

Physiko – mechanische Untersuchungen
des Schadensmechanismus bei Dachstuhlholzern durch
spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Andreas Schwar

aus Sebnitz

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat.,habil. Ing. R. Frey

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. K. Liersch

Gutachter: Univ.- Prof. a.D. Dipl.-Ing. C. Scheer

Tag der Disputation: 15.04.2004

Vorwort

Bei zahlreichen Dachstuhlholzern traten durch die mehrfache Behandlung mit spezifischen (flüssigen) Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln Schädigungen auf.

Daher steht an, den entsprechenden Schädigungsmechanismus abzuklären und entsprechende baupraktische Folgerungen zu ziehen. Deshalb wurde die vorliegende Arbeit verfasst.

Mein besonderer Dank für die wissenschaftlichen Anregungen für die vorliegende Arbeit gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kothe und Herrn Prof. Dr. rer. nat., habil. Ing. R. Frey, welcher nach dem bedauerlichen Ableben von Herrn Prof. Kothe im März 2002 die weitere Begleitung der Dissertation übernommen hat.

Außerdem möchte ich mich bei folgenden Damen und Herren bedanken, welche mich bei meiner Arbeit großzügig unterstützt haben:

Herrn Dipl.-Ing. E. Flohr	DHBV (Fachbereich Holz- und Brandschutz)
Herrn Dr.rer.nat. K.-J. Hüniger	BTU Cottbus (LS Baustoffe/Bauchemie)
Frau Dipl.-Chem. K. Kittler	BTU Cottbus (LS Baustoffe/Bauchemie)
Herrn Dr.-Ing. M. Petke	BTU Cottbus (LS Baustoffe/Bauchemie)
Frau Dipl.-Chem. J. Panzer	BTU Cottbus (FMPA)
Frau Dipl.-Ing. E. Tatan	BTU Cottbus (ZAL)
Herrn Dr.rer.nat. W. Wiehe	BTU Cottbus (ZAL)
Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Gleiter	BTU Cottbus (Fach Verbundwerkstoffe und Glasbau)

Inhalt

0	Einleitung und Problemstellung	1
1	Bisheriger Erkenntnisstand	6
2	Schädigungsauslösende Faktoren und Randbedingungen bei Dachstuhlholzern	13
2.1	Praxis des Holzschutzes im Betrachtungszeitraum	13
2.1.1	Kombinationsmittel	14
2.1.2	Holzschutzmittel auf der Basis von Fluorsalzen	18
2.1.3	Physikalische und chemische Eigenschaften der Salze bzw. Salzlösungen von Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln	19
2.1.4	Chlorierte Kohlenwasserstoffe als Bestandteil von insektizid bzw. fungizid wirkenden Holzschutzmitteln	24
2.2	Umgebungsbedingungen	25
2.2.1	Baulich - Konstruktive Gegebenheiten	25
2.2.2	Schadgasimmissionen (Schwefeldioxid)	27
3	Eigene Untersuchungen	30
3.1	Fragestellungen zur Aufklärung der Schädigungsmechanismen	30
3.2	Physikalisch – chemische Untersuchungen	32
3.2.1	Fallbeispiele	32
3.2.1.1	Fallbeispiel 1: Dachstuhl der Lutherhalle zu Wittenberg	32
3.2.1.2	Fallbeispiel 2: Dachstuhl der Stadthalle Zerbst	35
3.2.1.3	Tagesgänge von relativer Luftfeuchte und Temperatur am Beispiel des Dachstuhles der Stadthalle Zerbst	38
3.2.2	Beprobung	43
3.2.3	Analyse	47

3.2.4	Ergebnisse und Auswertung	50
3.2.4.1	Ionen- und Salzkonzentrationen	72
3.2.4.2	Sorptionsverhalten	73
3.3	Kristallisationsverhalten der Salze	105
3.3.1	Das Verhalten reiner und gemischter Salzsysteme	105
3.3.2	Das System $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ am Beispiel der Lutherhalle zu Wittenberg (Ostflügel)	107
3.3.2.1	Methode und Randbedingungen	107
3.3.2.2	Berechnung und Diskussion am Beispiel LH O 0-3 KH	110
3.3.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	115
3.4	Ergebnisse aus den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen	119
3.5	Mechanisch – technologische Prüfungen an labormäßig beanspruchten Proben	122
3.5.1	Versuchsziel	122
3.5.2	Versuchsdurchführung	122
3.5.3	Ergebnisse / Auswertung	129
3.5.3.1	Abhängigkeit von Biegeelastizitätsmodul und Biegefestigkeit von der Rohdichte der Nullproben	129
3.5.3.2	Entwicklungen von E – Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Zyklen (Dauer der Wechselklimabeanspruchung)	131
3.5.3.3	Fehlerdiskussion	133
3.5.3.4	Mikroskopische Strukturuntersuchungen	135
3.6	Verlauf der Holzfeuchte unter der geschädigten Oberflächenschicht	136
4	Ableitung von Ursachen und Mechanismen der Schädigung aus den Untersuchungsergebnissen	140
4.1	Aufnahme und Eindringverhalten der korrosionsauslösenden Holzschutz- und Holzflammschutzmittel	140

4.2	Mechanismus der Schädigung	151
4.2.1	Beanspruchung	152
4.2.1.1	Kristallisationsdruck / Hydratationsdruck	152
4.2.1.2	Quellen und Schwinden	157
4.2.2	Beanspruchbarkeit	158
4.2.2.1	Mechanische Funktion der Zellwand	158
4.2.2.2	Mechanische Schwachstellen in der Zellwand	158
4.2.2.3	Herabsetzung der Beanspruchbarkeit durch einen sauren Angriff	160
4.2.3	Zusammenfassung	166
5	Praktische Bedeutung (Bauwerkssicherheit)	169
5.1	Größe des tragfähigen Restquerschnittes	169
5.2	Festigkeit des Restquerschnittes	172
5.3	Zeitlicher Verlauf der korrosiven Schädigung	177
5.4	Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln und Anschlüssen	178
5.4.1	Zimmermannsmäßig hergestellte Verbindungen	178
5.4.2	Mechanische Verbindungsmittel	183
6	Sanierung durch Holzschutz- und Holzflammschutzmittel geschädigter Dachstuhlhälzer	185
6.1	Sanierungsziele	185
6.2	Sanierungsstrategien	185
6.2.1	Reduzierung des Salzgehaltes	187
6.2.2	Veränderung der bauphysikalischen Randbedingungen (rel. Luftfeuchte und Temperatur)	189
6.2.3	Reduzierung der Feuchteaufnahme und –abgabe des Holzes	190
6.2.4	Anwendung von Sanierungsmitteln	192
6.2.5	Zusammenfassende Bewertung von Sanierungsstrategien	194
6.3	Sanierungslösungen für die untersuchten Dachstühle	197

7	Zusammenfassung und Ausblick	199
	Literatur und Quellenverzeichnis	204
	Anlage A – Fotodokumentation	210
	Anlage B I – Masse der IC – Proben bei $\phi = 65 \%$	218
	Anlage B II – Masse der SI - Proben	219
	Anlage C I – Berechnung der Salzaufnahme A_F (Lutherhalle Wittenberg)	223
	Anlage C II – Berechnung der Salzaufnahme A_F (Stadthalle Zerbst)	223
	Anlage D – Tabellarische Zusammenstellung von Gesamtsalzgehalt S und Salzaufnahme A_F	224
	Anlage E I – Ergebnisse der Ionenchromatographie (IC) – Analyse (Lutherhalle Wittenberg)	225
	Anlage E II – Ergebnisse der Ionenchromatographie (IC) – Analyse (Stadthalle Zerbst)	227
	Anlage F – Tagesgänge der Stadthalle Zerbst	229
	Anlage G – Ergebnisse der Biegeversuche nach DIN 52183	231
	Anlage H I – Übersicht zu den statisch konstruktiven Grundsätzen der Hausdächer, nach [Mönck 1998]	236
	Anlage H II – Vor- und Nachteile der Dachsysteme, nach [Steinbrecher 1998]	236
	Anlage H III – Übersicht Sparrendach	237
	Anlage H IV – Übersicht Pfettendach	238
	Anlage I – Gefährdungsklassen für Bauholz nach DIN 68800 - 3	239

Verzeichnis der Bilder, Tabellen, Diagramme und Übersichten

Bild 0.1 Korrosionserscheinungen (Zerfaserung der Oberfläche und Salzausblühungen) an Hölzern des Dachstuhles der Stadthalle Zerbst	2
Bild 0.2 Salzausblühung an einer durch chemische Korrosion geschädigten Stuhlsäule	3
Bild 1.1 Zunahme der Korrosionsschichtdicke d im Laufe der Nutzzeit	10
Bild 2.1 Entwicklungsverlauf beim Hausbock (<i>Hylotrupes bajulus</i> [L.]), nach [Sutter 1997]	16

Bild 2.2 Fließschema des enzymatischen Zelluloseabbaus, nach [Schmidt 1993]	17
Bild 2.3 Funktionsweise eines belüfteten Dachraumes im Winter	26
Bild 2.4 Schwefeldioxid Emissionen, nach [(3)]	29
Bild 3.1 Querschnitt Dachstuhl Lutherhalle	34
Bild 3.2 Querschnitt Dachstuhl Stadthalle Zerbst	36
Bild 3.3 Schematische Darstellung der Beprobung	44
Bild 3.4 Abgelöste Frühholz- als auch Spätholzzellen (Tracheiden)	120
Bild 3.5 Abgelöste Spätholzzellen	120
Bild 3.6 Abgelöste Zellen bzw. Zellgruppen	121
Bild 3.7 Referenzprobe vom Ostflügel (Dachstuhl Lutherhalle Wittenberg)	121
Bild 3.8 Probenbeschaffenheit (alle Angaben in mm) und Einschnittbereich	122
Bild 3.9 Statisches System einer Dreipunktbelastung	127
Bild 3.10 Separation von Fasertracheiden (Bildmitte) in der Zugbruchzone beim Biegeversuch	135
Bild 3.11 Beprobungsschema	136
Bild 3.12 Beprobungsschema (Dachlatte)	138
Bild 4.1: Kapillarkräfte	141
Bild 4.2 Schematische Darstellung der Salzaufnahme in die Hohlräume des Mikrokapillarsystems	143
Bild 4.3 Anordnung von Zellulose, Lignin und Hemizellulose in der hölzernen Zellwand	147
Bild 4.4 Schichtenaufbau der Zellwand, nach [Eaton 1993]	149
Bild 4.5 Bruchbild bei langsamer Belastung [Niemz 1993]	160
Bild 4.6 Bruchbild bei schneller Belastung [Niemz 1993]	160
Bild 4.7 Lichtmikroskopische Aufnahme von delaminierten Spätholztracheiden (Lutherhalle Wittenberg)	168
Bild 5.1 Querschnitt eines durch chemische Korrosion geschädigten Querschnittes mit (links) und ohne Mazeration (rechts)	170
Bild 5.2 Bohrkern in Druckschale	177
Bild 5.3 Grundformen der zimmermannsmäßigen Verbindungen, aus [Mönck 1998]	179
Bild 5.4 Stirnversatz mit einer oberflächennahen Schädigung	179
Bild 6.1 Holzoberfläche nach Einsatz eines mechanischen Verfahrens	187

Tabelle 2.1 Ionenkonzentrationen im Oberflächenbereich des Holzes und deren mögliche Herkunft	13
Tabelle 2.2 Chemische Analyse von Kombinationsmitteln, nach [Busse 1987]	15
Tabelle 2.3 Eigenschaften von Salzen aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln [Gmelin]	20
Tabelle 2.4 Dichte ρ und pH-Wert einiger Salze aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln	21
Tabelle 2.5 Kritische relative Luftfeuchten einiger Holzschutz- und Holzflammschutzsalze	23
Tabelle 2.6 Holzschutzmittel mit chlorierten Kohlenwasserstoffen als Wirkstoff	25
Tabelle 3.1 Zusammenfassung der Ionen- und pH – Wert Analyse (Lutherhalle Wittenberg)	50
Tabelle 3.2 Zusammenfassung der Ionen- und pH – Wert Analyse (Stadthalle Zerbst)	51
Tabelle 3.3 Phasen der Sorption, nach [Niemz 1993]	74
Tabelle 3.4 Mittelwerte der Holzfeuchte u in % bei relativer Luftfeuchte $\phi = 35, 65$ und 95 % (entsprechende Schicht aus Süd, West, Nord und Ost nach Entsalzung)	103
Tabelle 3.5 Ionenbilanz	107
Tabelle 3.6 Anteil der PO_4^{3-} -, SO_4^{2-} - und NH_4^+ - Ionen (vgl. Anlage E – Konzentrationen auf g/kg Material bezogen)	109
Tabelle 3.7 Ausgangsdaten	110
Tabelle 3.8 Ionenkonzentrationen C_x und absolute Ionenmassen $m_{\text{SI-x}}$	111
Tabelle 3.9 Aufkonzentration der PO_4^{3-} - und SO_4^{2-} Ionen in der Salzlösung	112
Tabelle 3.10 Holzfeuchte (Mittelwert \bar{u} und Standardabweichung S) bei Desorption	134
Tabelle 4.1 Durchmesser von Kationen und Anionen [Holleman 1984]	146
Tabelle 4.2 Verteilung der chemischen Bestandteile in der Zellwand	148
Tabelle 5.1 Bemessungswert der Normalkraft (F_d) in der Strebe und die erforderlichen Ausgangsdaten	182

Diagramm 1.1 Biegefestigkeit σ_B und Holzfeuchte u zum Zeitpunkt der Festigkeitsprüfung nach Konditionierung im Normalklima (65 % rel. Luftfeuchte und 20 °C), nach [Kerner 1984].	8
Diagramm 2.1 Löslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur [Chemical Rubber Company, Gmelin]	21
Diagramm 2.2 Schematischer Verlauf der Fluorabgabe von $Mg[SiF_6] \cdot 6H_2O$ und NH_4HF_2 in Abhängigkeit der Zeit	22
Diagramm 3.1 Tagesgang vom 16.02.02	39
Diagramm 3.2 Tagesgang vom 15.04.02	40
Diagramm 3.3 Tagesgang vom 14.05.02	41
Diagramm 3.4 Tagesgang vom 18.06.02	42
Diagramm 3.5 Tagesgang vom 06.07.02	43
Diagramm 3.6 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () KH	53
Diagramm 3.7 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () SH	54
Diagramm 3.8 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () R	55
Diagramm 3.9 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH W () KH	56
Diagramm 3.10 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH W () SH	57
Diagramm 3.11 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ S ()	58
Diagramm 3.12 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ W ()	59
Diagramm 3.13 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ N ()	60
Diagramm 3.14 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ O ()	61
Diagramm 3.15 Salzverteilung Lutherhalle Ost Kernholz	63
Diagramm 3.16 Salzverteilung Lutherhalle Ost Splintholz	64
Diagramm 3.17. Salzverteilung Lutherhalle Ost Referenzprobe	65
Diagramm 3.18 Salzverteilung Lutherhalle West Kernholz	66

Diagramm 3.19 Salzverteilung Lutherhalle West Splintholz	67
Diagramm 3.20 Salzverteilung Stadthalle Zerbst Süd	68
Diagramm 3.21 Salzverteilung Stadthalle Zerbst West	69
Diagramm 3.22 Salzverteilung Stadthalle Zerbst Nord	70
Diagramm 3.23 Salzverteilung Stadthalle Zerbst Ost	71
Diagramm 3.24 Sorptions- und Desorptionsisothermen des Holzes, A...Nullprobe, B...bei Abbau hydrophiler Bestandteile, C...bei Salzbeaufschlagung	73
Diagramm 3.25 Abhängigkeit der Holzfeuchte vom Gesamtsalzgehalt	77
Diagramm 3.26 Sorptionsisothermen - Lutherhalle Wittenberg Ost Kernholz	79
Diagramm 3.27 Sorptionsisothermen - Lutherhalle Wittenberg Ost Splintholz	81
Diagramm 3.28 Sorptionsisothermen - Lutherhalle Wittenberg Ost Referenzprobe	83
Diagramm 3.29 Sorptionsisothermen - Lutherhalle Wittenberg West Kernholz	86
Diagramm 3.30 Sorptionsisothermen - Lutherhalle Wittenberg West Splintholz	89
Diagramm 3.31 Sorptionsisothermen – Stadthalle Zerbst Süd	91
Diagramm 3.32 Sorptionsisothermen – Stadthalle Zerbst West	94
Diagramm 3.33 Sorptionsisothermen – Stadthalle Zerbst Nord	97
Diagramm 3.34 Sorptionsisothermen – Stadthalle Zerbst Ost	100
Diagramm 3.35 Kristallisationsverhalten gemischter $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ / $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – Lösungen	106
Diagramm 3.36 Modifizierte Löslichkeitskurve in Abhängigkeit der PO_4^{3-} – und SO_4^{2-} - Ionenkonzentration	108
Diagramm 3.37 Kristallisationsdiagramm für die Probe LH O (...) KH	113
Diagramm 3.38 Kristallisationsdiagramm für LH O (...) SH	116
Diagramm 3.39 Kristallisationsdiagramm für die Probe LH O (...) R	117
Diagramm 3.40 Schematische Darstellung der Zyklen I zwischen zwei Biegeprüfungen	124
Diagramm 3.41 Schematische Darstellung der Zyklen II zwischen zwei Biegeprüfungen	125
Diagramm 3.42 Salzaufnahme in Abhängigkeit der Anzahl der Aufträge von Salzlösung (Besprühen)	127
Diagramm 3.43 Biegeelastizitätsmoduls E_B in Abhängigkeit der Rohdichte ρ_R (Nullproben)	129

Diagramm 3.44 Biegefestigkeit σ_B in Abhängigkeit der Rohdichte ρ_R (Nullproben)	129
Diagramm 3.45 Entwicklung des Biegeelastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Anzahl der Behandlungszyklen	131
Diagramm 3.46 Entwicklung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Behandlungszyklen	132
Diagramm 3.47 Abhängigkeit der Holzfeuchte von der Zeit beim Übergang von $\theta = 40\text{ °C} / \phi = 25\%$ auf $\theta = 23\text{ °C} / \phi = 90\%$	137
Diagramm 3.48 Holzfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen	139
Diagramm 4.1 Chemische Zusammensetzung der einzelnen Zellwandschichten	148
Diagramm 4.2 Das System Natriumsulfat / Wasser bei einer Temperatur von $\theta = 0 \dots 50\text{ °C}$ aus Steiger [1996]	155
Diagramm 4.3 Biegefestigkeit σ_B über der Zeit, nach [Lebow 1999]	162
Diagramm 4.4 pH – Wert über der Zeit, nach [Lebow 1999]	162
Diagramm 4.5 pH – Wert und Sulfationenkonzentration in g/kg	164
Diagramm 5.1 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite $b = 6\text{ cm}$	174
Diagramm 5.2 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite $b = 12\text{ cm}$	174
Diagramm 5.3 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite $b = 24\text{ cm}$	175
Diagramm 5.4 Bemessungswert der Normalkraft F_d in Abhängigkeit der festigkeitsgeminderten Randschicht d	183
Diagramm 6.1 Möglicher Schwankungsbereich der relativen Luftfeuchte $\Delta\phi$ eines belüfteten historischen Daches und die tatsächlich gemessene Schwankungsbreite zw. Maximal- und Minimalwert im jeweiligen Monat	190
Übersicht 3.1 Beprobungsschema Dachstuhl Lutherhalle Wittenberg	45
Übersicht 3.2 Beprobungsschema Dachstuhl Stadthalle Zerbst	46
Übersicht 3.3 Herstellung der Holzproben für die REM - Untersuchungen	49
Übersicht 3.4 Zyklus I	123
Übersicht 3.5 Zyklus II	124
Übersicht 4.1 Zusammenfassung der Beanspruchung / Beanspruchbarkeit	166

Übersicht 6.1 Oberflächenbehandlungen bei Holz	191
Übersicht 6.2 Anbieter von Sanierungsmitteln	193
Übersicht 6.3 Vor- und Nachteile einzelner Sanierungsstrategien	195

0 Einleitung und Problemstellung

Holz gilt allgemein als resistent gegen die Einwirkung von Chemikalien. Dies zeigen z.B. seine Einsatzgebiete im konstruktiven Ingenieurbau (wie für Hallen zur Lagerung von Salzen der Düngemittel- und Kaliindustrie, für Überdachungen von chemischen Anlagen sowie für den Einsatz im Salzbergbau).

Unter bestimmten Voraussetzungen können aber auch bei diesen Einsatzgebieten beim Holz von der Oberfläche ausgehende Schädigungen eintreten, wie (Bild 0.1 und 0.2)

- die Verfärbung (meist gelblich - braun bis braun) einer Randschicht,
- das Auffasern (faserige bis wollige Struktur), Aufweichen, jahringweise Ablösen oder das Pulverisieren der Oberfläche, verbunden mit einem Querschnittverlust sowie ggf. auch mit einer Festigkeitsminderung des Restquerschnittes,
- die Bildung von Salzausblühungen auf der Oberfläche und eine dadurch bewirkte erhöhte Holzfeuchte in den Randbereichen bei entsprechenden Umweltbedingungen.

Als abträglich sind auch korrosive Angriffe auf das Holz einzustufen, welche durch spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel verursacht werden.

Die Chemikalien und Prozesse, welche den korrosiven Angriff auf das Holz ausüben, können auch metallische mechanische Verbindungsmittel beeinträchtigen.

Tritt eine chemische Korrosion an Dachstuhlholzern auf, so ist diese manchmal auf eine Überdosierung von Holz- bzw. Flammschutzmitteln bei ungünstig wirkenden Umgebungsbedingungen zurückzuführen.

Das durch ungeeignete Holzschutz- und Holzflammschutzmittel bewirkte spezielle Schadbild ist die Zerfaserung der oberflächennahen Schichten. Dieser Vorgang wird durch den Begriff der „Mazeration“ gekennzeichnet.



a)

b)

Bild 0.1 Korrosionserscheinungen (Zerfaserung der Oberfläche und Salzausblühungen) an Hölzern des Dachstuhles der Stadthalle Zerbst

Eine „Mazeration“ (<lat.>) beinhaltet hierbei (beim Holz) die Lockerung oder Auflösung des festen Zellgefüges bzw. des festen Zellverbandes im Bereich der Mittelschicht durch chemische bzw. physikalische Einwirkungen. Die Einzelzelle bleibt dagegen weitgehend erhalten. Bei starker Schädigung kommt es dadurch zum Ablösen und Herabfallen ganzer Faserbüschel.

Das Holz ist im Randbereich meist gelblich-braun verfärbt. Außerdem bilden sich auf der Oberfläche ggf. weiße Salzausblühungen. Die Tiefe der aktuellen visuell sichtbaren Schädigung beträgt einige Millimeter, in Extremfällen wurden auch Schädigungen beobachtet, welche sich in den Zentimeterbereich erstrecken.

Betroffen von der „Mazeration“ ist eine ganze Reihe von teilweise historischen Dachstühlen, vornehmlich in den Neuen Bundesländern. Zu nennen wären beispielsweise die Dachstühle von der Albrechtsburg Meißen, von der Lutherhalle Wittenberg, vom

Schloss Cecilienhof Potsdam, vom Schloss Oranienburg, vom Gebäude der Landesregierung Potsdam, vom Schloss Doberlug-Kirchhain, von der Stadthalle Zerbst und vom Gerichtsgebäude Bielefeld.



Bild 0.2 Salzausblühung an einer durch chemische Korrosion geschädigten Stuhlsäule

Aber auch in weniger bedeutenden Objekten sind diese Phänomene anzutreffen. Meist handelt es sich um öffentliche Gebäude, bei denen entsprechend den jeweiligen Landesbau- bzw. Feuerwehrverordnungen (z.B. diejenige der ehem. Hauptabteilung Feuerwehr der DDR) eine wiederholte Behandlung der Konstruktionshölzer mit feuerhemmenden Schutzmitteln in bestimmten Zeitabständen und Konzentrationen vorgeschrieben worden war.

Obwohl das Fortschreiten der Schädigung nur sehr langsam eintritt und obwohl nur in den seltensten Fällen bisher ein Standsicherheitsproblem entstand, geht unwiederbringlich die historische Bausubstanz des Holzes verloren – in diesem Zusammenhang auch wertvolle historische Informationen wie Bearbeitungsspuren und Abbandzeichen.

Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen der betroffenen Objekte können nur als sehr eingeschränkt erfolgreich eingeschätzt werden. Teilweise traten die Erscheinungen der „Mazeration“ nämlich nach relativ kurzer Zeit wieder auf oder es kam zu weiteren Salzausblühungen – beispielsweise beim Einsatz von Chemikalien im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen.

