

# Zum Verhältnis von Strahlungsenergie und Verdunstung

R. GUENTHER

## Abstract

Many years investigations to the relationship of irradiated energy (global radiation) and the water consumption of agricultural cultures and several kinds of vegetable show a clear dependence on the soil water content, the plant type and development as well as on the meteorological conditions. For the evaporation of the uncovered soil (EB) in high soil water conditions in single periods were claimed up to 60% and for the evapotranspiration (ET) of fully developed plants even over 80% of the radiation energy. On single days the evaporation were larger than the available radiation energy. The reason for that were additional energy components such as soil heat and advective supplied energy. In the total investigation period were consumed in the nonirrigated or reduced irrigated variant 39% of the irradiated energy, for the evaporation in the irrigated variant 41%. Further it was found, that the plants with increasing development also use more water, with the same energy input. The quantification of the radiation parts which are used for the evaporation represent important results for the modelling.

## Einleitung

Die Verdunstung ist ein energetischer Vorgang, bei dem durch einen Mittler (z.B. Pflanze) Wasser unter Energiezufuhr in die gasförmige Phase überführt wird.

Die auf die Erdoberfläche auftreffende Strahlungsenergie wird hauptsächlich zur Verdunstung von Wasser, zum turbulenten Wärmeaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre sowie zur Erwärmung des Bodens beansprucht, wobei in gemäßigten geographischen Breiten der Anspruch für die Verdunstung überwiegt. Der Energieanteil, der für die Verdunstung genutzt wird, hängt von der verfügbaren Wassermenge ab. Dabei wird die Verfügbarkeit von

den Kräften mit denen das Wasser im Boden und in der Pflanze gebunden ist sowie von der verdunstenden Oberfläche (bezogen auf eine Flächeneinheit) bestimmt. Bei einem Pflanzenbestand ist somit der verdunstungsgebundene Energieanteil vom Bodenwassergehalt (Bindungskräfte) sowie von der Pflanzenentwicklung (verdunstende Oberfläche und Bindungskräfte) abhängig. HOFFMANN (1987) gibt einen Strahlungsenergieverbrauch durch Transpiration und Evaporation von 48% an. Für die Photosynthese werden dagegen nur 2 bis 5% der eingestrahelten Energie genutzt (HOFFMANN 1987).

Auf Grund der differenzierten Verdunstungsbedingungen ergibt sich eine relativ große Variabilität hinsichtlich der für die Verdunstung beanspruchten Strahlungsenergieanteile.

Die Quantifizierung dieser Anteile kann als Voraussetzung für die Weiterentwicklung von Verfahren zur Verdunstungsbestimmung angesehen werden.

## Material und Methoden

Den Untersuchungen liegen Daten der Lysimeterstation Großobringen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft von 1983 bis 2003 zu Grunde. Der Pflanzenwasserverbrauch (Evapotranspiration ET) und die Evaporation des Bodens (EB) wurden mit wägbaren Lysimetern gemessen (ROTH et al., 1994). Sie sind in zweifacher Wiederholung in zwei ca. 300 m voneinander getrennten Lysimeterkellern (ohne und mit Beregnung) inmitten eines landwirtschaftlichen Produktionschlages installiert. Die Auswägeeinrichtungen der Lysimeterbehälter erlauben eine kontinuierliche Wägung derselben mit einer Genauigkeit von 100 g (= 0,05 mm Wassergehaltsänderung in den Lysimetern). Im Untersuchungszeitraum wurden sowohl auf den Lysimetern als auch auf der umgebenden Fläche die wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen und mehrere Ge-

müsearten unter unberegneten bzw. reduziert beregneten (Lysimeteranlage 2) und potentiell beregneten Bedingungen (Lysimeteranlage 1) angebaut. Zur Ermittlung der Bodenevaporation wurden Lysimeterwerte der Zeiträume ohne Bewuchs (vor dem Auflaufen und nach der Ernte) herangezogen.

Die Messung des Strahlungsenergieangebotes erfolgte bis 1991 mit einem Pyranometer vom Typ PRM1 (SONNTAG, 1963), ab 1992 vom Typ CM11. Beide Sensoren waren bzw. sind für einen Spektralbereich von 0,28...2,9  $\mu\text{m}$  (Globalstrahlung) ausgelegt.

