ZUKUNFT
H O L Z

Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale

Auszug bestehend aus:
Kapitel 12 – Holzschutz, Oberflächenbehandlung

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Inhaltsverzeichnis

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Holzschutz – Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik S. 997
Unempfindlichkeit von technisch getrocknetem Holz gegen Insekten S. 1005
Polyurethan-Beschichtungen S. 1013
Brückenbelag aus DuroBOARD S. 1019
Nano-Beschichtungen S. 1021
Strahlengehärtete Lacke S. 1029
UV-Lichtstabilisierung S. 1031
Greywood S. 1035
Die Wirkung von Laserstrahlung auf Eigenschaften des Holzes S. 1037
RSM Analyse der Wirkung kombinierter Parameter auf das Wachstum von Pilzen S. 1045

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Einleitung

Im Bereich des Holzschutzes und der Oberflächenbehandlung hat sich in den vergangenen Jahren viel bewegt. So geht die Entwicklung innerhalb des Holzbaus eher weg vom chemischen Holzschutz, hin zu vorbeugenden baulicher Maßnahmen. Für viele Holzbaubetriebe ist heutzutage der Einsatz chemischer Holzschutzmittel problematisch geworden, sei es aus ökologischen Motiven heraus oder aus Gründen der Wohngesundheit.

Holzschutz

Die oben genannte Entwicklung greift auch die Holzbaunorm DIN 68800 auf, die derzeit aktualisiert wird: In Teil 1 der neuen Norm ist eindeutig darauf hingewiesen, dass bauliche Maßnahmen beim Schutz des Holzes künftig im Vordergrund zu stehen haben. Unter baulichem Holzschutz ist eine Bauweise zu verstehen, die eine dauerhafte Trockenhaltung des Holzes (unterhalb Fasersättigung) sicherstellt. So geschützte Bauteile und Holzkonstruktionen werden innerhalb der DIN 68800 der Gefährdungsklasse 0 zugeordnet. Details zu dieser Entwicklung wie auch ein umfassender Überblick über das Thema Holzschutz finden sich in dem Beitrag „Holzschutz – aktueller Stand der Wissenschaft und Technik" (Borimir Radovic).

Insgesamt umfasst der Holzschutz alle Maßnahmen, die eine Zerstörung von Holz vor Schädigungen durch Witterung, Insekten und Pilze verhindern und damit eine lange Gebrauchsdauer gewährleisten. Neben dem zu bevorzugenden konstruktiven Holzschutz werden folgende Arten des Holzschutzes unterschieden:

- Nutzung resistenter Hölzer: Diese sind gegenüber Pilzen und Insekten auf Grund ihrer natürlichen Inhaltsstoffe weitgehend resistent. So enthält Teakholz Stoffe, die dem Zersetzen durch Fressfeinde entgegenwirken, auch das Kernholz einiger Nadelholzgewächse (z.B. Lärche, Western Red Cedar) schützt sich selbst.

- Biologische Holzschutzmittel: Diese kommen ohne Biozide aus und besitzen gegen Insekten eine vorbeugende Wirkung. Das Wirkprinzip basiert auf der Abdeckung der holzspezifischen, geruchsintensiven Aerosole, durch welche die Tiere normalerweise angelockt werden. In früheren Zeiten verwandte Mittel wie Kalk und Ochsenblut beruhen auf dem gleichen Prinzip.

- Beim chemischer Holzschutz verhindern Biozide den Befall durch Holz zerstörende Organismen bzw. bekämpfen diese. Viele der als Schutzmittel eingesetzten Chemikalien sind neuro- und immuntoxisch bedenklich - sonst wären sie als Holzschutzmittel nicht wirksam.

Zaunblättling auf frei bewitterter Holzbohle

Die Bemühungen, Holz zu schützen, sind so alt wie die Verwendung des Holzes als Baustoff selbst. Schon sehr früh wurden neben dem rein konstruktiven Holzschutz physikalische Verfahren und chemische Wirkstoffe eingesetzt. Die Verfahren reichten von der Ankohlung der Hölzer (Funde in der Fayum Wüste, etwa 5.000 v. Chr.) über den Anstrich mit pflanzlichen Ölen (Ägypten, ab

2.900 v. Chr.) bis hin zur Behandlung mit Holzdestillationsprodukten wie Holzteer, Holzessig oder Kreosot (Griechenland und Italien, ab 1.000 v. Chr.); die Chinesen benutzen schon Quecksilber- und Arsenverbindungen zum Schutz ihrer Holzkonstruktionen (ab 800 v. Chr.).

Probater Schutz vor Insekten

Das Kapitel „Holzschutz – Oberflächenbehandlung" betrachtet vorwiegend Hölzer und Bauteile, die der Witterung ganz oder zumindest zeitweise ausgesetzt sind. Doch auch bei unbewittertem Holz kann es bekanntlich zu einem Schädlingsbefall kommen, der Hausbock sei hier an erster Stelle genannt. Dem Insektenbefall kann in unseren Breiten allerdings durch eine technische Trocknung der Hölzer vorgebeugt werden, wie der Beitrag „Unempfindlichkeit von technisch getrocknetem Holz gegen Insekten" (Borimir Radovic) zeigt.

Diese Tatsache lässt sich bei Brettschichtholz-Trägern, welche immer aus technisch getrocknetem Holz bestehen, ablesen. Mindestens 90% dieser Hölzer erhielten in Deutschland in den vergangenen Jahren keine Behandlung mit Holzschutzmitteln. Dennoch ist bis heute kein Fall bekannt, bei dem Brettschichtholz in Innenräumen und im nicht direkt bewitterten Außenbereich von Insekten befallen wurde. Zwei Feldstudien zur Untersuchung von Brettschichtholzträgern aus dem Jahr 1984 und 2001 bestätigten zudem: Alle untersuchten Träger waren frei von Insektenbefall.

Oberflächenbehandlung

Steht beim Holzschutz die Sicherheit tragender Bauteile im Vordergrund, so erfüllt die Oberflächenbehandlung bei Hölzern und Holzbauteilen im Außenbereich viele andere Funktionen. Dies sind der Schutz gegen Licht oder UV-Strahlung, der Feuchteschutz oder der Schutz gegen Oberflächen verfärbende Pilze und Algen. Zudem übernehmen Beschichtungen oft eine gestalterische Funktion, welche meistens mit einer Schutzfunktion in Verbindung steht.

Herkömmliche Substanzen zur Hydrophobierung von Holzoberflächen basieren auf Paraffin, Wachsen oder Ölen. Hydrophobierende Mittel der jüngeren Generation basieren in vielen Fällen zudem auf Siliziumverbindungen und besitzen in Verbindung mit der Nanotechnologie ein großes Entwicklungspotenzial. Werden diese Siliziumverbindungen allerdings mittels Imprägnierverfahren ins Holz eingebracht, so handelt es sich nicht mehr um eine Oberflächenbehandlung, sondern um eine Modifikation (siehe auch Kap. 8 „Modifiziertes Holz").

Nanotechnologie der Zukunft

Der Nanotechnologie wird ein großes Potenzial für technische Entwicklungen beigemessen, eine Vielzahl von neuen Anwendungen ist bereits aus ihr hervorgegangen. So wird sie als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts bezeichnet. Der Beitrag „Nanobeschichtungen" (Institut für Holzbau) beschreibt die möglichen Anwendungsgebiete dieser Zukunftstechnologie für den Holzbau.

Wie oben erwähnt wird die Nanotechnologie bereits zur Hydrophobierung von Holzoberflächen angewandt. Dabei werden so genannte Siliziumdioxid-Nanosole eingesetzt, die sich in einer (ethanoloischen) Lösung befinden. Sobald das Lösungsmittel verdampft, bildet das nanodisperse Siliziumdioxid ein Gel aus, welches sich im weiteren Verlauf vernetzt und zur Mineralisierung führt.

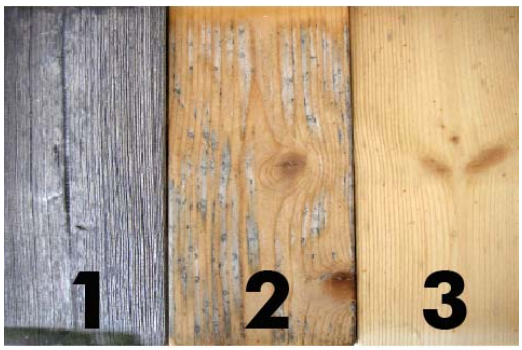
Die wohl bekannteste Funktion der Nanotechnologie ist die selbstreinigende Oberfläche, wie sie auch beim Blatt der Lotuspflanze beobachtet werden kann. Für Holz sind jedoch noch keine marktreifen Produkte bekannt. Dies liegt daran,

dass aufgrund der porösen Struktur der Holzoberfläche keine annähernd glatte Fläche wie beim Lotusblatt erzeugt werden kann. Die Holzforschung sollte auch an dieser Stelle weiter vorangetrieben werden mit dem Ziel, den selbstreinigenden Effekt der Nanobeschichtung mit der Hydrophobierung zu verbinden.

Sonnenschutz für Holzbauteile

Der Holzabbau an Bauteiloberflächen erfolgt nicht nur durch den Eintrag von Feuchtigkeit, sondern auch durch Lichteinstrahlung. Gemäß langjähriger Erfahrung kann die Standzeit von Holzoberflächen mit geeigneten Lichtschutzmitteln erheblich verlängert werden. Durch den Einsatz von UV-Absorbern wird der Abbau des Lignins stark verringert. Nach Erkenntnissen des Beitrags „UV-Lichtstabilisierung" (Chantal Donders) kann die Stabilität einer Holzoberfläche sowie die Haftung ihrer Beschichtung gegenüber traditionellen Beschichtungssystemen erheblich verlängert werden.

Dieser Effekt kann anhand eines farblosen Lasuranstrichs illustriert werden.



Wirkungsweise des UV-Schutzes (3) nach 2 Jahren Freibewitterung (1 = unbehandelte Oberfläche, 2 = Lasurfarbe farblos)

Bei diesem Versuch wurden nach fünf Monaten Freibewitterung die Oberflächen durch einen Hagelregen verletzt. Bei Probe Nr. 2 ist zu erkennen, dass Wasser unter die Lasurbeschichtung gedrungen ist und die zerstörten Ligninbestandteile teilweise ausgewaschen wurden (Wasserringe). Dieser Versuch zeigt anschaulich, dass UV-Strahlung eine fotochemische Veränderung der Holzsubstanz bewirkt. Insgesamt darf man davon ausgehen, dass die Möglichkeiten des UV-Schutzes von Holzoberflächen noch lange nicht ausgereizt sind.

Vorvergrautes Holz

Seit mehreren Jahrzehnten werden Gebäude mit Holzfassaden versehen, deren Oberfläche im Optimalfall mit der Zeit eine natürliche, silbergraue Patina annehmen. Da die Alterung jedoch selten so gleichmäßig ins Silber der natürlichen Vergrauung hinüberwechselt, wird es in vielen Fällen sowohl von der Bauherrschaft, als auch von den Planern gewünscht, die farbliche Veränderung des Holzes bereits bei der Errichtung von Holzfassaden vorwegzunehmen.

Verschiedene Hersteller bieten daher mittlerweile Lasuren an, welche die natürliche Vergrauung der Holzoberfläche durch eine Reaktion mit Feuchtigkeit und Sauerstoff extrem beschleunigen. Innerhalb weniger Monate kann so eine gleichmäßige und natürliche Oberflächenfärbung entstehen, die sonst mehrere Jahre erfordern würde. Auch ein nachträgliches Auftragen kann in geschützten Bereichen zu einer natürlichen Vergrauung führen. Siehe Beitrag „Greywood" (Institut für Holzbau).

Harte Kunststoffe für weiche Hölzer

Die Möglichkeiten des Einsatzes von harten Kunststoffen für die Oberflächenbehandlung zeigt der Beitrag „Polyurethan-Beschichtungen" (Institut für Holzbau). Im Hochbau werden Polyurethanharze als Holzlackfarben für Möbel, Beschichtungen für Industrie- und Sportböden, Parkettsiegel sowie als Metall-, Holz- und Betonbeschichtungen verwendet. Anwendungsbereiche

sind ebenfalls Dach- und Schwimmbadabdichtungen sowie Fassaden- bzw. Wandbeschichtungen.

Ein Anwendungsbeispiel für Polyurethan-Beschichtungen findet sich im Beitrag „Brückenbelag aus DuroBOARD" (Arnold Wittig). Entwickelt wurde dabei ein Holzwerkstoff, der eine Symbiose darstellt aus einem formstabilen Kern aus Furnierschichtholz und einer Verschleiß resistenten Ummantelung aus Polyurethan. Durch diese vorgefertigten Bohlen ist ein Rundumschutz des Holzes mechanische und witterungsbedingte Einflüsse gewährleistet.

Fazit

Insgesamt ist für Hölzer und Holzbauteile, die baulich nicht dauerhaft vor der Witterung geschützt werden können, eine steigende Anzahl von Schutzmöglichkeiten zu verzeichnen, deren Umweltauswirkungen im Gegensatz zu früheren Applikationen stark reduziert sind. Diese zu begrüßende Entwicklung setzt sich derzeit in Forschung und Praxis weiter fort und sollte unterstützt werden.

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Holzschutz – Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik

Borimir Radovic

1 Allgemeines

Wie alle Naturprodukte unterliegt auch das Holz den Gesetzen des Stoffkreislaufes der Natur. Innerhalb dieses Kreislaufes sind bestimmte Organismen, vor allem Pilze und Insekten, bemüht, das Holz in seine Ausgangsprodukte zurück zu verwandeln. Diese Verwandlung kann jedoch nur unter bestimmten Bedingungen stattfinden.

Die Aufgabe des Holzschutzes ist, das Zustandekommen solcher Bedingungen zu verhindern. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen sind in Deutschland in der DIN 68800 festgeschrieben. Zurzeit wird eine neue DIN 68800 erarbeitet. Die Neubearbeitung war aus folgenden Gründen erforderlich:

- die bisherigen fünf Teile der Norm, die sich in einem Alter zwischen 11 Jahren (Teil 2) und 33 Jahren (Teil 1) befinden, sollten auf die heutigen Vorstellungen zum Schutz des Holzes aufeinander abgestimmt werden,
- die EN-Normen im Bereich des chemischen Holzschutzes mussten berücksichtigt werden,
- eine klare Darstellung des in den EN-Normen fehlenden baulichen Holzschutzes war erforderlich,
- die neueste Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen auf dem Gebiet des Holzschutzes sollten berücksichtigt werden.

Nach dem Konzept der neuen Norm werden im Teil 1 alle grundlegenden Aussagen zum Schutz des Holzes aufgeführt, so dass dieser Teil eine zentrale Funktion ausüben wird. In den anderen Teilen werden detaillierte Regelungen zur Durchführung von Maßnahmen enthalten sein:
Teil 2, vorbeugende bauliche Maßnahmen
Teil 3, vorbeugende chemische Maßnahmen
Teil 4, Bekämpfungsmaßnahmen
Einen Teil 5, Schutz von Holzwerkstoffen, wie dies bis jetzt der Fall war, wird es nicht mehr geben. Schutz von Holzwerkstoffen wird in den Teilen 1 bis 3 geregelt.

Im neuen Teil 1 ist eindeutig darauf hingewiesen, dass bauliche Maßnahmen im Vordergrund stehen müssen. Nur wenn bauliche Maßnahmen und/oder die natürliche Dauerhaftigkeit der für den Verwendungszweck vorgesehenen Holzart nicht ausreichend sind, sind Schutzmaßnahmen mit chemischen Holzschutzmitteln erforderlich.

Die vorbeugenden baulichen Maßnahmen werden den Schwerpunkt dieses Vortrages bilden.

2 Vorbeugende bauliche Maßnahmen

Vorbeugende bauliche Maßnahmen sind alle planerischen, konstruktiven, bauphysikalischen und organisatorischen Maßnahmen, die eine Wertminderung oder Zerstörung von Holz und Holzwerkstoffen durch Holz zerstörende Organismen während der Gebrauchsdauer verhindern oder einschränken. Sie sollen darüber hinaus Schäden an Konstruktionen durch übermäßiges Quellen und Schwinden des Holzes und der Holzwerkstoffe vermeiden.

Es wird unterschieden zwischen

- grundsätzlichen baulichen Maßnahmen, die stets zu beachten sind, also auch im Falle der Verwendung eines Holzschutzmittels und
- besonderen baulichen Maßnahmen, die alleine für sich, also ohne Verwendung von Holzschutzmitteln, einen ausreichenden Schutz des Holzes gewährleisten. Diese erlauben die Einstufung der Holzkonstruktion in die Gebrauchsklasse GK0.

Eine der grundsätzlichen baulichen Maßnahmen ist z.B. dass die Niederschläge von Holz entweder ferngehalten oder schnell abgeleitet werden müssen. Bei den besonderen baulichen Maßnahmen sind über die grundsätzlichen baulichen Maßnahmen hinaus weitere Maßnahmen zu be-

achten, die nachgewiesen werden müssen. So muss z.B. bei den im Außenbereich befindlichen Teilen einer Holzkonstruktion ein ausreichender Dachüberstand nachgewiesen werden, wenn auch diese Teile in die Gebrauchsklasse GK0 eingestuft werden sollen. Ein ausreichender Dachüberstand ist z.B. gegeben, wenn zwischen Unterkante Dach und Unterkante Holz ein Winkel von mindestens 60° bezogen auf die Horizontale vorhanden ist.

Hinsichtlich der Schadorganismen wird unterschieden zwischen

- Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch Holz zerstörende Pilze und
- Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch Holz zerstörende Insekten.

2.1 Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch Holz zerstörende Pilze

Im Rahmen dieser Maßnahmen ist dafür zu sogen, dass eine unzuträgliche Erhöhung der Holzfeuchte, als Voraussetzung für einen Pilzbefall, vermieden wird. Dies bedeutet, dass die Holzfeuchte nicht längere Zeit über den Fasersättigungsbereich, d.h. oberhalb von rund 30 % liegen darf, da sich die Holz zerstörende Pilze erst beim Vorhandensein von freiem Wasser in den Zellhohlräumen entwickeln können.

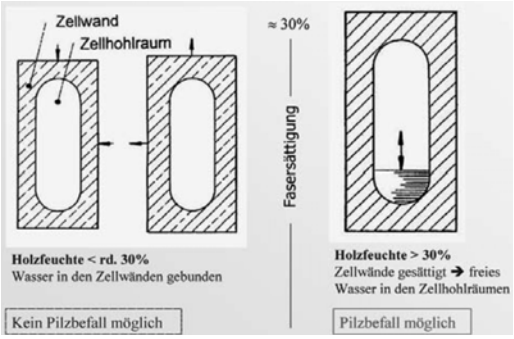


Abb. 1: Feuchtezustand der Zellwände und Zellhohlräume [9]

Bei den diesbezüglichen Maßnahmen wird unterschieden zwischen:

- Feuchteschutz während Transport, Lagerung, Montage und Nutzung
- Wetterschutz
- Schutz in Nassbereichen
- Schutz gegen Feuchteleitung aus angrenze den Stoffen oder Bauteilen
- Tauwasserschutz

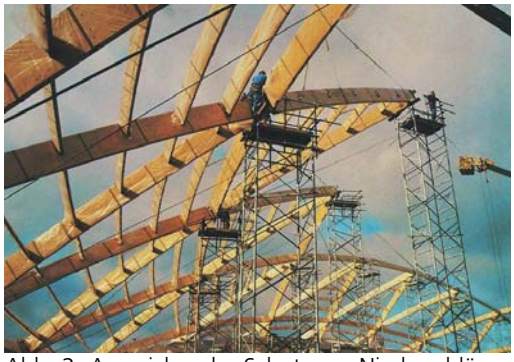
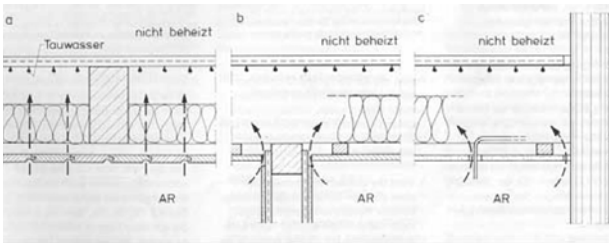


Abb. 2: Ausreichender Schutz vor Niederschlägen während der Montage mit diffusionsoffenen Folien; Oulu Dome, Finnland [5]

Abb. 3: Risse in Brettschichtholz infolge Nichtbeachtung des Feuchteschutzes währen des Bauzustandes [7]

Abb. 4: Ausreichender Wetterschutz einer Holzkonstruktion durch Überdachung [8]

Abb. 5: Wasserdicht ausgebildete Wand- und Fußbodenbereiche eines Badraumes [8]



a unterseitige Bekleidung nicht luftdicht;

b Anschluß der unterseitigen Bekleidung an die Trennwand nicht luftdicht

c luftdurchlässige Durchdringung einer ansonsten luftdichten Bekleidung durch Elektrokabel oder Rohrdurchführung; AR Aufenthaltsraum

Abb. 6: Wasserdampfkonvektion mit Tauwasserbildung bei nicht luftdicht ausgebildeten Außenbauteilen [3]

Hinsichtlich des Tauwasserschutzes wird unterschieden zwischen:

- Tauwasserschutz für die raumseitige Oberfläche von Außenbauteilen
- Tauwasserschutz für den Querschnitt von Außenbauteilen infolge Wasserdampfdiffusion
- Tauwasserschutz für den Querschnitt von Außenbauteilen infolge Wasserdampfkonvektion

Ein Tauwasserschutz für die raumseitige Oberfläche von Außenbauteile ist infolge ausreichender Wärmedämmung von Holzbauteilen in der Regel gegeben. Auch bezüglich des Tauwasserschutzes infolge der Wasserdampfdiffusion gab es in der Vergangenheit keine Probleme. Hier hat z.B. die Verwendung einer 0,2 mm dicken PE-Folie im Bereich der Innenseite ausgereicht, um den erwähnten Tauwasserschutz zu gewährleisten. In der Zwischenzeit wurden weitere Konstruktionen entwickelt, bei welchen dieser Schutz auch ohne eine PE-Folie gegeben ist. Wenn Schäden infolge der Tauwasserbildung auftraten, waren diese fast immer auf die Wasserdampfkonvektion zurück zu führen.

In der Zwischenzeit sind zahlreiche Luftdichtheitskonzepte erarbeitet worden, so dass auch Schäden infolge der Wasserdampfkonvektion in der Zukunft deutlich weniger auftreten dürften.