Daher ist wissenschaftlich abzuklären:

- Unter welchen Bedingungen kommt die chemische Korrosion bei Dachstuhlhölzern zustande, welche mit spezifischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln behandelt wurden?
- Wie verläuft der Schädigungsmechanismus? Handelt es sich vorrangig um einen selektiv-chemischen Angriff infolge der aufgetragenen chemischen Bestandteile der Mittel oder spielen Prozesse wie Auslaugung und der chemische Abbau von spezifischen Holzbestandteilen alternativ oder parallel eine wichtige Rolle für den Schädigungsverlauf? In welchen makro- bzw. mikroanatomischen Holzstrukturen findet die Schädigung statt?
- Entwickelt sich die Reduzierung des Querschnittes linear, degressiv oder progressiv? Welche Festigkeit ist unter der geschädigten Oberfläche vorhanden? Besteht eine Gefährdung der Standsicherheit bzw. der Gebrauchstauglichkeit des Bauteils?

Die wissenschaftlichen Untersuchungen dienen auch folgendem Zweck:

- Die wissenschaftlich fundierte Kenntnis der Bedingungen für das Zustandekommen der chemischen Korrosion durch manche Holzschutz- und Holzflammschutzmittel und die Kenntnis der Schädigungsmechanismen ermöglicht die Entwicklung erfolgreicher und nachhaltiger Sanierungsmethoden.

Hin und wieder ist auch eine sog. Dachlattenkorrosion – ebenfalls in Form von „Mazeration“ – zu beobachten. Diese wird meistens verursacht durch die Einwirkung von Auslaugungen aus älteren Dachziegelmaterialien und dem Ziegelverstrichmörtel.

Beispielsweise gelangen Magnesiumsulfat und Kalziumhydroxid dieser Materialien über die Feuchtigkeit der Luft und durch Durchfeuchtungen der Materialien in das Holz. Der Effekt kann durch Luftverschmutzungen, wie erhöhte Schwefeldioxidkonzentrationen, verstärkt werden [Erler 1998]. Diese spezifische Dachlattenkorrosion wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings bewusst nicht näher untersucht.

Als Hauptursache für das Zustandekommen der chemischen Korrosion in Form der „Mazeration“ durch spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel wurde bisher das Wirken eines Kristallisationsdruckes eingelagerter Salze, entstanden durch die Wechselwirkung des Holzes mit den spezifischen Mitteln, auf die Holzstruktur zwar manchmal vermutet, jedoch wissenschaftlich nicht abgeklärt. Ob und unter welchen Bedingungen dieser Druck, bewirkt durch die örtliche Bildung größerer, voluminöser Kristalle, eine Schädigung der oberflächennahen Holzstruktur verursacht, wird im Rahmen dieser Arbeit nachhaltig untersucht.

Deshalb wurden beispielhaft zwei Dachstühle (Lutherhalle in Wittenberg und Stadthalle Zerbst) untersucht, wo die typischen Schäden der „Mazeration“ verstärkt vorgefunden wurden. Dazu wurden Randbedingungen (z.B. die relative Luftfeuchten und die Einwirkungstemperaturen) erfasst, die Dachstuhlhälzer beprobt und an den Proben chemische Analysen (Ionenkonzentration, pH-Wert) durchgeführt, sowie physikalische Kenngrößen (z.B. die Holzfeuchten) ermittelt.

Alternativ wurde an kleinen Proben eine Holzschutz- bzw. Holzflammschutzbehandlung simuliert. Diese Proben wurden einer definierten Wechselklimabeanspruchung ausgesetzt. Nach bestimmten Zyklen wurden Proben entnommen und daran Biegeversuche nach DIN 52186 vorgenommen, um Veränderungen bezüglich der Festigkeit und des Verformungsverhaltens quantifizieren zu können.

1 Bisheriger Erkenntnisstand

Nachfolgend werden zusammenfassend alle dem Autor bekannten Arbeiten abgehandelt, die infolge chemisch / physikalischer Einwirkung chemische Holzkorrosionserscheinungen – teilweise in Form von „Mazeration“ beinhalten.

W. Mönck beschrieb erstmals 1973 das Wirken von Salzen – vorrangig in Superphosphat Lagerhallen - auf das Holz. Superphosphat ist ein Gemisch aus Calciumsulfat CaSO_4 und Calciumhydrogenphosphat $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Aus den Lösungen der Mittel können Salze auskristallisieren und das Holz u.U. mechanisch zerstören. Dies kann, von der Oberfläche aus beginnend zum vollständigen Strukturverlust führen. Als typisches Kennzeichen wird eine an der Oberfläche fasrige bis wollige Struktur genannt, außerdem jahresringweises Ablösen und eine dicke, weiße und feste Salzkruste. Als Angriffsbedingungen sind hohe Luftfeuchten sowie Ein- und Ablagemöglichkeiten für das Salz nötig. [Mönck 1973].

Ebenso wie Salze führen auch Industrieabgase in Form von Schwefeldioxid SO_2 nach der Oxidation zu Schwefelsäure H_2SO_4 bei hoher Luftfeuchte zu einer fasrigen bis wolligen Oberflächenstruktur, außerdem zu einem stechenden Geruch und bräunlicher Verfärbung der Hölzer. [Mönck 1973].

Brüche erscheinen als glatte Trennbrüche (Salzeinwirkung), kurzfasrig bzw. glatt (Einwirkung von Schwefeldioxid SO_2) im Gegensatz zu den langfasrigen Brüchen des ungeschädigten Holzes. [Mönck 1973].

Bei einer freitragenden Holzkonstruktion (z.B. 36 Jahre Beanspruchung durch Salze und Schwefelsäure) wurde mittels der Schädigungstiefe von 10 mm die jährliche Zerstörungsrate von 0,278 mm / Jahr ermittelt und der Verlauf (degressiv, progressiv oder linear) diskutiert. [Mönck 1973].

W. Mönck untersuchte Schäden durch eine chemische Korrosion an zwei Lagerhallen für Superphosphat. Die waagerechten Hölzer waren teilweise bis 20 cm dick mit

Salz belegt. Die Hölzer waren an der Oberfläche regelrecht aufgeweicht, zeigten keine Holzstruktur mehr und ließen sich mit einem stumpfen Gegenstand leicht eindrücken. Es wurde eine dünne weiße Kruste festgestellt, und das Holz war bis in eine Tiefe von 10 mm gelbbraun verfärbt. [Mönck 1975]

In den geschädigten Bauteilen kommt es aufgrund der Querschnittsminderung zur Spannungszunahme. Damit werden die zulässigen Spannungen teilweise überschritten und die Tragfähigkeit des Gebäudes kann auf Dauer nicht gewährleistet werden. Festigkeitsversuche ergaben eine signifikante Abnahme der Scher-, Biege-, Druck- und Zugfestigkeit. [Mönck 1975].

Die meisten Brüche wurden als kurzsplittrig beschrieben. pH – Wert Messungen ergaben einen deutlichen Gradienten (zur Oberfläche hin abnehmend). [Mönck 1975].

N. Parameswaran führte lichtmikroskopische, raster- und transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen an Balken eines sog. Pottaschelagerhauses durch. Dadurch konnten Strukturschädigungen bis in mikroanatomische Bereiche nachgewiesen werden.

Die Oberfläche des Fichtenholzes hatte ein wolleartiges Aussehen, durchsetzt mit glänzenden Partikeln. Untersuchungen mittels der Rasterelektronenmikroskopie (REM) ergaben, dass das wolleartige Aussehen infolge der Auflösung und Abtrennung einzelner Tracheiden entstanden ist. Die Trennung erfolgte offensichtlich in dem Bereich Mittellamelle / Primärwand P und Sekundärwand S1, (Bild 4.4). Das ist wahrscheinlich mit der Ablagerung großer Salzkristalle zwischen den Zellen verbunden.

Der Autor folgerte, dass der Angriff auf die inkrustierten Substanzen der Zellulosefibrillen erfolgt. Als Ursache für die Separation der Tracheiden voneinander wurden ein Abbau der Mittellamelle und die Entstehung von Rissen im Grenzbereich P / S1 angeführt. [Parameswaran 1981].

Mittels Elementaranalyse wurden in den Oberflächenkristallen die Elemente Schwefel, Chlor und Kalium gefunden. Eine Röntgendiffraktometrie - Analyse ergab Kaliumchloridkristalle KCl.

N. Parameswaran verglich die mikromorphologischen Effekte mit denen des alkalischen Aufschlusses und stellte Gemeinsamkeiten fest. [Parameswaran 1981].

Ziel der Versuche von G. Kerner war es, das Verhalten von mit Düngesalzen beaufschlagten Hölzern bei wechselnden klimatischen Umgebungsbedingungen zu erfassen. Dazu wurden Proben einer zweijährigen Dauerwechselbelastung im Labormaßstab ausgesetzt. Bei den mit Harnstoff behandelten Proben war ein deutlicher Abfall der Biegefestigkeit zu verzeichnen, gleichzeitig stieg die Hygroskopizität stark an und es wurde ein verstärktes Quellen beobachtet. [Kerner 1984].

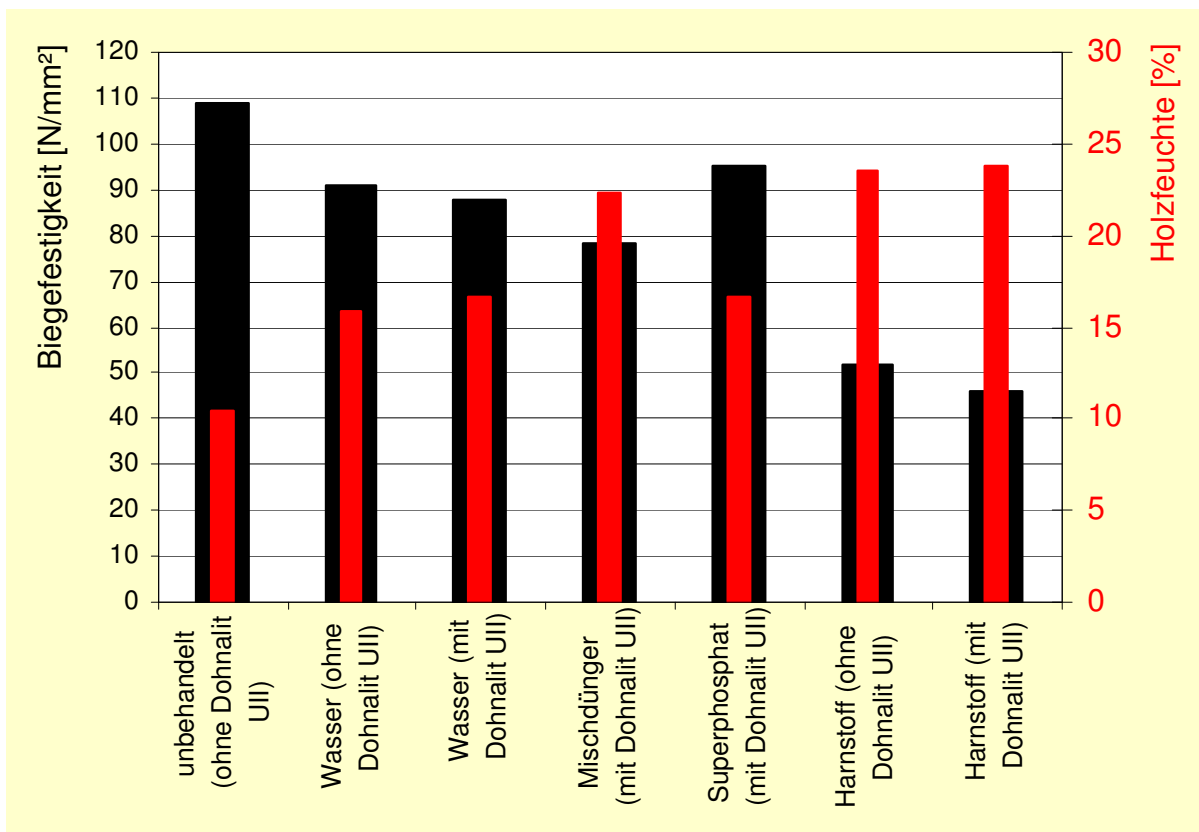


Diagramm 1.1 Biegefestigkeit σ_B und Holzfeuchte u zum Zeitpunkt der Festigkeitsprüfung nach Konditionierung im Normklima (65 % rel. Luftfeuchte und 20°C), nach [Kerner 1984].

Einige Proben wurden vor der Dauerwechselbelastung mit dem damals oft verwendeten Holzschutzmittel Dohnalit UII behandelt.

Der Festigkeitsabfall ist im Wesentlichen an die extrem hohe Hygroskopizität des Harnstoffes gebunden, welcher schon im Normalklima (20 °C / 65%) eine sehr hohe Ausgleichsholzfeuchte verursacht und an die Volumenquellung, welche auch bei Rücktrocknung bestehen bleibt. Bei Superphosphat und Mischdünger läge kein holzschädigendes Verhalten vor. [Kerner 1984].

Eine Zerfaserung der Oberfläche wurde nicht beobachtet. G. Kerner schloss daraus, dass die Holzerfaserung mit dem völligen Verlust der Festigkeit in dieser Oberflächenschicht eine in zeitraffenden Laborversuchen nicht nachvollziehbare Langzeitreaktion ist, diese entsteht erst in einem Zeitraum von Jahrzehnten [Kerner 1984].

Sehr umfangreiche Arbeiten liegen von K. Erler vor:

Den Nachweis, dass die Einwirkung von Salzlösungen nach einer definierten Zeit, mehr oder weniger eine Reduzierung der Biegefestigkeit bewirkt, brachte K. Erler 1984. Der pH –Wert scheint hier für die Festigkeitsabnahme eine wichtige Rolle zu spielen. [Erler 1984].

Die Holzkorrosion wird von K. Erler in Anlehnung an den Korrosionsbegriff für andere Werkstoffe folgendermaßen definiert; erstmals in [Erler 1988]:

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

Die Holzschädigungen durch Schadorganismen (Insekten, Pilze) sind nicht einbezogen, weil die Schädigung dort auch aus dem Inneren heraus erfolgen kann.

Um die Zunahme der Korrosionsschichtdicke über der Zeit quantifizieren zu können, wurde eine Vielzahl von Hölzern aus Gebäuden der Dünger- und Kaliindustrie untersucht. Die Hölzer waren jahrzehntelangen chemischen Einwirkungen ausgesetzt. [Erler 1988].

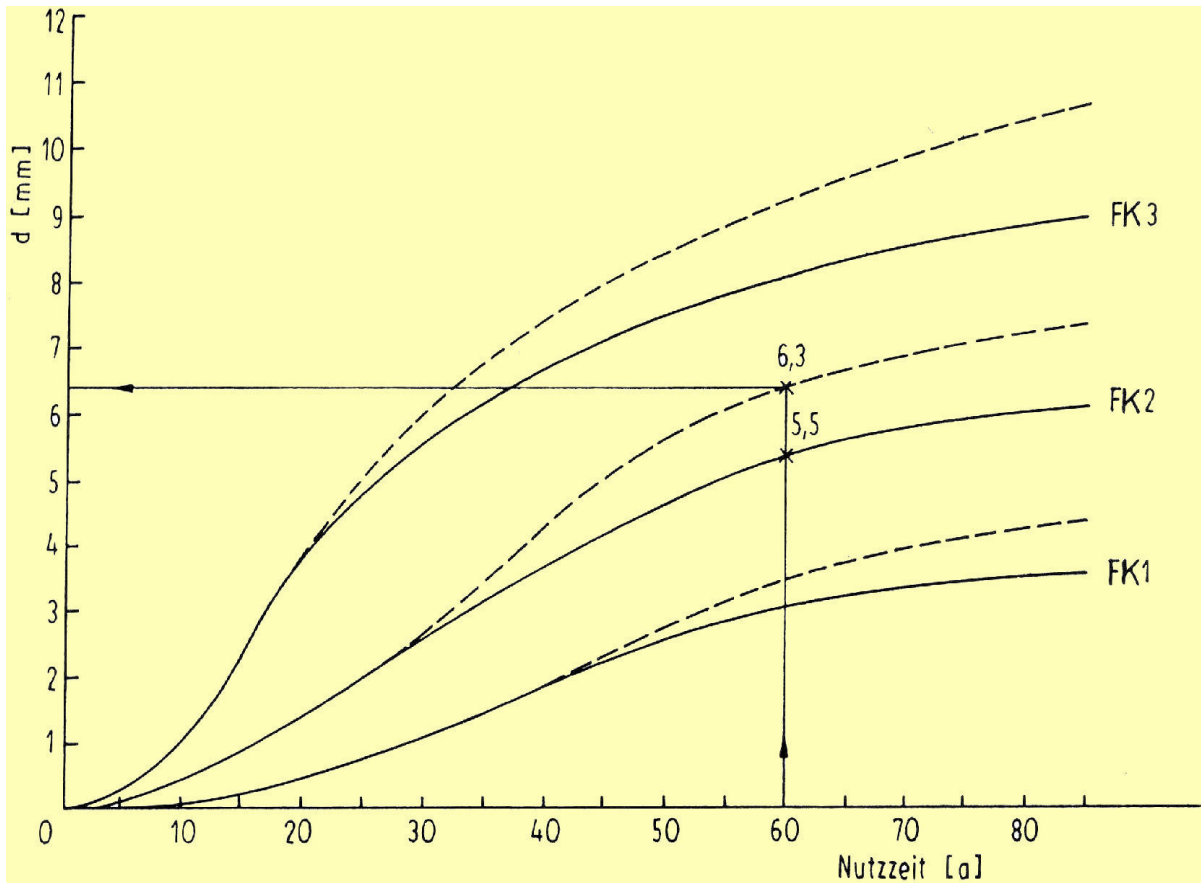


Bild 1.1 Zunahme der Korrosionsschichtdicke d im Laufe der Nutzzeit (Korrosionsrate) bei einer Salzeinwirkung und verschiedenen relativen Luftfeuchten; - - - mit wolliger Oberfläche, ----- ohne wolle Oberfläche, FK... Feuchteklasse [Erlar 1988, 1998, 2000]

Die Zunahme der Korrosionsschichtdicke gestaltet sich in den ersten Jahren progressiv und geht danach langsam mit dem Entstehen einer wolle Oberfläche in einen degressiven Verlauf über (Bild 1.1). FK1 bis FK3 beschreiben Klassen der relativen Luftfeuchte ϕ und zwar FK1: $\phi < 65\%$, FK2: $\phi = 65 \dots 85 \%$ und FK3: $\phi > 85 \%$. Nach diesem Diagramm würde selbst in der FK3 noch nach ca. 20 Jahren Nutzungsdauer keine visuell sichtbar zerfaserte Schicht vorhanden sein, wobei allerdings die Tiefe der Schädigung - also die Dicke der festigkeitsgeminderten Randschicht - schon 4 mm beträgt, ermittelt in [Erlar 1988].

In Abhängigkeit von Art des angreifenden Mediums, Feuchtigkeit und Dauer der Einwirkung wurden Bemessungsvorschläge unterbreitet. [Erlar 1988].

Dem Autor der vorliegenden Arbeit sind keine Arbeiten bekannt, in denen die Auswirkungen der für die 70iger und 80iger Jahre typischen Holzschutz- und Holzflammschutzmittel Behandlungen auf Dachstühle systematisch behandelt werden. Dagegen existieren etliche Gutachten und Expertisen, erstellt für spezielle Fragestellungen an Einzelobjekten [z.B. Kothe 1992, Kothe 1999, Schwar 2000]. Diese unterscheiden sich sehr stark in der jeweiligen Zielstellung, der Untersuchungsmethodik und der Auswertung, so dass die Ergebnisse nicht immer reproduzierbar und schwer zu verallgemeinern sind.

In den USA werden Voll- und Lagenhölzer vor dem Einbau mit wasserlöslichen Flammschutzmitteln, meist auf der Basis von Monoammoniumphosphat $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, mittels Druckverfahren imprägniert. In diesem Zusammenhang wurden Festigkeits- und Elastizitätsverluste im Laufe der Zeit und unter bestimmten Bedingungen beobachtet. [Winandy 1984, LeVan 1990, Winandy 1995]. Strukturveränderungen u.U. in Form von „Mazeration“ wurden allerdings nicht beschrieben.

Wasserlösliche Flammschutzmittel sind sehr hygroskopisch, deshalb sind sie, entsprechend ihrer Zusammensetzung, bei relativen Luftfeuchten von über 80 % nicht zu empfehlen. Bei den damit imprägnierten Hölzern wurde eine Verschlechterung der Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften quantifiziert. Bei technisch getrockneten, also unter Einwirkung von Wärme behandelten Hölzern, sind die Verluste größer als bei luftgetrockneten behandelten Hölzern. Begründet wurde dieser Sachverhalt mit dem hydrolytischen Abbau der Faser infolge hohem Feuchtegehalt, hoher Temperatur und dem Wirken saurer Salze bzw. Alkalien während des Trocknungsprozesses nach der Behandlung. [Winandy 1984].

Der Einfluss feuerhemmender Chemikalien auf die Festigkeit derartig imprägnierter Hölzer ist stark abhängig von der Art der eingesetzten Chemikalie und von der Umgebungstemperatur. Vor allem Phosphorsäure und Ammoniumphosphat entfalteten besonders bei hohen Temperaturen (66 °C oder 82 °C) eine stark festigkeitsreduzierende Wirkung. Nach einer anfänglichen Reduzierung der Festigkeit, die abhängig ist von der Art der eingesetzten Chemikalie und vom Regime des Trocknungsprozesses nach der Imprägnierung, ist ein weiterer Festigkeitsabbau stark von der Temperatur, der Zeit und – in diesem Zusammenhang – der thermischen Stabilität der eingesetz-

ten Chemikalie abhängig. Ein Stabilitätsverlust bedeutet hierbei, dass die Chemikalie in eine saure oder mehr sauer reagierende Form übergeht. Damit wird vorzeitig der feuerhemmende Mechanismus ausgelöst. In erster Linie wird Hemizellulose (besonders Arabinose, gefolgt von Galactose) abgebaut, wiederum in Abhängigkeit von der Temperatur und der Art der Chemikalie. Zellulose und Lignin werden kaum beeinflusst. Es besteht vorrangig ein Zusammenhang zwischen Reduzierung des Hemizellulosegehaltes und dem Abfall der Festigkeit. [LeVan 1990, Winandy 1995, Sweet 1999].

Der pH – Wert von mit Ammoniumphosphat – Lösung behandeltem Sperrholz nimmt in Abhängigkeit der Zeit ständig ab. Dies wurde festgestellt bei einer Temperatur von 66 °C und einer rel. Luftfeuchte von 75%. Die Festigkeit sinkt ebenfalls ständig, währenddessen die Holzfeuchtigkeit relativ unverändert bleibt. Die Trocknungstemperatur nach dem Imprägnieren hat hierbei keinen signifikanten Einfluss auf pH-Wert und Festigkeit. [Lebow 1999]

2 Schädigungsauslösende Faktoren und Randbedingungen bei Dachstuhlholzern

Wie die Erfahrung lehrt, ist das Auftreten von Korrosion in Form von „Mazeration“ an Dachstuhlholzern meist mit dem Vorhandensein bestimmter Holzschutz- und Holzflammschutzmittel im Holz und mit entsprechend begünstigend wirkenden Umgebungsbedingungen verbunden.

Zur Erläuterung potentieller Schädigungsmechanismen wird an dieser Stelle die Situation auf Dachstühlen mit derartig geschädigten Holzern beschrieben.

2.1 Praxis des Holzschutzes im Betrachtungszeitraum

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über festgestellte signifikante Ionenkonzentrationen im Oberflächenbereich des Holzes und deren mögliche Herkunft.

Ion	Holzflammschutzmittel	Holzschutzmittel	Atmosphäre (Gase, Aerosole)
Fluorid		x	
ortho-Phosphat	x		
Sulfat	x		x
Ammonium	x	x	x
Kalium	x	x	
Natrium	x	x	
Magnesium		x	

Tabelle 2.1 Ionenkonzentrationen im Oberflächenbereich des Holzes und deren mögliche Herkunft

Die meisten Ionen können nur durch Fremdeinträge in das Holz gelangt sein. Deshalb ist es notwendig, die Praxis des Holzschutzes und des Holzflammschutzes vor allem der 70iger und 80iger Jahre näher zu untersuchen.

2.1.1 Kombinationsmittel

Seit den siebziger Jahren wurden, vor allem auf dem Territorium der ehemaligen DDR, verstärkt flüssige Holzschutz- und Holzflammschutzmittel auf der Basis anorganischer Salze eingesetzt. Zur Anwendung kamen flüssige Mittel mit kombinierter Wirkung mit den anerkannten Schutzwirkungen [Kirk 1983]:

- vorbeugend gegen Insekten (Iv),
- gegen holzerstörende Pilze (P) und
- Holzschutzmittel gegenüber Feuer – schwer brennbar – (F)

Dohnalit Pyro I und Dohnalit FPI wurden meist im Rahmen von Nachschutzbehandlungen bestehender Konstruktionen in gedeckten Räumen (z.B. Dachstühle), in denen die Hölzer nicht der Auslaugung ausgesetzt sind, eingesetzt. Eine Verwendung in geschlossenen Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräumen war zulässig [Kirk 1983].

