

## **Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle**

(Festkolloquiumsvortrag zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. A. Kessler)

von

**Lutz Jaeger, Freiburg i. Br.**

### **Zusammenfassung**

Nach einer kurzen Beschreibung der forstmeteorologischen Meßstelle Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg wird auf die Verbesserungen der dortigen Psychrometermeßtechnik eingegangen. Danach wird über einige Ergebnisse der langjährigen Strahlungsmessungen am Beispiel der Strahlungsbilanz berichtet. Nach einer Darstellung des mittleren Verhaltens des Bodenwärmestromes, der mit unterschiedlichen Bodenfeuchteansätzen berechnet wurde, wird auf den Bestandwärmestrom eingegangen und dieser mit der Bodenwärme verglichen. Es folgt die Realisierung der Wärmehaushaltsgleichung, wobei auf die verschiedenen Methodiken hingewiesen wird, die in Hartheim angewandt wurden. Es handelt sich dabei um das Sverdrup Verfahren, aerodynamische Profilmethoden und hydrologische Ansätze. Die Energieströme werden in ihrem langjährigen Verhalten angesprochen und schließlich mit hydrologischen Berechnungen verglichen.

### **Abstract**

*After a short description of the forestmeteorological site Hartheim of the Department of Meteorology of Freiburg University we report the improvements of the psychrometric measurement technique there. Next some results of the longterm radiation monitoring are presented with the net radiation in particular. The calculation of the soil storage term follows and its behaviour in time by means of different soil moisture values as input into the equation. It is compared with the energy storage in stand air, stems and biomass. Turbulent flu-*

---

Anschrift des Verfassers:

PD Dr. LUTZ JAEGER, Meteorologisches Institut der Universität Freiburg, Werderring 10, 79085 Freiburg i. Br.

*xes of sensible and latent heat were calculated by means of the Bowen ratio, aerodynamic profile methods and the water budget. The conclusion consists of the comment of the long-term pattern of the energy fluxes and its comparisons to hydrological calculations.*

## **Résumé**

*L'article commence avec une description abrégée de la site forestière d'Hartheim de l'Institut Météorologique de l'Université Fribourg succédé par un rapport de l'amélioration de la technique des mesures psychrométriques là. Ensuite on présente quelques résultats des mesures radiatives vue à longue terme notamment le bilan radiatif. Le flux de chaleur sensible dans le sol, calculé avec des différents valeurs d'entrée de l'humidité du sol est comparé avec le flux de chaleur sensible dans le bois. On calcule les flux turbulents de la chaleur sensible et latente avec le rapport Bowen, la méthode des profils aérodynamiques et avec des approches hydrologiques. Finalement on analyse les flux d'énergie en égard aux relations hydrologiques sous le point de vue des années de la période des observations.*

## **1. Einleitung**

Die Untersuchung der physikalischen Grundlagen des Klimas in einem südwestdeutschen Kiefernwald ist ein Schwerpunkt des wissenschaftlichen Lebenswerkes von ALBRECHT KESSLER. Aus diesem Grunde, und dem festlichen Anlaß entsprechend, werden im Folgenden einige forstklimatologische Aspekte, die an der Hartheimer Meßstation gewonnen wurden, dargestellt. Dazu gehört auch die Beschreibung der langjährigen Betreuung dieser Wärmehaushaltsstation, die das Meteorologische Institut der Universität Freiburg seit 1969 betreibt.

Die Meßstelle wurde im Gemeindewald von Hartheim errichtet (47°56' n.B., 7°36' ö.L., 201 m NN). Eine detaillierte Beschreibung findet sich bei JAEGER (1978) und JAEGER et al. (1986). Die an diesem Standort begonnenen und bis heute andauernden Messungen haben zu zahlreichen Diplom- und Doktorarbeiten am Institut geführt. Ihnen allen gemeinsam war das Bemühen, die Untersuchungen mit möglichst langen Reihen nichtprimitiver Klimatelemente klimatologisch aussagekräftig zu machen.

Das Problem der Dauermessung an einer Hochschule besteht darin, mit wechselndem Personal und schwankender finanzieller Ausstattung eine Meßtechnik auf hohem Niveau über Jahre hinweg quasi observatoriumsmäßig zu gewährleisten und weiterzuentwickeln. Dieser Aufgabe stellte sich A. KESSLER, der mit unermüdlichem Engagement die Station von 1972 bis zu seiner Emeritierung betrieben hat. Inzwischen wird die Forstmeteorologische Meßstelle des Meteorologischen Instituts vom jetzigen Institutsdirektor H. MAYER weiter betrieben.

An dieser Stelle sei auch den Institutstechnikern gedankt, ohne die eine derartige meßtechnische Einrichtung nicht betrieben werden kann. Den Herren FERNBACH, TRICK UND REDEPENNING danke ich für Wartung und Pflege Hartheims, sowie für die notwendigen

Konstruktionsarbeiten. Neben der Finanzierung des Landes Baden-Württemberg und verschiedener Geldgeber des Bundes wurden für Hartheim auch immer wieder Unterstützungen durch die wissenschaftliche Gesellschaft in Freiburg im Breisgau gewährt, für die ebenfalls gedankt sei.

Eine Dauermeßstation wie die vorliegende, bietet nicht nur Datenmaterial für die Bearbeitung spezieller Aufgabenstellungen, wie methodischen Problemen (Beispiel: ist die Installation eines Windschutzringes für die Messung des Freilandniederschlages über Wäldern notwendig? JAEGER 1984) oder Fallstudien (Beispiel: Die Auswirkung einer Sonnenfinsternis auf die Energieströme an der Erdoberfläche, KESSLER et al. 1979), sondern es bietet sich auch an, das gewonnene Datenmaterial klimatologisch zu bearbeiten. Hierbei bilden die Arbeiten des Instituts drei Schwerpunkte:

1. Der Strahlungshaushalt, wobei alle Komponenten der Strahlungsbilanz betrachtet werden,
2. Der Energiehaushalt, wobei die Komponenten des Wärmehaushaltes, die Strahlungsbilanz, der Boden-Bestandswärmestrom, der Strom fühlbarer Wärme und der Strom latenter Wärme im Vordergrund stehen,
3. Der Wasserhaushalt des Kiefernbestandes.

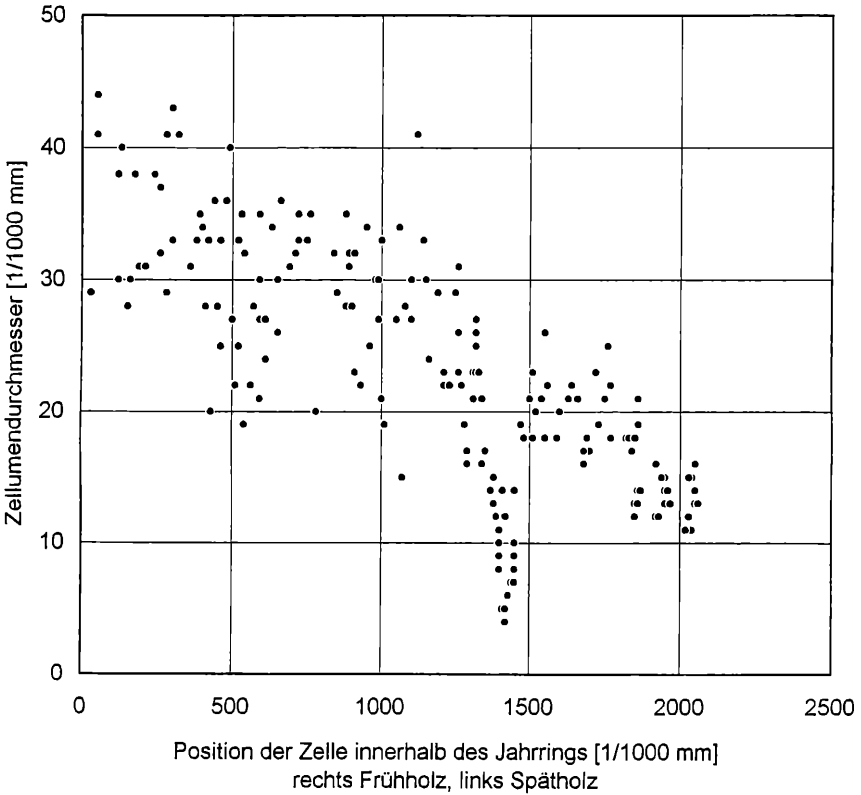
Dabei ist die latente Wärme als Bindeglied zwischen Wärme- und Wasserhaushalt von besonderer Bedeutung, zumal bei der Verdunstung auch praktische Gesichtspunkte eine Rolle spielen. Auch die Kiefern selbst wurden befragt, ob sich in ihren Jahrringen klimatologische Informationen finden lassen (MERKEL 1984), siehe Abbildung 1.

