

Chemische Korrosion von Holz und Holzkonstruktionen

T 2916

T 2916

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5726-X

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

Dr.-Ing. habil. Klaus Erler



An der Märchenwiese 10
D - 04277 Leipzig
Tel. 0341 / 877 43 42
FAX 0341 / 878 19 51

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
der Industrie und Handelskammer zu Leipzig
für Diagnose und Sanierung von Schäden an Holz-
konstruktionen

Vorhaben:

**Vergleichende Betrachtung
europäischer Bauprodukten-Normen
mit nationalen Bestimmungen**

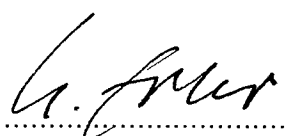
Teilprojekt:

**Chemische Korrosion
von Holz und Holzkonstruktionen
– Abschlußbericht (Studie) –**

Förderung:

- ◆ **Deutsches Institut für Bautechnik Berlin**
- ◆ **Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.**
- ◆ **Holzwirtschaft**

Leipzig, den 22.02.2000


.....
Dr.-Ing. habil. K. Erler

Gliederung

- 1. 1.Vorkommen und Definition der chemischen Korrosion bei Holz**
- 2. Bisherige Untersuchungen und Erkenntnisse**
- 3. Korrosionsarten bei Holz**
- 4. Korrosionserscheinungen bei Holz**
- 5. Aggressivitätsgrade**
- 6. Festigkeitsgeminderte Randschicht und Resttragfähigkeit**
- 7. Verhalten von Brettschichtholz bei chemisch aggressiven Einwirkungen**
- 8. Korrosionsschäden an Dachlatten und Sparren**
- 9. Korrosion durch Holzschutzmittel**
- 10. Derzeitige Bezüge in der nationalen Norm – DIN 1052 - sowie der Vornorm des Eurocode 5**
- 11. Textvorschlag zur Aufnahme in die neuen Holzbaunormen**

1. Vorkommen und Definition der chemischen Korrosion bei Holz

Holz ist ein korrosionsträger Baustoff, und deshalb haben Baukonstruktionen aus Holz bei korrosionsfördernden Einflüssen wie hoher Luftfeuchte und aggressiven Medien eine längere Nutzungsdauer als Bauteile aus Stahl oder Beton.

Derartige Bedingungen treten z.B. auf

- * in der chemischen Industrie
- * in der Landwirtschaft
- * in Düngerlagerhallen
- * in Gradierwerken
- * in alten Dachkonstruktionen bei Dachziegeleindeckung
- * bei zu häufigem oder zu hoch konzentriertem Einsatz von Holzschutzmitteln

Da auch Holz - wenngleich sehr langsam - korrodiert, ist es von technischem und wirtschaftlichem Interesse, die Korrosionsvorgänge und -geschwindigkeiten zu kennen, sowie die Wirkungen aggressiver Medien auf Holzbauteile und deren Tragfähigkeit beurteilen zu können.

Der Begriff „Korrosion“ war bei Holz bisher wenig gebräuchlich. Erst in den achtziger Jahren setzte sich für Schädigungen infolge chemischer Medien auch bei Holz dieser Begriff durch.

In Anlehnung an die allgemeine Begriffserklärung für Korrosion kann die Definition für Holzkorrosion formuliert werden:

„**Holzkorrosion** ist die von der Oberfläche ausgehende Schädigung bzw. Zerstörung des Holzes infolge chemischer und/oder chemisch-physikalischer Reaktion bei Wechselwirkung mit seiner Umgebung“.

Eine bei Holz wichtige Abgrenzung muß zu den Schädigungen durch Schadorganismen, zur sogenannten „biologischen oder biotischen Korrosion“ vorgenommen werden.

Im Betonbau wird „biogene Korrosion“ definiert als „Schädigung von Baustoffen durch von der Oberfläche ausgehende chemische Umsetzung unter Mitwirkung von Mikroorganismen“.

Es sind also auch hier wie bei den anderen Korrosionsarten Formulierungen „von der Oberfläche ausgehend“ und „unter Beteiligung von chemischen Reaktionen“ in der Definition maßgebend.

Deshalb wird die Einbeziehung von Holz-Schädigungen durch Schadorganismen (Holzinsekten, Holzpilze) in den Begriff Holzkorrosion abgelehnt.

Denn zum einen erfolgt dabei die Zerstörung nicht prinzipiell von der Oberfläche ins Innere fortschreitend, und zum zweiten sind bei Fraßschäden durch Holzinsekten keine chemischen Reaktionen im Holzbauteil beteiligt.

Deshalb sind dafür die bisherigen Begriffe biotische Schädigungen, Pilz- oder Insektenbefall oder Holzfäulnis zutreffend und sollten beibehalten werden.

2. Bisherige Untersuchungen und Erkenntnisse

Als erster, der systematische Untersuchungen an Laub- und Nadelholzproben in aggressiven Lösungen vornahm, kann **E. Mörath** genannt werden, der eine grundlegende Arbeit 1933 veröffentlichte /1/.

So stellte er die Abhängigkeit der Aggressivität gegenüber Holz von pH-Wert und von der Konzentration der Medien fest. Er formulierte auch, was allerdings so allgemein nicht zutrifft, daß die Widerstandsfähigkeit gegen Chemikalien mit steigendem spezifischem Trockengewicht zunimmt und daß die Nadelhölzer den Laubhölzern weit überlegen sind. Er lagerte fehlerfreie Holzstäbe (20 x 20 mm) 4 Wochen in aggressive Lösungen ein und stellte die Abnahme der Biegefestigkeiten der eingelagerten Hölzer fest.

Er resümiert /1, S. 54/:

„Die Korrosionswirkung der verschiedenen Lösungen ist in erster Linie von der Wasserstoffionenkonzentration abhängig und tritt bei diesen Versuchen nur an den Enden der pH-Skala in stark saurem Gebiet (unter pH = 2) und in stark alkalischem Gebiet (über pH = 11) in Erscheinung.“

F. Kollmann /2/ (im Jahre 1951) und I. Vorreiter /3/ (im Jahre 1949) nehmen ausführlicher Erkenntnisse über das Korrosionsverhalten von Holz auf.

In /2/ werden zahlreiche Agenzien bezüglich ihres Einflusses auf Laub- und Nadelholz analysiert, wobei Erfahrungen und die bis dahin relativ geringen Versuchsserien ausgewertet werden.

Seit den 20er Jahren gingen auch Forschungen direkt von der Industrie aus, vorrangig von der Papier- und Zellstoffindustrie und von speziellen chemischen Industriezweigen.

Etwa ab 1960 wurde die Aufgabe drängender, Holz als Baustoff für Gebäude unter aggressiver Belastung zu untersuchen und einen Schutz gegen diese Art Beanspruchung zu finden.

Hierzu legte das Institut für Forstwissenschaften Eberswalde mehrere Untersuchungen vor. Die erste genauere Prüfung von ausgebauten Hölzern aus einem Lokschuppen und einem Kalisalzbetrieb nahmen Lehmann und Öhlmann 1961 vor /4/. Sie führten sowohl Festigkeits- als auch chemische Untersuchungen an ausgebauten Balken durch.

Weitere Arbeiten des Institutes Eberswalde folgten Jahre später in Form von Prüfberichten /5/, /6/.

K. Seifert behandelt 1967 den chemischen Einfluß sauren Milieus auf die Holzbausubstanz /7/ und ermittelt dabei den Übergang von Pentosanen in den löslichen Zustand, den Rückgang der Gehalte an Hexosanen und stellt fest, daß die Ligninsubstanz erhalten bleibt.

W. Mönck veröffentlicht in den 70er Jahren mehrere Beiträge, die sich mit der Analyse von Schadensfällen, mit Festigkeitsprüfungen und dem Nachweis der Resttragfähigkeit älterer Konstruktionen in der chemischen Industrie befassen, z.B. /8/, /9/. Der Beitrag /9/ von 1975 enthält erstmals den Versuch, aus Zerstörungstiefen Zerstörungsraten bzw. die Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Standzeit abzuleiten. Der Verlauf der Zerstörungstiefe in Abhängigkeit von der Dauer der chemischen Einwirkung wird aufgrund fehlender Versuche und Auswertungen als etwa linear angenommen.

