

## Höhlensinter

Das Besondere an vielen Höhlen ist deren Sinterschmuck. Der Überbegriff für sämtliche mineralischen Bildungen aus wässrigen Lösungen, die in Höhlen entstehen, ist Höhlensinter oder Speläotheme. Darunter fallen Tropfsteine, grobkristalline Drusen, Bergmilch aber auch nicht-karbonatische Bildungen wie Überzüge aus Eisen- oder Manganoxid oder Gips (siehe MB Mineralien in Höhlen). Insgesamt sind weltweit aus Höhlen über 200 verschiedene Minerale bekannt, von denen das häufigste Kalzit, trigonal kristallisiertes Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), ist, von dem hier im wesentlichen die Rede ist.

### Terminologie

Die mannigfaltige Bildungsweise der Höhlensinter resultiert in einer großen Bandbreite an Bildungsformen, die naturgemäß zu einer Begriffsvielfalt führt. Die in unseren Breiten wichtigsten karbonatischen Formen umfassen:

**Sinterröhrchen (Spaghetti, Makkaroni):** Strohalm-ähnliche Gebilde, die von der Decke vertikal nach unten wachsen und deren hohler Durchmesser (4-6 mm) dem eines Wassertropfens entspricht. Diese Gebilde sind filigran, wachsen lokal relativ schnell und können im Extremfall mehrere Meter lang werden.

**Stalaktite:** Deckenzapfen, die sich häufig aus einem Sinterröhrchen entwickeln und deren Wachstum sowohl in vertikaler Richtung nach unten, als auch in seitlicher Richtung durch Ablagerung von Kalzit vom außen herunterrinnenden Tropfwasser erfolgt. Im Querschnitt zeigen Stalaktite deshalb eng gescharte Baumring-ähnliche Wachstumslagen, die sich um einen zentralen Zufuhrkanal legen.

**Stalagmite:** Bodenzapfen, die sich in der Regel unter einem Sinterröhrchen oder einem Stalaktiten bilden, d.h. das Tropfwasser, das auf der Spitze des Stalagmiten auftrifft, hat meist schon einen Teil seiner gelösten Stoffe abgegeben. Stalagmite wachsen meist vertikal nach oben (Idealfall: kerzenförmig mit gleich bleibendem Durchmesser), können aber auch ein beträchtliches Dickenwachstum aufweisen (kegelige Formen), und zwar dann, wenn die Menge des Tropfwassers abnimmt bzw. die Ausscheidung des Kalzits nicht nur an der Spitze, sondern entlang der Flanken des Stalagmiten erfolgt. Stalagmite weisen im Querschnitt einen Baumring-ähnlichen Aufbau auf, allerdings ohne einen Zentralkanal (vgl. Stalaktite). Im Längsschnitt zeigt sich der vertikale Aufbau mit flach liegenden Lagen im Zentralbereich und geneigten an den Flanken (letztere sind bei kerzenförmigen Stalagmiten nur schwach ausgebildet).

**Tropfsteinsäule (Sintersäule):** Wachsen Stalaktite und Stalagmite zusammen, so entsteht eine durchgehende Sintersäule, deren Wachstum ab diesem Zeitpunkt ausschließlich in die Breite erfolgt.

**Sinterfahne, Sintervorhang:** Schmucke, dünne, oft durchscheinende Ablagerungen aus Kalzit, die nicht selten dem Faltenwurf eines Kleides ähneln und z.B. seitlich aus einem Stalaktiten herauswachsen. Sie entstehen durch linear ab rinnendes Tropfwasser und zeigen oft einen charakteristischen feingeschichteten Aufbau.

**Boden- und Wandsinter (Sinterdecken):** Die im internationalen Sprachgebrauch als „flowstone(s)“ bekannten Speläotheme stellen volumenmäßig die wichtigsten Formen überhaupt dar. Die Wasserzufuhr erfolgt nicht punktförmig wie bei Stalagmiten, sondern das Tropfwasser tritt z.B. entlang einer Kluft oder flächig aus dem Gestein aus und trifft (oft aus großer Höhe) unregelmäßig auf und führt so zu einer tafelförmigen Sinterbildung. Wandsinter können randlich an Kanten in Stalaktit-Reihen übergehen, mehrere Meter mächtig werden und mit Sedimenten (z.B. Lehm) wechsellagern.

