

Untersuchungen zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holz unter dem Einfluss chemisch-aggressiver Medien

Holz zeigt eine hohe Beständigkeit gegenüber den meisten Chemikalien in allen drei Aggregatzuständen. Aus diesem Grund wird es häufig für Baukonstruktionen von chemischen Fabriken oder Lagerhallen für chemische Stoffe eingesetzt.

Der Beitrag befasst sich mit dem aktuellen Stand der Erfassung der Korrosion und ihres Einflusses auf die Festigkeit von Holz und Brettschichtholz. Es wird die Berücksichtigung derartiger Einflüsse durch einen Modifikationsbeiwert „Aggressive Medien“ bei der Bemessung von Holzbauteilen erläutert.

Studies on the strength and ultimate limit design of timber under the influence of chemically aggressive media. *Timber has a high resistivity to chemically aggressive agents. This is one of the reasons why timber structures are frequently being used in the construction of storage halls for chemical materials or of industrial buildings with aggressive environment. In this paper the state of the art of corrosion in timber and the consideration the chemical action by using a modification factor in the limit state design is presented.*

1 Einführung

Durch die praktischen Erfahrungen mit Holz weiß man, dass der natürliche Baustoff Holz gegen Angriff von che-



Bild 1. Speicher für Rohsalze, Bandzuführung im Firstbereich einer 36 m weit spannenden Salzlagerhalle aus Brettschichtholz

Fig. 1. Pot ash storage building, transport of pot ash in the ridge area, with a span of 36 m in glued laminated timber

misch-aggressiven Stoffen widerstandsfähiger ist als andere Materialien. Daher wird Holz nicht nur im Wohnungs- oder Gewerbebau, sondern unter anderem auch in chemischen Werken bzw. Fabrikationshallen als Behälter für die Lagerung von chemischen Stoffen und im Landwirtschaftsbau für die Lagerung von Düngemitteln verwendet.

2 Korrosion

Holz besitzt eine größere Resistenz als Stahl oder Beton gegenüber chemisch-aggressiven Medien, nicht zuletzt dadurch, da es sich mit seiner Umwelt chemisch im Gleichgewicht befindet. Allerdings kann es unter bestimmten aggressiven Bedingungen auch bei Holz zu korrosiven Schädigungen kommen.

Holzkorrosion ist die von der Oberfläche ausgehende Schädigung bzw. Zerstörung des Holzes infolge chemischer und/oder chemisch/physikalischer Reaktionen bei Wechselwirkung mit seiner Umgebung. [1]

Unter einer chemisch/physikalischen Reaktion versteht man vor allem die Reaktionen mit Salzen, da die Salze allein zunächst eine mechanische bzw. physikalische Reaktion hervorrufen. Durch ihr hygroskopisches Verhalten wird das Salz in gelöster Form durch die Holz-zellen aufgenommen. Anschließend kommt es zu einer Auskristallisation mit Zellwandzerstörung. Erst in Folge einer Verbindung des Salzes mit einer Säure oder Base kommt es zu den korrosiv wirkenden chemischen Verbindungen. Das Erscheinungsbild wird dann als **Holzkorrosion** oder **Mazeration** beschrieben.

3 Wirkung von chemisch-aggressiven Medien auf die Festigkeit von Holz – Stand der Forschung

Tabelle 1 enthält eine Übersicht über den bisherigen Stand der Forschung und Entwicklung. Die in der Spalte Literatur angegebenen Quellen sind in [2] zusammengestellt.

3.1 Untersuchungen an Vollhölzern

Schon 1933 unterteilt *Mörath* in den ersten richtungsweisenden Untersuchungen die wichtigsten einheimischen Holzarten in fünf Beständigkeitsgrade unter dem Einfluss von Säuren und Alkalien (s. Tabelle 2).

Tabelle 1. Auswertung der Literatur zur Untersuchung der Korrosion und Festigkeit von Holz
 Table 1. Overview on literature to the topic of timber corrosion and strength of timber

Jahr	Autor	Seite	chemisch-aggressive Medien									verwendetes Material			Festigkeit		Literatur	
			Säure			Base			Salz			behandeltes Holz ¹	unbehandeltes Holz ²	BSH	rechn. Ergebnisse	visuelle Ergebnisse		
			s	l	g	s	l	g	s	l								
1933	Mörath	19											x		x	x	[46]	
1951	Kollmann	18											x		x	x	[38]	
1962	Lehmann, Öhlmann	25											x		x		[1]	
	Lehmann, Öhlmann	25										x	x		x		[2]	
	Lehmann, Öhlmann	26										x			x		[3]	
1973	Mönck	26											x			x	[44]	
1975	Steiger, Wagenführ	-										x				x	[4]	
	Mönck	-											x		x	x	[39]	
1976	Metzner	29										x	x			x	[5]	
	Steiger, Wagenführ	-										x					[6]	
1977	Chasanov, Chrylev	29										x		x		x	[7]	
	Steiger, Wagenführ	30										x				x	[8]	
	Prüfbericht Nr. 741/77	30												x			[9]	
1979	Seifert	30											x			x	[10]	
	Prüfbericht Nr. 79/1-1626	-											x		x		[11]	
1980	Prüfbericht Nr. 79/1-1626	-											x		x		[12]	
	Wilschek	-											x			x	[13]	
	Bartels, Fengel	-												x			[14]	
1981	Gos	31										x			x	x	[15]	
1983	Krawack, Müller	31															x	[16]
	Erler	32												x			x	[17]
	Erler	32												x		x	x	[18]
	Strocke	43												x		x		[19]
1984	Reek	-												x		x	x	[20]
	Kerner, Ritter	35											x	x		x	x	[21]
	Erler	35												x		x	x	[47]
	N.N.	-												x				[22]
1985	Dauchauer	-												x			x	[23]
1986	Fengel, Wegener	36												x	x		x	[24]
1987	Erler	37												x	x		x	[25]
1988	Erler, Laduch	37											x		x		x	[26]
1989	Erler	38												x	x		x	[27]
	Institut für Standarisierung	-												x			x	[28]
	Erler	38												x			x	[29]
	Erler	39											x	x	x		x	[36]
	Erler, Rug	39											x	x	x		x	[37]
	Staatliche Bauaufsicht der DDR	40											x	x	x		x	[43]
1992	Schöne	-												x	x		x	[30]
1994	Schöne	-												x	x		x	[32]
1996	Winter	43												x			x	[40]
1998	Erler	43															x	[33]
2000	Erler	43															x	[34]
	Schwar	43											x				x	[35]
2004	Schwar	44											x	x			x	[45]

umfangreiche Informationen
 wesentliche Informationen



¹ behandelt mit Holzschutzmittel
² behandelt mit Holzschutzmittel

s fest
 l flüssig
 g gasförmig

Anhand der Tabelle 3 lassen sich seine für die untersuchten einheimischen Holzarten bei Einwirkung von Säuren zusammengestellten Ergebnisse ablesen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zur Beständigkeit bei alkalischer Einwirkung aufgeführt.

Tabelle 2. Gradmesser für die Korrosionsbeständigkeit nach Mörath (aus [9])
 Table 2. Degrees of timber corrosion stability from Mörath (taken from [9])

Beständigkeitsgrad	Bedeutung	Gewichtsabnahme g/m ² h
I	praktisch vollkommen beständig	< 10
II	genügend beständig	0,1 bis 1,0
III	ziemlich beständig	1,0 bis 3,0
IV	wenig beständig	3,0 bis 10,0
V	unbeständig	> 10

Mörath lagerte bei seinen Versuchen fehlerfreie Holzproben unterschiedlicher Holzarten über mehrere Wochen in verschiedenen Lösungen. Anschließend ermittelte er die Biegefestigkeit der in aggressiven Medien eingelagerten Stäbe im Vergleich zu Proben ohne Einfluss von aggressiven Medien (s. Bilder 1 und 2).

Für den Angriff von Säuren auf Holz wurden gleichartige Versuche durchgeführt. Holz ist auch gegen einen sauren Angriff sehr widerstandsfähig (s. Bild 3).

Die Ergebnisse zeigten eine hohe Beständigkeit des Holzes gegen schwache Säuren ($2 < \text{pH} < 7$) und gegen schwach alkalische Lösungen ($7 < \text{pH} < 11$). Die Untersuchungen von Mörath belegten weiterhin, dass erst bei einem pH-Wert unter 2 und über 11 die Holzfasern angegriffen werden und die Biegefestigkeit abnimmt.

Nur durch stark saure und stark alkalische Lösungen stellte sich eine Korrosionswirkung ein. Daraus folgt: Im pH-Wert-Bereich $2 < \text{pH} < 11$ ist die Holzkorrosion und damit der Einfluss auf die Biegefestigkeit gering.

