

---

## Kapitel 8

# Temperaturen und Strahlungshaushalt von Waldquellen

Werner Gräsle und Carl Beierkuhnlein

### 1. Einleitung

Neben den chemischen Standorteigenschaften stellen die physikalischen Gegebenheiten eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung von Lebensgemeinschaften dar. Für Quellen werden insbesondere für die physikalischen Umweltparameter mehr oder minder konstante Verhältnisse angenommen. Sollen die Auswirkungen geochemischer Variabilität auf die Artenzusammensetzung oder auf den Zustand von Organismen beurteilt werden, muss jedoch auch die Variabilität anderer Standorteigenschaften bekannt sein. Dies, und die offensichtliche Tatsache der Auswirkungen unterschiedlichen Lichtangebotes auf die Vegetation an Waldquellen, war die Motivation sich eingehender mit den Temperaturen und dem Lichtangebot solcher Standorte zu befassen.

### 2. Temperaturhaushalt

Die Temperaturverhältnisse eines Standorts ergeben sich aus dem Zusammenspiel aller relevanten Austausch-, Transport- und Umwandlungsmechanismen, an denen fühlbare oder latente Wärme beteiligt sind. In Tab. 8.1 sind die wichtigsten derartigen Prozesse zusammengestellt. Aufgrund unterschiedlicher Bedeutung der einzelnen Prozesse ergeben sich charakteristische Unterschiede im Temperaturhaushalt an verschiedenen Standorten.

Das auffälligste kleinklimatische Charakteristikum der Quellfluren besteht in ihren ausgeglichenen Temperaturverhältnissen. Bedingt durch die intensive Bindung an den annähernd isothermen Grundwasser- und Bodenwasserspeicher sind tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen im Vergleich zu quellfernen Standorten stark gedämpft. An Waldquellen kommen noch zwei weitere temperatenausgleichende Effekte hinzu: Zum einen bewirkt die relativ geringe Luftbewegung in Wäldern eine Herabsetzung advektiver Wärmeflüsse über die Luft und damit eine weitgehende Abkopplung vom thermischen Geschehen in der Atmosphäre, das seinerseits große zeitliche Amplituden aufweist. Zum anderen wird die tägliche Strahlungsbilanzkurve stark geglättet, weil das Kronendach der Bäume sowohl die tägliche Einstrahlung als auch die nächtliche Abstrahlung reduziert. Somit ist bei Waldquellen die Kopplung an Wärmepools geringer Temperaturschwankung erhöht, an solche mit hoher Temperaturamplitude dagegen reduziert.

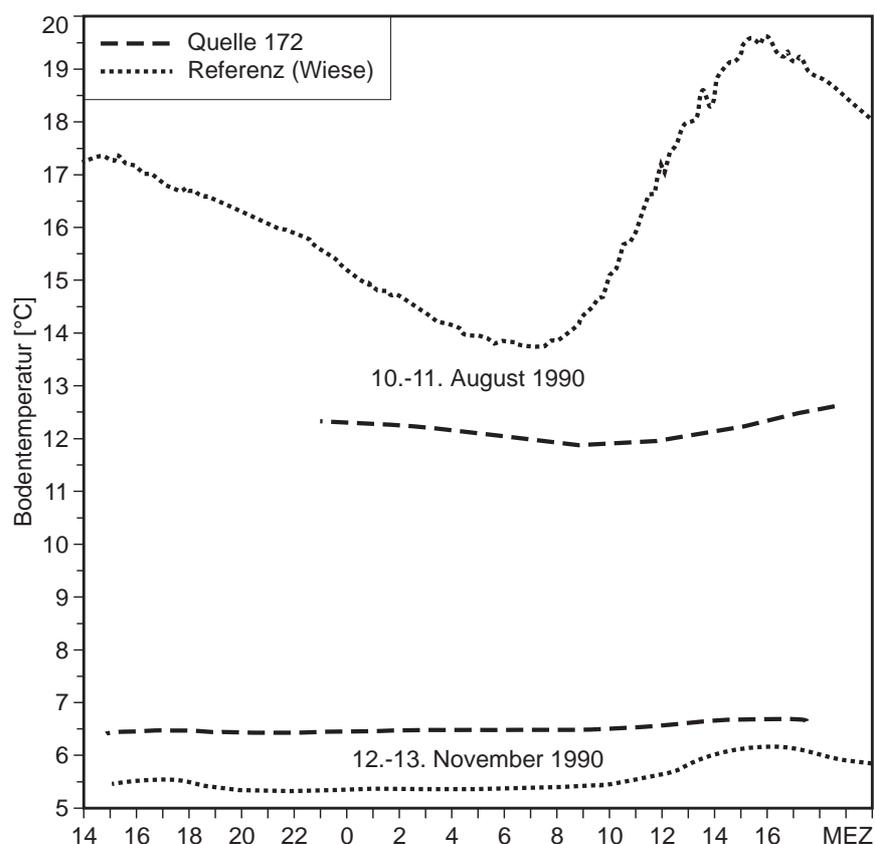
**Tab. 8.1:** Die wichtigsten Austausch- und Umsetzungsprozesse fühlbarer und latenter Wärme in terrestrischen Ökosystemen.

