

Gerhart Wagner, Stettlen; Christian Mätzler, Bern

Haareis – Ein seltenes biophysikalisches Phänomen im Winter

An Wintertagen ohne Schnee mit Temperaturen knapp unterhalb von 0 °C sind manchmal auf morschem und feuchtem Buchen- oder Eichenholz an einzelnen Stellen haar- oder watteartige Eisbildungen zu beobachten, die als Haareis bekannt sind. Ihre Entstehungsweise wurde bisher nicht befriedigend geklärt. In der vorliegenden Studie wird die schon von Alfred Wegener aufgestellte Hypothese geprüft, dass die Erscheinung durch den Stoffwechsel eines im Holz lebenden Pilzmycels verursacht wird. Auf Holzstücken, die in der Natur mit Haareis befallen waren, konnte dieses unter geeigneten äußeren Bedingungen künstlich neu „gezüchtet“ werden. Auf Versuchsstücken, in denen der Pilz durch Hitze (Kochen), Alkohol oder ein Fungizid geschädigt oder abgetötet war, gelang das nicht. Die Pilzhypothese wird damit bestätigt. Als Pilzarten kommen mehrere auf Laubholz spezialisierte winteraktive Asco- und Basidiomyceten in Frage.

Haareis bildet sich an schneefreien Wintertagen bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt und hoher Luftfeuchtigkeit in Laub- und Mischwäldern an einzelnen Stellen von morschem und feuchtem Laubholz (Abb. 1–4). Wir fanden es auf Holz von Buche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus robur*), Mühlestein und Lämmle [2] beschrieben es auch von Haselholz (*Corylus avellana*) und Brenda Callan in Victoria/Kanada (schriftliche Mitteilung) fand es auf Holz von Ahorn (*Acer macrophyllum*) und Erle (*Alnus rubra*).

Auf dem dunkelbraunen Waldboden erscheint Haareis in Gestalt vereinzelter oder lokal gehäufte weißer Flecken. Es besteht aus dicht stehenden, bis über 10 cm langen Eishaaren. Diese wachsen aus dem Holzkörper von toten Aststücken, an denen die Rinde sich gerade löst oder schon gelöst hat. Oft wird das Abheben der Rinde durch den Druck der wachsenden Haare gefördert (Abb. 2). Die Haare sind entweder glatt mit seidigem Glanz und einer Dicke von 0,01 bis 0,1 Millimeter [2] oder sie haben eine rauhe, etwas filzige Oberfläche. Sie können gerade oder lockig gebogen sein, oft parallel über mehrere cm Länge, häufig linear angeordnet und gescheitelt, manchmal wellig kraus. In seltenen Fällen ist eine Zonierung erkennbar (Abb. 3). Steigt die Lufttemperatur über den Schmelzpunkt, so werden die Haare watteartig-filzig, lokal gelegentlich mit einer bräunlichen Verfärbung. Vor dem Schmelzen degenerieren sie zu einer schneeartigen Masse.

Gelegentlich findet man im Haareis Ansammlungen von Springschwänzen (Collembolen) (Abb. 1). Es handelt sich



Abb. 1. Haareis mit einer Ansammlung von „Schneeflöhen“ (Springschwänze, Collembola), die etwa 2 mm lang sind. [Photo Ch. Mätzler]

vermutlich um den Schneefloh *Ceratophysella sigillata*. Diese Art nimmt im Gegensatz zu allen anderen winteraktiven Springschwanzarten selbst bei Temperaturen bis – 2 °C Nahrung auf [3]. Sie lebt in feuchten Wäldern, jedoch nicht allgemein verbreitet, sondern zerstreut in großen Kolonien.

Verwandte Phänomene

Haareis (*Ice Hairs*) wurde in der Literatur oft gleichgesetzt oder verwechselt mit zwei verwandten, jedoch wesentlich von ihm verschiedenen Phänomenen:

- Stängel- oder Kammeis (*Needle Ice*) wächst nicht auf morschem Holz, sondern auf Humuserde oder porösem Gestein. Es besteht nicht aus feinen, biegsamen Haa-



Abb. 2. Die in Ablösung begriffene Rinde wird durch die auf dem Holzkörper wachsenden, ca. 1 cm langen Eishaare abgehoben, wobei ein knisterndes Geräusch auftreten kann. [Photo Ch. Mätzler]

ren, sondern aus steifen Stängeln in der Dicke von mm, die sich zu Säulen von cm-Dicke vereinigen können. Es wurde von Rossmann genau beschrieben und erklärt [4].

- **Bandeis** (*Ice Ribbons* oder *Ice Flowers*) wächst zwar wie Haareis aus einem pflanzlichen Substrat, jedoch nicht aus morschem Holz, sondern aus Rissen von Stängeln oder Strünken verschiedener noch wurzelnder krautiger oder verholzender Pflanzen. John Frederick William Herschel, der Sohn des berühmten Astronomen Friedrich Wilhelm Herschel und selbst auch Astronom, beobachtete es auf Strünken von Sonnenblumen und Disteln und beschrieb es als „band- oder hemdkrausenartige wellenförmige Masse...[, die] scheinbar aus Längensrissen des Stiels in weichem Zustande hervorgequollen war“ [5]. Carter beschreibt in einer ins Internet gestellten Studie zahlreiche solche Fälle auf Stängeln der amerikanischen Pflanzengattungen *Cunila*, *Pluchea*, *Verbesina*, *Veronia* u. a. [6].