Sowjetische Wissenschaftler und Ingenieure befaßten sich verstärkt seit Mitte der 70er Jahre mit den Problemen aggressiver Einflüsse auf Holzkonstruktionen.

Autoren wie Leparski /10/, Chrulev /11/, /12/, Kann /13/ verfaßten mehrere Abhandlungen zu diesem Thema, wobei die gute Resistenz des Holzes besonders bei Mineraldüngerhallen nachgewiesen wird.

Polnische Wissenschaftler veröffentlichten seit 1977 Untersuchungen zum Einfluß gasförmiger Medien auf Holzeigenschaften und machten Vorschläge zur Korrosionsrate und Reduzierung der Holzquerschnitte /14/, /15/, /16/, /17/.

In /14/ werden die Veränderungen der mechanischen und chemischen Kenndaten von Holz unter der Einwirkung von aggressiven Gasen (Stickoxide, Schwefeldioxid, Chlor, Chlorwasserstoff, Ammoniak) ermittelt. Es werden Abminderungsfaktoren vorgeschlagen.

Den **Erkenntnisstand** bezüglich der Zerstörungsart und -größe durch chemisch aggressive Medien auf Nadelholz **im Jahre 1981** faßt W. Mönck wie folgt zusammen: „Trotz seiner großen Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einwirkungen unterliegt auch das Holz je nach Aggressivität der einwirkenden Stoffe, Zeitdauer der chemischen Einwirkung, Konstruktion und Holzart unterschiedlichen Schädigungen. Die Feststellung des Bauzustandes (z.B. des Zerstörungsgrades der Hölzer, der Standsicherheit) ist schwierig. Wissenschaftlich begründete Aussagen über die Zerstörungsrate der Hölzer infolge langjähriger chemischer Einwirkungen liegen noch nicht vor.“ /18, S. 179/.

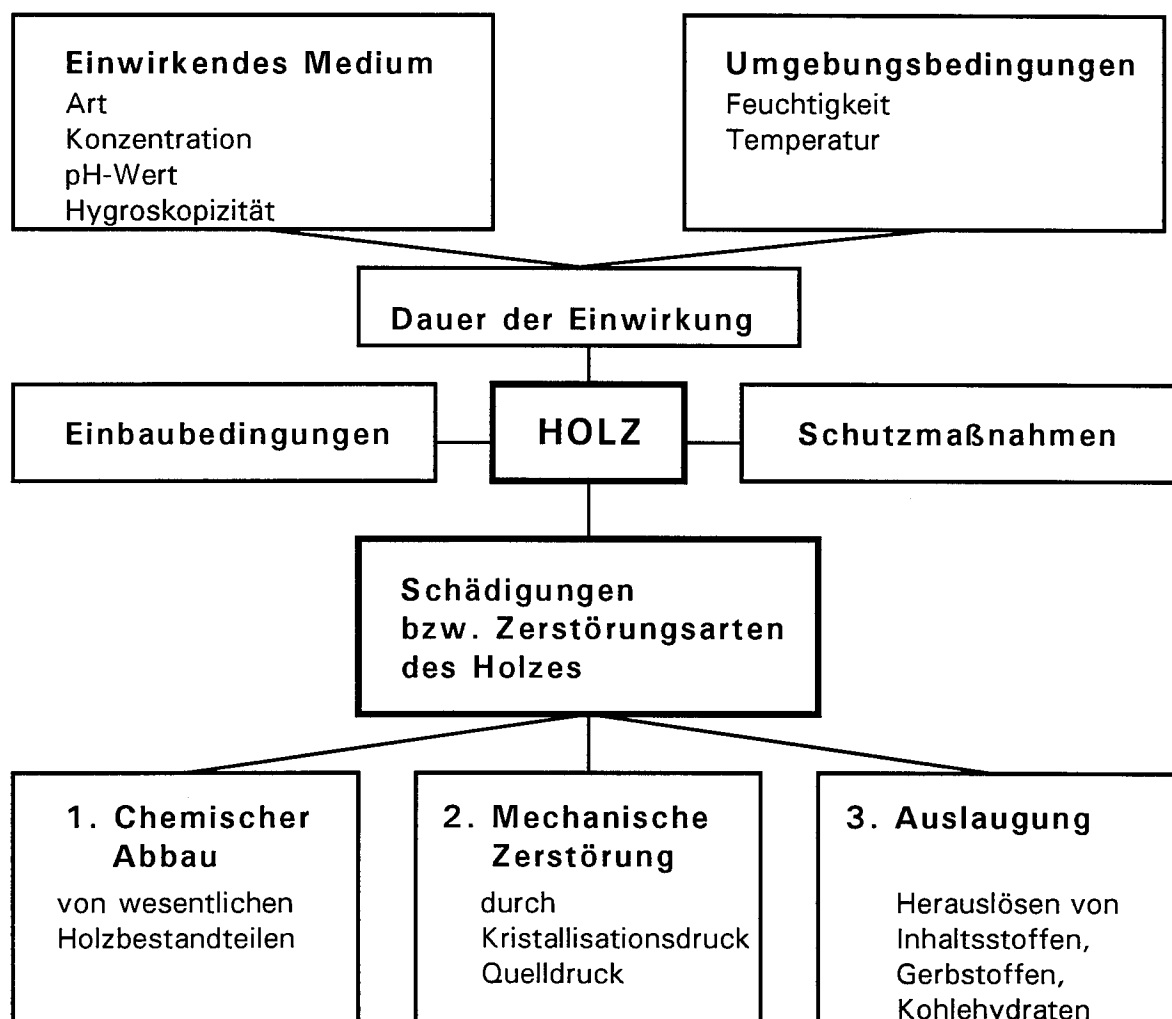
In den achtziger Jahren wurden tiefergehende und umfangreiche Untersuchungen, vor allem von deutschen Autoren, durchgeführt.

So wurden z.B. in /19/, /20/ chemische Veränderungen im Holz sowie in /21/, /22/ physikalische Änderungen bei Langzeiteinwirkung von aggressiven Medien auf Holz ermittelt. Die Korrosion von Holzbauteilen bei chemisch aggressiver Einwirkung wurde sowohl in Einlagerversuchen als auch durch Prüfung von Holzproben, die aus langjährig genutzten Gebäuden entnommen wurden, von **K. Erler** untersucht /23/, /24/, /25/.

3. Korrosionsarten bei Holz

Holz befindet sich mit seiner natürlichen Umgebung in nahezu vollkommenem chemische Gleichgewicht. Seine Lebensdauer ist deshalb bei normaler Luftfeuchte sehr hoch. Auch stärkeren chemischen Angriffen setzt Holz eine hohe Widerstandskraft entgegen. Seine Resistenz gegenüber Säuredämpfen, gegenüber verdünnten Säuren und Basen, machen es zu einem geeigneten Konstruktionswerkstoff, auch für einen Einsatz in der chemischen Industrie und in der Landwirtschaft. Über lange Zeiträume und bei starker chemischer Einwirkung erfolgt auch bei Holz eine Korrosion. Diese zerstörende Wirkung geht von der Oberfläche aus und schreitet nur langsam nach innen fort.

Die Faktoren, die bei der Korrosion von Holz eine bestimmende Rolle spielen, und die Korrosionsarten sind in einem Schema in Tafel 1 zusammengestellt.



Tafel 1: Einwirkung chemischer Medien auf Holz; Zerstörungsarten

Nachfolgend werden Erläuterungen zu den Korrosionsarten gegeben.

Chemischer Abbau von Holzbestandteilen

Die Hemizellulosen und dann das Lignin werden durch die meisten Agenzien eher und stärker abgebaut als Zellulose. Aufgrund der Struktur und der Zusammensetzung des Holzes wird Kernholz wesentlich langsamer abgebaut als das Splintholz und generell nimmt die Zerstörungsrate mit zunehmender Tiefe (von der Oberfläche aus) ab. Nadelholz wird durch die meisten chemischen Agenzien, besonders aber durch Laugen, langsamer zerstört als Laubholz.