Nadelhölzer besitzen eine weit höhere Korrosionsfestigkeit als Laubhölzer. Entsprechend der sehr hohen Kor-

Tabelle 3. Beständigkeitsgrade einheimischer Holzarten gegen Säuren bei 20 °C (aus [9])

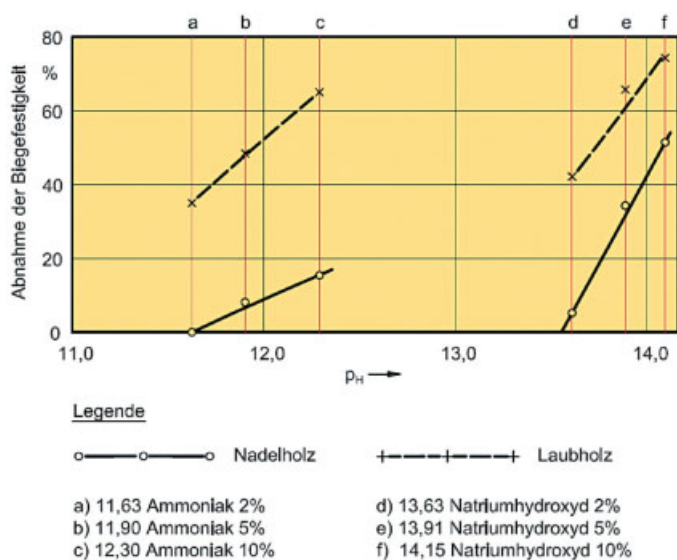
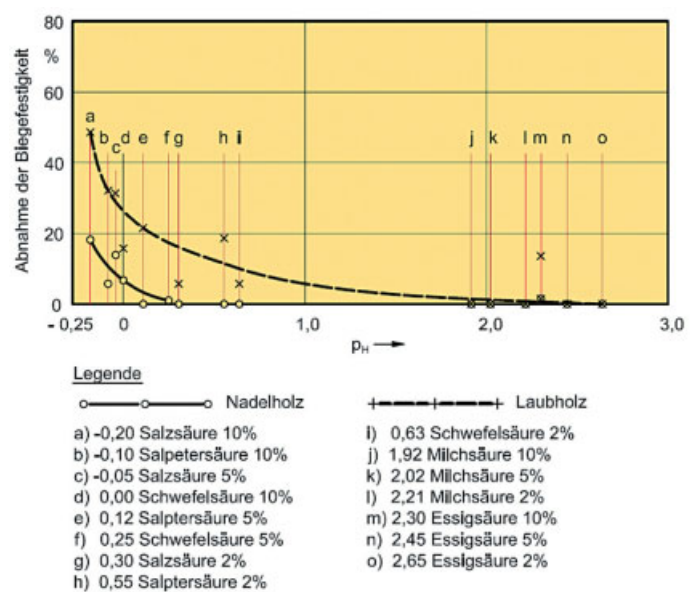
Table 3. Degrees of corrosion stability of several specimen of wood against acids by a temperature of 20 °C (taken from [9])

Benennung	Konzentration %	pH-Wert	Lärche	Kiefer	Fichte	Tanne	Pappel	Walnuss	Birke	Hainbuche	Buche	Eiche	Kirsche	Ahorn	Linde	Esche
Essigsäure	2	2,65	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	5	2,45	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	10	2,30	I	I	I	I	III	I	I	I	I	II	II	II	III	II
Milchsäure	2	2,21	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	5	2,02	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	10	1,92	I	I	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	II	I
Salpetersäure	2	0,55	I	I	I	I	III	II	II	II	II	II	II	II	II	II
	5	0,12	I	II	I	II	III	II	II	-	II	II	-	II	III	II
	10	-0,10	I	I	I	II	III	II	-	II	II	III	-	II	III	III
Salzsäure	2	0,30	I	I	I	I	III	I	I	I	I	I	I	I	II	I
	5	-0,05	I	II	II	II	III	-	-	II	II	II	-	II	III	II
	10	-0,20	II	II	II	II	IV	III	III	III	IV	III	III	III	IV	III
Schwefelsäure	2	0,63	I	I	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	II	I
	5	0,25	I	I	I	I	II	-	-	-	I	I	-	-	II	-
	10	0,00	II	II	II	II	IV	III	III	-	III	III	-	III	IV	III

Tabelle 4. Beständigkeitsgrade von Hölzern gegen alkalische Angriffe (aus [9])

Table 4. Degrees of corrosion stability several specimen of wood against alkaline (taken from [9])

Formel	Benennung	Konzentration %	pH-Wert	Lärche	Kiefer	Fichte	Tanne	Pappel	Walnuss	Birke	Hainbuche	Buche	Eiche	Kirsche	Ahorn	Linde	Esche
NH ₃	Ammoniak	2	2,21	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
		2	11,63	I	I	I	I	III	II	II	II	II	II	-	III	III	II
		5	11,90	I	I	I	I	IV	III	IV	III	III	IV	-	III	IV	-
		10	12,30	II	II	II	II	IV	IV	-	IV	IV	IV	-	IV	IV	IV
NaOH	Natriumhydroxid	2	13,63	I	I	I	I	III	II	II	II	II	II	II	II	III	II
		5	13,91	II	II	II	II	IV	IV	III	IV	III	IV	IV	III	IV	III
		10	14,15	III	III	III	II	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV

Bild 2. Abnahme der Biegefestigkeit von Holzstäben mit steigendem pH-Wert bei Angriff von alkalischen Medien (Einlagerung über vier Wochen; aus [9])
Fig. 2. Degrease of timber flexural strength with rising pH-value under the influence of alkaline over a time from four weeks (taken from [9])Bild 3. Abnahme der Biegefestigkeit von Holzstäben mit fallendem pH-Wert bei Angriff von Säuren (Einlagerungszeit vier Wochen; aus [9])
Fig. 3. Degrease of timber flexural strength with falling pH-value under the influence of acids over a time from four weeks (taken from [9])

rosionsbeständigkeit setzt *Mörath* die Nadelhölzer fast mit den nichtrostenden Edeltählen gleich.

Bei neutralen Salzen hingegen gibt es keinen Einfluss auf den Baustoff Holz.

Für alkalische oder saure Salzlösungen gelten die vorgenannten Erkenntnisse. Für eine Abschätzung der korrosiven Wirkung eines chemischen Stoffs kann der pH-Wert als Indikator herangezogen werden.

Im Zeitraum von 1960 bis 1990 wurden verschiedene Einzeluntersuchungen veröffentlicht (s. Tabelle 1). Diese beinhalten Erkenntnisse aus zahlreichen Untersuchungen an Proben aus genutzten Holzbauten, die während ihrer Nutzung als Produktionsstätte, beispielsweise einer chemischen Fabrik oder Lagerhalle für chemische Stoffe, über mehrere Jahrzehnte bestimmten Medien ausgesetzt waren.

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigte, dass anhand der unterschiedlichen Chemikalien entweder eine chemische oder mechanische Zerstörung sowie eine Kombination beider Zerstörungsarten auftreten können. Dies ist allerdings abhängig von der Art des aggressiven Mediums. Nach der Einwirkung von Säuren heben sich die Jahrringe an der Spät- und Frühholzgrenze ab, und es kommt zu einer faserig-„wolligen“ Struktur bis Pulverform des Holzes.

Bei Einfluss von Rauchgasen in Lokschruppen entsteht Schwefelsäure bzw. schweflige Säure, die das Lignin im Holz herauslösen. Der holzerstörende Einfluss von Salzsäure, Natronlauge und auch von schwefliger oder Schwefelsäure ist somit chemischer Natur.

Wegen ihrer Hygroskopizität können Salze bis ins Innere der Holzzellen eindringen. Je nach Feuchtegehalt des Holzes findet eine Auskristallisation von Salzen in den Holzzellen statt. Infolge des dadurch entstehenden Drucks werden die Holzzellen aufgesprengt und gelöst. So wird auf physikalischem Weg die Zellstruktur des Holzes zerstört. Beim Angriff bestimmter Salze, z. B. durch eine sehr intensive Behandlung des Holzes mit Holzschutz- und Feuerschutzmitteln, kann es, wie bei Säuren auch, zu einer typischen Auffaserung der äußeren Holzstruktur („wollige“ Struktur) kommen. Dieser Vorgang wird auch als Mazeration bezeichnet (weiteres dazu in [3] und [4]).