**Sinterbecken:** Scheidet sich aus stehenden Gewässern in Höhlen Karbonat ab, so entstehen verschiedenartige Formen, die zum einen seitlich an der Wasseroberfläche bzw. knapp darunter vom Beckenrand Richtung Beckenzentrum wachsen und zum anderen den Boden von Höhlenseen auskleiden. Solche Sinterbecken sind je nach Lokalität z.T. nur episodisch wasserführend.

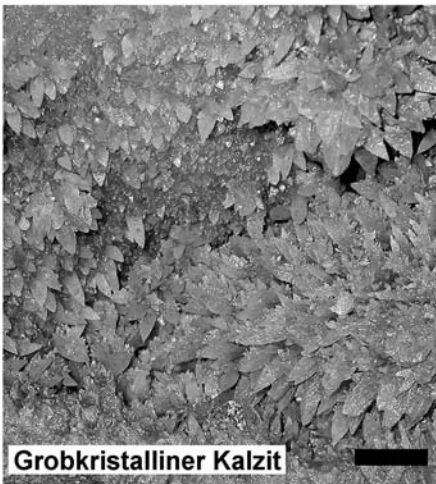
**Höhlenperlen (Sinterperlen):** Diese, aus konzentrischen Lagen aufgebauten, kugeligen Gebilde entstehen nur dort, wo Tropf- oder Spritzwasser eine ständige Umlagerung dieser Partikel bei langsam ablaufendem Weiterwachstum bewirkt. Unterbleibt die Zufuhr von oben bzw. ändert sich der Grad der Übersättigung in diesen kleinen Wasserbecken, dann sintern Höhlenperlen am Untergrund an.