Mechanische Zerstörung

Aufgrund der Sorptionseigenschaft des Holzes erfolgt aus der Umgebung in Form von hoher Luftfeuchte, Gasen und Lösungen, auch gelösten Salzen, eine Aufnahme von Wasser, die die Zellsubstanz zur Quellung bzw. bei Feuchteabnahme zur Volumenminderung bringt. Bei häufigem Wechsel solcher Vorgänge oder bei Einlagerung stark hygroskopischer Stoffe erhöht sich die zerstörende Wirkung, und es ergeben sich physikalische Veränderungen in der Zellsubstanz. Die starken Quellungen und eingedrungene Kristalle zerstören Zellverband oder Zellwände.

So ist z.B. auch das streifenartige Lösen von Holz in Salzlagerhallen vorrangig auf diese Wirkung zurückzuführen.

Auslaugung

Ein Prozeß des Herauslösen von Substanzen, z.B. Nebenbestandteilen, wie Mineralien, Harze, Alkohole, Stärke u.ä., durch Wasser, besonders bei hohen Temperaturen. Hier sind chemische und physikalische Prozesse beteiligt. In der Praxis vorkommend in chemischen Betrieben, z.B. bei Behältern, Fußbodenbelägen u.ä.

Die Auslaugung tritt bei Baukonstruktionen selten, nur bei entsprechender Produktionstechnologie oder ständig unter Wasser in Erscheinung.

Die **aggressive Wirkung** auf Holz ist je nach Aggregatzustand des Mediums vorrangig von folgenden Faktoren abhängig:

Aggregatzustand	maßgebende Faktoren
gasförmige Medien	Art, Konzentration, Luftfeuchte
flüssige Medien	pH-Wert, Konzentration, Dissoziationsgrad
feste Medien	Art, Löslichkeit in Wasser, Hygroskopizität, pH-Wert in Lösung, Luftfeuchte

Tafel 2 Maßgebende Faktoren für die Aggressivität von Medien auf Holz

4. Korrosionserscheinungen bei Holz

Die **Korrosionserscheinungen** sind bei den meisten auf Holz aggressiv wirkenden Agenzien **ähnlich**:

- Braun- oder Dunkelgelb-Färbung, die von den Randzonen aus in das Innere der Querschnitte vordringt
- erhöhter Feuchtegehalt in den Randbereichen
- Einlagerung von Salzkristallen oder Säurerestionen
- Auffasern bis zu pulvriger Auflösung der oberflächennahen Holzsubstanz
- Ablösen von Holzstreifen entlang der Jahrringgrenzen bei bestimmten Bedingungen
- verringerte Festigkeiten in den Randzonen
- kurzfasrige Brüche bei Säure-Einwirkung

Die Querschnitte von Holzbauteilen aus Gebäuden, die langjährig chemischem Einfluß ausgesetzt waren, weisen im allgemeinen eine **Verfärbung der Randbereiche** auf. Diese Verfärbung ist bei den meisten Medien dunkelgelb bis braun, auf jeden Fall dunkler als die inneren Querschnittsbereiche.

Inwieweit können die Breiten der verfärbten Randbereiche zu Rückschlüssen auf die Festigkeit bzw. zur Beurteilung der Tragfähigkeit herangezogen werden?

Aufgrund der Untersuchungen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

1. Die durch Eindringen und Einlagern chemischer Agenzien, insbesondere von Salzen, bewirkten Verfärbungszonen stellen ein Kennzeichen für die Einlagerung dar. Die Verfärbungsbreite ist abhängig von Luftfeuchte, Art des Mediums und Einwirkdauer.
2. Die Verfärbungszonen sind im ganzen Umfang vorhanden, sie sind ähnlich breit an den Seitenkanten sowie an Ober- und Unterseite.
3. Die Breiten der Verfärbungszonen liegen bei einer Nutzzeit des Gebäudes von etwa 60 Jahren i.M. bei 20 mm. Die Streuung ist allerdings je nach Einbauort, Ablagermenge und Luftfeuchte relativ groß.
4. Die Eindringtiefen bei Kiefernspiltholz sind erheblich größer als bei Fichtenholz!
5. Wie aus Festigkeitsprüfungen deutlich wird, ist die Verfärbungsgrenze keine Grenze eines stark festigkeitsgeminderten Randbereiches, doch beginnt ab dieser Grenze die Festigkeitsabnahme.

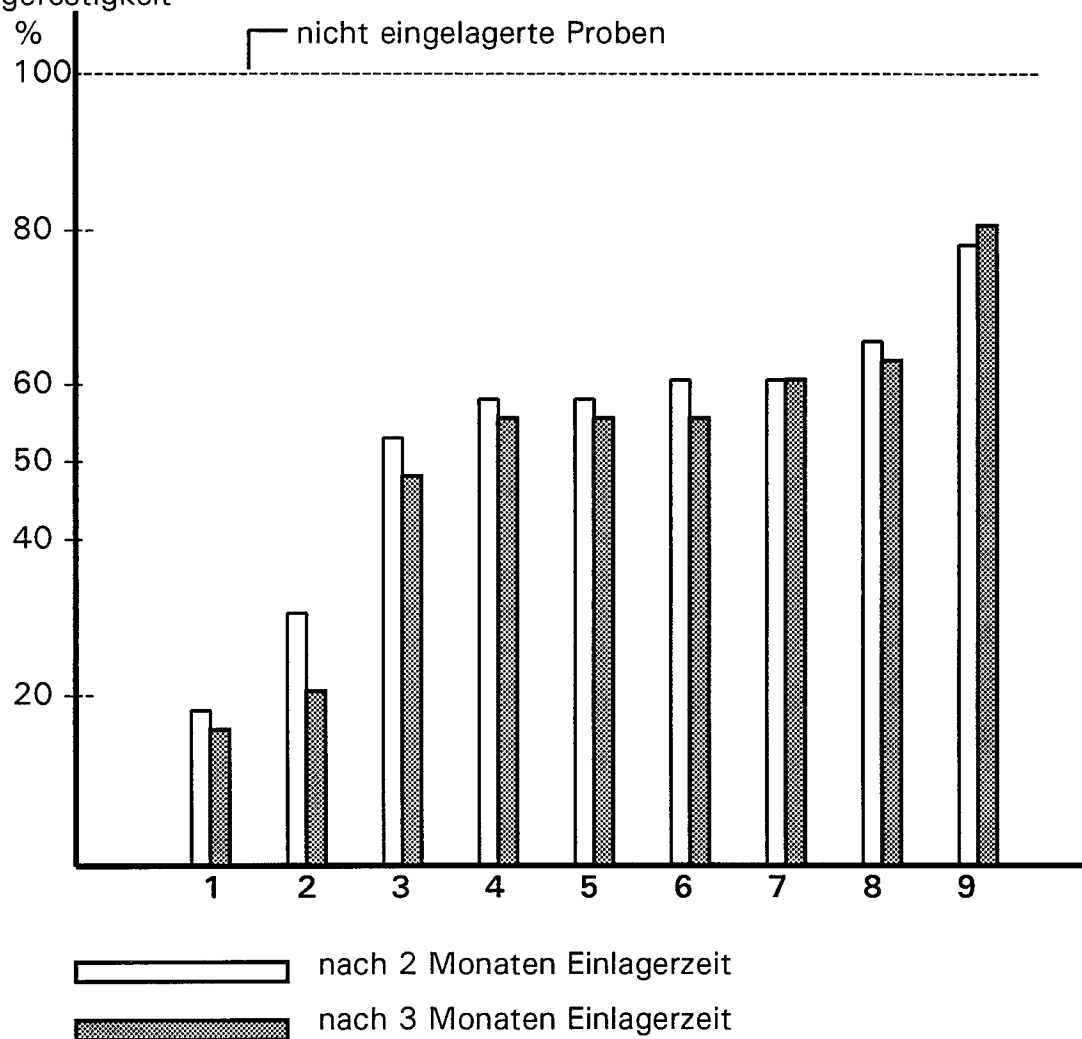
5. Aggressivitätsgrade

Die Aggressivität der Medien wurde aufgrund der Untersuchungen, insbesondere der reduzierten Querschnitte, bedingt durch die nichttragfähige korrodierte Randzone, ermittelt. Es wurden dabei Aggressivitätsklassen gebildet.