Die Messung und Datenerfassung erfolgte in den ersten Jahren mit Punktschreibern (SCHOTT 1980). Ab 1978 wurden mehrere Prozeßrechner eingesetzt, die sowohl die Meßwerte aufnahmen, als auch die Daten bis zu einem gewissen Grade weiterverarbeiteten (JAEGER 1980). Heute geschieht die Messung mit relativ billigen, aber hochgenau messenden und einfach zu programmierenden Dataloggern mit anschließender Weiterverarbeitung im Institut. Aber auch hier gab es Wechsel. Der über viele Jahre tätige Klimatologe mußte zwei Neueinführungen von Großrechnern im Rechenzentrum der Universität ertragen, mit all ihren Reibungsverlusten. Heute wird im wesentlichen auf Personal Computern und Workstations gerechnet.

## 2. Die Meßstation

Man versucht aus methodischen Gründen die Energieumsätze an der Erdoberfläche in möglichst gleichförmigem Gelände zu erfassen. Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, kann festgestellt werden, daß die Kiefernbestände in der Rheinebene südwestlich von Hartheim sehr gut geeignet sind, derartige Untersuchungen durchzuführen. Die Station selbst liegt in einem 35 Jahre alten Kiefernbestand (*Pinus sylvestris*) in der Rheinaue. Der Boden an der Meßstelle wurde vom Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre untersucht, wobei auch die physikalischen Eigenschaften der Hartheimer Pararendzina erfaßt wurden (HÄDRICH 1979).

Die mittlere Bestandshöhe und die Bestandsentwicklung geht aus der nächsten Abbildung (Abb. 2) hervor. Es lassen sich Trockenperioden herauslesen und auch die Reaktion auf die Durchforstungsmaßnahmen. Dies wird aber noch näher zu untersuchen sein.

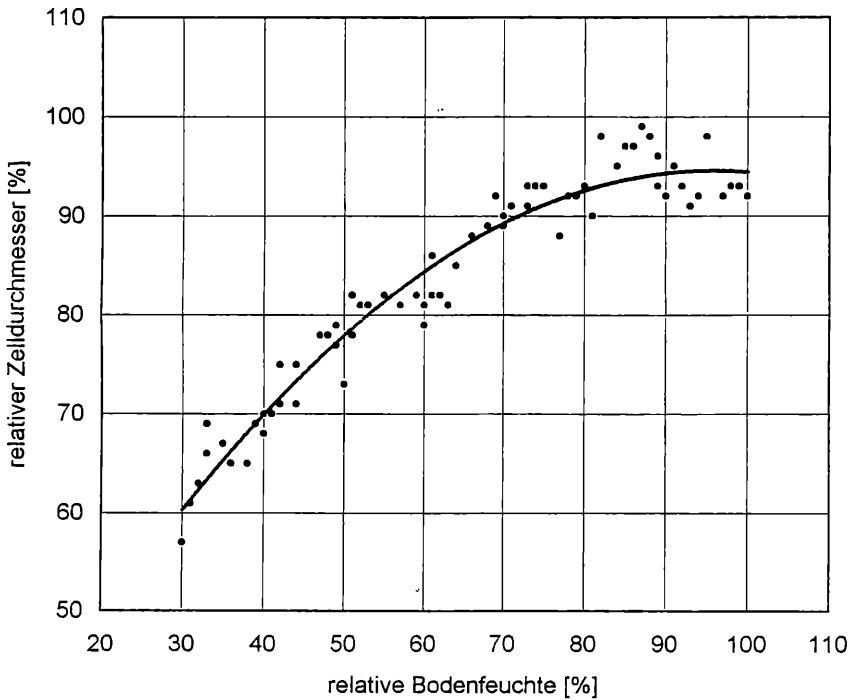


**Abb.1:** Beispiel für eine dendroklimatologische Untersuchung in Hartheim. Rohdaten von Zellumina aus dem Jahre 1976.

Der erste Meßturm hatte eine dreieckige Grundfläche und war 10 m hoch, in einem Wald, dessen Bäume zwischen zwei und drei Meter groß waren (TAJCHMAN 1981). Der heutige Aluminiumturm ist dreißig Meter hoch und ragt aus einem etwa 15 m hohen Bestand. Daneben werden ein zweiter Meßturm von 18 m Höhe und zahlreiche weitere Installationen betrieben. Die am großen Turm montierten Meßgeräte sind Sensoren zur Messung der kurz- und langwelligen Strahlung, Psychrometer zur Messung der Lufttemperatur und der Luftfeuchte in verschiedenen Höhen, Anemometer zur Messung der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Niveaus, und eine Windfahne zur Bestimmung der Windrichtung. Der kleine Meßturm trägt ebenfalls Strahlungsmeßgeräte, dazu Niederschlagsmesser und ein Gerät zur Bestimmung der Sichtweite. Weiterhin werden die Bodentemperaturen in verschiedener Tiefe gemessen, die Bodenfeuchte und die Bodenwärme beobachtet und die Niederschlagsverteilung im Bestand, d.h. Kronendurchlaß und Stammablauf untersucht.

Es muß nochmals betont werden, daß es sich im Hartheimer Kiefernwald um ein Dauereperiment handelt, das auch heute noch läuft. D.h., es sind alle Wettersituationen zu mei-

Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

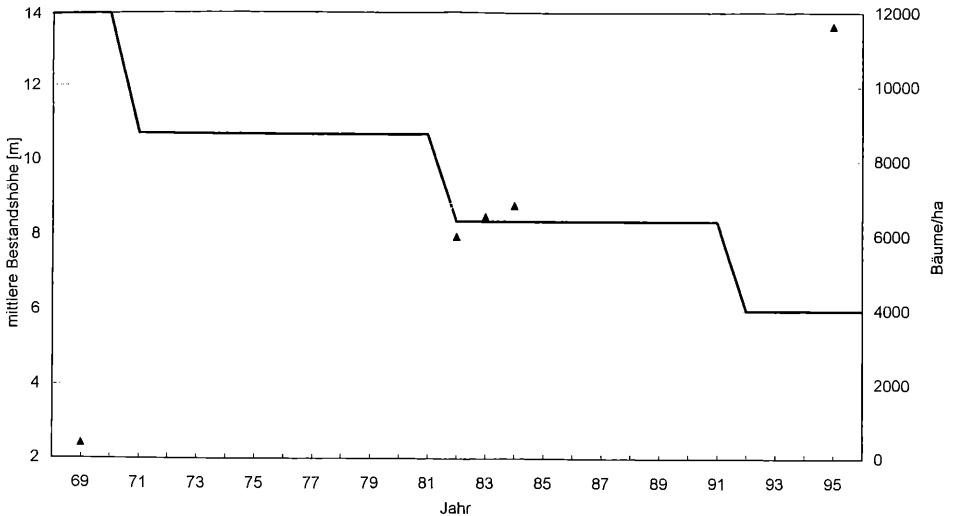


**Abb.1b:** Exponentielle Regression zwischen den Mittelwerten des relativen Zelldurchmessers und der relativen Bodenfeuchte im Jahre 1976.

stern, die die Natur bietet. Dazu gehört ebenfalls, daß Meßgeräte in der Werkstatt verbessert werden müssen, die im Dauerbetrieb Schwierigkeiten bereitet haben.

Ein Beispiel hierfür ist das Psychrometer, der Sensor, der zur Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte eingesetzt wird. Dies geschieht alle 30 Sekunden. Das Meßgerät muß kontinuierlich befeuchtet werden. Die Eigenentwicklung des Instituts weist gegenüber dem kommerziellen Produkt folgende Verbesserungen auf:

1. Durchmesservergrößerung des Ventilationsrohres (Zuleitung zum Aspirationsmotor) um eine Strömungsgeschwindigkeit von 3.0 m/s zu garantieren.
2. Verwendung elektronisch gesteuerter Motoren um die Strömungsgeschwindigkeit zu stabilisieren.
3. Verkabelung und Steckverbinder mit Goldkontakten.
4. Vom Hersteller nach unseren Angaben in Vierleiterschaltung konfektionierte Pt 100 Widerstandsthermometer, um das Eindringen von Luftfeuchte in den Meßwiderstand auszuschließen.



**Abb.2:** Die Bestandsentwicklung in Hartheim von 1969 bis 1995.

5. Verbesserung der thermischen Isolation des Strahlungsschutzes an den Meßwiderständen um Wärmeübergänge zwischen äußerem und innerem Strahlungsschutzrohr zu verringern.
6. Aufpolsterung der Psychrometerstrümpfe zur Erhöhung der Wasserleitfähigkeit.
7. Vergrößerung des Umlenkradius der Befeuchtungsstrümpfe vom Pt 100 zum Wasservorratsbehälter, um der Entstehung von Abrißkanten für den Wasserstrom des Psychrometers entgegenzuwirken.
8. Vergrößerung der Wasservorratsbehälter.
9. Wahl lichtreduzierender Bechermaterialien zur Verhinderung von Algenbildung im Befeuchtungswasser.
10. Abdichtung aller elektrischen Leitungen gegen Eindringen von Wasser und Wasserdampf mit Schrumpfschläuchen und deren Verguß mit Polymeren.
11. Verwendung von PVC-Handschuhen beim Strumpfwechsel, um zu verhindern, daß Hautfett die Saugfähigkeit der Psychrometerstrümpfe beeinträchtigt.