Um eine Beziehung zwischen der gemessenen Verdunstung und der Strahlungsenergie herzustellen, wurde eine der Strahlung äquivalente Verdunstungsgröße ( $\dot{A}V$ ) eingeführt, der ein Energiebedarf von 2,45 MJ für die Verdunstung von 1 kg Wasser ( bei 20°C) zu Grunde liegt.

## Ergebnisse und Diskussion

### Strahlungsenergie und Evaporation

Die Evaporation des unbedeckten Bodens (EB) hängt einerseits vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre und andererseits vom Wassergehalt der oberen Bodenschicht (0 bis 5 cm) ab. Da letzterer durch das Niederschlagsgeschehen bestimmt wird, besteht auch ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Niederschlag und EB (*Abbildung 1*).

Niederschlag führt - gleichen Verdunstungsanspruch vorausgesetzt - stets zum Ansteigen der Evaporation, die an niederschlagsfreien Folgetagen sehr schnell auf Werte unter 1mm abfällt. Erst eine erneute Befeuchtung des Oberbodens hat wieder einen nennenswerten Anstieg der EB zur Folge.

Demnach wird der für die EB beanspruchte Strahlungsanteil vom Wassersättigungsgrad der obersten Bodenschicht bestimmt. Bei Vorliegen poten-

**Autor:** Dr. Reinhard GUENTHER, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburger Str. 98, D-07742 JENA

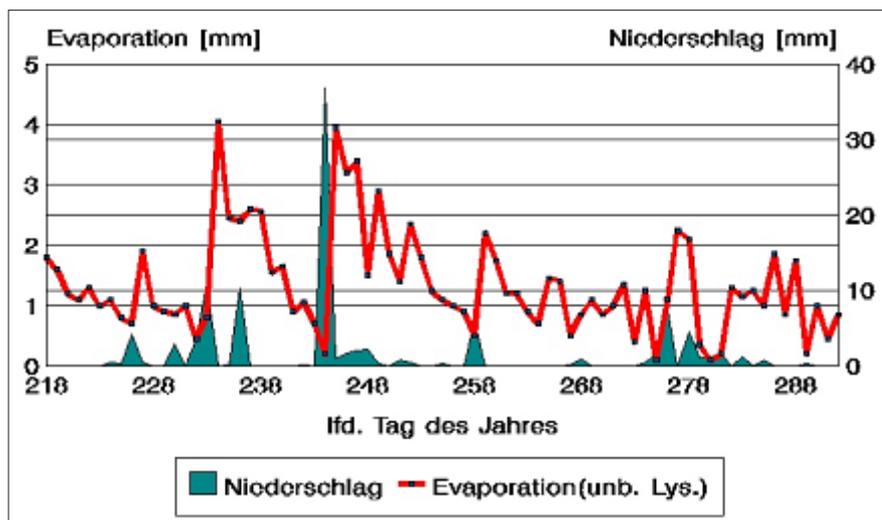


Abbildung 1: Abhängigkeit der Evaporation vom Niederschlag (Bodenwassergehalt)

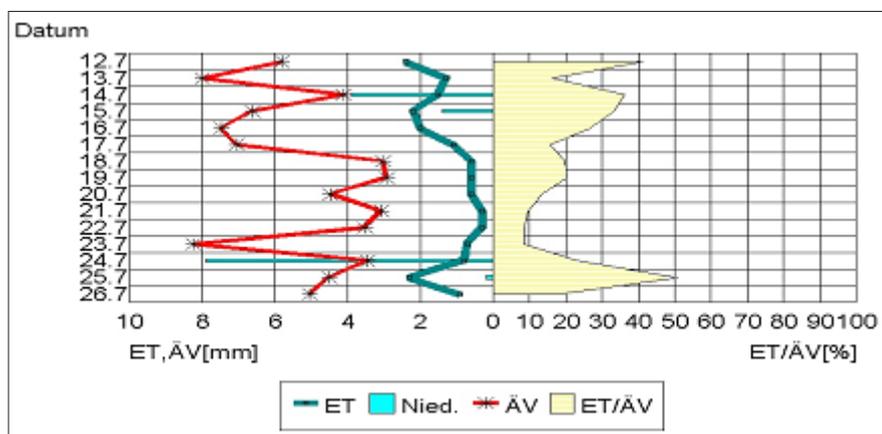


Abbildung 2: Energieanteil für die Evaporation in Abhängigkeit von Verdunstungsanspruch und vom Bodenfeuchtegehalt