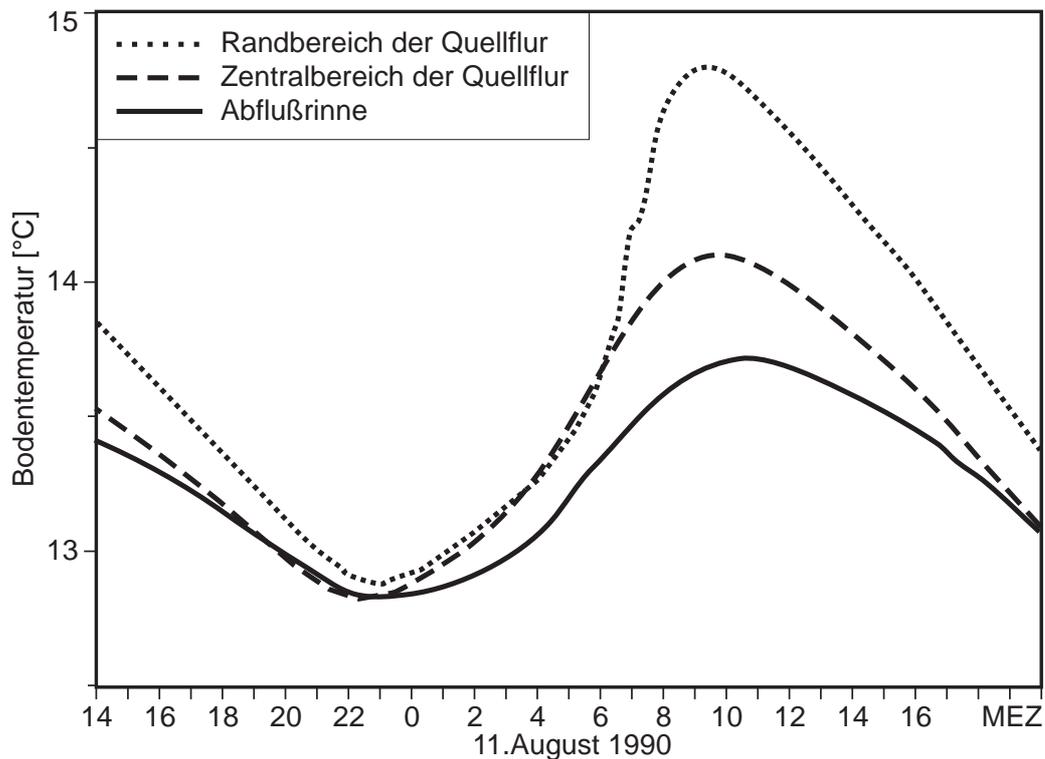
Prozess	koppelnder externer Energiepool	Bedeutung
Absorption und Emission elektromagnetischer Strahlung	Strahlungsfeld (zeitlich extrem variabel mit ausgeprägtem Tages- und Jahresrhythmus)	in fast allen terrestrischen Ökosystemen größter Energieumsatzterm
Wärmeleitung im Boden	Bodenwärmespeicher (annähernd isotherm)	langsamer Prozess
Wärmeleitung in der Luft	Wärmepool der bodennahen Luftschicht (starker Tages- und Jahresrhythmus)	langsamer Prozess
Wärmeadvektion durch Bodenwasser	Grundwasser- und Bodenwärmespeicher (annähernd isotherm)	nur bei rascher Bodenwasserbewegung relevant (Starkregen, Quellbereiche)
Wärmeadvektion durch Luft und Niederschläge	Wärmepool der bodennahen Luftschicht (starker Tages- und Jahresrhythmus)	bei stärkerer Luftbewegung relevanter Prozess; großräumig bedeutend für den Witterungsablauf
Advektion latenter Wärme	Wasserdampfgehalt der Atmosphäre	großräumig bedeutend für den Witterungsablauf
Umsatz latenter Wärme	(lokale Umwandlung zwischen fühlbarer und latenter Wärme durch Phasenübergänge)	bei hoher Evapotranspiration relevant; wichtigster Regulationsmechanismus für die Bestandesdeckentemperatur
Wärmebilanz chemischer Reaktionen	—	i. a. vernachlässigbar