Grundsätzlich bestätigten Untersuchungen an jahrelang genutzten Holzbauten immer wieder, dass Holzbau- teile eine jahrzehntelange Funktionstüchtigkeit, trotz unterschiedlichster äußerer Schädigungen, behalten. Welche Resttragfähigkeit derartig geschädigte Querschnitte noch haben, konnte wegen fehlender Erkenntnisse nicht beurteilt werden. Aus diesem Grund schlug Mönck Mitte der 1970-er Jahre eine systematischere Herangehensweise bei weiteren Untersuchungen zur Korrosion von Holzbau- teilen vor, und er forderte grundlegende Untersuchungen zur Erforschung noch offener Fragen.

Fest stand bis dahin, dass der Aggressivitätsgrad der chemischen Einwirkung (z. B. von Salzen, Säuren oder Basen) in fester, flüssiger oder gasförmiger Form, die Zeitdauer der Einwirkung, der Standort der Konstruktion (bezogen auf die vorherrschenden Umweltbedingungen), die verwendete Holzart und natürlich die konstruktive Durch- bildung zusammengekommen ein Korrosionssystem bil- den. Diese einzelnen Faktoren bestimmen die Zerstö- rungsrate des Holzes. Ob die Zerstörungsrate über die Einwirkungszeit abnimmt oder zunimmt, ist zu diesem Zeitpunkt noch unklar (s. [2]).

Diese Frage wird erst zwischen 1980 und 1990 grund- legend geklärt, als man im Zusammenhang mit der Novel- lierung des neuen DDR-Holzbaustandards [10] erstmals systematische Untersuchungen durchführt und das Ziel verfolgt, die Auswirkungen der Einflüsse von chemisch-ag- gressiven Medien unter Nutzungsbedingungen bei der Be- messung neuer Holzkonstruktionen oder der statischen Bewertung bestehender Bauten zu berücksichtigen.

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Unter- suchungen zeigten, dass bei den meisten Chemikalien in fester, flüssiger oder gasförmiger Form **die Korrosionswir- kung mit der Zeit abnimmt**, und eine Zerstörung nur in oberflächennahen Bereichen erfolgt ([1], [2], [5], [8], [11]).

Der Abbau der Holzsubstanzen im oberflächennahen Bereich ist mit einer Verfärbung der gestörten Quer- schnittsschichten verbunden. Die Verfärbung ist i. Allg. kennzeichnend für die Tiefe einer Verminderung der Holz- festigkeit infolge einer korrosiven Wirkung des angreifen- den Mediums. Je nach Korrosivität des Mediums, der Dauer und den vorherrschenden Umweltbedingungen tritt ein Festigkeitsverlust in diesen Querschnittsbereichen ein. Die **Holzfestigkeit** liegt zum Teil weit unter der Festigkeit des Holzes in den unzerstörten Querschnittsteilen. Dage- gen hat das Holz in den Randbereichen eine höhere Roh- dichte, unter Umständen verursacht durch die Salzeinla- gerungen in den Holzzellen. In Abhängigkeit von der Größe des Holzquerschnitts bildet sich eine Randzone mit geringerer Holzfestigkeit (s. Bild 4). In der inneren Zone ist die Zellstruktur des Holzes nicht geschädigt, und die Festigkeit entspricht der Ausgangsfestigkeit (s. [11]).

Bei der Beurteilung der Standsicherheit und Trag- fähigkeit von bestehenden Konstruktionen kann die nicht mehr tragende äußere Schicht vom Bruttoquerschnitt ab- gezogen werden. Für die Berechnung neuer Bauten ist die zu erwartende Zerstörungstiefe zum statisch erforderli- chen Querschnitt hinzu zu addieren. Bei großen kompak- ten Querschnitten ist der Einfluss der nichttragenden Randschicht geringer als bei kleinen Querschnitten.

Beim Angriff bestimmter Salze z. B. durch eine sehr intensive Behandlung des Holzes mit Holzschutz- und Feuerschutzmitteln kann es, wie bei Säuren auch, zu einer typischen Auffaserung der äußeren Holzstruktur (wollige Struktur – Mazeration) kommen (s. [3] und [4]).

Fazit: Trotz einer relativ sehr hohen Widerstands- fähigkeit des Holzes gegenüber aggressiven Stoffen kann es in Anhängigkeit von der Dauer der Einwirkung, der Ag- gressivität der angreifenden Stoffe, der Querschnittsgröße

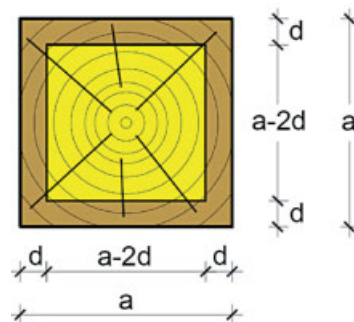


Bild 4. Quadratischer Querschnitt mit nicht tragfähiger Randzone der Breite d_{aM}

Fig. 4. Square cross section with not load-bearing peripheral zone, wide d_{aM}

und der klimatischen Bedingungen zu korrosiven Schädigungen kommen. Bei den meisten Chemikalien in fester, flüssiger oder gasförmiger Form nimmt die Korrosionswirkung mit der Zeit ab, und es erfolgt nur eine Zerstörung im oberflächennahen Bereich. Die Zerstörung in diesem Bereich führt zu einem Festigkeitsverlust, der im Vergleich zu den ungeschädigten Querschnittsbereichen erheblich sein kann [7].

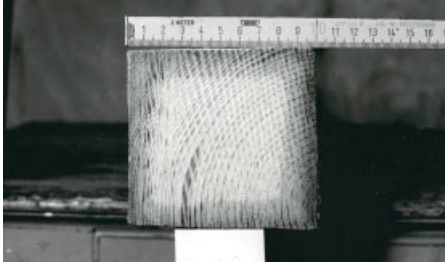


Bild 5. Altholzquerschnitt
Fig. 5. Old wood cross section

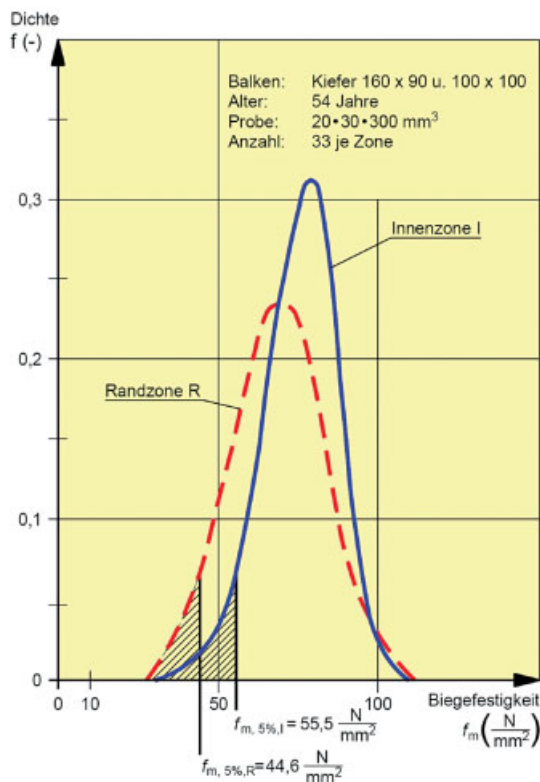


Bild 6. Weibull-Verteilung der Biegefestigkeit von Altholzbauteilen (Querschnittsflächen: 9500 bis 17000 mm²) in den Rand- und Innenzonen, die an fehlerfreien Proben ermittelte Biegefestigkeit ist für die Randzone um ca. 10 N/mm² geringer als in der inneren Zone (Randzone R: Einwirkung von Kalk-Ammon-Salpeter "20 mm – der Nitratgehalt verringerte sich im äußeren Bereich von 20 mm sehr stark bis auf Werte von 3,1 bis 2,5 bis 0,7 % gegenüber Werten im äußeren Bereich bei 1 bis 2 mm Schichtdicke – siehe auch Bild 7)
Fig. 6. Weibull curve of flexural strength from old timber components (cross-sectional areas: 9500 ... 17000 mm²) in the inside and peripheral zone, the flexural strength from clear specimen is lower for the peripheral zone about approx. 10 N/mm² than in the internal zone (peripheral zone: Effect of calcium ammonium nitrate "20 mm – the nitrate salary decreases very strongly on worth from 3,1 ... 2,5 ... 0,7 % compared with values in the external area with layer-thickness of 1 to 2 mm – see also Fig. 7)