Tafel 3 zeigt die Aggressivität einiger häufig vorkommender Lösungen.

Bei Gasen, Dämpfen und körnigen Lagerstoffen spielt die Luftfeuchte eine große Rolle. Ausgewählte Gase und feste Medien werden deshalb mit Feuchtebereichen in Beanspruchungsgrade BG eingeordnet.

vorhandene
Biegefestigkeit



Tafel 3 Aggressivität einiger wichtiger Lösungen gegenüber Nadelholz; verdeutlicht durch Abnahme der Biege-Tragfähigkeit
 1-Salzsäure, 2-Salpetersäure, 3-Harnstoff, 4-Natronlauge, 5-Superphosphat, 6-Kaliumchlorid, 7-Schwefelsäure, 8-Ammonsulfat, 9-Wasserstoffperoxid
 BG 1: Medium 8 und 9; BG 2: Medium 3 bis 7; BG 3: Medium 1 und 2

Es wurden 3 Feuchteklassen gebildet:

Feuchte- klasse	relative Luftfeuchte φ	Beispiele für Gebäude
FK 1	< 65%	
FK 2	65%...85%	Industrie mit Löse- und Tränk prozessen, Stallanlagen
FK 3	> 85%	Naßräume, hoher Dampfanfall

Tafel 4 Feuchteklassen

Die gewählten Feuchtebereiche FK 1, FK 2 und FK 3 entsprechen den Nutzungsklassen NK 1, NK 2 und NK 3 in der europäischen Norm Eurocode 5 „Holzbauwerke“. Die Beanspruchungsgrade BG sind in Tafel 5 definiert.

Beanspruchungsgrad	Erläuterung
BG I	nicht oder schwach aggressiv
BG II	mittel aggressiv
BG III	stark aggressiv

Tafel 5 Beanspruchungsgrade BG

Die Einordnung einiger, häufig vorkommender gasförmiger und fester Medien weisen Tafel 6 und Tafel 7 aus.

Medium	Konzentration	Beanspruchungsgrade BG bei		
		FK 1	FK 2	FK 3
Formaldehyd		I	I	I
Ammoniak		I	I	I
Schwefeloxid	0,2...10 mg/m ³	I	I	I
	10...200 mg/m ³	I	II	II
Stickstoffoxid	0,1...5 mg/m ³	I	I	I
	5...25 mg/m ³	I	II	II
	> 25 mg/m ³	II	II	II
Chlorwasserstoff	0,05...1 mg/m ³	I	I	I
	1...10 mg/m ³	I	II	II
	> 10 mg/m ³	II	II	II
Chlor	0,02...1 mg/m ³	I	I	I
	1.....5 mg/m ³	I	II	II
	> 5 mg/m ³	II	II	II

Tafel 6 Gasförmige Medien und Beanspruchungsgrade

Medium	Beanspruchungsgrad BG bei			Beispiele von Gebäudenutzungen
	FK 1	FK 2	FK 3	
Kalidünger Harnstoff	I I	II II	II II	BG 1: * Produktion Kaliindustrie Endprodukt-Lager
Superphosphat Natriumchlorid Ammonsulfat	I I I	I I	II I	BG II: * Rohsalzlager mit FK 2 * Düngerlagerhallen mit FK 2

Tafel 7 Feste Medien und Beanspruchungsgrade

6. Festigkeitsgeminderte Randschicht und Resttragfähigkeit

Es zeigt sich bei allen Bedingungen eine Festigkeitsreduzierung in relativ schmalen Randzonen, während schon in 10 bis 15 mm Tiefe fast Werte ungeschädigten Holzes erreicht werden.

Aufgrund von Vergleichsrechnungen wurden folgende **Gesetzmäßigkeiten** erkannt:

- Es ergibt sich in Abhängigkeit von der Einwirkdauer (Gebäude-Nutzzeit) und der vorherrschenden Luftfeuchte eine stark geschädigte und erheblich festigkeitsgeminderte Randzone.
- Die inneren Bereiche entsprechen nahezu ungeschädigtem Holz.
- Bei Tragfähigkeitsbetrachtungen korrosionsgeschädigter Holzbauteile kann von der Annahme einer korrodierten, nicht mehr tragfähigen Randschicht der Breite d ausgegangen werden.

Derartige Festigkeitsverläufe wurden an über 100 Querschnitten und zwar an Balkenscheiben und Bohrkernen ermittelt und ausgewertet. Da die Luftfeuchte und damit der Transport der Salze und anderer aggressiver Ionen in die Holzquerschnitte für die Korrosionsgeschwindigkeit maßgebend ist, wurden die drei Luftfeuchtebereiche festgelegt, die verschiedene Korrosionsraten bewirken (Tafel 4).

Zur Ermittlung der Festigkeitsänderung wurden sowohl Holzstäbe nach Einlagerung in aggressiven Lösungen als auch Holzproben geprüft, die aus mehrere Jahrzehnte aggressiv belasteten Gebäudekonstruktionen entnommen waren.

Prüfungen dieser Art, bei der aus Querschnitten ausgebaute Holzbauteile kleine Scheiben herausgeschnitten, mit dem Dynstatgerät auf Biegefestigkeit geprüft und dann Aussagen zur Festigkeitsverteilung innerhalb eines Holzbauteiles gemacht werden können, wurden erstmalig in größerem Rahmen durchgeführt. Insbesondere wurde diese Methode auch auf Bohrkern ausgedehnt und so mit einer zerstörungssarmen Methode mit relativ geringem Aufwand eine genaue Aussage über die Festigkeitsverteilung erreicht.

Aus über eintausend Meßwerten wurden Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. So konnten für die **Festigkeitsverläufe** vom Querschnittsrand ins Querschnittsinnere Regressionsfunktionen aufgestellt werden. Eine gute Angleichung an die Meßdaten wurde mit logarithmischen Funktionen erreicht:

$$\sigma_b = A + B \cdot t + C \cdot \ln(t)$$

Es bedeuten:

σ_b - Biegebeanspruchung in N/mm²

t - Abstand vom Querschnittsrand in mm

Als wesentliche Parameter für die Änderung der Biegefestigkeiten wurden die Dauer der Einwirkung, also die Nutzzeit der Gebäude, und die Luftfeuchte in den Gebäuden erkannt und danach Auswertungen vorgenommen.

So wurden aus mehreren Betrieben der Kaliindustrie Regressionskurven für die Biegefestigkeit für verschiedene Gebäudealter (= Nutzzeiten) und verschiedene Luftfeuchten ermittelt.

Bei Tragfähigkeitsberechnungen korrosionsgeschädigter Holzbauteile kann von der Annahme einer korrodierten, nicht mehr tragfähigen Randschicht der Breite d ausgegangen werden.

Die Ermittlung der Korrosionsschichtdicke d ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Mittelwert-Geraden der 0,75fachen Biegefestigkeiten im inneren, ungeschädigten Bereich mit der Mittelwert-Linie der Biegefestigkeiten im Randbereich.

Die Ableitung findet sich in /23/.

Ein zusammenfassendes Ergebnis der Untersuchungen an Proben aus der Düngesalz-Industrie zeigt Tafel 8.