### 3. Die Strahlungsbilanz

Im Mittelpunkt der Untersuchungen in Hartheim steht die Wärmehaushaltsgleichung, die das energetische Geschehen einer Oberfläche, in diesem Fall einer Waldoberfläche, zusammenfaßt. Die treibende Größe oder engl. forcing function dieser Gleichung ist die Strahlungsbilanz:

## Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

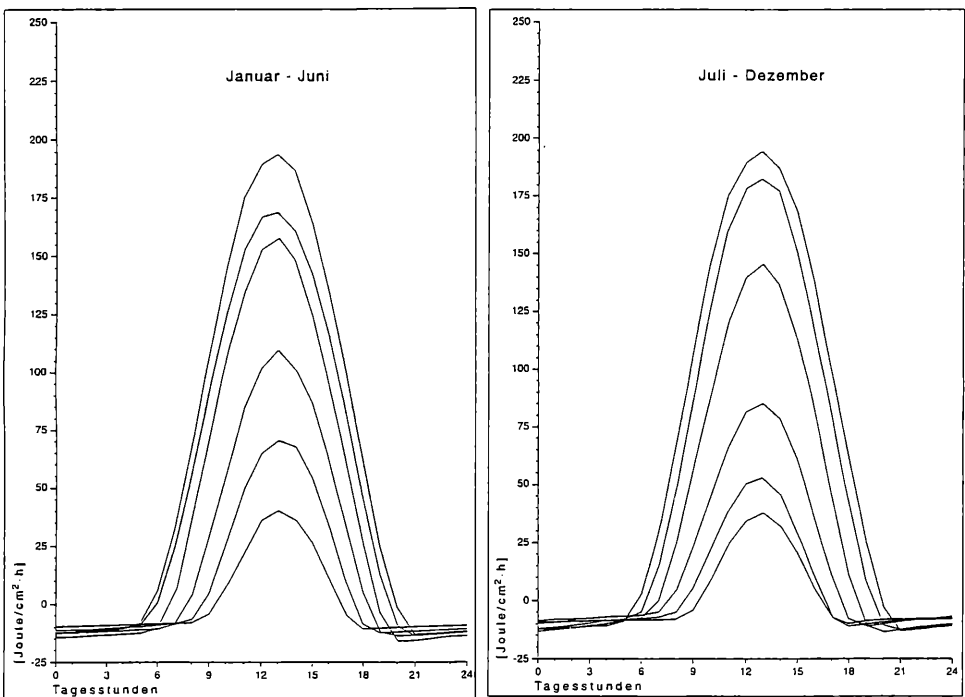
$$Q + B + H + \lambda E = 0$$

mit  $Q$  = Strahlungsbilanz,  $B$  = Boden-Bestandswärmestrom,  $H$  = turbulenter Strom fühlbarer Wärme und  $\lambda E$  = turbulenter Strom latenter Wärme.

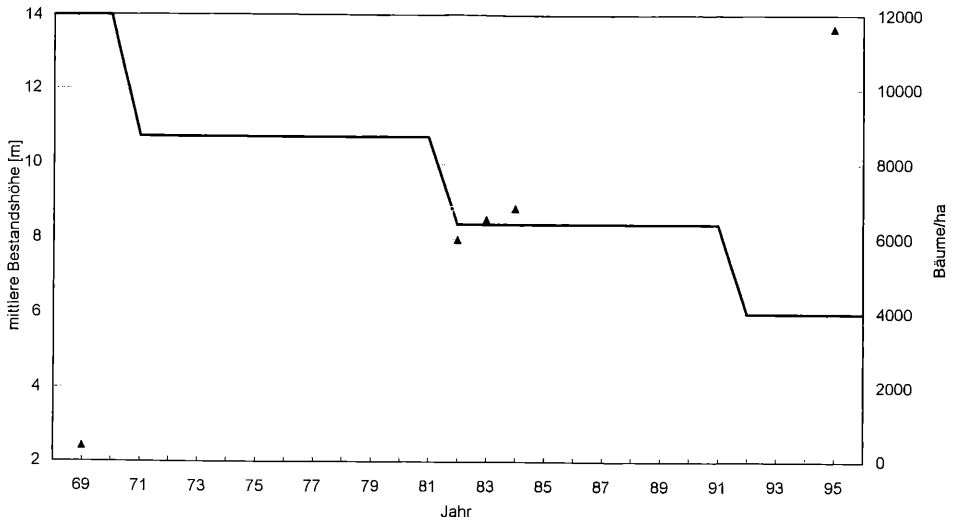
Wenn hier von Klimatologie die Rede ist, dann bedeutet dies, daß, wenn der Begriff nicht raumbezogen verwendet wird, es sich um eine längere Zeitreihe eines Ortes handelt. Dabei müssen Meßgeräte überwacht und Fehler erkannt und beseitigt werden. Bei Wechsel der Systeme, sowohl der Meßgeräte, als auch der Registriereinrichtungen ist auf Homogenität zu achten. So ist ein lückenloser Datensatz von 1974 bis 1988, also über einen Zeitraum von 15 Jahren auf der Basis von Stundenwerten entstanden. Derzeit werden die Daten von 1989 bis heute überprüft und Datenlücken aus redundanten Systemen gefüllt.

Aus dieser Periode, 1974 bis 1988 zeigt Abb. 3 einige Beispiele der Auswertung von Messungen der Komponenten der Strahlungsbilanz, die über dem Kiefernwald in Hartheim durchgeführt worden sind (KESSLER u. JAEGER 1994).

Bis zur endgültigen Überprüfung der Meßdaten hat die folgende Abbildung (Abb. 4), die den Tages- und Jahresgang der Strahlungsbilanz von 1974 bis 1991 in einer Isoplethendarstellung zeigt, nur vorläufigen Charakter. Es wird deutlich, daß die höchsten Werte um



**Abb.3:** Mittlere monatliche Tagesgänge der Strahlungsbilanz, gemittelt von 1974 bis 1988 in  $\text{J}/\text{cm}^2\text{h}$ .



**Abb.2:** Die Bestandsentwicklung in Hartheim von 1969 bis 1995.

5. Verbesserung der thermischen Isolation des Strahlungsschutzes an den Meßwiderständen um Wärmeübergänge zwischen äußerem und innerem Strahlungsschutzrohr zu verringern.
6. Aufpolsterung der Psychrometerstrümpfe zur Erhöhung der Wasserleitfähigkeit.
7. Vergrößerung des Umlenkradius der Befeuchtungsstrümpfe vom Pt 100 zum Wasservorratsbehälter, um der Entstehung von Abrißkanten für den Wasserstrom des Psychrometers entgegenzuwirken.
8. Vergrößerung der Wasservorratsbehälter.
9. Wahl lichtreduzierender Bechermaterialien zur Verhinderung von Algenbildung im Befeuchtungswasser.
10. Abdichtung aller elektrischen Leitungen gegen Eindringen von Wasser und Wasserdampf mit Schrumpfschläuchen und deren Verguß mit Polymeren.
11. Verwendung von PVC-Handschuhen beim Strumpfwechsel, um zu verhindern, daß Hautfett die Saugfähigkeit der Psychrometerstrümpfe beeinträchtigt.

### 3. Die Strahlungsbilanz

Im Mittelpunkt der Untersuchungen in Hartheim steht die Wärmehaushaltsgleichung, die das energetische Geschehen einer Oberfläche, in diesem Fall einer Waldoberfläche, zusammenfaßt. Die treibende Größe oder engl. forcing function dieser Gleichung ist die Strahlungsbilanz:



## Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

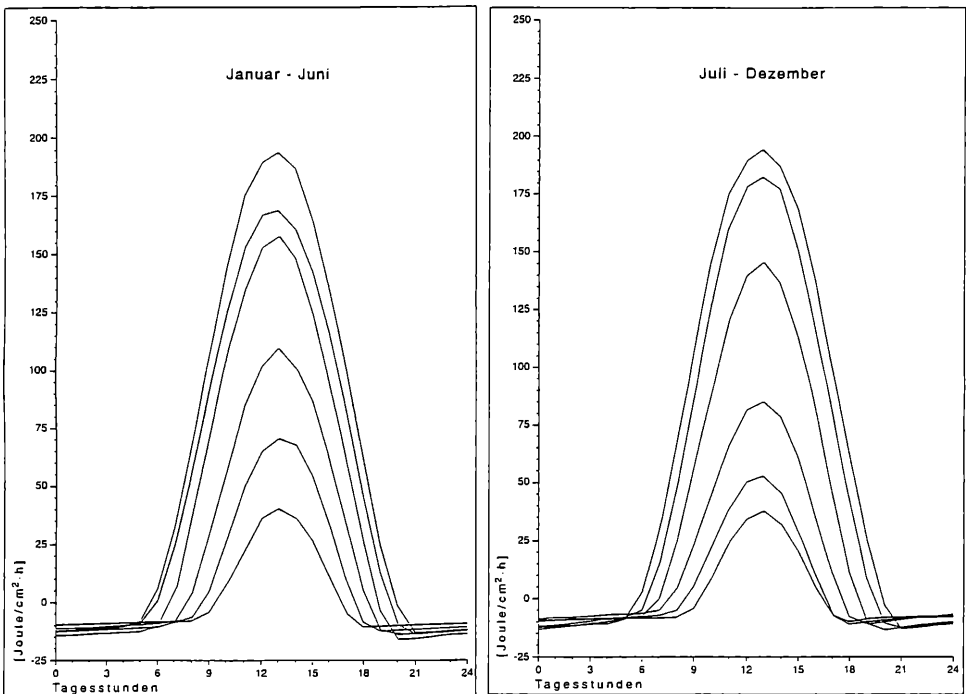
$$Q + B + H + \lambda E = 0$$

mit  $Q$  = Strahlungsbilanz,  $B$  = Boden-Bestandswärmestrom,  $H$  = turbulenter Strom fühlbarer Wärme und  $\lambda E$  = turbulenter Strom latenter Wärme.

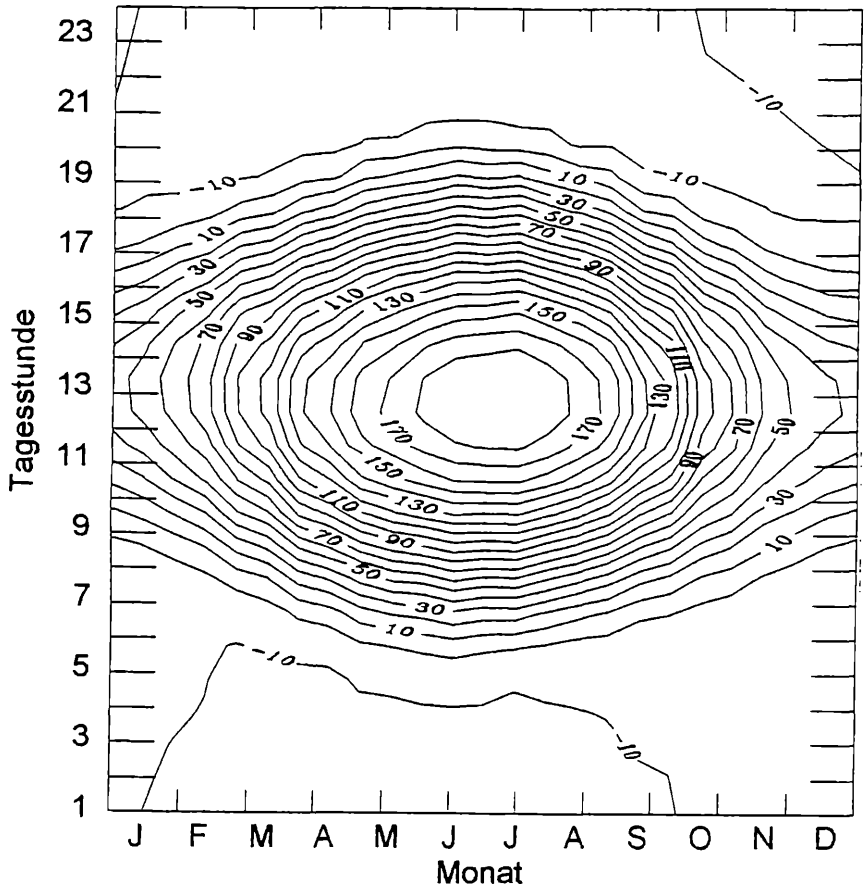
Wenn hier von Klimatologie die Rede ist, dann bedeutet dies, daß, wenn der Begriff nicht raumbezogen verwendet wird, es sich um eine längere Zeitreihe eines Ortes handelt. Dabei müssen Meßgeräte überwacht und Fehler erkannt und beseitigt werden. Bei Wechsel der Systeme, sowohl der Meßgeräte, als auch der Registriereinrichtungen ist auf Homogenität zu achten. So ist ein lückenloser Datensatz von 1974 bis 1988, also über einen Zeitraum von 15 Jahren auf der Basis von Stundenwerten entstanden. Derzeit werden die Daten von 1989 bis heute überprüft und Datenlücken aus redundanten Systemen gefüllt.

Aus dieser Periode, 1974 bis 1988 zeigt Abb. 3 einige Beispiele der Auswertung von Messungen der Komponenten der Strahlungsbilanz, die über dem Kiefernwald in Hartheim durchgeführt worden sind (KESSLER u. JAEGER 1994).

Bis zur endgültigen Überprüfung der Meßdaten hat die folgende Abbildung (Abb. 4), die den Tages- und Jahresgang der Strahlungsbilanz von 1974 bis 1991 in einer Isoplethendarstellung zeigt, nur vorläufigen Charakter. Es wird deutlich, daß die höchsten Werte um



**Abb.3:** Mittlere monatliche Tagesgänge der Strahlungsbilanz, gemittelt von 1974 bis 1988 in  $\text{J}/\text{cm}^2\text{h}$ .



**Abb.4:** Isoplethen der Strahlungsbilanz in Hartheim in  $\text{J}/\text{cm}^2\text{h}$  (1974 - 1991).

13 Uhr MEZ auftreten. Die Minima mit unter  $-10 \text{ J}/\text{cm}^2\text{h}$  erscheinen in den Abendstunden, wobei von Februar bis September die  $-10 \text{ J}/\text{cm}^2\text{h}$ -Isoplethe erst in den Morgenstunden wieder überschritten wird. Im übrigen verhält sich die Anordnung der Isoplethen wie sie für die Variabilität der Strahlungsbilanz in Mitteleuropa oder den gemäßigten Breiten typisch ist (KESSLER 1973)

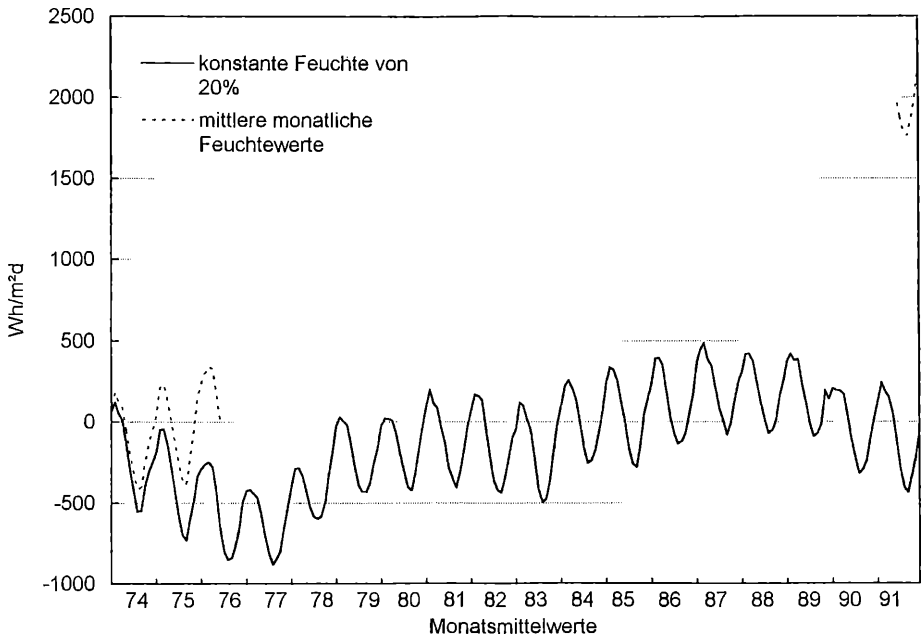
#### 4. Der Bodenwärmestrom

In einem Wald findet der Hauptumsatz der Strahlungsenergie im oberen Teil des Kronenraums statt. Die Energiumsätze unterhalb dieser Zählfläche werden in den Boden- und in den Bestandwärmestrom aufgeteilt. Die langjährige Erfassung des Bodenwärmestroms in

Hartheim (und auch des Bestandswärmestroms) hat eine kombinierte Methode, basierend auf Temperaturmessungen und Bodenfeuchtwerten zur Grundlage, die bei BERZ (1969) und TETZLAFF (1974) beschrieben ist. Das Bodentemperaturprofil wird mit Widerstandsthermometern in verschiedenen Tiefen gemessen.