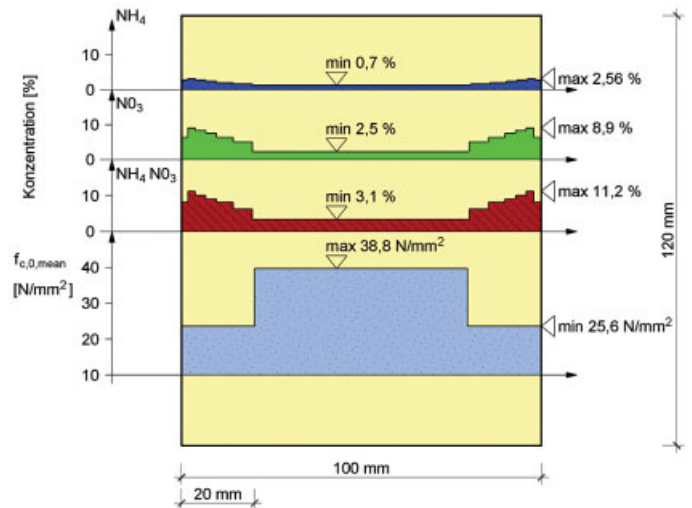


Bild 7. Verteilung der Druckfestigkeit parallel zur Faser und der aggressiven Medien aus Untersuchungen an verschiedenen Holzquerschnitten (Querschnittsfläche 10000 bis 17000 mm²) aus einer Düngerlagerhalle (Standzeit ca. 60 Jahre) für Kalk-Ammon-Salpeter

Fig. 7. Distribution of the compression strength perpendicular to fibre (averages) and ion concentration of the chemical components of calcium ammonium nitrate from investigations on several wooden cross sections (cross area: 10000 ... 17000 mm²), taken from a hall (existed from 60 years)

Beispiel 1

An Kantholzquerschnitten einer für den Abbruch bestimmten Holzkonstruktion einer Förderbrücke, die ca. 60 Jahre einer unmittelbaren Einwirkung von Kalk-Ammon-Salpeter ausgesetzt war, wurden Festigkeitsuntersuchungen an fehlerfreien Holzprüfkörpern durchgeführt. Die Biegeversuche erfolgten in Probengröße 20 × 20 × 300 mm und die Druckversuche parallel zur Faser in Probengröße 20 × 20 × 30 mm nach dem DDR-Standard TGL 25106, die in seinen jeweiligen Teilen im Wesentlichen der DIN 52185 und DIN 52186 entsprach. Bild 6 zeigt einen deutlichen Unterschied in der Biegefestigkeit zwischen Proben aus dem Randbereich (d " 20 mm) und Proben aus dem Querschnittsinneren.

Bild 7 dokumentiert die Abnahme der Ionenkonzentration der chemischen Bestandteile von Kalk-Ammon-Salpeter in den Randzonen im Vergleich zur Druckfestigkeit parallel zur Faser. Allerdings kann der Schädigungsbereich nicht mit der für die Festigkeitsbestimmung erforderlichen Probenbreite von 20 mm gleichgesetzt werden. Hierzu wäre eine genauere Festigkeitsuntersuchung mit dem Dynstatverfahren nach TGL 1-204 bzw. DIN 53435 erforderlich gewesen (s. dazu Beispiel 2).

3.2 Untersuchungen an Brettschichtholz

Seit den dreißiger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts werden mit Kunstharzen geklebte Brettschichtkonstruktionen auch für chemische Produktionsanlagen verwendet. Aus den Untersuchungen der letzten vierzig Jahre ergeben sich für chemisch-aggressiven Medien ausgesetztes Brettschichtholz die folgenden Erkenntnisse:

1. Die Wahl des Klebstoffs ist sehr entscheidend für eine lange Lebensdauer und Haltbarkeit der Konstruktion in chemisch-aggressiver Umwelt. Denn die verschiede-

nen Klebstoffe weisen unterschiedliche Verhaltensformen gegenüber den aggressiven Medien auf. Die Verwendung von Resorzin-Formaldehydharz-Klebstoff sowie Alkylresorzin-Formaldehyd-Klebstoff hat sich bewährt, da diese sich als besonders beständig gegenüber chemisch-aggressive Medien erwiesen haben [12].

2. Schädigungen der Klebefuge durch chemische Stoffe können besonders bei Fehlverklebungen auftreten.
3. Brettschichtholz, hergestellt aus phenolharzverklebten Brettlagen, hat sich bei Salzlagerhallen bewährt (siehe [5] und [6]).
4. Brettschichtholz wird bisher vorzugsweise aus Nadelholz hergestellt, weshalb die vorgenannten Erkenntnisse zur Wirkung aggressiver Medien auf Nadel-Vollhölzer hier ebenfalls gelten.
5. Da Brettschichtholz in fast beliebig großen Querschnitten herstellbar ist, entstehen große kompakte Querschnitte, die in jedem Fall eine höhere chemische Dauerstandfestigkeit aufweisen als Vollholzkonstruktionen mit kleineren Querschnitten. Voraussetzung ist, dass keine größeren Schwindrisse auftreten.

Die grundlegenden Untersuchungen der achtziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts gestatteten die Festlegung eines Anpassungsfaktors „Aggressive Medien“ für Bau- und Brettschichtholz, mit dem die Einwirkung verschiedener aggressiver Medien beim Standsicherheitsnachweis nach der Methode der Grenzzustände berücksichtigt werden kann. Seine Anwendung wird in Abschn. 4 erläutert (s. [8] und [10]).

Beispiel 2

Die Brettschichtholzkonstruktion eines Speichergebäudes für Düngemittelsalz war 35 Jahre lang dem Salzangriff ausgesetzt. Zur Beurteilung der Resttragfähigkeit wurden Bohrkern entnommen. Im Labor wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

1. Ermittlung von Materialkennwerten
2. Erfassung sichtbarer Anzeichen von Holzkorrosion
3. Bestimmung von Festigkeitseigenschaften
4. Beurteilung der Qualität der Verklebung

Zu den untersuchten Eigenschaften ergaben sich die folgenden Erkenntnisse (Holzarten: Fichte und Kiefer):

a) Erkenntnisse zu den Materialeigenschaften

Rohdichte: Die Rohdichte liegt über dem charakteristischen Wert der DIN 1052:2008 für die Festigkeitsklasse

C24 und entspricht der nächst höheren Festigkeitsklasse C27.

Jahrringbreite: Die gemessenen Jahrringbreiten liegen überwiegend zwischen 0,5 und 2 mm. In Einzelfällen betragen sie bei geringem Spätholz-Anteil maximal 6 mm.

Holzfeuchte im Einbauzustand: Die festgestellten Holzfeuchtwerte ergeben Werte zwischen 9 und 12 %. Unter defekter Dachhaut kommt es zu Aufweichungen der dort befindlichen Bauteile. Dort sind die Holzfeuchtwerte höher.

Chemische Einwirkungen: Gemäß Nutzerangaben wird im Speichergebäude Kalisalz mit folgenden Bestandteilen gelagert: Kaliumchlorid (95,3 %), Natriumchlorid (2,6 %); Magnesiumchlorid, Kalium-, Magnesium- und Calciumsulfat (jeweils < 1 %). Zum Einsatz von Holzschutzmitteln liegen keine Angaben vor. Im Holz nachgewiesene Einlagerungen zeigen Bestandteile von Kalium, Natrium, Magnesium, Calcium und Schwefel. Spuren dieser Elemente sind bis zum Ende des beprobten Bereichs bei 24 bis 24,5 bzw. 29 mm Abstand zur Bauteiloberfläche nachweisbar. Abweichend von der Zusammensetzung des Kalisalzes liegt ein hoher Natriumgehalt im Holz vor, der teilweise höher als der Kaliumgehalt ist. Der Gehalt an Kalium- und Natriumchlorid ist im oberflächennahen Bereich (Abstand zur Bauteiloberfläche 2 bis 2,5 mm) mit 13 bis 36,5 Masse-Prozent außerordentlich hoch. Bei 13 bis 14 mm Abstand von der Bauteiloberfläche liegen die Werte zwischen 1 bis 6 Masse-Prozent.

b) Bewertung der chemischen Aggressivität des Kalisalzes

Die chemische Aggressivität ist luftfeuchteabhängig, und es kommt bei Feuchteerhöhung zu einer zunehmenden Aggressivität. Gemäß Abschn. 4 dieses Beitrags, Tabelle 10 und Tabelle 8 in Verbindung mit Tabelle 5 wird Kalisalz bei einer relativen Luftfeuchtigkeit < 65 % als „nicht“ oder „schwach aggressiv“ eingestuft. Bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 65 und 85 % gilt Kalisalz als „mittel aggressiv“ eingestuft.

c) Sichtbare Anzeichen für Holzkorrosion

Die Proben sind äußerlich mittel- bis dunkelbraun verfärbt. An der Probenoberfläche weisen diese eine < 0,5 mm bis 1,5 mm, in Ausnahmefällen bis 4 mm tief reichende kurz- bis langfaserig zerstörte Außenschicht auf. Unter dieser Außenschicht zeigt sich eine Fortsetzung der Verfärbung (braun: charakteristisch für Holzkorrosion und/oder rötlich: Einlagerung chemischer Substanzen des zeitweilig eingefärbten Lagersalzes) nach innen bis zu einer Tiefe von