Diese beiden Eisphänomene haben mit dem Haareis gemeinsam, dass sie nicht aus atmosphärischem Wasser entstehen (also nicht zu den Hydrometeoren gehören wie Rauhreif), sondern aus einem feuchten Substrat herauswachsen. Im Unterschied zum Haareis haben sie vermutlich rein physikalische Ursachen.

Bisherige Berichte

Die bisherige Literatur über Haareis ist spärlich. Wir gehen im Folgenden kurz auf Autoren ein, die mit Haareis experimentiert oder einen Zusammenhang mit Pilzen vermutet haben. Der Meteorologe und bekannte Polarforscher Alfred Wegener, der durch die Kontinentaldrifttheorie berühmt wurde, beobachtete Haareis im Winter 1916/1917 in den Vogesen und im Februar 1918 in Rheinsberg i. d. Mark in Norddeutschland [1]. Es gelang ihm, auf den mitgenommenen Hölzern erneut Haareis zu erzeugen. Wegener vermutete einen Zusammenhang der Haareisbildung mit dem auf der Holzoberfläche beobachteten Pilzmycel. Sein Marburger Kollege, der Direktor des Botanischen Gartens Geheimrat Arthur Meier, stellte fest, dass das Holz von Pilzhypen durchwuchert war. Pilzfruchtkörper waren nicht

vorhanden. Wegener zog folgenden Schluss: „Meine . . . Beobachtungen dürften einen weiteren Schritt zur Klärung der Entstehung dieses Eises bedeuten, da aus ihnen hervorgeht, dass ein Pilz in entscheidender Weise dabei mitwirkt.“ [1]. Über die Art des Holzes sagte Wegener nichts. An älterer Literatur erwähnte er einzig Herschel [5], der aber nicht das Haareis auf morschem Holz beschrieb, sondern die verwandte Erscheinung von Bandeis (s.o.).

In der 1975 von Mühlestein und Lämmle veröffentlichten Studie *Neue Untersuchungen zur Entstehung von Kammeis (Haareis)* [2] wird bereits im Titel klar, dass die Begriffe Kammeis und Haareis fälschlicherweise als Synonyme verwendet werden. Die beschriebenen Experimente beziehen sich auf Haareis. Es gelang den Autoren, in einer Klimakammer auf morschem, vollständig durchnässtem Laubholz Haareis nachzuzüchten. Als Erklärung für das Phänomen vermuteten sie osmotische Kräfte und postulierten deshalb die Existenz von semipermeablen Membranen im toten Holz.

Wenige Jahre später beschrieb Lenggenhager [7] Haareis aus der Umgebung von Bern (1979, 1984 und 1985). Es gelang auch ihm, auf den im Wald gesammelten Stücken Haareis nachzuzüchten. Bei Nachttemperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt erhielt er regelmäßig bis 4 cm langes Haareis. Er machte auch Versuche mit frischen, künstlich entrindeten Aststücken verschiedener Laubhölzer, aber ohne jeden Erfolg: Ausschließlich auf Buchenholz, das er mit Haareis gesammelt hatte, konnte er solches nachzüchten. Über die Ursache der Erscheinung stellt er Mutmaßungen an. Nur indirekt taucht dabei die Pilzhypothese auf, indem er u. a. einen Gärungsprozess als mögliche Ursache in Betracht zieht.

Wagner beobachtete Haareis erstmals 1972 in einem Wald in der Nähe von Bern [8, 9]. 1974 entdeckte er auf Haareis tragenden Hölzern Fruchtkörper zweier Pilzarten, welche von H. Cléménçon als *Tremella mesenterica* und *Exidia glandulosa*, ganzjährig aktive Basidiomyceten, bestimmt wurden. Ohne Kenntnis von Wegeners Arbeit [1] vermutete er einen kausalen Zusammenhang zwischen Pilzen und



Abb. 3. Seidenartiges, über 10 cm langes Haareis („Seideneis“) mit deutlicher Zonierung. Wegener schrieb dazu [1]: „ . . . eine Art Schichtung, welche sich durch den ganzen Schopf parallel zur Ausgangsfläche hindurchzog, indem nämlich alle Härchen in gleichem Abstände vom Holz durchsichtiger oder undurchsichtiger wurden, was wohl auf Wachstumsstockungen hindeutet.“ [Photo K. Lauber]



Abb. 4. Schmelzendes, ca. 5 cm langes Haareis. Bei einigen noch freistehenden Haaren sind längs eines extrem dünnen Restfadens kleine Wasserperlen zu sehen. Die meisten Haare wachsen beim Schmelzprozess zusammen. [Photo Ch. Mätzler]

dem Haareis. Rein physikalische Wirkungen, die von anderen Autoren vorgeschlagen worden waren (Kapillarität und Osmose nach [2], Ausdehnung des Wassers unterhalb von + 4°C und beim Gefrieren nach [10]) hielt er als Erklärung der Erscheinung für ungenügend.

