

Holzaufbau und Tränkbarkeit

Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten

Michael Rosenthal, Ernst Bäucker, Claus-Thomas Bues

Zuerst veröffentlicht in: Holz-Zentralblatt - Nr. 34/2010, S. 852, 854

1 Einleitung

Im Rahmen holztechnologischer Prozesse wie dem Holzschutz, der Holzmodifizierung oder der Zellstoffherstellung sind die Eindringwege von Flüssigkeiten in das Holz von großem Interesse. Bei Maßnahmen des chemischen Holzschutzes und der Holzmodifizierung ist der Wirkungsort von den Eindringwegen des Mittels abhängig. Im Bereich der Zellstoffherstellung bestimmen die Fließwege der Aufschlusslösung die Regionen des ersten Ligninabbaues und damit das Bruchverhalten bzw. die Faserqualität während der Defibrillierung (Wardrop & Davies, 1961).

Auf die Permeabilität des Holzes für Flüssigkeiten haben drei Faktoren einen wesentlichen Einfluss: die Eigenschaften des Holzes, die Eigenschaften des Tränkmittels und der Tränkprozess. Der vorliegende Artikel hat den Einfluss mikrostruktureller Eigenschaften des Holzes auf die Tränkbarkeit zum Thema.

In der EN 350-2 wird die Tränkbarkeit von Holz definiert und eine Unterteilung in 4 Tränkbarkeitsklassen (gut, mäßig, schwer und sehr schwer tränkbar) vorgenommen. Das Kernholz der meisten europäischen Hölzer ist demnach schwer bis sehr schwer tränkbar. Große Unterschiede gibt es hingegen im Bereich der Splinthölzer: Douglasie, Fichte und Lärche sind nur schwer tränkbar; Buche, Eiche und Kiefer lassen sich hingegen sehr gut tränken. Es ist jedoch zu beachten, dass es auch innerhalb einzelner Arten zu einem hohen Maß an Variabilität kommen kann.

2 Fließwege im Holz

Der für die Tränkbarkeit verantwortliche Flüssigkeitstransport im Holz kann auf drei Wegen erfolgen: (a) durch die Zellwände, (b) durch die Tüpfel und (c) über durchgehende Verbindungswege.

- (a) Die Zellwände erlauben aufgrund der großen Wanddicken und der geringen Durchmesser ihrer Mikroporen nur einen sehr eingeschränkten Flüssigkeitstransport (Murmanis & Chudnoff, 1979).
- (b) Der Fließweg durch die Tüpfel ist infolge der geringen Dicke der Tüpfelmembran und den teilweise um ein Vielfaches größeren Poren im Vergleich zur Penetration durch die Zellwände deutlich wichtiger (Stamm, 1967).
- (c) Eine durchgehende Verbindung ist in longitudinaler Richtung durch die Gefäße und Interzellularräume im Laubholz bzw. in longitudinaler und radialer Richtungen durch die Harzkanäle und Interzellularräume im Nadelholz möglich. Da es sich um durchgehende Verbindungswege handelt, kann der Durchfluss ungehindert über deren gesamte Länge erfolgen. Prozentual macht dieser Durchfluss zumindest im Nadelholz aber nur einen geringen Anteil aus (Nicholas & Siau, 1973).

In der Praxis stellt der geradlinige Durchfluss einen Sonderfall dar. Auch wenn die Hauptbewegung einer Flüssigkeit mit einer anatomischen Richtung zusammenfällt, wird man feststellen, dass sie im Allgemeinen in einer Art Zickzack-Bewegung erfolgt. Die einzelnen Durchgangswege sind z.T. verschlossen, sodass immer nur ein gewisser Anteil von ihnen

durchlässig ist. Es ist daher für ein gutes Vordringen im Holz notwendig, dass die Flüssigkeit, die sich in einer bestimmten Richtung fortbewegen soll, die Möglichkeit hat, seitlich auszuweichen, wenn irgendwo ihr direkter Durchflussweg verschlossen ist (Buro & Buro, 1959a).

2.1 Fließwege im Nadelholz

Einer der prinzipiellen strukturellen Faktoren, die die Tränkbarkeit von Holz beeinflussen, ist die anatomische Richtung des Eindringens. Aufgrund der lang gestreckten Gestalt der Transportzellen (*Pinus sylvestris* L : B = 3100 µm : 44 µm (Wagenführ, 2007)) besitzt Holz in longitudinaler Richtung eine um einen Faktor von etwa 100 bessere Tränkbarkeit als quer dazu (Nicholas & Siau, 1973). Im Splintholz der Nadelhölzer stellen die Lumina der Frühholztracheiden und die Hoftüpfel die Hauptfließwege dar (Abb. 1). Die bei einigen Nadelhölzern auftretenden Harzkanäle und Parenchymzellen können außerdem als longitudinale Fließwege dienen. Durch ihre geringe Zahl und den möglichen Verschluss der Harzkanäle mit Harz besitzen sie häufig jedoch nicht mehr als eine marginale Bedeutung (Wardrop & Davies, 1961; Coté, 1963).