Besonders klar geht die thermische Ausgeglichenheit des Quellmilieus aus dem direkten Vergleich von Bodentemperaturkurven aus Quellfluren mit zeitgleichen Messungen an quellfernen Standorten hervor. Die starke Dämpfung der täglichen und jährlichen Temperaturamplitude zeigt exemplarisch Abb. 8.1 für eine Quelle im Frankenwald (GRÄSLE 1992). Dies macht Quellbereiche zu sommerkühlen Standorten, während sie im Winter Wärmeinseln darstellen, die oft schneefrei bleiben. Ein tieferes Eindringen von Frösten in den Boden ist auszuschließen, allerdings kann es aufgrund des hohen Angebots an Wasser während längerer Perioden mit strengen Frösten zu mehrere Zentimeter bis Dezimeter mächtigen Kammeisbildungen kommen.

Die entscheidende Bedeutung, die dem advektiven Wärmetransport durch das Quellwasser für die Einstellung der Temperaturverhältnisse in der Quellflur zukommt, äussert sich in der deutlichen Abnahme diurnaler Temperaturschwankungen von den schwächer durchrieselten Rändern zum intensiver durchströmten Kernbereich der Quellfluren (Abb. 8.2).

Der gleiche Effekt zeigt sich auch in den beobachteten Korrelationen zwischen Schüttung und Quellwassertemperatur (BEIERKUHNEIN & GRÄSLE 1993). Selbst mit einem relativ groben Verfahren wie dem Schätzen der Schüttungsintensität auf einer 10-teiligen Schätzskala konnte GRÄSLE (1992) im Winter positive und im Sommer negative signifikante Korrelationen nachweisen (Abb. 8.3). In den Übergangszeiten, wenn die mittleren Tagestemperaturen etwa den Jahresmitteltemperaturen entsprechen, sind dagegen erwartungsgemäß keine signifikanten Korrelationen zwischen Quellwassertemperatur und Schüttung zu finden.