Pilzhypothese und Holzanatomie

Die Vermutung, dass ein lebender Pilz hinter dem merkwürdigen Phänomen stecken könnte, stützt sich – nebst den oben dargelegten Beobachtungen – auf folgende physiologische und holzanatomische Fakten: Saprophytische Pilze leben von organischen Nährstoffen, die sie enzymatisch abbauen. Durch aeroben (oxidativen) Abbau von Stärke und Fett, wie sie im Holzkörper vor allem in den Holzstrahlen eingelagert sind [11], entstehen als Endprodukte CO₂ und H₂O sowie etwas Wärme. Das feuchte Gasgemisch verlässt das Holz auf dem Weg des geringsten Widerstandes und gefriert beim Austritt an die Luft, falls diese genügend kalt und mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Als Austrittswege kommen die Holzstrahlen in Betracht [11]. Holzstrahlen (früher als primäre und sekundäre Markstrahlen bezeichnet) sind radiär zwischen den Leitbündeln verlaufende Reihen dünnwandiger Zellen (Abb. 5a–c). Sie bilden ein dichtes System feiner Kanäle, die dem radialen Stofftransport dienen. Sie liegen stockwerkartig übereinander. Ihre Mündungsreihen

sind auf dem hellen Holzkörper als dunkle Linien sichtbar. Der für die Dicke der Eishaare maßgebende Durchmesser der Holzstrahlzellen beträgt beim Holzstrahl der Abb. 5b ca. 0,012 mm.

Als verursachende Pilze kommen zusätzlich zu den beiden genannten Basidiomyceten die winteraktiven Ascomyceten *Diatrypella favacea* und *Hypoxyylon spec. (H. multiforme?)* in Betracht, welche Beatrice Senn-Irlet auf den von uns 2008 gesammelten Versuchsstücken bestimmen konnte. Auf einem Photo stellte sie zudem vermutlich den Basidiomyceten *Dacrymyces stillatus* fest (Abb. 7). Die Fruchtkörper treten meist auf der noch intakten Rinde auf.

Mit den nachfolgend beschriebenen Versuchen wird die Pilzhypothese geprüft.

Experimentelle Prüfung der Pilzhypothese

Erfolg versprechende Versuche können nur mit Hölzern durchgeführt werden, auf denen in der Natur schon Haareis gewachsen ist. Die Bedingungen dafür waren im Winter 2007/2008 im schweizerischen Mittelland während längerer Zeit günstig. In drei verschiedenen Wäldern konnte totes Buchenholz mit Haareis gesammelt werden, meist Zweigstücke von 0,5 bis 2 cm Durchmesser, auf denen die Rinde wenigstens stellenweise schon abgelöst war oder sich gerade löste. Auf der noch intakten Rinde fanden sich bei einigen Stücken Fruchtkörper von Pilzen der oben genannten Gattungen.

(1) Nachzüchtung von Haareis

Wegener war es in seiner Pionierarbeit [1] gelungen, Haareis auf Holz nachzuzüchten, das zuvor mit Haareis infiziert war. Er stellte die Versuchshölzer hierzu mit dem unteren Teil in Wasser und setzte sie Lufttemperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt aus. Lenggenhager erreichte dasselbe, indem er die feuchten Versuchshölzer in nasse, oberflächlich eben gefrierende Erde steckte [7]. Mühleisen und Lämmle durchnässten die Versuchshölzer durch min-

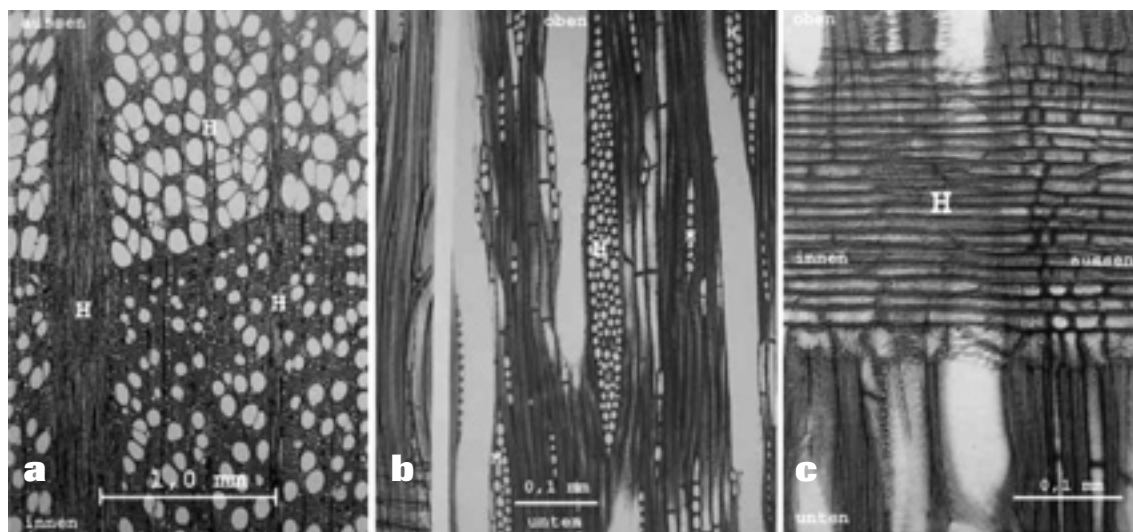


Abb. 5. Buchenholz-Anatomie in drei verschiedenen Schnittrichtungen. – **a.** Querschnitt an einer Jahringgrenze. Oben Frühjahrsholz mit weiten Leitgefäßen, unten dichtes Spätholz des Vorjahres. Die Holzstrahlen (H) bilden horizontale Kanäle zwischen vertikal verlaufenden Leitgefäßen. Sie bestehen aus hintereinandergereihten, dünnwandigen, röhrenförmigen Zellen. – **b.** Längsschnitt tangential durch Frühjahrsholz. Die 1 bis 4 Zellen breiten Holzstrahlen (H) sind quer geschnitten. – **c.** Längsschnitt radial durch einen kräftigen, aus ca. 20 übereinander liegenden Zellkanälen bestehenden Holzstrahl (H) in Frühlingsholz. Aus [11]



