

Abbau von Holz durch holzerstörende Pilze

Grundlagen, Biologie, Anwendung

T. Huckfeldt

Vortrag anlässlich des 3. Lauenburger Holzschutztages (DHBV)



Dr. Tobias Huckfeldt
Essener Straße 4 D2
225419 Hamburg
Tel: 040 / 49200989
Fax: 040 / 49200992
www.hausschwamminfo.de

Grundlagen - Fäuletypen

Braunfäule

Braunfäuleerreger unter den Hausfäulepilzen verursachen 90 bis 95 % aller Holzschäden in Gebäuden (GUILLITTE 1992). Die häufigsten Hausfäulepilze sind Haus- (*Serpula lacrymans*), Keller- (*Coniophora puteana*) und Porenschwamm (*Antrodia vaillantii*), sowie die Gallertränen (*Dacrymyces*) und die Blättlinge (*Gloeophyllum*). Braunfäulepilze bauen Cellulose, Hemicellulose und Pektine ab, nicht aber das Lignin. Mit dem Abbau verliert das Holz schnell seine mechanischen Eigenschaften, noch bevor ein intensiverer Masseverlust eingesetzt hat (SCHULTZE-DEWITZ 1966). So sinkt beispielsweise bei einem Befall mit Echtem Hausschwamm die Bruchlast bei Masseverlusten von nur 4 % um 14,7 bis 28,3 % ab (LIESE & STAMER 1934). Die Abbauleistung von Fäulepilzen ist recht verschieden und abhängig von der Pilzart (Tab. 1), dem Holz (Tab. 2) und den unten noch näher besprochenen Faktoren: Feuchtigkeit, Nährstoffe, Temperatur und Sauerstoff.

Braunfaules Holz schrumpft beim Trocknen in axialer Richtung, was zu dem typischen Würfelbruch mit Rissen quer und längs zur Faser führt (Abb. 1). Im Endstadium des Abbaus verbleibt eine braune Masse mit hohem Ligningehalt, die auf Druck zu Pulver zerfällt.

Die in den Tab. 1 und Tab. 2 genannten Daten sind Anhaltspunkte aus dem Labor, die bei optimaler Entwicklung von der Praxis übertroffen werden können (Abb. 2). Dies zeigen Beobachtungen aus Gebäudebefällen mit dem Echten Hausschwamm, bei denen innerhalb von zehn Monaten eine neue Kiefernholzkonstruktion einsackte. Das bedeutet, dass die Balkenköpfe im Format von 8 x 12 cm versagten und nahezu vollständig zerstört war. Auch eine 2 cm dicke, neu verlegte Eichen-Dielung wurde innerhalb eines Jahres so vollkommen abgebaut, dass sie mit dem Daumen eingedrückt werden konnte.

Im Labor werden Versuche zum Holzabbau routinemäßig zur Überprüfung von Holzschutzmitteln durchgeführt. Hierbei werden nur Pilzstämmen eingesetzt, die eine vorgeschriebene Mindestabbaurrate erreichen.

Weißfäule

Weißfäulepilze haben an Hölzern, die direkt der Witterung ausgesetzt sind, eine große Bedeutung. In Innenräumen sind sie seltener, hier kommt z. B. der Hausporling (*Donkioporia expansa*) vor (KLEIST & SEEHANN 1999). Weißfäulepilze können alle Bestandteile des Holzes abbauen. Dies sind Lignin, Hemicellulose, Pektin und Cellulose. Die mechanischen Eigenschaften des Holzes bleiben im Vergleich zur Braunfäule länger erhalten, allerdings kann die Bruchschlagfestigkeit nach einem zweiwöchigen Pilzbefall um 20 % sinken (SEIFERT 1968). Weißfäulepilze werden meist in zwei Gruppen eingeteilt:

- Weißfäuleerreger, die Lignin und Cellulose annähernd gleichzeitig abbauen, wie die Schmetterlingstramete (*Trametes versicolor*) und der Ausgebreitete Hausporling. Diese Form des Abbaus wird als Simultanfäule bezeichnet.
- Pilze, die überwiegend das Lignin angreifen. Sie werden als Erreger einer „selektiven Weißfäule“ zusammengefasst. Ein Beispiel ist der Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*).