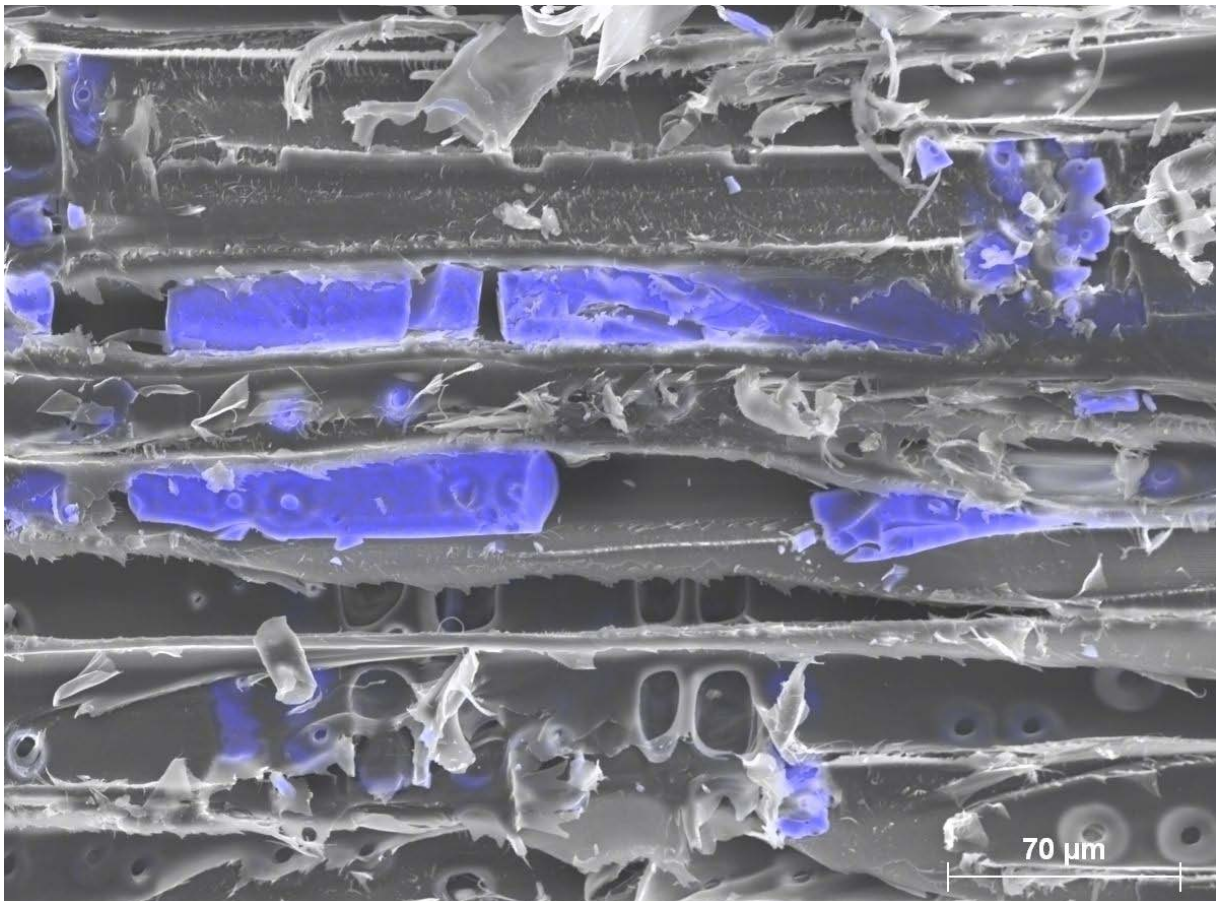


Abb. 1: Longitudinales Eindringen von Siliziumdioxid-Nanosolen in Frühholztracheiden von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), REM-Bild in Kombination mit einem EDX-Mapping (Si-Ablagerungen blau markiert)

Bei der industriellen Imprägnierung von Nadelschnittholz (mit Ausnahme von Holzpflaster) ist die longitudinale Penetration (von Längstracheide zu Längstracheide durch behöftete Tüpfel) aufgrund der Schnittholzabmessungen vernachlässigbar im Vergleich zur radialen Penetration (Siau, 1984; Bellmann, 1987b). Radiale Penetration zwischen Längstracheiden ist stark limitiert infolge des seltenen Auftretens von Tüpfeln in den tangentialen Zellwandbereichen. Deshalb stellt die radiale Penetration durch Holzstrahlen und die in ihnen enthaltenen

Harzkanäle die wichtigste Route dar, durch die Flüssigkeiten in das Splintholz langer Proben eindringen (Buro & Buro, 1959b). Das Leitvermögen von Strahltracheiden und Strahlparenchym wird dabei unterschiedlich bewertet (Buro & Buro, 1959a; Wardrop & Davies, 1961; Coté, 1963; Nicholas & Siau, 1973). Da jede Tracheide mit mindestens einem Holzstrahl verbunden ist, bieten die Kreuzungsfelder (Abb. 2) die Möglichkeit einer Penetration in das longitudinale Tracheidengewebe (Liese, 1951a). In tangentialer Richtung ermöglichen die v.a. in den Radialwänden der Tracheiden vorkommenden Hoftüpfel einen Flüssigkeitstransport. Nach Comstock (1970) liegt das Verhältnis von radialer zu tangentialer Permeabilität bei 5 ... 37 : 1 für Kiefer, 0,04 ... 10 : 1 für Fichte und 0,03 ... 0,7 : 1 für Douglasie. Diese Gruppen sind geordnet nach Abnahme der Tränkbarkeit und Abnahme der longitudinalen Permeabilität; dies unterstreicht die Wichtigkeit eines permeablen Strahlgewebes beim Einsatz von Holzschutzmitteln.

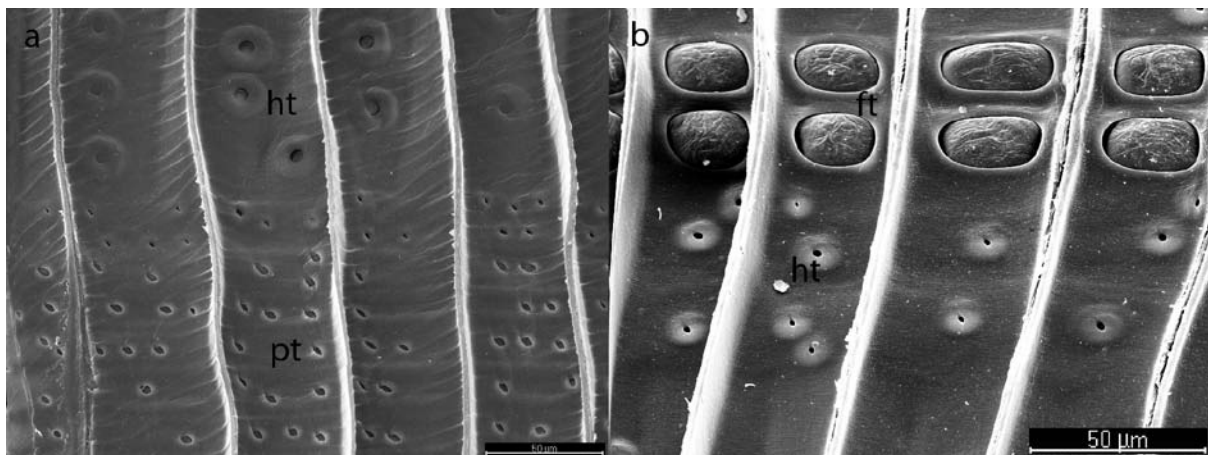


Abb. 2: Hoftüpfel zwischen Tracheiden (*ht*) und Tüpfelung im Kreuzungsfeld: (a) piceoide Tüpfel (*pt*) bei Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco), (b) Fenstertüpfel (*ft*) bei Kiefer (*Pinus sylvestris* L.)