Abb. 6. Polierte Querschnitte durch Buchenzweige, welche Haareis trugen, mit klar erkennbaren Jahrringen, primären und sekundären Holzstrahlen. Die von Pilzmycel durchwucherten Partien unterscheiden sich klar von dem hellen, noch nicht befallenen Holz. [Photo R. Wanner]



Abb. 7. Ca. 2 cm dicker Buchenzweig, der Haareis trug, mit Pilzfruchtkörpern wahrscheinlich von *Dacrymyces stillatus* (gelb) und *Hypoxylon spec.* (schwarz). [Photo M. Gsell]

destens einstündiges Wässern und exponierten sie dann, auf feuchtem Tuch liegend, in einer Klimakammer bei Temperaturen von 0 bis -5°C [2]. Sie erzeugten so Eishaar mit Wachstumsgeschwindigkeiten von durchschnittlich 0,6 cm pro Stunde. Auch wir experimentierten mit dieser Methode, doch arbeiteten wir nicht mit einer Klimakammer, sondern exponierten die Holzstücke in Frostnächten auf einem Wohnungsbalkon, also vor Niederschlägen und starkem Wind geschützt im Freien. Sobald die Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt sank, entstanden auf den vollständig durchnässten, aber oberflächlich abgetrockneten Versuchshölzern Eishaare, die in den ersten Stunden mit Geschwindigkeiten von einem halben bis über einen Zentimeter pro Stunde wuchsen. Das Wasser im nassen Tuch, auf dem die Hölzer lagen, gefror gleichzeitig. Bei weiter sinkender Temperatur trat eine Verlangsamung des Wachstums auf. Wir erreichten in einer Nacht Haarlängen von maximal 4 bis 5 cm (Abb. 8). Da die Tagestemperaturen immer im positiven Bereich lagen, konnten keine „Dauerzuchten“ über mehrere Tage durchgeführt werden.

(2) Versuche zur Ausschaltung der Pilzmycelien

Für den entscheidenden Test zur Pilzhypothese wurden die besten der zur Verfügung stehenden Hölzer verwendet, d.h. diejenigen, bei denen sich in den Vorversuchen der üppigste Wuchs von Haareis zeigte. Diese Stücke wurden zweigeteilt: Ein Teil wurde Hitze, Fungizid, oder Alkohol ausgesetzt, der andere unbehandelt als Kontrolle verwendet.

Bei den *Hitzeversuchen* wurde das Versuchsstück während 2 bis 3 Minuten siedendem Wasser ausgesetzt und anschließend kalt gewässert. Als *Fungizid* wurde ein käuflicher „Schimmel-Entferner“ mit 2,4% Natriumhypochlorit und 0,4% Natriumhydroxid (Giftklasse 5) verwendet, eine klare, farblose wässrige Flüssigkeit. Das Versuchsstück wurde während 90, 60 oder 15 Minuten in die Fungizidflüssigkeit getaucht und anschließend während mindestens 15 Minuten in fließendem Leitungswasser vom Fungizid befreit. Beim *Alkoholversuch* wurde das Versuchsstück während 90 Minuten in Alkohol 70 % gebadet und anschließend gründlich gewässert.

Folgen der Hitzebehandlung

Die Hitzebehandlung führte in allen drei Versuchen dazu, dass an den Holzstücken die Haareisbildung ganz unterblieb oder deutlich vermindert war, während es an den Kontrollhölzern zu üppiger Haareisbildung kam.

Ein erstes Versuchsstück zeigte nach der Hitzebehandlung vom 22. Januar während 19 Tagen in 10 Versuchsnächten unter dem Gefrierpunkt keine Spur von Haareis. Nach 23 Tagen, am Morgen des 14. Februar, entstand erstmals wieder eine Spur von ca. 1 mm langem „Flaumeis“, eine äußerst feine Form des Haareises.

Das zweite Versuchsstück bildete nach der Hitzebehandlung vom 28. Januar während 10 Tagen keine Spur von Haareis. Nach 14 Tagen entstanden erstmals wieder Spuren von 1 bis 2 mm langem Flaumeis.

Das dritte Versuchsstück zeigte in der ersten Nacht nach der Hitzebehandlung vom 16. Februar eine Flaumeisbildung von 2 mm, in den folgenden Nächten von 1 cm. Bei den Nachversuchen in den kalten Nächten um den 20. März zeigte das Hitzestück keine oder nur minimale Haareisbildung. Die unbehandelten Kontrollstücke wiesen bei allen Versuchen üppiges, 3 bis 4 cm langes Haareis auf (Abb. 9 a,b). Der Unterschied zwischen den drei Proben kann auf ungleicher Astdicke, aber auch auf etwas verschiedener Dauer der Hitzebehandlung beruhen.

Folgen der Fungizidbehandlung

Das Fungizid unterdrückte bei genügender Einwirkungszeit (90 Min) die Haareisbildung vollständig. An den Kontrollhölzern und an den Partien der Versuchshölzer, die aus der Fungizidlösung herausragten, kam es zu deutlichem Haareiswachstum. Versuche mit kurzer Einwirkungszeit (15 Min.) ergaben widersprüchliche Resultate.