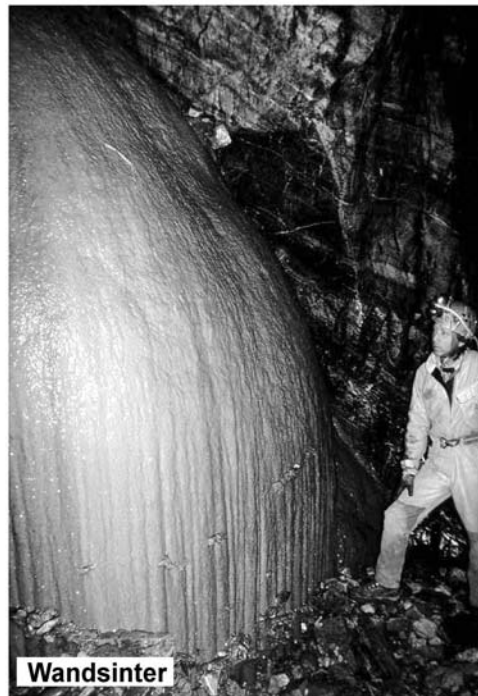
**Stalaktite und Tropfsteinsäulen**



**Sinterröhrchen**



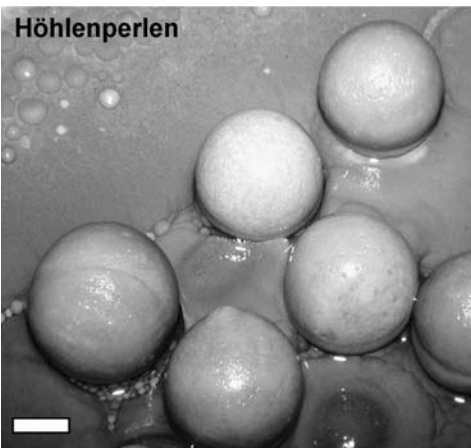
**Grobkristalliner Kalzit**



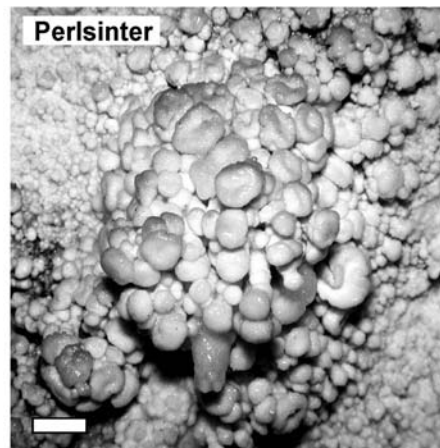
**Wandsinter**



**Stalagmit im Längsschnitt**



**Höhlenperlen**



**Perlsinter**



**Excentriques**

Fotos der wichtigsten Sinterformen (Balken jeweils ca. 1 cm lang).

**Excentriques:** Diese, auch als Heliktite bekannten, abnormen Formen kennt jeder Höhlenforscher. Gewundene, oft korkenzieherartige Formen, die scheinbar unbeeinflusst von der Gravitation wachsen. Im Unterschied zu Sinterröhrchen fehlt ihnen oft ein Zentralkanal. Die Bildungsweise der Excentriques ist ganz offensichtlich uneinheitlich. Kapillareffekte verstärkt durch einseitige Verdunstung an bewetterten Stellen dürften aber eine wichtige Rolle spielen.

**Perlsinter (Knöpfchen-, Korallen-, Warzen- oder Karfiolsinter):** Kleinere Sinterformen, die, wie die vielfältigen Namen nahe legen, Ähnlichkeiten mit Perlen usf. aufweisen, deren Durchmesser typischerweise einen halben Zentimeter kaum übersteigt. Sie sind häufig an bewetterten Stellen und zeigen z.T. auch die Windrichtung an, unter der sie entstanden sind. Sie finden sich aber auch recht häufig eingangsnah, z.B. in Halbhöhlen.

**Grobkristalline Sinter:** In machen Höhlen trifft man auf Kalzitkristalle, die mehrere Millimeter bis lokal Dezimeter groß sein können. Solche drusige Kristalle bilden sich charakteristischerweise nur unter phreatischen (d.h. wassererfüllten) Bedingungen bzw. können auf einen hydrothermalen Ursprung (d.h. Bergwässer, die höher temperiert sind als das Umgebungsgestein) eines Höhlensystems hindeuten.

**Bergmilch (Mondmilch):** Im Volksmund auch als „Nix“ bekannt unterscheidet sich diese Bildung von kristallinem Tropfstein-Kalzit durch seinen sehr hohen Wassergehalt, der bis zu 90 Gewichtsprozent betragen kann. Die einzelnen, extrem dünnen Kristalle (meist handelt es sich ebenfalls um Kalzit) sind so winzig, dass sie nur unter einem Elektronenmikroskop sichtbar gemacht werden können. Bei der Bildung der charakteristisch weißen und pastenförmigen Bergmilch dürften Mikroorganismen (Bakterien) eine wichtige Rolle spielen.