Die zweite, für den Bodenwärmestrom relevante und durch die Niederschläge variierte Größe, die Bodenfeuchte, wurde bis 1980 mit einer Neutronensonde dankenswerterweise vom Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg gemessen, ab 1981 erfolgt die Erfassung der Bodenfeuchte gravimetrisch. Der Bodenwasservorrat wird alljährlich trotz geringer Winterniederschläge bis zum Frühjahr auf etwa Feldkapazität aufgefüllt. Durch die steigende Evapotranspiration im Sommerhalbjahr sinkt die Bodenfeuchte bis in die Nähe des permanenten Welkepunktes ab, obwohl die Niederschläge zum Sommer hin zunehmen. Im Mittel liegt die Bodenfeuchte über das Jahr gerechnet bei 21.1 %. Auf der Basis dieses Ergebnisses wurde eine Version des Bodenwärmestroms mit einem von GARTHE (1985) erstellten Programm mit einer mittleren monatlichen Feuchte von 20 Vol.% gerechnet (Abb.5)

Insgesamt liegt der langjährige, mit konstanter Bodenfeuchte berechnete Bodewärmestrom im Mittel näher bei null als der mit mittlerer monatlicher Feuchte ermittelte Term. Dies ist auch aus der Abbildung abzulesen. Die mit ersterer Methodik ermittelten Monatswerte oszillieren über die Jahre um die Nulllinie, während sich das zweite Kollektiv konti-



**Abb.5:** Summenkurven des Bodenwärmestroms von Januar 1974 bis Dezember 1991, berechnet mit einer konstanten Bodenfeuchte von 20% und mit gemessenen mittleren monatlichen Bodenfeuchtwerten.

nuerlich positiv verstärkt. Dies würde bedeuten, daß getreu der Vorzeichendefinition der Boden permanent abkühlen würde. Dies wird aber nicht beobachtet. Es addiert sich daher ein permanent wirkender Meßfehler bei den mittleren monatlichen Feuchtwerten auf den Bodenwärmestrom und läßt ihn nach oben abdriften.

## 5. Der Bestandswärmestrom

Abbildung 6 bietet einen Größenvergleich zwischen dem Bestands- und dem Bodenwärmestrom und deren mittlere monatliche Verhältnisse am Beispiel des Jahres 1991. In den Wintermonaten sind die Änderungen im Tagesgang im Bestand größer als im Boden, während im Sommer die Amplituden im Boden doppelt so groß sind wie im Bestand. Der gegenüber dem Boden thermisch weniger träge Bestand erreicht das Maximum seiner Wärmeaufnahme in den frühen Vormittagsstunden, dann beginnt bereits wieder der Energieverlust mit einem Maximum nach 18 Uhr. Die stärkste Energieaufnahme des Bodens verharret das ganze Jahr über in den Mittagsstunden nach 12 Uhr, das Maximum des Energieverlustes dagegen wird in den frühen Morgenstunden beobachtet.

Wenn auch die Monatsmittel der Tagessummen des Bestandswärmestroms in den Einzeljahren den Betrag von  $7 \text{ W/m}^2$  nicht überschreiten (die Monatsmittel über den gesamten Untersuchungszeitraum übersteigen selbst den Betrag von  $2 \text{ W/m}^2$  nicht), so ist doch die Wirkung dieser Größe auf den Energiehaushalt in Hartheim nicht zu vernachlässigen und eine Beschränkung auf den reinen Bodenwärmestrom anstatt der Berechnung des Bestands-Boden-Wärmestroms ist nicht angebracht.

In der nächsten Abbildung (Abb. 7) sind die Monatsmittelwerte des Bestandswärmestroms aufsummiert. Man erkennt, daß sich die Summenkurve zunehmend von der Nulllinie, die im Jahresgang Energieausgleich repräsentiert, entfernt, in Richtung auf eine Energieaufnahme des Bestandsraums. Dies könnte die energetische Antwort auf den fortschreitenden Kronenschluß sein. Es ist aber Vorsicht angebracht bei der Interpretation, da sich die geschilderten Verhältnisse durchaus im Bereich der Meßunsicherheit abspielen.

## 6. Das Bowen-Verhältnis

Nun fehlen noch die Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme, die unter Verwendung von Temperatur- und Feuchtwerten aus zwei Meßniveaus nach einem Verfahren von BOWEN (1926) berechnet werden. Der von ihm formulierte Quotient aus einer Temperatur- und einer Dampfdruckdifferenz erlangte später die Bezeichnung Bowen-Verhältnis. Das dazugehörige Rechenverfahren wird auch Sverdrup-Methode genannt (SVERDRUP 1936). Gemittelt von Januar 1978 bis Dezember 1991 ist das Verhältnis tagsüber positiv, übersteigt aber nicht den Wert 0.9. Aufgrund der geringen Verdunstungswerte in der Nacht wird der Wert in den entsprechenden Stunden stark negativ. Die Zahlen des Winters liegen durchweg unter denen des Sommers, in den Nachtstunden stärker als am Tage.

Die exakte Bestimmung des Bowen-Verhältnisses ist abhängig von der Genauigkeit, mit der der vertikale Temperatur- und Feuchtegradient bestimmt werden kann. Fehlwerte bei der Berechnung enthalten sowohl Ausfälle der Psychrometer, als auch Unstetigkeiten und verworfene Werte nach den Kriterien von OHMURA (1982). Die Fehlwerte sagen zunächst noch

Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

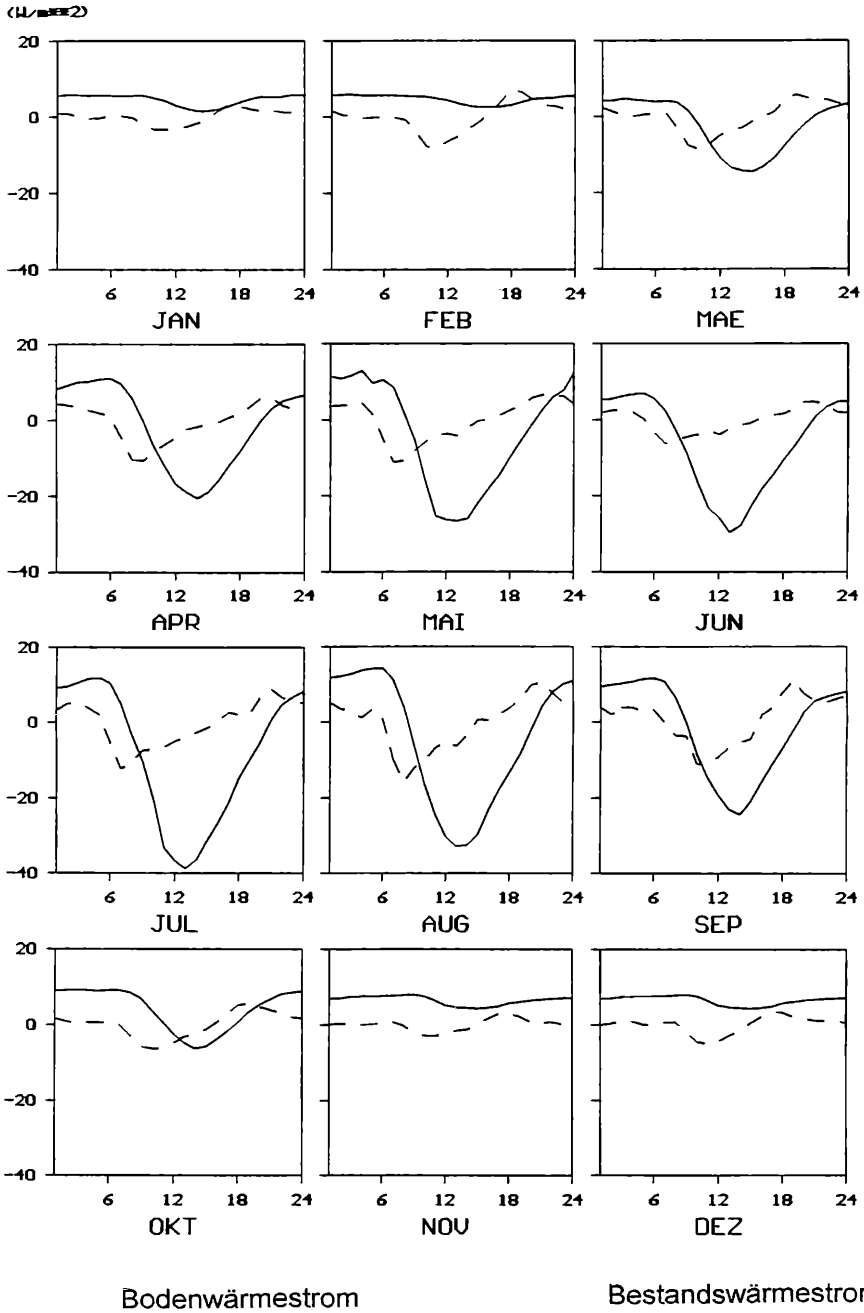
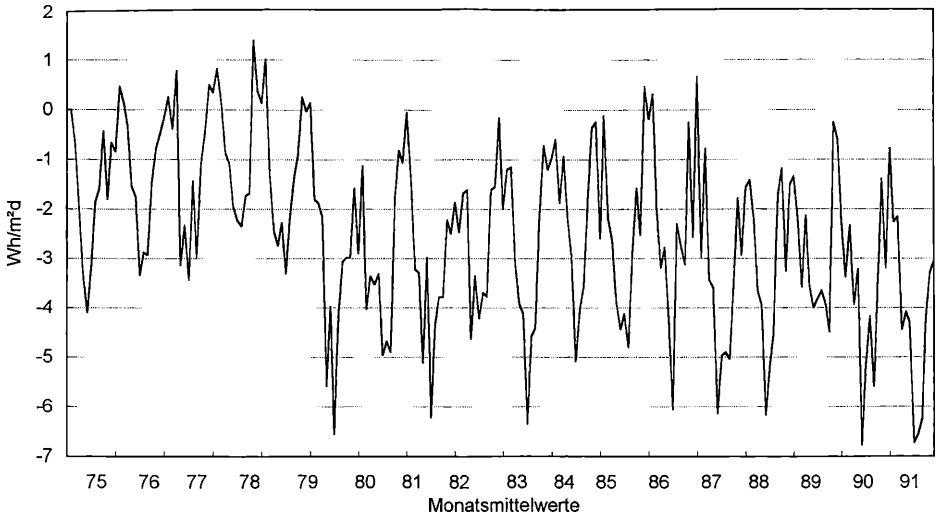