Einwirkung 90 Minuten: Das behandelte Versuchsstück wies am ersten Morgen (5. Februar) nach der Behandlung keine Spur von Haareis auf, während das Kontrollstück üppiges, 1,5 cm langes Haareis zeigte. Auch der Teil des Versuchsstücks, der bei der Behandlung aus

der Fungizid-Flüssigkeit herausgeragt hatte, zeigte noch 1 cm langes Haareis. Bei Folgeversuchen am 8., 11., 12. und 14. Februar bildeten sich am Versuchsstück nur sehr feine, flaumige Ansätze von Haareis, während die Kontrolle jeweils üppigen Haareiswuchs zeigte.

Einwirkung 60 Minuten: Das Versuchsstück wies am ersten Morgen nach der Behandlung (17. Februar) nur 0,2 cm Haareis auf, das Kontrollstück zeigte üppigen Haareiswuchs von 3,5 cm. Die Wiederholung des Versuchs am 20. Februar ergab dasselbe Resultat.

Einwirkung 15 Minuten: Das Versuchsstück wies am ersten Morgen nach der Behandlung (12. Februar) 1 cm langen Haareis-Flaum auf, das Kontrollstück nur 0,2 cm! Ein Nachversuch am 14. Februar zeigte erneut auf dem Versuchsstück eher bessere Haareisbildung als auf der Kontrolle. Das sah nach einer begünstigenden Wirkung einer kurzen Einwirkungszeit aus. Ein solcher Hormesis-Effekt konnte jedoch bei einer Wiederholung des Versuchs am 6./7. März mit einem anderen Versuchsstück nicht bestätigt werden: Das behandelte Stück bildete diesmal nur 2–5 mm, das Kontrollstück 5–10 mm langes Haareis.

Folgen der Behandlung mit Alkohol

Eine Alkoholbehandlung führte ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der Haareisbildung, allerdings aus unbekanntem Gründen erst ab dem zweiten Tag.

Beim Versuch mit Alkohol 70 % (90 Minuten Einwirkung) zeigte sich am ersten Tag nach der Behandlung (8. Februar) kein Unterschied gegenüber der Kontrolle, wohl aber bei den Folgeversuchen vom 9., 11., 12. und 14. Februar: Das mit Alkohol behandelte Stück zeigte jetzt nur noch 1 bis 1,5 cm Haareis, während auf dem Kontrollstück regelmäßig 3 bis 4 cm Haareis gebildet wurde.

(3) Wie lange ist „Nachzucht“ möglich?

Lenggenhager hatte Hinweise dafür gefunden, dass die Fähigkeit von Hölzern zur Haareisbildung trotz geeigneter Witterungsbedingungen mit der Zeit abnimmt [7].

So gelang ihm die Nachzucht von Haareis auf seinen im Januar gesammelten Versuchsstücken nach Mitte März auch bei geeigneten Bedingungen nicht mehr. Unsere Überprüfung dieser Frage ergab Folgendes: Am 4./5. März waren nach einer Wärmeperiode von zwei Wochen erstmals wieder Haareis-Bedingungen erfüllt. Auf den im Januar gesammelten Versuchsstücken zeigten sich schon jetzt nur noch vereinzelte Haareis-Ansätze, während die am 15. Februar gesammelten Stücke noch üppiges Haareis produzierten, soweit sie nicht mit Fungizid oder Hitze behandelt waren. Dasselbe konnten wir erneut in den Nächten vom 19. bis 29./30. März sowie in drei Frostnächten im April (5., 8., und 17. April) feststellen (Abb. 9b). Lenggenhagers Befund bestätigte sich also mit den im Januar, aber nicht mit den im Februar gesammelten Versuchsstücken. Bei einem Kontrollversuch am 20. Mai in einer Klimakammer des Instituts für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Birmensdorf, Schweiz, gelang auch mit den Hölzern vom Februar trotz geeigneter Bedingungen keine Haareis-Nachzucht mehr.

Die Annahme liegt nahe, dass das Pilzmycel in einem Holzstück nur während einer gewissen Zeit aktiv sein kann: Wenn die abbaubaren Nährstoffe aufgebraucht sind, erlischt der Dissimilationsprozess.



Abb. 8. Experimentelle Nachzucht von Haareis im Freien. Das gut durchnässte Holz wurde auf einem nassen Frotteetuch während einer Nacht exponiert. [Photo. G. Wagner]

Diskussion

(1) Entstehung und physikalisch-chemische Natur von Haareis

Verschiedene Beobachtungen und Überlegungen machen es wahrscheinlich, dass die Eishaare nicht aus reinem Wasser bestehen:

- Wird reines Wasser unter 0°C gekühlt, so bleibt es ohne die Anwesenheit von Kondensations- oder Gefrierkeimen bis zu tiefen Minustemperaturen flüssig (im Extremfall, etwa in Form von kleinen Wolkentröpfchen, bis – 40°C). Die Eishaare werden aber schon bei einer Lufttemperatur knapp unterhalb 0°C gebildet, typischerweise bei – 1°C, kaum mehr unterhalb von – 3°C. Aus der Atmosphärenphysik [12] ist bekannt, dass in diesem Temperaturbereich vor allem organische Verbindungen als Gefrierkeime wirksam sind, zum Beispiel Metaldehyd (CH₃CHO)₄. In unserem Fall handelt es sich um den „Immersionsmodus“: Die Keime sind schon vor der Abkühlung unter den Gefrierpunkt vorhanden.
- Bei den gegebenen Bedingungen ist die Eisstruktur hexagonal: Als Kristallformen entstehen Plättchen und Säulen. Um Fäden zu generieren, müssen die Eiskristalle viel kleiner sein als der Durchmesser der Haare. Entsprechend viele Gefrierkeime sind deshalb erforderlich. Die Gleichmäßigkeit in Dicke und Länge der aus individuellen Quellen wachsenden Haarfäden erfordert formgebende Kräfte, die sich nicht aus der Natur von Eis ableiten lassen.
- Beim Schmelzprozess bilden sich an den Eishaaren perlkettenartig angeordnete Wassertropfchen, die durch feinste, mit bloßem Auge gerade noch sichtbare Fäden verbunden bleiben (Abb. 4). Wegen der Oberflächenspannung, die bei Eis und Wasser nahezu identisch ist, können die Restfäden nicht aus Eis bestehen. Es muss sich um einen fadenziehenden Stoff handeln, der dem Haareis auch die beobachtete Flexibilität verleiht. Es kommt eine Substanz in Frage, die mit dem Wasser aus dem Holz austritt. Es ist vielleicht dieselbe Substanz, deren Moleküle als Gefrierkeime wirken, vermutlich ein Nebenprodukt des Pilzstoffwechsels.

- Beim Schmelzen entstehen manchmal lokale bräunliche Verfärbungen, und das Schmelzwasser hat, wie schon Wegener [1] feststellte, eine schwach hellbräunliche Tönung, ist aber trotzdem recht klar.
- Die Schmelzflüssigkeit ist nach Wegener [1] wie nach unseren eigenen Wahrnehmungen „anscheinend schwach riechend“. Auch die mehrfach beobachteten Collembolen im Haareis (Abb. 1) könnten durch einen Geruch angelockt worden sein.

(2) Herkunft des Wassers

Bei der Betrachtung der oft erstaunlich großen Haareisbüschel auf unscheinbaren kleinen Aststücken stellt sich zwingend die Frage nach der Herkunft des Wassers, aus dem das Haareis entsteht. Es kommen in Frage: (1) Wasserdampf aus der Atmosphäre, (2) Wasserdampf aus dem aerobischen Abbauprozess organischer Stoffe, (3) im Holz vorhandenes Wasser. Die Tatsache, dass Haareis manchmal unter noch anliegender Rinde gebildet und diese durch das Eis abgestoßen wird, lässt darauf schließen, dass das nötige Wasser nicht aus der Atmosphäre (1) stammt, sondern aus dem Holz. Bezüglich der Annahme (2), das Wasser stamme aus dem Abbauprozess organischer Stoffe, stellt sich die Frage nach der quantitativen Massenbilanz.

Dazu sind folgende Überlegungen nötig: Das Monomer der Stärke, die als Ausgangsstoff in erster Linie in Frage kommt, ist $C_6H_{10}O_5$. Mit 6 aus der Luft stammenden Sauerstoffmolekülen (O_2) bilden sich bei der Verbrennung 5 Moleküle H_2O und 6 Moleküle CO_2 . Eine einfache Rechnung ergibt, dass für die Bildung von 1g Eis aus Atmungswasser ca. 1,8g Stärke abgebaut werden muss. Ein Holzstück mit einem Feuchtgewicht von ca. 50g bildet aber in einer einzigen Nacht gut 1g Haareis. Das entspricht etwa 4 bis 5% des reinen Holzgewichtes. Mit dieser Abbaurrate wäre nicht nur die Stärkereserve im Holz, sondern die ganze Holzmasse in wenigen Tagen abgebaut. Wir konnten aber auf denselben Holzstücken während mehr als 60 Tagen immer wieder Haareis züchten. Zudem ist zu bedenken, dass der Dissimilationsprozess und damit der Wasserausstoß nicht nur während der Perioden der Haareisbildung, sondern andauernd im Gange ist, was durch eine Beobachtung von Wegener [1] bestätigt wird: Er konnte auf einem Haareis-Versuchsstück bei Zimmertemperatur mit starker Lupenvergrößerung „zahlreiche winzig kleine Wassertröpfchen auf der Holzoberfläche erkennen“ ([1]: S. 600). Bezüglich der hauptsächlichen Wasserquelle für das Eis der Haare bleibt somit nur die Annahme (3): Im feuchten Holz vorhandenes Wasser, welches vom Holz aus dem nassen Boden oder aus Niederschlag durch Kapillarwirkung aufgenommen wurde und immer wieder aufgenommen wird. Zwei Wärmequellen verzögern das Abkühlen des Holzes und damit das Gefrieren des im Holz enthaltenen Wassers: Die beim Atmungsprozess im Pilzmycel entstehende Verbrennungswärme sowie Wärme aus dem Phasenübergang des Wassers beim Gefrieren. Wenn das Wasser auch im Holzinnern gefriert, hört das Haareiswachstum auf.