Weißfaules Holz wird faserig, weich und meist im Verlauf des Abbauprozesses heller (Abb. 1). Eine Rissbildung quer zur Faserrichtung, wie sie bei Braunfäulepilzen häufig ist, erfolgt nicht.



Abb. 1. Braun- und Weißfäule an einem Holzstück aus einem Dachboden. Braunfäule (Hauschwamm) links mit Würfelbruch und deutlich dunklerer Farbe als die Weißfäule (Hausporling) rechts.

Tab. 1. Holzabbau durch verschiedene holzerstörende Pilze; angegeben sind die Gewichtsverluste an Kiefernspiltholz (nach verschiedenen Quellen ¹).

Gewichtsverlust	Pilzart	Porenschwamm	Kellerschwamm	Hausporling an Eichenholz	Zaunblättling	Hauschwamm	Schmetterlingstramete
nach 4 - 8 Wochen [%]		5-17	6-13	16	-	3-20	19-28*
nach 10-12 Wochen [%]		10-19	19-28	49	70-73	23-42	28-40*
nach 16-20 Wochen [%]		8-25	28-50	38*	-	19-62	38*

* Buchenholz;

¹ Quellenangaben siehe HUCKFELDT (2001).

Tab. 2. Holzabbau durch den Echten Hauschwamm (*Serpula lacrymans*) an verschiedenen Holzarten; angegeben sind die Gewichtsverluste nach 18 Wochen Inkubation (Quelle: WÄLCHLI 1973).

Holzart	Ulme (Kern)	Eiche (Kern)	Robinie	Erle	Buche	Kiefer (Kern)	Lärche (Kern)
Gewichtsverlust [%]	0,8	1,8	12,1	48,0	51,0	31,5	40,6

Voraussetzungen des Holzbaus

Hausfäulepilze sind in ihrer Abbauleistung von vier Faktoren abhängig a) Feuchtigkeit, b) Nährstoffe, c) Temperatur und d) Sauerstoffgehalt. Daneben spielt auch der Windzug eine Rolle.

a) Die Feuchtigkeit ist der eigentlich begrenzende Faktor für die Zerstörung von Holz. Trockenes Holz wird nicht abgebaut. Die Feuchtigkeitsquellen sind so vielfältig wie ihre Ursachen (WILLEITNER & SCHWAB 1981, HUCKFELDT 2003).

b) Heimisches Bauholz enthält viele Kohlenhydrate (Cellulose, Hemicellulose, Pektin und Lignin), ist aber vergleichsweise arm an Proteinen, Phosphat und Stickstoff. Die Wachstumsgeschwindigkeit und der

- c) Holzabbau können durch den Zusatz von geeigneten Phosphat- und Stickstoffquellen gesteigert werden. Braunfäulepilze sind aber auch in der Lage, gebundenes Phosphat und Magnesium aus Putzen und Böden
- d) herauszulösen und für ihren Stoffwechsel zu verwenden (WEBER 1996). In Gebäuden sind besonders alte Putze, verunreinigte Unterbodenräume und Schüttungen in Einschüben als Nährstoffquelle von Bedeutung.
- e) Die Temperatur ist in Gebäuden für Hausfäulen fast optimal. Sie ist nur bei Bekämpfungsmaßnahmen ein Faktor (HUCKFELDT 2003).
- f) Der Einfluss des Sauerstoffgehalts zeigt sich eindrucksvoll an Rammpfählen, die Jahrhunderte ihre Funktion behalten, solange sie nass bleiben.

Holzabbau

Der Weg der Enzyme ins Holz

Der Holzabbau dient der Nährstoffversorgung der Pilze (Abb. 8). Für den Abbau werden von den Hyphen Enzyme (Fermente) und Radikale abgegeben, die das Holz zerstören. Die hierfür notwendigen Enzyme werden von den Hyphen gebildet und in das Holz ausgeschieden. Dies ist ein komplizierter Prozess der nur teilweise aufgeklärt ist. Der Aufbau einer Hyphe ist in Abb. 3 dargestellt.