Die Behandlung erfolgte im Sprühverfahren, durch Streichen und ggf. im Tränkverfahren. Als Mindestaufnahmemasse waren 150 g/m^2 gefordert. Die Mittel besitzen einen begrenzten Wirkungszeitraum von etwa 2 Jahren, deshalb musste die Behandlung im zweijährigen Abstand wiederholt werden [Busse 1987]. Dies wird damit begründet, dass die Salze im Laufe der Zeit immer tiefer in das Holz diffundieren und dass somit die flammhemmend wirkende Konzentration an der Oberfläche abnimmt. Außerdem findet bei der bioziden Fluorsalzkomponente eine ständige Fluorabgabe in Form von Fluorwasserstoff HF statt.

Dohnalit FPI wurde 1987 aufgrund verschärfter Prüfbedingungen die Zulassung entzogen. Dagegen war Dohnalit Pyro I noch bis 1989 auf dem Gebiet der ehemaligen DDR zugelassen [Kothe 1992] und wurde auch in den ersten Jahren nach der Wiedervereinigung weiter verwendet.

Chemische Zusammensetzung der Kombinationsmittel

Die Ergebnisse einer chemischen Analyse sind in Tabelle 2.2 dargestellt [Busse 1987]:

das eigentliche Vollinsekt. Durch die Fraßtätigkeit der Larven wird das Holz im Bereich der Fraßgänge mechanisch zerkleinert und damit zerstört. (Bild 2.1).

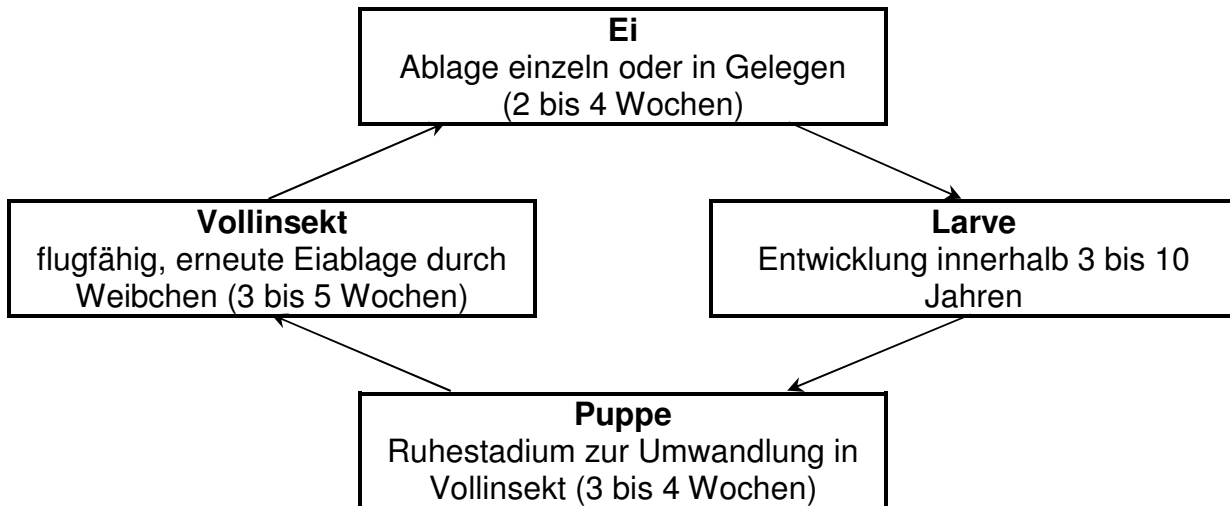


Bild 2.1 Entwicklungsverlauf beim Hausbock (*Hylotrupes bajulus* [L.]), nach [Sutter 1997]

Fluoride als Holzschutzkomponente wirken allgemein als Fraßgift. Sie werden also wirksam, wenn das behandelte Holz vom Insekt als Nahrung aufgenommen wird. Fraßgifte wirken deshalb meist nur gegen die im Holz vorhandene Larve. Die Larve stirbt ab und der Entwicklungszyklus (Bild 2.1) holzerstörender Insekten wird somit unterbrochen. Hydrogenfluoride wirken aufgrund der ausgeprägten Gasphase zusätzlich als Atemgift. Fluorwasserstoff HF wird hierbei über die Atemluft aufgenommen, so dass auch Vollinsekten abgetötet werden.

Fungitoxische Substanzen wirken unterschiedlich. Sie können auch zur Inhibierung verschiedener enzymatischer Prozesse beitragen – Natriumfluorid z.B. bindet leicht metallische Enzyme. [Eaten 1993]. Zu den wichtigsten Angriffspunkten in der Zelle **holzerstörender Pilze** gehören die Enzyme. Dadurch wird der Stoffwechsel der Pilzzelle gestört, und es kommt zur Hemmung des Wachstums oder zur Abtötung des Organismus.

Durch die von den Pilzen gebildeten Enzyme werden außerdem die Bestandteile der hölzernen Zellwand abgebaut. Einige Zerstörer des verbauten Holzes (z.B. Echter Hausschwamm, Porenschwämme, Blättlinge usw.) haben sich auf den Abbau der

Zellulose spezialisiert, sie werden auch als Braunfäuleerreger bezeichnet. Der enzymatische Abbau der Zellulose ist nicht vollständig geklärt [Schmidt 1993]. Es scheint aber als gesichert, dass die komplexe Zellulose über Bruchstücke (Cellobiosen) zu einfacher Glukose abgebaut wird, (Bild 2.2).

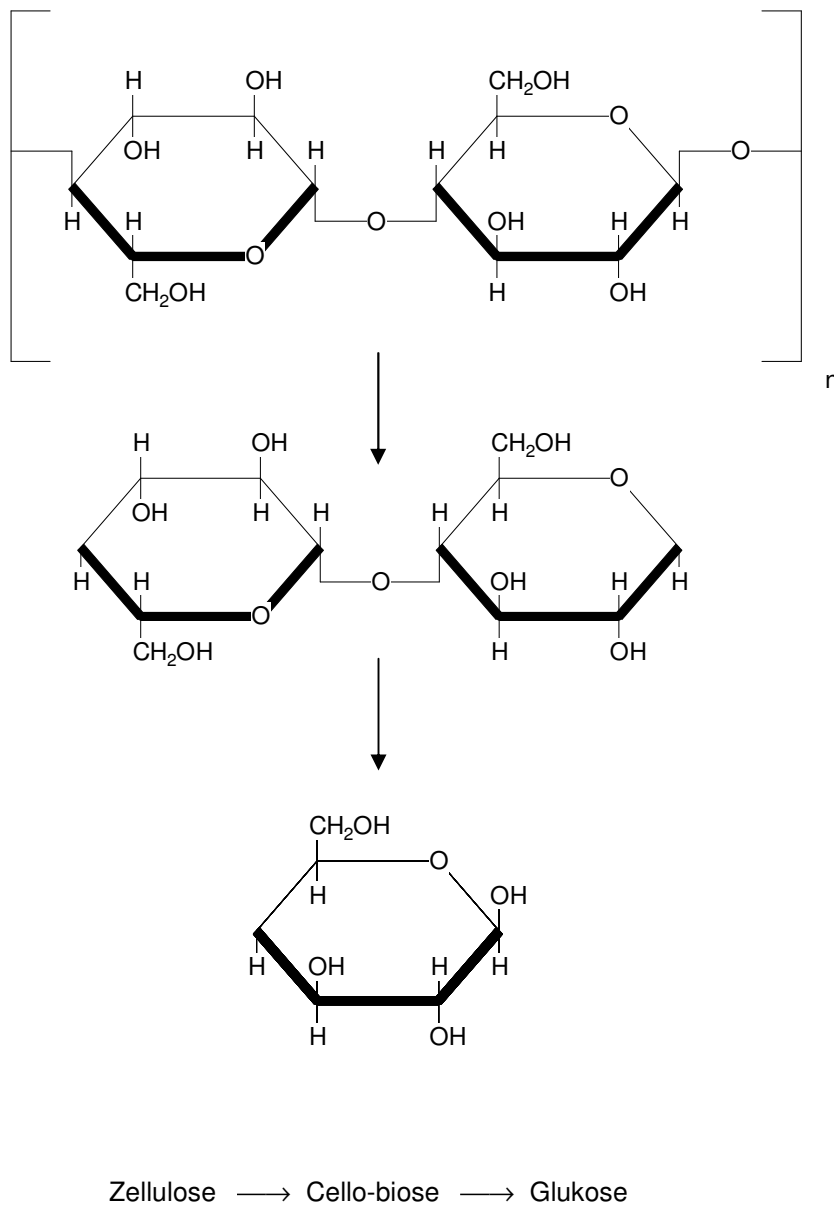


Bild 2.2 Fließschema des enzymatischen Zelluloseabbaus, nach [Schmidt 1993]

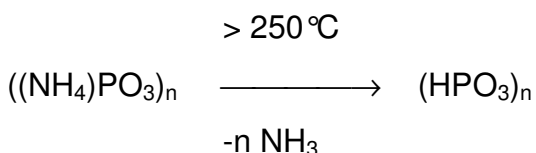
Wirkungsweise der Flammenschutzmittelkomponente der Kombinationsmittel

Bei Temperaturen zwischen 150 und 400 °C [Busse 1987] wird Zellulose zersetzt. Als Zersetzungsprodukte entstehen etwa 70 [Busse 1987] flüchtige und brennbare Verbindungen. Diese entzünden sich bei entsprechenden Bedingungen und ausreichender Energie. Die bei der Verbrennung stattfindende Energiefreisetzung bewirkt eine weitere Pyrolyse des Substrates. Bei der Zersetzung der Zellulose entstehen aber auch nichtbrennbare Verbindungen wie Wasser, Kohlendioxid und ein Verkohlungsrückstand.

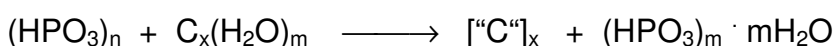
Eine Möglichkeit der Herabsetzung der Brennbarkeit beruht auf dem Einsatz von Ammoniumsalzen. Diese Salze zerfallen bei denjenigen Temperaturen, bei denen auch die Zersetzung der Zellulose stattfindet. Die entstehenden Säuren stören den spezifischen Pyrolysemechanismus und fördern vorrangig die Wasserabspaltung und die Verkohlung. Dadurch können die Brennbarkeits-Vorgänge bzw. -Mechanismen unterdrückt und auch unterbunden werden.

Beispiel - Phosphorverbindung:

Beim Erhitzen bildet sich Phosphorsäure unter Abspaltung von Ammoniak.



Durch die gebildete Polyphosphorsäure wird eine Schutzschicht gebildet. Es setzt eine zunehmende Verkohlung unter Wasserabspaltung und somit ein zunehmender Brennbarkeits-Widerstand ein.



Neuere Flammenschutzmittel – sog. Schaumschichtbildner – enthalten organische Verbindungen, z.B. Dicyandiamid $(\text{H}_2\text{N})_2\text{C} = \text{N} - \text{CH}$ oder Harnstoffe in Kombination mit Phosphaten und Kohlehydraten [Müller 1993]. Bei direkter Feuereinwirkung oder

Strahlungswärme bilden diese eine mikroporöse Schaumschicht, diese verzögert die Entzündung bzw. Brandausbreitung. Dadurch kann für Holzbauteile im Innenbereich die Baustoffklasse B1 nach DIN 4102-1 „schwer entflammbar“ erreicht werden.

2.1.2 Holzschutzmittel auf der Basis von Fluorsalzen

Ergänzend zu dem Einsatz von Holzflammschutz- bzw. Kombinationsmitteln wurden die Hölzer entweder schon vorher oder später mit Holzschutzmitteln auf Fluorsalzbasis behandelt.

Neben dem bereits erwähnten Ammoniumhydrogenfluorid NH_4HF_2 kamen weitere fluorhaltige Wirkstoffe in Holzschutzmitteln zum Einsatz: Kaliumhydrogenfluorid KHF_2 (z.B. Basilit BF und TS), Fluorosilikate wie Zinkhexafluorosilikat $\text{Zn}[\text{SiF}_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ und Magnesiumhexafluorosilikat $\text{Mg}[\text{SiF}_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (z.B. Vogel-Fluat, Adolit SF, Baslit SF) und Natriumfluorid NaF . Die Verwendung mancher fluorhaltiger Wirkstoffe gehört nach wie vor zur Holzschutzpraxis.

2.1.3 Physikalische und chemische Eigenschaften der Salze bzw. Salzlösungen von Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln

Die Tabellen 2.3 und 2.4 zeigen wichtige physikalische und chemische Eigenschaften, im Diagramm 2.1 sind Löslichkeiten in Abhängigkeit der Temperatur von Salzen aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln dargestellt.

Alle in das Holz eingebrachten wasserlöslichen Fluorsalze haben die Gemeinsamkeit, dass sie im Laufe der Zeit den Wirkstoff Fluor in Form von Fluorwasserstoff HF abgeben. Diese Abgabe setzt sofort nach der Behandlung ein. Schon nach zwei Stunden können 15 bis 25 % der Fluormenge von mit NH_4HF_2 behandelten Hölzern verdampft sein [Becker 1963]. Zwischen den einzelnen Fluorsalzen bestehen Unterschiede. Währenddessen z.B. bei Hydrogenfluoriden die Fluorabgabe anfangs stark ausgeprägt ist, im Laufe der Zeit aber beständig gering bleibt, ist sie bei Magnesiumhexafluorosilikat anfangs kleiner, dafür aber für längere Zeit stärker ausgeprägt. Dieser Sachverhalt ist im Diagramm 2.2 qualitativ dargestellt.

Der Anteil des verbleibenden Fluors stabilisiert sich nach einer gewissen Zeit. Offensichtlich kommt es zur Anlagerung an oder zur Einlagerung in Zellulosemoleküle. Es wurde eine erhöhte Abgabe mit steigender Temperatur und zunehmender Luftfeuchte beobachtet. Letzteres wird mit der Reaktionsfreudigkeit der Fluorverbindungen mit Wasser und dem damit verbundenem Lösungsbestreben begründet. Die HF-Abgabe wird durch saure Reaktion angeregt und durch alkalische Reaktion gehemmt. [Becker 1963].

Salz	Chemische und physikalische Eigenschaften
NH ₄ F / NH ₄ HF ₂	Nach dem Eindampfen der wässrigen Lösung kann NH ₄ F nicht erhalten werden. Es zerfällt bereits bei gewöhnlichen Temperaturen – schneller beim Erhitzen – unter NH ₃ -Entwicklung in das saure Salz NH ₄ HF ₂ . Die Salze NH ₄ HF ₂ und NH ₄ F sind sehr hygroskopisch, und sie besitzen eine hohe Wasserlöslichkeit, diese wird aber durch Anwesenheit von NH ₃ stark erniedrigt. Die wässrige Lösung von NH ₄ HF ₂ reagiert schwach sauer.
KF	Stark hygroskopisch.
Mg[SiF ₆] · 6H ₂ O	Die Lösung reagiert sauer.
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ab einer relativen Luftfeuchte $\phi = 87,15\%$ zerfließt das Salz. Das Zusammenbacken beginnt schon ab $\phi \approx 80\%$. Die hygroskopische Wirkung wird durch Verunreinigungen mit Pyridin (z.B. im Steinkohlenteeröl) und durch das Vorhandensein freier Säure erhöht. Durch Behandlung mit gasförmigem NH ₃ kann die Hygroskopizität wieder herabgesetzt werden. [Gmelin]. Das hygroskopische Verhalten ist stark vom Säuregehalt abhängig. Die saure Reaktion der wässrigen Lösung nimmt mit steigender Temperatur erheblich zu.
(NH ₄) ₂ HPO ₄	An der Luft verwitern die Salzkristalle unter Abgabe von NH ₃ . Das Salz ist instabil und geht bei höheren Temperaturen unter NH ₃ -Abgabe in NH ₄ H ₂ PO ₄ über. Die wässrige Lösung reagiert schwach alkalisch.
NH ₄ H ₂ PO ₄	Das Salz ist an der Luft beständig. Die wässrige Lösung reagiert sauer.

Tabelle 2.3 Eigenschaften von Salzen aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln [Gmelin]

Salz	Dichte ρ bei 20 °C [g/cm ³]	pH-Wert
NH ₄ F	1,01 ¹⁾	≈ 6 ¹⁾ (20 °C 50 g/l H ₂ O)
NH ₄ HF ₂	1,5 ¹⁾	≈ 3,5 ¹⁾ (20 °C 50 g/l H ₂ O)
KF	2,49 ¹⁾	Alkalisch ¹⁾
KHF ₂	2,37 ³⁾	Sauer ²⁾
Zn[SiF ₆] · 6H ₂ O	1,43 ²⁾	
Mg[SiF ₆] · 6H ₂ O	1,23 ²⁾	3,0 – 3,1 ²⁾ (0,5% ige Lösung)
NaF	2,8 ¹⁾	≈ 10,2 (40 g/l) ¹⁾
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,77 ¹⁾	4,5 – 6 ¹⁾ (20 °C 50 g/l H ₂ O)
(NH ₄) ₂ HPO ₄	1,62 ¹⁾	7,8 – 8,5 ¹⁾ (20 °C 50 g/l H ₂ O)
NH ₄ H ₂ PO ₄	1,80 ¹⁾	3,8 – 4,4 ¹⁾ (20 °C 50 g/l H ₂ O)

1) [Merck 1999], 2) [Gmelin], 3) [(2)]

Tabelle 2.4 Dichte ρ und pH-Wert einiger Salze aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln

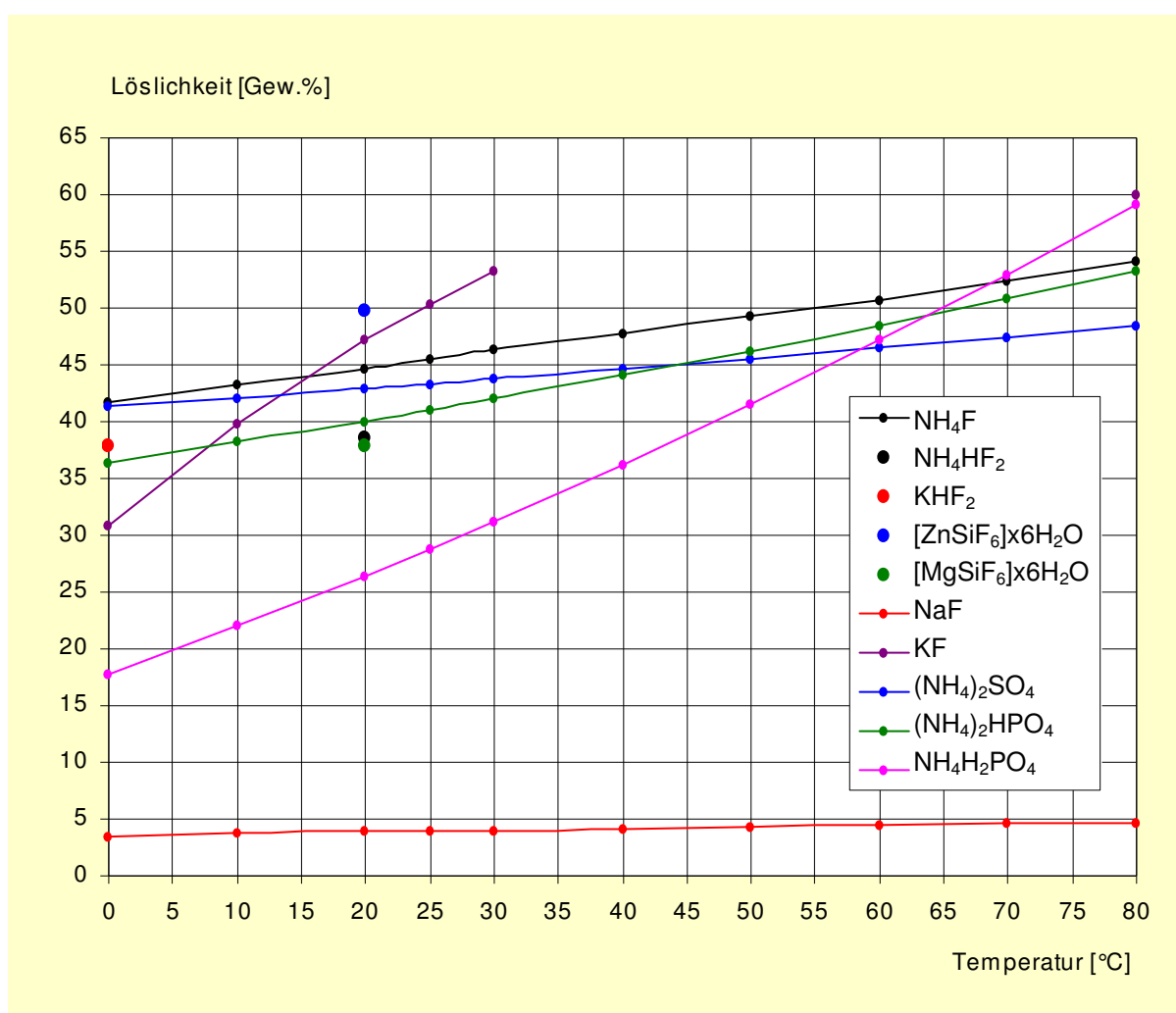


Diagramm 2.1 Löslichkeit in Abhängigkeit der Temperatur [Chemical Rubber Company, Gmelin]

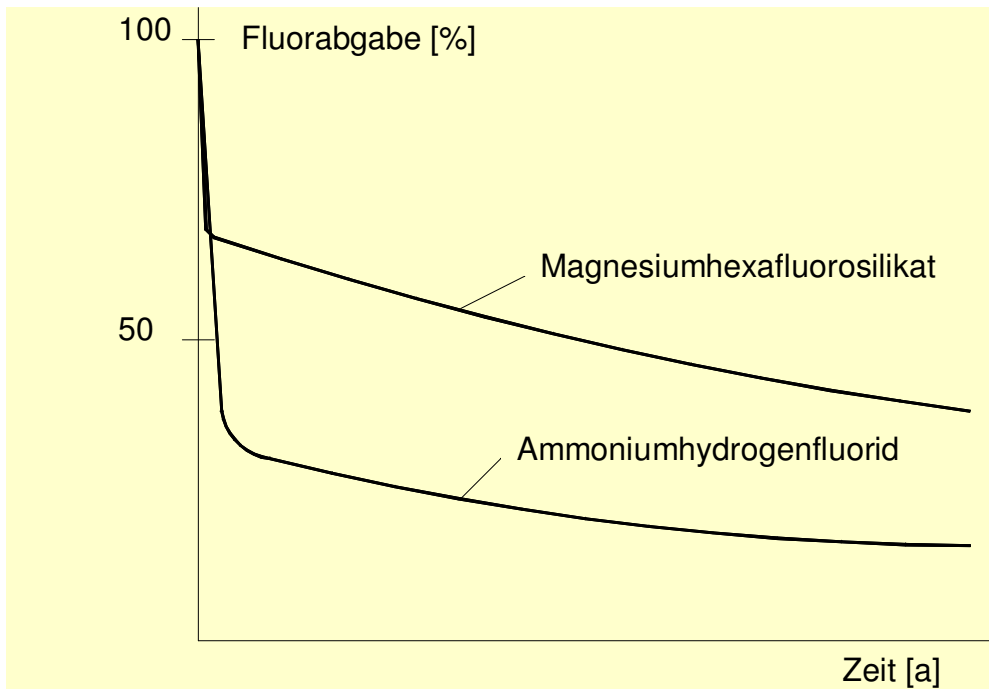


Diagramm 2.2 Schematischer Verlauf der Fluorabgabe von $\text{Mg}[\text{SiF}_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ und NH_4HF_2 in Abhängigkeit der Zeit

Die Fluorverluste sind weiterhin abhängig vom Einbringverfahren. Bei handwerklichen Verfahren (Streichen, Spritzen) sind die Verluste höher als beispielsweise bei einer Volltränkung durch Unterdruckbehandlung. [Leiß 1992].

Einige Salze, welche aus unterschiedlich starken Basen oder Säuren entstanden sind, werden in wässriger Lösung hydrolytisch gespalten, d.h., die Lösung zeigt eine alkalische oder saure Reaktion.

Zum Beispiel reagieren die wässrigen Lösungen der Ammoniumsalze NH_4X sauer aufgrund der Bildung von Hydroniumionen (Tabelle 2.3):



Salze von anorganischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln beeinflussen unabhängig von äußeren direkten Feuchtigkeitsquellen den Feuchtegehalt des Holzes: Jedes Salz nimmt oberhalb einer bestimmten relativen Luftfeuchte Wasser aus der Umgebung auf und geht in Lösung. Sinkt die relative Luftfeuchte wieder unter diesen kritischen Wert, kristallisieren die Salze wieder aus der Lösung. Salze, welche bei

einer niedrigen „kritischen“ relativen Luftfeuchte in Lösung gehen, werden als hygroscopische Salze bezeichnet. Tabelle 2.5 zeigt einige Holzschutz- und Holzflammschutzsalze und deren kritische relative Luftfeuchten.