Abb. 7: Herstellung der luftdichten Schicht [6]

2.2 Maßnahmen zur Vermeidung eines Insektenbefalles

Umfangreiche Untersuchungen an Objekten aus Brettschichtholz in einem Alter zwischen rd. 30 und 100 Jahren sowie an Objekten aus Vollholz, keilgezinktem Vollholz und Balkenschichtholz in einem Alter zwischen rd. 10 und 20 Jahren haben eindeutig bewiesen, dass das technisch getrocknete Holz von den in unseren Breitengraden vorkommenden Insekten nicht angegriffen wird. Dies bedeutet, dass bei Verwendung von Brettschichtholz, Balkenschichtholz, Brettsperrholz, keilgezinktem Vollholz und anderen Produkten aus technisch getrocknetem Holz keine weiteren Schutzmaßnahmen hinsichtlich eines Insektenbefalls erforderlich sind.

Abb. 8: Intakte Hetzerträger ohne Holzschutzmittel, Alter ca. 100 Jahre, Halle Christoph und Unmack, Niesky [7]

Abb. 9: Kein Insektenbefall bei technisch getrocknetem, nicht chemisch behandeltem Holz im Innen- und Außenbereich eines rund 20 Jahre alten Holzhauses [9]

Abb. 10: Kein Insektenbefall bei technisch getrocknetem nicht chemisch behandeltem Holz im Außenbereich eines rd. 15 Jahre alten Holzhauses [9]

Auch bei einem nicht technisch getrockneten Holz ist die Gefahr eines Bauschadens durch Insekten nicht gegeben, wenn eine der nachfolgenden Bedingungen erfüllt ist:

- das Holz ist allseitig insektenundurchlässig abgedeckt, (genauere Angaben in [3] bzw. Erläuterungen zu [2])
- das Holz ist offen angeordnet, so dass es kontrollierbar ist,
- Verwendung von Farbkernhölzer mit einem Splintholzanteil unter 10 % .

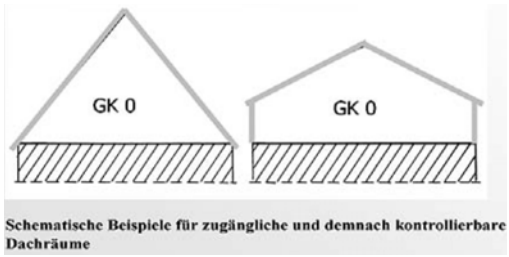


Abb. 11 Holzkonstruktionen GK 0 in nicht ausgebautem Dachraum; GK 0 Konstruktion auch bei nicht technisch getrocknetem Holz [3]

2.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch übermäßiges Quellen und Schwinden des Holzes

Um Schäden durch übermäßiges Quellen und Schwinden des Holzes zu vermeiden, sollten die Hölzer mit einer Feuchte eingebaut werden, die als mittlere Holzfeuchte im eingebauten Zustand zu erwarten ist. Als Maßstab dafür dient die Gleichgewichtsfeuchte (Abb. 12).

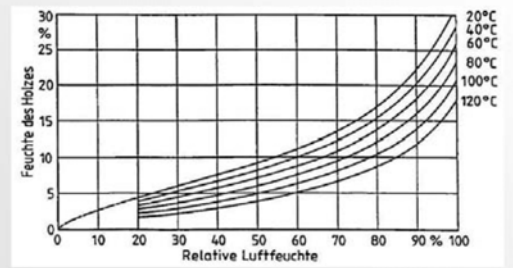


Abb. 12: Gleichgewichtsfeuchte des Holzes in Abhängigkeit von der Temperatur und relativen Luftfeuchte [9]

Bei Nichtbeachtung dieser Anforderung können Schäden infolge Schwindens oder Quellens auftreten, wie unerwünschte Verformungen des Holzes, Risse, Setzungen der Konstruktion usw.

Abb. 13: Fugen zwischen Holzbauteilen infolge Schwindens [4]

Abb. 14: Stauchung der Putzträgerplatte auf Grund von Setzungen / Schwinden der liegenden Randbalken [4]

Abb. 15: Risse im Holz infolge Schwindens [7]

3 Beispiele für empfindliche Anwendungsbereiche des Holzes

3.1 Brücken ohne ausreichenden Wetterschutz

Wenn das Niederschlagswasser von Holzbauteilen nicht rechtzeitig abgeführt werden kann, ist die Gefahr eines Pilzbefalles sehr groß. Diese Gefahr kann auch bei einer chemischen Behandlung des bei uns hauptsächlich verwendeten Fichtenholzes nicht ausreichend beseitigt werden, da das Fichtenholz auch im Kesseldruckverfahren nur in den äußeren 1 bis 2 mm vom Holzschutzmittel erfasst wird und eine ausgereifte technische Ausrüstung

für eine tiefere Imprägnierung zurzeit nicht existiert und im Sinne der Nachhaltigkeit auch nicht für sinnvoll erachtet wird.

Abb. 16: Pilzbefall bei einer ungeschützten Trogbrücke, Feuchteaufnahme über nachträgliche Risse sowie über Verschmutzungen im Randbereich [8]

3.2 Spritzwasserbereich

Bei Holzbauteilen im Freien muss die Spritzwasserfreiheit gewährleistet sein, wenn Pilzschäden vermieden werden sollen. Die Spritzwasserfreiheit ist im Allgemeinen gegeben, wenn zwischen der Unterkante der direkt bewitterten Hölzern und dem Erdreich bzw. dem umgebenden Bodenbelag ein Abstand von mindestens 30 cm eingehalten wird. Dieser Abstand kann durch technische Maßnahmen zur Vermeidung der Spritzhöhe (z.B. Kiesschüttung mit bestimmter Körnung) auf 15 cm reduziert werden.

Abb. 17: Nicht ausreichende Spritzwasserfreiheit einer Holzfassade

Abb. 18: Ausreichende Spritzwasserfreiheit einer Holzfassade [9]

Abb. 19: Nicht ausreichende Spritzwasserfreiheit von Holzstützen im Freien, nicht ordnungsgemäße Stützenfüße [4]

3.3 Flachdach

Ein Flachdach ist eine sehr empfindliche Konstruktion, bei welcher die kleinsten Fehler zu großen Schäden führen können. So können z.B. die kleinsten Undichtheiten im Bereich der raumseitigen Oberfläche in kurzer Zeit zur starken Befeuchtung der innerhalb des Flachdaches befindlichen Bauteile infolge der Wasserdampfkonvektion führen.

In solchen Fällen hilft auch eine Behandlung des Holzes mit Holzschutzmitteln nicht, da diese die Zerstörung des Holzes nur etwas verzögern kann und die Durchnässung der Wärmedämmung und

Entwicklung der Schimmelpilze nicht verhindern kann.

Aus diesem Grund muss bei der Errichtung von Flachdächern die größte Sorgfalt vorhanden sein und ein genauer bauphysikalischer Nachweis z.B. mit einem instationären Programm erfolgen.

Abb. 20: Pilzschäden innerhalb eines Flachdaches infolge Wasserdampfkonvektion [7]

4 Beispiele für Konstruktionen in der Gebrauchsklasse GK0

In den Bildern 21 bis 30 sind Beispiele für Konstruktionen in der Gebrauchsklasse GK0 zu sehen.

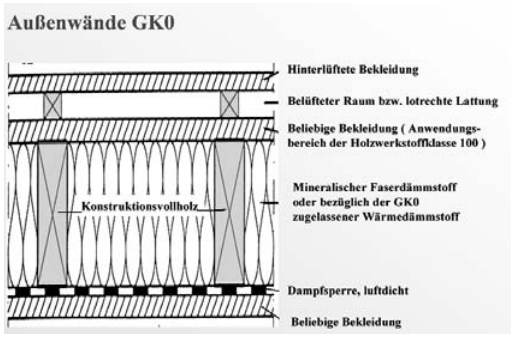


Abb. 21: Außenwände mit Vorhangschalen aus Bekleidung auf Lattung

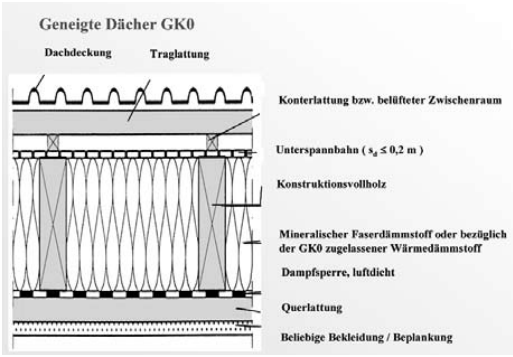


Abb. 22: Geneigtes Dach ohne Belüftung innerhalb des Gefaches

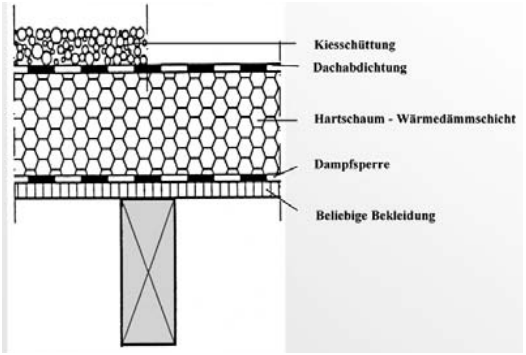


Abb. 23: Flachdach über Aufenthaltsräume mit dreiseitig sichtbaren Deckenbalken

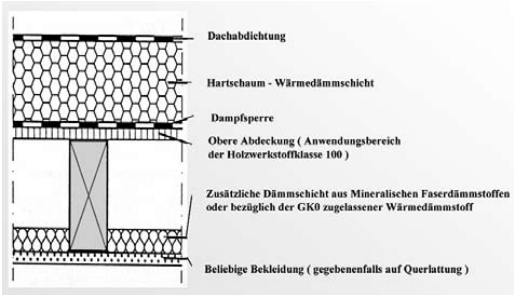


Abb. 24: Flachdach mit raumseitiger Bekleidung

Abb. 26: Brücke mit Dach; kompletter Schutz durch Glasdach [8]

Abb. 27: Mit Stehfalzdeckung abgedeckte tragende Verbundbauteile aus Brettschichtholz einer Brücke [7]

Abb. 29: Solemar Bad Dürrheim; trotz Thermalwasser keine besondere Gefährdung wegen zu hoher Feuchte [8]

Abb. 30: Expodach Hannover. Großer Dachüberstand schützt die Stützenfüße vor direkter Bewitterung [10]

Quellen

[1] DIN 68800-1: 1974-05 „Holzschutz im Hochbau – Allgemeines“
[2] DIN 68800-2: 1996-05 „Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau“
[3] Schulze, H.: „Baulicher Holzschutz“, holzbau handbuch Reihe 3, Teil 5, Folge 2, Informationsdienst Holz, Holzabsatzfonds, 1997
[4] Colling, F.: „Lernen aus Schäden“, DGfH, München
[5] Finnforest Merk, Aichach
[6] MOLL bauökologische Produkte GmbH, Schwetzingen
[7] Schwaner, Institut für Holzbau, Hochschule Biberach
[8] Arge Holz, Düsseldorf
[9] Radovic, Borimir
[10] Holzabsatzfonds HAF, Bonn

Für weitere Informationen siehe auch Kap. 12: Radovic, B.: „Unempfindlichkeit von technischem getrocknetem Holz gegen Insekten“

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Unempfindlichkeit von technisch getrocknetem Holz gegen Insekten

Borimir Radovic

1 Einleitung

Vor etwa 100 Jahren hat man damit begonnen, im Holzbau technisch getrocknetes Nadelholz in Form von Brettschichtholz in größerem Umfang zu verwenden. Seitdem wurden in Deutschland über 20 Millionen Kubikmeter davon verbaut, europaweit mehr als 50 Millionen. Mindestens 90% von diesem Brettschichtholz erhielten keine Behandlung mit Holzschutzmitteln. Dennoch ist in Deutschland bis heute kein Fall bekannt, bei dem solches Brettschichtholz im Innenraumbereich und im nicht direkt bewitterten Außenbereich von Insekten befallen wurde. Zwei Feldstudien zur Untersuchung von Brettschichtholzträgern aus dem Jahr 1984 [1] und 2001 [2] bestätigen dies: Alle untersuchten Träger waren frei von Insektenbefall.

Es liegt die Vermutung nahe, dass diese Unempfindlichkeit gegen Insekten auch bei anderen Produkten aus technisch getrocknetem Nadelholz zu erwarten ist, wenn sie im Innenraumbereich (innerhalb der Gebäudehülle) bzw. im nicht direkt bewitterten Außenbereich eingesetzt werden. Solche Produkte wären beispielsweise Balkenschichtholz, keilgezinktes Vollholz oder nicht verklebte Holzprodukte.

Seit etwa 25 Jahren schon werden auch diese Produkte ohne Holzschutzmittel im Innenraumbereich und im nicht direkt bewitterten Außenbereich eingebaut, wenn bis zu drei Querschnittsseiten des Bauteils sichtbar sind. Die Offenheit der Konstruktionen ermöglicht den Insekten jederzeit ungehinderten Zugang zu den Holzquerschnitten, sie erlaubt aber gleichzeitig eine einfache Kontrolle der Bauteile. Trotz der scheinbar günstigen Zugangsverhältnisse für Insekten ist bei keinem dieser Holzbauwerke ein Befall bekannt geworden. Eine ergänzende Befragung von rund 800 Holzbaubetrieben durch verschiedene Verbände ergab das gleiche Resultat.

Der Autor der im Folgenden beschriebenen aktuellen Feldstudie konnte im Rahmen seiner umfangreichen Recherchen und seiner gutachterlichen Tätigkeit ausnahmslos die „Insektenunempfindlichkeit" von Bauteilen aus technisch getrocknetem Holz im Innenraumbereich und im nicht direkt bewitterten Außenbereich ohne die Verwendung von Holzschutzmitteln feststellen.

Die bisherigen Erkenntnisse aus der Praxis, dass bei Bauteilen aus technisch getrocknetem Nadelholz ohne Holzschutzmittel kein Insektenbefall zu befürchten ist, wenn diese im Innenraumbereich und im nicht direkt bewitterten Außenbereich verbaut worden sind, belegt nun auch diese Feldstudie: Durch Untersuchungen an 101 Objekten konnten die bisherigen baupraktischen Erfahrungen überprüft und nach dem heutigen wissenschaftlichen technischen Erkenntnisstand begründet werden, so dass eine endgültige Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines Befalls von technisch getrocknetem Nadelholz durch die in Deutschland vorkommenden Insekten getroffen werden kann. Aussagekräftige Laboruntersuchungen gibt es dazu keine, da die realen Lebensbedingungen dieser Insekten im Labor nicht ausreichend nachgestellt werden können.

Die Untersuchungsergebnisse der Feldstudie, deren 101 Objekte alle in Befallsgebieten [16] stehen, werden mit einer Bewertung des jeweiligen realen Gefährdungspotenzials verknüpft. Dieses Gefährdungspotenzial wird wesentlich von den unterschiedlichen Klimabedingungen in den Bauwerken bestimmt, das heißt von den Klimarandbedingungen, die für die Entwicklung von Insektenlarven notwendig sind. Bei der Bewertung des Gefährdungspotenzials werden außerdem die Nährstoffrandbedingungen berücksichtigt, wie Protein und Vitamin B Abnahme, sowie die Ver-

flüchtigung der holzeigenen Inhaltsstoffe (Lockstoffe) des Holzes durch die hohen Temperaturen bei der technischen Holztrocknung.

2 Definition der Nutzungsklassen

Tragwerken aus Holz werden wegen ihrer entsprechend unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften bestimmte Nutzungsklassen (NKL) zugewiesen, die die vorherrschenden klimatischen Umgebungsbedingungen des Holzbauwerks bzw. -bauteils während seiner Lebensdauer beschreiben. Die Nutzungsklassen dienen im Sinne der Holzbaunormen EN 1995 (Eurocode5) und DIN 1052 (Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken) hauptsächlich der Zuordnung von Festigkeitswerten der Materialien und zur Berechnung von Verformungen unter festgelegten Umweltbedingungen.

Im Zusammenhang mit den vorgenommenen Untersuchungen geben die Nutzungsklassen aber auch Auskunft über die notwendigen Entwicklungsbedingungen von Insektenlarven, die in hohem Maße von der Feuchte und Temperatur des Holzes bzw. der umgebenden Luft abhängen (siehe Abschnitt 3). In EN 1995 und DIN 1052 werden die folgenden drei Nutzungsklassen festgelegt:

Nutzungsklasse 1

Sie ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20° C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 65% übersteigt. Die meisten Nadelhölzer überschreiten in der Nutzungsklasse 1 eine Gleichgewichtsfeuchte von 12% nicht.

Nutzungsklasse 2

Sie ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20° C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 85% übersteigt. Die meisten Nadelhölzer überschreiten in der Nutzungsklasse 2 eine Gleichgewichtsfeuchte von 20% nicht.

Nutzungsklasse 3

Sie erfasst Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten führen als in Nutzungsklasse 2 angegeben. In Ausnahmefällen können auch überdachte Tragwerke in die Nutzungsklasse 3 eingestuft werden.

3 Der Hausbockkäfer

3.1 Allgemeines

Stellvertretend für alle holzzerstörenden Insekten, die im verbauten Holz in Deutschland vorkommen, wird hier der Hausbock ausführlich behandelt. Er gilt mit Abstand als größter tierischer Zerstörer von verbautem Holz.

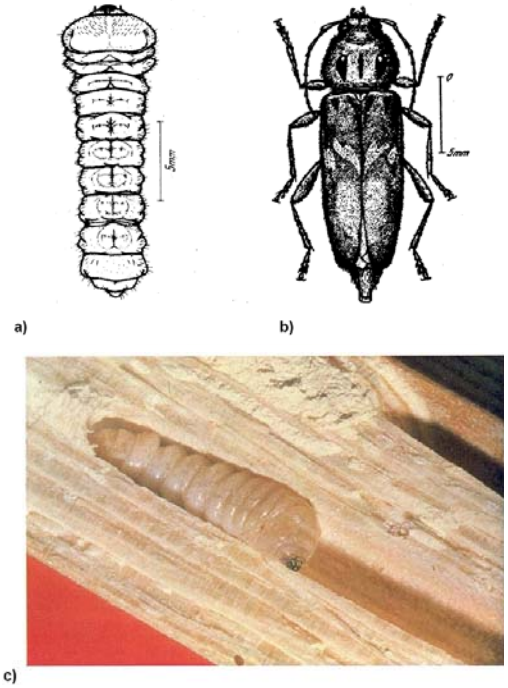


Abb. 1a, 1b, 1c: Ansichten des weiblichen Hausbockkäfers (a) und der Hausbocklarve (b, c)
a, b nach [12], c nach [8]

Grundlegende Literatur zum Hausbockkäfer (Hylotrupes bajulus (L.)) – umgangssprachlich häufig auch als „Hausbock", „Holzbock" oder „großer Holzwurm" bezeichnet – findet man z.B. in [7] und [8]. Im Rahmen der folgenden Ausführungen werden nur die Aspekte der Lebensbedingungen bzw. des Ernährungs- und Schädigungsverhaltens des Insekts beleuchtet, soweit sie für die hier betrachteten Zusammenhänge wesentlich sind.

Der Generationenzyklus (Ei, Larve, Puppe, ausgewachsenes Insekt) des Hausbocks (Abb. 1ac) beträgt gewöhnlich 4 bis 6 Jahre [6], kann unter ungünstigen Bedingungen jedoch auch bis zu 15 Jahre [8] dauern.

Holzzerstörend ist nicht das ausgewachsene Insekt, sondern ausschließlich die Larve. Die Lebensdauer des fliegenden Käfers (etwa Mitte Juni bis Ende August) beträgt je nach Umweltbedingungen 2 bis 4 Wochen [7].

Voraussetzungen für die Eiablage

Die Eiablage und damit der spätere Befall erfolgt nur in Nadelhölzern, wobei die Widerstandskraft von Kiefer über Tanne zu Fichte zunimmt [10]. Die Käfer werden von dem für frisches Koniferenholz charakteristischen Duft von Pinen und Caren angelockt. Die Befallswahrscheinlichkeit des Holzes nimmt mit zunehmendem (Schnitt-) Holzalter ab, wobei die Angaben über den jeweiligen Zeitpunkt, ab dem kein Befall mehr stattfindet, in der Literatur zum Teil deutlich variieren. Üblicherweise hört aber bei 50 bis 60 Jahre altem Holz der Hausbockbefall auf [8]; 100 Jahre altes Bauholz ist in der Regel nicht mehr als Nahrungssubstanz für Larven geeignet [11].

Befallsmerkmale

Der Larvenfraß erfolgt fast ausschließlich im Splintholz, wobei unregelmäßig verlaufende und im Querschnitt ovale Gänge erzeugt werden. Zerfressen werden vorwiegend die weicheren Frühholzschichten, während die härteren Spätholzschichten lamellenartig stehen bleiben.

Das typische, äußerlich sichtbare Merkmal eines Hausbockbefalls sind die Ausfluglöcher des geschlüpften Insekts. Sie sind oval und haben einen Längsdurchmesser von etwa 5 bis 10 mm (Abb. 2).

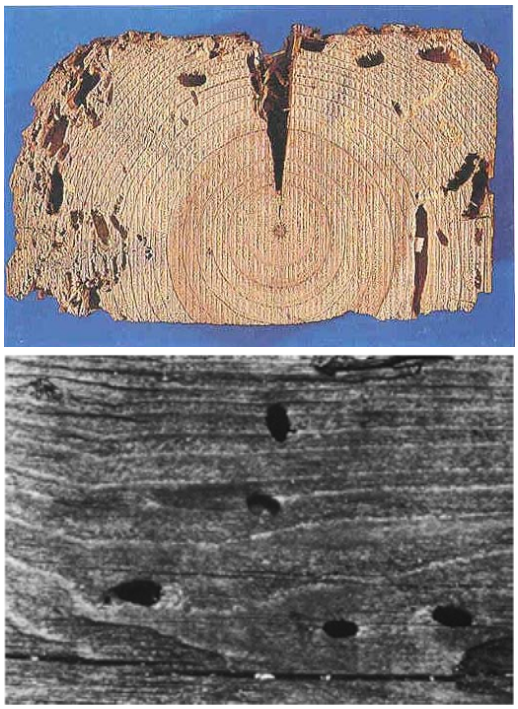


Abb. 2: (a) Typische Ansichten von Fraßgängen von Hausbocklarven im Querschnitt eines befallenen Kiefernholzbalkens sowie (b) von Ausfluglöchern (ovale Form, längerer Ellipsendurchmesser rund 5-10 mm) (a) nach [8], (b) nach [12]

Einflussfaktoren auf die Larvenvitalität

Die Larvenentwicklung und die Lebenszeit der Larven aller in Deutschland vorkommenden holzzerstörenden Insekten hängen im Wesentlichen von drei Faktoren ab:

- Holzfeuchte,
- Luft bzw. Holztemperatur,
- Nährstoffangebot im Holz.