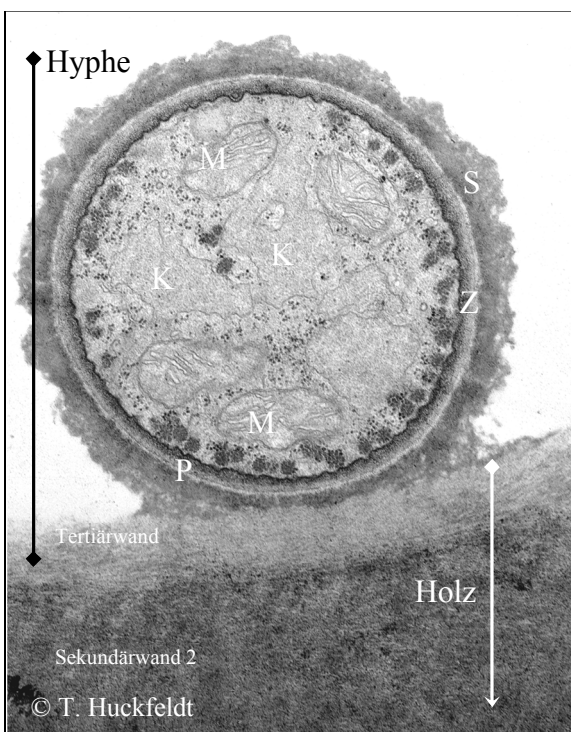


Abb. 3. Elektronenmikroskopische Aufnahme: Hyphe des Weißen Porenschwammes (*Antrodia vaillantii*) im Querschnitt; Durchmesser dieser Hyphe ca. 2 µm [1000 µm = 1 mm]; K = Zellkern (Steuerzentrum), M = Mitochondrium (Kraftwerke), P = Plasmalemma (selektive „Türen“), S = Schleimschicht (Schutz), Z = Zellwand (Formgebung).



Abb. 2. Ein durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) zerstörter Balkenkopf eines Fußbodens im Mauerauflager (freigelegt); Balken 18 x 24 cm.

Ein Größenvergleich der Hyphen im Holz ist in Abb. 8 gezeigt.

Die Enzyme gelangen ins Holz, aber über den Weg gibt es verschiedene Auffassungen:

- a) Enzyme werden an der Hyphenspitze abgegeben, da diese noch durchlässig ist. Bohrhypen durchdringen die Zellwände und können an dieser Stelle Holz vollständig enzymatisch auflösen, dieses muss an der Hyphenspitze geschehen, da die Hyphe sonst nicht weiter wachsen könnte (Abb 7). Allerdings wurde auch ein hydraulischer Vortrieb diskutiert, da Hyphen einiger Bläuepilze Aluminiumfolie durchdringen können (LIESE & SCHMID 1964).
- b) Enzyme werden im hinteren Teil der Hyphe eingelagert und erst mit dem Tod der Hyphen frei (LACKNER et al. 1991). Für dieses Modell spräche die Größe der Enzym-Moleküle, verbunden mit der Vermutung, dass diese die Hyphenwand nicht durchdringen können.