### **Warum bilden sich Höhlensinter?**

Jeder Höhlenforscher weiß, dass im Zuge der Verkarstung aus dem Muttergestein gelöstes Karbonat beim Eintritt in einen Höhlenraum zum Teil wieder aus dem Tropfwasser ausfällt und Tropfsteine bildet. Nicht selten bekommt man zu hören, dass der Grund, warum diese Reaktion stattfindet, auf die Verdunstung des Tropfwassers zurückzuführen sei. Die Antwort trifft zwar auf einige Höhlen zu, übersieht aber die Hauptursache: Das Entgasen von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus dem Tropfwasser (siehe MB Verkarstung). Niederschlagswasser nimmt auf seinem Weg  $\text{CO}_2$  aus dem Bodenhorizont auf und kann dadurch Karbonatgestein im Untergrund lösen. Würde dieses Grundwasser in einen völlig abgeschlossenen Höhlenraum tropfen, dann würde darin keinerlei Tropfsteinwachstum stattfinden. Erst wenn dieser Hohlraum – was in den allermeisten Höhlen der Fall ist – über Gänge, Spalten und Schächte mit der Außenluft in Verbindung steht, wenn also ein, wenn auch nur geringer, Luftaustausch mit der Atmosphäre (Bewetterung) stattfindet, sind die Grundvoraussetzungen für Sinterbildung gegeben. Das Tropfwasser „sieht“ beim Eintritt in einen Höhlenraum Luft, deren  $\text{CO}_2$ -Anteil (genauer: Partialdruck) geringer ist als der in den engen Rissen und Klüften, in denen die Lösung des Muttergesteins stattfand. Es tritt also ein Effekt vergleichbar dem bei der Öffnung einer Flasche „nicht-stillen“ Mineralwassers ein:  $\text{CO}_2$  entweicht. Wenn – was bei Höhlenwässern oft der Fall ist – dieses Wassers ursprünglich an Kalzit gesättigt war, dann bewirkt das Entgasen von  $\text{CO}_2$  eine nunmehrige Übersättigung an diesem Karbonatmineral: Es scheidet sich aus. Zurück zur Verdunstung: Dieser Prozess verringert das Volumen an Wasser, was zwangsweise zu einer Aufkonzentration und in weiterer Folge ebenfalls zum Entweichen von  $\text{CO}_2$  führen kann. In den meisten Höhlen ist die relative Luftfeuchtigkeit aber nahe bei 100%, d.h. Verdunstung findet kaum statt. In stark bewetterten Höhlen und besonders in solchen, die in trockenen Gebieten liegen und in denen die Tropfstellen immer wieder austrocknen, spielt die Verdunstung eine wichtige Rolle und ist eine treibende Kraft der Bildung von Sintern, nicht selten auch Aragonit (siehe unten).

### **Wie wachsen Höhlensinter?**

Speläotheme „wachsen“, indem Myriaden mikroskopisch kleiner Kalzit- (oder seltener Aragonit-) Kristalle, die mit ihren Kristallflächen die Oberfläche eines Stalaktiten, eines Bodensinters oder eines Sintervorhanges bilden, sukzessive Lage für Lage an eben diese freien Kristallflächen anlagern. Es handelt sich stets um ein Weiterbauen an bestehenden Kristalloberflächen, auch wenn diese z.B. durch

feinste Tonmineral-Partikel verunreinigt sein können. Sintersubstanz ist daher stets kristalliner Natur, wenn auch mitunter von extrem kleiner Kristallgröße (z.B. Bergmilch).

Da der Wasserfilm, in dem die gelösten Stoffe angeliefert werden, nur Bruchteile eines Millimeters dünn ist, können sich bei den genannten Sinterformen keine größeren Kristalle bilden, da deren Enden über den Film hinausragen und so in ihrem Wachstum gestoppt würden. Anders hingegen die Situation in Sinterbecken. Dort können bei entsprechender Übersättigung Kristalle frei in die Lösung hinauswachsen und Kristallrasen oder -drusen entstehen.

### **Warum sind manche Höhlensinter gefärbt?**

Das Hauptmineral der Speläotheme, Kalzit, besitzt keine Eigenfarbe (gleiches gilt für Aragonit). Hochreiner Kalzit, ob als Tropfstein, Kalkstein oder Kalkmarmor ist äußerlich weiß, mikroskopisch betrachtet farblos durchscheinend. Trotzdem erscheint die Mehrzahl der Höhlensinter in Farben, die im wesentlichen auf drei verschiedene Prozesse zurückgeführt werden können: Organische Stoffe, so genannte Humin- und Fulvinsäuren, die durch das Tropfwasser in Spuren aus dem Bodenhorizont in das Höhlensystem eingebracht werden, verursachen die häufige hell- bis dunkelbräunliche, seltener auch gelbbraune Färbung von Tropfsteinen. Eine zweite Form der Färbung wird durch winzige Partikel von Eisen- und/oder Manganoxiden und -hydroxiden bedingt, die über das Tropfwasser oder lokal auch durch die Höhlenluft (Staub) eingetragen werden. Diese anorganischen Pigmente resultieren in braunen (Eisenverbindungen) bzw. schwarzen (Manganverbindungen) Farben. Schwarze Pigmentierung kann lokal auch durch die Deposition von Ruß entstehen, z.B. wenn Rauch in eine Höhle zieht. Selten tritt auch eine dritte Form von Färbung durch den Einbau von spezifischen Spurenmetallen in das Kristallgitter des Kalzits auf. So färben Spuren von Kupfer kalzitische Sinter meist grün, aragonitische Sinter hingegen bläulich. Diese optisch attraktiven Sinterbildungen finden sich nicht selten in alten Erzbergbauen.