tieller Verdunstungsbedingungen (Bodenfeuchtegehalt  $>80\%$  nFK) werden bis zu 60% der eingestrahlten Energie für die Evaporation genutzt. Fallen die Feuchtegehalte unter diesen Grenzwert ab, verringern sich auch die für die Verdunstung beanspruchten Energieanteile. Der Abfall dieser Energieanteile erfolgt beim Ausbleiben von Niederschlag unmittelbar, da die für die Bodenevaporation relevante Bodenschicht nur geringmächtig ist und deshalb nur wenig Wasser speichern kann. Selbst beim sehr speicherfähigen Löß des Lysimeterstandortes beträgt der nutzbare Wassergehalt in der 5 cm Schicht höchstens 8 mm. *Abbildung 2* zeigt dies an Messwerten vom 12. bis 26. Juli 2000 in anschaulicher Weise. Am 14.07. fiel Niederschlag, der einen unmittelbaren Anstieg des Quotienten  $ET/\dot{A}V$  zur Folge hatte. Danach setzte ein nahezu kontinuierli-

cher Abfall des Quotienten ein, der erst wieder am 24.07. durch das Niederschlagsangebot von 7,9 mm angehoben wurde und einen Wert über 50% annahm. An den Folgetagen ohne nennenswerten Niederschlag war wiederum eine stetige Abnahme zu verzeichnen. Damit liegen bei gesättigtem Boden annähernd vergleichbare Quotienten für die Verdunstung wie bei freien Wasserflächen vor (GEIGER, 1961; SCHÄFER et. al., 1984). Aus *Abbildung 2* ist weiterhin zu ersehen, dass der Strahlungsenergieanteil für EB auch eine Abhängigkeit von der Höhe des Verdunstungsanspruches ( $\dot{A}V$ ) aufweist. So ist am 18. und 19. Juli bei niedrigerem Verdunstungsanspruch ein höherer Energieverbrauch (ca. 20%) feststellbar als am 17.07. (ca. 15%), obwohl der Bodenwassergehalt in der verdunstungsrelevanten Bodenschicht am 17. Juli höher war als am 18. und 19.

Juli. Dies bedeutet, dass ein bestimmter Bodenwassergehalt bei geringem Verdunstungsanspruch eher eine potentielle Verdunstung zulässt als bei hohem Verdunstungsanspruch. Dies gilt auch bei bewachsenem Boden und wird deshalb auch in Bodenfeuchte-Verdunstungsmodellen entsprechend berücksichtigt.

### Strahlungsenergie und Evapotranspiration

Zwischen dem Pflanzenwasserverbrauch (ET) und der strahlungsäquivalenten Verdunstungsmenge ( $\dot{A}V$ ) besteht in der Hauptwachstumsperiode bei gleichzeitig uneingeschränkter Bodenwasserversorgung eine enge Beziehung. Mit zunehmender Entwicklung des Blattapparates der Pflanzen und der damit einhergehenden Erhöhung des Wasserverbrauches steigt der Energieanteil für die ET an und erreicht bei voll entwickelten Beständen in einzelnen Dekaden Werte über 80% der insgesamt eingestrahlten Energie. Bei Zuckerrüben 1988 wurden in der 19. Dekade, d. h. kurz nach Bestandesabschluss, sogar 88% der Globalstrahlung (die bedeutet nahezu 100% der Nettostrahlung) für die Verdunstung genutzt (*Abbildung 3*). Nach dem Hauptwachstumsstadium mit Alterung des Blattapparates fällt der für die ET beanspruchte Strahlungsenergieanteil wieder ab. Bei den als Beispiel angeführten Zuckerrüben ist dies ab der 24. Dekade, bei Zwiebel nach der 20. Dekade (*Abbildung 4*) der Fall.

Generell gilt, dass in Stadien mit voll entwickeltem Blattapparat der Höchstwert des Strahlungsenergieverbrauches für die Evapotranspiration erreicht wird. Die Maximalwerte weisen hinsichtlich des Betrages keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Fruchtarten auf, wenn die Pflanze im Wachstumsverlauf einen nicht limitierenden Wasservorrat vorfindet.

