



<http://www.csc.rub.de/forschung/hoehle/einfuehrung.html.de#navigation>

Wissenschaftliches: Allgemeines zur Höhlenklimatologie

Das Forschungsfeld der Höhlenklimatologie ist nach eigener Einschätzung, aber auch nach SCHUSTER & NOVAK (1999) in Deutschland nur schwach entwickelt, ganz im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern.

Bei unseren Nachbarn wie z. B. in Österreich, der Schweiz, Frankreich, Italien aber auch in Polen, der Tschechischen Republik, der Slowakei und Slowenien hat dieser Forschungsbereich einen erheblich höheren Stellenwert, was sich sowohl in einer höheren Anzahl an Publikationen als auch einer höheren Zahl finanziert Forschungsprojekte bemerkbar macht. Dieses soll sich in Zukunft ändern und hierzu wird die Arbeitsgruppe U-Bahn und Höhlenklimatologie an der Ruhr-Universität Bochum sowie der Verband der Deutschen Höhlen- und Karstforscher e. V. (VdHK) seinen Beitrag leisten.

Im Folgenden gibt es für die Interessierten eine kleine Einführung in die Höhlenklimatologie.

Die klimatische Klassifizierung natürlicher Höhlensysteme aufgrund ihrer Bewetterung

Sowohl die Speläometeorologie als auch die Speläoklimatologie unterscheiden sich erheblich von ihren entsprechenden Pendanten in der freien Atmosphäre. Während das Wettergeschehen und die klimatologische Ausprägung eines Standortes an der Erdoberfläche sehr stark sowohl von kurzfristigen bzw. regionalen als auch von mittelfristig wirkenden bzw. globalen Veränderungen beeinflusst wird, ist das Speläoklima praktisch ausschließlich auf die jeweils gegebenen lokalen Bedingungen zurückzuführen (BÖGLI 1978), die auf die zusammenhängenden Hohlräume und Öffnungen wirken. Kontinuierlich gleichbleibende Zustände wie z. B. lang anhaltend hohe relative Luftfeuchtigkeit, geringe Temperaturschwankungen sowie geringe oder fehlende Luftbewegungen sind typisch für zahlreiche Höhlensysteme. Insbesondere diese konstanten Bedingungen haben in Verbindung mit ständiger Dunkelheit zur Ausbildung spezieller, sehr empfindlicher Ökosysteme geführt.

Allgemein wird in der Höhlenklimatologie davon ausgegangen, dass die in Höhlen nachgewiesenen Luftströmungen (Höhlenwinde) durch die folgenden endogenen und exogenen Faktoren bedingt werden:

Exogene Faktoren:

- durch Differenzen zwischen dem Luftdruck im Inneren der Höhle einerseits und der Außenatmosphäre andererseits, hervorgerufen durch den stetig wechselnden Einfluss durchziehender Druckgebilde (MOORE & SULLIVAN 1964, PFLITSCH et al. 2007),
- durch Druckunterschiede, die durch die unterschiedliche Orientierung der Öffnungen zur aktuellen Windrichtung bedingt werden. In sogenannten Durchgangshöhlen zeigt die dem Wind zugewandte Seite einen höheren Druck als die Leeseite (BÖGLI 1978),
- durch Temperaturunterschiede und hierdurch hervorgerufene Druckunterschiede zwischen Höhlen- und Außenluft (MOORE & SULLIVAN 1964; BÖGLI 1978). Die Druckunterschiede werden durch die Temperaturdifferenzen zwischen Höhlenluft und Außenatmosphäre bedingt. Im Winter ist die in der Höhle befindliche Luft i.d.R. wärmer und weniger dicht als die Außenluft und entweicht durch die obere Öffnung. Durch den durch die ausströmende Luft bedingten Massenverlust im oberen Bereich der Höhle entsteht ein Druckgradient, so dass zum Druck bzw. Massenausgleich durch tiefer liegende Tagöffnungen kalte Luft nachgezogen wird. Im Sommer ist die im Vergleich zur Außenatmosphäre kältere Luft schwerer und fließt durch die untere Öffnung aus, das Druckgefälle wird durch Nachströmen an den höher gelegenen Tagöffnungen ausgeglichen. Weitergehende Erkenntnisse liegen aus der Moestrof-Höhle in Luxemburg vor. Hier wurden interessante Zusammenhänge zwischen den Schwankungen des Differenzdruckes und den Dichteunterschieden (Außenluft/Höhle), sowie der Außentemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit in der Höhle nachgewiesen. Die dort durchgeführten Untersuchungen bieten eine gute Grundlage für die Forschung in barometrischen Höhlen (MASSEN et al. 1997).