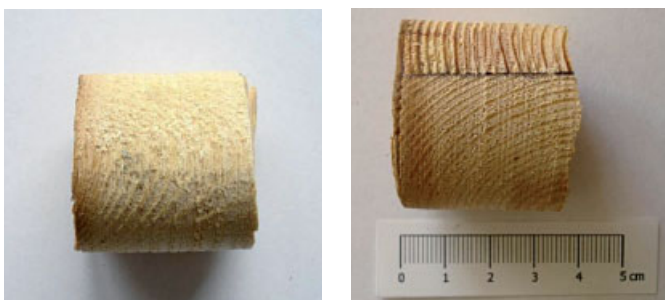


Bild 8. Bohrkern aus Fichtenholz (links) und Kiefernholz (rechts)
Fig. 8. Drilling cores of spruce (on the left) and pine (on the right)



Bild 9. Typische Holzkorrosionserscheinungen an den Außenflächen
Fig. 9. Typical wooden corrosion phenomena in the exterior surfaces

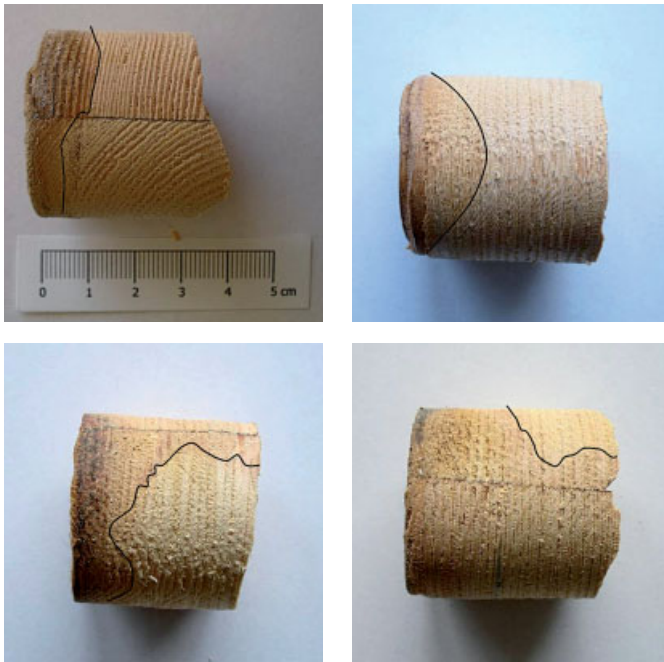


Bild 10. Typische Verfärbungen der oberflächennahen Randzone und entlang der Klebefuge (Verfärbungsgrenze schwarz nachgezeichnet)

Fig. 10. Typical discolorations of the peripheral zone close to surface and along the glue line (discoloration border black gone over)

unter 5 mm bei 39,0 % der gemessenen Bohrkerne
5 bis 10 mm bei 49,5 % der gemessenen Bohrkerne
über 10 mm bei 11,5 % der gemessenen Bohrkerne,
wobei die Messwerte von 1,5 mm bis 20 mm reichen und die rötliche über die braune Verfärbung hinausgeht (s. Bild der 9 und 10).

d) Festigkeitswerte

Biegefestigkeit von der Oberfläche in tiefere Holzschichten: In oberflächennahen Bereichen, bis ca. 7 bis 8,5 mm Tiefe, ist eine geringere Biegefestigkeit als in Querschnittsmitte des Holzbauteils feststellbar. Die Breite der Randzone mit verminderter Biegefestigkeit entspricht der Zone, in der der Kalium- und Natriumgehalt jeweils > 1 % beträgt (s. Bild 11).

Druckfestigkeit parallel zur Faser: Die Druckfestigkeit liegt deutlich über dem charakteristischen Wert der Festigkeitsklasse C24 und selbst der höchsten Festigkeitsklasse C50 nach DIN 1052:2008.

e) Qualität der Verklebung

Die Klebfugendicke beträgt etwa 80 µm. Die Eindringtiefe des Klebstoffs in das Holz liegt etwa bei 100 bis 300 µm. Etwa 19 % der Bohrkerne zerfallen bei der Entnahme in der Klebefuge. Etwa 38 % der Bohrkerne bzw. 24 % der Prüfkörper erfüllen die Mindestanforderungen nach DIN EN 386 bezüglich Scherfestigkeit der Klebefuge und Faserbruchanteil nicht.

Die Ursachen niedriger Scherfestigkeitswerte liegen teilweise in festgestellten Fehlverklebungen aus bereits vor längerer Zeit aufgerissenen Klebfugen. Bei guter Verklebefestigkeit ergaben sich an einigen Proben niedrigere Scherfestigkeiten durch geringen Spätholzanteil und ungünstige Jahrringlage.

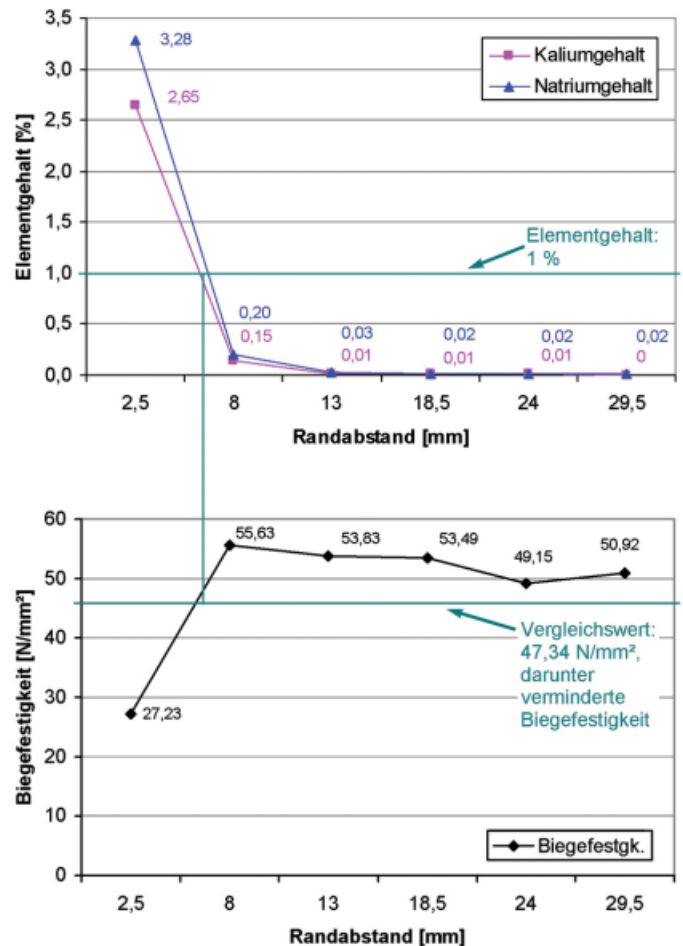


Bild 11. Exemplarische Gegenüberstellung der Messwerte einer Probe aus chemischer Analyse und Biegefestigkeitsprüfung nach DIN 53435

Fig. 11. Exemplary comparison of the measuring values of a test from chemical analysis and flexural strength according DIN 53435

Hierzu sind folgende Anmerkungen zu den Fehlverklebungen zu beachten: Nach TGL 33136/01 „Holzbau. Bauteile aus Brettschichten, geklebt – Technische Bedingungen“ vom Januar 1987 waren auf 1 m Klebfuge unabhängig von der Gütesortierung 30 cm² bei bis zu 50 % der Brettbreite an Klebefehlern zulässig. Somit ist davon auszugehen, dass derartige Fehler aus der Fertigung des Brettschichtholzes vorhanden sind. Die o.g. 50 % überschreiten jedoch den heute für Schwindrisse zulässigen Wert von 1/6 der Querschnittsbreite.

f) Bewertung der Material- und Festigkeitseigenschaften des Holzes

Die Material- und Festigkeitseigenschaften des verbauten Brettschichtholzes wurden durch die 35-jährige Einwirkung des Kalisalzes wie folgt beeinflusst:

- Im Randbereich sind bis 10 mm Tiefe (bei etwa 10 % der Proben darüber hinaus bis 15 bis 20 mm) Holzkorrosionserscheinungen sichtbar, die einhergehen mit verminderten Biegefestigkeitswerten.
- Über die korrodierte Randzone hinaus bis zum Ende des beprobten Bereichs bei 24 bis 29 mm Tiefe sind Salzeinlagerungen chemisch nachweisbar.
- Für die Rohdichte und Druckfestigkeit sind relativ hohe Werte feststellbar.