Es ist hier die Zunahme der Korrosionsschichtdicke d im Laufe der zunehmenden Nutzzeit des Gebäudes (Korrosionsrate) bei verschiedenen Luftfeuchtebereichen aufgetragen. Diese Grafik enthält folgende Informationen:

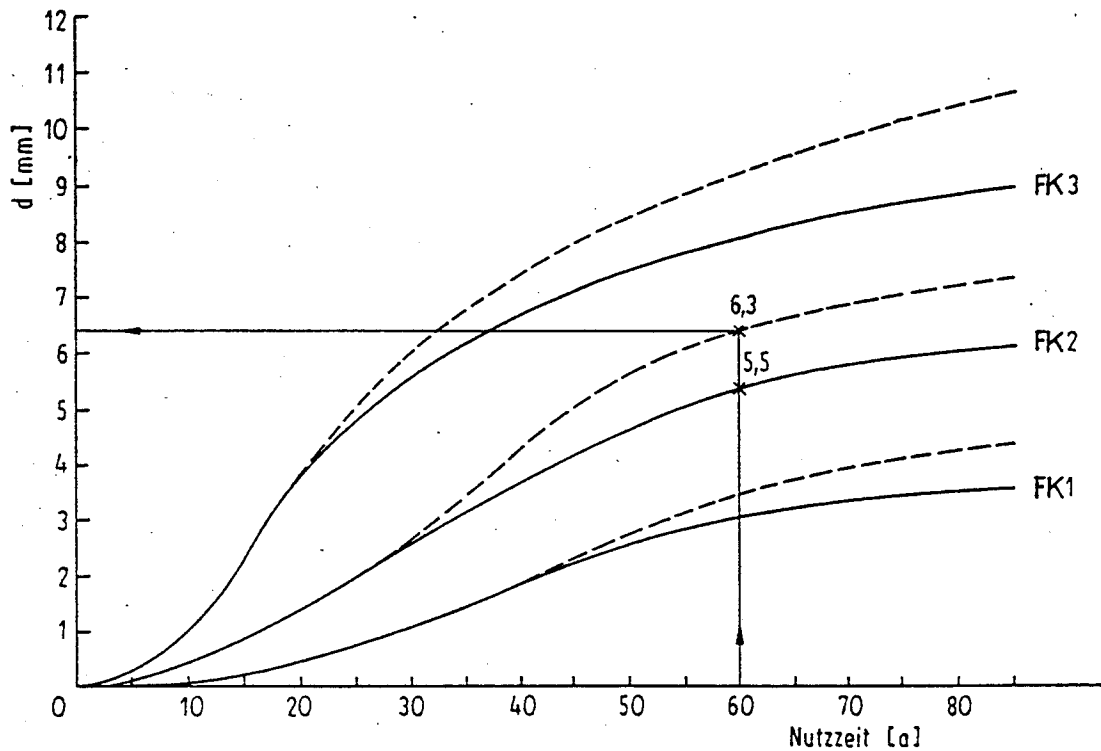
1. Der Verlauf der Korrosionsrate ist nicht linear, sondern weist in den ersten 15 Jahren geringe Werte aus, nimmt dann unter anderem aufgrund der Hygroskopizität der schon eingelagerten Salze stärker zu, um danach, ab etwa 40 Jahren Nutzzeit, wieder geringer zu werden. Das bedeutet, daß ab etwa 40 Jahren Einwirkzeit die Korrosionsrate abnimmt.

2. Mit dieser Grafik kann die Korrosionsschichtdicke d bei Tragfähigkeitsbeurteilungen von Holzkonstruktionen für bestimmte Nutzzeiten und Luftfeuchtebereiche ermittelt werden. Die Holzquerschnitte sind dann umlaufend um die Breite d zu reduzieren und damit die Tragfähigkeitsnachweise zu führen.

In Tafel 8 wird als Beispiel für ein Gebäude mit einer Standzeit von 60 Jahren und dem Luftfeuchtebereich FK 2 [$\Phi = 65...85\%$] bei Berücksichtigung der zerfaserten, wolleartigen Oberfläche eine nicht mehr tragfähige Randschicht der Dicke $d \approx 6$ mm auf der Ordinate gefunden.

Es ist also möglich, die nicht mehr tragfähige Randzone durch Prüfung von entnommenen Holzproben genau zu ermitteln oder, wie beschrieben, aus einer Grafik als Näherung zu entnehmen.

Mit den **um d reduzierten Holzquerschnitten** kann die **Rest-Tragfähigkeit** vorhandener Konstruktionen **nachgewiesen werden**.



Tafel 8 Zunahme der Korrosionsschichtdicke d im Laufe der Nutzzeit (Korrosionsrate) bei Salzeinwirkung und verschiedener Luftfeuchten.

—— mit wolliger bzw. — ohne wollige Oberflächenschicht

Bei **Neuplanungen** kann eine **Abminderung der Querschnitte** vereinfacht ähnlich der bei Brandeinwirkung vorgenommen werden.

Das **Vorgehen** bei Neuplanungen:

- Feststellung der vorrangig einwirkenden Medien
- Einschätzung der mittleren relativen Luftfeuchte und damit Festlegung der Feuchtekategorie FK
- Einordnung der Nutzungsbedingungen in die Beanspruchungsgrade BG (z.B. Tafel 3, 6 und 7)
- Abminderung des tragfähigen Querschnittes mit einer umlaufenden zerstörten Randschicht

7. Verhalten von Brettschichtholz bei chemisch aggressiven Einwirkungen

Untersuchungen an geklebten Brettschichtholz-Bauteilen bei chemisch aggressiver Einwirkung liegen in relativ geringer Zahl vor.

Der Einfluß von gasförmigen Medien auf Brettschichtholz wurde von der polnischen Wissenschaftlerin Gos untersucht /14/, /16/, /17/. Diese Laborversuche zeigen die Relationen des Einflusses der Gase HCl, NO₂, Cl₂, SO₂, NH₃ auf, sowohl auf das Nadelholz als auch auf den Resorcinharzkleber. Dabei wurde festgestellt, daß Cl₂ und HCl sowohl das Holz als auch die Klebefugen am stärksten schädigen, am wenigsten NH₃ und SO₂.

In /26/ werden Überprüfungen des Bauzustandes von 18 Düngemittel-Lagerhallen aus Brettschichtholz-Konstruktionen vorgelegt. Die Standzeit der Hallen lag im Mittel bei 10 Jahren.

Es wurden Bohrkern entnommen und mit entsprechenden **Nachweisreagenzien** die **Eindringtiefe** der Medien in das Holz nachgewiesen.

Einige Erkenntnisse aus der Analyse:

- Bauteile aus geklebten Brettschichtholz sind bei Einwirkung aggressiver Medien, insbesondere Mineraldüngemitteln, gut resistent und zeigen bis mindestens 12 Jahre Nutzzeit außer Verfärbungen (leichte Braunfärbung) und Korrosion an den Stahlverbindungsteilen keine Schädigungen.
- Außer dem vorgeschriebenen chemischen Holzschutz waren in diesem Zeitraum keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen erforderlich.
- Befall durch Schadorganismen konnte nicht festgestellt werden. Ausnahme war geringer Moderfäulebefall an Stützenfüßen in 2 Objekten.
- Hohe Holzfeuchten traten nur an den Holzteilen auf, die Kontakt mit Harnstoffdünger hatten.
- Die Unterspannungen aus Stahl wiesen schon nach 4 bis 5 Jahren Nutzzeit Korrosion auf und nach 12 Jahren erhebliche Korrosion, die z.T. eine Auswechslung erforderlich macht.
- Chrulev /11/, /12/ teilt Erkenntnisse mit Düngelagerhallen aus Brettschichtholz in der Sowjetunion mit, die ähnliches aussagen.

Eine neuere Untersuchung auf dem Gebiet der ostdeutschen Bundesländer legt **W. Schöne** vor /28/.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen an Brettschichtholz-Konstruktionen unter besonderer chemisch aggressiver Umgebung dargestellt. Es handelt sich vorrangig um Festigkeitsprüfungen und mikroskopische Darstellungen aus Proben von bis zu 30 Jahre alten Hallen aus Brettschichtholz. Die Standzeit der untersuchten Konstruktionen betrug 8 bis 33 Jahre. Von 18 untersuchten Hallen waren 15 chemisch aggressiv hoch belastet, vor allen Dingen als Düngesalz-Lagerhallen, Hallen in der Kali-Industrie und der chemischen Industrie.

Es wurden 541 Bohrkernsowie 120 genormte Vergleichsprüfkörper untersucht. Dies erfolgte in den Jahren 1991 und 1992. Es sollten sowohl Schädigungen in den äußeren Zonen des Holzes als auch die Leimfugenqualität nach längeren Standzeiten ermittelt werden. Als Kleber für das Brettschichtholz wurde Phenolformaldehyd-Harz eingesetzt, zu dessen Polykondensation eine Säure zugesetzt wurde. Es war hier also zusätzlich die Gefährdung durch Reste freier Säuren gegeben.