Endogene Faktoren:

- durch Druckdifferenzen innerhalb der Höhle, bedingt durch Dichteunterschiede der Luft, verursacht durch Unterschiede in der Temperatur, der Luftfeuchte und des CO₂-Gehaltes (BÖGLI 1978),
- durch die Kraftübertragung von turbulent fließendem Wasser (CIGNA 1971; SCHUSTER & NOVAK 1999) oder
- durch Volumenänderungen, die durch Veränderungen der Wasserführung von Höhlengewässern (FORD & CULLINGFORD 1976) bedingt werden.

Aus der Aufstellung über die Gründe für die Ausbildung von Luftbewegungen in Höhlen wird deutlich, dass die Ausprägung der Lufttemperatur einen wichtigen Faktor darstellt. Sowohl Temperaturunterschiede innerhalb der Höhle als auch zur Außenluft können zu entsprechenden Ausgleichsströmungen führen, wobei die durch endogene Faktoren bedingten Strömungen eher schwach ausgeprägt sind, während eine exogen ausgelöste Bewetterung durchaus hohe Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde hervorrufen können (SCHUSTER & NOVAK 1999).

Die in und aus einer Höhle gerichteten Ausgleichsströmungen der Luft, sind i.d.R. so schwach, dass sie nur in geringem Maße zu einem Temperatenausgleich zwischen Höhlen- und Außenluft beitragen. Somit wird die Lufttemperatur der inneren Höhlenbereiche durch die Felstemperatur kontrolliert, die wiederum der langjährigen Jahresmitteltemperatur der Außenatmosphäre entspricht. So geben MOORE & SULLIVAN (1964) an, dass eine tägliche Temperaturschwankung der Außenluft von 30 K in 57 cm Tiefe eines Kalksteins auf eine Amplitude von < 1 K reduziert wird. Hingegen lässt sich nach den gleichen Autoren die Jahresamplitude der Außentemperatur von 30 K immerhin bis in eine Tiefe von 11 m mit einer Schwankung von >1 K nachweisen. Somit ergeben sich für Höhlen mit einer größeren Tiefe als 11m jährliche Temperaturvariationen von weniger als 1 K. Deutliche Unterschiede zu diesen Angaben sind nur bei Vorhandensein eines starken, in die Höhle gerichteten Luftstroms zu erwarten.

Weiterhin ergibt sich daraus, dass die Höhlentemperatur von der jeweiligen Breitenlage als auch der Höhe über dem Meeresspiegel bestimmt wird und somit in etwa abgeschätzt werden kann (MOORE & SULLIVAN 1964). Darüber hinaus gibt es aber weitere Einflussfaktoren, welche die Temperatur im Inneren der Höhle beeinflussen können. Dieses sind:

- **Wasser:** Einen erheblich stärkeren Einfluss auf die Höhlentemperatur als die schwachen Luftbewegungen haben Höhlenwässer LUETSCHER & JEANNIN (2004). Durch die geringe spezifische Wärmekapazität von Luft sowie deren geringe Dichte ergibt sich ein im Vergleich zu Stein und Wasser erheblich geringerer Wärmeinhalt der Luft, so dass sich die Lufttemperatur rasch an die des Wassers angleicht (BÖGLI 1978). Insbesondere Höhlen, die durch kalte Schmelzwässer beeinflusst werden, haben somit im Frühjahr aber teilweise auch über das gesamte Jahr, eine geringere Temperatur als die mittlere Außentemperatur erwarten lässt (BÖGLI 1978; MOORE & SULLIVAN 1964).
- **Geothermische Erwärmung (Erdwärme):** Dieser Einflussgröße wird in der Literatur nur ein bedingter Einfluss beigemessen. Bei einer Temperaturzunahme von 0,03 K m⁻¹ ergibt sich ein nachweisbarer Effekt erst für tiefere Höhlen. **Handelt es sich dabei um Höhlen des noch aktiven Endokarstes, so fällt dieser Effekt gänzlich weg, da die herangeführte Wärme durch das Wasser abgeführt wird.**
- **Struktur:** Bei **blind endenden Höhlen** und somit eher statischen Höhlen kann die relative Lage der Öffnung zum Höhleninneren zu merklichen Abweichungen führen. Liegt die Öffnung unterhalb des Hohlraumes, so sammelt sich hier bevorzugt die leichtere, wärmere Luft als sog. **"Warmluft sack"** unter der Decke oder in höheren Höhlenbereichen, während im gegenteiligen Fall die schwere, kalte Luft als sog. "Kaltluft sack" in dem "Loch" stagniert und/oder in die tiefer gelegenen Bereiche herabsinkt und eine stabile Schichtung entsteht.
- **Exposition:** Die Lage einer Höhle unter einem besonnten Südhang bzw. einem schattigen Nordhang müsste bei einer nicht zu starken Gesteinsüberdeckung zu einer leicht erhöhten bzw. abgesenkten Mitteltemperatur führen. Entsprechende Hinweise auf diesen Sachverhalt wurden im Rahmen eigener Messungen (Balzarka Höhle des Mährischen Karstes) gefunden. Hierfür konnten in der Höhlenliteratur jedoch keine Angaben gefunden werden.