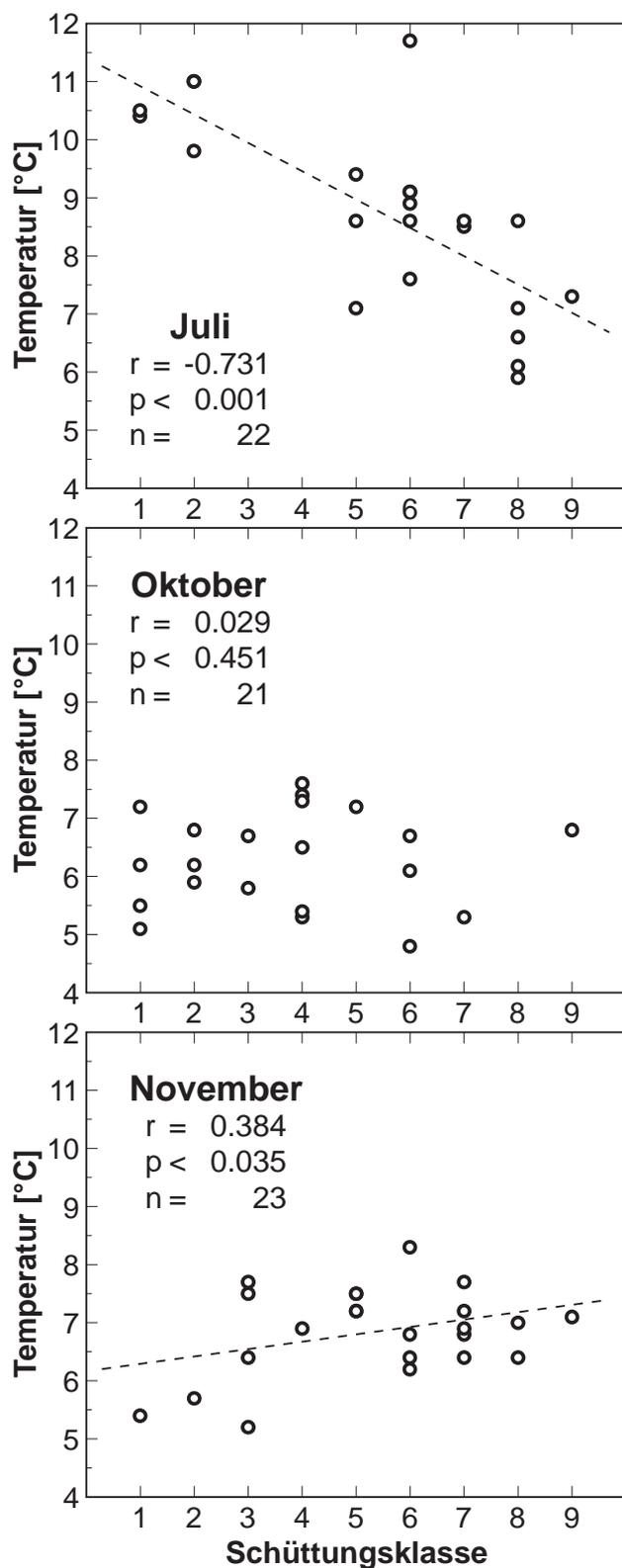




**Abb. 8.2:** Bodentemperaturverlauf in 5 cm Tiefe an drei Stellen einer Waldquellflur. Die Dämpfung der täglichen Temperaturschwankung wird mit abnehmender Wasserzügigkeit immer schwächer.

Je stärker die Quellschüttung ist, umso schneller verläuft die Bodenwasserbewegung im Oberboden der Quellflur, und umso geringer ist der Einfluss der momentanen Lufttemperatur auf die thermischen Verhältnisse an der Quelle, da die geringen Verweilzeiten des Wassers in den oberflächennahen Bereichen der Quellflur im Sommer kaum eine Erwärmung, im Winter kaum eine Abkühlung des Bodenwassers zulassen. Neben der Schüttung beeinflusst auch die Ausdehnung des Quellbereichs die Verweilzeit des Wassers in der Aktivzone (WILHELM 1956), also in oberflächennahen Bereichen mit wirksamem Wärmeaustausch mit der Luft. Daher weisen bei vergleichbarer Schüttung weitläufige Quellsümpfe, wie sie auf den Hochflächen des Frankenwaldes häufig auftreten, deutlich höhere Amplituden der Quellwassertemperatur auf als kleinräumige Quellen, die besonders für steilere Hanglagen typisch sind. So war z. B. für 23 Quellen im Frankenwald eine hochsignifikante Abhängigkeit ( $R^2=0.403$ ,  $p=0.0056$ ) der Jahrestemperaturamplitude  $\Delta T_{\text{year}}$  des Quellwassers von der Fläche  $A_Q$  und dem zeitlichen Mittel  $\bar{S}_Q$  der Schüttungsklasse feststellbar:  $\Delta T_{\text{year}} = 3.05^\circ\text{C} + 4.74^\circ\text{C} \ln(A_Q / \text{m}^2) - 0.564^\circ\text{C} \bar{S}_Q$ .

Besonders ausgeglichene Temperaturjahresgänge zeigt dementsprechend das Quellwasser rheokrener Quellen stärkerer Schüttung. Dort kann die maximale Temperaturschwankung geringer als  $1^\circ\text{C}$  sein.



**Abb. 8.3:**  
Korrelation zwischen Quellschüttung und Quellwasser-Temperatur zu verschiedenen Jahreszeiten.

### 3. Strahlungshaushalt

Um den Einfluss der Einstrahlung auf die Vegetation sowie auf das Temperaturverhalten an Quellstandorten zu untersuchen wurden eingehende Strahlungsmessungen an 23 Quellen durchgeführt. Wie alle Waldbodenphytozönosen werden auch Waldquellfluren in ihrem Lichtklima entscheidend von Zusammensetzung der Baumschicht geprägt. Da in den kontinental getönten stark reliefierten Mittelgebirgen keine Bäume innerhalb der Quellfluren wurzeln, befindet sich je nach Größe des Quellbereichs über ihm meist eine mehr oder weniger große Lücke im Kronendach, wodurch das Lichtangebot<sup>1)</sup> für die Quellvegetation etwas größer ist als an quellfernen Stellen des Waldbodens.