### Energieausnutzung an Einzeltagen

An Einzeltagen können Verdunstungswerte auftreten, die über der äquivalenten Verdunstung liegen, d.h. es wird mehr verdunstet als an Strahlungsenergie zur Verfügung steht. Dies tritt vorwiegend in Zeiträumen auf, in denen sich in der

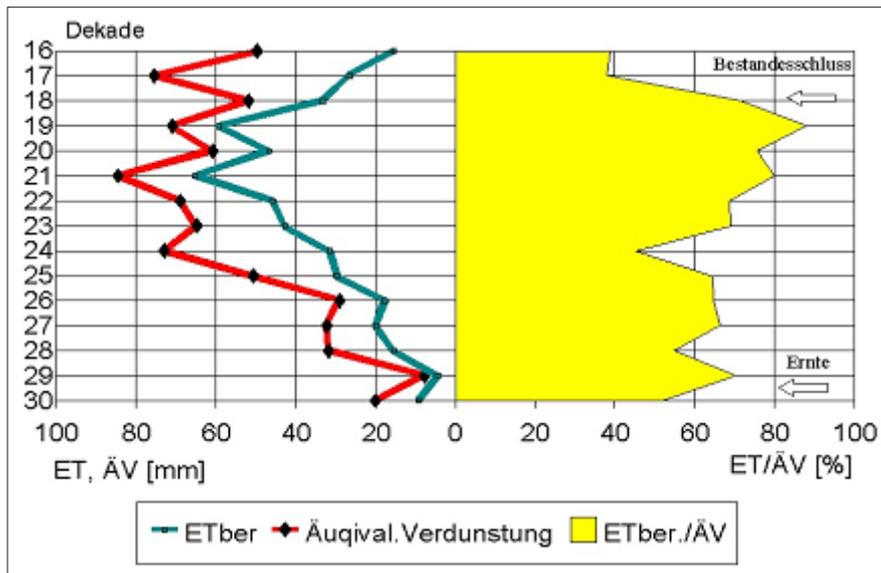


Abbildung 3: Energieanteil für die Verdunstung bei Zuckerrüben 1988

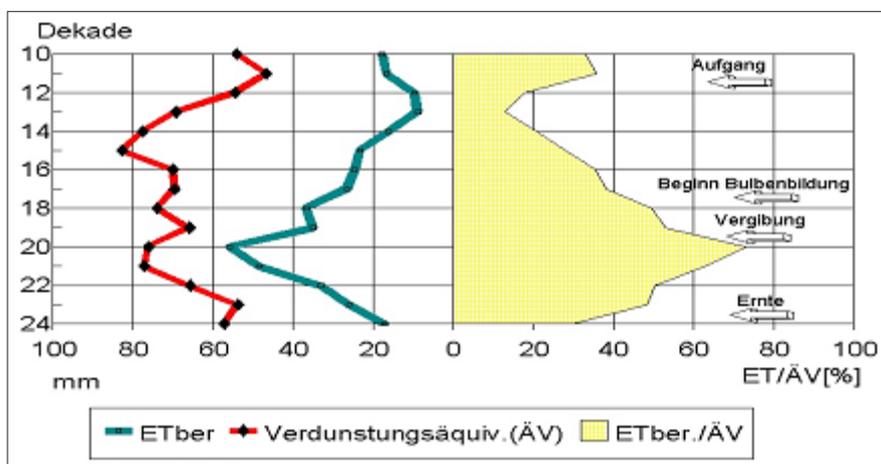


Abbildung 4: Strahlungsenergieanteil für die Verdunstung bei Zwiebeln 1999

Nachbarschaft befindliche, unbewachsene Flächen durch Einstrahlung stark erwärmen und die dadurch entstehenden warmen Luftmassen advektiv über den Pflanzenbestand geführt werden. Dadurch stehen neben der Strahlung zusätzliche Energiebeiträge sowohl für die Evapotranspiration als auch für die Evaporation zur Verfügung.

Am Beispiel der 1984 auf den Lysimetern angebauten Zuckerrüben ist zu erkennen (Abbildung 5), dass im Verlaufe der Wachstumsperiode die ET vor allem dann die ÄV übersteigt, wenn benachbarte Flächen noch bzw. wieder unbewachsen sind und so besonders mit zusätzlichen Energiebereitstellungen zu einer erhöhten Verdunstung beitragen. Dies war 1984 nach dem 10. August (223. Tag des Jahres) der Fall. Ab diesem Zeitpunkt bis zur Ernte lag die ET

an 4 Tagen über der aus der verfügbaren Strahlungsenergie berechneten Verdunstung. In der gesamten Wachstumszeit der Zuckerrübe (182 Tage) trat dieser Fall 5 mal auf. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in allen anderen Jahren festgestellt, in denen die vorgenannten Bedingungen vorlagen.

Unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen Netto- und Globalstrahlung, das mit einem Schwankungsbereich von 0,56...0,74 angegeben wird (MEYER, 1981; SCHÄFER et al., 1985), stellten auch BRUN et al. (1985) eine höhere Verdunstung als strahlungsbedingt möglich fest. Bei hohem Bodenfeuchteniveau (1981) trat dieser Fall an 22 von 55 Tagen ein, bei niedrigen Bodenfeuchtegehalten (1982) nur an 5 von 72 Tagen. Bei diesen Untersuchungen wurde allerdings die Nettostrahlung

(Globalstrahlung minus langwellige Reflexstrahlung) zur Bestimmung der äquivalenten Verdunstung herangezogen, wodurch die Anzahl der Tage mit erhöhter ET prinzipiell größer ausfällt als bei Verwendung der Globalstrahlung. Die Ergebnisse von BRUN et al. zeigen ebenfalls, dass der Bodenfeuchtegehalt einen wesentlichen Einfluss auf den Anteil der für die Verdunstung verbrauchten Strahlungsenergie hat.

### Energiebilanzen für den gesamten Untersuchungszeitraum

Für den 21-jährigen Untersuchungszeitraum ergaben sich für Perioden mit unterschiedlichen Bedeckungsgraden deutlich von einander abweichende Anteile der eingestrahelten Energie für die Verdunstung. In Zeiträumen ohne Bewuchs wurden im Mittel 32% der Globalstrahlung für die Verdunstung verbraucht. (Tabelle 1). In den Einzeljahren schwankten die Werte zwischen 16% und 60%. Im Zeitraum von Aufgang bis Ernte steigt der Anteil unter berechneten Bedingungen (höherer Bodenwassergehalt) auf 45%, in der Hauptwachstumsperiode (Bestandesschluss bis beginnende Reife) sogar auf 57% an. In Einzeljahren (z.B. 2000, Blumenkohl) wurden in dieser Periode bis zu 77% der eingestrahelten Energie für die Verdunstung genutzt.

Bei unberechneten Beständen betragen diese Anteile 43% bzw. 53%.

Die Gesamtjahresbilanz weist bei unberechneten bzw. nicht potentiellen Bedingungen im Mittel einen 39%-igen Anteil der Strahlungsenergie für die Verdunstung aus, wobei die Werte in den Einzeljahren zwischen 26% und 51% schwankten. Unter berechneten Bedingungen ergaben sich bei nicht baren Flächen höhere Energieanteile für die Verdunstung. Dies ist gegenüber der unberechneten Variante auf einen durchschnittlich höheren, dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre eher entsprechenden Bodenwassergehalt zurückzuführen.

Der auch hier erkennbare dominierende Einfluss der Strahlung auf die Verdunstung ist ein weiterer Hinweis darauf, für die Verdunstungsbestimmung vorrangig auf Verfahren mit Strahlungsgliedern zu orientieren.

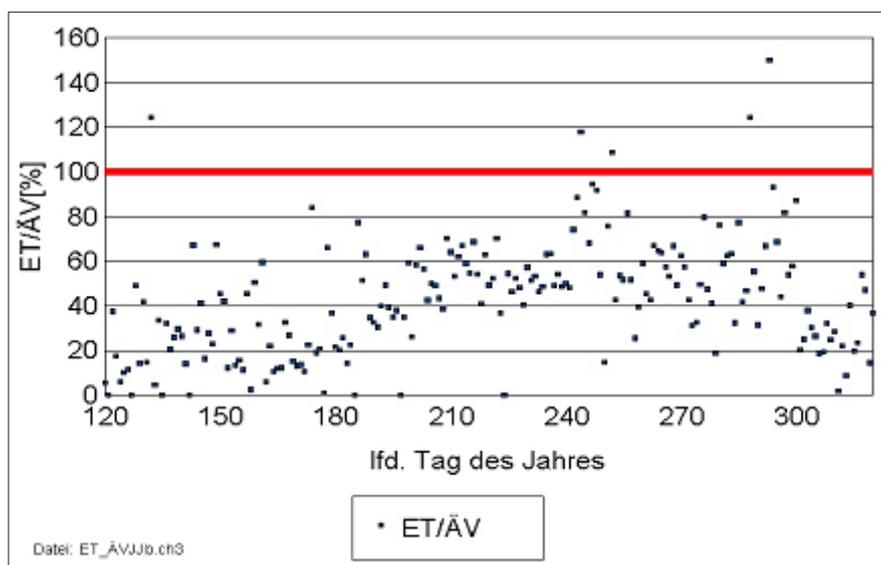


Abbildung 5: Quotienten aus ET und äquivalenter Verdunstung bei berechneten Zuckerrüben 1984 (Tageswerte vom 29.4. bis 15.11.)