2.2 Fließwege im Laubholz

Der Flüssigkeitstransport im Laubholz erfolgt auch bei praxisüblichen Schnittholzabmessungen hauptsächlich in den aus zahlreichen Gefäßgliedern bestehenden, longitudinal orientierten Gefäßen (Liese, 1957). Die Endwände der Gefäßglieder können unterschiedlich gestaltete Durchbrechungen aufweisen. So besitzen Birke und Erle leiterförmige Gefäßdurchbrechungen (Abb. 3 a); die Gefäßdurchbrechungen von Buche können sowohl einfach als auch leiterförmig ausgebildet sein. Im Gegensatz zu einer möglichen Verthyllung (Abb. 3 b) führen die Durchbrechungen jedoch im Allgemeinen nicht zu einer Einschränkung des Durchflusses.

In Querrichtung ist über die Hoftüpfel ein Eindringen in die benachbarten Gefäße möglich (Wardrop & Davies, 1961). Auch Libriformfasern, Fasertracheiden, vasizentrische Tracheiden und longitudinale Parenchymzellen tragen zum Eindringen von Flüssigkeiten in das Holz bei, aufgrund ihrer komplexen Struktur ist ihre Bedeutung jedoch nur schwierig einzuschätzen (Coté, 1963).

Der Flüssigkeitstransport in tangentialer Richtung wird, wie bei den Nadelhölzern auch, durch die v.a. in den Radialwänden vorhandenen Tüpfel ermöglicht. Die Permeabilität in radialer Richtung kann geringer sein als in tangentialer Richtung (Larnøy et al., 2005). Dies ist hauptsächlich auf das im Vergleich zu den Nadelhölzern geringere Leitvermögen der Holzstrahlen zurückzuführen, die Variabilität zwischen den Arten ist hierbei jedoch sehr hoch (Wardrop & Davies, 1961; Coté, 1963; Siau, 1984).

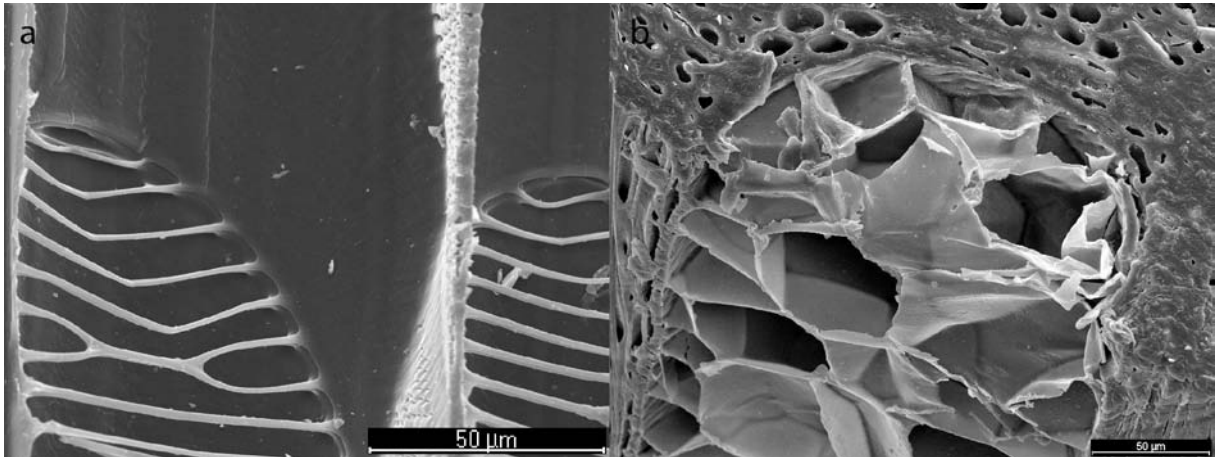


Abb. 3: (a) Leiterförmige Gefäßdurchbrechung bei Birke (*Betula pendula* Roth), (b) verthylltes Frühholzgefäß von Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.)

3 Tüpfelbau

Bei einer Imprägnierung von Holz dringt die jeweilige Flüssigkeit zu einem großen Teil über die Tüpfel in das Holz ein. Deren Bau ist damit von entscheidender Bedeutung für die Tränkbarkeit des Holzes (Abb. 4 a). Als Tüpfel werden die Öffnungen in der Zellwand bezeichnet, über die die Lumina der Holzzellen miteinander in Verbindung stehen. Sie bestehen grundsätzlich aus einer Tüpfelmembran und einem Tüpfelhohlraum. Man unterscheidet zwischen einfachen Tüpfeln (zwischen Parenchymzellen), einseitig behöft Tüpfeln (zwischen Tracheiden/ Gefäßen und Parenchymzellen) und beidseitig behöft Tüpfeln bzw. Hoftüpfeln (zwischen Tracheiden/ Gefäßen).

