfläche. Die am Südhang stärker erwärmte Luft gibt einen Teil ihrer Wärme über die Luftbewegung an den Nordhang ab.

Ein umgekehrtes Vorzeichen des Gliedes (L) tritt auch noch am 5.-6. Oktober auf, während im November an beiden Hängen in der Tagessumme Wärme aus der Luft zum Boden strömt, zur kälteren Bodenoberfläche des Nordhangs erheblich mehr als zur Oberfläche des Südhanges. Sicherlich liegt die letzte Ursache zu allem in einem unterschiedlichen Genuß der Hänge an Globalstrahlung, doch aus diesen Unterschieden sind die anderen Wärmeströme höchstens in ihrer Richtung, jedoch nicht im Betrag abzuschätzen. Im Herbst verschwindet am Nordhang auch die Verdunstung, am Südhang bleibt sie noch merklich.

An sich ist eigentlich nichts anderes zu erwarten. Unterschiedliche Strahlungsbilanzen erzeugen verschiedene Oberflächentemperaturen. Damit entstehen Ausgleichströmungen, wenn der Ausgleich nicht schon durch die allgemeinen Windverhältnisse erzeugt wird. Ähnliche Unterschiede der einzelnen Wärmeströme existieren nicht nur bei gleicher Bodenbedeckung, aber unterschiedlicher Hangbestrahlung, sondern in ebenem Gelände auch bei wechselnden Bodenverhältnissen, besonders aber bei unterschiedlichen Pflanzendecken mit verschiedener Albedo.

Aus der Tagessumme der Bestrahlung eines kegelförmigen Berges allein läßt es sich nicht erklären, daß in der Regel der mittlere Südwesthang eines Berges die höchste tägliche Maximum- und die höchste Tages-

mitteltemperatur erzielt. Denn wenn der Südosthang am späten Vormittag die stärkste Sonnenstrahlung empfängt, ist dessen Strahlungsbilanz sogar noch größer als die des Südwesthangs am frühen Nachmittag, wenn dieser die stärkste Einstrahlung erreicht. Denn die langwellige Ausstrahlung wächst ja mit der Oberflächentemperatur der Hänge, sie ist also am frühen Nachmittag größer als am späten Vormittag. Sie ist gegen 14 Uhr am wärmeren Südwesthang auch größer als zur gleichen Zeit am Südosthang.

Daraus müßte man schließen, daß der Temperaturunterschied zwischen einem SO- und einem SW-Hang um 10 Uhr größer sein müßte als der mit dem umgekehrten Vorzeichen versehene Unterschied zwischen beiden Hängen um 14 Uhr. Das konnte ich am Staufenberg im Südharz im September 1953 und Juni 1954 jedoch nicht feststellen (F. K. HARTMANN, J. VAN EIMERN, G. JAHN, 1959). Vielmehr war der Temperaturunterschied zwischen beiden Hängen am Nachmittag merklich größer als am Vormittag. Neben den Strahlungsströmen spielen eben auch die anderen Wärmeströme eine Rolle. Der Wärmestrom in den Boden muß am trockneren Südwest- bis Westhang schlechter gewesen sein als am feuchten Osthang.

Vielfach findet man auch folgende Erklärung für die größere Wärme des SW-W-Hanges gegenüber dem SO- bis O-Hang: An den Ost- und Südosthängen würde zur Zeit ihrer stärksten Bestrahlung noch Tau verdunsten, der längst weg sei, wenn die Sonne im Südwesten bis Westen stünde. Doch im Sommer ist der Tau auch schon längst verschwunden, wenn die Sonne im Südosten steht. Aber zu dieser Tageszeit ist die Evapotranspiration noch in vollem Gange, die bei der höheren Wärme am frühen Nachmittag eher durch Stomatenschluß eingeschränkt ist als vormittags. Weniger Energie für die Verdunstung bedeutet mehr Energie für den Wärmestrom in den Boden und in die Luft und somit größere Temperaturunterschiede.

Ein Wärmeaustausch zwischen allen Hängen eines Mittelgebirges über die Luftbewegung findet immer statt. Aber dieser Austausch ist auch am Vormittag schon beträchtlich. Er ist aber in der Regel am frühen Nachmittag noch größer als am Vormittag, weil eben auch die Temperaturunterschiede größer sind und somit größere Ausgleichsströmungen verursachen können. Die Klimafaktoren Hangrichtung und Hangneigung beeinflussen somit das Klima durch Abwandlung aller Energieströme.