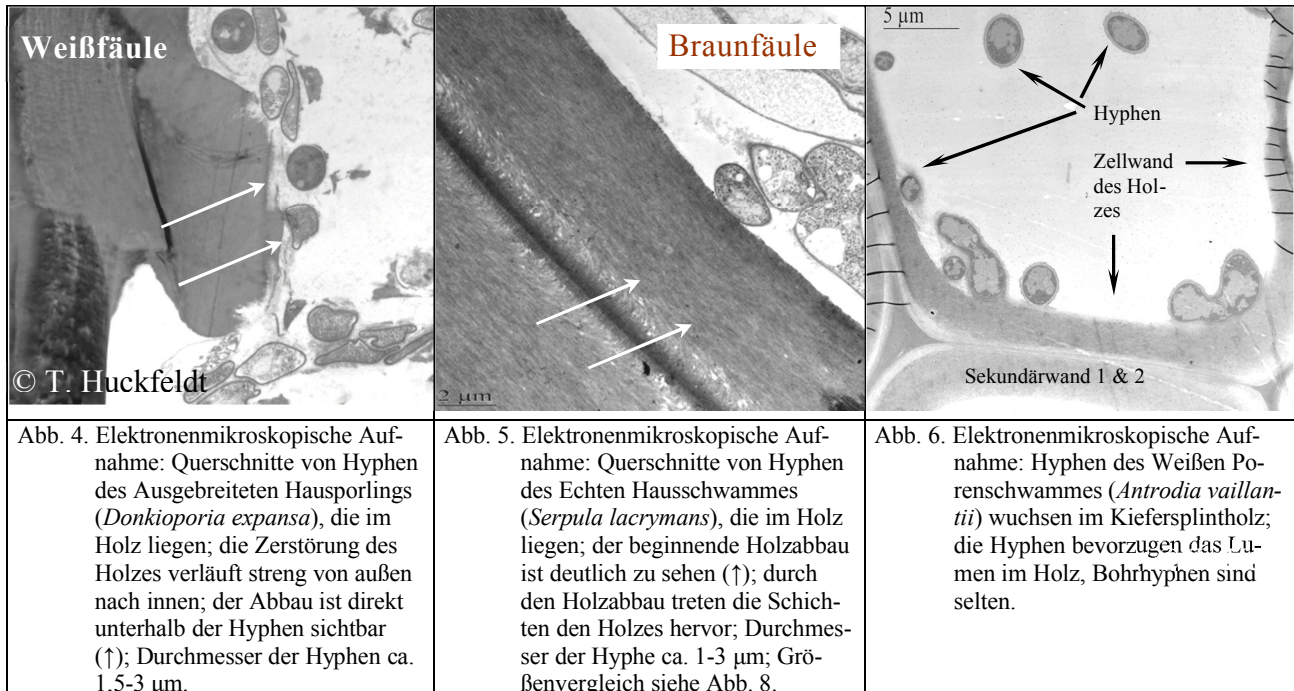
Möglicherweise stimmen beide Ansätze und es gibt beide Abgabeweg nebeneinander.

Enzyme bauen die Cellulose im Holz ab

Eine Reihe von Enzymen spalten Cellulose. Die Cellulose ist ein Riesenmolekül, das aus immer gleichen Bausteinen (Zucker) zusammengesetzt ist. Deshalb lässt sich Holz auch „verzuckern“, um daraus z. B. Alkohol zu gewinnen. Auch Pilze „verzuckern“ Holz.

Die Enzyme, die Cellulose, aber auch Hemicellulose abbauen, spalten unter Wasseranlagerung die Bindungen zwischen den einzelnen Bausteinen der Cellulose. Zuvor müssen die Wasserstoffbrücken zwischen sehr „festen Ketten“ (β -1,4-Glucanketten) gelockert werden. Einige dieser Enzyme sind bei Braun- und Weißfäulepilzen ähnlich, so die Endoglucanasen (SCHMIDHALTER & CANEVASCINI 1992). Für Weiß- und Braunfäulepilze sind alle Enzyme nachgewiesen, die für einen Abbau von Cellulose notwendig sind. Es sind drei zusammenarbeitende Enzymsysteme: Endoglucanasen (zuständig für die Spaltung der „festen Ketten“ zu Vielfachzuckern - Oligosaccharide), Exoglucanasen (Spaltung der Vielfachzucker in Doppelzucker - Cellobiose) und Cellobiasen (Spaltung der Doppelzucker in einfachen Zucker - Glucose) (CARLILE et al. 2001). Nur diese einfachen Zucker können von den Hyphen aufgenommen werden. Ausführlichere Darstellung des Holzbaus siehe z. B. SCHMIDT (1994). Andere Prinzipien des Holzabbaus haben einige Bakterien entwickelt (SCHWARZ 2003).

Neben Enzymen sind auch chemische Prozesse beim Holzabbau durch Braunfäulepilze beteiligt (HIGHLEY 1982). Es werden drei „Reaktionssysteme“ diskutiert, die das Eindringen der Enzyme in das Holz erleichtern sollen: Wasserstoffperoxid, Oxalsäure und Expansine (Einzelheiten z. B. in HUCKFELDT 2003). Auch hier arbeiten möglicherweise zwei oder alle drei Reaktionssysteme zusammen. Dieser Punkt ist derzeit noch offen.