Diese Einflussfaktoren werden nachstehend wegen ihrer Bedeutung für den Auftritt eines Schadens diskutiert.

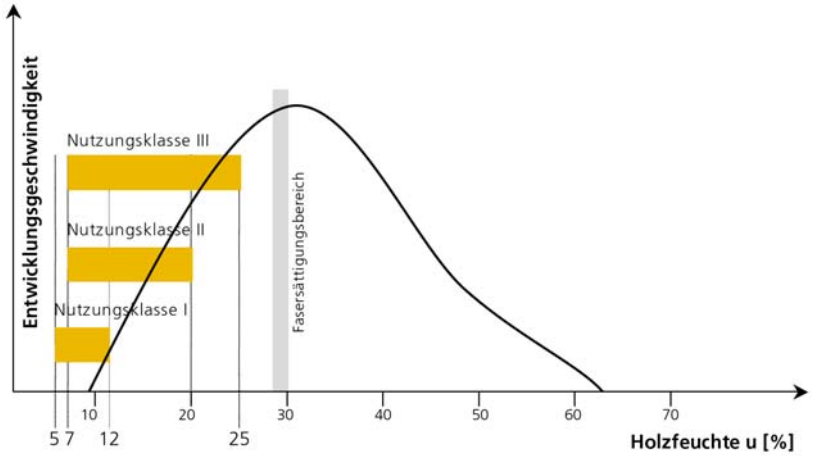
3.2 Einfluss der Holzfeuchte und der Temperatur

Die Larvenentwicklung hängt entscheidend von den beiden Parametern Holzfeuchte und Temperatur ab. Dies lässt unmittelbare Schlussfolgerungen auf das unterschiedliche Gefährdungspotenzial von technisch getrocknetem Nadelholz in den drei Nutzungsklassen zu.

Wie aus Abb. 3a ersichtlich, erstreckt sich der Holzfeuchtebereich, in dem sich Larven entwickeln können, von etwa 9% bis 60%, wobei das Entwicklungsoptimum im Fasersättigungsbereich bei rund 30% liegt. Hausbocklarven wachsen somit umso schneller, je feuchter die Luft ist. Unterhalb einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40% bis 50%, was einer Holzfeuchte von etwa 8% bis 10% entspricht, nimmt die Larvenvitalität auf Null ab und die Larven sterben nach längerer Hungerszeit [7]. Nach [13] ist für eine Entwicklung der Eilarven eine Holzfeuchte von mindestens 12% erforderlich.

Betrachtet man im Vergleich zur Larven-Entwicklungsgeschwindigkeitskurve die typischen Holzfeuchtebereiche der drei Nutzungsklassen, so stellt man fest, dass technisch getrocknetes Nadelholz, das in der Nutzungsklasse 1 verbaut ist, nur ein äußerst geringes Risiko der Larvenentwicklung aufweist, das nach [13] vernachlässigbar klein ist. Im Bereich der Nutzungsklasse 2 kann die Holzfeuchte je nach Gebäudenutzung, geographischer Lage und Jahreszeit zwischen 7% und maximal 20% schwanken. Umfangreiche Messungen der relativen Luftfeuchte und Feuchtemessungen bei Holzbauobjekten der Nutzungsklasse 2 zeigten, dass die mittlere Jahresholzfeuchte in Deutschland etwa 14%, mit Schwankungen zwischen 11% und 17% beträgt. Die genannte mittlere Feuchte liegt, wie man sieht, noch weit unterhalb eines günstigen Larvenentwicklungsbereichs. Lediglich der Feuchtebereich der Nutzungsklasse 3, der sich in grober Näherung etwa von 7% bis 25% erstreckt, weist im Mittel Feuchten auf, die eine ausreichend hohe Geschwindigkeit der Larven-entwicklung gewährleisten.

a



b

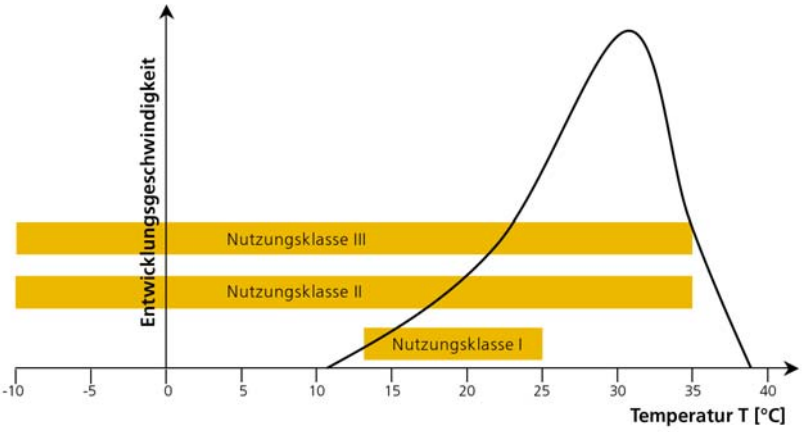


Abb. 3a, 3b: Abhängigkeit der Entwicklungsgeschwindigkeit der Larve von der Holzfeuchte (a) und der Temperatur (b) nach [6]. Mit angegeben sind Näherungsbereiche für die Holzfeuchte- und Temperaturbereiche der drei unterschiedlichen Nutzungsklassen (nach [2])

Neben der Feuchte hat die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Larvenentwicklungsgeschwindigkeit (Abb. 3b). Die Hausbocklarve ist sehr Wärme liebend; die günstigste Temperatur für eine Larvenentwicklung liegt bei etwa 28° bis 30° C [7]. Unterhalb von etwa 10° C verfallen die Larven in Kältestarre, in der sie auch stärkeren Frost ertragen. Oberhalb von 38° C ist keine Entwicklung möglich. Bei einer Temperatur von 55° C sterben alle im Holz befindlichen Larven. Dies ist einer der Gründe, warum Dachlatten, die im Sommer unter einer relativ dunklen Dachhaut lange Zeit einer Temperatur von mehr als 60° C ausgesetzt sind, keine nennenswerten Insektenschäden aufweisen.

Betrachtet man die Bandbreite der grob abgeschätzten mittleren Temperaturen in den drei Nutzungsklassen (mitteleuropäischer Raum), so zeigt sich, dass die Nutzungsklasse 1 auch bezüglich der Temperaturen eine eher geringe Larvenentwicklung bedingt. In den Nutzungsklassen 2 und 3 liegen dagegen vergleichbar günstige Bedingungen für eine Larvenentwicklung vor.

3.3 Einfluss des Nährstoffangebots

Die Entwicklung von Larven setzt eine Reihe von Nährstoffbedingungen voraus. Von wesentlicher Bedeutung sind Kohlenhydrate, der Proteingehalt sowie der Vitamin-B-Gehalt des Holzes.

Kohlenhydrate – Cellulose, Hemicellulosen, Zucker und Stärke

Nach [14] ist die Kohlenhydrat-Ausnutzung bei der Hausbocklarve z.B. im Vergleich zu Termiten sehr gering; rund 78% der aufgenommenen Menge werden im Durchschnitt unverdaut ausgeschieden

Proteingehalt

Nach [14] existiert für die Larvenwachstumsgeschwindigkeit eine lineare Abhängigkeit vom Proteingehalt des Holzes, wobei die unterste Grenze für Larvenwachstum bei 0,2% Protein bezogen auf das Holzgewicht liegt. Allgemein nimmt der Proteingehalt von Splint zum Kernholz hin exponentiell ab und liegt beim Kernholz im Bereich zwischen 0,2% und0,3%, also nur gering oberhalb des entwicklungsnotwendigen Schwellenwertes. Im Gegensatz hierzu wurden in den Splintrandbereichen etwa 0,5% Proteingehalt gemessen. Die Verteilung des Proteingehalts im Splint- und Kernholz erklärt unter anderem, warum bevorzugt die eiweißreichen Splintholzzonen befallen werden, während das Kernholz weitgehend gemieden wird.

Vitamin-B-Gehalt: Vitamin-B-Gehalt

Nach [14] ist eine ausreichende Menge an Vitamin B für die Larvenvitalität zwingend erforderlich. Vitamin B2 scheint wichtiger zu sein als Vitamin B1. Die mangelnde Eignung von altem Holz als Nahrungssubstanz wird in [14] auf die alterungsbedingte Vitamin-B-Abnahme zurückgeführt. Letztere Annahme wird in [8] als noch strittig diskutiert.

3.4 Bisherige Untersuchungen zur Befallswahrscheinlichkeit von technisch getrocknetem Nadelholz

Bis heute sind keine Laborversuche bekannt, bei denen unter Beachtung von Praxisbedingungen die Befallswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß durch den Hausbock bei technisch getrocknetem Nadelholz untersucht wurde.

Außer für Brettschichtholz gab es bisher ebenfalls keine Feldstudien an Bauwerken aus technisch getrocknetem Nadelholz. Untersuchungen aus den 1950er Jahren an 45.000 Gebäuden in der Bundesrepublik Deutschland ergaben zwar an mehr als einem Drittel Schäden1 durch Fraß der Hausbocklarve an Vollholz [17], nur sind diese Schäden an nicht oder unzureichend getrocknetem, überwiegend mit Bast und Rinde behaftetem Vollholz aufgetreten. Entsprechend wird in

der Literatur über keinen einzigen Fall berichtet, bei dem technisch getrocknetes Nadelholz im Innenraumbereich und im nicht direkt bewitterten Außenbereich verbaut wurde und von Insektenbefall betroffen war.

Der Begriff Schaden betraf nach damaliger Auffassung die Feststellung eines oder mehreren Ausfluglöcher ohne jegliche Bewertung einer Tragfähigkeitsminderung.

4 Feldstudie

4.1 Zielvorgaben

Ziel der Feldstudie war die Feststellung eventueller Anzeichen eines Insektenbefalls von Bauteilen aus technisch getrocknetem Holz ohne Holzschutzmittel. Bei dem begutachteten technisch getrockneten Nadelholz der 101 Objekte der Feldstudie handelt es sich um Holz, das über mehrere Tage einer Temperatur von mindestens 55° C ausgesetzt war und nach der Trocknung eine Feuchte von maximal 18% aufwies.

Es wurde zusätzlich dokumentiert:
a) Lage der Objekte,
b) Alter der Holzkonstruktionen ohne Holzschutzmittel,
c) Abmessungen der Holzbauteile,
d) Holzfeuchte der Bauteile.

4.2 Begutachtete Objekte

Es wurden insgesamt 101 Objekte, davon 95 in Deutschland und sechs in Österreich, begutachtet. Die Objekte bzw. die Holzkonstruktionen waren zwischen 8 und 20 Jahre alt. In ihrer Nähe befanden sich mitunter auch ältere Gebäude mit ausgewiesenem Hausbockbefall.

4.3 Ergebnisse der Feldstudie

Bei keinem der untersuchten Objekte wurden Anzeichen eines Insektenbefalls festgestellt, weder bei den im Innenraumbereich befindlichen Hölzern (z.B. unausgebautes Dachgeschoss), noch bei den durch Überdachung vor Niederschlägen geschützten Hölzern (nicht direkt bewitterte Außenbereiche wie z.B. Sparrenteile im Traufenbereich, Carports).

Die innerhalb der Objekte ermittelte Holzfeuchte lag in der Regel zwischen 9% und 13%. Auch im Rahmen vieler anderer Untersuchungen wurde diese Holzfeuchte immer wieder festgestellt, so dass sie bei bewohnten Häusern als Regelfall angenommen werden kann.

Nach Abschnitt 3.2 befindet sich diese Feuchte an der Mindestgrenze bzw. unterhalb der Mindestgrenze, die eine Entwicklung von Hausbocklarven zulässt. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass für die Entwicklung des gewöhnlichen Nagekäfers, der neben dem Hausbock in Europa von Bedeutung ist, die Mindestfeuchte des Holzes etwas höher liegt.

Bei dem im Außenbereich befindlichen, aber durch Überdachung vor Niederschlägen geschützten Holz wurde eine feuchte zwischen 12% und 16% ermittelt.

5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die bisherigen Praxiserkenntnisse für die Bereiche der Nutzungsklassen 1 und 2 nach EN 1995 (Eurocode 5) bzw. DIN 1052 in vollem Umfang: Es wurde bei keinem der untersuchten Objekte ein Befall des verbauten technisch getrockneten Nadelholzes durch in Deutschland vorkommende Insekten festgestellt.

Im Einzelnen lassen sich hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines Insektenbefalls von technisch getrocknetem Nadelholz ohne Holzschutzmittel die nachstehenden Schlussfolgerungen ziehen:

Die Befallswahrscheinlichkeit und die damit verbundene Tragfähigkeitsgefährdung sind in den Nutzungsklassen 1 und 2 vernachlässigbar klein.
Die ermittelte Holzfeuchte innerhalb der Gebäudehülle mit in der Regel 9% bis 13% befindet sich entweder unterhalb der Mindestgrenze oder gerade an der Mindestgrenze, die eine Entwicklung von Insektenlarven zulässt.

Die ermittelte Holzfeuchte von 12% bis 16% bei den vor Niederschlägen geschützten Hölzern im Außenbereich liegt noch in einem für die Larvenentwicklung ungünstigen Bereich.

Von weiterer kausaler Bedeutung dürfte eine Protein- und Vitamin-B-Abnahme sein, die die hohen Temperaturen bei der technischen Holztrocknung bewirken, sowie die Verflüchtigung der Holzinhaltsstoffe (Lockstoffe) Pinen und Caren.

In früheren wissenschaftlichen Untersuchungen stand nur die theoretische Möglichkeit eines Insektenbefalles im Vordergrund. Schlussfolgerungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines Gefährdungspotenzials mit Blick auf Tragfähigkeitsminderungen wurden in der Vergangenheit nicht gezogen. Die Wahrscheinlichkeit eines Befalls und weitergehend einer Tragfähigkeitsminderung ist heute insbesondere auch vor dem Hintergrund des immer bedeutsamer werdenden Umwelt- und Gesundheitsschutzes wirklichkeitsbezogen zu hinterfragen. Im Rahmen des Letzteren ist es allgemein gewünschte Zielsetzung, in allen Anwendungsbereichen den Holzschutz mit bioziden Wirkstoffen auszuschließen und erforderlichenfalls entsprechend resistente Holzarten zu verwenden.

Für weitere Informationen siehe auch Kap. 12:
Radovic, B.: „Holzschutz – Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik"

Quellen

[1] Gersonde, M.; Grinda, M. (1984): Untersuchungen über das Vorkommen von Schäden durch holzzerstörende Pilze und Insekten an Holzleimbaukonstruktionen. Forschungsbericht. Bundesanstalt für Materialprüfung, Fachgruppe „Biologische Materialprüfung"
[2] Aicher, S.; Radovic, B.; Volland, G. (2001): Untersuchungen zur Befallswahrscheinlichkeit von Brettschichtholz durch Hausbock, bauen mit holz, 12/2001
[3] DIN EN 199511:2005-12: Eurocode5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Teil 11: Allgemeine Bemessungsregeln für den Holzbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
[4] DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin
[5] DIN 68 8003:1990-04: Holzschutz. Vorbeugender chemischer Holzschutz. Beuth Verlag GmbH, Berlin
[6] N.N. (1998): Holzschutz, Erläuterungen zu DIN 68 8002, 3, 4. BeuthKommentare, 1. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin
[7] Becker, G. (1950): Zerstörung des Holzes durch Tiere. In: Handbuch der Holzkonservierung, Hrsg. Mahlke, Troschel u. Liese, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
[8] Grosser, D. (1985): Pflanzliche und tierische Bauund Werkholzschädlinge. DRWVerlag, Leinfelden-Echterdingen
[9] Sutter, H. P. (1986): Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Paul Haupt Verlag, Bern; Stuttgart
[10] Graf, E. (1989): Ökologische Aspekte zur chemischen Hausbockbekämpfung. Holz als Rohund Werkstoff, Jg. 47, S. 383387

[11] Wichmanel, H. (1941): Wie lange dauert ein Hausbockbefall? Anzeiger für Schädlingskunde 17: 2124

[12] Schmidt, H. (1962): Tierische Schädlinge im Bauund Werkholz. Ein Taschenbuch zur Bestimmung und Verhütung von Fraßschäden. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin

[13] Vongkaluang, G.; Moore, H. B.; Farrieb, H. (1982): Mortality of firstinstar larvae of the old house borer (Hylotrupes bajulus (L.)) (Col.: Cerambycidae) at low wood moistures. Material and Organisms 17(3): S. 233240

[14] Becker, G. (1963): Holzbestandteile und Hausbocklarven-Entwicklung. Holz als Roh- und Werkstoff 21(4): S. 285-289

[15] Cymorek, S. (1982): Zur Befallbarkeit von Brettschichtholzträgern durch den Hausbock. Holz-Zentralblatt, Nr. 108, S. 1.509

[16] Becker, H. (1979): Die Verbreitung des Hausbockkäfers Hylotrupes bajulus (L.) Serville (Col., Cerambycidae); Versuch einer kartographischen Erfassung seines Vorkommens. Der praktische Schädlingsbekämpfer, 31. Jg., Nr. 5, S. 7175; Nr. 6, S. 106108; Nr. 7, S. 117119; Nr. 8, S. 133135; Nr. 9, S. 145148; Nr. 10, S. 162163; Nr. 11, S. 173176

[17] Körting, A. (1965): Wichtigster Hausschädling – der Hausbockkäfer. Umschau, Jg. 65 (4), S. 116 119

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Polyurethan-Beschichtungen

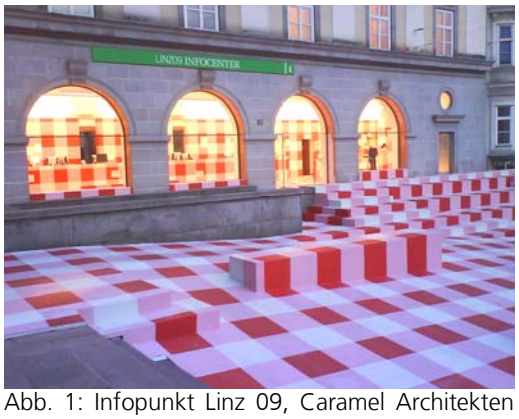


Abb. 1: Infopunkt Linz 09, Caramel Architekten [4]

1 Allgemeines

1935 entwickelte der Chemiker Otto Bayer das Diisocyanat-Additionsverfahren, hierdurch wurden Polyurethane herstellbar. Durch das Variieren der Ausgangsstoffe und der Reaktionsbedingungen lässt sich aber eine große Bandbreite von Kunststoffen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften erzielen.

Polyurethane werden überwiegend in der Automobil-, Elektro- und Baubranche verwendet. Die Anwendungsgebiete von Polyurethanen sind breit gefächert: Matratzen, Polstermöbel, Stoßfänger, Freizeitschuhe, Dämmung, Klebstoffe oder als Beschichtungen.

2 Beschichtungen

Polyurethanharze gehörten zu den Reaktionsharzen und sind unter dem Namen DD-Lacke bekannt geworden. Die PUR-Lacke beruhen auf der großen Reaktivität von sogenannten Isocyanatverbindungen, den Härtern, die mit einer Vielzahl von Harz-Komponenten Reaktionen eingehen. Im Normalfall werden Isocyanate mit alkoholähnlichen Verbindungen (Polyhydroxyle) kombiniert. Im Hochbau werden die reaktiven Isocyanathärter häufig auch mit Acrylharzen gepaart, wodurch äußerst wetterbeständige Lackfilme entstehen. Die Polyurethanharze gehören zu den neueren chemischen Entwicklungen und sind hochwertige Beschichtungsstoffe für Anwendungsbereiche mit hohen Anforderungen an die mechanische und chemische Beständigkeit.

Die Zahl der chemischen Modifikationen von Harz- und Härterkomponenten sowie die Kombinationsmöglichkeiten von Harz- und Härtertypen sind außerordentlich groß und ermöglichen eine gezielte Beeinflussung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften. Insbesondere die lösemittelhaltigen Polyurethansysteme lassen sich praktisch mit allen anderen Bindemitteln aus der Lackindustrie kombinieren. Es ist deshalb auch außerordentlich schwierig ein konkretes Produkt zu identifizieren und die spezifischen Eigenschaften eines Produktes objektiv und unabhängig zu beurteilen.

3 Anwendungsbereiche

Im Hochbau werden Polyurethanharze als Holzlackfarben für Möbel, Beschichtungen für Industrie- und Sportböden, Parkettsiegel sowie als Metall-, Holz- und Betonbeschichtungen verwendet. Anwendungsbereiche sind ebenfalls Dach- und Schwimmbadabdichtungen sowie Fassaden- bzw. Wandbeschichtungen.

Tab. 1: Anwendungsbereiche [1]

	Innen		Außen
Beanspruchung	**gering**	**stark**	
Putze und Gipsputze	x	x	x
Gips, Gipskarton, Papier	x	x	
Beton	x	x	+
Faserzement	x	x	x
Massivholz	x	+	+
Holzwerkstoffe	x	+	+
Stahl	x[1)]	+[1)]	+[1)]
Stahl verzinkt	x[1)]	+[1)]	+[1)]
Aluminium	x[1)]	+[1)]	+[1)]

+ geeignet / x möglich, aber nicht gebräuchlich
1) nur mit entsprechender Grundierung

4 Beständigkeit

Tab. 2: Beständigkeit [1]

Mechanische Beständigkeit		
Abrieb-festigkeit	Abwaschbar- und Scheuerbeständigkeit	Härte und Kratzfestigkeit
sehr gut	sehr gut, teilweise auch chemikalienbe-ständig	sehr gut
Alterungsverhalten		
Vergilbungsneigung		Witterungsbeständigkeit
bei nicht lichtstabilisierten Sys-temen möglich		bei bestimmten Härter-komponenten sehr gut,

Die Polyurethansysteme lassen sich für alle Anwendungsbereiche so modifizieren, dass sie die Anforderungen an die Beständigkeit erfüllen. Dabei müssen allerdings die Empfehlungen der Hersteller genau beachtet werden. Auch bei den Polyurethanlacken gibt es kein Universalsystem, das alle Anforderungen erfüllt.