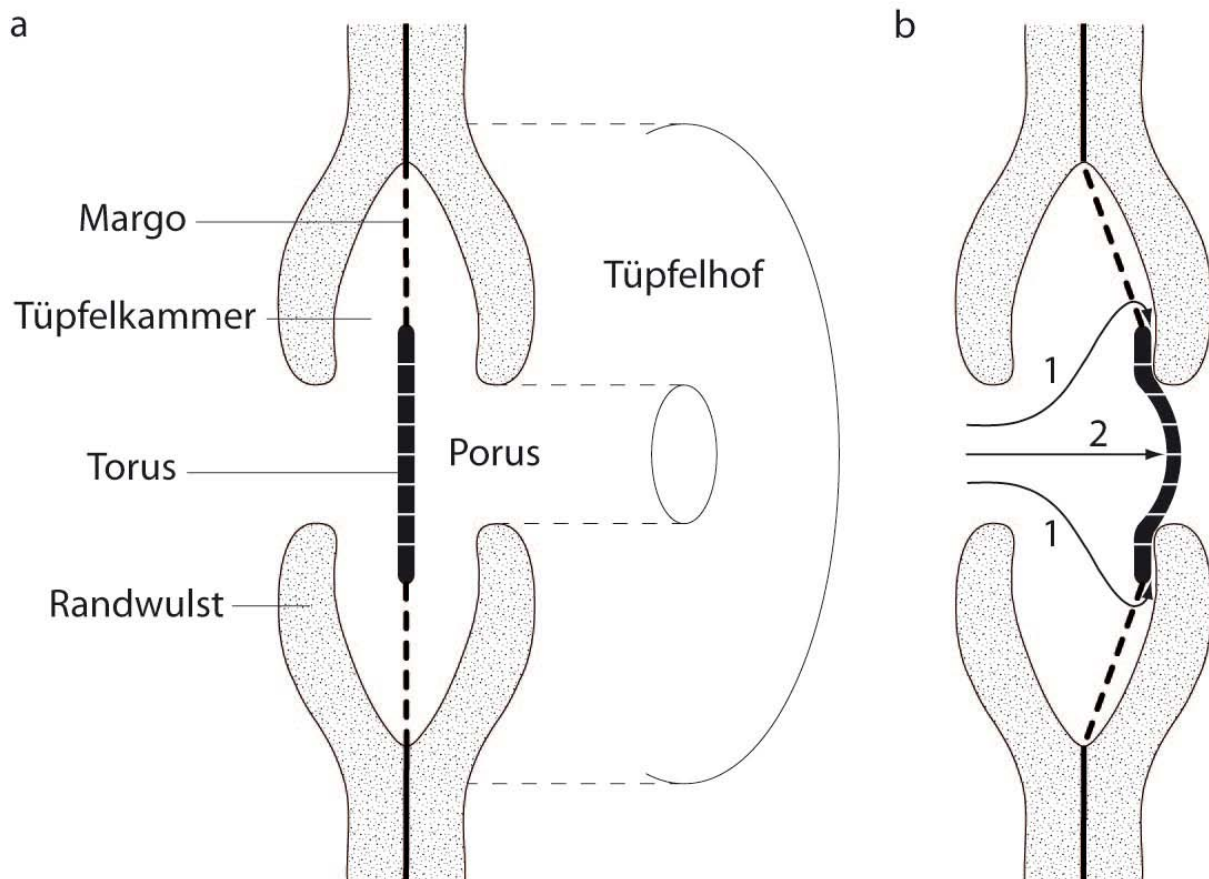


Abb. 4: Schematische Darstellung des Baus der Hoftüpfel im Frühholz der Pinaceae (a) und der möglichen Fließwege nach einem Tüpfelverschluss (b)

Die Tüpfelmembran ist bei den Hoftüpfeln der Pinaceae in der Mitte zu einem kreisförmigen Torus verdickt. Bei den übrigen Pflanzenfamilien der Nadelhölzer (z.B. Cupressaceae oder Taxaceae) ist dieser nur selten zu finden (Liese & Bauch, 1967; Fengel, 1968). Der Rand des Torus ist gefranst, mehrere Autoren berichten von einer peripheren, zirkularen Textur. Die Fransen gehen allmählich in Fäden über, die eine netzartige Margo (Abb. 5 a) bilden (Liese & Fahnenbrock, 1952; Frey-Wyssling & Bosshard, 1953; Liese & Johann, 1954; Jayme & Hunger, 1955; Frey-Wyssling et al., 1956; Stemsrud, 1956; Bailey, 1957; Jayme & Fengel, 1959; Jayme et al., 1960; Jutte & Spit, 1963). Bei allen anderen oben genannten Tüpfeln fehlt sowohl die zentrale Verdickung als auch der porige Charakter der peripheren Membranbereiche (Abb. 5 b). Die Tüpfelmembranen besitzen hier eine gleichmäßige Struktur innerhalb der gesamten Tüpfelkammer und bestehen aus primärwandigem Material mit willkürlicher Orientierung. Unter Umständen kommt es jedoch zu Auflagerungen auf den Membranen behöfter Tüpfel, die zu torusähnlichen Gebilden führen können (Fengel, 1966). In den Membranen von einfachen Tüpfeln sind Tüpfelkanäle beobachtet worden, durch die Plasmodesmen verlaufen (Fengel, 1966).

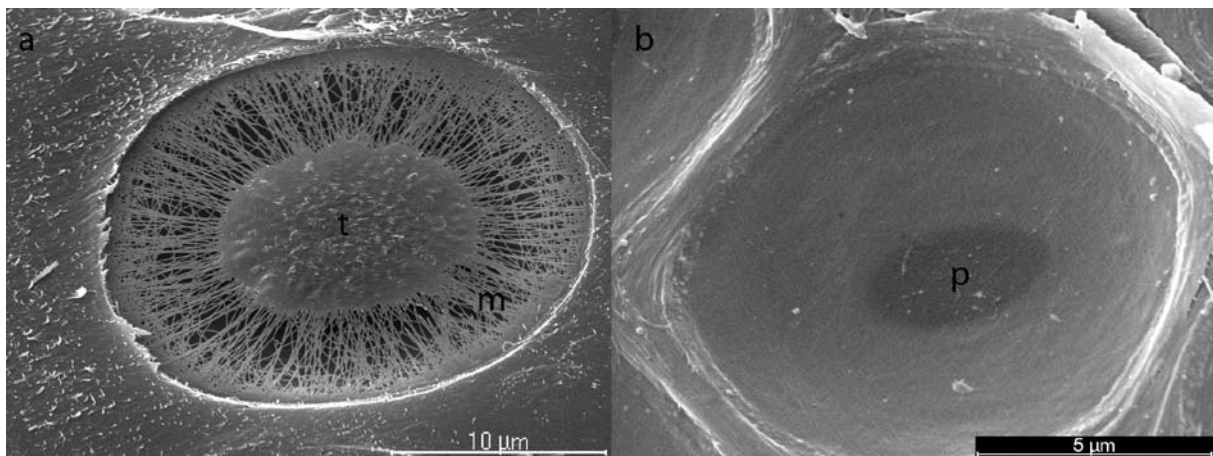


Abb. 5: (a) Hoftüpfelmembran im Frühholz von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst., Splint) bestehend aus Torus (t) und Margo (m), (b) homogen strukturierte Hoftüpfelmembran bei Aspe (*Populus tremula* L.) mit sich abzeichnenden Porus (p) der dahinter liegenden Randwulst

Der Tüpfelhohlraum ist bei einfachen Tüpfeln als Tüpfelkanal ausgebildet. Frühholz-Hoftüpfel besitzen hingegen eine von der Randwulst überwölbte Tüpfelkammer, deren Öffnung in das Zellumen als Porus bezeichnet wird. Bei den Hoftüpfeln des Spätholzes ist die Wölbung der Hofränder nicht erforderlich, da der Tüpfelhohlraum in den Zellwänden ausgespart ist; die Pori sind als Kanäle angelegt (Fengel, 1968).