Salz	Kritische relative Luftfeuchte ϕ_{krit} [%]				
NH_4HF_2 ¹⁾	42,7 (20 °C, Sättigungskonzentration)				
KF ²⁾	48,3 (18 °C, 10,95 mol KF / 1000 g H ₂ O) 41,0 (18 °C, 14,01 mol KF / 1000 g H ₂ O; übersättigte Lösung)				
NaF ²⁾	92				
	Kritische relative Luftfeuchte ϕ_{krit} in % in Abhängigkeit der Temperatur θ :				
	<div style="text-align: center;"> <p>Kritische relative Luftfeuchte [%]</p> <p>Temperatur [°C]</p> <p>Legend: — $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ — $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ </p> </div>				
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ²⁾	79,2	81,0	79,2	78,4	77,7
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ²⁾		82,7	81,6	80,9	80,5
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ²⁾	97,8	91,7	91,6	90,3	88,2

[Merck 1999] 2) [Gmelin]

Tabelle 2.5 Kritische relative Luftfeuchten einiger Holzschutz- und Holzflammschutzsalze

2.1.4 Chlorierte Kohlenwasserstoffe als Bestandteil von insektizid bzw. fungizid wirkenden Holzschutzmitteln

Neben den beschriebenen wasserlöslichen Kombinationsmitteln Dohnalit FPI oder Kulbasal 55 FP wurde im Rahmen der ehemaligen DDR – Holzschutzpraxis oftmals das DDT- und lindanhaltige Hylotox 59 eingetragen [Rafalski 1999]. Dem Verfasser sind keine Untersuchungen darüber bekannt, ob die verwendeten chlorierten Kohlenwasserstoffe eine mechanische bzw. chemische Oberflächenschädigung auslösen bzw. fördern. Beim Einsatz von DDT haltigen Holzschutzmitteln werden lediglich nadelförmige, kristalline Ausblühungen auf der Holzoberfläche beobachtet.

Das Problem liegt hier eher in der erheblichen Toxizität dieser Substanzen beim Erreichen bestimmter Grenzwerte in der Raumluft, im Holz bzw. im Staub. Die Wirkstoffe verbleiben in Abhängigkeit vom Dampfdruck sehr lange im Holz und bilden somit über lange Zeit einen Emittenten für Schadstoffe in die Raumluft und in andere Materialien (besonders Hausstaub).

DDT besitzt im Gegensatz zu Lindan und noch mehr zu PCP einen geringen Dampfdruck p :

$$p_{\text{DDT}} < p_{\text{Lindan}} < p_{\text{PCP}} \quad (2.1)$$

Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über Holzschutzmittel aus der ehemaligen DDR mit chlorierten Kohlenwasserstoffen und deren Bestandteilen.

Hylotox 59 wurde in gedeckten Räumen (z.B. Dachstühlen) eingesetzt und durfte auch in geschlossenen Wohn- und Arbeitsräumen verwendet werden. Dieses Holzschutzmittel war im Einzelhandel erhältlich.

Holzschutzmittel	Wirkstoffe ¹⁾	Begleitstoffe / Lösemittel ¹⁾	Anwendung ²⁾
Hylotox 59	3,5 % DDT 0,5 % Lindan	„Laval 300“ (ca. 95 % aliphatische Kohlenwasserstoffe), ca. 0,5 % Isobornylacetat ca. 0,25 % Terpentinöl	Vorbeugend und bekämpfend gegen Insekten, gegen Termiten
Hylotox IP / Hylotox IP braun	3 % DDT 5 % PCP	„Laval 300“ (Schmierölfraktion) Braunkohlenschwelöl (IP braun)	Vorbeugend und bekämpfend gegen Insekten, gegen holzerstörende Pilze (einschließlich Moderfäule)
Hylotox S	4,5 Volumenanteil Na – PCP in 95,5 Volumenanteil Wasser	Wasser	Gegen Moderfäule, Bläue und Schimmelpilze

1) [Unger 1998], 2) [Kirk 1978/83]

Tabelle 2.6 Holzschutzmittel mit chlorierten Kohlenwasserstoffen als Wirkstoff

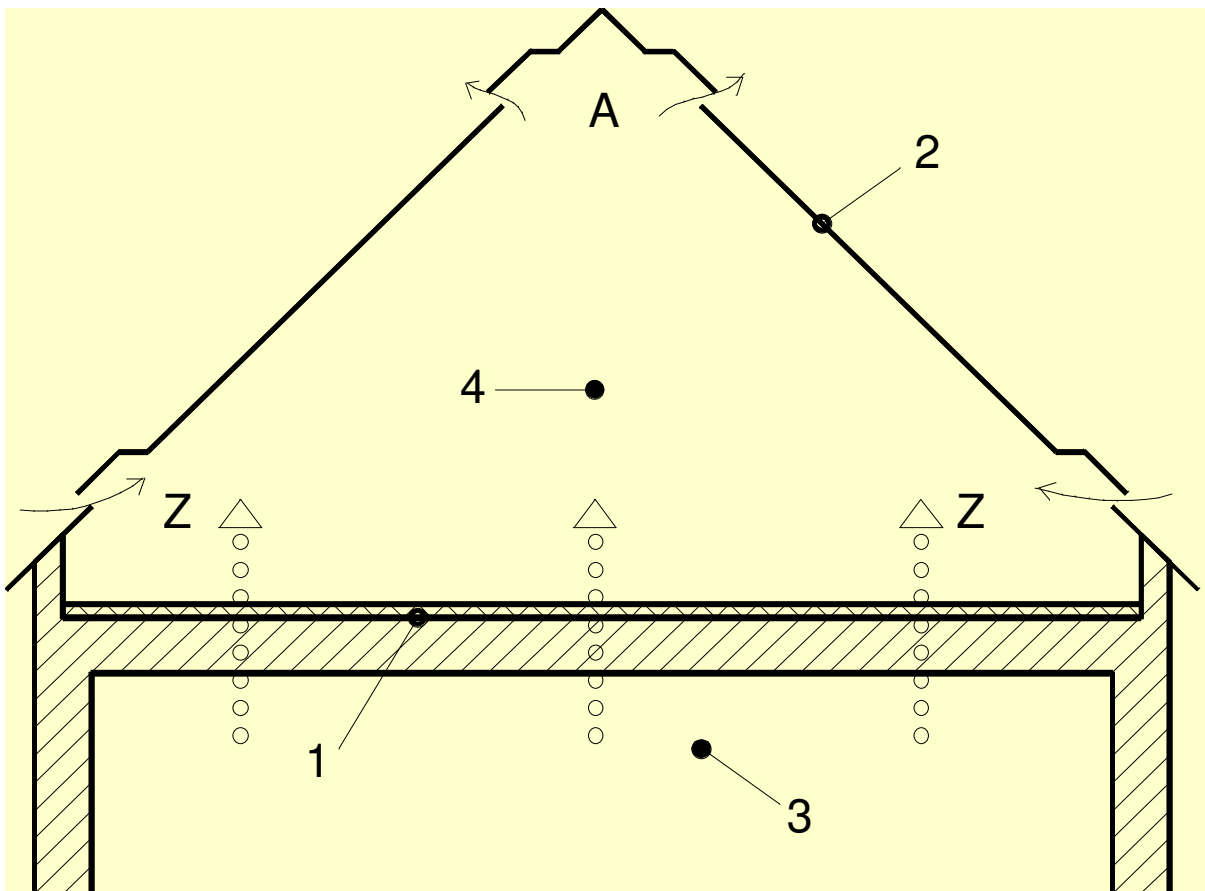
2.2 Umgebungsbedingungen

2.2.1 Baulich - Konstruktive Gegebenheiten

Großen Einfluss auf den Verlauf der Holzschädigung haben Temperatur und relative Luftfeuchte sowie deren Schwankungen innerhalb von 24 Stunden.

Ein Dach hat u.a. die Aufgabe, die periodisch großen äußeren Temperatur- und Luftfeuchteänderungen zu dämpfen, also regulierend auf den Wärme- und Feuchtehaushalt im Inneren des Gebäudes einzuwirken.

Eine chemische Korrosion mit ihrer speziellen Form der „Mazeration“ wurde bisher oft an Hölzern von nicht ausgebauten (belüftete Dachräume) beobachtet. Darunter befinden sich meist beheizbare Räume. Bild 2.3 verdeutlicht die Gesamtsituation an einem nicht ausgebauten Dach mit Lüftungsziegeln im Winter.



- | | |
|---|-----------------------|
| 1 Geschossdecke mit Wärmeschutzfunktion | 4 belüfteter Dachraum |
| 2 Dachhaut mit Wetterschutzfunktion | Z Zuluft |
| 3 beheizter Raum | A Abluft |

Bild 2.3 Funktionsweise eines belüfteten Dachraumes im Winter

Es darf nicht mehr Wasserdampf in den kalten Dachraum strömen, als durch die Belüftung abgeführt werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss mit erheblichen Feuchtigkeits-Bauschäden gerechnet werden.

Ursachen für eine erhöhte Feuchte im Dachraum (meist in Kombination) sind:

- Konvektion warmer feuchter Luft durch die Geschossdecke infolge von Undichtigkeiten,
- nicht vorhandene oder ungenügend große Lüftungsöffnungen im Dachraum, zu kleine Abstände zwischen Zu- und Abluftöffnungen ($h \geq 1,5$ m [Mönck 1998]).

Folge:

- Kondensation an kalten Bauteiloberflächen (Oberseite der Geschossdecke, ggf. Dachhaut und Konstruktionshölzer),
- hohe relative Luftfeuchte im Dachraum, d.h. die Maximal- und Minimalwerte innerhalb der Tagesgänge der rel. Luftfeuchte bewegen sich auf einem sehr hohen Niveau.

Im Sommer soll eine ständige Durchlüftung ein Aufheizen des Dachraumes verhindern, d.h. die hohen sommerlichen Temperaturspitzenwerte unter der Dachhaut werden gedämpft.

Demnach können durch eine fehlerhafte bauphysikalische Ausbildung der Hüllelemente, bzw. bei der Umnutzung von Altbauten zusätzlich fördernde Bedingungen für eine Baumaterial-Schädigung entstehen wie periodisch hohe relative Luftfeuchten und periodisch hohe Temperaturen.

2.2.2 Schadgasimmissionen (Schwefeldioxid)

Bild 2.4 [(3)] zeigt die Entwicklung der Schwefeldioxidemissionen von der Mitte der achtziger Jahre bis zur Gegenwart. Vor allem im mitteldeutschen Raum und in den Ballungszentren waren bis Mitte der neunziger Jahre hohe Emissionswerte zu verzeichnen, nicht zuletzt verursacht durch eine sehr hohe Zahl von kleineren Industrie- und Hausbrandanlagen.

Diese hohen SO_2 – Werte wirkten jahrzehntelang auch unmittelbar auf die Konstruktionshölzer von Dachstühlen ein.

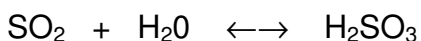
SO_2 als Gas ist eine niedermolekulare Verbindung und verteilt sich deshalb schneller und gleichmäßiger als eine Flüssigkeit im Kapillarsystem des Holzes.

Für die Diffusion von Gasmolekülen in das Holz existiert ein 3-Phasen-Modell [Besold 1982]:

1. Mobile Phase: freier Transport durch Konvektion im Makrokapillarsystem
2. Immobiler Phase: Gas diffundiert durch eine Flüssigkeit (z.B. Wasser)
3. Feste Phase: Gas diffundiert durch feste Bestandteile (z.B. Holzsubstanz)

SO_2 hat eine geringe Löslichkeit in Wasser. Deshalb tritt im Wasser des feuchten Holzes schnell eine Sättigung ein. Die immobile Phase wird schnell überwunden, währenddessen der Quellzustand des Holzes nicht genügend Platz für ein Eindringen von SO_2 – Molekülen in die feste Phase schafft. Eine Reaktion mit SO_2 findet deshalb nur an der Oberfläche des Holzes statt. [Besold 1983 - Teil 3]

Beim Lösen von SO_2 in Wasser, z.B. aus der Luft oder im Kapillarwasser des Holzes entsteht Schweflige Säure H_2SO_3 :



Schweflige Säure besitzt reduzierende Eigenschaften, d.h. sie hat das Bestreben, in die höhere Oxidationsstufe des Schwefels überzugehen. Schematisch:



Durch diese Vorgänge werden in belasteten Gebieten allmählich immer mehr SO_4^{2-} - Ionen im Oberflächenbereich von Hölzern angereichert. Dies führt zusätzlich zu einer mehr und mehr sauren Reaktion.

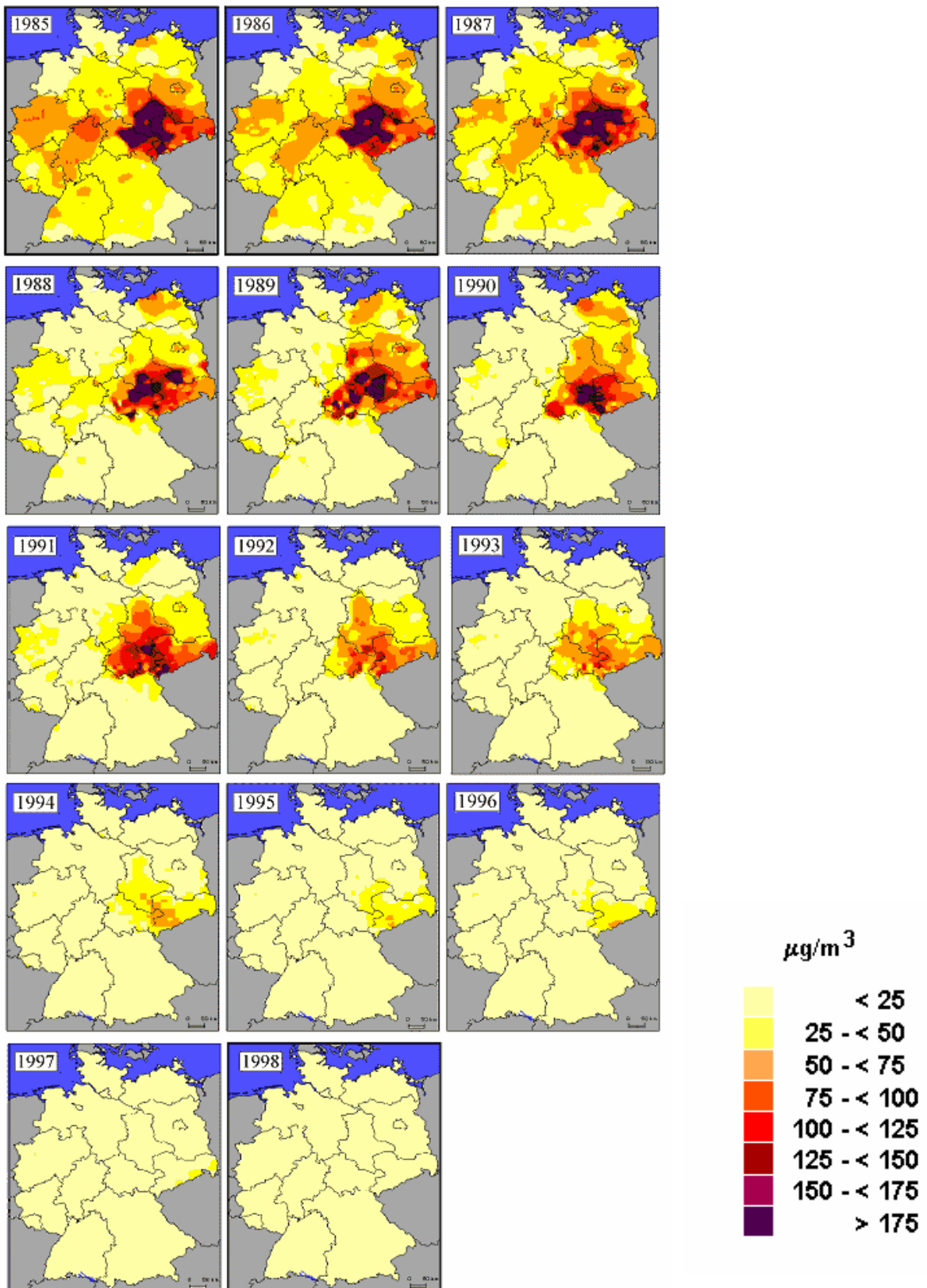


Bild 2.4 Schwefeldioxid Emissionen [(1)]

3 Eigene Untersuchungen

3.1 Fragestellungen zur Aufklärung der Schadensmechanismen

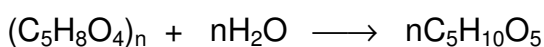
Um ein schlüssiges Verständnis für die Schadensmechanismen entwickeln zu können, werden mittels theoretischer Überlegungen und durch experimentell chemisch physikalische sowie mechanisch technologische Untersuchungen die nachfolgenden Fragestellungen beantwortet. Hintergrund ist die Vermutung, dass häufige Phasenwechsel (flüssig / fest) der eingedrungenen Salze durch deren „Kristallisationsdruck“ eine mechanische Wechselbeanspruchung auf die Holzstruktur ausüben und dass dieser Vorgang langfristig zur Strukturschädigung an der Oberfläche führt.

a) Welche Salz- bzw. Ionenkonzentrationen befinden sich im Holz?

Die Ionenkonzentrationen wurden mittels der Ionenchromatographie (IC) – Analyse an Proben aus verschiedenen Untersuchungsobjekten ermittelt und daraus die Gesamtsalzeinträge berechnet, (Abschnitt 3.2.4).

b) Sind chemische Reaktionen der eingedrungenen Schutzmittel mit ein oder mehreren Holzbestandteilen zu erwarten bzw. kommt es zu Lösevorgängen?

Viele wässrige Lösungen der Salze aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln reagieren sauer (Tabelle 2.3). Dies hat zur Folge, dass auf die Zellwandbestandteile ein schwach saurer Angriff erfolgt. Säuren verursachen bei gewöhnlichen Temperaturen und niedrigen Konzentrationen vorrangig eine Hydrolyse der Hemizellulosen. Es wird vorrangig eine Spaltung der Pentosanenkettenmoleküle beobachtet [Seifert 1967]. Die verhältnismäßig langkettigen Pentosane Xylan und Araban werden hierbei zu einfachen Zuckern (Xylose und Arabinose) gespalten [Kürscher 1962]. In der Summenformel drückt sich dieser Vorgang folgendermaßen aus:



Es kann somit angenommen werden, dass eine langfristige Einwirkung von in wässriger Lösung hydrolytisch gespaltenen, sauer reagierenden Salzen einen Abbau von Hemizellulosebestandteilen bewirkt.

Die Einwirkung von SO_2 – Gasen bzw. deren Lösungsprodukten H_2SO_3 / H_2SO_4 führt ebenfalls zum sauren Angriff auf Holzbestandteile, (Abschnitt 2.2).

c) Wird das Kapillarsystem durch die Salze beeinflusst? Wie groß ist der Einfluss auf die Wasseraufnahme (Absorption), Wasserabgabe (Desorption) und die Wasserdampfdurchlässigkeit?

Ebenfalls an den Proben aus den Untersuchungsobjekten wurden die Sorptionsisothermen bei einer relativen Luftfeuchte $\phi = 20$ bis 95 % experimentell ermittelt, (Abschnitt 3.2.4.2).

d) Welche Salzphasen befinden sich in Abhängigkeit von der umgebenden Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Kapillarsystem? Ist der übliche Luftfeuchtewechsel der Umgebung mit Phasenänderungen, dem Über-/Unterschreiten einer kritischen rel. Luftfeuchte und damit u.U. mit einer Veränderung des kristallinen Aufbaus der Salze verbunden?

Es wurde das Verhalten eines Salzgemisches im Holz unter den auf Dachstühlen vorhandenen Klimabedingungen untersucht, hierbei werden tatsächlich Phasenwechsel nachgewiesen und analysiert, (Abschnitt 3.3).

e) Führen diese Phasenwechsel zu mechanischen Wechselbelastungen und Gefügeveränderungen?

Hierzu wurden Festigkeitsversuche durchgeführt. Kleine Proben aus Kiefernholz wurden einer definierten Wechselklimabeanspruchung ausgesetzt und in regelmäßigen Abständen mit Salzgemisch – Lösungen behandelt, (Abschnitt 3.5). Gefügeveränderungen wurden mikroskopisch nachgewiesen, Abschnitt (3.4, 3.5.3.4 und 4.2.3).

f) *Wie verändert sich durch die eingelagerten Salze beim Holz das Quell- und Schwindverhalten. Führt dies ebenfalls zu mechanischen Wechselbelastungen?*

Es wurden Holzfeuchten an der Oberfläche im Vergleich zu Tiefenbereichen salzbelasteter Proben ermittelt, (Abschnitt 3.6).

3.2 Physikalisch chemische Untersuchungen

Die physikalisch chemischen Untersuchungen konnten an zwei beispielhaften Objekten im mitteldeutschen Raum mit den eingangs beschriebenen Schädigungen vorgenommen werden. An den Hölzern der Dachstühle wurden Proben entnommen. Außerdem wurde jeweils die bauliche, bauphysikalische sowie holzschutztechnische und –geschichtliche Situation der Dachstühle analysiert.

3.2.1 Fallbeispiele

3.2.1.1 Fallbeispiel 1: Dachstuhl der Lutherhalle zu Wittenberg

Das Gebäude wurde vorerst als Augustiner – Eremiten – Kloster erbaut. Nach der Reformation überließ Kurfürst Friedrich das verwaiste Kloster Martin Luther. Das Gebäude war nun Luthers Wohn- und Arbeitsstätte bis zu seinem Tod 1546. Danach wurde es von seinen Erben an die Universität Wittenberg verkauft. Heute beherbergt das Gebäude das reformationsgeschichtliche Museum.

Baugeschichte der Lutherhalle

- Gebaut 1504 bis 1507 in Form eines einzelnen dreigeschossigen Flügels.
- Ab 1535 bauliche Veränderungen, u.a. Einrichtung Luthers Wohn- und Arbeitszimmers.
- 1540 Einbau des Katharinenportals.
- 1565 umfangreiche Bauarbeiten: Neue Einwölbung des Refektoriums im Erdgeschoss, Bau des Treppenturms mit Wendelstein vor der Hoffront.

- 1853 bis 56 Wiederaufbau der baufällig gewordenen Giebel.
- Bis 1873 umfassende neugotische Umgestaltung am und im Haus: Erhöhung der Längsmauern durch ein Drempegelgeschoss mit kleinen Zwerchgiebeln, Angleichung der Fenster in Größe und Form, Fassadenputz mit Quaderzeichnung, Errichtung einer kuppelartigen Haube auf dem nördlichen Treppenturm [Bellmann 1979].
- 1979 bis 1983 Bau- und Restaurierungsmaßnahmen zur Vorbereitung der Luthererehrung 1983.
- Seit 2000 umfangreiche Sanierungsarbeiten, Fertigstellung: Oktober 2002, Eröffnung der neuen Dauerausstellung: März 2003 [(1)].

Dachstuhl

Der Dachstuhl ist auf den Anfang des 16. Jahrhunderts datiert worden [Bellmann 1979]. Das dreifache Kehl balkendach besteht aus Kiefernholz. Die beiden unteren Kehl balkenlagen sind jeweils durch einen stehenden Stuhl unterstützt. Als zusätzliche Aussteifung dienen Andreaskreuze, angeordnet zwischen unterem Stuhl und dem Sparren zwischen der 2. und 3. Kehl balkenlage. Im 3. Obergeschoss unter dem Dachgeschoss befindet sich der Große Hörsaal. Zur Aufnahme der Deckenlasten wurden 3 Sprengböcke in Nord – Südrichtung mit jeweils einer Hängesäule eingebaut, (Foto 2 – Anlage A).

Die Dachhaut besteht aus einer Flachziegeldeckung auf Lattung. Die Differenz zum alten Dachfuß durch das Drempegelgeschoss wurde im 19. Jahrhundert durch Aufschieblinge ausgeglichen [Bellmann 1979], (Bild 3.1).

Nach der Bombardierung benachbarter Gebäude am 20. April 1945 wurde das Dach neu gedeckt. 1967 erfolgten Instandsetzungsarbeiten am Dachstuhl. [Bellmann 1979].

Der Dachstuhl ist im Wesentlichen in seiner Originalform erhalten.