5 Herstellung - Zusammensetzung

Als Bindemittel werden im Hochbau vor allem Polyesterpolyole mit vorpolymerisierten Isocyanaten chemisch zum PUR- Lack gebunden. Bei den Pigmenten und Füllstoffen handelt es sich um dieselben Stoffgruppen wie sie in allen Farbsystemen eingesetzt werden. Als Lösemittel kommen bei wasserlöslichen Lacken Alkohole oder andere wasserlösliche Verbindungsgruppen zum Einsatz (z.B. N-Methyl-2-pyrrolidon). Die Hilfsstoffe spielen in dieser Produktgruppe keine bedeutende Rolle (Abb. 1).

Bei lösemittelhaltigen Lacken kommen neben den bekannten aromatischen Lösemitteln wie Xylol ein Vielzahl spezieller Lösemittel (Ketone, höhere Alkohole, Ester) zum Einsatz. Die lösemittelhaltigen Polyurethanharze erfordern in der Regel verschiedenartige Hilfsstoffe, meistens auf der Basis von Polymeren (Abb. 2).

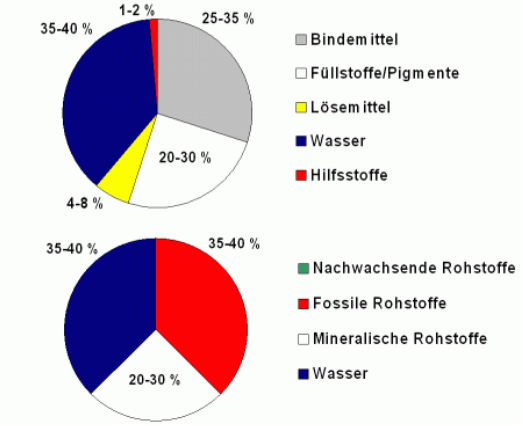


Abb. 2: Hauptbestandteile PUR-Harze, wasserverdünnbar [1]

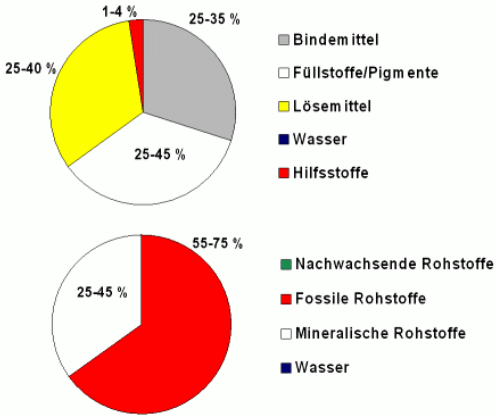


Abb. 3: Hauptbestandteile PUR-Harze, lösemittelhaltig [1]

6 Umweltindikatoren

6.1 Graue Energie

Tab. 3: Primärenergieaufwand [1]

	Dispersions-lackfarben	Polyurethanharze wasserverdünnbar	Polyurethanharze lösemittelhaltig
MJ/m²	11 - 14	20 - 25	38 - 41

Die angegebenen Zahlen beziehen sich auf einen Standardaufbau für ein weiß deckendes Farbsystem. Für die Standard-Bindemittel von Polyurethanen (Polyole und Isocyanate) sind relativ zuverlässige Daten zum Energieaufwand verfügbar.

Sie stammen vom europäischen Verband der Kunststoffproduzenten und repräsentieren europäische Mittelwerte. Der Unterschied zwischen wasserverdünnbaren Polyurethanharzen und Polyurethanharze lösemittelhaltig sind etwa 30 bis 35 % Lösemittel. In den Bindemitteln unterscheiden sie sich bezüglich Belastung während der Herstellung kaum. Die Unterschiede zu Dispersionslackfarben werden hauptsächlich durch die energieintensiven Bindemittel verursacht.

6.2 Umweltbelastungszahl gemäß BUWAL-Methode

Tab. 4: Umweltbelastungszahl BZ [1]

	Dispersions-lackfarben	Polyurethanharze wasserverdünnbar	Polyurethanharze lösemittelhaltig
BZ [-/m²]	15 - 19	35 - 40	50 - 65

Der BZ-Indikator ist das Ergebnis einer in der Schweiz entwickelten Bewertungsmethode der Umweltbelastung während der Herstellung und Verarbeitung von Anstrichstoffen und basiert auf der Stoff- und Energiebilanzierung.

Da mit dem BZ-Wert auch die Verarbeitung bewertet wird, gehören die Polyurethanharze aufgrund ihrer reizenden und z.T. sensibilisierenden Inhaltsstoffe zu den umweltbelastendsten Anstrichen im Hochbau. Bei den lösemittelhaltigen Polyurethanvarianten sind 25 bis 50 %, bei den wässrigen Systemen lediglich 15 bis 25 % des BZ-Indikators auf die Verarbeitung zurückzuführen. Die großen Bereiche der Belastungszahl stammen von den sehr unterschiedlich toxischen Härtern und Hilfsstoffen in gewissen Produkten.

6.3 Emissionen

Tab. 5: Emissionen [1]

	Alkydharz-lackfarben	Polyurethanharze lösemittelhaltig	Polyurethanharze wasserverdünnbar
g/m²	120 - 150	180 - 200	0 - 5

Die Lösemittelemissionen der lösemittelhaltigen Polyurethanharze sind verglichen mit möglichen Alternativen auf Wasserbasis (Polyurethanharze wasserverdünnbar) sehr hoch.

Emissionen in den Innenraum

TVOC: Aus punktuellen Messungen in der Prüfkammer muss man davon ausgehen, dass bei Polyurethanen das Risiko längerfristiger Schadstoffabgabe nicht ganz ausgeschlossen werden kann. Vor allem bei unsachgemäßer Verarbeitung von Zweikomponentensystemen können Probleme entstehen, insbesondere wenn die Mischungsverhältnisse, Verarbeitungstemperaturen oder Luftfeuchtigkeiten zu wenig genau beachtet werden. Die Verarbeitung dieser Systeme erfordert erhöhte Sachkenntnis.

Emissionen in den Außenraum

- enthalten keine Metallsikkative
- enthalten keine Konservierungsmittel
- können Weichmacher enthalten
- wasserverdünnbare Lacke enthalten verhältnismäßig selten gesundheitsgefährdende Hilfsstoffe im Bereich von 1 bis 2 %.
- Lösemittelhaltige Lacke enthalten in der Regel eine Reihe von gesundheitsgefährdenden Hilfsstoffen auf polymerer Basis im Bereich von 2 bis 3 %.

Umweltrelevante Bestandteile können durch Abwitterung, Versprödung, Diffusion oder bei der Renovierung (z.B. durch Schleifen) in die Umwelt gelangen. Zudem können alle buntpigmentierten Polyurethanharze, insbesondere die kräftig leuch-

tenden Pigmente, umweltrelevante Schwermetalle enthalten.

Aufgrund der Anwendungsvielfalt wird exemplarisch die Verarbeitung eines PUR- Spritzelastomer Beschichtung für Abdichtungen im Außenbereich näher betrachtet.

7 Flüssige Folienbeschichtung

7.1 Merkmale

Seit ca. 30 Jahren wird der Flüssigkunststoff als Schutzabdichtung von Stahlbetonbrücken verwendet. Diverse Hersteller bieten Systeme für eine Dachabdichtung auf vielen verschiedenen Untergründen, auch Holz- oder Holzwerkstoffen, an.

Eine bauaufsichtliche Zulassung im Außenbereich besteht zurzeit nur für die Verwendung als Dachabdichtung. Im Regelfall kann mit den vorhandenen Prüfzeugnissen eine Zulassung im Einzelfall für Fassaden erwirkt werden.

Dies eröffnet Planern die Möglichkeit, ein Bauwerk fugenlos in einer homogenen Materialoberfläche auszuführen. Die Beschichtung ist wurzelfest und geht einen festen Verbund mit der Unterlage ein. Eine Unterläufigkeit des Materialuntergrundes wird somit verhindert. Über einen Temperaturbereich von – 30 bis + 80 °C verhält sich die Beschichtung dauerelastisch. Das Beschichtungssystem ist wasserdampfdiffusionsoffen $\mu = 480$ (s_d = ca. 2 m).

Die Kosten für die reine Beschichtung (ohne Nebenkosten, Stand 2009) liegen zwischen 60 und 90 €/m². [3]

BASF entwickelt ein Beschichtungssystem, welches direkt auf die Außendämmung aufgebracht werden kann. Die Marktreife wird 2009 erwartet.

7.2 Verarbeitung

Eine werksseitige Beschichtung ist nur dann zu empfehlen, wenn Elementstöße mit sichtbar bleibenden Fugen eingeplant werden, da nachträgliches Anarbeiten an fertig beschichtete Oberflächen optisch wahrnehmbar ist.

Eine ansatzfreie Oberfläche ist nur durch einen bauseits ausgeführten Auftrag möglich. Hierbei bestehen klimatische Abhängigkeiten, welche bei der Ausführung berücksichtigt werden müssen:

- Luftfeuchtigkeit max. 70 %. Bei Regen nicht verarbeitbar. Ein feuchter Untergrund schränkt die Haftung ein.
- Holz bzw. Holzwerkstoffe sollten nur bis zu einer Feuchte von max. 12 % beschichtet werden.
- Die Lufttemperatur muss mind. 10°C betragen.

Auf eine sorgfältige Untergrundvorbehandlung sollte geachtet werden, da die Beschichtung nur bedingt egalisierend wirkt und sich selbst kleinere Unebenheiten an der fertigen Oberfläche abzeichnen können. Um eine ausreichende Haftung im Bereich von Kanten zu gewährleisten, sollte eine Fase bzw. Rundung von 3 bis 5 mm vorgesehen werden.

7.3 Systemaufbau

Haftgrund

Der erste Schichtauftrag besteht aus einem Haftgrund, welcher sich je nach Materialuntergrund unterscheiden kann. Grundsätzlich ist die Polyurethanbeschichtung (Dehnfähigkeit bis 400 %) rissüberbrückend. Bei Materialwechsel mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten muss jedoch ein Dehnungsband eingearbeitet werden, welches die Verformungen aufnehmen kann. Optisch kann sich dieses an der Oberfläche abzeichnen.

Folienbeschichtung

Die eigentliche Abdichtung erfolgt nach dem Haftgrund und wird ca. 2 bis 3 mm dick in einem Arbeitsgang maschinell aufgespritzt. Die Topfzeit beträgt lediglich 15 s. Die Haltbarkeit dieser Beschichtung übertrifft gem. Herstellerangaben, die von konventionellen Abdichtungsbahnen.

Versiegelung – UV Schutz

Wird die Beschichtung nicht abgedeckt und somit einer UV-Strahlung ausgesetzt, ist eine zusätzliche Versiegelung als UV-Schutz notwendig. Diese kann farblich pigmentiert werden und ist somit farbgebend. Auftrag in zwei Schichten. Glanzgrad Matt bis Seidenglänzend. Der UV-Schutz muss alle 10 Jahre erneuert werden. Hierzu wird die alte Beschichtung gereinigt, ein Haftvermittler aufgetragen und anschließend neu versiegelt [2], [3].

7.4 Beispiele

Haus Kaps, Saalfelden, Österreich, 2004

Abb. 4: Ansicht [4]

Anbau an ein historisches Bauernhaus. Der Baukörper ist aus Holzfertigteilen gefertigt. Die Fassade ist mit einem PUR-System beschichtet.

Haus 1, Penafiel, Portugal, 2005 -

Abb. 5: Ansicht [5]

Abb. 6: Dachaufsicht [5]

Abb. 7: Ansicht Rohbau [5]

Das aufgeständerte Wohnhaus besteht aus einer mit Holzwerkstoffplatten beplankten Stahlrahmen Leichtbaukonstruktion. Die OSB Platten sind direkt mit einem PUR-Spritzelastomer beschichtet.

Mensa der Hochschule Karlsruhe, 2006

Abb. 8: Außenansicht, Foto IfH

Abb. 9: Innenraum, Foto IfH

Die Konstruktion des Baukörpers besteht aus einem inneren Kern aus Stahlbeton, sowie im wesentlichen aus einer tragenden Holzverbundkonstruktion für Dach und Fassaden mit einer direkten Polyurethan Beschichtung.

Bauherr: Land Baden-Württemberg
Architekt: J. MAYER H., Berlin
Holzbau: Finnforest Merk GmbH, Aichach
Beschichtung: Reaku Hobein GmbH, Überlingen

Quellen

[1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Wecobis, Ökologisches Baustoffinformationssystem, www.wecobis.de
[2] BASF, Ludwigshafen, www.flooring.basf.de
[3] Reaku Hobein GmbH, Überlingen
[4] Caramel Architekten ZT GmbH, Wien, Bildrechte Architekt, www.caramel.at
[5] Claudio Vilarinho, Portugal

Abschnitt 2 bis 6 Auszüge aus [1], redaktionell ergänzt.

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Brückenbelag aus DuroBOARD

Arnold Wittig

1 Einleitung

Holz und die Verwendung von Holzwerkstoffen bekommen im Baubereich eine immer bedeutendere Rolle. Der ökologische Aspekt und die verbesserten Produktionsmöglichkeiten, verbunden mit Veredelungsprozessen, ermöglichen effiziente und leistungssteigernde Holzprodukte mit beinahe unbegrenzten Möglichkeiten.

So ist es inzwischen möglich, hochwertige in den Tropen gewachsene Harthölzer durch heimische Weichhölzer zu ersetzen. Der Vorteil liegt darin, dass die Nachfrage an „Tropenhölzern" reduziert wird. Gleichzeitig können die in ausreichender Menge vorkommenden Weichhölzer weiteren Anwendungen zugeführt werden. Ein zusätzlicher Aspekt ist die Steigerung der Lebensdauer von Holz.

War bisher noch die Meinung in der breiten Öffentlichkeit, dass Holz als Baustoff eher nicht geeignet ist, wächst die Akzeptanz für den Baustoff Holz und die Veredelungsprodukte. Holz wird durch Minimierung der natürlichen Holzfehler leistungsfähiger und durch verbesserte Oberflächentechniken dauerhafter. Diese Entwicklung steht erst am Anfang.

Abb. 1

2 Ausgangslage

DuroBoard wurde ursprünglich entwickelt, um die Herstellung von Betonprodukten zu verbessern.

Es zeichnet sich aus, durch

- schlagzähe und extrem verschleißfeste Polyurethanoberfläche
- konstruktiven Holzkern aus Weichholz
- durch Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Belastungen
- wasserfeste und ummantelnde Oberfläche, dadurch Schutz des Holzes gegen Feuchtigkeit.

Diese besonderen Eigenschaften sollen nun auch in anderen Bereichen, z.B. dem Holzbau, umgesetzt werden.

3 Zielsetzung

Ziel ist es, die Technik des Herstellungsprozesses und den dadurch entstehenden Verbundwerkstoff für den Holzbau nutzbar zu machen. Gesucht werden hierbei Bereiche, die durch mechanische oder witterungsbedingte Beanspruchungen bisher eher kritisch für die Verwendung von Holz sind.

Erste Versuche, bei denen die Eigenschaften von DuroBoard bestens zum Tragen kommen, sind Bohlen für Rad- und Fußgängerbrücken.

Terrassen- und Balkonbeläge, Stege, Stützwände, Brüstungen, Verkleidungen, Fassaden und Holz im Garten gehören zum Anwendungsbereich.

Abb. 2

4 Produktbeschreibung DuroBOARD Brückenbeläge

Das Prinzip dieser Entwicklung ist die Symbiose aus formstabilen, biege- und verwindungssteifen FSH-Kern (Furnierschichtholz) und einer verschleißresistenten Ummantelung aus Polyurethan, das in einem geschlossenen automatischen Herstellungsprozess gefertigt wird.

Die Lebensdauer des dieser Bauteile wird dadurch erheblich verlängert, sowohl gegen mechanische als auch witterungsbedingte Einflüsse.

Die Entwicklung des DuroBOARDs ist das Ergebnis der Zusammenarbeit von Spezialisten der Polyurethan Kunststofftechnik, der Betonwarenherstellung, der Kunststoffanlagentechnik sowie der Holzverarbeitung. Im Technikum der BAYER MaterialScienence AG, Leverkusen wurden umfangreiche Tests durchgeführt.

Dieses Know-how begleitet auch die Produktion von DuroBOARD von Assyx Engineered Boards. Die vorgefertigten FSH-Kerne werden vor der Weiterverarbeitung im Rahmen einer permanenten Qualitätskontrolle auf Biegesteifigkeit und Abmessungen, unter Einhaltung geringster Toleranzen, überprüft. Das zur Ummantelung eingesetzte Polyurethan unterliegt den Qualitätskontrollen der BAYER MaterialScience AG.

Zurzeit können neben dem eigentlichen DuroBOARD-Bohlen mit Längen von 0,40 bis 1,80 m und einer Breite von 0,40 bis 1,40 m hergestellt werden. Das Trägermaterial besteht aus einem Holzkern mit Dicken von 40 mm, 45 mm, 50 mm, 55 mm und 60 mm. Der Polyurethanmantel ist pro Seite 3 mm dick.

Durch den vollautomatischen und geschlossenen Herstellungsprozess ist garantiert, dass die Schichtdicke der Ummantelung genau eingehalten wird und die Umweltfreundlichkeit gewährleistet ist. Durch Farbpigment-Beimischung lassen sich alle Farbwünsche erfüllen.

Abb. 3

Abb. 4

Ein weiterer Vorteil ist die Bearbeitung der Oberfläche. Durch Fräsen können in der Oberfläche der Furnierschichtstreifen vor der Ummantelung Profile eingearbeitet werden, die z.B. eine Rutschsicherheit bei Belägen sicherstellt. Ebenso ist es möglich, durch die Herstellung im geschlossenen Kammersystem, die Oberfläche ganz frei zu gestalten.

Durch die genau vorgefertigten Bohlen ist ein Rundumschutz des Holzes gewährleistet. Die Befestigung erfolgt von unten. Nachgearbeitete Stellen können mit einem Reparatur Kit nachgebessert werden. Ebenso ist angedacht, spezielle Verbindungsmittel für die Befestigung zu entwickeln. Derzeit kann aber auch mit Schrauben in Verbindung mit Dichtbeilagscheiben gearbeitet werden. Ansonsten erfolgt die Montage wie bei Vollholzbohlen oder Dielen.

Ein weiterer Vorteil ist die Dimensionsstabilität, ein Drehen oder Verwinden oder Reißen der Bohlen ist nahezu ausgeschlossen. Ebenso werden die Quell- und Schwindeigenschaften des Holzes minimiert.

Der Werkstoff ist wie Furnierschichtholz zu berechnen.

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Nanobeschichtungen

1 Allgemeines

Beschichtungen von Holzaußenbauteilen und von wetterbeanspruchten Holzprodukten sind für die Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus auch im 21. Jahrhundert von großer Bedeutung. Sie bilden eine Teilkomponente im System des umfassenden Holzschutzkonzeptes.

Unter einer Oberflächenbehandlung versteht man Verfahren, bei denen die Beschichtungsstoffe in flüssiger Form durch Streichen, Fluten, Kurztauchen oder Spritzen auf die Holzoberfläche aufgebracht werden.

Die Aufgabe von Beschichtungen für Holz im Außenbereich ist die Erfüllung bestimmter Schutzfunktionen, die jeweils oder in Kombination von den Produkten erfüllt werden. Schutzfunktionen sind im Einzelnen der Licht- oder UV-Schutz, der Feuchteschutz und Schutz gegen oberflächenverfärbende Pilze und Algen. Zudem erfüllen Beschichtungen oft eine gestalterische Funktion, welche meistens mit einer Schutzfunktion in Verbindung steht.

Die Aufnahme von flüssigem Wasser ins Holz soll durch den Einsatz hydrophobierender Substanzen bei der Oberflächenbehandlung reduziert oder vermieden werden. Herkömmliche Substanzen zur Hydrophobierung von Holzoberflächen basieren auf Paraffin, Wachsen oder Ölen. Hydrophobierungen der jüngeren Generation basieren in den meisten Fällen auf Siliziumverbindungen und besitzen aufgrund der Fortschritte in der Nanotechnologie ein großes Entwicklungspotential. Werden die Siliziumverbindungen mittels Imprägnierverfahren ins Holz eingebracht, so handelt es sich nicht mehr um eine Oberflächenbehandlung sondern um eine Modifikation, bei der die Siliziumverbindungen über den ganzen Querschnitt des Holzes verteilt sind.

Die Nanotechnologie ist ein aktuelles Forschungsgebiet, dem ein großes Potenzial für technische Entwicklungen beigemessen wird und aus dem bereits eine Vielzahl von neuen Anwendungen hervorgegangen ist. Sie wird als die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet und man geht davon aus, dass sie unser Leben nachhaltig verändern wird. Es gibt kaum ein Gebiet, das sich nicht durch nanotechnologische Methoden nachhaltig verändert werden wird. Ob Materialwissenschaften, Informationstechnologie, Biomedizin oder Umwelttechnologien. Aber nicht nur die Entwicklungen besitzen großes Potenzial, sondern auch das Weltmarktvolumen, das heute, durch mit Nanotechnologie beeinflusste Produkte, 100 Mrd. Euro beträgt. In den nächsten fünf bis zehn Jahren wird mit einer Verzehnfachung dieses Wertes gerechnet [5]. Seit ca. 20 Jahren wird die Nanotechnologie in der ganzen Welt erforscht. Deutschland nimmt dabei eine führende Rolle ein. Die Entwicklung der Technologie geht mit dem Vorstoß in bisher unsichtbare Welten einher. Erst durch die Entwicklung des Rasterelektronenmikroskops 1981, mit dem Auflösungen bis ca. 0,01 nm möglich sind, war die Arbeit mit Nanopartikeln möglich.

Bei der Nanotechnologie unterscheidet man drei Bereiche. Die inkrementelle Nanotechnologie will die Eigenschaften von Werkstoffen verbessern, wie z.B. bei Oberflächenbeschichtungen. Die evolutionäre Nanotechnologie versucht existierende Technologien, wie Mikroprozessoren auf Nanoformat zu verkleinern und die radikale Nanotechnologie erschafft neuartige Nanoroboter.

Die Nanotechnologie beschäftigt sich mit einer faszinierenden Welt mit unvorstellbar kleinen Strukturen. Die Vorsilbe Nano kommt aus dem Griechischen und bedeutet Zwerg. Sie bezeichnet den Milliardstel Teil einer Einheit. So zum Beispiel innerhalb des metrischen Systems als ein Milli-

ardstel von einem Meter. Ein Nanometer entspricht somit 10^{-9} Meter.