### **Wie rasch wachsen Höhlensinter?**

Kaum eine Frage wird von Höhlenbesuchern so oft gestellt wie diese. Leider geistern diesbezüglich nicht immer gut fundierte Zahlen durch das bisherige höhlenkundliche Schrifttum. Zudem haben moderne Untersuchungen gezeigt, dass die Wachstumsgeschwindigkeit einer bestimmten Sinterform bei Leibe nicht mit einer Zahl charakterisiert werden kann und stark davon abhängt, wo die betreffende Höhle gelegen ist. Qualitativ kann gesagt werden, dass Höhlensinter in warm-feuchten Klimaten schneller wachsen also solche in trockenen und/oder kalten Regionen. Auf die Alpen umgelegt bedeutet dies, dass Sinter in einer Höhle auf Talniveau tendenziell schneller wachsen als vergleichbare Sinter einer hochgelegenen Höhle. Grund dafür ist letzten Endes die (mit der Seehöhe abnehmende) Temperatur, die die Vegetationsverhältnisse und den Aufbau des Bodens langfristig kontrolliert; Parameter, welche ihrerseits wieder den Motor für die Karstlösung und den Eintrag entsprechender Sickerwässer in unterirdische Hohlräume darstellen.

Zu den am schnellsten wachsenden Speläothemen zählen die Sinterröhrchen. Wie aus aufgelassenen Bergwerken bekannt können diese filigranen Gebilde bis zu mehrere Millimeter pro Jahr an Länge zunehmen, wenn auch die Hauptmasse deutlich langsames Wachstum "bevorzugen" dürfte. Über das Wachstumsverhalten von Stalaktiten existieren keine genauen Untersuchungen in alpinen Höhlen, aber man kann von Geschwindigkeiten zwischen einigen Hundertstel bis maximal wenigen Zehntel Millimeter pro Jahr ausgehen. Wesentlich besser Bescheid weiß man über Stalagmite. Altersbestimmungen (siehe Kap. Sinterdatierung) und (mikroskopische) Messungen sichtbarer Jahreslagen haben gezeigt, dass Stalagmite aus ostalpinen Höhlen unter derzeit herrschenden Klimabedingungen pro Jahr um etwa 4 bis 6 Hundertstel Millimeter größer werden. Umgelegt auf ein Menschenleben bedeutet dies einen Längenzuwachs von wenigen Millimetern.

### **Kalzit oder Aragonit?**

Kalziumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ , tritt in zwei kristallinen Modifikationen auf, einmal Kalzit (Kalkspat) und zum anderen Aragonit. Der Hauptunterschied liegt in der Kristallstruktur. Aragonit ist wesentlich seltener als Kalzit und weist oft auf spezifische Bildungsbedingungen hin (warme Höhlen, relativ geringe

Luftfeuchtigkeit der Höhlenluft, Mg-reiche Gesteine, z.B. Dolomit). Zudem ist Aragonit in Höhlen und nahe der Erdoberfläche instabil und wandelt sich langsam in den stabilen Kalzit um. Bekanntestes heimisches Beispiel für aragonitische Sinter sind die Eisenblüten, die allerdings hauptsächlich in Erzbergbauen vorkamen.