Prinzipiell treten insbesondere bei den endogenen Einflüssen nur schwache Windgeschwindigkeiten von wenigen Dezimetern auf, die selten den Wert von 1 m s⁻¹ überschreiten. Gelegentlich können

Höhlenwinde jedoch Sturmstärke erreichen, wie z. B. 166.3 km/h in der türkischen Pinargözü-Höhle (BAKALOWICZ 1972). Diese hohen Windgeschwindigkeiten werden in der Regel durch den sog. Kamineffekt hervorgerufen (MOORE & SULLIVAN 1964). Andere Höhlen - wie z. B. die Wind Cave in South Dakota oder die Caves of the Winds in Colorado, beide in den USA - sind für ihre Winde bzw. für die Geräusche, die beim Austreten der Luftströmungen aus den engen Zugangsöffnungen entstehen, berühmt (CONN 1966).

Hinsichtlich ihrer klimatischen Ausprägung sowie ihrer Bewetterung unterscheidet man in der gängigen Literatur statische von dynamischen Höhlen. Beide Begriffe wurden 1966 durch GEIGER geprägt, wobei diese Definitionen allein auf der Anzahl der Öffnungen von Höhlen beruht; Höhlen mit nur einem Eingang wurden als statisch, solche mit mehreren Eingängen als dynamisch eingestuft. Auch wenn es sich nach FORD & CULLINGFORD (1976) bei statischen Höhlen überwiegend um Höhlen mit nur einem oder keinem natürlichen Eingang handeln dürfte, ist diese - alleine auf der Anzahl der Öffnungen beruhende - Klassifizierung nach Auffassung des Antragstellers jedoch wenig sinnvoll, da auch in Höhlensystemen mit nur einem Eingang, wie z. B. der oben genannten Wind Cave, merkliche Luftbewegungen auftreten können und somit als dynamische Höhlen bezeichnet werden müssen.

Untersuchungen über dynamisch bewetterte Höhlen mit vergleichsweise hohen Windgeschwindigkeiten liegen viele vor. Die Wetterführung der Salzgrabenhöhle von SCHUSTER & NOVAK (1999) ist hier nur als letzte zu nennen. Aber ebenso wie das von BÖGLI (1978) betrachtete Hölloch mit einer Höhendifferenz zwischen unterer und oberer Öffnung von ca. 500 m besitzt auch die Salzgrabenhöhle mit einem Unterschied von 640 m eine sehr große Vertikalerstreckung, so dass sich entsprechend hohe Druckunterschiede ausbilden, die einfach zu berechnen sind.