Der Begriff Nanotechnologie definiert sich nur über die Größe der Strukturen oder Partikel, die zur Anwendung kommen. So lange die Partikel im Einzelnen oder Strukturen nicht größer als 100 Nanometer sind, darf von Nanotechnologie gesprochen werden. Der Durchmesser eines Nanopartikels zu einem Fußball verhält sich etwa so wie der Durchmesser des Fußballs zur Erdkugel.

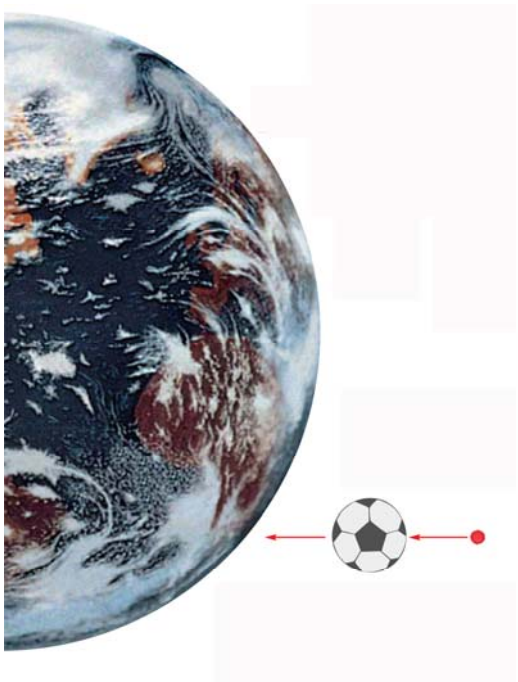


Abb. 1: Größenvergleich [7]

Die Manipulation der Materie auf molekularer Ebene eröffnet die Möglichkeit auf Materialien mit völlig neuen, maßgeschneiderten Eigenschaften. Dies basiert auf der Tatsache, dass das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen bei diesen Partikeln besonders groß ist. Die daraus resultierende hohe Reaktivität bietet die Möglichkeit, Werkstoffe spezifischer auf den jeweiligen Verwendungszweck auszurichten, was häufig durch die Entwicklung neuartiger Beschichtungen gelingt. Die Anforderungen an die jeweilige Struktur ist dabei abhängig von den erforderlichen Nutz- und Schutzfunktionen von Oberflächen. Die Grundlagen für die Herstellung und Manipulation (Anordnung einzelner Atome) von Strukturen im Nanometerbereich lieferten einerseits immer präziser werdende Fertigungsmethoden, die in immer kleinere Maßstäbe vordringen und andererseits chemische Technologien zur Funktionalisierung von Molekülen und Ausbildung von organisierten Schichten und Strukturen.

Die Natur dient als Vorbild dieser technischen Entwicklung. Bei Tieren und Pflanzen sind bestimmte Funktionalitäten auf perfekt ausgebildete Feinstrukturen zurückzuführen. Ein sehr bekanntes Vorbild ist das Blatt der Lotuspflanze, bei dem aufgrund einer feinen Mikrostruktur in Verbindung mit eingelagerten Wachskristallen eine stark Wasser abweisende Wirkung erzielt wird.

Bei Nanobeschichtungen zum Schutz für bewitterte Holzoberflächen handelt es sich um eine Oberflächenbehandlung. Sie darf nicht mit der Modifikation von Vollholz mit siliziumhaltigen Verbindungen verwechselt werden. Obwohl Ausgangsstoffe und Wirkprinzip ähnlich sind, handelt es sich bei der Modifikation um eine Behandlung über den ganzen Querschnitt, bei der nicht nur die äußeren, sondern auch die inneren Holzoberflächen behandelt werden. Nanobeschichtungen für Holzoberflächen sind in den letzten Jahren verstärkt am Markt aufgetreten. In der Vermarktung werden die Produkte im Vergleich zu üblichen Beschichtungen mit Lacken und Lasuren meist als Alternative mit vielen Vorteilen dargestellt. Bisher können aber noch nicht alle Möglichkeiten für den Werkstoff Holz umgesetzt werden. Ein viel versprechendes Entwicklungspotential liegt vor allem in der Kombination von Nano-Teilchen mit der klassischen Lacktechnologie. Es kommt darauf an, welche Schutzfunktionen durch die Nanotechnologie erfüllt werden

sollen und können, und wo die Grenzen dieser Produkte liegen. Schutzfunktionen sind der Feuchteschutz, also die Hydrophobierung, der Lichtschutz (Verhinderung von Vergrauung), die Herstellung einer selbstreinigenden Oberfläche oder die biozide Ausrüstung.

Mit der Nanotechnologie bestehen viele Möglichkeiten, mit denen verschiedene Effekte und Schutzfunktionen erzielt werden können. Das Entwicklungspotential ist sehr groß und Forschungsaktivitäten lassen weitere Fortschritte in den nächsten Jahren erwarten. Großer Forschungsbedarf besteht auch noch über mögliche Gefahren die von Nanopartikeln auf Mensch und Umwelt ausgehen. Daher wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung zusammen mit der Industrie das Projekt NanoCare ins Leben gerufen.

2 Planung

Nanobeschichtungen haben hauptsächlich das Ziel, Holz gegen Witterungseinflüsse widerstandsfähig zu machen. Dabei gibt es unterschiedliche Schutzfunktionen die zu erfüllen sind und vom eingesetzten Stoff abhängig sind. Bei der Formulierung von Beschichtungen dürfen die zu erfüllenden Aufgaben wie z. B. Licht- und Feuchteschutz nicht getrennt voneinander betrachtet werden, sondern vereint in einem Gesamtsystem.

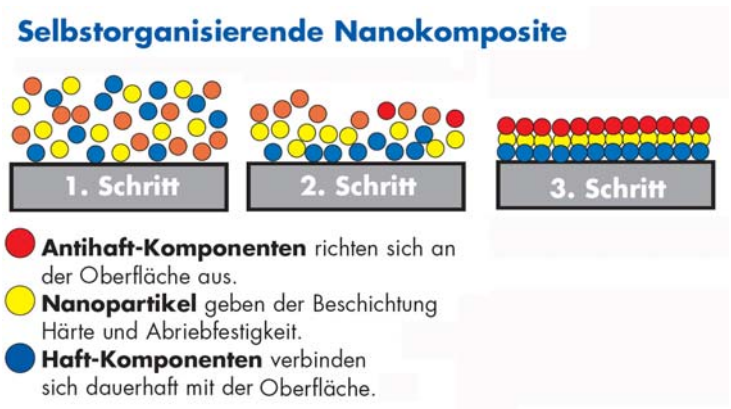


Abb. 2: Selbstorientierung auf der Oberfläche [7]

3 Schutzfunktionen, die bereits möglich sind

3.1 Feuchteschutz

Für die Hydrophobierung von Holz werden so genannte Nanosole eingesetzt. Diese basieren auf der Sol-Gel-Technologie. Dabei sind die Siliziumdioxid-Nanosole in einer (ethanoloischen) Lösung in unterschiedlicher Konzentration versehen. Das Lösungsmittel verdampft, dabei bildet das nanodisperse Siliziumdioxid ein Gel, das sich im weiteren Verlauf vernetzt und zur Mineralisierung führt. Diese Technik wird auch zur Modifikation von Holz angewandt. Dabei wird das Holz aber über den ganzen Querschnitt behandelt und nicht nur die Oberfläche. Organofunktionelle Silane oder Siloxane sind Bausteine aus Siliziumverbindungen, die mit bestimmten funktionellen Gruppen versehen werden, durch welche die Eigenschaften gezielt eingestellt werden können. Dadurch können so genannte bifunktionelle Moleküle erzeugt werden, die mit hydrophoben oder hydrophilen Endgruppen zur Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften auf der einen Seite und Gruppen zur Anbindung auf der anderen Seite ausgestattet sind. Auf der Holzoberfläche kommt es zu einer Selbstorientierung und Vernetzung dieser Moleküle. Diesen Vorgang nennt man auch Nanoformieren. Die bindenden Komponenten wandern zur Materialoberfläche, die Antihaft-Komponenten richten sich zur Luft hin aus. Bei dieser Selbstorganisation entsteht eine ultradünne, glasartige Schicht, die sich mit dem Untergrund homogen verbindet und so einen extrem dauerhaften Schutzfilm bildet. Die Oberflächen bleiben dabei atmungsaktiv. Schmutz und Wasser findet nahezu keinen Halt mehr und perlt einfach ab. Auf horizontalen Flächen können die nach Regen sich bildenden Wassertropfen mitunter lange auf dem Holz stehen bleiben und bei intensiver Sonneneinstrahlung wie Brenngläser wirken, so dass Fleckenbildungen möglich sind.

Die angebotenen Produkte werden häufig durch streichen oder sprühen aufgebracht. Durch den

Auftrag von sehr dünnen Schichten erreicht man ein Abperlen von Wassertropfen, was auch auf Hirnholzflächen und Rissen funktioniert. Dadurch wird ein Feuchteeintritt ins Holz verhindert, ohne dass die Wasserdampfdurchlässigkeit der Oberfläche verhindert wird. Dies führt zu einer geringeren Rissbildung und Erosion. Da hydrophobierende Nanobeschichtungen in der Regel keinen Lichtschutz aufweisen wird eine Vergrauung nicht verhindert. Deshalb zeigen sie auf bewitterten Holzoberflächen nur eine bedingte Funktion, da die Abwitterungsprozesse des Holzes nur relativ kurze Zeit verzögert werden. Um dies zu verhindern ist eine Kombination mit klassischen Holzbeschichtungen oder mit nanoskaligen Lichtschutz-Pigmenten möglich.

Untersuchungen ergaben, dass die Wasseraufnahme von mit Nanospray behandeltem Holz bei Wasserlagerung und Beregnung gegenüber unbeschichtetem Holz reduziert war. Bessere Ergebnisse wurden mit einer Dünnschichtlasur erreicht, die Bindemittel enthielt. Gute Ergebnisse werden durch eine Kombination von Lasur und nanoskaligen Produkten erzielt [4].

3.2 Lichtschutz

Der Lichtschutz ist eine der wesentlichen Aufgaben einer Oberflächenbeschichtung. Dieser wird traditionell durch die Zugabe von Pigmenten erzielt, deren Partikelgrößen und Farbgebung jedoch die Transparenz der Beschichtungen beeinträchtigt. Bei lasierenden Beschichtungen auf Holzoberflächen wird aber oft eine hohe Transparenz gewünscht. Daher bieten sich für den Lichtschutz nanoskalische anorganische Pigmente wie Titandioxid (TiO_2), Zinkoxid (ZnO) oder Eisenoxid (FeO) an. Diese werden schon lange für den Lichtschutz in Sonnencremes eingesetzt. Sie weisen so kleine Partikel auf, dass das Licht nicht mehr gestreut wird und sie ihre Eigenfarbe verlieren. Dadurch lassen sich farblose Beschichtungen herstellen, mit denen die natürliche Farbe des Holzes erhalten bleibt. Die nanoskaligen transparenten Pigmente sind im Beschichtungsfilm feinst verteilt und absorbieren sehr gut den UV-Anteil des Sonnenlichtes. Damit bieten sie einen guten Lichtschutz für das Holz. Als weitere Additive enthalten die Beschichtungen organische UV-Absorber und HALS (Hindered Amine Light Stabilizer). Dadurch wird nicht nur das Holz, sondern auch das Bindemittel des Lacks vor UV-Licht geschützt und eine Versprödung verhindert. Die Dauerhaftigkeit von farblosen Beschichtungen kann so deutlich verbessert werden. Entscheidendes Kriterium dafür ist die richtige Abstimmung der Lichtschutzadditive im Beschichtungssystem, bestehend aus Grundierung und Deckbeschichtung. Die Schichtdicke der Deckbeschichtung spielt für die Wirksamkeit der transparenten Pigmente eine Rolle. Je höher die Schichtdicke umso besser ist die UV-Absorption. Nanoskalige anorganische Pigmente können mitunter den Beschichtungsfilm etwas milchig erscheinen lassen.

Abb. 3: Verbesserter UV-Schutz durch Titandioxidbeschichtung [2]

Für farbgebende Oberflächenbehandlungen können auch feinverteilte, dünnplattige und mit Silikaten beschichtete Aluminiumplättchen eingesetzt werden. Die reaktiven Aluminiumplättchen bilden eine dem Schieferdach ähnliche Anord-

nung. Dadurch wird eine hohe Lichtreflexion erzielt, die den Abbau der unteren Bindemittelschichten und gleichzeitig das Auftreffen von UV-Strahlen auf dem Holzuntergrund verhindert.

4 Schutzfunktionen die noch nicht möglich sind

4.1 Selbstreinigende Oberflächen

Die wohl bekannteste Funktion der Nanotechnologie ist die selbstreinigende Oberfläche, wie sie das Vorbild aus der Natur, das Blatt der Lotuspflanze aufweist. Dieses erzielt aufgrund einer feinen Mikrostruktur in Verbindung mit eingelagerten Wachskristallen eine stark Wasser abweisende Wirkung. Gleichzeitig können Verschmutzungen nicht an der Oberfläche anhaften und die Schmutzpartikel werden vom Regenwasser leicht abgewaschen.

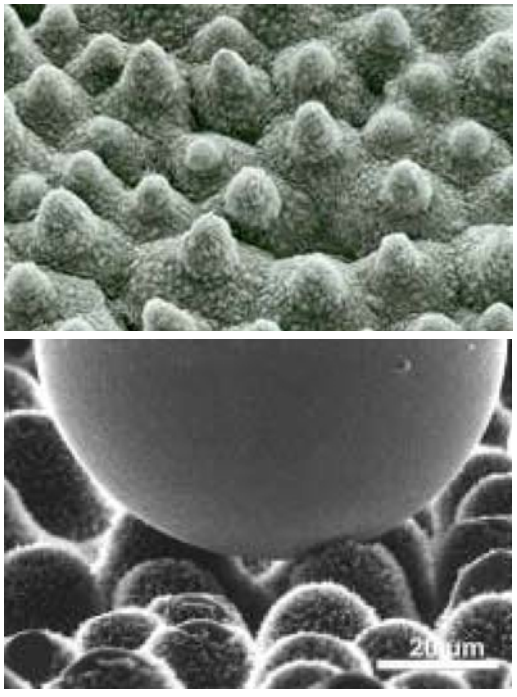


Abb. 4: Oberfläche des Lotusblattes (oben), Schmutzpartikel auf Lotusblatt (unten) [2]

Ein Selbstreinigungseffekt kann auch über die Anwendung von photokatalytisch aktivem Titandioxid erzeugt werden. Durch Sonnenlichteinstrahlung bilden die Pigmente aus organischen Substanzen an ihrer Oberfläche Radikale. Dadurch lassen sich zwei Effekte erzielen. Zum Einen werden Verunreinigungen auf der Oberfläche angelöst, zum Anderen besteht die Möglichkeit Schadstoffe in der Luft abzubauen. Bei Glas und Dachziegeln wird dieser Effekt bereits genutzt. Verunreinigungen können sich nicht festsetzen und werden durch Regen weggespült. Die Reinigung der Luft ist vor allem für Innenwandfarben und Tapeten interessant. Entsprechende Produkte sind bereits erhältlich und können auch Schadstoffe wie Formaldehyd abbauen. Die Beschichtung von Katalysatoren mit Titandioxid wird in der Großindustrie zur Reinigung von Abgasen eingesetzt.

Für Holz sind noch keine marktreifen Produkte bekannt. Dies liegt daran, dass, aufgrund der porösen Struktur der Holzoberfläche keine Oberflächenstruktur wie am Lotusblatt erzeugt werden kann. Bei einer Verwendung von Titandioxid auf Holzoberflächen, wie es als Lichtschutz verwendet wird, muss es mit einer dünnen Beschichtung, wie z.B. Siliziumdioxid, überzogen werden. Dadurch wird die photokatalytische Aktivität unterbunden. Ansonsten würden die gebildeten Radikale das Bindemittel des Lackes zerstören. Eine Hydrophobierung mit Nanosolen ist zwar möglich, damit wird aber kein Selbstreinigungseffekt erzielt.

4.2 Biozide Ausrüstung

Um den Bewuchs mit Schimmel, Bläuepilzen und Algen, der zu Verfärbungen und zum Abbau von Beschichtungsfilmen beiträgt zu vermeiden ist die biozide Ausrüstung ein wichtiger Bestandteil von Beschichtungen auf bewitterten Holzoberflächen. Dazu werden in anderen Bereichen bereits nanoskalige Silberpartikel verwendet. Unter Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff bilden sich Silberionen, durch welche das Wachstum von

Bakterien und Pilzen gehemmt wird. Silber ist für den Menschen nicht toxisch. Der Vorteil ist, dass sich genau dann Silberionen bilden, nämlich bei Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff, wenn auch das Wachstum von Mikroorganismen möglich ist. Diese Anwendung wird bereits im Bereich von antibakteriellen Beschichtungen im Gesundheitswesen und als Schutz der Innenwände von Kühlschränken vor Schimmel angewendet. Für Holzoberflächen existieren noch keine Produkte auf dem Markt. In einem Forschungsprojekt wurde die Entwicklung von Nanosolen auf Basis von Siliziumdioxid für den Holzschutz untersucht um neuartige, umweltfreundliche Beschichtungslösungen zu erhalten, die einen effektiven antimikrobiellen Schutz von Holz gewährleisten. Die Beschichtungslösungen sind auch für Textilien geeignet. Neben Silber ist die Beimischung von Chitosan oder Borsäure in immobilisierter Form möglich. Eine Anwendung für den Außeneinsatz in Gefährdungsklasse 3 ist dem Bericht der GMBU (Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e.V.) zufolge aber bislang nur mit borsäurehaltigen Siliziumdioxid-Nanosolen mit einer Borsäurekonzentration > 2% und Vakuumdruckimprägnierung möglich. Für den Bläueschutz des Holzes ergeben sich für silberhaltige Siliziumdioxid-Beschichtungen vorteilhafte Anwendungsmöglichkeiten.

5 Ökologie

Die Nanotechnologie ist auch mit Risiken verbunden, welche zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht alle absehbar sind. Daher besteht noch großer Forschungsbedarf über mögliche Gefahren die von Nanopartikeln auf Mensch und Umwelt ausgehen.

Bisher geht man davon aus, dass vor allem bei freien Nanopartikeln Risiken lauern. Noch gibt es keine Hinweise, dass eine orale Aufnahme oder Hautkontakt Gesundheitsschäden hervorrufen. Freie Nanopartikel können, wenn sie eingeatmet werden, bis tief in die Lunge und von dort in den Blutkreislauf eindringen. Welche Auswirkungen sie dort auf das Immunsystem auslösen ist noch nicht ausreichend erforscht. Wobei nicht alle Nanopartikel gleich toxisch sind. Daher muss jede Art von Nanopartikel separat untersucht werden. Nanostaub birgt zunächst einmal die gleichen Risiken wie auch anderer ultrafeiner Staub. Hohe Konzentrationen können die Lungenbläschen verstopfen und zum Ersticken führen. Daher sind vor allem bei der Verarbeitung die angegebenen Sicherheitshinweise zu beachten. Im eingebauten Zustand sind die Nanokomponenten fest in andere Materialien eingebunden und daher zunächst von der Umwelt isoliert. Da es jedoch noch keine Konzepte für Entsorgung und Recycling gibt, könnten viele der Materialien am Ende ihrer Lebensdauer in die Umwelt gelangen, denn niemand weiß genau was geschieht, wenn nanobeschichtetes Holz zerkleinert wird.

Arbeitssicherheitsvorschriften und Produktsicherheitsregelungen für die Feinstaubbelastung oder für Aerosole gelten für Nanopartikel genauso wie für herkömmliche Stoffe. Die Nanotechnologie baut aber darauf auf, dass Materialien in Nanostrukturen ganz spezifische neue Eigenschaften aufweisen können. Daher müssen die wissenschaftlichen Grundlagen für die Entscheidung verbreitert werden, ob weitere Regelungen erforderlich sind oder nicht. Das Projekt NanoCare des Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Industrie beschäftigt sich mit den Auswirkungen von Nanopartikeln auf Mensch und Umwelt. Es soll Wissenslücken schließen und Maßnahmen zur Risikoerkennung und –minimierung einleiten. Das Ergebnis sollen neue Methoden zur frühzeitigen Bewertung der Auswirkungen von Nanomaterialien auf Gesundheit und Umwelt sein. Das European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals hat zehn toxikologische Tests zusammengestellt, nach denen künftig Nanopartikel untersucht werden sollen.

Quellen

[1] Artikel über die Swiss NanoConvention 2007
[2] Beschichtungen mit funktionellen Eigenschaften durch Nanotechnologie, Technische Informationsstelle des deutschen Maler- und Lackiererhandwerks, 2005
[3] Blondeau, M.: Nanotechnologie: Fluch und Segen aus der Welt des Unsichtbaren, Wohnung + Gesundheit 12/06, Seite 40 – 41
[4] Grüll, G.: Bringt die Nanotechnologie das Wundermittel für Holzoberflächen?, 25. Holzschutz-Tagung der DGFH, Biberach/ Riß, 2007
[5] NanoCare – verantwortungsvoller Umgang mit der Nanotechnologie, Bundesministerium für Bildung und Forschung
[6] Nanomaterialien – kleine Dimensionen, große Effekte, Bundesministerium für Bildung und Forschung
[7] Nanotechnologie jetzt auch für Zuhause, Optidee Produktions- und Handels GmbH
[8] Richter, K.: Oberflächenbehandlung wetterbeanspruchter Holzbauteile, EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf
[9] Übersicht Forschungsprojekt Antimikrobielle Nanosol-Beschichtungen zum Schutz von Holz und Textilen, GMBU - Gesellschaft zur Förderung von Medizin,- Bio- und Umwelttechnologien e. V., Innovationskatalog 2006

Linkliste

www.nanopartikel.info
Internetseite des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zum BMBF-Projekt NanoCare – Verantwortungsvoller Umgang mit der Nanotechnologie

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Strahlengehärtete Lacke

1 Allgemeines

Die Strahlenhärtung gilt als eine sehr umweltverträgliche Beschichtungstechnologie. Der geringe Energiebedarf für die Lackhärtung, die praktisch ohne VOC (flüchtige organische Bestandteile) Emissionen erfolgt, sichert ihr hier einen erstrangigen Platz. Die beschichteten Teile sind sofort trocken, können ohne Pause verpackt oder weiterverarbeitet werden. Damit entfallen die bei der Nass- und Pulverlackierung erforderlichen energieaufwendigen Trocknungs- oder Einbrennanlagen mit ihrer z.T. komplexen Frisch- und Abluftaufbereitung.