4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für Holzbauteile unter dem Einfluss von chemisch-aggressiven Medien

Konstruktionen sind während ihrer langen Nutzungsdauer den unterschiedlichsten Beanspruchungen wie Feuchtwechsel, Verformungen, Temperatureinwirkungen und aggressiven Medien ausgesetzt. Dies bedeutet, dass bei bestehenden Konstruktionen ohne zusätzliche Untersuchungen zum Bauzustand, der vorhandenen Baumängel und deren Ursachen keine Entscheidung bezüglich der Erhaltung der Konstruktion getroffen werden kann (s. auch [7]). Im Hinblick auf die weitere Nutzung oder mögliche Umnutzung geht es bei bestehenden Konstruktionen häufig auch um die Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Bauteile unter Berücksichtigung vorhandener Schädigungen und geänderter Beanspruchungen.

In der DIN 1052:2008 werden die Einflüsse der chemischen Korrosion bei der Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt. Dagegen empfehlen die Erläuterungen [7] bei bestehenden Konstruktionen, die chemisch-aggressiven Medien ausgesetzt waren, den geschädigten Randbereich **exakt** zu ermitteln und bei den statischen Untersuchungen vom statisch nutzbaren Querschnitt abzuziehen (**Berechnung mit reduzierten Querschnittswerten**). Beispiel 2 zeigt, wie dies durch Entnahme von Bohrkernen in Verbindung mit dem Dynstatverfahren nach DIN 53435, einer Untersuchung der Ionenkonzentration in den äußeren Holzschichten und speziellen Untersuchungen zum Klebstoff bei Brett-schichtkonstruktionen möglich ist.

Für überschlägige Berechnungen kann mit der in [7] angegebenen Schädigung von 10 mm zuzüglich eines Sicherheitszuschlags von 5 mm gerechnet werden. Der Wert von 10 mm wurde für Nadelholz aus den bisher durchgeführten Untersuchungen an ausgebauten Bauteilen festgelegt. Zusammen mit dem Sicherheitszuschlag von 5 mm ergibt sich daraus nur eine orientierende Bewertung.

Für den Entwurf neuer Konstruktionen kann überschlägig in gleicher Weise verfahren werden, wenn der statisch erforderliche Querschnitt um diesen Betrag vergrößert wird.

Ein anderer Weg zur Berücksichtigung einer korrosiven Wirkung von bestimmten aggressiven Stoffen auf die Tragfähigkeit von Holzbauteilen besteht in der Modifikation der Festigkeit (**Berechnung mit modifizierten Festigkeiten**). Dieses Verfahren kann sowohl für die Berechnung von neuen Konstruktionen als auch zur Bewertung der Tragfähigkeit von bestehenden Bauwerken angewendet werden. Die Modifikation der Festigkeiten erfolgt durch die Einführung eines Anpassungsfaktors „Aggressive Medien“ $k_{\text{mod,aM}}$. Grundlage hierfür ist ein Vorschlag nach [8]. Zur Bestimmung des Anpassungsfaktors dienen die Tabellen 5 bis 9. Den Faktor zur Berücksichtigung der chemischen Einwirkung erhält man für die in den Tabellen 6 bis 8 angegebenen aggressiven Stoffe aus dem jeweiligen Beanspruchungsgrad. Dieser gibt den Grad der Aggressivität des angreifenden Stoffs wieder (zur Definition des Beanspruchungsgrad s. Tabelle 5).

Die Art der einwirkenden Medien wird gegliedert in Gase, Lösungen und feste Stoffe. Aus der Konzentration

der Stoffe und der während der Nutzung vorhandenen Holzfeuchte (Nutzungs-kategorie – s. Tabelle 10) ergeben sich die Beanspruchungsgrade (s. Tabellen 5 bis 8). Zusätzlich beeinflussen die Querschnittsabmessungen die Auswirkung der Korrosion auf die Festigkeit des Holzes. Bei großen Querschnitten verringert sich die korrosive Wirkung (s. Tabelle 9).

Bei der Ermittlung der Bemessungswerte einer Festigkeitseigenschaft berücksichtigt man $k_{\text{mod,aM}}$. Aus diesem Grund wird die Gleichung (3) in DIN 1052:2008 um den Faktor $k_{\text{mod,aM}}$ erweitert:

$$X_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot X_k}{\gamma_M} \cdot k_{\text{mod,aM}}$$

mit

X_d	Bemessungswert einer Festigkeitseigenschaft
k_{mod}	Modifikationsbeiwert, der den Einfluss der Nutzungs-kategorie und der Lasteinwirkungsdauer auf die Festigkeitseigenschaft berücksichtigt (nach Tabelle F.1 in DIN 1052:2008)
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeitseigenschaft
$k_{\text{mod,aM}}$	Modifikationsbeiwert für die Wirkung aggressiver Medien auf die Festigkeitseigenschaft

Man kann zunächst auch den Bemessungswert der Festigkeit X_d nach DIN 1052:2008 Gleichung (3) berechnen und dann X_d mit $k_{\text{mod,aM}}$ multiplizieren. Den Bemessungswert der Festigkeit unter Einwirkung aggressiver Medien erhält man dann mit:

$$X_{d,aM} = X_{d,Gl(3)} \cdot k_{\text{mod,aM}}$$

Nach der Einordnung des Mediums in Aggressivitätsbereiche ist der Beanspruchungsgrad für gasförmige, flüssige und feste Medien mit Hilfe der Tabellen 6 bis 8 zu ermitteln.

Anschließend wird mit dem Beanspruchungsgrad in Abhängigkeit von der Querschnittsgröße der Holzbauteile der Modifikationsbeiwert $k_{\text{mod,aM}}$ für aggressive Medien nach Tabelle 9 festgelegt.

Tabelle 5. Beanspruchungsgrade bei korrosiver Wirkung auf Holz und Brett-schichtholz [8]

Table 5. Ranges of aggressiveness with corrosive effect on wood and glued laminated timber [8]

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

Im Folgenden werden die einzelnen Möglichkeiten zur Berücksichtigung einer Korrosion von Holz beim Nachweis der Tragfähigkeit an Beispielen erläutert. Weg 1 (Berechnung mit modifizierten Festigkeiten) bezieht sich auf den Anpassungsfaktor $k_{\text{mod,aM}}$ aus Tabelle 9, welcher die Festigkeit des Holzes abmindert. Bei Weg 2 (Berechnung mit reduzierten Querschnittswerten) wird eine korrosive Schichtdicke aus entnommenen Proben ermittelt bzw. aus Erfahrungswerten geschätzt, die den vorhandenen Quer-

Tabelle 6. Aggressivitätsbereiche und Beanspruchungsgrade für Gase [8]

Table 6. Ranges of aggressiveness and degrees of stressing for gases [8]

Gas – Aggressivität steigend			Gasgruppe bei Konzentration in mg/m ³		
			A1	A2	A3
1.	CH ₂ O	Formaldehyd	1 bis 200	–	–
2.	NH ₃	Ammoniak	0,5 bis 20	–	–
3.	SO ₂	Schwefeldioxid	0,2 bis 10	10 bis 200	–
4.	NO ₂	Stickstoffoxid	0,1 bis 5	5 bis 25	über 25
5.	HCL	Chlorwasserstoff	0,05 bis 1	1 bis 10	über 10
6.	CL ₂	Chlor	0,02 bis 1	1 bis 5	über 5
Beanspruchungsgrad bei Nutzungsklasse			Gasgruppe bei Konzentration mg/m ³		
			A1	A2	A3
NKL 1			I	I	II
NKL 2			I	II	II
NKL 3			I	II	II

Tabelle 7. Beanspruchungsgrade für Lösungen [8]

Table 7. Degrees of stressing for chemical solutions [8]

Gruppe	Lösung	pH – Wert	Konzentration der Lösung [Vol-%]	Dissoziationsgrad bei 1- normaler Lösung	Beanspruchungsgrad
Säuren	Salpetersäuren	< 2	bis 5 über 5	hoch	III III
	Salzsäure		bis 5 über 5	hoch	III III
	Schwefelsäure		bis 5 über 5/ über 15	mittel	I II/III
	Essigsäure	4	über 15	niedrig	I
Basen	Natronlauge	> 13	bis 2 über 2	hoch	II III
	Kalilauge		bis 2 über 2	hoch	II III
	Ammoniumhydroxid		bis 5 über 5	niedrig	I II
Salzlösungen	Chloridlösung	7	bis 10/ über 10	mittel	I II
	Sulfatlösung		bis 10/ über 10	mittel	I II
	Ammonsulfat	5	bis 40		I
	Harnstoff	2	bis 40		II