Die entnommenen Proben aus dem Brettschichtholz wurden bezüglich ihrer Scherfestigkeit, ihrer Zugfestigkeit quer zur Faser, sowie mikroskopisch erkennbarer Schädigungen untersucht.

Die Ergebnisse waren folgende:

- 1 Visuell konnte bei nahezu allen Konstruktionen ein guter Zustand festgestellt werden.
2. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten ein gutes Eindringen des Klebers in die anliegenden Holzgefäße. Die mikroskopischen Bilder ergaben keine festigkeitsmindernden Schädigungen infolge der Einwirkung aggressiver Medien.
3. Als Grundlage zum Vergleich der Festigkeiten wurden Wareneingangsfestigkeiten mit den Festigkeiten der Proben nach den entsprechend langen Standzeiten verglichen. Es zeigte sich sogar eine gering höhere Festigkeit der entnommenen Bohrkerns.

Damit ist erwiesen, daß in den untersuchten Brettschichtholz-Konstruktionen auch bis zu 30jähriger Nutzung unter chemisch aggressiven Bedingungen kein Festigkeitsverlust eingetreten ist. Auch eine schädigende Wirkung des säurehärtenden Phenolharzleimes auf die Struktur des Holzes oder die Güte der Leimverbindung konnte nicht nachgewiesen werden.

Alle vorgenannten Untersuchungen belegen eine gute Resistenz von Bauteilen aus Brettschichtholz einschließlich der Klebefugen mit Phenolharzkleber gegenüber den meisten chemisch aggressiven Medien. Diese Resistenz ist mindestens in den ersten 20 bis 30 Jahren Standzeit höher gegenüber Bauteilen aus Vollholz. Bedingt ist dies durch die im allgemeinen großen kompakten Querschnitte, den gleichmäßigen Trocknungsgrad, seltene Risse sowie guter Widerstandsfähigkeit der Kleber. Aufgrund sowjetischer, polnischer und eigener Untersuchungen werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Die chemische Korrosion von Bauteilen aus Brettschichtholz erfolgt im allgemeinen langsamer als bei Bauteilen aus Vollholz
- Ein chemischer Schutz der Brettschichtholzteile hängt von der Art des aggressiven Mediums und der Luftfeuchte im Gebäude ab.
Bei Luftfeuchten kleiner als 65% ist bei luftumspülten Bauteilen kein Schutz erforderlich. Eine Schutzmittel-Tränkung sollten jedoch Stirnseiten, Fußbereiche von Stützen und Kontaktflächen zu Fundamenten oder aggressiven Lagergütern erhalten.
Bei Luftfeuchten über 65% und hygroskopischen Medien sollte eine Schutztränkung erfolgen.

In der ehemaligen Sowjetunion ist seit 1976 ein zusätzlicher Schutz von Brettschichtholzkonstruktionen, differenziert nach vorherrschender Luftfeuchte und aggressiver Belastung, vorgeschrieben und zwar in SNIP III-19-75.

Als Schutzmittel können ölige Mittel und neutralisierende Spezialemulsionen empfohlen werden. Um langfristig einen wirksamen Schutz zu erreichen, sind die Mittel im Tränkverfahren oder noch besser im Kesseldruckverfahren einzubringen.

8. Korrosionsschäden an Dachlatten und Sparren bei Ziegeldächern

Die bei älteren Dächern mit Dachziegel-Eindeckung zu beobachtende Holzkorrosion wird oft als Mazeration bezeichnet. Dieser Ausdruck bezeichnet jedoch nur eine spezielle Art der Holzkorrosion und zwar die Lösung der Holzzellen voneinander durch die Zerstörung der Mittellamellen. Die hier auftretende Zerstörung ist auf verschiedene Prozesse zurückzuführen. Der Oberbegriff Holzkorrosion ist hier zutreffend.

Maßgebend für die Dachlatten-Korrosion sind Salzbildungen aus dem Dachziegelmaterial, z.B. Magnesiumsulfate, bzw. aus dem Verstrichmörtel in Form von Kalziumhydroxid, Stoffe, die infolge Durchfeuchtung oder über die feuchte Luft in die Holzbauteile eindringen. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch Luftverschmutzungen, z.B. mit Schwefeldioxid.

Die jahrzehntelange Einwirkung bewirkt das Zerfasern der Holzoberfläche bis zu wolleartiger Struktur. Meist dringt diese Zerstörung nur 2 bis 3 mm in das Holz ein. Es sind die vorhandenen Holzquerschnitte maßgebend.

Bei Dachlatten mit ursprünglich nur 3 x 5 cm Querschnitt und relativ großen Sparrenabständen ist meist eine Neulattung erforderlich. Bei geringer Korrosion sind die Salze mit Drahtbürsten o.ä. zu entfernen. Bei stärkerer Schädigung sind die oberflächennahen Zonen (nur wenige Millimeter) abzufräsen und zu entsorgen.

Bei anhaltend relativ hoher Luftfeuchte oder bei Sichtbarbleiben der Hölzer kann noch eine Oberflächenbehandlung erfolgen. Dafür werden Spezialemulsionen angeboten, die eine neutralisierende und zugleich schützende Wirkung haben.

9. Korrosion durch Holzschutzmittel

Wurden salzige Holzschutzmittel in der Vergangenheit zu häufig oder in zu hoher Konzentration auf Holzbauteile, z.B. Dachtragwerke, aufgebracht, kann, besonders bei hohen Luftfeuchten, eine erhebliche Holzkorrosion auftreten. Ein genauer Nachweis kann durch die Entnahme und Prüfung von Bohrkernen erfolgen.

Auch hier ist die geschädigte Holzoberfläche zu entfernen. Bei tiefer Eindringung können Oberflächenfräsen eingesetzt werden. Bei diesen Arbeiten sind die Arbeits- und Gesundheitsschutzbestimmungen zu beachten; so sind unbedingt Schutzmasken und Schutzkleidung zu tragen!

Einer weiteren Schutzbehandlung bedarf es dann nicht, da Salze auch tiefer eingedrungen sind. Die Luftfeuchte sollte möglichst niedrig gehalten werden und es ist für eine Durchlüftung zu sorgen.

10. Derzeitige Bezüge in der nationalen Norm – DIN 1052 – sowie in der Vornorm des Eurocode 5

In der derzeit noch gültigen Norm DIN 1052 – Holzbauwerke – vom April 1988 sind Hinweise auf Schwächungen von Bauholz infolge chemischer Korrosion nicht enthalten.

10.1. DIN 1052 (Entwurf September 1999)

Im Entwurf der DIN 1052 vom September 1999 /29/ wird in Abschnitt 5 „Anforderungen an die Dauerhaftigkeit“ an 2 Stellen auf die chemische Einwirkung auf Holz und metallische Baustoffe bzw. Verbindungsmittel hingewiesen.

In **Abschnitt 5.1.** wird formuliert:

„(1) Die Forderung nach einem angemessenen dauerhaften Tragwerk gilt als erfüllt, wenn es während der vorgesehenen Lebensdauer seine Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften und mit einem vertretbaren Instandhaltungsaufwand behält.

(2) Zur Sicherstellung dieser Dauerhaftigkeit muß den möglichen Schadeinflüssen auf die Baustoffe Rechnung getragen werden.

(3) Dazu sind schon im Entwurfsstadium die Umweltbedingungen des Bauwerkes abzuschätzen, um ihre Bedeutung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit beurteilen und ausreichende Vorkehrungen zum Schutz der Baustoffe treffen zu können.

(4) Die wichtigsten Schadeinflüsse sind biologische Einwirkungen (z.B. Pilz- oder Insektenbefall) auf die Holzbaustoffe und chemische Einwirkungen (z.B. Korrosion) auf die metallischen Baustoffe.

(5) Als Vorkehrungen kommen die Auswahl geeigneter Baustoffe mit natürlicher Dauerhaftigkeit, baulich-konstruktive Schutzmaßnahmen sowie Schutzmaßnahmen für die Baustoffe bzw. Baustoffoberflächen in Betracht.“

Im **Abschnitt 5.2.** wird allgemein auf den baulich-konstruktiven Holzschutz, auf die natürliche Dauerhaftigkeit von Holzarten sowie die Einhaltung von Einbaufeuchten eingegangen.