Bereits in den 60er Jahren wurde diese Art der Beschichtung von Ford in Detroit bei Armaturentafeln eingesetzt.

2 Härtungsverfahren

Treffen energiereiche UV- bzw. Elektronenstrahlen auf ein reaktives Harz, dessen Bestandteile über eine genügende Anzahl von polymerisierbaren Doppelbindungen verfügen, so kann durch Energieübertragung eine Vernetzung zwischen den Mono- bzw. Oligomeren des Harzes und damit ein Übergang vom flüssigen zum festen Aggregatzustand ausgelöst werden.

Man unterscheidet zwischen der Elektronenstrahl-Härtung (ESH), bei der die Polymerisation des Lackharzes ohne Zusatz weiterer Hilfsmittel direkt durch energiereiche Elektronen ausgelöst wird und der UV-Härtung (UVH), die – wenn auch in geringen Mengen – Photoinitiatoren als Startersubstanzen für die Polymerisation benötigt.

Da der apparative und sicherheitstechnische Aufwand bei der ESH nicht ganz unbeträchtlich ist, blieb bisher der Einsatz auf Spezialgebiete beschränkt.

Während bei der Elektronenstrahlhärtung die Eindringtiefe ausschließlich von der Beschleunigungsspannung des Strahlers einerseits und der Masse der zu vernetzenden Schicht andererseits abhängt, hängt die Eindringtiefe der UV-Strahlen entscheidend von der Absorption – also der Durchsichtigkeit im UV-Bereich – ab. Mit ersteren können vorzugsweise dicke und pigmentierte Schichten gehärtet werden (z.B. bei der Lackierung von Türen). Letztere werden besonders zur Härtung dünner und / oder nicht pigmentierter Schichten eingesetzt. (z.B. bei Druckfarben, CD-Schutzbeschichtungen, etc.).

Die Zahl und Art der mittels Strahlenpolymerisation hergestellten Produkte ist außerordentlich groß und vielfältig: Getränkedosen, Möbelfronten, flexible Verpackungen, selbstklebende Etiketten, elektronische Geräte wie z.B. Handys, Zahnfüllungen, Golfbälle, Parkett, Gebäudefassaden, Tunnelauskleidungen etc.

Die stärksten Triebkräfte für die stetige Ausbreitung beider Technologien sind dabei einmal der sparsame Energieverbrauch beim Härten im Vergleich zum konventionellen Trocknen. Eine Studie des RWE von 1994 ergab ein Verhältnis im Energieverbrauch von 1 : 3 : 10 zwischen ES-, UV-Härtung und thermischer Trocknung. Zum anderen erweist sich bei dem immer stärker werdenden Verantwortungsgefühl zur Schonung der Umwelt die Tatsache, dass durch Strahlenhärtung eine flüssige organische Beschichtung ohne jegliche Emissionen von VOCs in eine feste Schicht – und das oft im Zeitraum von Sekunden – umgewandelt werden kann, als der entscheidende ökologische Vorteil gegenüber anderen Verfahren. Diesen Vorteil besitzt nur noch die Pulverbeschichtung, bei der jedoch die Substraterwärmung thermische Energie verbraucht; die Strahlenhärtung ist dagegen ein kalter Prozess.

Ideal einsetzbar ist die Strahlenhärtung für flächenhafte Teile und Bahnenware. (Dreidimensionale, tief gestaffelte Strukturen sind allerdings wegen der kurzen Strahlungsreichweite weniger leicht zugänglich). Stand der Technik ist sie in der Holz- bzw. Möbelindustrie, bei der Beschichtung von Papier und Pappe, bei Folien und Fußbodenbelägen. Ihr Einsatz für die Lederveredelung wird diskutiert. Auch CDs tragen meist eine strahlengehärtete Lackschicht zum Schutz der Tonträger-Prägung. [1]

3 Strahlenhärtende Lackharze auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen (Leinöl)

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhaben, wurde der heute von der Firma Dreisol Coatings GmbH & Co. KG angebotene Lack SUNCOAT® entwickelt. Hauptbestandteil des lösemittelfreien Schutz- und Dekorlacks für Holzoberflächen ist heimisches Leinöl. Das Öl ist gesundheitlich völlig unbedenklich und kann in modifizierter Form durch UV-Strahlung sekundenschnell gehärtet werden. Der Leinöl-Lack hat im Vergleich zu Lacken mit UV-Bindemitteln auf petrochemischer Basis zahlreiche ökologische und ökonomische Vorteile:

- Die Herstellung des Bindemittels ist sehr Energie sparend. Es wird nur 10 % der für petrochemisch basierte Bindemittel benötigten Energie verbraucht.
- Die Produktion ist Ressourcen schonend, denn der Lack besteht zu 95 % aus nachwachsenden Rohstoffen.
- Frei von Lösemitteln und allergieauslösenden Monomeren.
- Der Lack ist weitgehend biologisch abbaubar und unproblematisch bei der Entsorgung durch Kompostierung, Recycling oder Verbrennung.
- Der Lack ist preislich konkurrenzfähig

Nicht nur für Holz und Holzwerkstoffe wie Parkette, Möbel, Decken- und Wandpaneele lassen sich glänzende, seidenglänzende und matte Filme mit einer ansprechenden Optik, guter Haftung, mechanischer Belastbarkeit und Chemikalienresistenz erzeugen. Der Lack kann ebenfalls für die Lackierung von Fußbodenbelägen aus Kork und Linoleum, sowie für Papier, Pappe und Leder verwendet werden. [2]

Leinöl als Vorprodukt des Leinölepoxids wird zwar in Deutschland angebaut. Trotzdem ist Deutschland ein Leinöl-Importland. Dies zu ändern, wäre in erster Linie Aufgabe der Agrarpolitik, die hier die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen hätte. Die ökologischen und volkswirtschaftlichen Vorteile des neuen Lackbindemittels Leinölepoxid gegenüber seinen konkurrierenden petrochemischen Produkten sind eindrucksvoll und überzeugend. [1]

Quellen

[1] Strahlenpolymerisierbare lösemittelfreie Schutz- und Dekorationsbeschichtungen auf Basis heimisch nachwachsender Rohstoffe, Abschlussbericht 1999, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, An der Bornau 2, 49090 Osnabrück, www.dbu.de

[2] Lösemittelfreie Holzbeschichtung auf Leinölbasis, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, An der Bornau 2, 49090 Osnabrück, www.dbu.de

[3] Dreisol Coatings GmbH & Co. KG, Industriestr. 4, 32361 Preußisch Oldendorf, www.dreisol.de

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
UV-Lichtstabilisierung

Chantal Donders, Karoly Donders

1 UV-Schutz im Außenbereich

Holz als Bausubstanz ist vielen Umwelteinflüssen ausgesetzt und sollte daher mit baulichen, d.h. konstruktiven Maßnahmen, sowie gezielt mit geeigneten Produkten geschützt und veredelt werden. Die Abbaumechanismen für Holz im Aussenbereich sind:

- Wassereinwirkung
- Sonneneinstrahlung (UV-Licht)
- Mechanische Belastung (z.B. Hagel)
- Thermische Belastung
- Biologische Belastung (Pilze & Insekten)
- Chemische Belastung

Das Sonnenlicht löst in der exponierten Holzoberfläche fotochemische Abbauprozesse aus. Dabei wird insbesondere das „Lignin", ein stark vernetztes, aromatisches Polymer, welches als Festigungselement im Holz dient, abgebaut. Die dabei entstehenden Abbauprodukte sind vorwiegend wasserlöslich und können daher „ausgewaschen" werden. Dadurch verliert das Holz an der Oberfläche seine Festigkeit und die Haftung des darauf befindlichen Beschichtungssystems wird erheblich gestört. Bei Betrachtung dieses Vorgangs fällt auf, dass erst das Zusammenspiel mehrerer Einflüsse zu den bekannten Schadensbildern, wie z.B. Wasserringe, Bläuebefall, Vergrauung und Rissbildung führt. Das Wasser kann die Ligninbestandteile nur deshalb aus der Holzstruktur lösen, weil zuvor die UV-Strahlung das Lignin fotochemisch verändert hat.

Daher müssen Lösungen und Systeme angestrebt werden, welche der primären Ursache, wie z.B. UV-Strahlung, entgegenwirken, aber auch für weitere Einwirkungen gerüstet sind. Allgemein ist die UV-Schutzwirkung stark abhängig von der Opazität, d.h. dem Grad der Pigmentierung von Beschichtungen. Grundsätzlich verfügen farblose und lasierende Systeme über eine geringere UV-Schutzwirkung als deckende Anstriche und müssen daher speziell mit UV-Schutz ausgerüstet werden.

2 UV-Absorber & HALS

Grundsätzlich stehen für die Lacktechnik organische und anorganische Lichtschutzmittel für die Verbesserung bestehender Lacksysteme zur Verfügung. Organische UV-Absorber werden mit der Zeit abgebaut und können daher nur einen begrenzten Langzeitschutz bieten, anorganische UV-Absorber hingegen weisen eine hohe Langzeitbeständigkeit auf.

Ein optimal formuliertes System besitzt sowohl UV-Absorber wie auch passende HALS (Hindered Amine Light Stabilizers). UV-Absorber sind Substanzen welche die UV-Energie absorbieren und dadurch andere sensible Gruppen im und unter dem Lack schützen. HALS verhindern oxidative Reaktionen, indem sie freie Radikale (d.h. extrem reaktive Zentren) einfangen. Aufgrund der beiden unterschiedlichen Wirkungsweisen ergänzen sich beide Substanzen und organische UV-Absorber werden dabei durch die HALS stabilisiert.

In einem qualitativ hochwertigen System decken die UV-Absorber möglichst große „Fenster" der UV-Strahlung ab. D.h. es werden diverse UV-Absorber eingesetzt, welche unterschiedliche Wellenlängen der Strahlung absorbieren.

3 Praxiserfahrung

Gemäß unserer langjährigen Erfahrung kann die Standzeit von Holzoberflächen mit geeigneten Lichtschutzmitteln erheblich verlängert werden. Durch den Einsatz von UV-Absorbern und HALS wird der Abbau des Lignins stark verringert. Das Holz behält seine Stabilität und die Haftung der Beschichtung auf der somit intakten Holzoberfläche wird gegenüber traditionellen Systemen verlängert. Dieser Effekt kann eindrucksvoll anhand

eines farblosen Lasuranstrichs wie in Abb. 1 illustriert werden.

Abb. 1: Wirkungsweise SunCare® 900 nach 2 Jahren Freibewitterung, 45° SW
1 = unbehandelte Oberfläche
2 = 2x Lasurfarbe farblos
3 = 1x SunCare® 900 + 2x WoodCare® UV

Nach circa 5 Monaten Freibewitterung wurden die Oberflächen durch einen Hagelregen verletzt. Die stabilisierende Wirkung von SunCare® 900 als Ligninschutz ist bei Nr. 3 anschaulich demonstriert. Bei Nr. 2 ist deutlich zu erkennen, dass Wasser unter die Lasurbeschichtung gedrungen ist und die zerstörte Ligninbestandteile teilweise ausgewaschen wurden (Wasserringe). Die zerstörte Holzsubstanz begünstigt das Wachstum von Bläuepilzen, welche als schwarze Punkte erkennbar sind. Die Verfärbung des Holzes bei Nr. 2 ist ein weiteres Indiz für die fotochemische Veränderung der Holzsubstanz durch UV-Strahlung.

Der in Nr. 3 (Abb. 1) verwendete Ligninschutz ist ein wasserlösliches Produkt und muss mit einer zusätzlichen Schicht vor Wassereinwirkung geschützt werden. Grundsätzlich werden alle Farbsysteme mit einem Ligninschutz erheblich stabilisiert. Für farblose und leicht pigmentierte Systeme sind zusätzliche UV-Absorber im Topcoat wichtig, damit ein möglichst langfristiger Effekt erzielt werden kann.

Ligninschutz im Aussenbereich, d.h. ein UV-Schutz welcher insbesondere das Lignin an der Holzoberfläche schützt, ist ein Beitrag zur Nachhaltigkeit. Durch die Stabilisierung der Holzoberfläche können Farbsysteme mit weniger Filmschutz, d.h. Fungiziden und Insektiziden, ausgerüstet werden, da die Holzoberfläche weniger Angriffspunkte liefert. Diese These wird durch den erfolgreichen Einsatz von Ligninschutzmittel wie z.B. SunCare® 900 seit über 10 Jahren gestützt.

4 Vergilbungsschutz im Innenbereich

Klarlacke und leicht weißlich pigmentierte Systeme sind für viele Anwendungen im Innenbereich sehr beliebt.

Abb. 2: Linke Stuhlhälfte Basisbehandlung mit SunCare® 800

Die Farbtonveränderungen, welche durch die Lichtempfindlichkeit der Holzsubstanz ausgelöst werden, sind daher oft unerwünscht. Die Vergilbung des Holzes wird ebenfalls durch fotochemische Prozesse verursacht. Dabei genügt bereits das diffuse Licht im Innenbereich um diesen Prozess auszulösen. Die bräunliche Färbung des Lignins wird durch die primären Chromophore, Carbonyle und konjugierte Phenole initiiert. Die Absorption findet zwischen 300-400 nm statt.

Die Vergilbung des Holzes kann mit speziellen Lichtschutzmitteln wie z.B. SunCare® 800 erheblich reduziert werden.

Abb.3: Innenraum, behandelt mit Vergilbungsschutz, SunCare® WF.

5 Schlusswort

Das Sonnenlicht und insbesondere die hochenergetische UV-Strahlung ist ein sehr wichtiger und schädlicher Einflussfaktor für die Bausubstanz Holz. Lichtschutzmittel sind deshalb für die Stabilisierung von Festigkeit und Farbe ein wichtiger Bestandteil für die Werterhaltung von Holzoberflächen.

Eindrucksvolle Ergebnisse konnten mit den bereits existierenden organischen UV-Absorbern in Kombination mit HALS erzielt werden. Seit einiger Zeit wird auch intensiv die Verwendung von anorganischen Materialien für diese Zwecke untersucht.

Quellen

[1] P. Hayoz et all., Farbstabilisierung und Lichtschutz bei naturbelassenen Hölzern für den Innenbereich, Farbe&Lack, 7, 2003, S.26f

[2] U. Müller et all., Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation, Journal of Photochemistry and Photobiology B, 2003, S.97f

[3] R. William, Effect of grafted UV stabilizers on wood surface erosion and clear coating performance, Journal of Applied Polymer Science, 1983, S 2093f

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Greywood

Seit mehreren Jahrzehnten werden Gebäude mit Holzfassaden versehen, deren Oberfläche im Optimalfall mit der Zeit eine natürliche, silbergraue Patina annehmen. Da die Alterung jedoch selten so gleichmäßig ins Silber der natürlichen Vergrauung hinüberwechselt, wird es in vielen Fällen sowohl von der Bauherrschaft, als auch von den Planern gewünscht, die farblichen Veränderung des Holzes bereits bei der Errichtung von Holzfassaden vorwegzunehmen.

Die Fassaden verwittern je nach Intensität von z.B. Regen, Hagel, Temperatur, UV-Strahlung unregelmäßig, da direkt bewitterte Teile im Lauf der Zeit stark vergrauen, während sich unter Vordächern und in geschützten Bereichen das unbehandelte Holz lediglich dunkel färbt.

Abb. 1: Flecken und Schlierenbildung unter dem Dachvorsprung, verursacht durch unterschiedliche UV-Belastung [2]

Bisher war es nur möglich, das farblich unterschiedliche Erscheinungsbild einer unbehandelten Holzfassade durch die natürliche Vergrauung zu akzeptieren oder das Holz durch eine Beschichtung vor Bewitterung zu schützen, was wiederum eine regelmäßige Wartung erforderlich macht.

Eine Alternative zu den herkömmlichen Lacken und Lasuren stellt vorvergrautes bzw. mit grauer Lasur vorbehandeltes Holz dar, welches bereits mit dem Tag des Einbaus an eine natürliche graue Farbe aufweist. Um dies zu erreichen, gibt es die Möglichkeit, eine graue pigmentierte Holzlasur zu verwenden, die in den bewitterten Bereichen nach und nach in eine natürliche Patina übergeht, während sie in den geschützten Bereichen erhalten bleibt. Die verschiedenen Hersteller bieten zu diesem Zweck unterschiedliche Lasuren an.

Die Firma Caparol [3] hat beispielsweise zwei verschiedene Lasuren im Angebot: GreyWood und GreyExpress. Während die GreyWood-Lasur in verschiedenen Grautönen erhältlich ist und die Entscheidung erlaubt, entweder das Holz regelmäßig mit der Lasur zu behandeln, oder es nicht mehr zu pflegen und die bewitterten Stellen langsam natürlich vergrauen zu lassen, kann durch GreyExpress die natürliche Vergrauung der Holzoberfläche durch eine Reaktion mit Feuchtigkeit und Sauerstoff extrem beschleunigt werden. Innerhalb weniger Monate kann so eine gleichmäßige und natürliche Oberflächenfärbung entstehen, die sonst mehrere Jahre erfordern würde. Auch ein nachträgliches Auftragen kann in geschützten Bereichen zu einer natürlichen Vergrauung führen.

Abb. 2: vorvergraute Fassade [1]

Eine andere, nicht ganz so gängige Möglichkeit, ist die Alterung der Holzoberfläche bei Witterung. Das Verfahren basiert auf der Alterung der Oberfläche mittels der Hauptfaktoren Sonne (UV-Strahlung), Regenwasser sowie natürlicher Bläuepilze. Dies garantiert eine Vorvergrauung ohne Einsatz zusätzlicher Stoffe. Zu diesem Zweck werden von den Herstellern in der Regel Rift- und Halbriftbretter mit guter Dimensions- und Formstabilität als Ausgangsmaterial verwendet und im Werk der Witterung ausgesetzt. Nach Erreichen des erforderlichen Behandlungsgrades werden diese getrocknet und profiliert.

Abb. 3: Die silbergrauen Farbtöne der GreyWood-Lasur, die durch spezielle Effektpigmente unterschiedliche Farbtonrichtungen erhalten. [3]

Die Dauerhaftigkeit von vorvergrautem Holz ist vergleichbar mit unbehandeltem Holz – das bedeutet eine lange Lebensdauer ohne regelmäßigen Unterhalt, wenn die Regeln des konstruktiven Holzschutzes eingehalten werden.

Unabhängig von dem Einsatz im Neubaubereich bieten sich auch bei Erneuerungen oder Erweiterungen von Fassadenflächen aus unbehandeltem Holz weitere Potentiale zur Verwendung vorvergrauter Hölzer. Bisher bestand das Problem darin, dass es zwischen den alten, vergrauten und den neuen Fassadenbrettern zu auffälligen Farbunterschieden kam, die durch die Verwendung von vorvergrautem Holz deutlich reduziert werden können. Eine von Anfang an vorvergraute Fassade kann so einen Beitrag zur Akzeptanzsteigerung von Holzfassaden und -bauten bei Architekten, Bauträgern und den Konsumenten leisten.

Quellen

[1] Setz Architektur, CH-Rupperswil
www.setz-architektur.ch
[2] CD Color GmbH & Co. KG, Herdecke
www.delta-woodprotection.de
[3] CAPAROL Farben Lacke Bautenschutz GmbH, Ober-Ramstadt
www.caparol.com

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung
Die Wirkung von Laserstrahlung auf strukturelle, chemische und physikalische Eigenschaften des Holzes

Hendrik Wurst, Günter Wiedemann, Peer Haller

Bei der Laserbestrahlung von Holzoberflächen tritt neben der Pyrolyse Schmelze auf, die als unerwünschte Begleiterscheinung angesehen wird. Die vorliegende Arbeit untersucht die Wirkung des Laserstrahls auf Holz hinsichtlich der strukturellen, chemischen und physikalischen Eigenschaften. Die Absorption des Lasers variiert im Laufe der Bestrahlung infolge der Veränderungen des Gefüges. Die chemische Zusammensetzung der drei Hauptbestandteile – Zellulose, Hemizellulose und Lignin – führt zu Veränderungen der Schwell- und Grenzwerte für Strahlintensität und Wechselwirkungszeit. Ein Parameterfeld für pyrolysefreies Schmelzen wurde ermittelt. Es zeigte sich, dass der Nd:YAG-Laser (1,064 µm) in Abhängigkeit von der Wechselwirkungszeit eine 8 bis 1000 fach höhere Strahlintensität benötigt als der CO_2-Laser (10,6 µm) um die gleiche Wirkung zu erzielen. Die Benetzung und die kapillare Wasseraufnahme aller untersuchten Holzarten wurden durch die Behandlung verändert. Die größte Wirkung wurde bei Fichte festgestellt, wohingegen Sapelli nur geringe Veränderungen zeigte.

Einführung

Die Einführung des Lasers in verschiedene Bereiche der Materialbearbeitung schreitet rasch voran. Die Gründe hierfür sind: der fokussierte Energieeintrag, die leichte Kontrolle von Strahlform, Energiedichte und Wechselwirkungszeit für verschiedene Wellenlängen sowie die einfache Führung des Strahls durch Lichtfasern und Spiegel.

Bekannte Anwendungen des Lasers in der Holzindustrie sind Schneiden und Gravieren (Kudapa et al., 1991; Westkämper und Hoffmeister, 1998). Zusätzlich wird die Perforation massiver Bohlen vor der Imprägnierung mit chemischen Holzschutzmitteln (Hattori, 1995), der Abtrag dünner Schichten (Panzner et al., 1998) sowie die Reinigung von Holzoberflächen in der Denkmalpflege (Wiedemann et al., 1998) heute untersucht.

Der Stand der Technik zeigt, dass das Potenzial von Laseranwendungen in der Holzindustrie nur unvollständig genutzt wird, da die Grundlagen zur Entwicklung neuer Verfahren fehlen.