Abb.6: Mittlere monatliche Tagesgänge des Boden- und des Bestandswärmestroms im Jahre 1991.



**Abb.7:** Summenkurve des Bestandwärmestroms (Monatsmittel) von Januar 1974 bis Dezember 1991.

einmal nichts über die Intensität des energetischen Geschehens aus und dessen Lücken, da die Schwierigkeiten, das Bowen-Verhältnis zu berechnen, in den Stunden geringen Energieumsatzes auftreten, d.h., wenn sich das Vorzeichen der Ströme fühlbarer oder latenter Wärme umkehrt. Diese Lücken im Tagesgang wurden durch lineare Interpolation ausgefüllt. Diese Korrektur reduziert die Ausfälle auf Monatsmittel von 91 Stunden, entsprechend 13 % der Gesamtwerte eines Jahres. Die jetzt noch verbliebenen Datenlücken wurden mit Monatsmitteln des Tagesganges des Bowen-Verhältnisses ausgefüllt, wodurch ein lückenloser Datensatz von Werten der fühlbaren und latenten Wärme über vierzehn Jahre auf Stundenbasis erhalten wurde, der für die klimatologische Betrachtung zur Verfügung stand.

## 7. Der Strom latenter Wärme

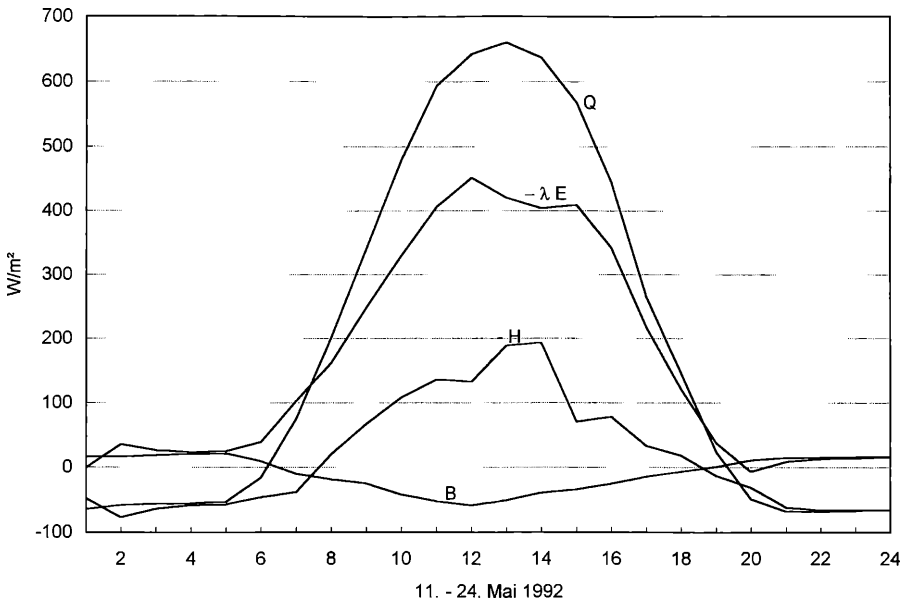
Der Strom latenter Wärme stellt in der Wärmehaushaltsgleichung den Beitrag zur Evapotranspiration. Verdunstung ist ein energieverzehrender Vorgang. Die Verdunstungsenergie kommt dabei der umgebenden Luft (oder Oberfläche) bei Kondensation wieder zugute. Das Maximum dieses Energieterms tritt zwischen 13 und 14 Uhr auf. Abgesehen von der Lage des mittleren Höchstwertes verdunstet am Nachmittag weniger als in den Vormittagsstunden. Die Sommermonate erreichen die zweieinhalbfache Verdunstungsleistung der Wintermonate.

Im allgemeinen verdunsten Wälder in größerem Maße als irgend eine andere Erdoberflächenart, mit Ausnahme von Wasser, da Wasser potentiell evaporiert. Wälder können in der Größenordnung 50 – 90 % der Niederschläge wieder als Evapotranspiration an die

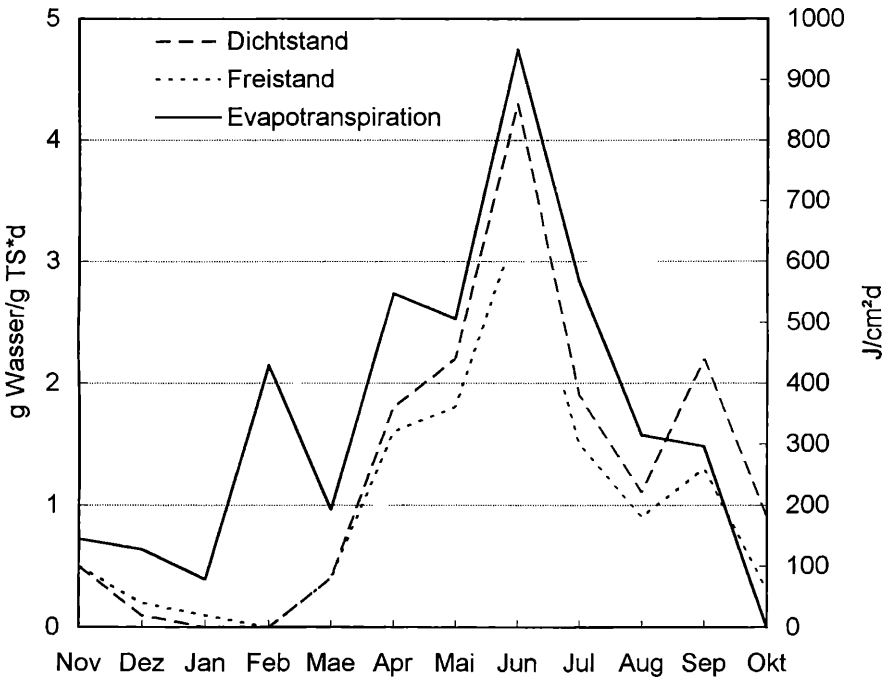
Atmosphäre abgeben (REIFSNYDER 1982). Grasland verdunstet im Mittel etwa 10 % weniger, während es bei nacktem Boden nur 30 % sind.

Verschiedene Autoren berichten über einen Einbruch der mittäglichen Verdunstung zur Sommerzeit. In Hartheim kann in trockenen Sommermonaten dieser mittägliche Rückgang auch beobachtet werden. Dies berichten bereits KESSLER et al. (1979) und SCHOTT (1980). Auch KÜNSTLE (1991) bestätigt diese Beobachtung auf der Basis seiner Gaswechselfmessungen in Hartheim. Während der HartX 92-Periode (HartX = Hartheim Experiment) im Mai 1992 trat der mittägliche Rückgang des turbulenten Stromes latenter Wärme auch im vierzehntägigen Mittel auf (Abb. 8). Bei starkem Wasserstreß reduzieren die Kiefern um die Mittagszeit ihre Transpiration indem sie ihre Stomata schließen. Die Bäume riskieren dabei zwar die Überhitzung ihrer Nadeln, müssen aber dafür sorgen, daß der Saftstrom im Stamm nicht abreißen darf.