Der sichtbare Abbau des Holzes

Die Hyphen der Braunfäulen wachsen meistens im Lumen (Poren, Gefäßen) des Holzes und zersetzen das Holz durch ihre Enzymabgabe sozusagen von außen - jedoch im Holz (Abb. 6 & 8). Der Holzabbau durch den Hausschwamm und andere Braunfäulepilze beginnt nach elektronenmikroskopischen Untersuchungen in der Primär- und Sekundärwand 1, wohingegen die Mittellamelle, Sekundärwand 2 und Tertiärwand länger

unverändert bleiben (Abb. 5). Die Folge ist, dass der Zusammenhalt des Zellverbundes aufgelöst wird. Dies wird der Grund sein, warum die mechanischen Eigenschaften des Holzes schon bei geringen Masseverlusten, die durch Braunfäuleerreger hervorgerufen werden, stark sinken.

Auch die Hyphen der Weißfäulepilze wachsen im Lumen. Der Holzabbau, z. B. durch den Hausporling, unterscheidet sich jedoch von dem oben beschriebenen. Der Abbau schreitet in den Holzzellen streng von außen nach innen fort, wobei die einzelnen Wandschichten meist gleich intensiv abgebaut werden (Abb. 4). Die mechanischen Eigenschaften bleiben länger erhalten, weil nicht gleich die gesamte Struktur in Mitleidschaft gezogen wird. Das Lignin wird durch folgende Enzyme abgebaut: Lignin- und Manganperoxidase, Laccase und Peroxidase (SCHMIDT et al. 1997).

Auch Braunfäulepilze können Holz in Punkten gänzlich auflösen

In der unmittelbaren Umgebung von Bohrhypen wird Holz durch Hyphen des Echten Hausschwammes, des Porenschwammes und des Saftporlings (*Oligoporus placenta*) vollständig abgebaut (Abb. 7). Bei den Braunfäulepilzen können zwei Abbaumechanismen unterschieden werden: Holzabbau mit „Nahwirkung“ und Celluloseabbau mit „Fernwirkung“.

- Holzabbau mit „Nahwirkung“ wurde bei Bohrhypen und insbesondere bei solchen Hyphen gefunden, die von den Tüpfelkammern aus in die Region der Mittellamelle einwuchsen.
- Celluloseabbau mit „Fernwirkung“ entspricht der „klassischen“ Braunfäule und wurde bei allen untersuchten Braunfäulepilzen gefunden. Der Abbau lässt sich mit den im Holz nachgewiesenen Enzymen, ggf. unter Beteiligung von Oxalsäure oder Expansinen erklären.

Da die beiden Abbaumechanismen der Braunfäule unterschiedliche Muster zeigen, werden unterschiedliche Mechanismen

hierfür verantwortlich sein, für die eine bisher unbekannte Steuerung erforderlich ist. Bei anderen Pilzen sind sehr raffinierte Kontrollmechanismen bekannt, bei denen die Zuckerkonzentration regulierend wirkt. Die Fähigkeit zum Abbau von Lignin durch Braunfäulepilze bleibt auf bestimmte Situationen bzw. Umweltbedingungen begrenzt, wie die Notwendigkeit zur Anlage von Bohrhypen bzw. das Wachstum auf suboptimalen Substraten, zum Beispiel bei sehr hohen Holzfeuchtigkeiten. So werden zum Beispiel vom Kellerschwamm auch moderfäuleartige Kavernen gebildet (KLEIST & SCHMITT 2001). Der Holzabbau ist noch längst nicht vollständig verstanden, bisher sind lediglich die Eckpunkte bekannt.