In dieser Arbeit wird die Wirkung von Laserstrahlen auf Holz an Hand mikrostruktureller, chemischer und physikalischer Eigenschaften beschrieben. Das Augenmerk liegt dabei auf folgenden Gesichtspunkten:

- Beschreibung der Wechselbeziehung Strahl-Oberfläche
- Veränderung der Oberfläche und Erzeugung von Schmelze
- Einfluss der Parameter Wellenlänge, Wechselwirkungszeit, Strahlintensität auf das Schmelzen
- Charakterisierung der Schmelze

Thermisches Verhalten von Holz

Holz ist ein poröser Stoff mit einem Porenanteil zwischen 60 und 70 % für Nadelholz. Seine physikalischen Eigenschaften, insbesondere sein hygrisches Verhalten, hängen sehr vom anatomischen Aufbau ab. Es besteht aus verschiedenen chemischen Bestandteilen unter denen Zellulose, Hemizellulose und Lignin die wichtigsten sind. Diese Bausteine bestehen aus Polymerketten, die keine ausgeprägten Schmelzpunkte sondern einen Glasübergang aufweisen, dessen Werte sind für Lignin und Zellulose unterschiedlich sind und jeweils zwischen 140 °C and 200 °C (Sandermann and Augustin 1963) variieren, so dass mit konventionellen Wärmequellen ein Schmelzen nicht ohne Bräunung oder Verbrennung erreicht werden kann.

Orech (1975) hat das Absorptionsspektrum von Holz gemessen, das wegen seines Minimums bei 1000 nm die geringste Absorption beim Nd:YAG-Laser erwarten lässt. Im Gegensatz hierzu tritt eine hohe Absorption mit über 80 % für den UV- und IR-Bereich auf (Abb. 1).

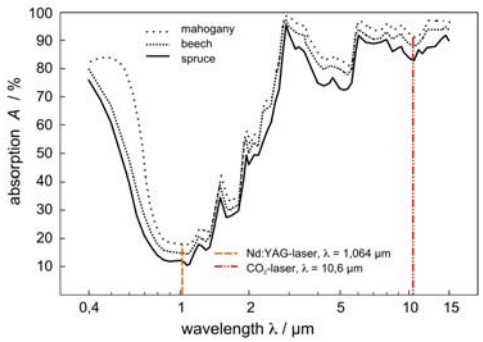


Abb. 1: Spektrum von Mahagony, Buche und Kiefer; siehe Markierungen der Wellenlängen typischer Laser (Wust 1998, Orech 1975)

Seltman (1995) veröffentlichte als erster Ergebnisse von Ablationsversuchen an Holzoberflächen mit dem Excimer-Laser. Die Oberflächenstruktur ähnelte danach Mikrotomschnitten, wie sie zur Vorbereitung von Präparaten der Elektronenmikroskopie durchgeführt werden. Untersuchungen von Henneberg (1997) und Panzner (1998) haben gezeigt, dass die Ablationstiefe sehr stark von der örtlichen Mikrostruktur und der Porosität abhängt.

Verkohlte oder geschmolzene Oberflächen sind aus der Literatur bekannt und werden als unerwünschte Erscheinungen betrachtet, die gewöhnlich entfernt werden müssen. Die thermische Zersetzung ist unvermeidlich und stellt einen Mangel hinsichtlich der Oberflächenqualität dar (Parameswaran 1982). Hohe Temperatur während des Schneidens (ungefähr 700 °C, Arai et al. 1979) führt zu einer Umwandlung des Zellgefüges in eine feste, glasartige Substanz. Back (1973) hat die Schmelztemperatur für Zellulose mit ungefähr 450 °C berechnet. Schmelzen ohne Verbrennung oder Verkohlung sollte aber möglich sein, wenn Erhitzung und Abkühlung der Oberfläche in sehr kurzer Zeit erfolgen.

Laser

Laser ist eine Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Fügt man einem laser-aktiven Material in einem Resonator Energie zu, generiert es Laserstrahlung. Neben den physikalischen Vorgängen gibt Eichler (1991) Erläuterungen zur Charakteristik des Laserstrahls und seine Interaktion mit Materialien.

Laserstrahlung ist zeitlich und räumlich kohärent, das heißt zwischen den Lichtwellen existiert eine feste zeitliche und räumliche Beziehung, die zu den oben beschriebenen Eigenschaften des Strahles führt. Infolge ihrer geringen Divergenz besitzt Laserstrahlung selbst über weite Entfernungen eine hohe Intensität. Sie wird definiert als Leistungsdichte E (durchschnittliche Leistung des Lasers P_{Av} bezogen auf die bestrahlte Fläche) oder als Energiedichte H (Pulsenergie Q bezogen auf die bestrahlte Fläche).

Es ist möglich, den Laserstrahl auf eine sehr kleine Fläche – theoretisch bis auf das 2,4 fache der Wellenlänge – zu fokussieren, wodurch hohe Intensitäten auftreten. Die Fokussierung des Lasers zusammen mit der Steuerung der durchschnittlichen Leistung gestattet eine feine Dosierung der Intensität als Voraussetzung zur Behandlung der Holzoberfläche. Handelsübliche Laser sind heute mit Wellenlängen von Ultraviolet bis in das mittlere Infrarot verfügbar.

Die Wechselwirkung wird gewöhnlich definiert als Leistung über der Zeit, beziehungsweise der Dauer des Laserpulses. Die Erzeugung gepulster Laserstrahlung ermöglicht eine weitere Steigerung der Intensität, bei der sehr hohe Energie in einem kurzen Zeitraum auf der Oberfläche umgesetzt wird.

Experimenteller Aufbau

Für die Versuche wurde Fichte, Buche und Sapelli ausgewählt. Bretter und Bohlen guter Qualität und mit feinen Jahrringen wurden in einer Schreinerwerkstatt in würfelförmige Probekörper von 20 mm Kantenlänge geschnitten, wobei die Schnittrichtung den orthotropen Hauptachsen des Holzes entsprach. Die Flächen blieben sägerauh. Die Würfel wurden anschließend auf eine Holzfeuchte von 10 % konditioniert. Darüber hinaus wurden Furniere der besagten Holzarten sowie Zellstoff und Lignin für die spektroskopischen Untersuchungen und die Absorptionsmessungen verwendet.

Ein Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und ein CO_2-Laser mit 10.6 µm wurden für die Behandlung verwendet. Der Nd:YAG-Laser wurde wegen der zu erwartenden hohen Eindringtiefe von 1 µm gewählt. Der CO_2-Laser wurde herangezogen, weil Holz ihn im Bereich von 10 µm gut absorbiert. Die Laserparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Laserstrahl des CO_2-Lasers wurde mit einem 45 ° Brennspiegel aus Molybdän-beschichtetem Kupfer fokussiert, der eine Brennweite von 400 mm aufwies. Beim Strahl des Nd:YAG-Lasers geschah dies mit Hilfe von Quartzlinsen einer Brennweite von 300 mm. Zur Veränderung der Leistungsdichte wurde die durchschnittliche Leistung des Lasers variiert.

Tab. 1: Zusammenfassung von Laserarten und ihrer Besonderheiten

Typ	Wellenlänge	Aktives Medium	Operationsmodus
Excimer-Laser	193, 248, 308 nm	Gas	gepulst (pw)
Diodenlaser	805, 940 nm	Halbleiter	kontinuierlich (cw)
Nd:YAG-Laser	355, 532, 1064 nm	Festkörper	gepulst (pw), kontinuierlich (cw)
CO_2-Laser	10,6 µm	Gas	gepulst (pw), kontinuierlich (cw)

Die spektroskopischen Untersuchungen wurden mit Hilfe des FTIR-Spektrometer Perkin Elmer Spectrum 2000 durchgeführt. Die Messung erfolgte im Bereich 4000 cm^{-1} bis 600 cm^{-1} mit einer Auflösung von 4 cm^{-1}. Um den Einfluss gasförmigen Wassers zu mildern, wurden die Kuven geglättet, und es wurde eine ATR-Korrektion durchgeführt. Die Auswertung des Spektrums erfolgte qualitativ über die Position der Peak.

Für die Kontaktwinkelmessung wurde das System Surftens 3.0 verwendet. Die Aufzeichnung der Gestalt des Tropfens destillierten Wassers auf der Holzoberfläche erfolgte mittels einer CCD-Kamera mit Makro-Objektiv. Die Daten wurden mit einer Bildverarbeitung automatisch ausgewertet. Die Zufuhr von Flüssigkeit geschah mit einer Mikrospritze (Volumen 500 µl) bei einem konstanten Volumenstrom von 5 μls^{-1}, wobei die Spitze während der Messung im Tropfen verblieb. Die Auswertung der Bilder und Messwerte wurde graphisch nach den Empfehlungen von Nussbaum (1989) vorgenommen.

Die kapillare Wasseraufnahme der Holzoberfläche wurde gemäß DIN 52617-A bestimmt. Nach dem Eintauchen der Proben in Wasser wurde die Gewichtzunahme nach 10 min, 30 min, 1 h, später stündlich bis zur sechsten Stunde und schließlich nach 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h, 144 h und 168 h ermittelt. Überschüssiges Wasser wurde vor der Wägung entfernt; die Messwerte wurden in einer Tabelle zusammengestellt, grafisch ausgewertet und die Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion

Schmelz- und Zersetzungstemperatur für Zellulose, Hemizellulose und Lignin können Abb. 2 entnommen werden. Die Zersetzungstemperatur der Hemizellulose ist mit ungefähr 200 °C am geringsten. Die Zersetzung des Lignins erfolgt bei weit höheren Temperaturen als die Erweichung,

wohingegen beide Temperaturen bei der Zellulose nahezu identisch sind.

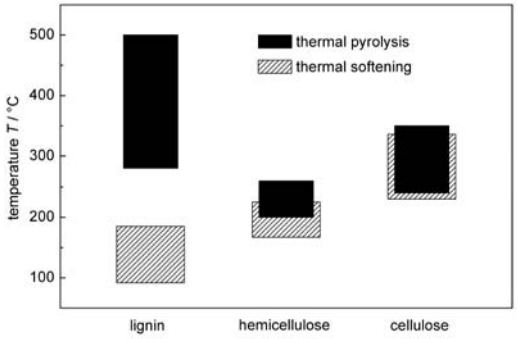


Abb. 2: Thermische Erweichungs- und Zersetzungstemperaturen von Holzbestandteilen (Wust 1998)

Die Absorption der Laserstrahlung ist Voraussetzung für die Behandlung der Holzoberfläche (Abb. 3). Untersuchungen der Absortion zeigen geringste optische Eindringtiefen für Fichte bei Wellenlängen von 805 nm und 10,6 µm.

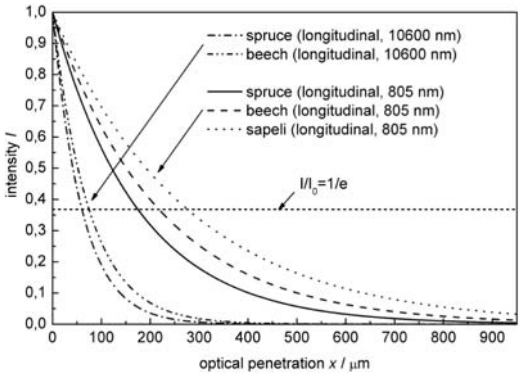


Abb. 3: Optische Eindringtiefe für Fichte, Buche und Sapeli sowie ausgewählte Wellenlängen von Lasern

Die höchste Eindringtiefe wurde für Sapelli gemessen. Die Messungen der Reflexion ergab für alle drei Holzarten einen Wert von 90 % bei 805 nm und einen wesentlich geringeren von weniger als 10 % bei 10,6 µm. Dies bedeutet eine effektive Absorption des CO_2-Lasers und eine größere Eindringtiefe des Nd:YAG-Lasers, einhergehend mit einer gleichmäßigen Verteilung der Temperatur.

Mit dem CO_2-Laser und Pulsbreiten von 1 ms konnte das Schmelzen der Holzoberfläche ohne Verkohlung beobachtet werden (Abb. 4a,b). Die Tiefe der Schmelzschicht wurde mittels Licht- und Elektronenmikroskop bestimmt. Sie liegt in einem Bereich von 2 bis 7 µm; die Zone der thermischen Beeinflussung hingegen reicht von 5 µm bis 15 µm (Abb. 5).

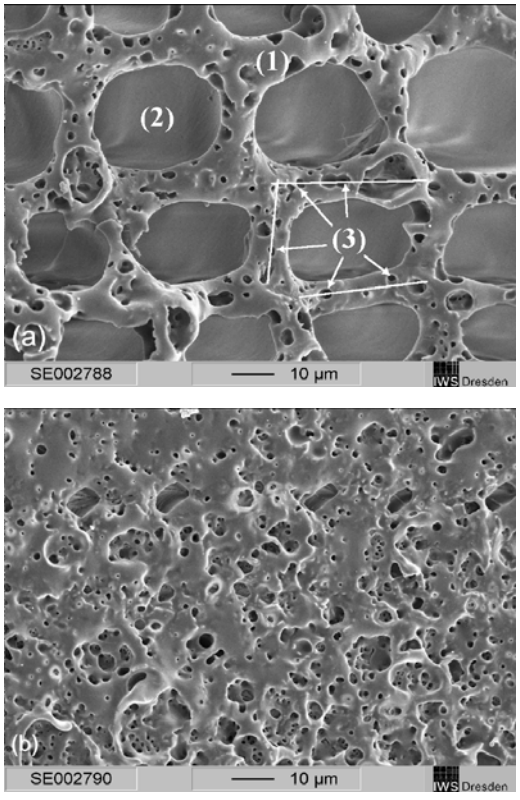


Abb. 4: REM-Aufnahme von Fichte nach Laserbestrahlung mit CO2-Laser, t_P= 1 ms. Querschnitt mit (a) Frühholz (1) glasartige Schmelze, (2) Lumen, (3) Pore und ihre Orientierung in der Mitte der Zellwand; (b) Spätholz (Wust 1998)

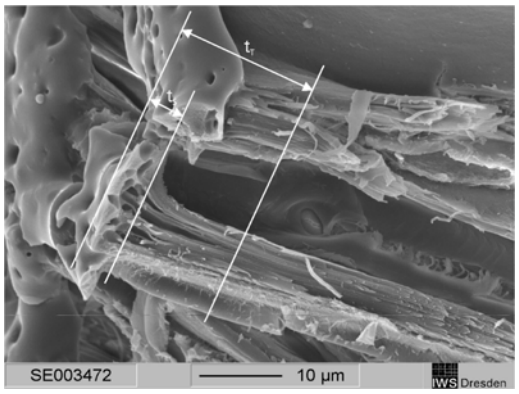


Abb. 5: REM-Aufnahme von Fichte nach Laserbestrahlung mit CO2-Laser, t_P= 1 ms., Querschnitt, Tiefe der Schmelzschicht t_S= 3,6 µm, Tiefe der thermischen Veränderung t_T= 15 µm (Wust 1998)

Veränderungen der physikalischen Eigenschaften, insbesondere der Feuchteaufnahme, wurden über den Kontaktwinkel bestimmt. Die Messungen zeigten für alle Holzarten nach der Bestrahlung einen Wert von 80 ° (Abb. 6,7). Dies entspricht bei Fichte einer Steigerung von 130 % und bei Buche 60 %. Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit mikroskopischen Untersuchungen zeigt, dass die Veränderung der Benetzung aus der Schmelze resultiert, ungeachtet dessen, ob diese eine geschlossene Schicht bildet oder nicht.

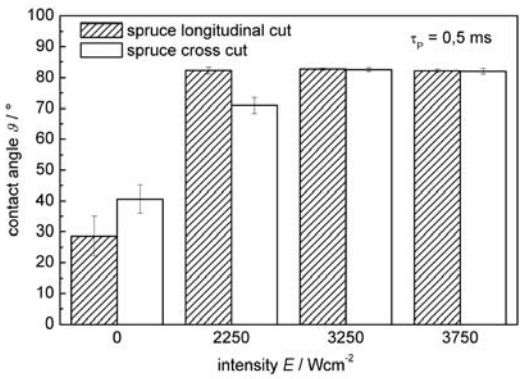


Abb. 6: Kontaktwinkel von Fichte, vor und nach der Bestrahlung mit CO_2-Laser

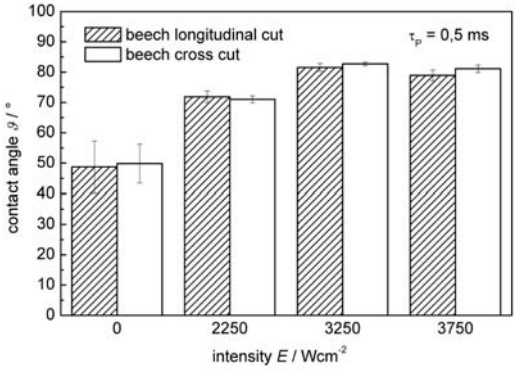


Abb. 7: Kontaktwinkel von Buche, vor und nach der Bestrahlung mit CO_2-Laser

Schlussfolgerung

Die Untersuchungen berichten über grundlegende Aspekte der Laserbehandlung von Holz zur Erzeugung von Schmelze, wobei der Einfluss verschiedener Parameter wie Wellenlänge, Leistungsdichte, Pulsdauer und Fokussierung in mikroskopischen Aufnahmen der Oberfläche gezeigt wurde.

Die Absorption des Laserstrahls geht mit Veränderungen der Oberfläche einher. Die chemische Zusammensetzung, besonders die Verteilung von Zellulose, Hemizellulose und Lignin in der Zellwand, führt zu den besagten Veränderungen von Schwell- und Grenzwerten hinsichtlich Intensität und Wechselwirkungszeit.

Ein Parameterfeld wurde ermittelt, das ein Schmelzen der Holzoberfläche ohne Verkohlung ermöglicht. Die Oberflächentemperatur dürfte 200 °C nicht übersteigen, da jenseits dieser Temperatur, entsprechend des aus der Literatur bekannten thermischen Verhaltens, eine Verkohlung von Hemizellulose und Lignin zu erwarten wäre.

Es zeigte sich, dass die Bestrahlung mit Nd:YAG-Laser (1,064 µm) in Abhängigkeit von der Intensität eine 8 bis 1000 fach höhere Strahlintensität

erfordert als der CO_2-laser (10,6 µm) um die gleiche Wirkung zu erzielen.

Sowohl die Benetzung als auch die Wasseraufnahme wurden bei allen Holzarten verändert. Die größte Wirkung zeigte die Fichte, wohingegen Buche nur geringe Veränderungen aufwies.

Bis heute beschränkt sich die Laserbearbeitung in der Holztechnologie auf wenige Anwendungen wie Schneiden, Perforieren oder Gravieren. Angesichts dieser Tatsache sollten die physikalischen und chemischen Grundlagen für weitere Bearbeitungsverfahren stärker als bisher erforscht werden (Abb. 8).

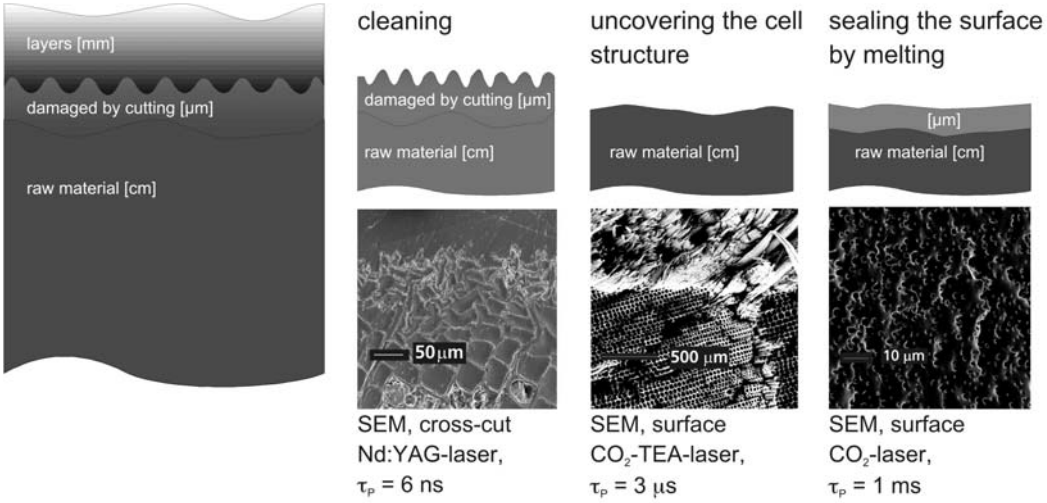


Abb. 8: Neue Möglichkeiten der Laserbehandlung von Holzoberflächen am Beispiel der Fichte durch Veränderung von Wellenlänge, Intensität und Wechselwirkungszeit.

Literatur

[1] Back, E.L. (1973). Cellulose bei hohen Temperaturen. Selbstvernetzung, Glasumwandlung und Schmelzen unter Einwirkung von Laserstrahlen. Das Papier, 27, pp. 475-483

[2] Haller, P., Wust, H., Beyer, E., Wiedemann, G., Panzner, M. (2002). Experimental Study of the Effect of a Laser Beam on the Morphology of Wood Surfaces, First European Wood Conference, 7.10.-10.10., Hamburg, Germany

[3] Henneberg, K. (1997). Untersuchungen zur Oberflächenbearbeitung von Massivholz mittels Laserstrahlung. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden

[4] Nussbaum, R. M. (1999). Natural surface inactivation of Scots pine ans Norway spruce evaluated by contact angle measurement, Holz als Roh- und Werkstoff, 57, pp. 419-424

[5] Orech, T., Kleskenova, M. (1975). Untersuchungen über die Holzbearbeitung mit Laserstrahlen. Drevo, 30, pp. 324

[6] Panzner, M., Wiedemann, G., Henneberg, K., Fischer, R., Wittke, Th., Dietsch, R. (1998). Experimental investigation of the laser ablation process on wood surfaces. Applied Surface Science, 129, pp. 787-792

[7] Parameswaran, N. (1982). Feinstrukturelle Veränderungen an durch Laserstrahl getrennten Schnittflächen von Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff, 40, pp. 421

[8] Pöpel, L.V. (1997). Untersuchungen der Eigenschaften laserbehandelter Holzoberflächen bezüglich Verkleb- und Imprägnierbarkeit. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden

[9] Sandermann, W., Augustin, H. (1963). Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Erste Mitteilung – Stand der Forschung. Holz als Roh- und Werkstoff, 21, pp. 256

[10] Sandermann, W., Augustin, H. (1963). Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Zweite Mitteilung – Untersuchungen mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse. Holz als Roh- und Werkstoff, 21, pp. 305

[11] Seltman, J. (1995). Freilegen der Holzstruktur durch UV Bestrahlung. Holz als Roh- und Werkstoff, 53, pp. 225

[12] Wust, H. (1998). Untersuchung von laserinduzierten Schmelzprozessen an Holzoberflächen. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden

[13] Wust, H. (2006). Die Wirkung von Laserstrahlung auf strukturelle, chemische und physikalische Eigenschaften von Holz, Shaker-Verlag, Aachen

12 Holzschutz, Oberflächenbehandlung

Response Surface Analyse (RSM) der Wirkung kombinierter Parameter Temperatur, Wasseraktivität (a_w) und pH-Wert auf das Wachstum von *Physisporinus vitreus*

Mark Schubert, Francis W.M.R. Schwarze

Zusammenfassung

Der biotechnologische Prozess Bioincising beinhaltet den kontrollierten Einsatz von *Physisporinus vitreus* (Empa 642), einem Basidiomyceten, der durch den selektiven Abbau der Membranen der Hoftüpfel (Tori) die Permeabilität von Fichten- und Tannenkernholz signifikant erhöht. Die gesteigerte Tränkbarkeit des Kernholzes führt zu einer deutlichen Verbesserung der Aufnahmefähigkeit, Verteilung und Eindringtiefe von Holzschutzmitteln und anderen Holzveredelungssubstanzen.