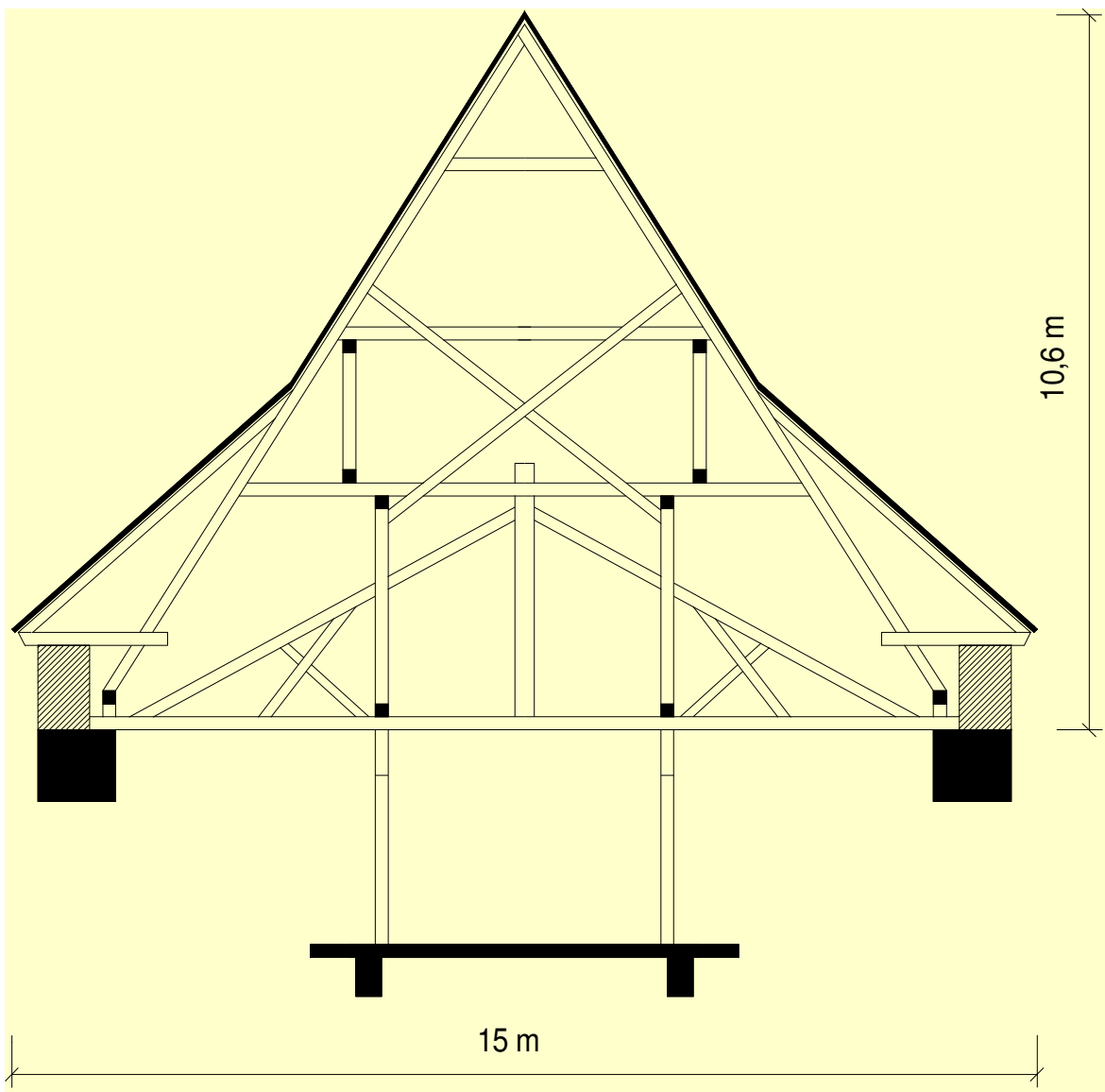


Bild 3.1 Querschnitt Dachstuhl Lutherhalle

Behandlung mit Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmitteln:

Laut Angabe der Objektverantwortlichen wurde mehrmals und wiederholt mit Dohnalit FPI gesprüht. Einzelbeprobungen vom August 2001 ergaben außerdem signifikante p,p'-DDT – sowie Lindankonzentrationen im Holz, in der Luft und auch im Staub. Offensichtlich wurde hier mit Hylotox 59 behandelt. Neben einer Oberflächenbehandlung muss zumindest in Teilbereichen eine Bohrlochtränkung mit diesem Holzschutzmittel erfolgt sein, erkennbar an Bohrlöchern vielerorts. Die entstandenen Löcher wurden danach mit Bohrkernen verschlossen.

Zustand und visuell festgestellte Schädigung:

Pilz-, Insektenschäden sowie Verformungen und Schädigungen der Knoten und Verbindungsmittel sind an dieser Stelle nicht Gegenstand der Beurteilung.

Der Ostflügel ist 1999 gereinigt worden (mechanisches Entfernen der Holzfasern mittels weicher Bürsten). Trotzdem wurde an einer Vielzahl der Konstruktionshölzer im August 2001 eine chemische Korrosion in Form von „Mazeration“ festgestellt. Wahrscheinlich sind die Holzfasern nicht vollständig entfernt worden und/oder es kam nach der Reinigung zum Fortschreiten der Schädigung. Die korrodierten Hölzer waren hellbraun bis gelblich verfärbt. An einigen Stellen waren weiße Salzausblühungen sichtbar, verstärkt im Spätholzbereich der Jahrringe.

Der Westflügel ist 1998 nach Reinigung mit dem Sanierungsmittel „Korasit LH“ der Fa. Obermeier behandelt worden. Auch hier wurde, zumindest noch teilweise eine „Mazeration“ an den Konstruktionshölzern festgestellt. Auffällig waren starke und großflächige weiße Salzausblühungen, welche sich lt. Angabe der Objektverantwortlichen nach dem Auftragen des Sanierungsmittels gebildet haben sollen.

1997 sind Vermörtelungen mit dem Ziel entfernt worden, das Dachgeschoss besser zu durchlüften.

3.2.1.2 Fallbeispiel 2: Dachstuhl der Stadthalle Zerbst

Baugeschichte der Stadthalle Zerbst

Das Gebäude der Stadthalle Zerbst ist ein Nebenbau des ehemaligen Zerbster Residenzschlosses. Dieses ist am 16. April 1945 durch Bomben schwer getroffen worden und brannte vollständig aus. Nach Abbruch von zwei Schlossflügeln existiert gegenwärtig nur noch der Ostflügel als gigantische Ruine.

Im Schlossgarten unmittelbar neben den Resten des Schlosses befindet sich die ehemalige fürstliche Reitbahn, ein barocker Bau, in den Grundzügen erbaut 1724 bis

1726. Die Pläne dazu schuf der aus Sachsen-Weißenfels stammende Baumeister Johann Christoph Schütze. 1951 erfolgte der Umbau zur Stadthalle. Im Sommer 2002 wurde im Saal der Stadthalle ein neues Parkett gelegt. Gleichzeitig wurden Fußbodenbeläge in Form von Spanplatten entfernt und die darunter liegende Dielung (Kiefer mit Eiche abgesetzt) wieder sichtbar gemacht und restauriert.

Dachstuhl

Das Dach ist in seiner Grundform als Mansarddach mit beidseitigem Walm an den Stirnseiten des Gebäudes ausgebildet, (Foto 3 – Anlage A). Sowohl Unter- als auch Oberdach ist als Kehlbalkendach mit zweifach liegendem und im Unterdach zusätzlich zweifach stehendem Stuhl ausgeführt. Durch eine Riegel- und Strebenkonstruktion erfahren die Stühle im Unterdach eine zusätzliche Längsaussteifung. Die obere Kehlbalkenlage ist mittig gestützt. Zur Aufnahme der Lasten der weit gespannten Decke dient ein doppeltes Hängewerk. Als zusätzliche Aussteifung dienen Streben, angeordnet zwischen den unteren Stuhlsäulen und den Hängesäulen im Oberdach, (Bild 3.2 und Foto 4 – Anlage A). Die Dachstuhlhälzer bestehen aus Kiefernholz.

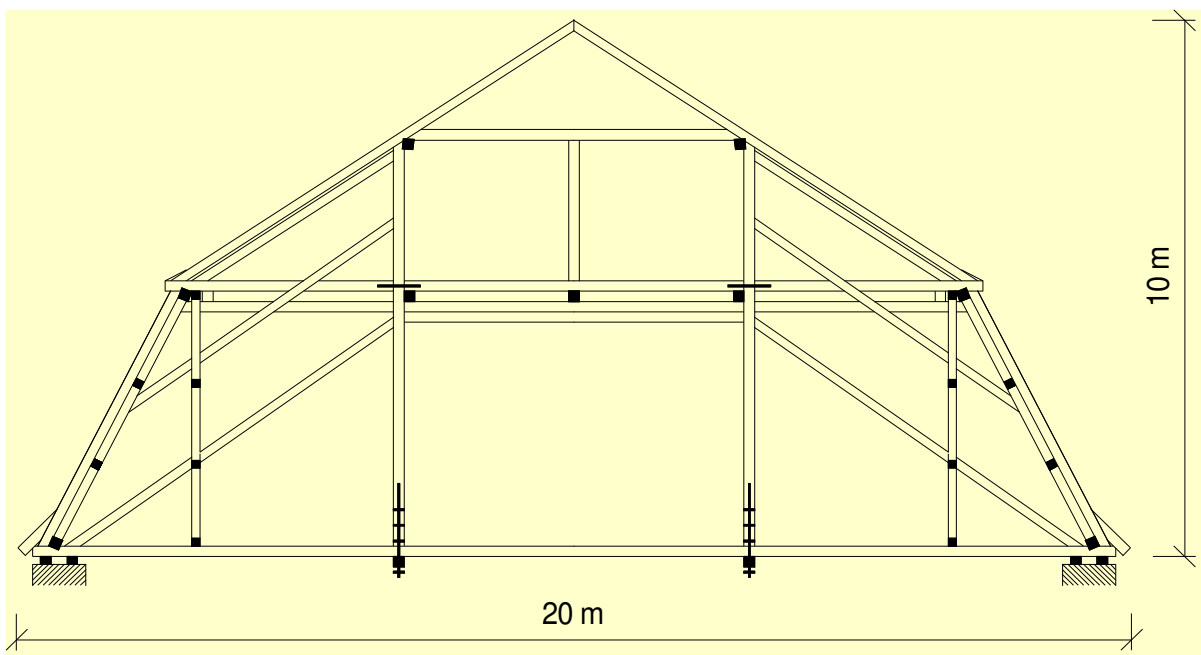


Bild 3.2 Querschnitt Dachstuhl Stadthalle Zerbst

Mitte der Neunziger Jahre neigte sich das Dach zur Seite, weil eine große Anzahl von Sparrenauflegern durch die Einwirkung holzerstörender Pilze und Insekten zerstört worden war. Es erfolgten umfangreiche Sicherungen und Reparaturen am Dachstuhl. Im Jahre 2000 wurde das Dach mit einer neuen Biberschwanz-Deckung komplett neu gedeckt. Die alte Dachdeckung bestand ebenfalls aus Biberschwanzziegeln.

Behandlung mit Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmitteln:

Vorgefunden wurde eine Tafel mit Angaben zur Behandlung mit Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln. Der letzte aktenkundlich erwähnte Auftrag von Vogelfluat und Dohnalit Pyro I fand 1979 vermutlich mittels Besprühen statt, (Foto 5 - Anlage A).

Zustand und visuell festgestellte Schädigung:

Auch bei diesem Beispiel sind nur die Schäden infolge chemischer Korrosion Gegenstand der Beurteilung.

Das Schadbild der chemischen Korrosion äußerte sich auch hier in Form der „Mazeration“. Schädigungstiefe und –ausmaß waren sehr unterschiedlich ausgeprägt. Offensichtlich spielen für die Intensität der chemischen Korrosion bestimmte Einflussfaktoren eine wichtige Rolle. Dazu einige Beobachtungen:

„Mazeration“ ist stärker ausgebildet an Bauteilbereichen:

- bei denen offensichtlich die Salzlösung länger und tiefer einwirken konnte und nicht sofort von der Oberfläche wieder ablaufen konnte (z.B. waagerechte Oberflächen, Tropfkanten, Bereiche von Verbindungen und Anschlüssen, z.B. Versätze),
- in klimatisch stark beanspruchten Bereichen mit stärker ausgeprägten Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen (Süd, Südost, Südwest).

Dagegen zeigten manche Fußschwellen gar keine augenscheinlichen Anzeichen einer „Mazeration“. Hier ist wahrscheinlich kein oder nur sehr wenig Holzschutz- bzw. Flammflammschutzmittel gesprüht worden. Offensichtlich war der Fußboden während der Behandlung abgedeckt worden, an der Dielung waren nämlich keine Spuren einer chemischen Korrosion erkennbar.

An einigen Stellen der Dachstuhlhälzer wurden weiße Salzausblühungen vorgefunden. Im Holz vorhandene Nägel waren stark korrodiert.

3.2.1.3 Tagesgänge von relativer Luftfeuchte und Temperatur am Beispiel des Dachstuhles der Stadthalle Zerbst

Im Untersuchungszeitraum von Juli 2001 bis Juli 2002 wurde in unmittelbarer Nähe der südlichen Beprobungsstelle (Abschnitt 3.2.2) zeitweise ein Thermohygrograph zur Messung der relativen Luftfeuchte (ϕ) und der Temperatur (θ) installiert. Die genannten Parameter wurden stündlich in folgenden Zeiträumen gemessen:

- 21.06. – 31.07.01 (Anlage F)
- 12.02. – 20.02.02 (Anlage F)
- 02.04. – 19.06.02 (Anlage F)

Die Tagesgänge bestätigen allgemein das Verhalten der Außenluft, nämlich, dass am frühen Nachmittag zur Zeit der größten Temperatur die relative Luftfeuchte auf ein Minimum absinkt und am frühen Morgen kurz vor Sonnenaufgang bei tiefster Temperatur ein Maximum erreicht. Die relative Luftfeuchte wird nämlich vorwiegend von der Temperatur gesteuert. Durch das Dach entsteht allerdings eine Phasenverschiebung, die Luft bzw. die auf dem Dachstuhl vorhandene feste Materie benötigt immer eine gewisse Zeit um sich aufzuheizen bzw. wieder abzukühlen (Speichervermögen). Außerdem werden die Maximal- und Minimalwerte gedämpft. Hier spielt allerdings die Lage der Messstelle eine entscheidende Rolle. Gerade bei starker Sonneneinstrahlung kann sich die Lufttemperatur, besonders hinter Dachkonstruktionen mit hohem Absorptionsgrad (Dachpappe, dunkle Flächen usw.), stark erhöhen und die Außentemperatur sogar überschreiten.

Nachfolgend werden einige typische Tagesgänge dargestellt und diskutiert.

Das Diagramm 3.1 zeigt den Tagesgang für einen typischen Wintertag mit wenig Sonnenschein. Gegen 11 Uhr wird das Maximum an rel. Luftfeuchte von $\phi = 68\%$ erreicht, die Differenz zum Minimalwert beträgt 17% . Die Temperatur schwankt zwischen $\theta = 4 \dots 12\text{ °C}$. Das Temperaturmaximum wird gegen 15 Uhr erreicht.

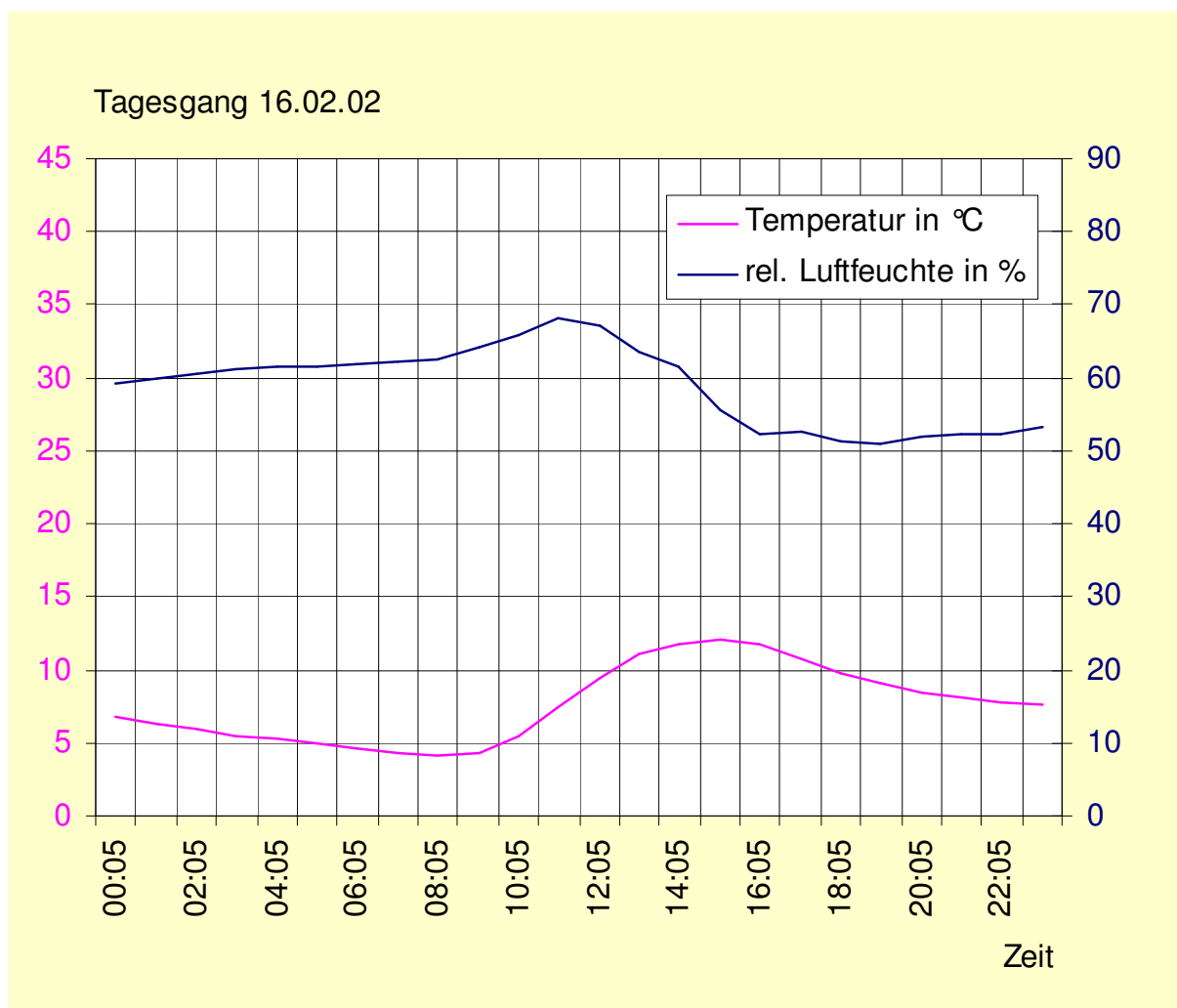


Diagramm 3.1 Tagesgang vom 16.02.02

Dagegen bleiben Temperatur und rel. Luftfeuchte beim Tagesgang vom 15.04.02 nahezu konstant, (Diagramm 3.2). Die rel. Luftfeuchte bewegt sich an diesem regnerischen und trüben Tag auf einem konstant hohen Niveau von $\phi \approx 85\%$.

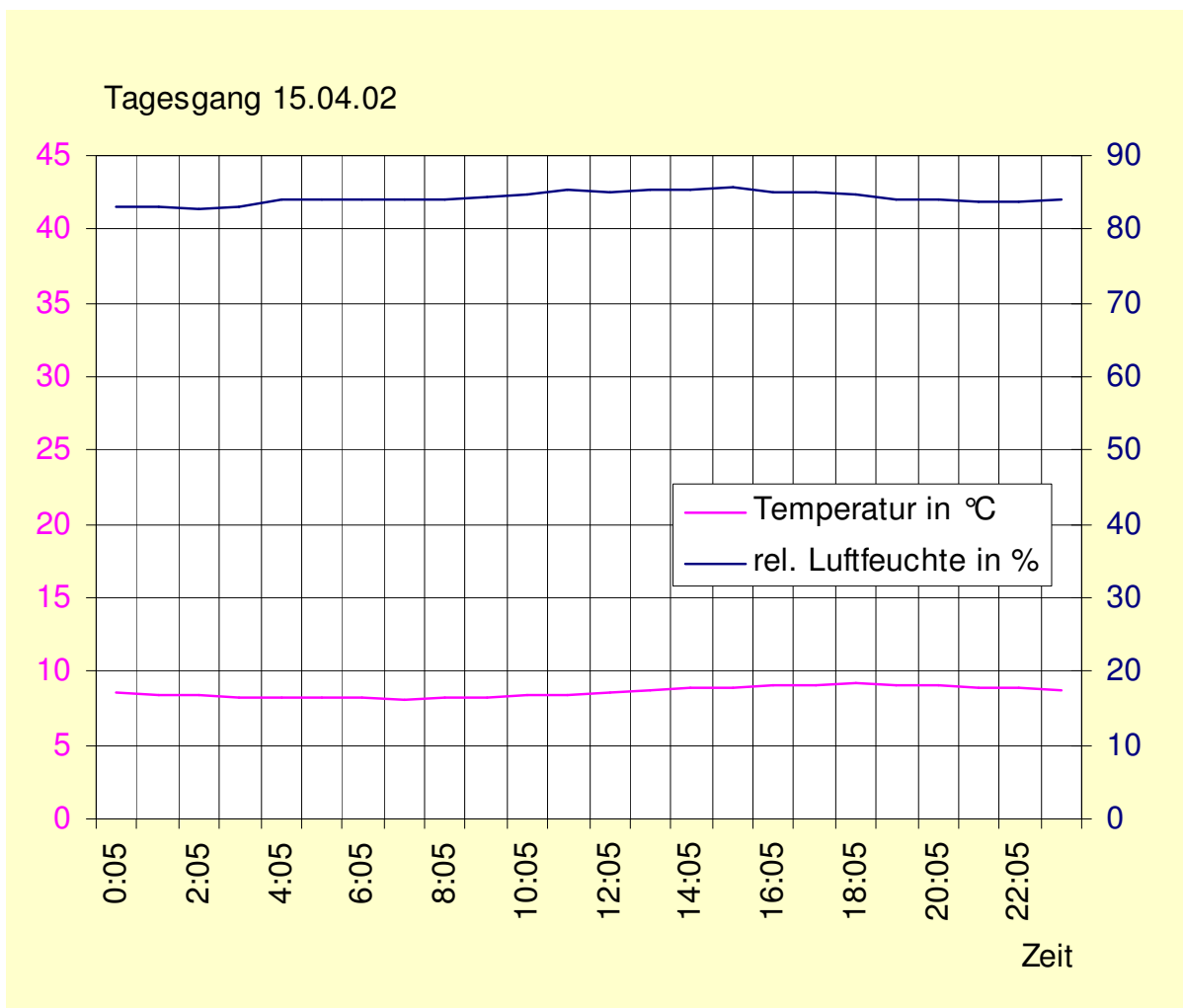


Diagramm 3.2 Tagesgang vom 15.04.02

Anders beim Tagesgang vom 14.05.02, einem durchschnittlichen Frühlingstag mit Sonnenschein, (Diagramm 3.3). Das Maximum der rel. Luftfeuchte von $\phi = 79\%$ wird gegen 8.00 Uhr morgens erreicht gleichzeitig mit dem Temperaturminimum, die Differenz zum Minimalwert beträgt 29 %.