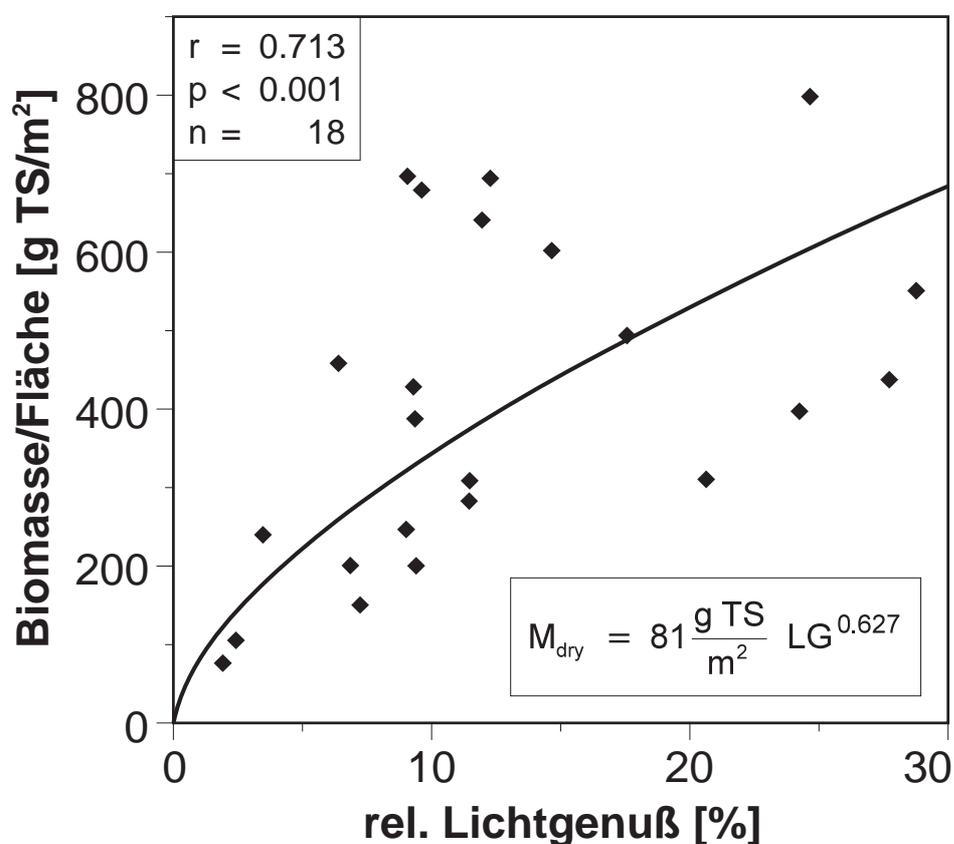
Das Lichtangebot stellt eine entscheidende Steuerungsgröße für die Struktur der Quellvegetation dar (GRÄSLE 1992), wobei außer in Quellen mit ausgeprägt saurem Millieu (Quellwasser-pH unter 5) ein- bis zweischichtige (selten dreischichtige) Phanerogamenbestände entstehen, meist ergänzt durch eine Moosschicht. Das Lichtangebot in den unteren Schichten wird dabei durch die oberen Schichten modifiziert.

In Laubholzbeständen, insbesondere unter Buche, ist das relative Lichtangebot für kleinflächige Quellfluren (unter 100 m<sup>2</sup>) im Sommer sehr gering, da die Buche über der Quelle meist zum Kronenschluss gelangt. Sommerliche relative Lichtgenüsse unter geschlossenen Buchenbeständen liegen meist zwischen 2% und 5% (GRÄSLE 1992, HARTMANN et al. 1959). Da dies das Lichtbedürfnis praktisch aller höherwüchsigen Quellflurarten unterschreitet, kommt es hier nur zur Ausbildung einer einschichtigen Quellvegetation, die i. a. von *Chrysosplenium oppositifolium*, bisweilen mit starkem Hinzutreten von *Cardamine amara*, dominiert wird, sofern das boden- und wasserchemische Millieu für diese Spezies nicht zu sauer wird. Entsprechend der phänologischen Entwicklung der Buche weist das relative Lichtangebot einen ausgeprägten Jahresgang auf, der nach dem Laubfall Werte über 40% erreichen kann. Dies erlaubt es zum Teil auch Frühjahrsgeophyten wie *Allium ursinum* sich in diesen Quellfluren zu etablieren.