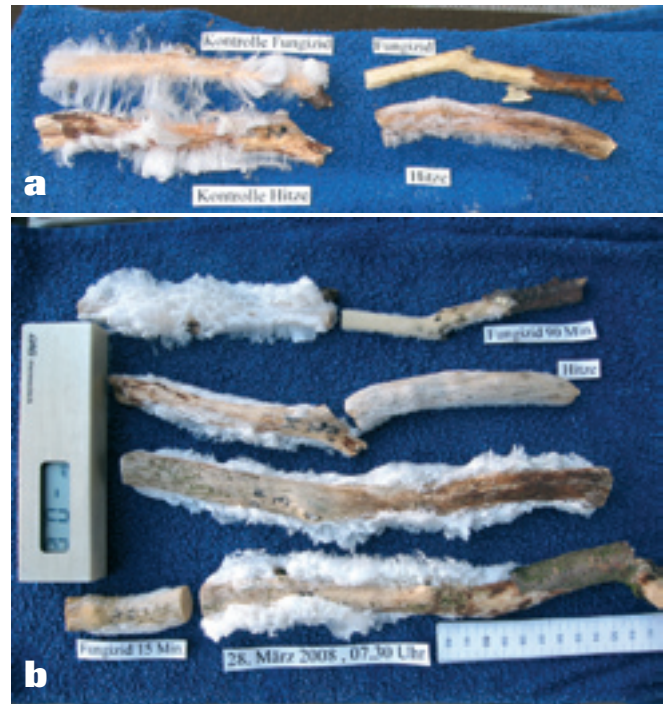


Abb. 9. Wirkung von Fungizid- und Hitzebehandlung. – **a.** Versuchsergebnis der Nacht 16./17. 2. 2008: Ein abgetrenntes Zweigstück, das in Vorversuchen reichlich Haareis gebildet hatte, war während 60 Minuten in einem Fungizid gebadet, ein zweites während 2 Minuten gekocht worden. Während die unbehandelten Kontrollstücke erneut üppigen Haareiswuchs zeigten, entstand auf den Versuchsstücken kein bzw. nur sehr wenig Haareis. [Photo U. Schär] – **b.** Versuchsergebnis der Nacht 27./28. 3. 2008: Die unbehandelten Hölzer zeigten immer noch schönen Haareiswuchs. Auf den behandelten Stücken (Fungizid 90 Min. am 4. 2., bzw. 15 Min. am 13. 2., Kochen 2 Min. am 16. 2.) entstand nur 1 bis 2mm langer Eisflaum. [Photo G. Wagner]

Warum tritt bei der Haareisbildung Wasser durch die Holzstrahlkanäle aus dem Holzkörper aus? Die oben bei der Darlegung der Pilzhypothese formulierte Vermutung erscheint wahrscheinlich: Der aerobe Dissimilationsprozess führt zu einer CO_2 -Übersättigung des Wassers im Holz. Der entstehende Gasdruck wirkt als treibende Kraft für den Ausstoß von Wasser auf dem Weg des geringsten Widerstandes. Obschon atmosphärisches Wasser für die Haareisbildung nicht in Frage kommt, spielt es doch eine wesentliche Rolle: Es muss nicht nur das Holz mit Feuchtigkeit mehr oder weniger gesättigt sein, sondern auch dessen Umgebungsluft. Die auf feuchter Unterlage liegenden Versuchsstücke zeigten den weitaus stärksten Wuchs von Haareis regelmäßig nach unten und an ihren Seiten, das heißt an den Orten größter Luftfeuchtigkeit, und nicht nach oben. Wo die Luft mit Wasserdampf nicht gesättigt ist, sublimiert und verschwindet der aus den Holzstrahlen fließende Eisflaum in kurzer Zeit. Hohe Luftfeuchtigkeit in der nächsten Umgebung ist also eine notwendige Randbedingung.

(3) Beurteilung der Pilzhypothese

Alle Versuche, in denen die im Holz lebenden Pilzmycelien durch Hitze, Alkohol oder Fungizid geschädigt wurden, führten gegenüber den unbehandelten Kontrollen zu einer

Hemmung oder Unterdrückung der Haareisbildung. Dass nach einer gewissen Zeit (bei den Fungizidversuchen nach Tagen, bei den Hitzeversuchen erst nach Wochen) eine gewisse Erholung der Haareisbildung auftrat, ist damit erklärbar, dass der Pilz durch die Einwirkung zwar schwer geschädigt, aber nicht ganz abgetötet wurde. Es kann sich dabei um überlebende Reste des Mycels oder um eine Neubildung aus Sporen handeln. Die Annahme, dass die Haareisbildung nach den verschiedenen Eingriffen nur infolge struktureller Veränderungen des Holzes unmöglich gemacht wurde, erscheint für alle drei Versuchsvarianten unwahrscheinlich. Selbst durch Kochen wird die Holzstruktur nicht verändert (Prof. Fritz Schweingruber, persönliche Mitteilung). Als Bilanz kann festgestellt werden, dass nicht nur die Beobachtungen in der Natur, sondern auch die Versuchsergebnisse ausnahmslos für die Pilzhypothese sprechen. Wegeners Schlussfolgerung, „dass ein Pilz in entscheidender Weise dabei mitwirkt“ [1], erscheint mit großer Wahrscheinlichkeit bestätigt. Die wesentlichen Fakten seien hier nochmals aufgezählt:

- Das Haareis wächst auf morschem Laubholz, das von Pilzmycel durchwuchert ist, nicht auf frischem Laubholz.
- In der Nachbarschaft von Haareis treten oft Fruchtkörper von auf Laubholz spezialisierten winteraktiven Gallertpilzen auf.
- Haareis tritt meist nur auf einigen wenigen der vielen zur Verfügung stehenden gleichartigen Hölzer auf und auch auf diesen oft nur in einzelnen Partien.
- Die Wachstumsgeschwindigkeit der Eishaare nimmt mit sinkender Temperatur ab.
- Alle Eingriffe, welche den Pilz schädigen oder abtöten (Hitze, Fungizid, Alkohol), hemmen oder verhindern die Bildung von Haareis.
- Eine gewisse Zeit (Tage bis Wochen) nach dem Eingriff, mit dem die Haareisbildung unterdrückt wurde, kommt diese langsam wieder in Gang.
- Nach einer gewissen Zeit (mehrere Wochen) wird auch bei günstigen äußeren Bedingungen kein Haareis mehr gebildet.