Das Erkennen von Aragonit erfordert einige Erfahrung. Hauptmerkmale von aragonitischen Speläothemen sind deren schneeweiße Farbe, die – falls erkennbar – extrem dünn-faserigen Kristalle, sowie deren Undurchsichtigkeit. Eine sichere Bestimmung ist jedoch nur mit Labormethoden möglich, wozu geringe Mengen etwa vom Volumen eines Streichholzkopfes benötigt werden. Solche Untersuchungen können in den meisten geowissenschaftlichen Instituten routinemäßig durchgeführt werden.

### **Aktiv oder fossil?**

Die Entscheidung, ob eine bestimmte Tropfstein-Form momentan im „Wachsen“ begriffen, also aktiv ist, ist oft keine einfach zu beantwortende Frage. Das bloße Tropfen auf einen Stalagmiten muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass hier Karbonat abgelagert wird (wenngleich es in vielen Fällen zutrifft). Den Tropfsteinen „beim Wachsen zusehen“ ist aus logistischen Gründen kaum durchführbar (und so auch deren „Wachsen“ nicht innerhalb kurzer Beobachtungszeiten nachweisbar). Antwort kann letztlich nur die Kombination von hydrochemischen Messungen, daraus erfolgter Berechnung der Unter- bzw. Übersättigung des Tropfwassers an Kalzit und die Langzeitbeobachtung z.B. durch genaues Vermessen oder Markieren von einzelnen Höhlensinterformen geben.

Fossile, d.h. seit Jahrtausenden oder gar Jahrmillionen inaktive Speläotheme erkennt man hingegen relativ leicht an Merkmalen wie graue oder braune Außenfarbe (bedingt durch nachträgliche Anlagerung z.B. von toniger Substanz), die nicht mit der des eigentlichen Sintermaterials im Inneren zusammenpasst, oberflächliche Erosionsmerkmale, fehlende Tropfwasserzufuhr, Versatz durch Brüche, und Umlagerung bzw. Überschichtung durch tonig-sandiges Sediment.

### **Höhlensinter als Indikatoren**

Höhlen stehen in Kommunikation mit der Erdoberfläche und Höhlensinter sind gewissermaßen Stein gewordene Zeugnisse der Einwirkung von Niederschlagswässern und deren Einwirkung auf Karbonatgestein.

Rege Tropfsteinbildung weist auf intensive Karstlösungsprozesse oberhalb der Höhle hin bzw. auf ein humides (Niederschlag überwiegt die Verdunstung) und oft warm-feuchtes Klima mit hoher Niederschlagsrate und gut entwickelter Vegetation und Boden. Umgekehrt zeigen Höhlen in niederschlagsarmen Gebieten, aber auch in kalten (alpinen) Höhlen tendenziell geringeren Tropfsteinschmuck. Allerdings ist Vorsicht bei der unkritischen Übertragung solcher Aussagen angebracht, denn wir kennen in den allerwenigsten Höhlen die Altersverteilung der Speläotheme. Auch wenn es auf einen meterhohen Stalagmiten tropft, kann dieser aus einer klimatisch völlig anderen Zeit stammen und nichts über den heutigen Zustand der Höhle bzw. ihrer klimatischen Lage aussagen. Sicher ist jedoch, dass das Wachstum der Tropfsteine während der großen Eiszeiten des Quartärs (siehe Kap. Quartär) so gut wie völlig zum Erliegen gekommen ist bzw. ältere Sinterformationen lokal durch Gletscherschmelzwässer sogar zerstört worden sind.

### **Weiterführende Literatur**

Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – 292 S., Berlin (Springer).

Ford, D.C. & Williams, P. (1989): Karst Geomorphology and Hydrology. - 601 S., London (Chapman & Hall).

Hill, C. & Forti, P. (1997): Cave Minerals of the World. – 2. Auflage, 463 S., Huntsville/Alabama (National Speleological Society).

Höhlengeheimnisse (2001): Ausstellungskatalog Mineralientage München, 272 S.