Tabelle 8. Beanspruchungsgrade bei festen Medien [8]

Table 8. Degrees of stressing for solid media [8]

Feste Medien	pH – Wert	Löslichkeit im Wasser	Hygroskopizität	Beanspruchungsgrad bei		
				NKL 1	NKL 2	NKL 3
Kalidünger	8	gut (bis 20 %)	gut	I	II	II
Harnstoff	9	gut (bis 40 %)	stark	I	II	II
Superphosphat	3	(bis 5 %)	gut	I	I	II
Natriumchlorid	7	gut	gut	I	I	II
Ammonsulfat	5	gut (bis 40 %)	gering	I	I	I

Tabelle 9. Modifikationsbeiwert $k_{mod,aM}$ „Aggressive Medien“ im GZT und GZN von Bauholz und Brettschichtholz [8]**Table 9. Modification factors $k_{mod,aM}$ for aggressive media subject to the timber cross section size for structural timber and glued laminated timber [8]**

Beanspruchungsgrad	Querschnittsgröße [mm ²]	Modifikationsbeiwert $k_{mod,aM}$
BG I		1,0
BG II	< 9000	0,75
	< 30000	0,85
	≥ 30000	0,95
BG III	< 9000	0,65
	< 30000	0,75
	≥ 30000	0,85

Hinweis: Mindestabmessung des Holzbauteils bei BG II und BG III: 40 mm
 Mindestquerschnittsfläche: 4000 mm²;
 $k_{mod,aM}$ ist auf die Fläche des ungeschwächten Querschnittes bezogen.
 Bei Verwendung wirksamer Bekleidung oder Beschichtung ist $k_{mod,aM} = 1$.

Tabelle 10. Nutzungsklassen (NKL) nach DIN 1052:2008**Table 10. Service classes according to DIN 1052:2008**

DIN 1052: 2008 – 12		
NKL	Holzfeuchte [%]	DIN 1052:2008, Abschnitt 7.1.1
1	5 bis 15	T = 20 °C und einer rel. Luftfeuchte " 65 %, z. B. in allseitig geschlossenen und beheizten Bauwerken
2	10 bis 20	T = 20 °C und einer rel. Luftfeuchte " 85%, z. B. bei überdachten offenen Bauwerken
3	12 bis 24	was nicht in NKL 2 erfasst wird, z. B. für Konstruktionen, die der Witterung ausgesetzt sind (in Ausnahmefällen können bei speziellen Nutzungsbedingungen auch überdachte Bauwerke in Nutzungsklasse 3 eingeordnet werden)

schnitt reduziert. Aufgrund der Empfehlung in [3] wird der korrodierten Randzone ein Sicherheitszuschlag von 5 mm hinzugefügt (s. Tabelle 11).

Der angenommene Näherungswert von 10 mm zusätzlich eines Sicherheitszuschlages von 5 mm liegt auf der sicheren Seite, weshalb die Auslastung des Querschnittes im Vergleich zur Berechnung mit modifizierter Festigkeit sehr viel höher ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung mit modifizierten Festigkeiten geringere Schädigungstiefen im oberflächennahen Bereich angenommen werden.

Beispiel 4 (Berechnung mit modifizierten Festigkeiten)

Bemessung eines Bauteils in einem vorhandenen Speichergebäude aus Brettschichtholz aus GL 24c nach DIN 1052: 2008, Tabelle F.9, Querschnitt 200/600 mm, Spannweite 8,12 m mit Beanspruchung auf Doppelbiegung mit Längskraft nach der Berechnung mit modifizierten Festigkeiten:

Maximale Schnittkräfte:

$\max M_{y,d} = 74,93 \text{ kNm}$; $\max M_{z,d} = 0,56 \text{ kNm}$; $\max N_d = 480 \text{ kN}$

Querschnittswerte:

$I_y = 3,6 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$, $W_y = 1,2 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$; $I_z = 4,0 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$;
 $W_z = 4,0 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$; $A = 1,2 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$;
 $i_y = 173 \text{ mm}$; $i_z = 50,6 \text{ mm}$ (in y-Richtung ist der Träger in den Drittelpunkten gehalten)

Nutzungsklasse 2, Klasse der Lastwirkungsdauer „kurz“
 $\rightarrow k_{mod} = 0,9$

Aggressives Medium: Kalidünger

Aus Tabelle 8 erhält man für Nutzungsklasse 2 den Beanspruchungsgrad II; für eine Querschnittsfläche $A \geq 30000 \text{ mm}^2$ beträgt nach Tabelle 9 der Modifikationsbeiwert $k_{mod,aM} = 0,95$.

Materialkennwerte nach DIN 1052:2008, Tabelle F.9:

Charakteristische Festigkeiten für GL24c:

$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$, $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$

Charakteristische E- und G-Moduli:

$E_{0,05} = 5/6 \cdot E_{0,mean} = 5/6 \cdot 11600 = 9667 \text{ N/mm}^2$,

$G_{05} = 5/6 \cdot G_{0,mean} = 5/6 \cdot 590 = 492 \text{ N/mm}^2$

Nach DIN 1052:2008 ist der Nachweis nach Gl. (71) und Gl. (72) zu führen:

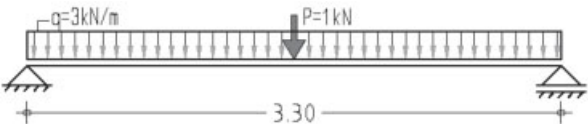
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_m \cdot f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

[DIN 1052:2008, Gl. (71)]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_m \cdot f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

[DIN 1052:2008, Gl. (72)]

Tabelle 11. Beispiel 3 – Nachweis einachsige Biegung
Table 11. Numerical example 3 – Proof uniaxial bending strength

Generelles Vorgehen beim Nachweis auf Biegung nach DIN 1052:2008, Abschnitt 10.2.6, Gleichung (53): $\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$ $\sigma_{m,d} = \frac{M}{W} \quad f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m}$ $\sigma_{m,d}$ Spannung aus Biegung, $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ Widerstandsmoment Nachweis auf Biegung DIN 1052:2008, Abschnitt 10.2.6, Gleichung (53): k_{mod} Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der Feuchte und der Lastdauer auf die Materialfestigkeit siehe DIN 1052:2008, Anhang F, Tabellen F.1 bis F.3 $f_{m,k}$ Rechenwerte für die charakteristische Festigkeit Vollholz (VH), Brettschichtholz (BSH) siehe DIN 1052:2008, Anhang F, Tabelle F.5 und F.9 γ_M Teilsicherheitsbeiwert 1,3 – siehe DIN 1052:2008, Abschnitt 5.4 Grenzzustände der Tragfähigkeit	
Berechnung mit modifizierten Festigkeiten (Weg 1) mit Modifikationsbeiwert $k_{mod,aM}$ aus Tabelle 9 zur Berücksichtigung der Wirkung aggressiver Medien auf die Festigkeit des Holzes $\frac{\sigma_{m,d}}{k_{mod,aM} \cdot f_{m,d}} \leq 1$ $\frac{6 \cdot M \cdot \gamma_m}{b \cdot h^2 \cdot k_{mod,aM} \cdot k_{mod} \cdot f_{m,k}} \leq 1$ b, h Querschnittswerte in [mm]	Berechnung mit reduzierten Querschnitten (Weg 2) mit geschwächtem Querschnitt nach Angriff durch chemisch-aggressives Medium (s. Bild 4) $\frac{\sigma_{m,d,red}}{f_{m,d}} \leq 1$ $\frac{6 \cdot M \cdot \gamma_m}{[b - (2d_{aM} + 5)] \cdot [h - (2d_{aM} + 5)]^2 \cdot k_{mod} \cdot f_{m,k}} \leq 1$ d_{aM} nicht mehr tragfähige Randzone in [mm]; Sicherheitszuschlag = 5 mm
Beispiel 3 Nachweis der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Wirkung eines aggressiven Mediums – gegeben: chemisch-aggressives Medium: Kalilauge KOH > 2 % Querschnitt: 160/220 mm NKL: 2 Holzart: NH C24 nach DIN 1052:2008/ S10 nach DIN 4074-1:2008 nichttragende Randzonenschicht: $d_{aM} = 8$ mm – statisches System: 	
Berechnung mit modifizierten Festigkeiten (Weg 1) Berechnung mit dem Modifikationsbeiwert $k_{mod,aM}$ aus Tabelle 9 $\frac{\sigma_{m,d}}{k_{mod,aM} \cdot f_{m,d}} \leq 1$ $\frac{6 \cdot M \cdot \gamma_m}{b \cdot h^2 \cdot k_{mod,aM} \cdot k_{mod} \cdot f_{m,k}} \leq 1$ $M_{d,max} = \frac{q_d \cdot \ell^2}{8} + \frac{F_d \cdot \ell}{4} = \frac{3 \cdot 3,3^2}{8} + \frac{1 \cdot 3,3}{4} = 4,908 \text{ kNm}$ $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$? C24 $k_{mod} = 0,6$? ständig, NKL2 $\gamma_m = 1,3$ $k_{mod,aM} \rightarrow$ KOH = Lösung, Base Konzentration der Lösung über 2 Vol.-% $\rightarrow$ aus Tabelle 7 erhält man BGIII, $A = b \cdot h = 160 \cdot 220 = 35200 \text{ mm}^2$ $A \geq 30.000 \text{ mm}^2$, aus Tabelle 9 ? $k_{mod,aM} = 0,85$ $\frac{6 \cdot 4,909 \cdot 10^6 \cdot 1,3}{160 \cdot 220^2 \cdot 0,85 \cdot 0,6 \cdot 24} \leq 1$ <u>0,404 " 1</u>	Berechnung mit reduzierten Querschnitten (Weg 2) Berechnung mit dem geschwächten Querschnitt durch dauernden Angriff des chemisch-aggressiven Mediums $\frac{\sigma_{m,d,red}}{f_{m,d}} \leq 1$ $\frac{6 \cdot M \cdot \gamma_m}{[b - (2d_{aM} + 5)] \cdot [h - (2d_{aM} + 5)]^2 \cdot k_{mod} \cdot f_{m,k}} \leq 1$ $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$? C24 $k_{mod} = 0,6$? ständig, NKL2 $\gamma_m = 1,3$ $d_{aM} = 8 \text{ mm}$ $\frac{6 \cdot 4,909 \cdot 10^6 \cdot 1,3}{[160 - (2 \cdot 8 + 5)] \cdot [220 - (2 \cdot 8 + 5)]^2 \cdot 0,6 \cdot 24} \leq 1$ <u>0,568 " 1</u>