3.1 Penetration durch Nadelholztüpfel

Solange sich die Membranen der Nadelholztüpfel in medialer Position befinden, können Flüssigkeiten die Margo durchdringen; die benachbarten Tracheiden der Nadelhölzer stellen demzufolge ein System von kommunizierenden Röhren dar (Liese, 1957). Möglich ist dies, da die Öffnungen zwischen den hauptsächlich radial ausgerichteten, dabei meist überkreuzenden Cellulosefibrillen, aus denen die Margo besteht, Durchmesser von 0,02 ... 0,3 ... 4 µm besitzen. Selbst innerhalb einer Holzart kommt es dabei jedoch zu einer großen Variabilität. Die Dicke der Tüpfelmargo, die als eine weitere wichtige Größe den Durchflusswiderstand beeinflusst, liegt bei 0,1 ... 0,2 ... 0,5 µm (Liese, 1952; Comstock & Côté, 1968; Siau, 1984, Wagenführ, 1999).

Der zentral verdickte Torusbereich besteht neben Cellulose und Hemicellulose hauptsächlich aus Pektin (Bamber, 1961; Sachs, 1963; Liese et al., 1967; Bauch et al., 1968). Auch bei maximaler rasterelektronenmikroskopischer Auflösung sind keine Öffnungen im Torus zu erkennen, er wird deshalb in der Regel als nicht durchlässig für Flüssigkeiten angesehen (Siau, 1984). Es gibt allerdings Hinweise für ein Wölben der Tori verschlossener Tüpfel, was Nicholas & Siau (1973) zufolge auf das Vorhandensein sehr kleiner Öffnungen im Torus zurückzuführen ist. Auch Fengel (1972) schreibt den Tori des Splintholzes eine gewisse Durchlässigkeit für wässrige Lösungen und phenolische Substanzen zu.

Die Dicke der Membran von einfachen und einseitig behöften Tüpfeln liegt bei 0,6 ... 1,8 μm . Trotz dieser im Vergleich zu den beidseitig behöften Tüpfeln relativ großen Dicke und des Fehlens von Öffnungen in den Membranen weisen sie eine relativ gute Penetrierbarkeit auf (Siau, 1984; Wagenführ, 1999).

3.2 Penetration durch Laubholztüpfel

Obwohl die Tüpfelmembranen im Laubholz keine mikroskopisch sichtbaren Öffnungen besitzen, gibt es eindeutige Hinweise auf die Existenz solcher Öffnungen. Nach Siau (1984) haben die Öffnungen in Laubholztüpfeln Durchmesser von 0,005 ... 0,03 ... 0,17 μm und sind damit eine Zehnerpotenz kleiner als die im Nadelholz. Der Flüssigkeitsaustausch ist dadurch stark eingeschränkt. Die Dicke der Tüpfelmembran liegt bei 0,1 ... 0,4 μm .

Die Flüssigkeitsbewegung von Gefäß zu Gefäß erfolgt im Laubholz nicht wie im Nadelholz als freie Strömung, sondern beruht auf Diffusionsvorgängen. Die longitudinale Strömungsgeschwindigkeit ist dementsprechend eingeschränkt. Dennoch ist durch die große Zahl der Hoftüpfel ein hinreichender Flüssigkeitsaustausch möglich (Liese, 1957; Fengel, 1966; Murmanis & Chudnoff, 1979).

4 Tüpfelverschluss

Kommt es im Zuge der Kernholzbildung bzw. der Trocknung des Holzes nach dem Fällen eines Baumes zu einer Abnahme der Holzfeuchte, kann dies einen Verschluss der Hoftüpfel nach sich ziehen. Da die Tüpfelmargo aufgrund ihrer fibrillären Textur eine gewisse Flexibilität besitzt, kann sich der Torus bei Druckänderungen oder Lufteinbruch in das Zelllumen an die Randwulst anlegen und so den Porus verschließen. Dadurch wird ein weiterer Durchfluss von Flüssigkeiten stark reduziert. Anatomische Voraussetzung für die Möglichkeit des Tüpfelverschlusses ist dabei das Vorhandensein eines Tori. Das Phänomen ist folglich auf die Hoftüpfel der Nadelhölzer beschränkt.

In chemischer Hinsicht stellen die Oberflächenspannung und die Adhäsion wichtige Einflussfaktoren auf den Tüpfelverschluss dar. Je geringer die Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit ist, von der aus getrocknet wurde, desto geringer ist die Neigung zum Tüpfelverschluss (Sandermann & Jonas, 1952; Bolton & Petty, 1977). Ersetzt man das im Holz gebundene Wasser ($\sigma \approx 73 \text{ mN/m}$) beispielsweise durch Aceton ($\sigma \approx 23 \text{ mN/m}$) kann ein Tüpfelverschluss weitgehend verhindert werden. Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist dafür verantwortlich, dass der Torus in Kontakt mit der Randwulst kommt. Um den Torus in dieser Stellung zu halten, müssen jedoch auch die Adhäsionskräfte ausreichend groß sein. Da die Adhäsion des Tori an der Randwulst auf Wasserstoffbrückenbindungen basiert, verhindert die Trocknung ausgehend von bestimmten organischen Lösungen, die zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen nicht fähig sind, einen bleibenden Tüpfelverschluss (Comstock & Côté 1968, Thomas & Kringstad 1971).