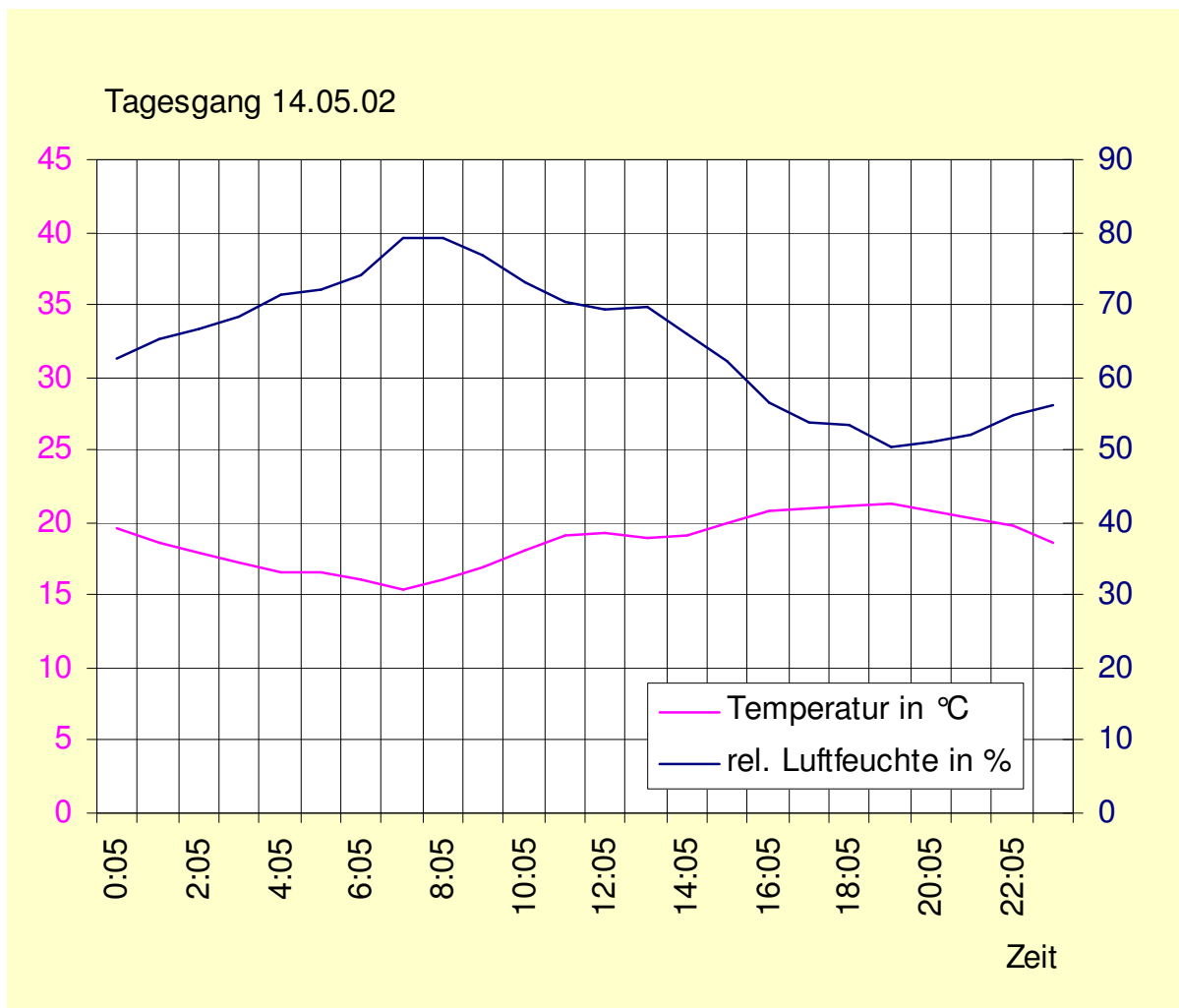


Diagramm 3.3 Tagesgang vom 14.05.02

Die beiden nächsten Diagramme 3.4. und 3.5 zeigen Tagesgänge von zwei sonnenreichen und heißen Sommertagen. Die Maxima der rel. Luftfeuchten werden wieder in den Morgenstunden mit einer kleinen Phasenverschiebung zur Zeit der niedrigsten Lufttemperatur erreicht. $\Delta\phi$ beträgt hier 28 bzw. 25%

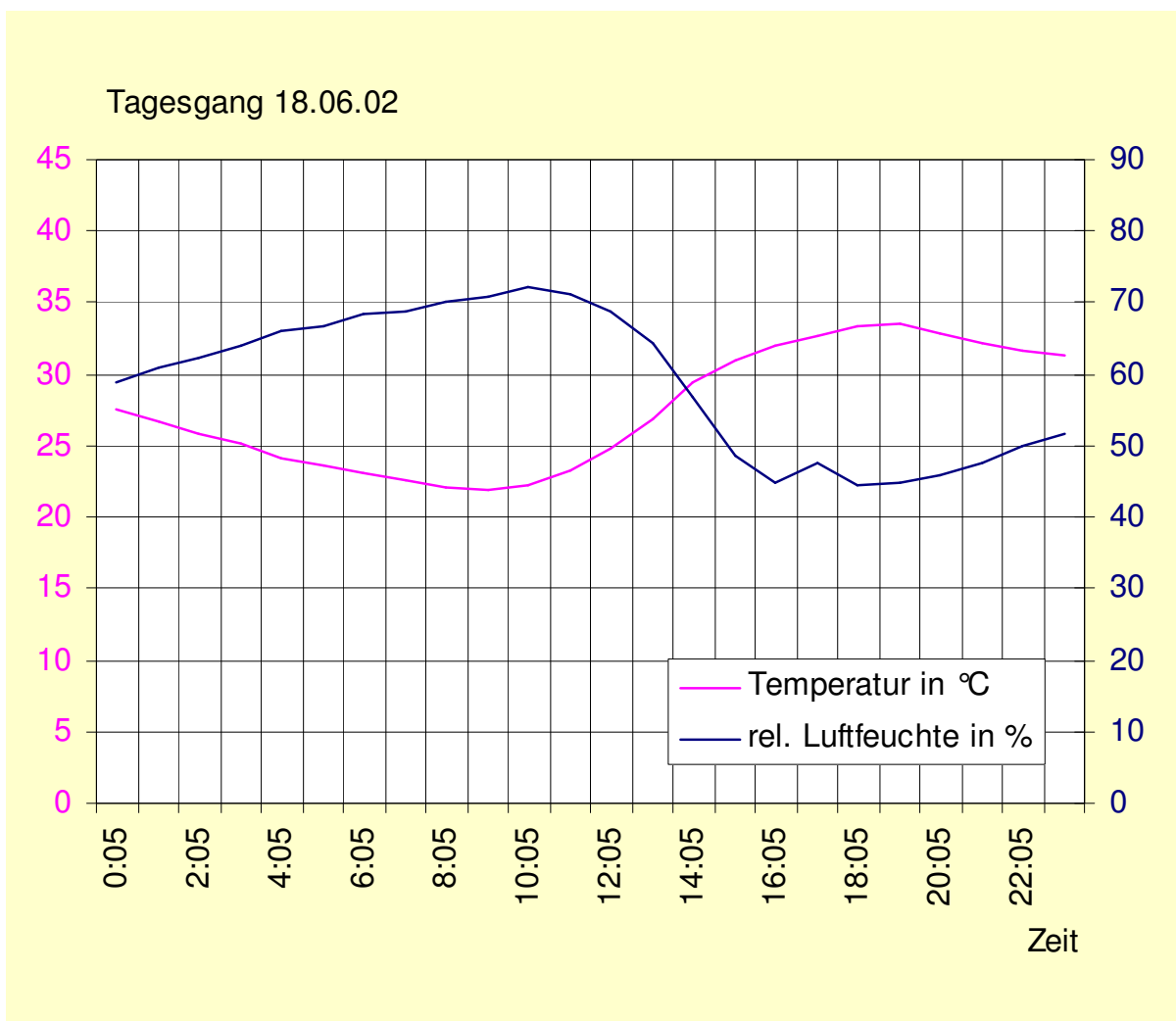


Diagramm 3.4 Tagesgang vom 18.06.02

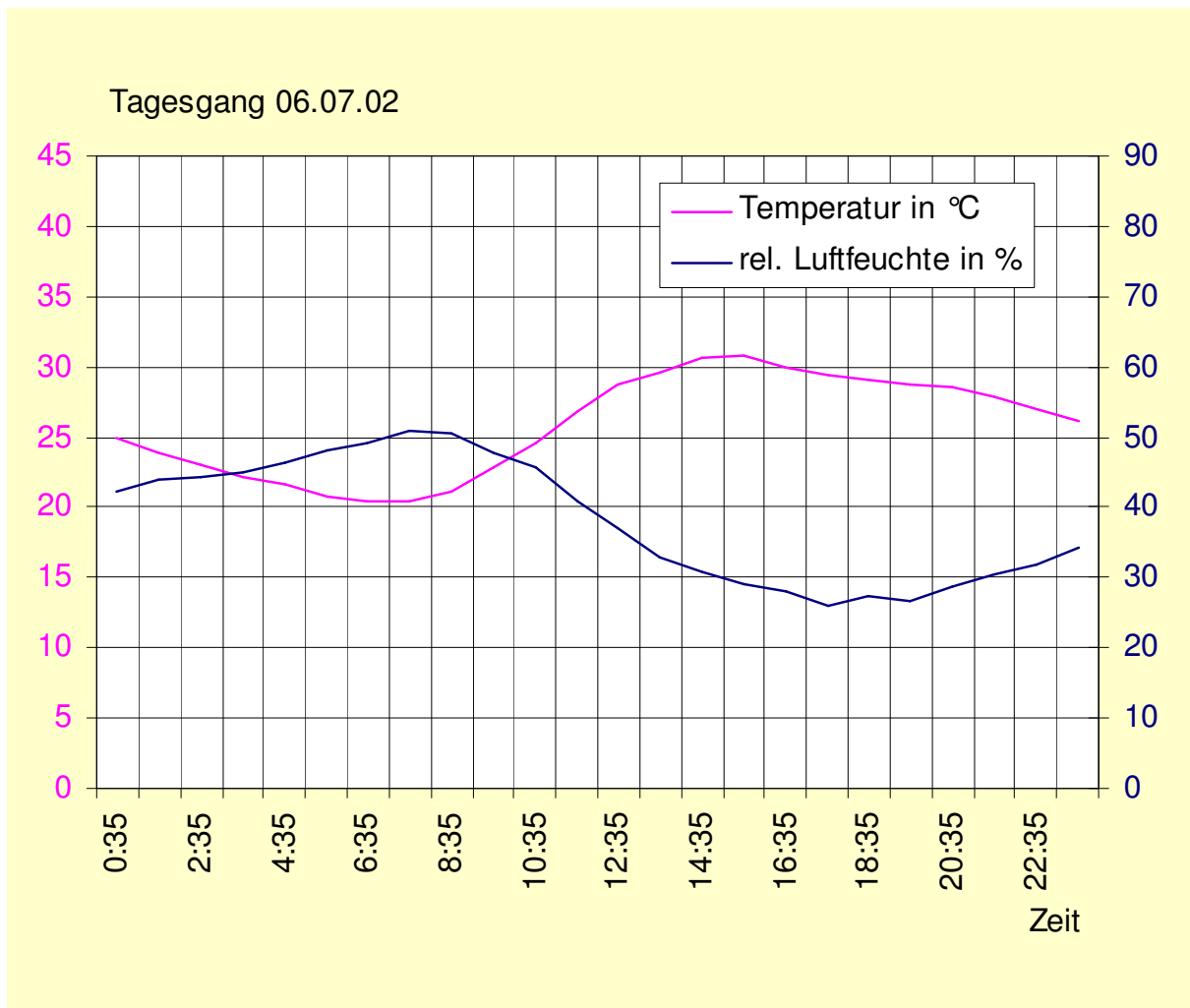


Diagramm 3.5 Tagesgang vom 06.07.02

3.2.2 Beprobung

Um sowohl den Oberflächenzustand, als auch die Verhältnisse unter der Oberfläche charakterisieren zu können, wurde folgende Art der Beprobung gewählt.

Auf einer Fläche von $10 \times 10 = 100 \text{ cm}^2$ wurde die leicht aufliegende zersfaserte Schicht mittels Stemmeisen vorsichtig abgeschabt. Diese Schicht ist nicht eindeutig von einer darunter liegenden und festeren Schicht abzugrenzen, im Frühholz scheint die Auflösung des Faserverbundes tiefer zu gehen. Danach wurden mit einem Forstnerbohrer ($\varnothing 20 \text{ mm}$) jeweils in einer 3 mm Tiefenstufung Bohrspäne entnommen, um Tiefenprofile der zu ermittelnden Kenngrößen zu erhalten.

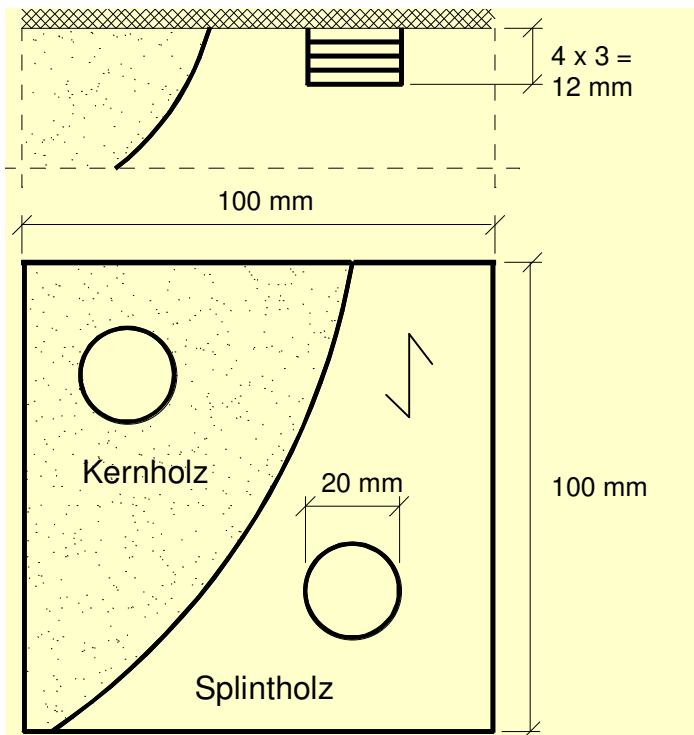


Bild 3.3 Schematische Darstellung der Beprobung

Die Proben wurden folgendermaßen bezeichnet:

LH	O	0-3	KH	
				Holzart (ggf.): „KH“ ...Kernholz, „SH“ ...Splintholz
				Tiefenbereich der Beprobung in mm oder Oberfläche „O“
				Geographische Lage im Objekt (Himmelsrichtung)

Objekt: „LH“... Lutherhalle, „SZ“ ...Stadthalle Zerbst

Fallbeispiel 1: Dachstuhl der Lutherhalle zu Wittenberg

Beprobte wurde im Ostflügel eine stark durch chemische Korrosion geschädigte Stuhlsäule. Unter der mazerierten Schicht wurden sowohl im Splint- als auch im Kernholz Proben entnommen, (Bild 3.3). Außerdem wurde eine Tiefenbeprobung an einer Stelle vorgenommen, wo keine augenscheinliche Holzkorrosion festgestellt werden konnte (Referenzprobe). Um die zerfaserte Oberflächenschicht für mikroskopische Untersuchungen zu erhalten, wurden in der Nähe der Tiefenbeprobungen zusätzlich Stemmproben (ca. 15 x 20 x 6 mm) entnommen.

Im Westflügel wurde entsprechend vorgegangen, allerdings ohne Referenzprobe.

Bezeichnung der Probe	Erläuterung / Ort der Entnahme
LH O O LH O 0-3 KH LH O 3-6 KH LH O 6-9 KH LH O 9-12 KH	Lutherhalle, Ostflügel, mazerierte Oberfläche (Stütze) Lutherhalle, Ostflügel, 0-3 mm Tiefe, Kernholz usw.
LH O O LH O 0-3 SH LH O 3-6 SH LH O 6-9 SH LH O 9-12 SH	Lutherhalle, Ostflügel, mazerierte Oberfläche (Stütze) Lutherhalle, Ostflügel, 0-3 mm Tiefe, Splintholz usw.
LH O 0-3 R LH O 3-6 R LH O 6-9 R LH O 9-12 R	Lutherhalle, Ostflügel, 0-3 mm Tiefe, Referenzprobe (Fußschwelle) usw.
LH W O LH W 0-3 KH LH W 3-6 KH LH W 6-9 KH LH W 9-12 KH	Lutherhalle, Westflügel, mazerierte Oberfläche, Kernholz (Stütze) usw.
LH W O LH W 0-3 SH LH W 3-6 SH LH W 6-9 SH LH W 9-12 SH	(Stütze)

Übersicht 3.1 Beprobungsschema Dachstuhl Lutherhalle Wittenberg

Fallbeispiel 2: Dachstuhl der Stadthalle Zerbst

Es wurden Proben an allen 4 Seiten des Dachstuhles entnommen, hier ebenfalls eine oberflächennah stark geschädigte Schicht und die darunter liegenden Tiefenbereiche.

Nach der Beprobung im Juli 2001 wurden die Bohrlöcher wieder mit hölzernen Dübeln verschlossen. Danach wurde die beprobte Fläche mittels einer rotierenden Bürstenwalze mit Stahldraht geschliffen, d.h. die locker aufliegende zerfaserte Schicht wurde vollständig und etwas großflächiger als 10 x 10 cm² abgetragen. Dadurch entstand eine deutliche Profilierung der Oberfläche. Die weichen und möglicherweise stärker geschädigten Frühholzbereiche wurden stärker ausgeräumt.

Bezeichnung der Probe	Erläuterung / Ort der Entnahme
SZ S O SZ S 0-3 SZ S 3-6 SZ S 6-9 SZ S 9-12	Stadthalle Zerst Südseite Oberfläche Stadthalle Zerst Südseite 0-3 mm Tiefe usw. (Stütze der Stuhlkonstruktion; Foto 6 – Anlage A)
SZ W O SZ W 0-3 SZ W 3-6 SZ W 6-9 SZ W 9-12	(Riegel der Stuhlkonstruktion; Foto 7 – Anlage A)
SZ N O SZ N 0-3 SZ N 3-6 SZ N 6-9 SZ N 9-12	(Strebe der Stuhlkonstruktion; Foto 8 – Anlage A)
SZ O O SZ O 0-3 SZ O 3-6 SZ O 6-9 SZ O 9-12	(Strebe in der Binderebene; Foto 9 – Anlage A)

Übersicht 3.2 Beprobungschema Dachstuhl Stadthalle Zerst

Ein Jahr später, im Juli 2002, wurden die geschliffenen Bereiche erneut auf Anzeichen einer chemischen Holzkorrosion hin untersucht. Tatsächlich bildeten sich an einigen Stellen erneut weiße Salzausblühungen und die „Mazeration“ an der Oberfläche ging weiter – besonders an der visuell stark geschädigten Ostseite – allerdings in einer sehr abgeschwächten Form. Dies deutet darauf hin, dass die Schädigung – wenn auch sehr langsam – nach Entfernen der oberflächlich stark zerfaserten Schicht weiter voranschreitet. (Fotos 6 bis 9 – Anlage A).

3.2.3 Analyse

Ionenchromatographie, pH – Wert Messung und Aufnahme der Sorptionsisothermen

Die Masse der zerfaserten Schicht auf 100 cm^2 bezogen ist abhängig vom Oberflächenzustand. Die darunter entnommenen Volumina (Tiefe jeweils 3 mm, Durchmesser 20 mm) entsprechen jeweils der Bohrspanmasse von etwa 1 g.

Vorgehensweise:

1. Die eine Hälfte der Probe wurde für die Ionenchromatographie (IC) Kationen- und Anionenbestimmung sowie für die pH – Wert Messung im entionisierten Wasser eluiert (Verhältnis: 1 g Probenmaterial auf 50 ml Wasser, 24 h bei 25°C). Dabei gehen die Ionen nahezu vollständig in Lösung. Der Rückstand wurde abgefiltert.
2. Mit der anderen Probenhälfte wurden durch Klimaschrankeinlagerung die Sorptionsisothermen (Absorption und Desorption) innerhalb der relativen Luftfeuchten $\phi = 20$ bis 95% ermittelt. Die Massebestimmung m_u erfolgte auf einer Analysenwaage nach einer Stufung der Luftfeuchte von $\Delta\phi = 5 \%$ immer nach dem Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte. Danach wurde im Trockenschrank die Trockenmasse m_{dtr} bei einer Temperatur von $\theta = 103^\circ\text{C}$ bestimmt. Die Masse der eingelagerten Salze ist in m_u und m_{dtr} jeweils enthalten. Die Holzfeuchte ergibt sich nach der Gleichung:

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} * 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgte weitestgehend nach DIN 52183, auf das Abkühlen der erwärmten Probe im Exsikkator wurde verzichtet, die Messung der Darrtrockenmasse erfolgte sofort.

Gilt nur für Fallbeispiel 2 (Dachstuhl der Stadthalle Zerbst):

3. Die bereits eluierten Proben wurden hier erneut im entionisierten Wasser gespült um eventuell noch vorhandene Restsalze weitestgehend zu entfernen. Die Holzfeuchtigkeit des Rückstandes wurde nun nach erneuter Klimaschranklagerung bei $\phi = 35, 65$ und 95% anhand der Gleichung 3.1 bestimmt.

Licht- und rasterelektronenmikroskopische Strukturuntersuchungen an den Stemmproben

Lichtmikroskopie:

Die Darstellung der einzelnen mazerierten Holzfasern erfolgte mit Auflicht und einer Dunkelfeldkontrastierung. Für die Durchlichtmikroskopie wurden die Proben 24 h in einem Azeton / Alkohol – Gemisch gelagert. Danach wurden Dünnschnitte (Schnitt-richtung quer zur Faser) angefertigt.

Rasterelektronenmikroskopie (REM):

Hand- oder Mikrotomschnitte würden bei einer geschädigten Oberfläche kein sauberes Bild ergeben bzw. die an der Oberfläche anliegenden mazerierten Fasern würden

verloren gehen. Deshalb wurden die Holzproben folgendermaßen präpariert, (Übersicht 3.3):

Maßnahme	Erläuterung
Infiltration mit Azeton	Entharzen des Holzes
Infiltration mit Spurr – Medium (Epoxidharz)	Verfestigung der Holzstruktur, lose Fasern werden in einer Epoxidharzmatrix fixiert.
Polymerisation im Wärmeschrank	
Anschliff des Querschnittes	Der Anschliff erfolgt, um die Struktur in der Ebene (Querschnitt) abbilden zu können.
Kohlebedampfung	Verbesserung der Leitfähigkeit, Verhindern der Zerstörung der Oberflächenstruktur durch den Elektronenstrahl im Rasterelektronenmikroskop

Übersicht 3.3 Herstellung der Holzproben für die REM - Untersuchungen

Gewählt wurde das Rückstreuелеktronenverfahren (backscattered electron - BE). Der Detektor erhält von schwereren Elektronen energiereichere Signale und kann somit überwiegend einen Elementkontrast abbilden. Deshalb wird diese Methode vorrangig bei Dünn- und Anschliffen eingesetzt.

3.2.4 Ergebnisse und Auswertung

3.2.4.1 Ionen- und Salzkonzentrationen

In den Diagrammen 3.6 bis 3.14 sind die Anionen- und Kationenkonzentrationen für jede Beprobung über der Tiefe, umgerechnet in g/kg, sowie die pH-Werte dargestellt. Auffällig ist ein starker Gradient der Eigenschaften. Die Ionenkonzentration ist an der Oberfläche immer am größten und nimmt über der Tiefe ab. Der pH-Wert zeigt in der Tendenz an der Oberfläche eine stärkere Säurereaktion als im Inneren des Holzes an.

Objekt / Probe	auffällig hohe Konzentrationen		Tendenz über die Tiefe	pH – Wert	Oberflächen- zustand / Bemerkungen
	Anionen	Kationen			
Ostflügel LH O KH und LH O SH	PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺ , K ⁺	Langsam ab- nehmend, aber noch signifikante Konzentrationen	Oberfläche: 3,73; ab einer Tiefe von 3-6 mm relativ konstant bei ≈ 4,5 ... 5	„Mazeration“
Ostflügel LH O R	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺	Langsam ab- nehmend, Ca ²⁺ nur bei 0-3 mm	steigend von 3,74 (0-3 mm) auf 5,07 (9-12 mm)	keine augen- scheinliche „Mazeration“
Westflügel LH W KH und LH W SH	PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺	Langsam ab- nehmend, ab 6-9 mm keine signifikanten Konzentrationen im Kernholz	≈ 4,5 (Oberflä- che und 0-3 mm) auf ≈ 5 bis 6 steigend	„Mazeration“ / weiße Salz- ausblühungen, höhere SO ₄ ²⁻ und Na ⁺ - Kon- zentrationen im Gegensatz zu den anderen Proben

Tabelle 3.1 Zusammenfassung der Ionen- und pH – Wert Analyse (Lutherhalle Wittenberg)

Die Ergebnisse werden in den Tabellen 3.1 und 3.2 zusammengefasst und ausgewertet.

Objekt / Probe	auffällig hohe Ionenkonzentrationen		Tendenz über die Tiefe	pH – Wert	Oberflächen- zustand / Bemerkungen
	Anionen	Kationen			
Überall	F ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Zn ²⁺	schnell ab- nehmend, 0-3 mm signifi- kant, 3-6 mm teilweise und ab 6 mm kei- ne sign. Kon- zentrationen mehr	≈ 3,5 bis 4,5 (Oberfläche und 0-3 mm) auf ≈ 5 bis 6 steigend	„Mazeration“ / zum Teil weiße Salzausblühun- gen

Tabelle 3.2 Zusammenfassung der Ionen- und pH – Wert Analyse (Stadthalle Zerbst)

Mögliche Herkunft der hohen Ionenkonzentrationen

Lutherhalle Wittenberg – Ostflügel:

PO₄³⁻ und der größte Teil der SO₄²⁻ -, NH₄⁺ - und K⁺ - Ionen stammen wahrscheinlich aus dem Kombinationsmittel Dohnalit FPI, (Abschnitt 2).

Lutherhalle Wittenberg – Westflügel:

Auch hier kam Dohnalit FPI zum Einsatz und erklärt somit die hohen PO₄³⁻ -, SO₄²⁻ -, NH₄⁺ - und K⁺ - Ionenkonzentrationen. Außerdem wurde 1998 das Sanierungsmittel „Korasit LH“ aufgebracht. Dieses enthält u.a. Natriumlaktat bzw. das Natriumsalz der Hydroxyessigsäure [Marx 1998].