Obschon unsere Versuche und Überlegungen die Pilzhypothese als gut gesichert erscheinen lassen, sind sie doch noch weit davon entfernt, dem merkwürdigen Phänomen Haareis alle Geheimnisse zu entreißen. Weitere systematische Untersuchungen mit Laborhilfsmitteln, die uns nicht zur Verfügung standen, sind unerlässlich.

Eine ausführlichere Version unserer Studie wurde als Forschungsbericht [13] ins Internet gestellt.

Danksagung

Die vorliegende Studie wäre nicht möglich gewesen ohne die Mitwirkung zahlreicher Helferinnen und Helfer, denen wir Hinweise auf Haareis-Vorkommen, das Sammeln von Versuchsstücken, photographische Aufnahmen oder Hinweise auf Literatur verdanken: Henk de Bruin [14], François Burnier, Karsten Dörfer, Bernhard Fischer, Rolf Fries, François Gautier, Maroia Gsell, Niklaus Kämpfer, Niklaus Lüthi, André Masson, Hans Christian Rufener, Christoph Scheidegger, Fritz Schweingruber [11], Emil Suter, Richard Wanner, Alfred Weiersmüller und andere. Ihnen allen sei hier unser herzlicher Dank ausgesprochen. In unseren Dank beziehen wir auch Prof. James R. Carter in Illinois/USA [6] und Dr. Brenda Callan in Victoria/Kanada ein, mit denen zeitweise ein intensiver und fruchtbarer Mail-Kontakt bestand.

Literatur

- [1] A. Wegener, Die Naturwissenschaften **6**/1, 598, (1918). – [2] R. Mühlestein, A. Lämmle, Meteorol. Rdsch. **28**, 60 (1975). – [3] J. Zettel, U. Zettel, Mitt. Naturf. Ges. Bern **65**, 79 (2008). – [4] F. Rossmann, Meteorol. Zeitschrift, **55**(2), 64 (1938). – [5] J. F. W. Herschel, Pogg. Ann. d. Phys. u. Ch. (Leipzig) **28**, 231 (1833). – [6] J. R. Carter: Ice Ribbons, Ice Flowers, Frost Flowers or whatever they might be called. <http://www.ilstu.edu/~jrcarter/ice/>. 2007. – [7] K. Lenggenhager, Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Ser. B. **36**, 371, (1986). – [8] G. Wagner, Schweiz. Zeitschrift für Pilzkunde **83**, 269 (2005). – [9] G. Wagner, Die Alpen 11/2007, 64. – [10] W. Emeis, Die Naturwissenschaften **78**, 124 (1919). – [11] F. H. Schweingruber: Anatomie europäischer Hölzer. – Anatomy of European woods. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf (Hrsg.). Haupt, Bern und Stuttgart 1990. – [12] H. R. Pruppacher, J. D. Klett: Microphysics of Clouds and Precipitation. 2nd Edition. Kluwer. Dordrecht 2000. – [13] G. Wagner und C. Mätzler: Haareis auf morschem Laubholz als biophysikalisches Phänomen / Hair Ice on Rotten Wood of Broadleaf Trees – a Biophysical Phenomenon, IAP Forschungsbericht Nr. 2008-05-MW, s. <http://www.iap.unibe.ch/publications/>, Institut für Angewandte Physik, Universität Bern 2008. – [14] H. de Bruin, B. van den Berg. Meteorologica **15**(2), 1(2006).

Dr. Dr. h. c. **Gerhart Wagner** (Jahrgang 1920) ist ursprünglich Zoologe und war nacheinander Gymnasiallehrer für Biologie und Geologie, Bundesbeamter für Strahlenschutz, Assistenzprofessor für Zoologie an der Universität Zürich, Rektor eines Gymnasiums in Bern. Spezialgebiet eiszeitliche Mittelmoränen. In seinem Ruhestand (seit 1983) schuf er zusammen mit Konrad Lauber im Haupt-Verlag die *Flora des Kantons Bern* (1991, 4. Aufl. 2006) und die *Flora Helvetica* (1996, 4. Aufl. 2007). Im Baumgarten 10, CH-3066 Stettlen, E-Mail: wagnerger@bluewin.ch

Prof. Dr. **Christian Mätzler** (Jahrgang 1945) leitet die Forschungsgruppe Umweltradiometrie in der Mikrowellenabteilung des Instituts für Angewandte Physik der Universität Bern. Seine Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung und Prüfung von Methoden zur Fernerkundung von Wasser in allen Zustandsformen an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre. Dabei stehen Mikrowellenmethoden im Vordergrund. Er ist Herausgeber und Mitautor der Monographie *Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing* (IET Electromagnetic Waves Series 52. London, UK, 2006).

Staffelweg 30, CH-3302 Moosseedorf, E-Mail: matzler@iap.unibe.ch