Die Penetration durch verschlossene Tüpfel ist zwar eingeschränkt, aber nicht unmöglich. Wardrop & Davies (1961) und Nicholas & Siau (1973) beschreiben zwei mögliche Fließwege (Abb. 4 b): Der erste Weg verläuft durch die Öffnungen der Margo und dann zwischen Torus und Randwulst in das Lumen der benachbarten Zelle. Die Breite und die Dichte der Kontaktzone von Torus und Randwulst stellen die wesentlichen Faktoren dar, die den

Durchfluss über diesen Weg beeinflussen. In den meisten Fällen ist diese Kontaktzone relativ undurchlässig. Bei einigen Arten (z.B. *Pinus spec.*, *Tsuga canadensis*) scheint jedoch eine aufgelagerte Warzenschicht einen dichten Verschluss zu verhindern. Der zweite Weg führt direkt durch kleine Öffnungen des Torus.

Der Tüpfelverschluss ist kein irreversibler Vorgang. Bei einer Wiederbefeuchtung des Holzes kann es durch ein Lösen von Wasserstoffbrückenbindungen zu einem Öffnen verschlossener Tüpfel kommen. Je länger der Torus jedoch in der verschlossenen Stellung verharret, desto schwieriger ist es, den Tüpfel wieder zu öffnen. Eine Erklärung für dieses zeitabhängige Phänomen ist Thomas & Kringstad (1971) und Bellmann (1987a) zufolge eine Spannungsrelaxation der Margofibrillen, durch die die Tendenz der Membran, in ihre Ausgangsposition zurückzukehren, reduziert wird.

Der Umstand, dass es bei Wiederbefeuchtung des Splintholzes zu einer Aufhebung des Tüpfelverschlusses kommen kann, lässt vermuten, dass dies auch während einer Druckimprägnierung mit wasserbasierten Holzschutzmitteln möglich ist (vgl. Huber & Merz, 1958). Andererseits kann nicht erwartet werden, dass ölbasierte Mittel Wasserstoffbrückenbindungen aufbrechen können. (Nicholas & Siau, 1973).

4.1 Früh- und Spätholz

Die Hoftüpfel im Früh- und Spätholz der Nadelhölzer weisen einen unterschiedlichen anatomischen Bau auf (Abb. 5 a, 6). Spätholztüpfel besitzen im Vergleich zu Frühholztüpfeln einen geringeren Durchmesser, einen dickeren Torus und eine dichtere Margo (Fengel, 1968; Greaves, 1973). Die höhere mechanische Stabilität der Tüpfelmembranen im Spätholz führt zu einer geringeren Deformationsneigung. Während der Tüpfelverschluss bei der Mehrzahl der Tüpfel im Frühholz auftritt, besitzen die Spätholztüpfel folglich eine geringere Tendenz zum Verschluss (Liese & Bauch, 1967). Der Grad des Tüpfelverschlusses ist eine wesentliche Ursache für die Variabilität in der Tränkbarkeit von Früh- und Spätholz (Siau, 1984): Bei Holzfeuchten unterhalb Fasersättigung besitzt das Spätholz eine bessere Tränkbarkeit, wohingegen im saftfrischen Zustand das Frühholz eine bessere Wegsamkeit aufweist (Bellmann, 1987a).

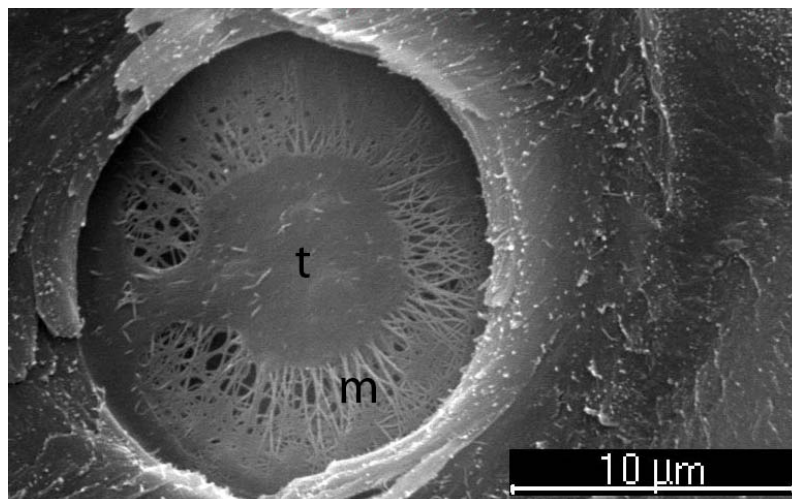


Abb. 6: Hoftüpfelmembran im Spätholz von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst., Splint) bestehend aus Torus (t) und Margo (m)

Da durch das Fehlen der Tori in den Gefäßtüpfeln der Laubhölzer kein den Nadelhölzern vergleichbarer Tüpfelverschluss auftritt (Abb. 5 b), gibt es hier keine geringere Permeabilität im Frühholz. Im Gegenteil ist das Frühholz der Laubhölzer meist besser tränkbar als das Spätholz. Bei den Ringporern ist dies noch stärker ausgeprägt als bei den Zerstreutporern (Siau, 1984).

4.2 Splint- und Kernholz

Während der Kernholzbildung ändert sich der Tüpfelbau, was zu einer Verschlechterung der Permeabilität im Vergleich zum Splintholz führt (Siau, 1984). Es kommt erstens zum Tüpfelverschluss und zweitens zu einer Inkrustierung mit Harzsäuren, Monoterpenen, Fettsäuren und weiteren Extraktstoffen (Coté, 1963; Bauch et al., 1968; Bauch et al., 1974). Die Einlagerung von Extraktstoffen erhöht den Tüpfelverschluss auf zweierlei Weise: Einerseits reduzieren die Extraktstoffe den Durchmesser der Tüfpelporen; andererseits fungieren sie als eine Art Kleber, der die Bindung des Torus an die Randwulst verbessert. Auch eine Wiederbefeuchtung kann den Tüpfelverschluss im Kernholz nicht aufheben (Nicholas & Siau, 1973).

5 Fichte und Kiefer

Exemplarisch soll der Einfluss mikrostruktureller Eigenschaften von Holz auf die Tränkbarkeit von Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) aufgezeigt werden. In zahlreichen Veröffentlichungen wurde versucht, die schlechtere Tränkbarkeit der Fichte im Vergleich zur Kiefer auf den anatomischen Bau beider Holzarten zurückzuführen.