Der Strom latenter Wärme umfaßt bei einer bewachsenen Oberfläche sowohl die an ihr auftretende Evaporation, als auch die Transpiration der auf dieser Oberfläche wachsenden Pflanzen. Es wäre interessant, beide Wasserdampfströme separat quantifizieren zu können. Im Rahmen einer ertragskundlichen Untersuchung des Instituts für Waldwachstum wurde in den Jahren 1984 und 1985 mit Gaswechselfkammern der  $\text{CO}_2$ -Umsatz und die Transpiration von Kiefern-zweigquirlen in Hartheim bestimmt. Diesen Vergleich, zusammen mit der



**Abb.8:** Mittlerer Tagesgang der Wärmehaushaltsgrößen während des HartX-Experiments (11. bis 24. Mai 1992).



**Abb.9:** Mittlere monatliche Transpiration und Evapotranspiration in Hartheim, November 1984 bis Oktober 1985.

vom Meteorologischen Institut ermittelten Evapotranspiration zeigt Abbildung 9. Die Transpiration ist in Gramm Wasserdampf pro Gramm Trockensubstanz und Tag angegeben (linke Ordinate), die Evapotranspiration in  $\text{J}/\text{cm}^2\text{d}$  (rechte Ordinate). Der Verlauf der Kurven deutet an, wie stark das Verdunstungsgeschehen in Hartheim von der Transpiration gesteuert wird; nur der Februar 1984 macht hier eine Ausnahme. Wenn es möglich wäre, vom einzelnen Kiefernzweig auf den individuellen Einzelbaum und von dort auf den Bestand zu integrieren, könnte man die Beträge von Transpiration und Evapotranspiration direkt miteinander in Relation setzen. So ist dies nur qualitativ möglich, da die für die Berechnung der Bestandstranspiration in Hartheim notwendigen Bestandsparameter nicht bekannt sind.

## 8. Die Wärmehaushaltsgleichung

Die Zusammenschau und den mittleren Verlauf der Energieströme in Hartheim im vierzehnjährigen Mittel zeigt die nächste Abbildung (Abb. 10). Die Basis dieser Darstellung ist die Berechnung mit dem Sverdrup-Verfahren. Das damit ermittelte Bowen-Verhältnis



## Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

ergibt in jedem Monat des Jahres einen mittleren latenten Wärmestrom  $\lambda E$ , der größer ist, als die fühlbare Wärme  $H$ . Die mittlere Strahlungsbilanz des Kiefernwaldes ist nur im Dezember negativ. Dies erklärt sich dadurch, daß, unter den herrschenden mitteleuropäischen Bedingungen, die langwellige Ausstrahlung und die kurzwellige Reflektion des Bestandes nicht mehr durch die atmosphärische Gegenstrahlung und die astronomisch bedingte Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung kompensiert oder überschritten werden können. Die Erwärmung des Bestandes und des Bodens erfolgt von März bis August; in den übrigen Monaten, abgesehen von einem ausgeglichenen Zustand im September, geben der Boden und der Bestand Energie ab. Der Strom fühlbarer Wärme ist in den Monaten November bis Januar positiv. Evapotranspiration herrscht in allen Monaten des Jahres vor, auch im Winter mit nennenswerten Beträgen. Dies deshalb, weil die Hartheimer Kiefern auch im Winter assimilieren und damit transpirieren. Die große Anzahl der für die Mittelung zur Verfügung stehenden Werte (5113 pro Stunde und Wärmestrom) ergibt eine gute Glättung der vier Kurven.

Bei der Betrachtung mittlerer Tagesgänge aus den vierzehn Jahren (1978 - 1991) fällt auf, daß im August und im September der Strom fühlbarer Wärme den latenten Wärmestrom in den Mittagsstunden übersteigt. Das Bodenwasser ist in diesen Monaten im Mittel soweit aufgebraucht, daß dadurch die Evapotranspiration einschränkt wird. Die verfügbare Energie erhöht dann aber den turbulenten fühlbaren Energiefluß in die bestandsnahe Luft.

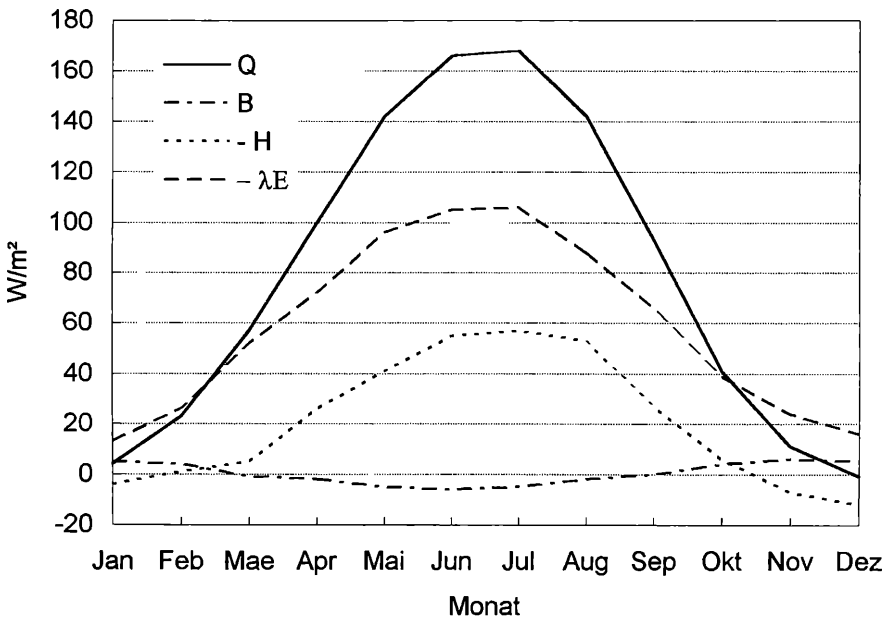
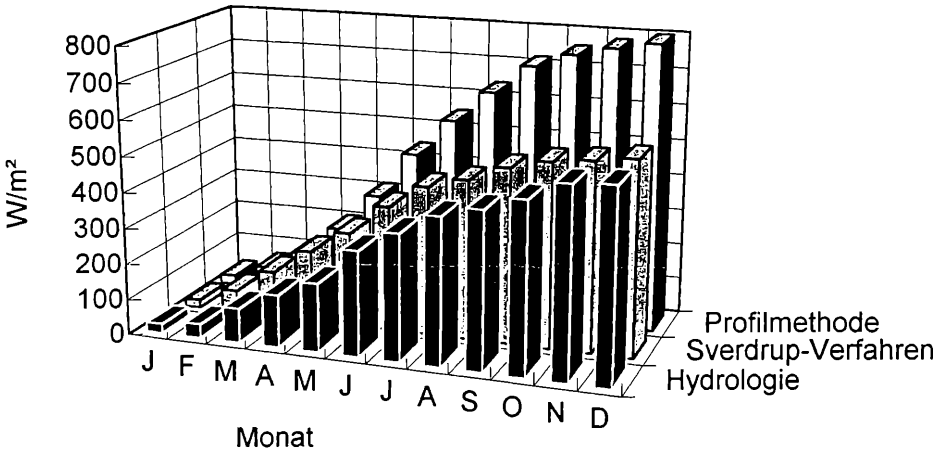


Abb.10: Mittlerer Jahresgang der Energieströme in Hartheim (1978 - 1991).



**Abb.11:** Summenkurven der Monatsmittel des Stromes latenter Wärme im Jahre 1992, mit drei verschiedenen Methoden ermittelt.

## 9. Die aerodynamische Profilmethode

Die heute allgemein verwendete Bezeichnung „aerodynamische Profilmethode“ hat die Überlegungen von MONIN und OBUCHOV (1958) zur atmosphärischen Turbulenz zur Grundlage. Die Beziehungen zwischen dem oberflächennahen Impuls und dem Strom fühlbarer Wärme können dabei in einer dimensionslosen Länge  $L^*$  ausgedrückt werden.

Diese Methode wurde mit Daten aus dem Jahre 1992 durchgerechnet und die Monatsmittel in Abbildung 11 als Summenkurve dargestellt. Dabei liegen die Werte dieser aerodynamischen Profilmethode zwischen den mit dem Sverdrup- und den mit dem hydrologischen Verfahren bestimmten Verdunstungshöhen.