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
LH O-O	3,73	7,09	0,39	0,00	0,40	0,96	24,54	66,85	5,10	17,27	13,61	0,33	4,37
LH O 0-3 KH	4,18	2,69	0,44	0,00	0,38	1,37	15,22	30,38	2,37	10,42	3,48	0,23	1,41
LH O 3-6 KH	5,07	1,77	0,48	0,00	0,52	1,99	7,35	17,48	1,39	7,67	1,84	0,17	0,89
LH O 6-9 KH	4,98	1,29	0,49	0,00	0,55	1,60	3,93	11,08	0,94	5,48	1,46	0,13	0,65
LH O 9-12 KH	4,99	0,8	0,42	0,00	0,48	0,96	3,34	9,63	0,70	4,66	1,38	0,14	0,63

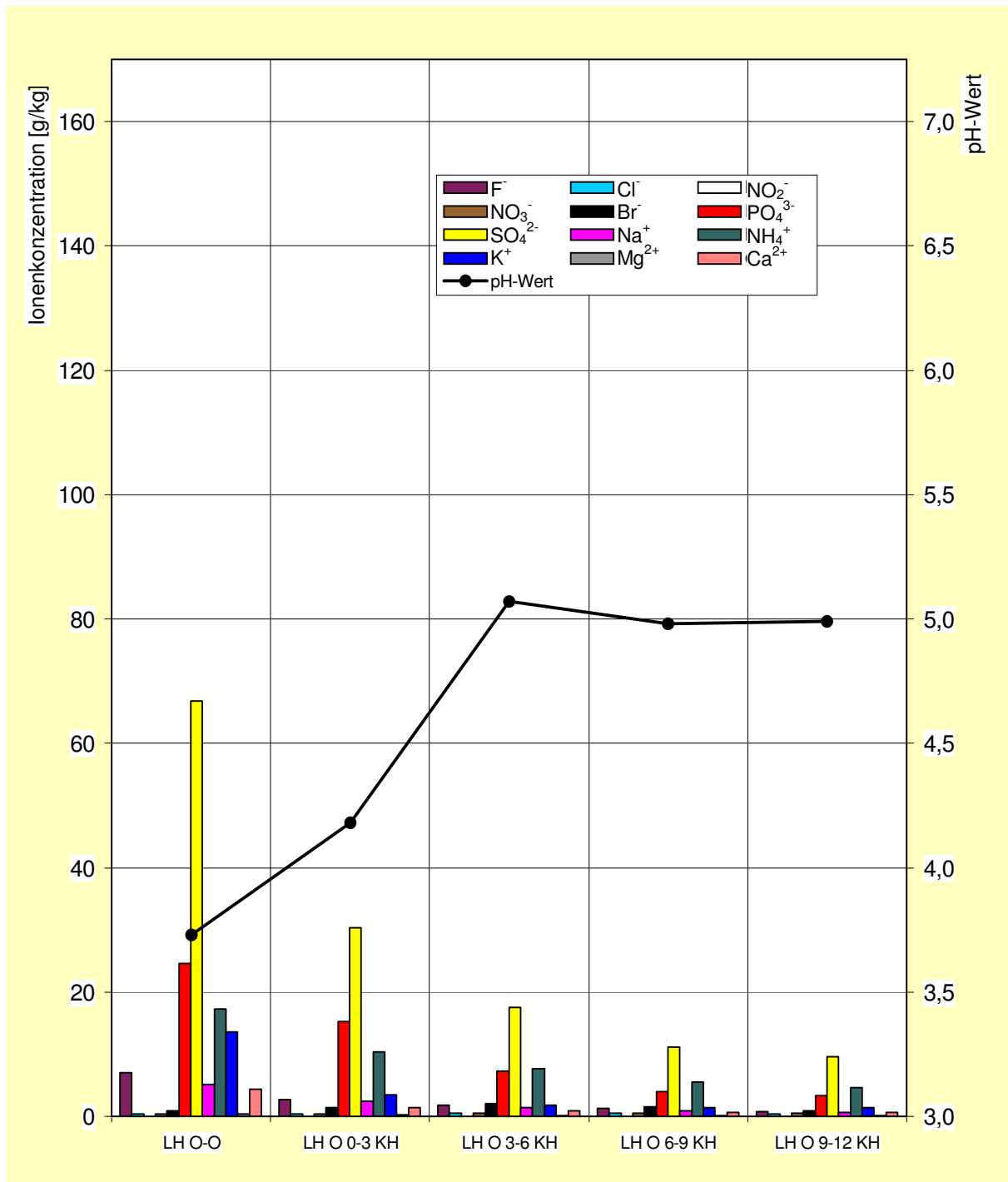


Diagramm 3.6 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () KH

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
LH O-O	3,73	7,09	0,39	0,00	0,40	0,96	24,54	66,85	5,10	17,27	13,61	0,33	4,37
LH O 0-3 SH	4,20	1,91	0,42	0,00	0,48	1,68	25,97	29,16	3,16	10,71	4,29	0,18	1,60
LH O 3-6 SH	4,69	0,82	0,42	0,01	0,55	1,97	8,81	18,48	2,27	6,92	1,97	0,07	0,79
LH O 6-9 SH	4,67	0,34	0,53	0,00	0,75	1,99	2,78	7,38	0,85	3,70	1,04	0,05	0,17
LH O 9-12 SH	4,53	0,22	0,47	0,00	0,73	0,67	0,93	3,10	0,39	1,54	0,62	0,03	0,10

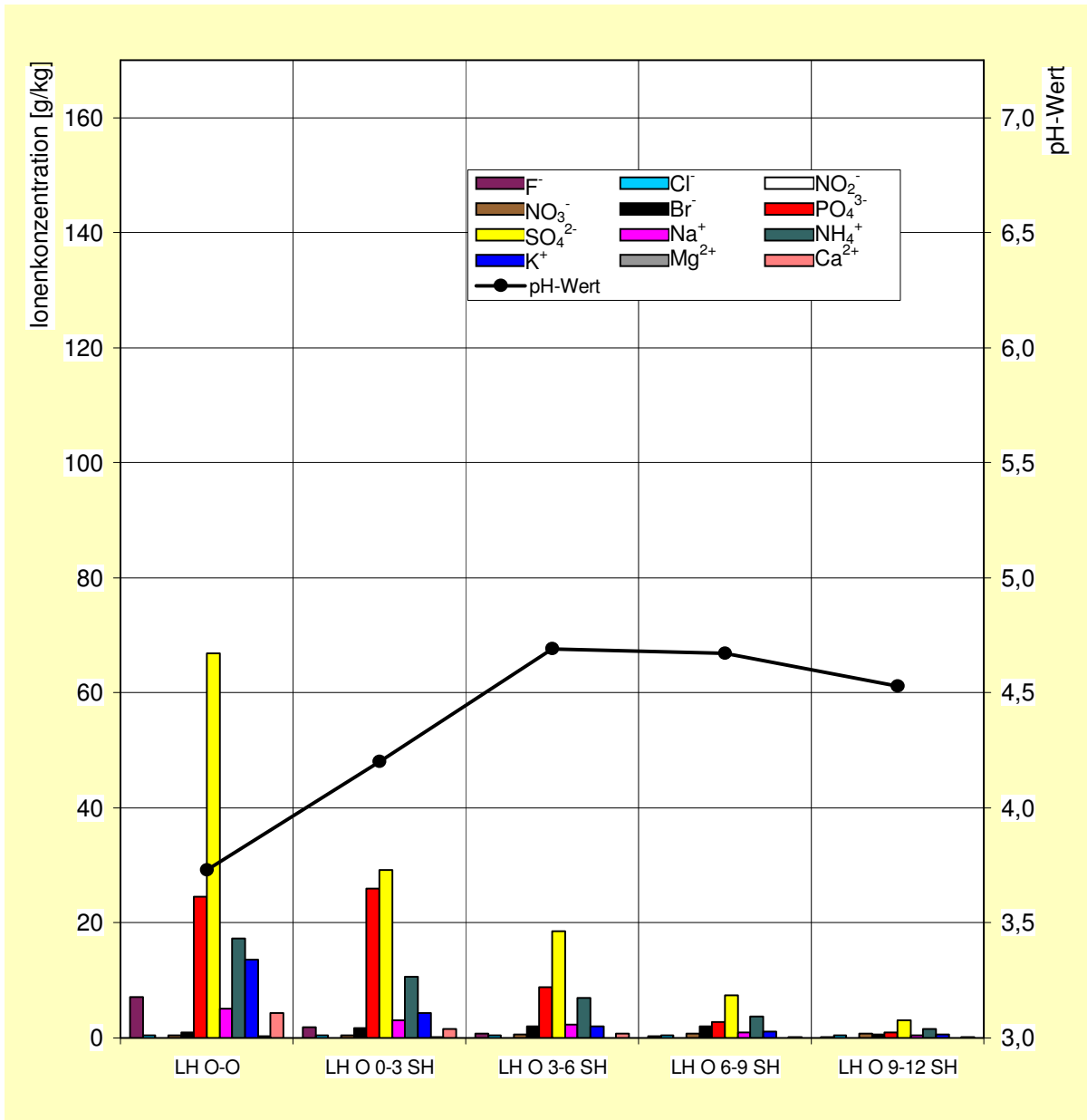


Diagramm 3.7 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () SH

Probe	Ionenkonzentration C [g/kg]												
	pH-Wert	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
LH O 0-3 R	3,74	0,08	0,32	0,00	0,33	0,00	0,77	31,55	0,46	6,46	0,60	0,16	5,85
LH O 3-6 R	4,42	0,03	0,39	0,00	0,65	0,00	0,85	9,65	0,39	3,64	0,29	0,05	0,31
LH O 6-9 R	4,71	0,02	0,48	0,00	0,75	0,00	0,38	2,97	0,22	1,49	0,17	0,02	0,10
LH O 9-12 R	5,07	0,04	0,55	0,00	0,76	0,00	0,25	0,31	0,26	0,68	0,16	0,02	0,09

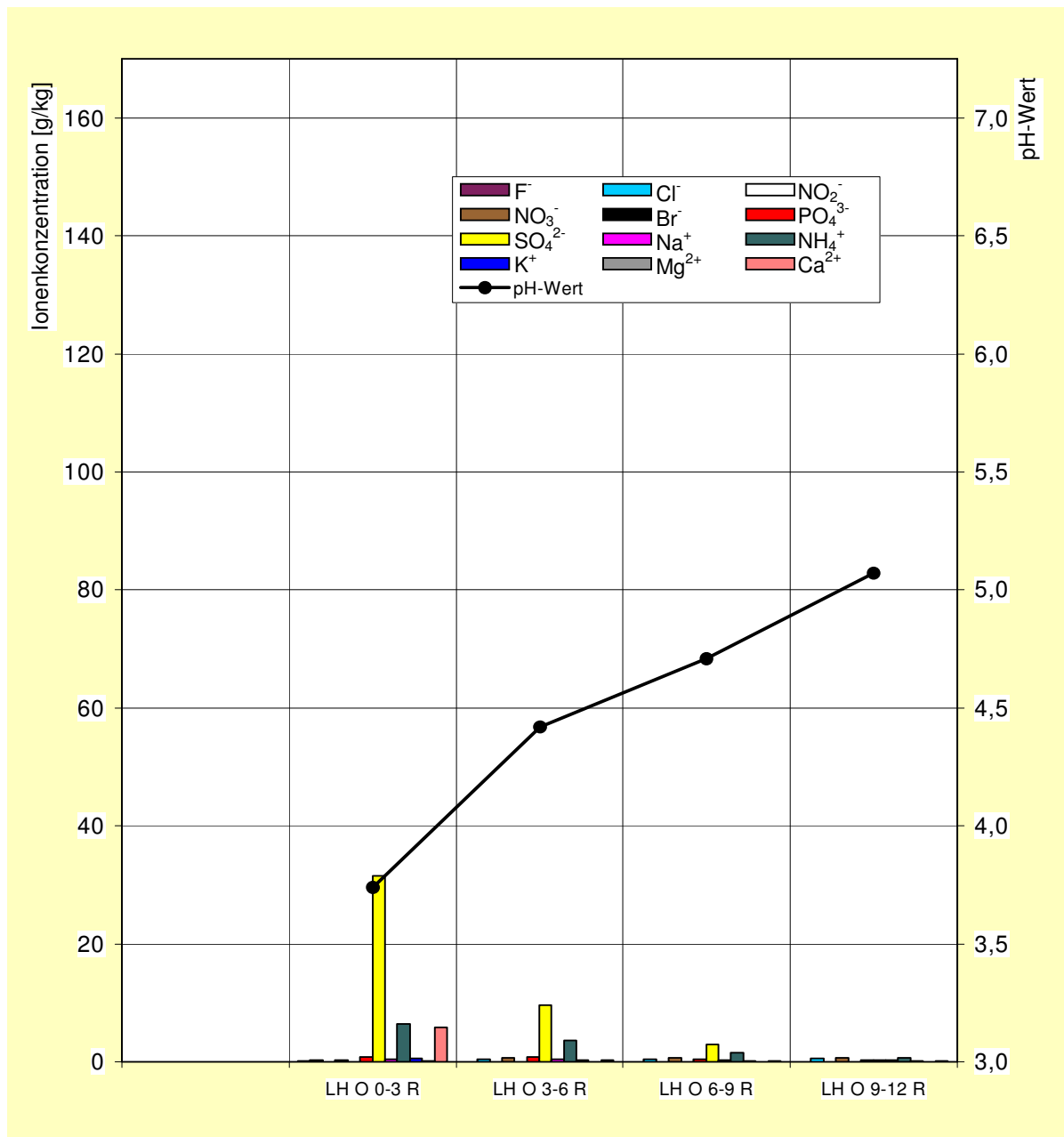


Diagramm 3.8 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH O () R

Tiefe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
LH W O	4,48	1,40	0,54	0,00	0,53	0,06	18,04	160,65	71,24	5,04	3,25	0,72	7,18
LH W 0-3 KH	4,42	0,00	0,41	0,09	0,51	0,04	7,95	32,58	13,42	12,21	1,25	0,21	2,26
LH W 3-6 KH	5,96	0,04	0,49	0,01	0,82	0,04	2,08	8,59	2,86	4,85	0,54	0,09	1,10
LH W 6-9 KH	6,01	0,02	0,50	0,00	0,85	0,00	0,40	1,98	2,97	1,18	0,36	0,04	0,63
LH W 9-12 KH	5,37	0,02	0,39	0,00	0,76	0,00	0,25	0,10	1,69	0,50	0,49	0,02	0,56

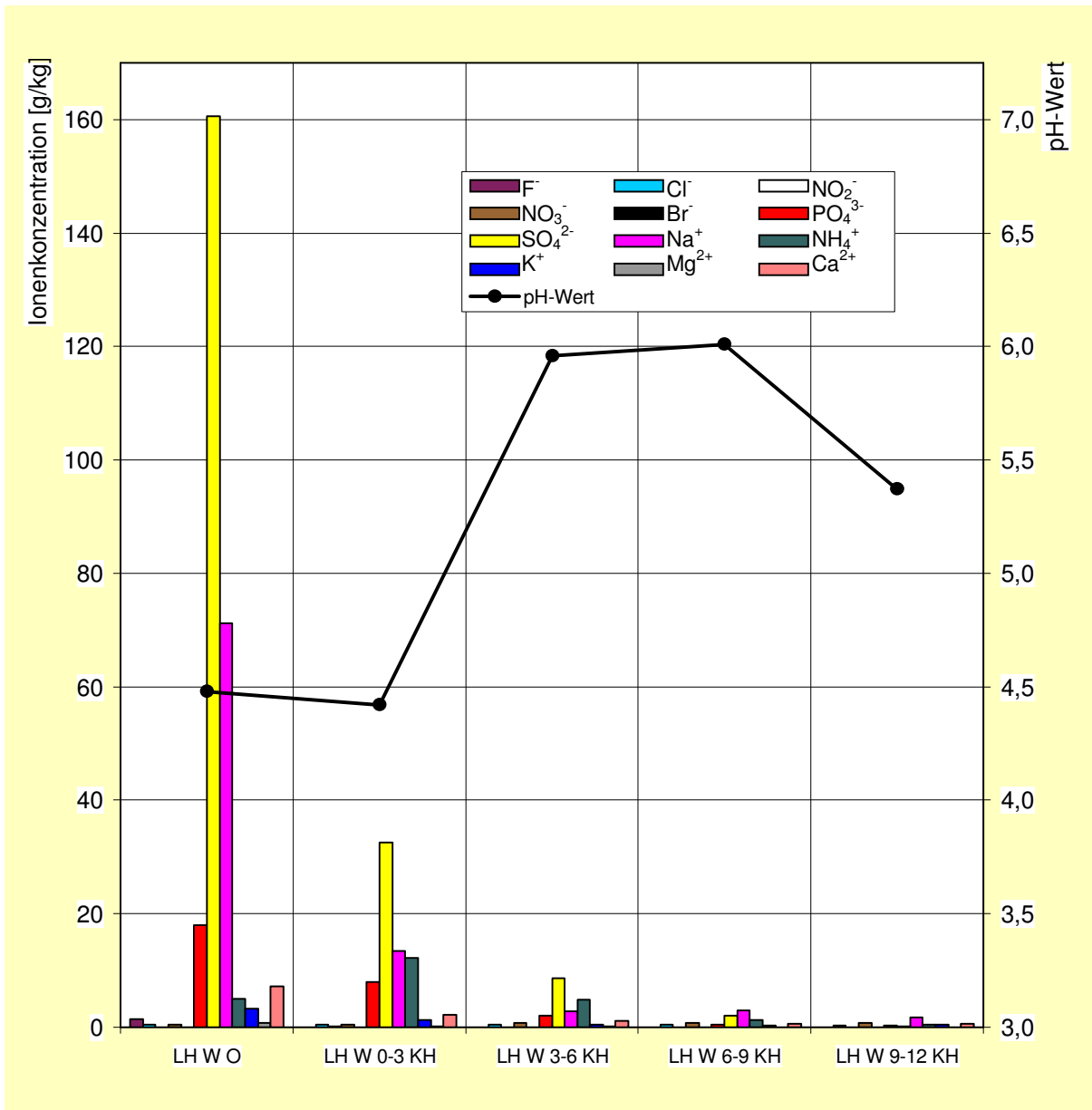


Diagramm 3.9 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH W () KH

Tiefe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
LH W O	4,48	1,40	0,54		0,53	0,06	18,04	160,7	71,24	5,04	3,25	0,72	7,18
LH W 0-3 SH	4,42	0,12	0,60	0,13	0,72	0,18	10,69	25,47	13,42	6,67	3,01	0,23	2,26
LH W 3-6 SH	5,29	0,00	0,74	0,03	0,99	0,14	4,41	8,14	2,86	3,19	1,92	0,19	1,10
LH W 6-9 SH	4,85	0,00	0,77	0,03	0,88	0,08	3,96	5,57	2,97	3,46	1,13	0,14	0,63
LH W 9-12 SH	5,30	0,00	0,64	0,01	0,74	0,05	1,79	3,80	1,69	3,32	0,57	0,10	0,56

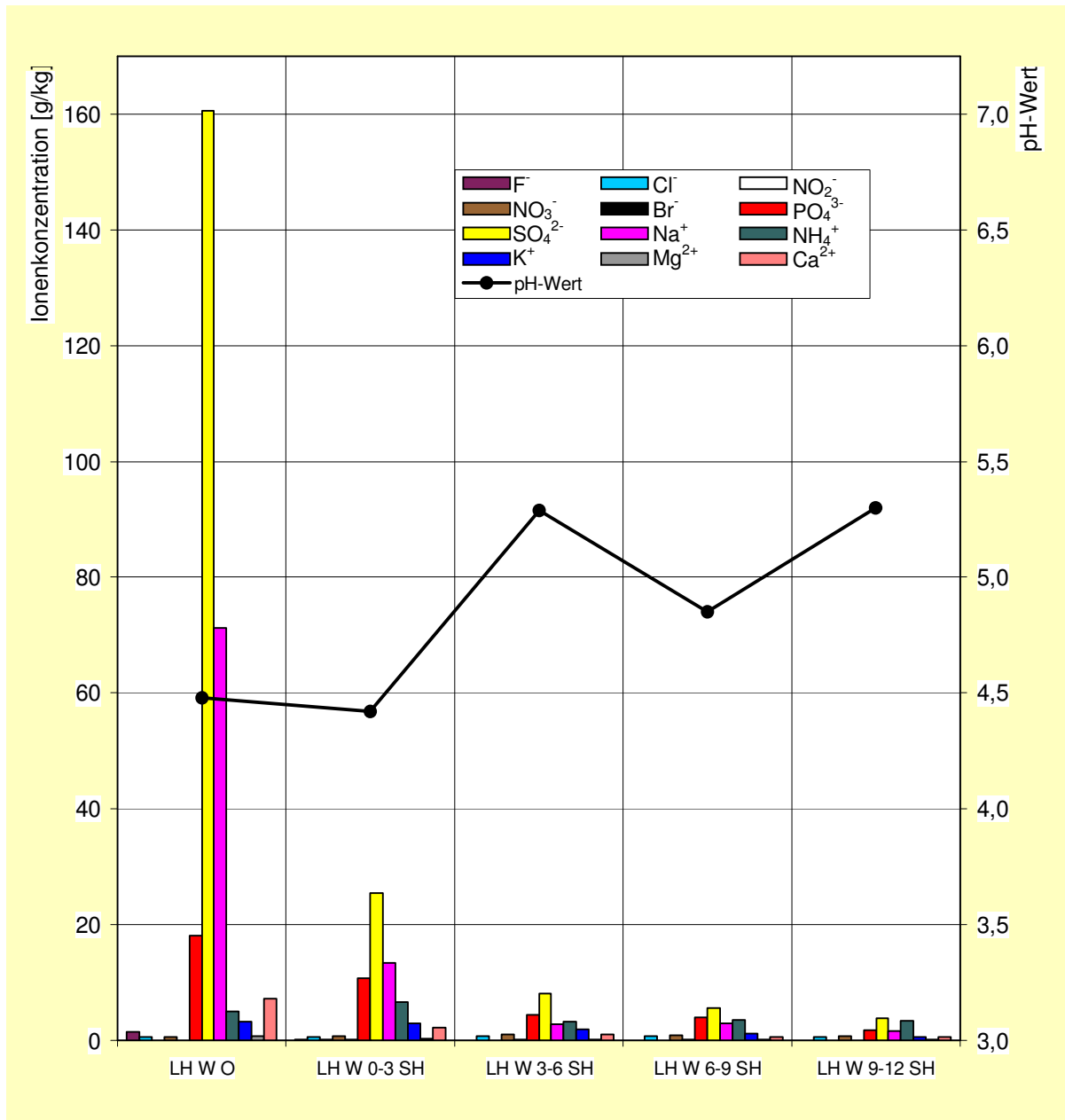


Diagramm 3.10 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben LH W () SH

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn ²⁺
SZ S O	4,33	84,93	0,00	0,25	0,24	133,50	165,67	15,69	32,39	22,26	0,26	2,14	43,3
SZ S 0-3	4,04	31,17	0,68	0,63	1,06	15,66	47,96	5,74	11,34	8,83	0,11	1,84	36,5
SZ S 3-6	4,20	5,05	0,78	0,49	0,88	5,25	11,95	1,88	3,68	1,78	0,22	1,22	1,02
SZ S 6-9	5,01	0,97	0,43	0,28	0,15	1,00	2,74	0,57	1,02	0,39	0,16	0,51	0,08
SZ S 9-12	5,63	0,54	0,33	0,20	0,03	1,00	1,11	0,27	0,59	0,28	0,12	0,83	0,07

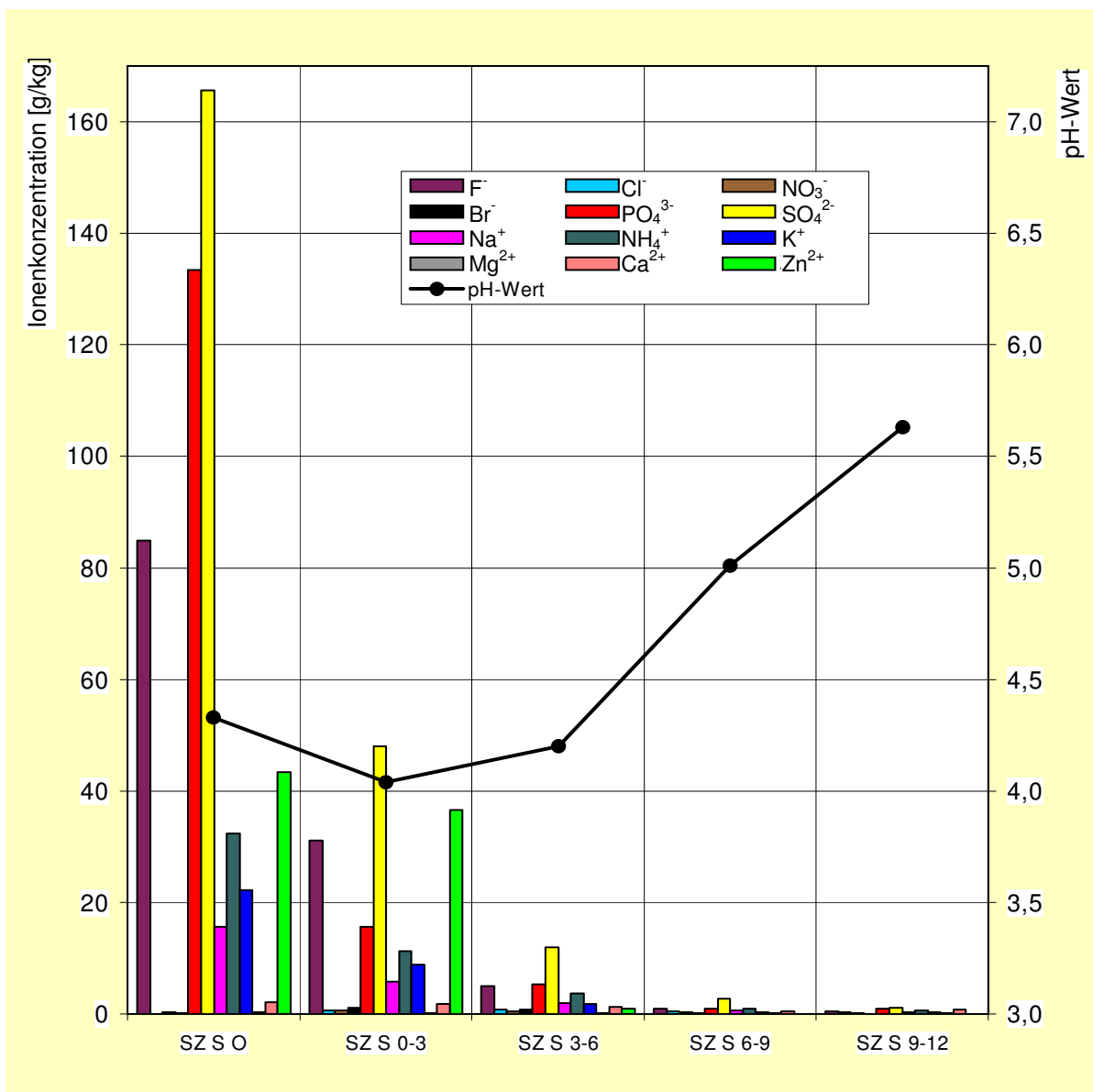


Diagramm 3.11 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ S ()