Die der Tertiärwand aufgelagerte Warzenschicht wurde als eine Ursache für die bessere Tränkbarkeit von Kiefer angesehen. Als Warzen bezeichnete submikroskopische Partikel sind innerhalb der Gattung *Pinus* sowohl auf den Tracheidenwänden als auch auf der Innenseite des Tüpfelhofes in einer großen Variationsbreite bei einer Reihe von Arten zu finden (Liese, 1956). Im Gegensatz dazu weist die Fichte eine relativ glatte innere Tüpfelwand auf (Schmidt-Vogt, 1986). Es wird die Möglichkeit geäußert, dass die Auswüchse auf den Innenwänden der Hoftüpfel eine völlige Abdichtung der Tüpfelöffnung verhindern könnten (vgl. Abb. 4 b, Fließweg 1), was sich vorteilhaft auf die Imprägnierbarkeit auswirken würde (vgl. Liese & Bauch, 1967). Dies ist allerdings experimentell nicht erwiesen (Schmidt-Vogt, 1986). Auch kann dies nicht die einzige Ursache für die schlechtere Tränkbarkeit von Fichte darstellen, da andernfalls alle Holzarten mit Hoftüpfeln, deren Innenwände glatt sind und die durch den Torus hermetisch verschlossen werden, gleich schlecht imprägnierbar sein, was jedoch nach Frey-Wyssling & Bosshard (1953) nicht der Fall ist.

Die chemische Zusammensetzung der Hoftüpfelmembran dürfte für den Stofftransport durch den Torus verschlossener Tüpfel (Abb. 4 b, Fließweg 2) von Bedeutung sein. Nach Bauch et al. (1983) bestehen die Hoftüpfelmembranen zwischen Längstracheiden bei Kiefer (*P. sylvestris*) ausschließlich aus aliphatischen Bestandteilen. Bei *Fichte* treten zusätzlich dazu phenolische Begleitsubstanzen auf.

Stemsrud (1956) berichtet von Perforationen der Tori verschlossener Hoftüpfeln in Kiefersplintholz, die teilweise bis zur gänzlichen Auflösung reichten. Er vermutet, dass die zur Kernbildung benötigten Stoffe durch die perforierten Tori strömen. Wenn die Kernbildung abgeschlossen ist, werden die Perforationen wieder abgedichtet, weshalb sich keine perforierten Tori im Kernholz finden lassen. Die Perforation gibt seiner Meinung nach eine Erklärung für die gute Imprägnierbarkeit von Kiefer.

Auf die Unterschiede im Bau der Kreuzungsfeldtüpfel wurde schon eingegangen (Abb. 2). Bei Fichte sind pro Kreuzungsfeld durchschnittlich vier piceoide Tüpfel vorhanden, die eine Fläche von $30\ \mu\text{m}^2$ ergeben. Die Fenstertüpfel bei Kiefer besitzen dagegen eine Tüpfelfläche von etwa $460\ \mu\text{m}^2$ (Bauch et al., 1983). Die größere Tüpfelfläche wird von Schmidt-Vogt (1986) als Ursache für die bessere Tränkbarkeit der Kiefer angeführt. Für Liese (1951b) scheint dieser Schluss unbegründet; er weist jedoch darauf hin, dass bei Kiefer durch entsprechende Druckunterschiede im Rahmen der Imprägnierung die großen Membranen der Fenstertüpfel zerrissen werden können (Liese, 1957).

Die gute radiale Wegsamkeit der Kiefer im Vergleich zur Fichte beruht nach Schmidt-Vogt (1986) auf einem etwa doppelt so großen Holzstrahlanteil und einem etwa fünfmal so großen

Tracheidenanteil innerhalb der Strahlen (Liese & Bauch, 1967). Dies könnte sich so positiv auf die Tränkbarkeit trockenen Holzes auswirken, da nach Bellmann (1987a,b) die Hoftüpfel zwischen den Holzstrahltracheiden eine sehr geringe Neigung zum Tüpfelverschluss besitzen. Bauch et al. (1983) konnten hingegen keinen Zusammenhang zwischen dem Holzstrahl- sowie dem Holzstrahltracheidenanteil und der Wegsamkeit nachweisen. Stattdessen führen sie an, dass die Holzstrahlparenchymzellen von Fichte dicke und verholzte Wände besitzen, während bei Kiefer (*P. sylvestris*) dünne und unverholzte Wände vorherrschen, welche nach dem Trocknen kollabieren können, wodurch neue Wege für die Tränklösung entstehen.

7 Literatur

1. Bailey, P.J. (1957): Die Struktur der Tüpfelmembran bei den Tracheiden der Koniferen. Holz Roh- Werkst. 15(5) 210-213
2. Bamber, R. K. (1961): Staining reaction of the pit membrane of wood cells. Nature 191: 409-410
3. Bauch, J.; Liese, W.; Scholz, F. (1968): Über die Entwicklung und stoffliche Zusammensetzung der Hoftüpfelmembranen von Längstracheiden in Coniferen. Holzforschung 22(5): 144-153
4. Bauch, J.; Schweers, W.; Berndt, H. (1974): Lignification during heartwood formation: comparative study of rays and bordered pit membranes in coniferous woods. Holzforschung 28: 86-91
5. Bauch, J.; Liese, W.; Willeitner, H. (1983): Zum Tränkverhalten verschiedener Kiefernarten. Holz Roh- Werkst. 41(8): 339-344
6. Bellmann, H. (1987a): Zur Bedeutung der Holzfeuchte bei der Kesseldrucktränkung von Nadelhölzern. Teil 2: Anatomische und technologische Einflüsse. Holz-Zentralblatt 143: 2201-2203
7. Bellmann, H. (1987b): Zur Bedeutung der Holzfeuchte bei der Kesseldrucktränkung von Nadelhölzern. Teil 3: Tränkbarkeit abtrocknenden Holzes. Holz-Zentralblatt 151: 2312, 2314, 2316
8. Bolton, A.J.; Petty, J.A. (1977): Variation of susceptibility to aspiration of bordered pits in conifer wood. J. Exp. Bot. 28: 935-941
9. Buro, A.; Buro, E.A. (1959a): Beitrag zur Kenntnis der Eindringwege in Kiefernholz. Holzforschung 13(3): 71-77
10. Buro, A.; Buro, E.A. (1959b): Untersuchungen über die Durchlässigkeit von Kiefernholz. Holz als Roh- und Werkstoff 17(12): 461-474
11. Comstock, G.L.; Côté W.A. (1968): Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. Wood Sci. Technol. 2(4):279-291
12. Comstock, G.L. (1970): Directional permeability of softwoods. Wood Fiber 1: 283-289
13. Côté, W.A. (1963): Structural Factors Affecting the Permeability of Wood. Journal of Polymer Science 2: 231-242
14. EN 350-2 (1994): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa, Deutsche Fassung Beuth Verlag
15. Fengel, D. (1966): Die Feinstruktur der Tüpfel im Buchenholz. Holz Roh- Werkst. 24(6): 245-253
16. Fengel, D. (1968): Zur Variation der Hoftüpfelgestalt bei verschiedenen Nadelhölzern. Holz Roh- Werkst. 26(8): 296-304
17. Fengel, D. (1972): Structure and Function of the Membrane in Softwood Bordered Pits. Holzforschung 26(1): 1-8