Für einen effizienten und optimierten biotechnologischen Einsatz von *Physisporinus vitreus* (möglichst kurze Inkubationszeit), ist es von grosser Bedeutung die wachstumbeeinflussenden Faktoren zu determinieren und abzuschätzen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von *P. vitreus* Stamm 642 unter kombinierten Faktoren (Temperatur: 10, 15, 20°C; Wasseraktivität a_w: 0.892, 0.928, 0.955, 0.982, 0.998; pH-Wert: 4, 5, 6) untersucht sowie durch die Anwendung der Response Surface Methode (RSM) modelliert und optimiert.

Der getestete Stamm wies eine hohe Sensitivität gegenüber sinkenden Wasseraktivitäten auf (P<0,001) und zeigte bereits bei einem a_w- Wert von 0.982 ein stark reduziertes radiales Wachstum. Die Response Surface Methode zur Modellierung der kombinierten Faktoren bestätigt die beobachteten *in vitro* Ergebnisse und lässt eine stärkere Abhängigkeit des Wachstums von *P. vitreus* von der Wasseraktivität als von der Temperatur und dem pH-Wert erkennen. Somit ist die Wasseraktivität (a_w) und damit die Holzfeuchte für die Optimierung des biotechnologischen Prozesses von grosser Bedeutung.

Einleitung

Bei den Nadelhölzern aus der Familie der Pinaceen ist bei den Hoftüpfeln der mittlere Teil der Tüpfelmembran zu einem so genannten Torus verdickt. Nach einem Verschluss der Hoftüpfelöffnungen wird der Wassertransport zwischen benachbarten Tracheiden stark erschwert. Die Lignifizierung des Margos während der Kernholzbildung hat zur Folge, dass selbst nach einer Behandlung im Kessel- oder Wechseldruckverfahren Schutzmittel nur sehr geringe Eindringtiefen insbesondere im Fichtenholz erreicht werden. Im Rahmen eines derzeit laufenden KTI-Projektes 8593.1 LSPP „Bioincising von Nadelholz mit *Physisporinus vitreus* – Optimierung von Holzbehandlungs- und Veredelungsprozessen" wird ein biotechnologisches Verfahren zur Verbesserung der Aufnahme, Verteilung und Eindringtiefe von Imprägniermitteln in Nadelholz nach einer Behandlung mit *Physisporinus vitreus* entwickelt (Schwarze & Landmesser, 2000; Schwarze et al., 2006).

Durch den Prozess des Bioincisings könnten eine Vielzahl von Behandlungs- und Veredelungsprozessen von Nadelholz effizienter und wertschöpfender gestaltet und damit die wirtschaftliche Nutzung der wichtigsten Baumarten der Schweiz und in Deutschland massgeblich verbessert werden. Um diesen biotechnologischen Einsatz von *Physisporinus vitreus* so effizient und damit kostengünstig gestalten zu können, ist es von grosser Bedeutung die wachstumbeeinflussenden Faktoren zu determinieren und zu charakterisieren. Die klassische Methode, um den Einfluss solcher kombinierter Faktoren zu bestimmen, ist einen Faktor zu variieren, während die Restlichen konstant gehalten werden.

Solch eine Vorgehensweise ist zeitaufwendig, benötigt einen hohen experimentellen Aufwand und eine Analyse der einzelnen Parameter und ihrer Interaktionen ist nicht möglich. Aus diesem

Grund war das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Response Surface Modells (RSM), welches das Wachstumsverhalten von *P. vitreus* Stamm 642 und einem Vergleichspilz *Lentinus lepideus* (Stamm 340) unter kombinierten Umweltbedingungen beschreibt.

Material und Methoden

Die eingesetzten Pilzarten *Physisporinus vitreus* (Empa 642) und *Lentinus lepideus* (Empa 340) sind in der Stammkulturensammlung der EMPA, Materials Science and Technology, Schweiz hinterlegt. Beide Pilzarten wurden vor den Studien mikroskopisch identifiziert. Zusätzlich wurde die ITS1-5,8S-ITS2 Region (Internal Transcribed Spacer) der rDNA von *P. vitreus* (642) amplifiziert und sequenziert (EMBL, Zugangsnr. FM202494). Für die Studien wurden die Pilzarten auf einem 2%igen Malzextraktmedium (Oxoid) kultiviert und nicht länger als 6 Monate bei 4°C konserviert.

Das Monitoring der radialen Wachstumsraten (mm Tag^{-1}) der Pilze erfolgte auf einem 2%igen Malzextraktagar über 20 Tage unter definierten Temperaturen (10, 15, 20°C), pH-Werten (4, 5, 6) und Wasseraktivitäten a_w (0.892, 0.928, 0.955, 0.982, 0.998). Die Wasseraktivität ist ein Maß für frei verfügbares Wasser in einem Material und sollte nicht mit dem Wassergehalt (g Wasser/g Substrat) verwechselt werden. Die a_w-Werte wurden nach Dallyn (1980) durch eine bestimmte Zugabe der inerten Substanz Glycerin eingestellt. Das radiale Myzelwachstum wurde in 2 vorher festgelegten Richtungen gemessen und durch Mittelung der Werte bestimmt (Goldfarb et al. 1989).

Die Response Surface Methode (RSM) ist ein statistisches Analyseverfahren (Multiple Regression) und dient um Beziehungen zwischen einer abhängigen (Y) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen (x_{ij}) zu beschreiben (modellieren).

Mit der RSM ist es möglich das Verhalten der jeweiligen Pilzart unter bestimmten Bedingungen vorherzusagen und die Einflussfaktoren zu gewichten (Baş & Boyaci, 2007). Folgende Regressionsgleichung wurde angewendet:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^{\,2} + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=i+1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Y = Response (Wachstumsrate), β_0 Koeffizient = Intercept, x_i = kodierte, unabhängige Variablen, β_i = lineare Koeffizienten, β_{ij} = Interaktive Koeffizienten, β_{ii} = quadratische Koeffizienten, und ε = Fehler. Interpretation der Daten basiert auf den Vorzeichen (positive oder negative Wirkung) und statistische Signifikanz der Koeffizienten (P<0.05). Interaktionen zwischen den Variablen können antagonistisch (negativer Koeffizient) oder synergetisch (positiver Koeffizient) sein.

Um die Genauigkeit und Robustheit des Modells zu bestimmen, wurden verschiedene Indizes berechnet: Root-Mean-Squares Error (RMSE); Standard Error of Prediction (SEP) (García-Gimeno et al. 2005; Zurera-Cosano et al. 2006); Bias Factor (B_f) and Accuracy Factor (A_f) (Ross 1996).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\mathrm{obs} - \mathrm{pred})^2}{\mathrm{n}}}$$

$$\%\mathrm{SEP} = \frac{100}{\mathrm{mean\ obs}} \sqrt{\frac{\sum (\mathrm{obs} - \mathrm{pred})^2}{\mathrm{n}}}$$

$$\mathrm{B_f} = 10^{\left(\frac{\sum \log\left(\frac{\mathrm{pred}}{\mathrm{obs}}\right)}{\mathrm{n}}\right)}$$

$$\mathrm{A_f} = 10^{\left(\frac{\sum \left|\log\left(\frac{\mathrm{pred}}{\mathrm{obs}}\right)\right|}{\mathrm{n}}\right)}$$

obs = observed value (beobachtete Wert); pred = predicted value (prognostizierter Wert); mean obs = mean of observed values (Durchschnitt der beobachteten Werte).

Die Modellberechnungen und die statistischen Analysen wurden in Matlab® Software (Version 7.4 R2007a) programmiert durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Response Surface Analyse ist eine Sammlung mathematischer und statistischer Methoden zur Beschreibung komplexer Systeme und Prozesse (Baş & Boyaci, 2007) und wurde bereits von einigen Autoren zur Optimierung und Vorhersage des Wachstumsverhaltens von Mikroorganismen erfolgreich eingesetzt (Zurera-Cosno et al. 2006; Spolaore et al. 2006; Begoude et al. 2007; Schubert et al. 2009a,b). Die beobachteten und modellierten Wachstumsraten (mm Tag^{-1}) für die beiden Pilzarten unter den kombinierten Faktoren (pH 4, 5, 6; Temperatur: 10, 15, 20°C; a_w: 0.955, 0.982, 0.998) sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die multifaktorielle Varianzanalyse liess einen leichten Einfluss des pH-Wertes auf das Wachstum (P<0.05) und keinen auf die Lag-Phase (P≥0.05) von *P. vitreus* erkennen.

Hingegen reagierte *P. vitreus* sehr sensitiv (reduzierte Wachstumsraten und Verlängerung der Lag- Phase) auf suboptimale Temperaturen (P<0.001) und insbesondere auf geringere Wasseraktivitäten (P<0.001). Während bei allen getesteten Temperaturen und pH-Werten innerhalb der 20 Tage noch ein Wachstum von *P. vitreus* beobachtet werden konnte, wurde bereits bei einem a_w- Wert von 0.955 kein Wachstum mehr ermittelt. Das Wachstumsoptimum und die kürzeste Lag- Phase wurde bei pH 5, einer Temperatur von 20°C und der höchsten Wasseraktivität (0.998) beobachtet. In Abbildung 1 ist der Einfluss der Temperatur und des a_w- Wertes auf das Wachstum von *P. vitreus* grafisch dargestellt.

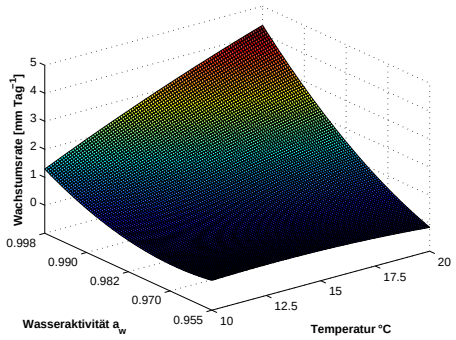


Abbildung 1: Wirkung der kombinierten Parameter Temperatur und Wasseraktivität (a_w) auf die Wachstumsraten (mm Tag^{-1}) von *Physisporinus vitreus* 642

Ein Vergleich der beiden Pilzarten zeigte, dass *Lentinus lepideus* im Gegensatz zu *P. vitreus* eine gewisse Toleranz gegenüber suboptimalen a_w-Werten aufwies. So konnte auch noch bei einer Wasseraktivität von 0.955 ein Wachstum ermittelt werden und erst ab a_w≤0.928 wurde auch nach 20 Tagen kein Wachstum mehr beobachtet (Tab. 1).

Zwar reagierte *L. lepideus* tolerant gegenüber suboptimalen a_w-Werten, doch wirkten dafür niedrige Temperaturen hemmend auf das Wachstum. In Tab. 2 sind die Modellkoeffizienten für die einzelnen Faktoren aufgelistet. Wenn man zur Grunde legt, dass ein grosser Modellkoeffizient (unabhängig vom Vorzeichen) gleichbedeutend ist mit einem hohen Einfluss auf das Wachstum, wird nochmals die hohe Abhängigkeit von *P. vitreus* von der Wasseraktivität und die Abhängigkeit von *L. lepideus* von der Temperatur deutlich.

Tab. 1: Beobachtete und prognostizierte Wachstumsraten (mm Tag^{-1}) von *Physisporinus vitreus* (642) und *Lentinus lepideus* (340)

Kulturbedingungen			Kodierte Werte			EMPA 642		EMPA 340	
						Wachstum mm Tag^{-1}		Wachstum mm Tag^{-1}	
°C	a_w	pH	°C	a_w	pH	Beobachtung	Prognose	Beobachtung	Prognose
20	0.998	6	1	1	1	4.22 ± 0.02	4.25	2.89 ± 0.12	2.78
20	0.998	5	1	1	0	4.38 ± 0.05	4.27	2.94 ± 0.22	2.86
20	0.998	4	1	1	-1	4.31 ± 0.01	4.20	2.83 ± 0.08	2.82
20	0.982	6	1	0	1	1.26 ± 0.01	1.47	1.40 ± 0.11	1.57
20	0.982	5	1	0	0	1.41 ± 0.01	1.51	1.49 ± 0.10	1.62
20	0.982	4	1	0	-1	1.20 ± 0.02	1.46	1.49 ± 0.16	1.55
20	0.955	6	1	-1	1	0.00 ± 0.00	0.00	0.88 ± 0.02	0.81
20	0.955	5	1	-1	0	0.00 ± 0.00	0.00	0.87 ± 0.05	0.82
20	0.955	4	1	-1	-1	0.00 ± 0.00	0.00	0.77 ± 0.06	0.73
15	0.998	6	0	1	1	3.07 ± 0.05	2.90	1.18 ± 0.03	1.24
15	0.998	5	0	1	0	3.02 ± 0.12	2.91	1.42 ± 0.04	1.35
15	0.998	4	0	1	-1	2.84 ± 0.02	2.83	1.25 ± 0.03	1.34
15	0.982	6	0	0	1	0.93 ± 0.04	0.93	0.42 ± 0.01	0.47
15	0.982	5	0	0	0	0.94 ± 0.03	0.95	0.68 ± 0.01	0.54
15	0.982	4	0	0	-1	0.89 ± 0.01	0.89	0.50 ± 0.02	0.50
15	0.955	6	0	-1	1	0.00 ± 0.00	0.07	0.16 ± 0.01	0.14
15	0.955	5	0	-1	0	0.00 ± 0.00	0.12	0.14 ± 0.03	0.18
15	0.955	4	0	-1	-1	0.00 ± 0.00	0.08	0.14 ± 0.06	0.12
10	0.998	6	-1	1	1	1.22 ± 0.10	1.29	0.28 ± 0.04	0.32
10	0.998	5	-1	1	0	1.24 ± 0.02	1.28	0.35 ± 0.07	0.45
10	0.998	4	-1	1	-1	1.03 ± 0.05	1.19	0.51 ± 0.06	0.47
10	0.982	6	-1	0	1	0.33 ± 0.01	0.12	0.13 ± 0.04	0.00
10	0.982	5	-1	0	0	0.34 ± 0.02	0.13	0.13 ± 0.01	0.08
10	0.982	4	-1	0	-1	0.32 ± 0.01	0.06	0.16 ± 0.03	0.07
10	0.955	6	-1	-1	1	0.00 ± 0.00	0.06	0.08 ± 0.02	0.09
10	0.955	5	-1	-1	0	0.00 ± 0.00	0.10	0.08 ± 0.01	0.17
10	0.955	4	-1	-1	-1	0.00 ± 0.00	0.04	0.00 ± 0.00	0.12
						RMSE	**0.135**	**RMSE**	**0.079**
						%SEP	**11.14**	**%SEP**	**9.20**
						B_f	**0.897**	**B_f**	**1.022**
						A_f	**1.193**	**A_f**	**1.199**

RMSE : root mean square error; %SEP: standard error of prediction; B_f: bias factor; A_f: accuracy factor

Tab. 2: Modellkoeffizienten und ihr Effekt auf die Wachstumsrate (mm Tag^{-1}) von *Physisporinus vitreus* (642) und *Lentinus lepideus* (340)

	Koeffizienten	642	340
Response mean	*β0*	0.9540*	0.5408*
T	*β1*	0.6892*	0.7663*
a_w	*β2*	1.3953*	0.5808*
pH	*β3*	0.0186$^{n.s}$	0.0171*
T^2	*β11*	-0.1337*	0.3105*
a_w^2	*β22*	0.5599*	0.2245*
pH^2	*β33*	-0.0442*	-0.0569*
T*aw	*β12*	0.8018*	0.4371$^{n.s}$
T*pH	*β13*	-0.0111$^{n.s}$	-0.0282*
a_w*pH	*β23*	0.0192$^{n.s}$	0.0296*

* = signifikant ($P \leq 0.001$); $^{n.s}$ = nicht signifikant

Die Unterschiede im Wachstumsverhalten und der unterschiedliche Einfluss der gegebenen Umweltfaktoren auf die 2 Pilzarten sind möglicherweise mit ihrer unterschiedlichen Lebensweise zu erklären. Während sich *P. vitreus* an einen Extremstandort wie beispielsweise Riesellatten in Kühltürme angepasst hat (Schmidt et al. 1997), kommt *L. lepideus* häufig an Eisenbahnschwellen vor, die in den Sommermonaten hohe Temperaturen sowie eine hohe Trockenheit aufweisen (Jahn, 1990).

Für eine erfolgreiche Anwendung der Response Surface Methode sollte die Modellgenauigkeit überprüft werden. Die Validierung des Modells wurde mit einer Korrelationsanalyse (R^2) zwischen beobachteten und prognostizierten Werten durchgeführt (Abb. 2). Zusätzlich wurden weitere Indizes (RMSE, SEP%, A_f, B_f) berechnet.

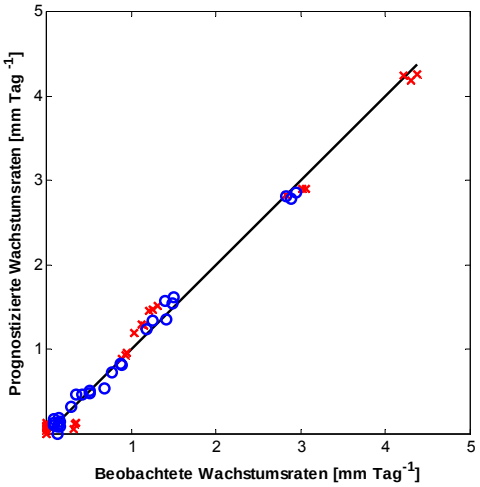


Abbildung 2: Korrelationsanalyse zwischen den beobachteten Wachstumsraten (mm Tag^{-1}) und den generierten/prognostizierten Werten des RSM-Modells. (O) *Lentinus lepideus* (340), (x) *Physisporinus vitreus* (642)

An dieser Stelle wird auf eine genau Interpretation der einzelnen Indizes und ihrer Werte verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen (García- Gimeno et al. 2005; Zurera- Cosano et al. 2006; Ross 1996). Allerdings bleibt festzuhalten, dass die ermittelten Indizes (Tabelle 1) sowie die grafische Darstellung der Korrelation beweisen, dass das in dieser Arbeit generierte Modell (RSM) äusserst genaue Prognosen liefert und die experimentellen Beobachtungen bestätigt.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich durch die Anwendung der Response Surface Methode der experimentelle Aufwand reduzieren lässt sowie das Wachstumsverhalten von *P. vitreus* unter definierten Bedingungen beschrieben und optimiert werden kann. Des weiteren wurde durch die vorliegende Arbeit deutlich, dass für die Optimierung und der Qualitätssicherung des biotechnologischen Prozesses (Bioincising) die Wasseraktivitäten und damit die Feuchtigkeitsverhältnisse mit entscheidend sind.

In Zukunft wird, in einem vom Schweizer National Fond (SNF) 205321-121701/1 geförderten Projektes, die Ausbreitung von *P. vitreus* dreidimensional im Holz untersucht und computerunterstützt simuliert.

Quellen

[1] Baş, D., İsmail & H. Boyaci, H. (2007): Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. Journal of Food Engineering 78: 836-845.

[2] Begoude, B.A.D., Lahlali, R., Friel, D., Tondje, P.R. & Jijakli, M.H. (2007): Response surface methodology study of the combined effects of temperature, pH, and a_w on the growth rate of *Trichoderma asperellum*. Journal of Applied Microbiology 103: 845-854.

[3] Dallyn, H. & Fox, A. (1980): Spoilage of materials of reduced water activity by xerophilic fungi. In: Gould, G.W. (ed.): Microbial growth and survival in extremes of environment. Academic Press, London. 129-139.

[4] Goldfarb, B., Nelson, E.E. & Hansen, E.M. (1989): *Trichoderma* spp.: Growth rates and antagonism to *Phellinus weirii* in vitro. Mycologia 81: 375-381.

[5] Jahn, H. (1990): Pilze an Bäumen. Patzer Verlag, Berlin, Hannover. 272 S.

[6] Schmidt, O., Schmitt, U., Moreth, U. & Potsch, T. (1997): Wood decay by the white rotting basidiomycete *Physisporinus vitreus* from a Cooling Tower. Holzforschung 51: 193-200.

[7] Schubert, M., Dengler, V., Mourad, S. & Schwarze, F.W.M.R. (2009a): Using response surface methodology to evaluate the optimum growth parameters of *Physisporinus vitreus*. Journal of Applied Microbiology. In press.

[8] Schubert, M., Mourad, S., Fink, S. & Schwarze, F.W.M.R. (2009b): Ecophysiological responses of the biocontrol agent *Trichoderma atroviride* to combined environmental parameters. Biological Control. In press

[9] Schwarze, FWMR. & Landmesser, H. (2000): Preferential degradation of pit membranes within tracheids by the basidiomycete *Physisporinus vitreus*. Holzforschung 54: 461–462.

[10] Schwarze, FWMR., Landmesser, H., Zgraggen, B. & Heeb, M. (2006): Permeability changes in heartwood of *Abies alba* and *Picea abies* induced by incubation with *Physisporinus vitreus.* Holzforschung 60, 450–454.

[11] Spolaore, P. Joannis-Cassan, C., Duran, E. & Isambert, A. (2006): Optimization of *Nannochloropsis oculata* growth using the response surface method. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 81: 1049-1056.

[12] Zurera- Cosano, G., García- Gimeno, R.M., Rodríguez-Pérez, R. & Hervás- Martínez, C. (2006): Performance of response surface model for prediction of *Leuconostoc mesenteroides* growth parameters under different experimental conditions. Food Control 17: 429-438.