In Forsten mit führender Fichte unterliegt der relative Lichtgenuss der Quellfluren erwartungsgemäß nur marginalen jahreszeitlichen Schwankungen, wobei aufgrund des schmalkronigen Habitus der Fichte selbst über kleinflächigen Quellen bereits eine Bestandeslücke auftritt. Daher überschreitet das relative Lichtangebot meist ganzjährig 7%. Dies genügt für eine sehr vitale Entwicklung von *Impatiens noli-tangere*, so dass diese hochwüchsige Annuelle eine zweite Krautschicht über der auch hier vorhandenen *Chrysosplenium oppositifolium*-Schicht bilden kann. Überschreitet das relative Lichtangebot ca. 10%, so wird *Impatiens* weitgehend von Hochstauden verdrängt (z. B. *Chaerophyllum hirsutum*, *Petasites albus*, *Petasites hybridus*) (s.a. BEIERKUHNLEIN & GRÄSLE in diesem Band).

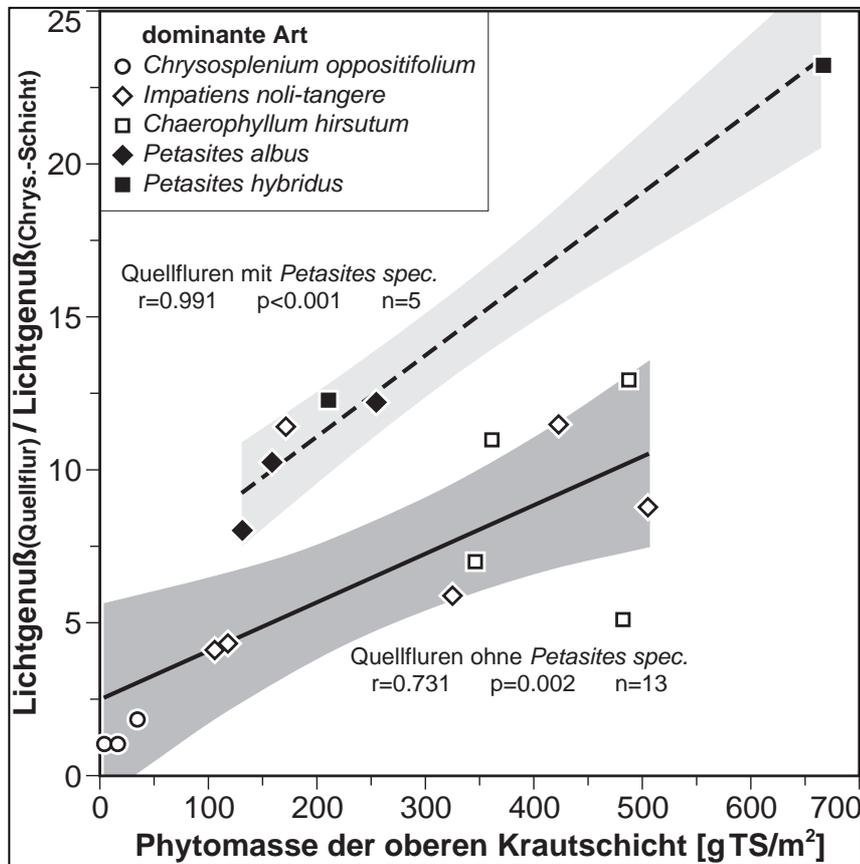
---

<sup>1)</sup> Lichtgenüsse beziehen sich hier stets auf die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR).