Im **Abschnitt 5.3.** werden Forderungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von metallischen Bauteilen und Verbindungsmitteln aufgeführt.

Es wird dort formuliert:

„(1) Die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von metallischen Bauteilen und Verbindungsmitteln erfordert Maßnahmen gegen Korrosion, die der zu erwartenden Beanspruchung genügen.

(2) Als Maßnahmen gegen Korrosion kommen z.B. Metallüberzüge und/oder Beschichtungen oder die Verwendung geeigneter nichtrostender Stähle in Betracht.

(3) Beispiele für Korrosionsschutzmaßnahmen sind – in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse und der Korrosionsbelastung – in Tabelle 5.1 angegeben. Andere, gleichwertige Maßnahmen sind zulässig.

(4) Korrosionsgefahr kann auch auftreten bei Kontakt mit gerbstoffreichen Hölzern (z.B. Eiche) und mit imprägnierten Hölzern. In diesen Fällen sollten die Mindestanforderungen nach Tabelle 5.1, Spalte 3 zugrunde gelegt werden.“

Es wird also allgemein darauf hingewiesen, daß „die **Umweltbedingungen** des Bauwerkes schon im Entwurfsstadium **abzuschätzen** sind, um ihre Bedeutung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit **beurteilen und ausreichende Vorkehrungen zum Schutz** der Baustoffe treffen zu können.“

Im weiteren werden jedoch chemische Einwirkungen (z.B. Korrosion) in den Abschnitten 5.1. und 5.3. **nur auf metallische Bauteile und Verbindungsmittel** bezogen und der Einfluß auf Holzbauteile wird nicht erwähnt.

10.2. Eurocode 5 – ENV 1995 – 1 – 1 /30/

In der Vornorm ENV 1995 – 1 – 1 werden weitgehend die bezüglichen oben zitierten Formulierungen der DIN 1052 – E vorgegeben. Sie sind im Abschnitt 2.4. Dauerhaftigkeit enthalten.

Unter Pkt. 2.4.1. wird „die Berücksichtigung der voraussichtlichen Umweltbedingungen“ gefordert und unter Pkt. 2.4.3. wird auf den Widerstand gegen Korrosion bei metallischen Verbindungsmitteln eingegangen.

Auch hier ist ein Hinweis zur Korrosion von Holzbauteilen nicht enthalten.

11. Textvorschlag zur Aufnahme in die neuen Holzschutznormen

Gegenüber den meisten chemisch aggressiven Medien ist Holz gut resistent, doch auch Holz erleidet in seinen Randzonen bei langjähriger derartiger Einwirkung strukturelle und chemische Veränderungen und damit Schädigungen.

Die Erfassung derartiger Einflüsse bei entsprechenden Umweltbedingungen kann bei der **Bemessung der Holzquerschnitte**

- durch Modifikationsfaktoren (= Anpassungsfaktoren) oder
- durch Querschnittsreduzierungen erfolgen.

Beide Möglichkeiten wurden nach zahlreichen Prüfungen an eingebauten Hölzern und nach Vergleichsrechnungen vom Autor der Studie auf der 22. Jahrestagung der Arbeitsgruppe W 18 A „Timber Structures des CIB im Jahre 1989 in Berlin vorgestellt /31/.

Prof. Larsen und Prof. Ehlbeck empfahlen, die einfachere und trotzdem genaue Variante durch Abzug einer geschädigten Randzone, d.h. eine konkrete Reduzierung der Holzquerschnitte, zu präzisieren.

Nach weiteren Auswertungen und Verweis auf die Abschnitte 5 und 6 dieser Studie kann festgestellt werden:

Es hat sich für die meisten Praxisfälle erwiesen, daß der Beanspruchungsgrad II relevant ist.

Die Auswertung der Grafik in Tafel 8 ergibt genähert folgende **festigkeitsgeminderte Randschichtdicke d**

bis zu einer Gebäudenutzzeit von 75 Jahren (siehe Tafel 9):

Nutzungs- klasse	Nutzdauer [Jahre]				
	15	30	45	60	75
NK 1	-	-	2	3	3,5
NK 2	1	2	4	6	7
NK 3	2	5	7	8	9

Tafel 9 Umlaufende Reduzierung der Holzquerschnitte aus Nadelholz um die Breite d in /mm/ in Abhängigkeit von der Nutzdauer (FK 2 = NK 2 des Eurocode 5)

Bei Tragfähigkeitsberechnungen korrosionsgeschädigter Holzbauteile kann von der Annahme einer korrodierten, nicht mehr tragfähigen Randschicht der Breite d ausgegangen werden.

Tafel 8 enthält dazu folgende Informationen:

1. Der Verlauf der Korrosionsrate ist nicht linear, sondern weist in den ersten 15 Jahren geringe Werte aus, nimmt dann unter anderem aufgrund der Hygroskopizität der schon eingelagerten Salze stärker zu, um danach, ab etwa 40 Jahren Nutzzeit, wieder geringer zu werden. Das bedeutet, daß ab etwa 40 Jahren Einwirkzeit die Korrosionsrate abnimmt.

2. Mit dieser Grafik kann die Korrosionsschichtdicke d bei Tragfähigkeitsbeurteilungen von Holzkonstruktionen für bestimmte Nutzzeiten und Luftfeuchtebereiche ermittelt werden. Die Holzquerschnitte sind dann umlaufend um die Breite d zu reduzieren und damit die Tragfähigkeitsnachweise zu führen.

In Tafel 8 wird als Beispiel für ein Gebäude mit einer Standzeit von 60 Jahren und dem Luftfeuchtebereich FK 2 [$\Phi = 65...85\%$] bei Berücksichtigung der zerfaserten, wolleartigen Oberfläche eine nicht mehr tragfähige Randschicht der Dicke $d \approx 6$ mm auf der Ordinate gefunden.

Es ist also möglich, die nicht mehr tragfähige Randzone durch Prüfung von entnommenen Holzproben genau zu ermitteln oder, wie beschrieben, aus einer Grafik als Näherung zu entnehmen.

Mit den **um d reduzierten Holzquerschnitten** kann die **Rest-Tragfähigkeit** vorhandener Konstruktionen **nachgewiesen werden**.

Das Vorgehen bei Neuplanungen:

- Feststellung der vorrangig einwirkenden Medien
- Einschätzung der mittleren relativen Luftfeuchte und damit Festlegung der Feuchteklasse FK (= Nutzklasse)
- Einordnung der Nutzungsbedingungen in die Beanspruchungsgrade BG
- Abminderung des tragfähigen Querschnittes mit einer umlaufenden zerstörten Randschicht d

Für die häufigsten Fälle der Praxis kann weiter **vereinfacht** werden:

- es wird Beanspruchungsgrad II zugrundegelegt
- es wird eine Nutzdauer der Holzbauwerke von 75 Jahren zugrundegelegt

Mit Auswertung der obigen Angaben kann die Bemessung bei Neuplanungen durch Verringerung der Querschnitte vorgenommen werden. Das Prinzip entspricht dem Nachweis von Holzquerschnitten bei Brandeinwirkung.

Für den häufigen Fall, im Rahmen von aggressiven Beanspruchungen, des Beanspruchungsgrades II und einer Nutzdauer von 75 Jahren kann eine umlaufende Reduzierung des realen Holzquerschnittes um d = 10 mm angesetzt werden.

Diese Annahme stellt einen Näherungswert dar.

Es ist jedoch für die Baupraxis wenig sinnvoll, wesentlich stärker zu differenzieren, da viele Parameter wie Holzart, Kernholzanteil der eingebauten Hölzer, schwankende Luftfeuchten, geänderte Nutzung, vorrangige Holzfeuchte, nicht genau erfaßt werden können.