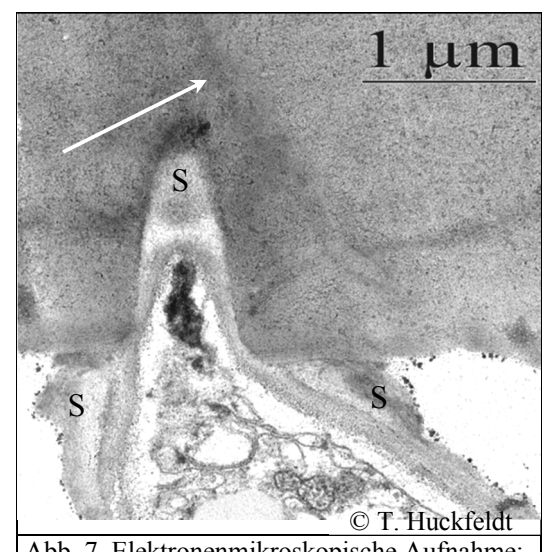


Abb. 7. Elektronenmikroskopische Aufnahme: Eine Bohrhyphe des Weißen Porenschwammes (*Antrodia vaillantii*) dringt mit der Hyphenspitze (↑) ins Holz ein. Die Hyphe ist von einer dicken Schleimschicht (S) umgeben, die bei der Enzymabgabe eine wichtige Rolle spielt.

Literatur

- Carlile, M. J.; Watkinson, S. C.; Gooday, G. W. (2001) *The fungi*. 2. Aufl., Academic press, London, 588 S.
- Guillitte, O. (1992) Epidemiologia des attaques. 2. Aufl., In: *La Mèrùle et autres champignons nuisibles dans les bâtiments*. Jardin Botanique National de Belgique Domaine de Bouchout, S. 34-42
- Highley, T. L. (1982) Is extracellular hydrogen peroxide involved in cellulose degradation by brown-rot fungi? *Mat. Org.* 17 (3), S. 205-214
- Huckfeldt, T. (2001) Echter Hausschwamm – Informationen zu holzzerstörenden Gebäudepilzen. „www.bfah.de/inst4/44/index.htm“ sowie „www.stud.uni-hamburg.de/users/Serpula“
- Huckfeldt, T. (2003) Ökologie und Cytologie des Echten Hausschwammes (*Serpula lacrymans*) und anderer Hausfäulepilze. Dissertation der Universität Hamburg, Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft 213, 208 S.
- Kleist, G.; Seehann, G. (1999) Der Eichenporling, *Donkio- poria expansa* - ein wenig bekannter Holzzerstörer in Gebäuden. *Z. Mykologie*. 65 (1), S. 23-32
- Kleist, G. Schmitt, U. (2001) Characterisation of a soft rot-like decay pattern caused by *Coniophora puteana* (Schum.) Karst. in Sapelli wood (*Entandrophragma cylindricum* Sprague). *Holzforschung* 55 (6), S. 573-578
- Lackner, R.; Srebotnik, E.; Messner, K. (1991) Secretion of ligninolytic enzymes by hyphal autolysis of the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. Stockholm: IRG/WP 1480, 14 S.
- Liese, J.; Stamer, J. (1934) Vergleichende Versuche über die Zerstörungsintensität einiger wichtiger holzzerstörender Pilze und die hierdurch verursachte Festigkeitsminderung des Holzes. *Angew. Bot.* 16 (4), S. 363-372
- Liese, W.; Schmid, R. (1964) Über das Wachstum von Bläupilzen durch verholzte Zellwände. *Phytopatholog. Zeitschr.* 51, S. 385-393
- Schmidhalter, D. R.; Canevascini, G. (1992) Characterization of the cellulolytic enzyme system from the brown-rot fungus *Coniophora puteana*. *Appl Microbiol. Biotechnol.* 34, S. 431-436
- Schmidt, O. (1994) *Holz- und Baumpilze. Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen*. Springer, Berlin, 246 S.
- Schmidt, O.; Schmidt, U.; Moreth-Kebernik, U.; Potsch, T. (1997) Wood decay by the white-rotting basidiomycete *Physisporinus vitreus* from a cooling tower. *Holzforschung* 51 (3), S. 193-200
- Schultze-Dewitz, G. (1966) Beziehungen zwischen der Elastizität und der statischen sowie dynamischen Biegefestigkeit von Kiefernholz nach dem Angriff durch echte holzzerstörende Pilze. *Holz Roh- Werkstoff* 24 (10), S. 506-512
- Schwarz, W. H. (2003) Das Cellulosom- Eine Nano-Maschine zum Abbau von Cellulose. *Naturwissenschaftliche Rundschau* 56 (3), S. 121-128
- Seifert, K. (1968) Zur Systematik der Holzfäulen, ihre chemischen und physikalischen Kennzeichen. *Holz Roh- Werkstoff* 26 (6), S. 208-215
- Wälchli, O. (1973) Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch den echten Hausschwamm (*Merulius lacrimans* (Wulf.) Fr.). *Holz Roh- Werkstoff* 31 (3), S. 96-102
- Willeitner, H.; Schwab, E. (1981) *Holz-Außenverwendung im Hochbau*. Verlagsanstalt A. Koch, Stuttgart, 148 S.