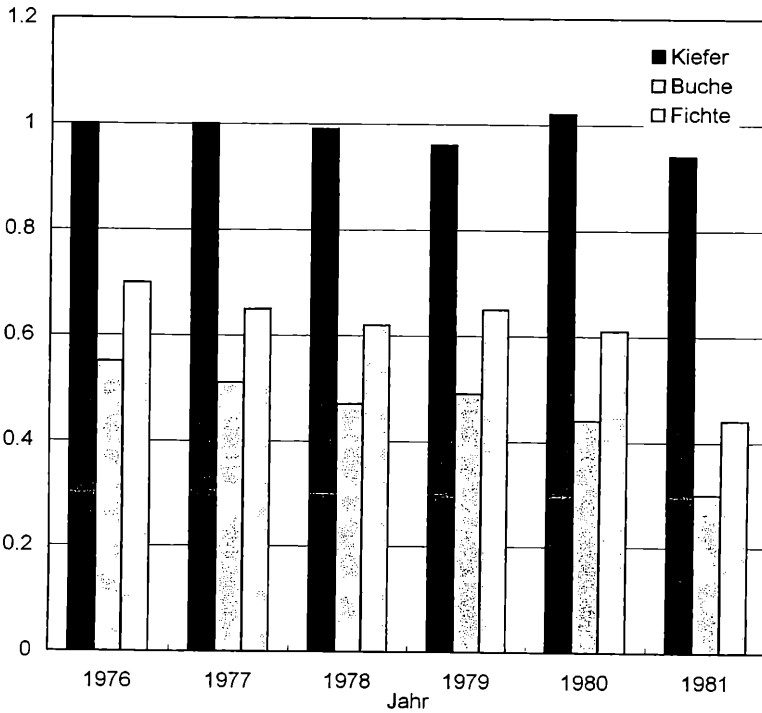
## 10. Der hydrologische Ansatz

Die hydrologischen Verhältnisse des Standorts Hartheim erlauben es, aus der Kombination von Wasser- und Wärmehaushaltsgleichung, die Ströme fühlbarer und latenter Wärme zu berechnen. Tabelle 1 zeigt den mittleren Jahresgang der Wasserhaushaltsgrößen Speicherung, Niederschlag und Verdunstung im achtzehnjährigen Mittel von 1974 bis 1991. Die gemittelte Speicherung des Bodenwassers bleibt weit unter der Feldkapazität von 181,2 mm. Im Februar ist die mittlere Bodenwassersäule am höchsten, im Juli am kleinsten. Erstaunlich ist, daß die Verdunstung im September größer ist als im August. Dies hängt damit zusammen, daß im August nur wenig Wasser zur Evapotranspiration zur Verfügung steht. Vom Wärmehaushalt her betrachtet, entsteht dadurch im Spätsommer auch ein Über-

## Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle

**Tab.1** Mittlerer Jahresgang (mm) der hydrologischen Verhältnisse in Hartheim (1974 - 1991)

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Speicherung	124	136	126	112	102	79	67	68	74	86	95	117
Niederschlag	36	33	38	47	77	70	74	62	60	51	37	47
Evapotranspirat.	25	24	55	63	87	94	84	53	62	29	28	25

**Abb.12:** Mit der Jahressumme des Niederschlags normierte Evapotranspirationswerte von Kiefer (Hartheim) sowie Buche und Fichte (Solling).

gewicht des fühlbaren Wärmestroms gegenüber der latenten Wärme, bei einem hohen Angebot an verfügbarer Energie. Im Mittel von 1974 bis 1991 waren 98.7 mm Bodenwasser gespeichert. In dieser Zeit betrug der mittlere Niederschlag 630.9 mm und die Evapotranspiration 628.2 mm.

Im Untersuchungszeitraum war das bisher feuchteste Jahr das Jahr 1979, das trockenste das Jahr 1991. Überhaupt zeigt sich Ende der achtziger Jahre eine Tendenz zu hohen Strahlungsbilanzwerten und größerer Trockenheit. Dies hatte auch eine Erhöhung der Borkenkäferkalamitäten in der Hartheimer Kiefernmonokultur zur Folge.

Nun wäre es interessant, die in Hartheim gefundenen Ergebnisse mit weiteren forstklimatologischen Untersuchungen zu vergleichen. Leider existieren nur wenige Forschungsprojekte im Walde, die für diesen Zweck geeignet sind. Es gibt eine Arbeit aus dem Solling, die über sechs Jahre ausgedehnt war (SALIHI 1984). Hier ergeben sich synchrone Vergleichswerte mit Hartheim, die aus Abbildung 12 zu ersehen sind. Dabei kommt die unterschiedliche hydrologische Situation der Waldbestände in Südbaden und im Hochsolling zum Ausdruck.

Während in Hartheim praktisch der gesamte Niederschlag wieder verdunstet, wird die Evapotranspiration im Solling vom Niederschlagsangebot kaum beeinflusst. Es steht genügend Niederschlagswasser für die Grundwasserneubildung zur Verfügung, wobei der Fichtenbestand mehr Wasser bei der Evapotranspiration verbraucht als der Buchenbestand.

## 11. Schluß

Neben der Betrachtung der hydrologischen Größen Niederschlag, Evapotranspiration, Wasserspeicherung im Boden, Abfluß und Versickerung, sind in einem Waldbestand weitere Größen des Wasserhaushaltes, wie Interzeption, Stammabfluß und die Aufspaltung der Evapotranspiration in reine Verdunstung und Transpiration zu betrachten. Hier gibt es noch viele Fragen, die offen sind, und denen, da wir im Walde von Hartheim weiterhin messen, in den nächsten Jahren auch weiterhin nachgegangen wird.

## 12. Angeführte Schriften

- BERZ, G. (1969): Untersuchungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche und zum bodennahen atmosphärischen Transport. *Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. München*, **16**, 94 S.
- BOWEN, I.S. (1926): The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface. *Phys. Rev.*, **27**, S. 779 - 787.
- GARTHE, H.-J. (1985): Über das langjährige Verhalten der Energiehaushaltskomponenten eines mitteleuropäischen Kiefernwaldes. *Diss. Geowiss. Fak. Univ. Freiburg*, 107 S.
- HÄDRICH, F. (1979): Der Wasserhaushalt einer Zweischicht-Pararendzina unter Kiefernjungbeständen im Trockengebiet am südlichen Oberrhein. *Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges.*, S. 149 - 159.
- JAEGER, L. (1978): Die klimatologische Meßstation Hartheim des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg i. Br., *Ber. Naturf. Ges. Freiburg*, **68**, S. 47 - 73.
- JAEGER, L. (1980): Prozeßrechner in der Mikroklimatologie. *Siemens Energietechnik*, **2**, S. 16 - 18.
- JAEGER, L. (1984): Zehn Jahre Niederschlagsmessungen über einem Kiefernwald im angehenden Stangenholzalder. *Wetter und Leben*, **36**, S. 149 - 158.
- JAEGER, L., GARTHE, H.-J. u. KESSLER, A. (1986): The climatological site Hartheim. Its philosophy, design and special measuring results. *Freiburger Geogr. H.*, **26**, S. 189 - 199.
- KESSLER, A. (1973): Zur Klimatologie der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Tages- und Jahresgänge in den Klimaten der Erde. *Erdkunde*, **27**, S. 1 - 10.

- KESSLER, A., JAEGER, L. u. SCHOTT, R. (1979): Die Auswirkungen der Sonnenfinsternis vom 29. April 1976 auf die Energieströme an der Erdoberfläche. Meteorol. Rdsch., **32**, S. 109 - 115.
- KESSLER, A. u. JAEGER, L. (1994): Mittlere Tages- und Jahrgänge der Strahlungsbilanz und ihrer Komponenten über einem südwestdeutschen Kiefernwald. Erdkunde, **48**, S. 14 - 33.
- KÜNSTLE, E. (1991): Bedeutung des Standraums für die Produktivität am Beispiel von Kiefernbeständen. Allg. Forstz., **21**, S. 1081 - 1085.
- MERKEL, H. (1984): Über den Witterungseinfluß auf die Jahrringstruktur der Gemeinen Kiefer (*Pinus silvestris* L.) Diss. Geowiss. Fak. Univ. Freiburg, 192 S., Freiburg i. Br.
- MONIN, A.S. u. OBUCHOV, A.M. (1958): Fundamentale Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Vermischung in der bodennahen Schicht der Atmosphäre. In: GOEHRING, H.: Sammelband zur statistischen Theorie der Turbulenz. Akademie-Verlag, Berlin, S. 199 - 226.
- OHMURA, A. (1982): Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. J. Appl. Meteorol., **21**, S. 592 - 598.
- REIFSNYDER, W.E. (1982): The role of forests in the global regional water and energy balance. WMO, Agr. Meteorol. CAgM Report Nr. **8**, 33 S.
- SALIHI, O.O.A. (1984): Potentielle Verdunstung eines Buchen- und eines Fichtenwaldes auf der Basis von Daten des Deutschen Wetterdienstes als Parameter der aktuellen Evapotranspiration. Diss. Forstl. Fak. Göttingen, 92 S.
- SCHOTT, R. (1980): Untersuchungen über die Energiehaushaltskomponenten in der atmosphärischen Grenzschicht am Beispiel eines Kiefernbestandes in der Oberrheinebene (Hartheim, Rh.), Ber. Dt. Wetterd. Nr. **153**, 58 S.
- TAJCHMAN, S.J. (1981): Comments on measuring turbulent exchange within and above forest canopy. Bull. Amer. Meteorol. Soc., **62**, S. 1550 - 1559.
- TETZLAFF, G. (1974): Der Wärmehaushalt der zentralen Sahara. Ber. Inst. Meteorol. Klimatol. TU Hannover, **13**, 113 S.

Eingang des Manuskripts 26.01.1996

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 1996/1997

Band/Volume: [86-87](#)

Autor(en)/Author(s): Jaeger Lutz

Artikel/Article: [Der Hartheimer Kiefernwald als klimatologische Datenquelle 1-20](#)