**Abb. 8.4:** Korrelation zwischen Biomasseproduktion und relativem Lichtgenuss für Quellfluren mit pH>5 im Frankenwald.

Auch hinsichtlich der Produktivität der Quellflurvegetation besitzt der Standortfaktor Licht eine entscheidende Bedeutung. So zeigen die Untersuchungen im Frankenwald für Quellen mit pH-Werten über 5 eine hochsignifikante, nichtlineare Korrelation zwischen dem relativen Lichtgenuss und der oberirdischen Biomasse auf dem Höhepunkt der Vegetationsentwicklung im August (Abb. 8.4). Demgegenüber zeigt die Biomasse der *Chrysosplenium oppositifolium*-Schicht keine klare Abhängigkeit vom Lichtangebot in der Quellflur. Grund dafür ist die starke Beschattung durch die obere Krautschicht in mehrschichtigen Beständen. Im Mittel erhält die *Chrysosplenium oppositifolium*-Schicht in gut belichteten, mehrschichtigen Quellfluren sogar ganzjährig weniger Licht als in den stark beschatteten Quellen in Buchenbeständen (s. Abb. 18.1 in BEIERKUHNEIN & GRÄSLE in diesem Band). Zwischen dem Lichtangebot für die *Chrysosplenium oppositifolium*-Schicht und deren Phytomasse deutet sich wiederum eine positive Korrelation an, die aber statistisch noch nicht abgesichert werden konnte ( $r=0.313$ ,  $p=0.1$ ,  $n=18$ ).



**Abb. 8.5:** Relative Abnahme der Photosynthetisch aktiven Strahlung beim Durchgang durch die obere Krautschicht in Abhängigkeit von deren Phytomasse. Dargestellt sind für Quellfluren mit und ohne *Petasites spec.* die linearen Regressionen und deren 95%-Konfidenzintervalle.

Untersucht man den Einfluss der oberen Krautschicht auf das Lichtklima in unteren Bestandesschichten, so findet man erwartungsgemäß eine enge Korrelation zwischen der Phytomasse der oberen Krautschicht und dem Verhältnis der Beleuchtungsstärke an der Obergrenze der Quellvegetation zu derjenigen in der *Chrysosplenium oppositifolium*-Schicht (GRÄSLE 1992 fand  $r=0.708$ ,  $p<0.001$  mit  $n=18$ ). Dabei ist bei gleicher Phytomasse die beschattende Wirkung der *Petasites*-Arten mit ihren großen, opaken und weitgehend horizontal ausgerichteten Blättern, die in einer Höhe eine praktisch geschlossene Schicht bilden, deutlich stärker als die von *Impatiens noli-tangere* oder *Chaerophyllum hirsutum*, deren kleinere bzw. stark zerteilten Blätter sich in lockerer Staffelung über einen größeren Höhenbereich verteilen (Abb. 8.5).

#### 4. Zusammenfassung

Die als für Quellen als charakteristisch angesehene Isothermie konnte an den Quellen des Untersuchungsgebietes nur eingeschränkt gefunden werden. Zwar ist der Temperaturverlauf an solchen helokrenen Quellen im Vergleich zu terrestrischen Ökotope deutlich gedämpft und ausgeglichener, doch sind durchaus diurnale und saisonale Fluktuationen zu bemerken. Diese Temperaturamplituden sind stark durch die Quellschüttung beeinflusst. Der Einfluss des Quellwassers auf die Temperaturverhältnisse der Quellbereiche wird offensichtlich durch das Wasserdargebot gesteuert.

Die Temperaturen sind natürlich auch stark durch die Einstrahlung beeinflusst, welche wiederum an den untersuchten Waldquellen eng mit den Vegetationsstrukturen der umgrenzenden Waldbestände zusammenhängt. Es wurde darüberhinaus der deutliche Einfluss der Vegetationsstrukturen der Quellbereiche selbst auf die oberflächennahen Strahlungsverhältnisse aufgezeigt.

#### Literatur

- BEIERKUHNLEIN, C. & W. GRÄSLE (1993): Zum Temperaturverhalten von Waldquellen des Frankenwaldes (Nordost-Bayern). - *Crunoecia* 2: 5-14
- GRÄSLE, W. (1992): Waldquellfluren im Frankenwald – Floristische, strukturelle, hydrochemische und mikroklimatische Untersuchungen an ausgewählten Quellen. Unveröff. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Biogeographie der Univ. Bayreuth, 132 S.
- HARTMANN, F.K., J. VAN EIMERN & G. JAHN (1959): Untersuchungen reliefbedingter kleinklimatischer Fragen in Geländequerschnitten der hochmontanen und montanen Stufe des Mittel- und Südwestharzes. – *Ber. Dt. Wetterdienst* **50** (Band 7), 1-39. Offenbach am Main
- WILHEM, F. (1956): Physikalisch-chemische Untersuchungen an Quellen in den bayerischen Alpen und im Alpenvorland. – *Münchener Geogr. H.* **10**, 1-97.