Text-Vorschlag zur Aufnahme in die neue DIN 1052 – Holzbauwerke – und in den Eurocode 5:

- bei DIN 1052 in Abschnitt 5 „Anforderungen an die Dauerhaftigkeit“
- bei Eurocode 5 – 1 – 1 in Abschnitt 2.4 Dauerhaftigkeit“

„Gegenüber den meisten chemisch aggressiven Medien ist Holz gut resistent. Doch auch Holz erleidet bei langjähriger derartiger Einwirkung strukturelle und chemische Veränderungen und damit Schädigungen in seinen Randzonen.

Die Erfassung dieser Einwirkung kann durch eine Querschnittsreduzierung und zwar durch den allseitigen Abzug einer festigkeitsgeminderten Randschicht erfolgen.

Für die häufigsten Anwendungsfälle kann für eine Nutzungsdauer der Bauwerke von ca. 75 Jahren unter mittlerer bis starker korrosiver Einwirkung eine allseitige Querschnittsreduzierung um 8 mm, bei sehr hoher Feuchte um 10 mm vorgenommen werden.

Bei Bauteilen aus Brettschichtholz ist eine Reduzierung um 6 mm allseitig ausreichend.“

Literatur

- /1/ Mörath, E.
Die Widerstandsfähigkeit der wichtigsten einheimischen Holzarten gegen chemische Angriffe.- In: Mitteilungen Fachausschuß Holzfragen.- Berlin, 1933. H. 5. - S. 37-58
- /2/ Kollmann, F.
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Band 1.- Berlin. Springer-Verlag, 1951.- 1050 S.
- /3/ Vorreiter, L.
Holztechnologisches Handbuch Band I.- Wien. Verlag Georg Fromme & Co., 1949.
- /4/ Lehmann, G.; Öhlmann, J.
Holzschutz gegen Angriffe durch Chemikalien.- In: Holzindustrie.- Leipzig 15(1962) 3. S. 63-65 sowie S. 131-134
- /5/ Kirk, H.
Korrosionsprüfung von Hölzern gegenüber Mineraldüngemitteln.- Prüfbericht Nr. 745/77 vom 23.11.1977: Institut für Forstwissenschaften Eberswalde (unveröffentlicht).
- /6/ Kirk, H.
Festigkeitsuntersuchungen an Nadelschnitthölzern aus Düngerhallen mit vorwiegender Belastung durch Harnstoff.- Institut für Forstwissenschaften Eberswalde.- Prüfbericht Nr. 769 vom 06.05.1981 (unveröffentlicht).
- /7/ Seifert, K.
Der chemische Einfluß schwach sauren Milieus auf die Holzsubstanz.- In: Holz als Roh- und Werkstoff.- Berlin 25(1967) 7.- S. 265-267
- /8/ Mönck, W.
Schadensanalyse an Holzkonstruktionen - Auswirkungen langjähriger chemischer Angriffe auf freitragende Holzkonstruktionen.- In: Bauzeitung.- Berlin 27 (1973) 2.- S. 90-94
- /9/ Mönck, W.
Holzerstörungen bei freitragenden Holzkonstruktionen von Mineraldünger-Lagerhallen.- In: Holztechnologie.- Leipzig 16(1975) 1.- S. 22-28
- /10/ Leparskij, L.O.
Issledovanija v oblasti objepetschenija dolgovetschnosti djerevjannich konstrukcii.- Moskva, 1976.- Trudy instituta.- 141 S. Forschungen auf dem Gebiet der Dauerbeständigkeit von Holzkonstruktionen.

- /11/ Chrulev, V.M.
Prognosirovanije dolgovetschnosti kleevych sojedenenij djerevjannych konstrukcij.- Moskva: Strioisdat 1981.- 128 S. Beurteilung des Dauerstandsverhaltens geklebter Holzkonstruktionen.
- /12/ Chrulev, V.M.
Opyt ekspluatacii kleenych derevjannych konstrukcij v zdanijach s aggressivnoj sredoj.- In: Prom. Stroitelstva.- Moskva 54(1977) 2.- S. 27-28
Erfahrungen bei der Anwendung von geklebten Holzkonstruktionen in Gebäuden mit aggressiver Umwelt.
- /13/ Kann, Ä.A.; Serov, E.N.
Derevjannye konstrukcij v sovremennom stroitelstve.- Kirschinev, 1981.- 180 S. Holzkonstruktionen im modernen Bauwesen.
- /14/ Krach, H.; Gos, B.
Untersuchung der chemischen und der Festigkeitsveränderungen in geleimten Konstruktionen großer Abmessungen unter dem Einfluß aggressiver Gasmedien.- Symposium „Holz in modernen Baukonstruktionen“ Szcecin, 1978.- Tagungsmaterial, S. 85-93
- /15/ Polanska, T.; Olifierowicz, J.
Mechanische Parameter des Holzes, das dem Einfluß eines chemischen Angriffes unterzogen wurde.- Symposium „Holz in modernen Baukonstruktionen“ Szcecin, 1978.- Tagungsmaterial, S. 79-84.
- /16/ Gos, B.
Der Einfluß von Ammonjak auf die Scherfestigkeit geklebter Holzkonstruktionen beim Einsatz von Phenol-Resorcinharz.- In: Holztechnologie.- Leipzig 22(1981) 1.- S. 36-40
- /17/ Gos, B.
Physikalische und chemische Veränderungen in Kiefernholz und Phenol-Resorcin-Harz infolge des Einwirkens konzentrierter aggressiver Gase.- In: Holztechnologie.- Leipzig 27(1986) 1.- S. 20-24
- /18/ Mönck, W.
Bauschäden an Holzkonstruktionen - Teil II.- In: Holzindustrie.- Leipzig 34(1981) 6.- S. 176-179
- /19/ Parameswaran, N.
Zur Mikromorphologie von Fichtenholz nach längerem Einsatz in einer Kali-Lagerhalle.- In: Holz als Roh- und Werkstoff.- Berlin 39(1981) 4.- S. 149-156
- /20/ Besold, C.; Fengel, D.
Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz.- In: Holz als Roh- und Werkstoff.- Berlin 41(1983) S. 227-232; S. 265-269; S. 333-337; S. 509-513

- /21/ Kerner, G.; Ritter, H.
Grundlagenuntersuchungen zur Beständigkeit von Nadelschnittholz gegen Mineraldünger.- In: Holztechnologie.- Leipzig, 25(1984) 5.- S. 233-237
- /22/ Erler, K.
Wirkungen aggressiver Lösungen auf Kiefernholz.- In: Holztechnologie.- Leipzig 25(1984) 5.- S. 249-252
- /23/ Erler, K.
Habilitationsschrift „Bauzustandsanalyse und Beurteilung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Korrosion des Holzes“.- Technische Hochschule Wismar, 1988
- /24/ Erler, K.
Korrosion von Holzbauteilen bei chemisch aggressiver Einwirkung.- In: Bauplanung-Bautechnik.- 43(1989) H. 8 S. 352-356
- /25/ Erler, K.
Korrosion und Anpassungsfaktoren für chemisch-aggressive Medien bei Holzkonstruktionen.- In: Holztechnologie.- Leipzig 30(1990) H. 5 S. 228-232
- /26/ Erler, K.; Kuphal, M.; Krawack, D.
Daten- und Schadenserfassung an Holzkonstruktionen in Düngemittel-Lagerhallen.- Ingenieurhochschule Wismar.- 1982.- Bericht (unveröffentlicht).- 28 S.
- /27/ Winter, K.
Holz in historischen Salzgewinnungsanlagen.- In: Seminarunterlagen (liegt bei Recontie Berlin vor) zum 12. Holzbauseminar der fünf ostdeutschen Bundesländer in Brandenburg.- 20./21.09.1996
- /28/ Schöne, W.
Beurteilung der Standsicherheit von phenolharzverleimtem Brettschichtholz nach langjähriger Nutzungsdauer.- Forschungsthema der AIF, Vorhaben Nr. 414D; Forschungsbericht 10/1992.
- /29/ DIN 1052
Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken.- September 1999.-
- /30/ Eurocode 5
Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Teil 1 – 1
Deutsche Fassung ENV 1995 – 1 - 1
- /31/ Erler, K.
Corrosion and adaption factors for chemically aggressive media with timber structures. in: Proceedings – Volume II
der 22. Jahrestagung vom W 18 A – CIB; Berlin 1989.-