Schließlich sei auf eine Geländeklima-Eigentümlichkeit hingewiesen, die mir schon lange aufgefallen ist. Im Nordosten von Hamburg fand E. FRANKEN (1955) bei zahlreichen Geländemeßfahrten kurz vor Sonnenuntergang bei klarem windschwachem Wetter maximale Temperaturunterschiede zwischen einem Wiesental und dem 23 m höher gelegenen Scharberg von regelmäßig etwa 4–5,5° C. In Quickborn, wo die maximalen Höhenunterschiede etwa dieselben sind, fand ich 1950 zwischen den Wiesen der Pinnauniederung und den 25–30 m höher gelegenen Anhöhen gleich große Unterschiede. Im bayerischen tertiären Hügelland bei Weihenstephan mit maximalen Höhenunterschieden um 50–60 m wurden Unterschiede von 7° erreicht, jedoch nicht überschritten. A. BAUMGARTNER (1960) fand am Großen Falkenstein im Bayer. Wald in der warmen Hangzone 300 m über dem Defferniktal nächtliche Temperaturunterschiede von maximal 5–6° C. Auch in anderen Mittelgebirgslandschaften sind die absoluten Unterschiede von der gleichen Größenordnung (M. M. BJELANOVIC, 1967). Merkwürdig größere Unterschiede treten eigentlich nur bei ganz extremen geomorphologischen Verhältnissen wie etwa in Dolinen auf. Es hat also den Anschein, daß normalerweise im Hügelland wie im Mittelgebirge sich obere Grenzwerte der möglichen nächtlichen Temperaturunterschiede einstellen, die bei 5–7° C liegen. Es wäre eine Aufgabe, dieses einmal auch theoretisch nachzuprüfen. Die Bildung der nächtlichen Temperaturschichtung ist nicht allein eine Folge der vertikalen Verteilung der Strahlungsbilanz, sondern auch des Luftaustausches, der anscheinend mit zunehmenden Höhenunterschieden gefördert wird. Der Wärmeübergang „L“ von der Luft zum Boden muß also auch eine Funktion der Reliefenergie sein. Die theoretische Behandlung einer solchen Untersuchung wird leider durch die Reibung, welche die Luftströmung an der rauhen Bodenoberfläche erfährt, erschwert, aber es ist bekannt, daß das System der Hangwinde und der Berg- und Talwinde statistisch gesehen mit der Reliefenergie zunimmt. Wenn man von einem jahreszeitlichen Gang der Obergrenze der Bodeninversion in Tälern, also der Höhe der warmen Hangzone, absieht, wie sie BAUMGARTNER im Bayer. Wald gefunden hat, so stellt man fest, daß die nächtliche Verteilung der Unterschiede der Minimumtemperatur in klaren Nächten sich auch nur wenig mit der Jahreszeit unterscheidet, obwohl die Dauer der Ausstrah-

lung, d. h. der negativen Strahlungsbilanz, erheblich von der Jahreszeit abhängt. Wäre die Minimumtemperaturverteilung nur von der Ausstrahlung abhängig, wäre diese Tatsache nicht zu erklären. Doch die Ausgleichsströmungen, die unvermeidlich entstehen, müssen eine Art Gleichgewichtszustand der Minimumtemperaturverteilung erzeugen, der bei nur geringer weiterer Temperaturabnahme bis Sonnenaufgang anhält.

Diese Beispiele mögen genügen, die Wichtigkeit der Energieströme für die Anwendung klimatologischer Unterlagen zu zeigen als auch Erscheinungen des Klimas, insbesondere des Geländeklimas selbst zu erklären. Es ist zu hoffen, daß die moderne Meßtechnik uns künftig noch mehr und bessere Daten liefern wird, um noch offene Probleme zu lösen.

Literatur

- BAUMGARTNER, A.: Die Lufttemperatur am Großen Falkenstein. Forstwiss. Cbl. 79, 362–373, 1960.
- BJELANOVIC, M. M.: Mesoklimatische Studien im Rhein- und Moselgebiet. Arbeiten aus dem Geogr. Inst. der Univ. Bonn Reihe A, Nr. 76, 231 S., 1967.
- BLÜTHGEN, J.: Allgemeine Klimageographie, 1. Aufl., Berlin 1964.
- FRANK, E. C. and LEE, R.: Potential solar beam irradiation on slopes. Tables for 30° to 50° latitude. US Forest Service Res. Pap. No. RM 18, Fort Collins, 1966.
- FRANKEN, E.: Unterschiedliche Frostgefährdung im Norden Hamburgs. Annalen der Met. 7, 135–148, 1955.
- FIGULA, K.: Untersuchungen über die Wasser- und Wärmebilanz des Hanges. Wiss. Zeitschr. Karl-Marx-Univ. Leipzig, 13, Math. Naturw. R. Nr. 4, 783–788, 1964.
- GEIGER, R.: Die Atmosphäre der Erde, 12 Wandkarten, Justus Perthes, Darmstadt, 1963.
- HARTMANN, F. K., VAN EIMERN, J., JAHN, G.: Untersuchungen reliefbedingter klein-klimatologischer Fragen in Geländequerschnitten... des Mittel- und Südwestharzes. Berichte Deutsch. Wetterd., Nr. 50, 39 S., 1959.
- KNOCH, K.: Klima und Klimaschwankungen, Quelle und Meyer, Leipzig, 1930.
- LIESEGANG, F.: Der natürliche Standort für den Anbau von Körner- und Silomais in Westdeutschland. Diss. Fak. f. Landw. u. Gart. der TH München, Freising-Weihenstephan, 1965.
- MORGEN, A.: Die Besonnung und ihre Verminderung durch Horizontbegrenzung. Veröff. Met. u. Hydrol. Dienst DDR, Potsdam, No. 12, 1957.
- PAHL, E.: Jahreszeitliche Schwankungen der Futterproduktion auf einigen Weiden und ihre Abhängigkeit von der Evapotranspiration und von Witterungsfaktoren. Diss. Fak. f. Landw. u. Gartenbau TH München, Freising-Weihenstephan, 1968.
- SAUBERER, F., und HÄRTEL, O.: Pflanze und Strahlung. Leipzig 1959.
- SCHNEIDER-CARIUS, K.: Das Klima, seine Definition und Darstellung. Veröff. Geophys. Inst. Univ. Leipzig, 2. Ser., 17, 80 S., 1961.
- WALTER, H., und LIETH, H.: Klimadiagramm – Weltatlas. G. Fischer, Jena 1960–1967.