18. Frey-Wyssling, A.; Bosshard, H.-H. (1953): Über den Feinbau der Schließhäute in Hoftüpfeln. *Holz Roh- Werkst.* 11(11): 417-420
19. Frey-Wyssling, A.; Bosshard, H.-H.; Mühlethaler, K. (1956): Die submikroskopische Entwicklung der Hoftüpfel. *Planta* 47: 115-126
20. Greaves, H. (1973): Comparative Morphology of Selected Sapwood Species Using the Scanning Electron Microscope. *Holzforschung* 27(3): 80-88
21. Huber, B.; Merz, W. (1958): Über die Bedeutung des Höftüpfelverschlusses für die axiale Wasserleitfähigkeit von Nadelhölzern. *Planta* 51: 645-659
22. Jayme, G.; Hunger, G. (1955): Die Oberflächen ungebleichter Fichtensulfat- und Sulfitzellstoffe im elektronenmikroskopischen Bild. *Holz Roh- Werkst.* 13(6): 212-215
23. Jayme, G.; Fengel, D. (1959): Untersuchungen über den Feinbau der Hoftüpfelschließhäute in Fichtenholz unter Anwendung einer Feucht-Präparationsmethode. *Holz Roh- Werkst.* 17(6): 226-230
24. Jayme, G.; Hunger, G.; Fengel, D. (1960): Das elektronenmikroskopische Bild des Cellulosefeinbaus verschlossener und unverschlossener Hoftüpfel der Nadelhölzer. *Holzforschung* 14(4): 97-105
25. Jutte, S.M.; Spit, B.J. (1963): The submicroscopic structure of bordered pits on the radial walls of tracheids in Parana Pine, Kauri and European Spruce. *Holzforschung* 17(6): 168-175
26. Larnøy, E.; Eikenes, M.; Militz, H. (2005): Uptake of chitosan based impregnation solutions with varying viscosities in four different European wood species. *Holz Roh- Werkst.* 63: 456-462
27. Liese, W. (1951a): Über die Bedeutung der Holzstruktur für das Eindringen öligler Holzschutzmittel. Dissertation, Univ. Göttingen
28. Liese, W. (1951b): Über die Eindringung von öligen Schutzmitteln in Fichtenholz. *Holz Roh- Werkst.* 9(10): 374-378
29. Liese, W.; Fahnenbrock, M. (1952): Elektronenmikroskopische Untersuchungen über den Bau der Hoftüpfel. *Holz Roh- Werkst.* 10(5): 197-201
30. Liese, W.; Johann, I. (1954): Experimentelle Untersuchungen über die Feinstruktur der Hoftüpfel bei Koniferen. *Naturw.* 41(24): 579
31. Liese, W. (1956): Zur systematischen Bedeutung der submikroskopischen Warzenstruktur bei der Gattung *Pinus* L. *Holz Roh- Werkst.* 14(11): 417-424
32. Liese, W. (1957): Der Feinbau der Hoftüpfel bei den Laubhölzern. *Holz Roh- Werkst.* 15(11): 449-453
33. Liese, W.; Bauch, J. (1967): On the closure of bordered pits in conifers. *Wood Sci. Technol.* 1:1-13
34. Liese, W.; Bauch, J.; Scholz, F. (1967): Über den Torus der Hoftüpfel in Coniferenholz. *Naturw.* 54(2): 49
35. Murmanis, L.; Chudnoff, M. (1979): Lateral Flow in Beech and Birch as Revealed by the Electron Microscope. *Wood Sci. Technol.* 13:79-87
36. Nicholas, D.D.; Siau, J.F. (1973): Factors influencing the treatability of wood. In: Nicholas, D.D. (ed.): *Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. II Preservatives and preservative systems*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, S. 299-343
37. Sachs, I. B. (1963): Torus of the bordered-pit membrane in conifers. *Nature* 198: 906-910
38. Sandermann, W.; Jonas, G.Z. (1952): Über die Imprägnierung von Hölzern mit öligen Schutzmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Fichte. *Holz als Roh- und Werkstoff* 10(8): 305-311
39. Schmidt-Vogt, H. (1986): *Die Fichte*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin

40. Siau, J.F. (1984): Transport processes in wood. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
41. Stamm, A. J. (1967): Movement of Fluids in Wood. Part I: Flow of Fluids in Wood. Wood Science and Technology 1:122-141
42. Stemsrud, F. (1956): Über die Feinstruktur der Hoftüpfel-Schließhaut von Nadelhölzern. Holzforschung 10(3): 69-75
43. Thomas, R.J.; Kringstad, K.P. (1971): The role of hydrogen bonding in pit aspiration. Holzforschung 25(5): 143-148
44. Wagenführ, R. (1999): Anatomie des Holzes. 5. Aufl. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
45. Wagenführ, R. (2007): Holzatlas. Fachbuchverlag Leipzig - Carl Hanser Verlag
46. Wardrop, A.B.; Davies, G.W. (1961): Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood. Holzforschung 15: 129-141