Da die Windgeschwindigkeit in sog. statischen Höhlen vielfach nur sehr gering ist (SCHUSTER & NOVAK 1999) und unterhalb der Ansprechgeschwindigkeit der bisher verwendeten Messwertgeber liegt, ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass die ganzheitliche Erfassung von Luftströmungen (Horizontal- und Vertikalkomponente) eher ein messtechnisches Problem darstellt. Aus der VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2 (VDI 1988) lässt sich ein Grenzwert für eine sinnvolle Verwendung der Messwerte von den allgemein in der Anwendung befindlichen Rotationsanemometern von 0,6 m/s ableiten, i.d.R. gelten jedoch Windgeschwindigkeiten kleiner oder gleich 0,5 m/s als "Situationen messtechnisch unbestimmter Windrichtung" (REUTER et al. 1991, S. 33). Über diese als Calmen bezeichneten Situationen liegen also keine exakten Informationen bezüglich der Windrichtung und -geschwindigkeit vor. Hinweise, dass auch in solchen Höhlen, in denen man bisher messtechnisch keine Luftströmungen nachweisen konnte, ein Strömungssystem vorliegt, erhielt man mittelbar über die Nutzung von austretendem Radon als Tracer (PRZYLIBSKI & PIASECKI 1999; HEBELKA 1998). In jüngsten und umfangreichen klimatologischen Untersuchungen der Moestroff-Höhle in Luxemburg (MASSEN et al. 1997) sowie in Höhlensystemen des Mährischen Karstes der Tschechischen Republik (HEBELKA 1998) konnten Geschwindigkeiten schwacher Strömungen $< 0,5$ m/s unter Verwendung eines Hitzdrahtanemometers zeitlich hochauflösend und exakt ermittelt werden. Die genaue Erfassung von Windrichtung und Vertikalbewegungen sind mit dieser Methode jedoch nicht möglich.

Hieraus lässt sich zunächst folgern, dass sogenannte "statische Höhlen" Klimasysteme darstellen, für die keine ausreichenden Informationen über ein möglicherweise vorhandenes Strömungssystem vorliegen. Diese Lücke konnte jedoch inzwischen durch die Verwendung von Ultraschall-Anemometern geschlossen werden. Der Einsatz solcher Messgeräte ermöglicht die Aufnahme von Strömungsgeschwindigkeiten bis in einen Geschwindigkeitsbereich von wenigen cm/s, die Registrierung von feinsten Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen in Intervallen von Sekundenbruchteilen sowie die Erfassung feinsten Variationen der Lufttemperatur. Laut VDI 3786, Blatt 12 liegt die untere Erfassungsgrenze dieser Geräte bei $2,2 \cdot 10^{-2}$ K (VDI 1994).

Die Anwendung dieser Technik erlaubt neben dem Nachweis schwacher Luftbewegungen ebenso eine langfristige Quantifizierung von solchen Strömungsereignissen, die bisher nur kurzzeitig mittels Rauch sichtbar gemacht werden konnten (PFLITSCH & FLICK 2000).

Eigene Untersuchungen in verschiedenen Höhlensystemen in Deutschland, Polen, der Tschechischen Republik und der Slowakei (PIASECKI & PFLITSCH 1999; PFLITSCH et al. 1999a, PFLITSCH, A. & J. PIASECKI, 2003) haben ergeben, dass es wesentlich zweckmäßiger erscheint, in diesem Zusammenhang solche Höhlen in klimatologischem Sinne als dynamisch zu charakterisieren, in denen die leicht nachweisbaren und z. T. erhebliche Geschwindigkeiten erreichende Luftbewegung als Hauptformungsprozess für das Klima des gesamten oder des überwiegenden Teils der Höhle eingestuft werden kann

und in denen die Schwankungsbreite der übrigen meteorologischen Elemente wie Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit deutlich ausgeprägt sind.

Darüber hinaus hat z. B. PIASECKI (1996) gezeigt, dass es sinnvoll ist, Höhlen in einzelne Teilbereiche zu untergliedern. In langjährigen Untersuchungen konnte er für das kleine Höhlensystem der Bärenhöhle im Südwesten Polens eindeutig Bereiche mit statischen Klimabedingungen nachweisen, während andere Abschnitte dieser Höhle durch dynamische Verhältnisse geprägt werden.

Somit muss die Einstufung von Höhlen als statische oder dynamische Klimasysteme vollständig überarbeitet werden, da die alte Einteilung als überholt anzusehen ist. Die neusten Messergebnisse haben eindeutig gezeigt, dass von statischen Bedingungen nur noch gesprochen werden kann, wenn - abgesehen von den unmittelbaren Öffnungsbereichen - keine oder nur sehr schwache Luftströmungen nachgewiesen werden können sowie die räumliche und zeitliche Spannbreite der Klimaelemente sehr gering ausgeprägt ist. Darüber müssen innerhalb eines Systems räumliche und zeitliche Differenzierungen vorgenommen werden (PFLITSCH, A. & J. PIASECKI, 2003).