Tabelle 1: Strahlungsenergieverbrauch für die Verdunstung bei unterschiedlichen Bedeckungsgraden (Mittel der Jahre 1983-2003)

Zeitraum	Mittelwert ET/ÄV [%]		Schwankungsbreite ET/ÄV [%]	
	unb.	ber.	unb.	ber.
ohne Bewuchs	32		16..60	
Aufgang-Ernte	43	45	25..56	36..57
Bestandesschluss bis beginnende Reife (Vergilbung)	53	57	32..68	37..77
<b>Gesamtjahr</b>	<b>39</b>	<b>41</b>	<b>26..51</b>	<b>32..54</b>

## Zusammenfassung

Vieljährige Untersuchungen zum Verhältnis von eingestrahelter Energie (Globalstrahlung) und dem Wasserverbrauch von landwirtschaftlichen Kulturen und mehreren Gemüsearten zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt, der Pflanzenart und -entwicklung sowie von den meteorologischen Bedingungen. Für die Evaporation des unbedeckten Bodens (EB) wurden bei hoher Bodenwasserversorgung in einzelnen

Dekaden bis zu 60% und für die Evapotranspiration (ET) vollentwickelter Pflanzenbestände sogar über 80% der zur Verfügung stehenden Strahlungsenergie beansprucht. An Einzeltagen nahm die Verdunstung (ET und EB) höhere Werte an, als dafür an Strahlungsenergie zur Verfügung stand, hervorgerufen durch Verfügbarkeit weiterer Energiekomponenten (Bodenwärme, advektiv zugeführte Energie). Im gesamten Untersuchungszeitraum wurden bei der unberechneten bzw. reduziert berechneten

Variante 39% der eingestrahlenen Energie für die Verdunstung verbraucht, bei der berechneten 41%. Es zeigte sich weiterhin, dass die Pflanzenbestände mit fortschreitender Entwicklung ihres Blattapparates und Wurzelsystems bei gleicher Energiezufuhr zunehmend mehr Wasser verdunsten. Die Quantifizierung der für die Verdunstung von pflanzenbaulich genutzten Flächen verbrauchten Strahlungsanteile stellt für die Modellierung eine nutzbare Erkenntnis dar.

## Literatur

- BRUN, L.J., J. ENZ and J.K. LARSEN, 1985: Evaluation of energy balance and water use by spring wheat during a normal and a dry season. - In: Agric. and Forest. Meteorology. - Amsterdam 35, S. 103-111.
- GEIGER, R., 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht. - Vieweg-Verlag, Braunschweig, 646 S.
- HOFFMANN, P., 1987: Photosynthese. - Berlin, 304 S.
- MEYER, H., 1981: Strahlungsmessungen über einem Ackerboden, einem Maisfeld und einem Weingarten. - In: Agric. Meteor. - Amsterdam 23, S. 317-330.
- ROTH, D., R. GÜNTHER und S. KNOBLAUCH, 1994: Technische Anforderungen an Lysimeteranlagen für die Übertragbarkeit von Lysimeterergebnissen auf landwirtschaftliche Nutzflächen, Bericht 4. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 19.-20.04.1994, S.9-21.
- SCHÄFER, W. und G. KNOF, 1984: Schätzung des Wasserverbrauches von berechneten Pflanzenbeständen mit Hilfe eines flachen Verdunstungskessels. - In: Arch. Acker- u. Pflanzenb. u. Bodenk., Berlin 28, 8, S. 451-456.
- SCHÄFER, W., L. KLANK und W. SCHÖNE, 1985: Beziehungen zwischen Strahlungsbilanz, Globalstrahlung und photosynthetisch aktiver Strahlung zueinander im Tagesgang und im Verlauf der Vegetationsperiode. - In: Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenk. - Berlin 29, 2, S. 91-97.
- SONNTAG, D., 1963: Ein Pyranometer bzw. Effektivpyranometer mit galvanisch erzeugter Thermosäule. - Z. Meteor., Berlin 12,1, S. 49-56.