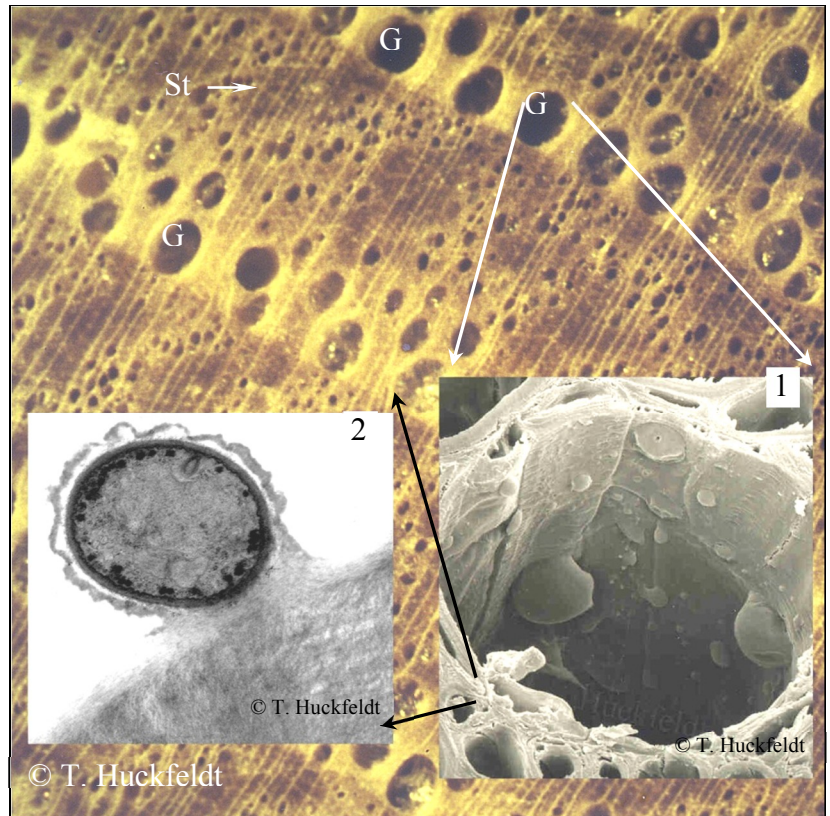


Abb. 8. Größenvergleich der Hyphen im Holz.

- Großes Bild: Eichenholz im Lupenbild - die einzelnen Jahrringe, Holzstrahlen (St) und die Gefäße (G) sind erkennbar;
1. Vergrößerung: Ein einzelnes, großes Gefäß, mit 0,2 mm Durchmesser (Raster-Elektronenmikroskopie-Aufnahme);
 2. Vergrößerung: Ausschnitt einer Holz Zellwand mit anliegender Hyphe, 0,002 mm Durchmesser (elektronenmikroskopische Aufnahme). Eine weitere Vergrößerung ist in Abb. 3 dargestellt und eine Übersicht in Abb. 1 & 2.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Zusammenarbeit des Instituts für Allgemeine Botanik und des Ordinariats für Holzbiologie der Universität Hamburg in der Zeit vom Oktober 1999 bis April 2003. Den Herren PD Dr. H. Quader und Prof. Dr. O. Schmidt danke ich herzlich für ihre Unterstützung und Betreuung. Die Untersuchungen wurden freundlicherweise von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Rahmen ihrer Doktoranden-Stipendien gefördert, worüber ich mich sehr gefreut habe.

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar.

Mail: huckfeldt@hausschwamminfo.de