Berechnung der Knickbeiwerte nach Gl. (64):

- in y- Richtung: mit $\lambda_y = 46,93$, der bezogenen Schlankheit nach Gl. (66) $\lambda_{rel,c,y} = 0,70$, $k_y = 0,765$ nach Gl. (65) und $\beta_c = 0,1$ für Brettschichtholz beträgt der Knickbeiwert $k_{c,y} = 0,93$
- in z-Richtung: mit $\lambda_z = 53,49$, der bezogenen Schlankheit nach Gl. (66) $\lambda_{rel,c,z} = 0,79$, $k_z = 0,84$, nach Gl. (65) mit $\beta_c = 0,1$ für Brettschichtholz beträgt der Knickbeiwert $k_{c,z} = 0,89$
- der Kippbeiwert beträgt nach Gl. (68) mit $\lambda_{rel,m} = 0,65$ nach Gl. (70); für $\lambda_{rel,m} > 0,75$ ist nach Gl. (68) $k_m = 1,0$!

Berechnung der Bemessungswerte der Festigkeit unter Berücksichtigung der Wirkung des aggressiven Mediums mit Hilfe der erweiterten Gl. (3) nach DIN 1052:2008 mit den modifizierten Bemessungswerten der Festigkeiten:

$$f_{c,0,d,aM} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{mod,aM} = 13,81 \text{ N / mm}^2$$

$$f_{m,0,d,aM} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{mod,aM} = 15,79 \text{ N / mm}^2$$

Nachweis nach DIN 1052:2008, Gl. (71) und Gl. (72) mit $k_{red} = 0,7$ da $h/b = 3 < 0,4$:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d,aM}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_m \cdot f_{m,y,d,aM}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d,aM}} = 0,71 \leq 1,0$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d,aM}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_m \cdot f_{m,y,d,aM}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d,aM}} = 0,61 \leq 1,0$$

Die Berücksichtigung des aggressiven Mediums über den $k_{mod,aM}$ entspricht in etwa einer nicht mehr tragfähigen äußeren Randschicht von 7 bis 8,5 mm. Tatsächlich konnte an Proben aus dem Speichergebäude für Kalidünger eine Korrosionsschichtdicke von 8 mm festgestellt werden (s. Beispiel 2).

5 Zusammenfassung

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt innerhalb der Regeln der DIN 1052:2008 im Bereich des Neubaus. Nach Abschnitt 1, Absatz (5) gelten die Regeln der Norm auch sinngemäß für Bauten im Bestand. Zur Präzisierung bestimmter Regeln auf das Bauen im Bestand wurden deshalb die Erläuterungen zu DIN 1052:2008 ergänzt (s. a. [7]).

Die Auswirkungen langfristig wirkender aggressiver Stoffe auf das Tragvermögen von Holzkonstruktionen sind bisher in DIN 1052:2008 nicht enthalten. Für bestehende Konstruktionen fehlen ebenfalls Grundlagen zur Beurteilung einer langzeitigen Wirkung aggressiver Medien auf die Tragfähigkeit und Standsicherheit verbauter Holzbauteile.

Für eine Reihe von chemischen Stoffen kann nicht nur für bestehende Konstruktionen, sondern auch für neu zu errichtende Bauten die aggressive Wirkung auf die Tragfähigkeit durch Berechnung mit modifizierten Festigkeiten berücksichtigt werden.

Ein zweiter Weg ergibt sich aus der Annahme eines Näherungswertes für die Zerstörungstiefe zuzüglich eines

Sicherheitszuschlages, mit dem der Querschnitt des Bauteiles abgemindert wird.

Die geschädigte Randzone kann bei bestehenden Holzkonstruktionen relativ genau durch Entnahme von Proben bestimmt und vom statisch nutzbaren Querschnitt abgezogen werden.

Dennoch sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um noch nicht behandelte stoffliche Wirkungen berücksichtigen zu können oder die bisherigen Erkenntnisse, wie die Verwendung eines Sicherheitszuschlages bei der Berechnung nach reduzierten Querschnitten zu vertiefen.

Literatur

- [1] Lißner, K., Rug, W.: Holzbausanierung, Grundlagen und Praxis der sicheren Ausführung. Berlin: Springer Verlag 2000 (2. Auflage in Vorbereitung).
- [2] Lißner, A.: Untersuchungen zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holz unter dem Einfluss von chemisch-aggressiven Medien. Diplomarbeit, Berufsakademie Glauchau, 2009.
- [3] Schwaar, A.: Schäden an Dachstühlen infolge Fehlanwendungen von Holz- und Flammenschutzmitteln – Auswirkungen auf die Bauteilsicherheit. Bauingenieur 79 (2004), H. 10, S. 473–475.
- [4] Schwaar, A.: Mazeration als Erscheinungsform chemischer Korrosion an verbaulichem Holz, Auslösende Faktoren, Mechanismen. Bautechnik 77 (2000), H. 7, S. 478–481.
- [5] Erler, K.: Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. Bautechnik 75 (1998), H. 8, S. 530–538.
- [6] Schöne, W.: Beurteilung von phenolharzverleimtem Brettschichtholz nach langjähriger Nutzungsdauer. Bautechnik 71 (1994), H. 2, S. 104–113.
- [7] Lißner, K., Rug, W.: Ergänzende Erläuterungen für Bauten im Bestand. In: Blaß, H.J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052, 2. Aufl. München, Karlsruhe 2005.
- [8] Erler, K., Rug, W.: Modification Factor „Aggressive Medien“ – a proposal for a supplement to the CIB-Model Code. CIB-W18A/22-100-4- paper, CIB-Meeting Berlin 1989. (Der Vorschlag entspricht dem Verfahren in der Ergänzung zur TGL 33135/01- Holzbau, Tragwerke Berechnung nach Grenzzuständen, Vorschrift 174/89 Staatliche Bauaufsicht, Berlin 1989).
- [9] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Berlin: Springer Verlag 1951.
- [10] Rug, W., Kofent, W.: New GDR Timber Design Code, State and Development. CIB-W18A/22-100-4- paper, CIB-Meeting Berlin 1989.
- [11] Erler, K.: Bauzustandsanalyse und Beurteilung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Korrosion des Holzes. Ingenieurhochschule Wismar, Habilitation, Wismar 1987.
- [12] Chrulev, V. M., Chasanov, R. S.: Erfahrungen bei der Anwendung geklebter Holzkonstruktionen in Gebäuden mit aggressiver Betriebsumwelt. Promit. Stroito., Moskva 54 (1977), H. 2, S. 27–28 (russ.).

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rug, Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH), Fachbereich Holztechnik, Fachgebiet Holzbau, Alfred-Möller- Straße 1, 16225 Eberswalde
Dipl.-Ing. (BA) Angelika Lißner, Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Glauchau, Kopernikusstraße 51-53, 08371 Glauchau