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn ²⁺
SZ W O	3,36	40,96	0,00	0,27	0,05	50,15	165,32	31,81	21,17	9,50	1,04	3,43	22,8
SZ W 0-3	3,76	8,96	0,42	0,40	0,18	16,30	37,10	8,34	14,33	1,27	0,41	1,69	4,07
SZ W 3-6	5,51	0,51	0,60	0,37	0,23	1,00	5,20	1,07	1,36	0,20	0,13	0,80	0,01
SZ W 6-9	5,93	0,23	0,66	0,29	0,08	1,00	0,80	0,56	0,46	0,14	0,17	0,65	0,02
SZ W 9-12	5,51	0,17	0,43	0,22	0,02	1,00	0,57	0,34	0,19	0,10	0,13	1,07	0,01

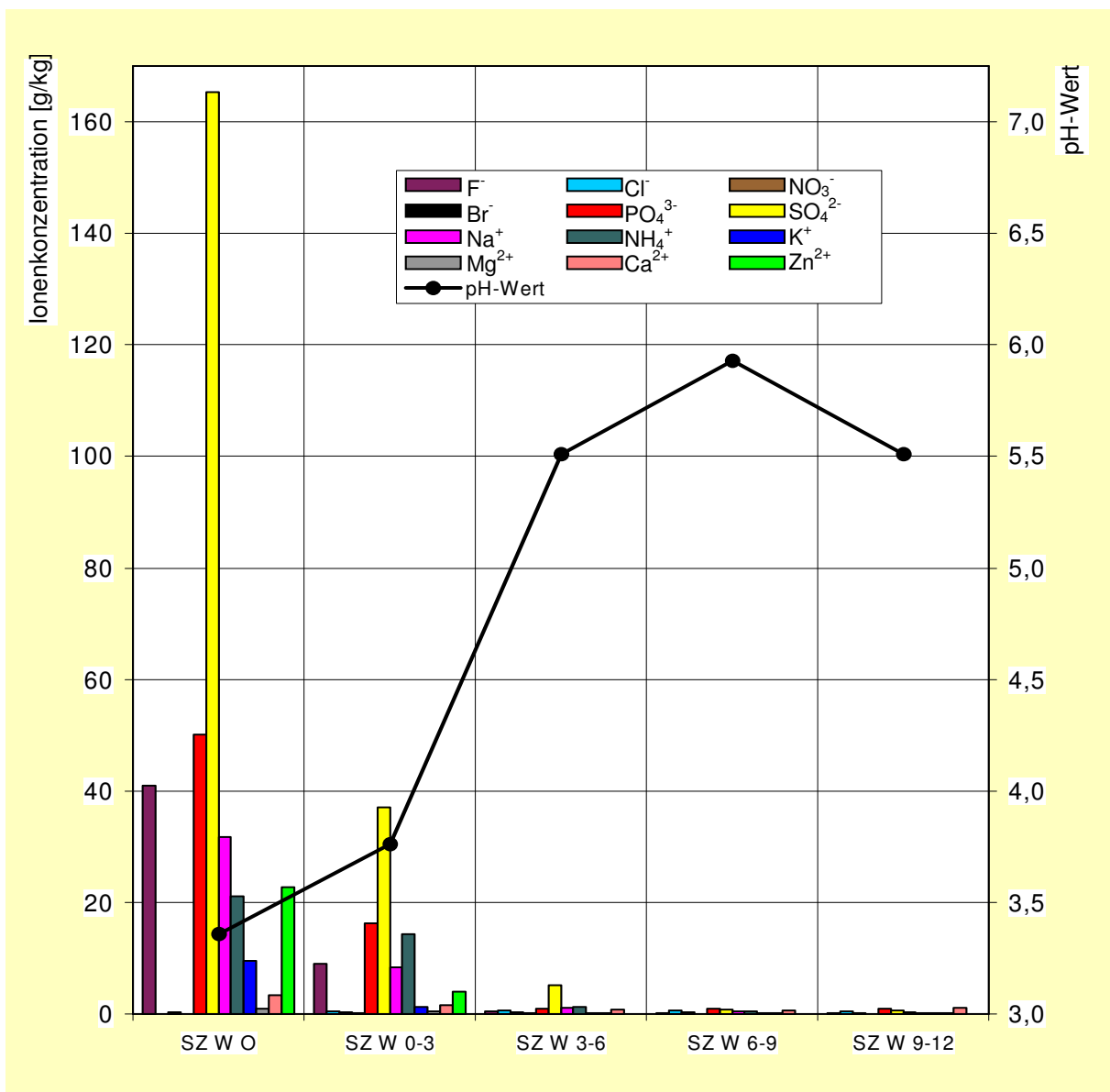


Diagramm 3.12 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ W ()

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn ²⁺
SZ N O	4,02	42,31	0,00	0,30	0,32	37,16	124,54	23,04	14,71	25,92	0,59	3,09	18,7
SZ N 0-3	3,85	7,32	0,61	0,40	0,92	10,88	29,80	6,09	5,44	2,42	0,20	1,24	1,52
SZ N 3-6	4,60	0,77	0,54	0,43	0,71	1,88	3,57	1,53	1,88	0,67	0,19	0,68	0,13
SZ N 6-9	5,16	0,49	0,49	0,33	0,19	1,00	2,98	0,74	0,88	0,35	0,18	0,68	0,08
SZ N 9-12	5,47	0,36	0,44	0,23	0,05	1,00	2,23	0,59	0,39	0,23	0,19	0,69	0,04

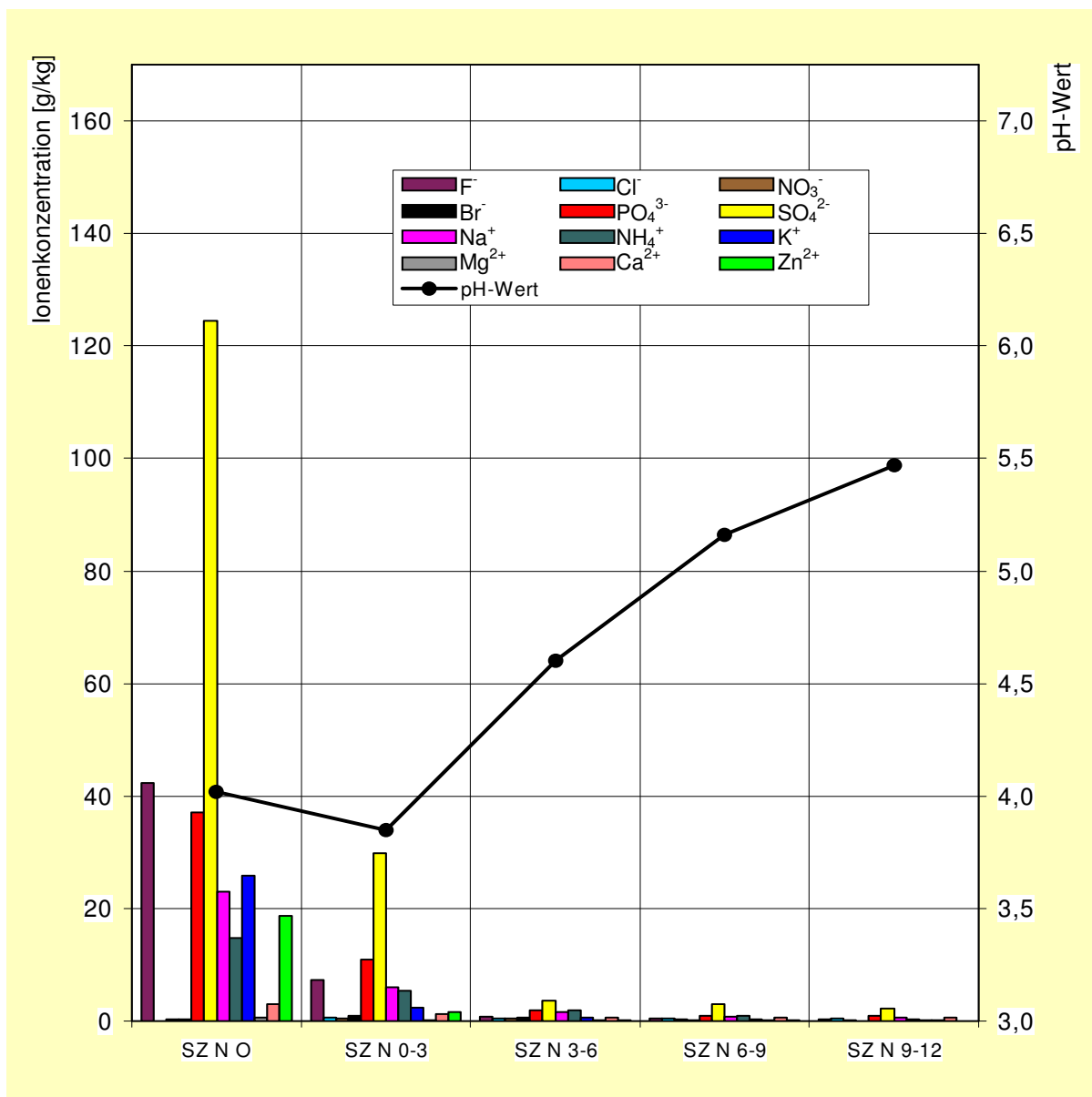


Diagramm 3.13 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ N ()

Probe	pH-Wert	Ionenkonzentration C [g/kg]											
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Zn ²⁺
SZ O O	4,24	0,00	0,00	0,34	0,52	127,69	156,27	21,19	26,06	38,71	0,52	2,28	16,1
SZ O 0-3	4,01	4,45	0,59	0,45	1,02	14,25	70,55	11,17	12,47	17,59	0,25	1,01	1,28
SZ O 3-6	4,89	1,34	0,79	0,72	1,12	1,00	12,40	2,18	2,57	3,79	0,09	0,56	0,04
SZ O 6-9	5,26	1,33	0,59	0,32	0,14	1,00	2,87	0,99	0,70	1,46	0,16	0,58	0,02
SZ O 9-12	5,23	0,65	0,37	0,16	0,02	1,00	1,60	0,53	0,51	0,65	0,13	0,57	0,04

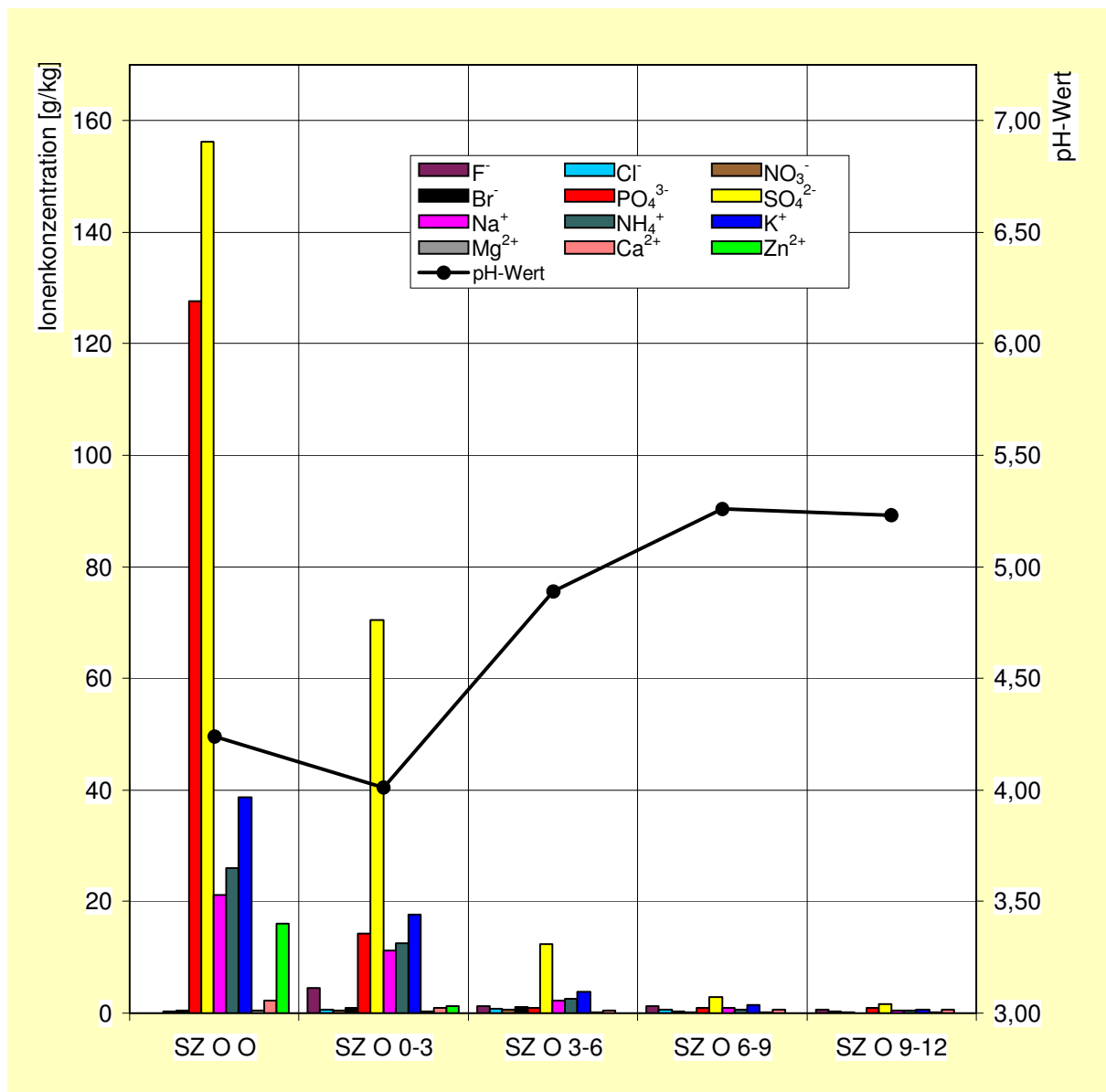


Diagramm 3.14 Anionen- und Kationenkonzentrationen sowie pH – Werte von den Proben SZ O ()

Gesamtsalzeintrag

Eine Aussage über den Gesamtsalzeintrag enthält die Konzentrationsangabe einerseits bezogen auf die Masse in g/kg und andererseits auf die Auftragsfläche in g/m².

Aus den Tabellen der Einzelionenkonzentrationen in g/kg (Diagramme 3.6 bis 3.14) ergibt sich jeweils der Gesamtsalzgehalt S für jeden Probenbereich in g/kg.

Die Salzaufnahme A_F in g/m² wird folgendermaßen berechnet:

$$A_F = m_{\text{Salz}} / A_{O(T)} \quad (3.2)$$

$$\text{mit } A_O = 0,1 * 0,1 = 0,01 \text{ m}^2 \quad \text{bzw.} \quad (3.3)$$

$$A_T = \pi/4 * 0,02^2 = 0,000314159 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

$$\text{und } m_{\text{Salz}} = S * \Sigma m_U / 1000 \quad (3.5)$$

S	Gesamtsalzgehalt aus Summe der Einzelionenkonzentrationen aus der Anlage E auf die Masse von Holz + Salz bezogen in g/kg
m_{Salz}	absolute Salzmasse in g
A_O	Fläche der Oberflächenbeprobung in m ²
A_T	Fläche der Tiefenbeprobung in m ²
Σm_U	Masse der Probe nach Normalklimalagerung 20/65 aus der Anlage C in g

Die Berechnung ist tabellarisch in Anlage D ersichtlich.

Die Ergebnisse sind in der Anlage D tabellarisch und in den Diagrammen 3.15 bis 3.23 graphisch dargestellt.

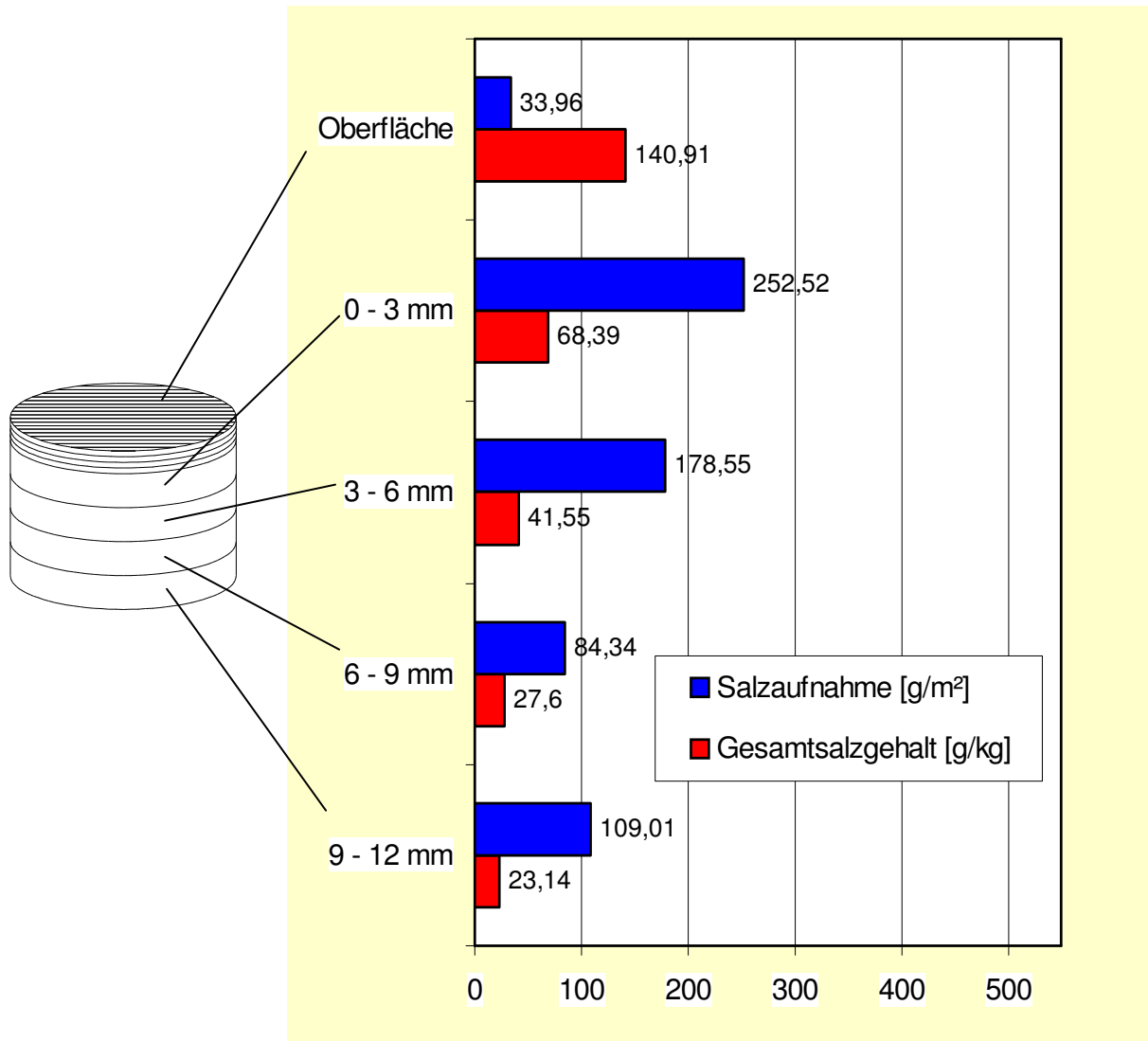


Diagramm 3.15 Salzverteilung Lutherhalle Ost Kernholz

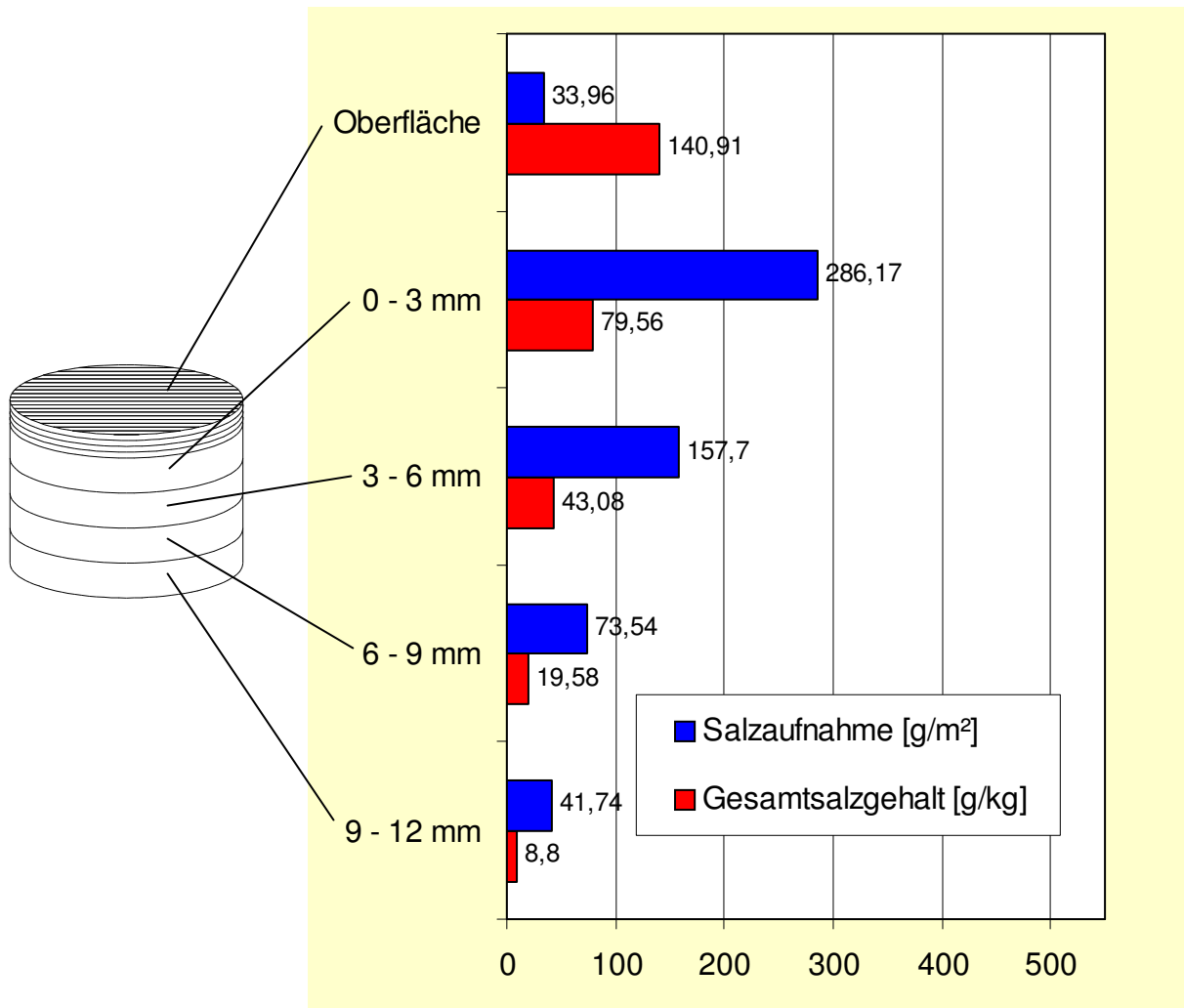


Diagramm 3.16 Salzverteilung Lutherhalle Ost Splintholz

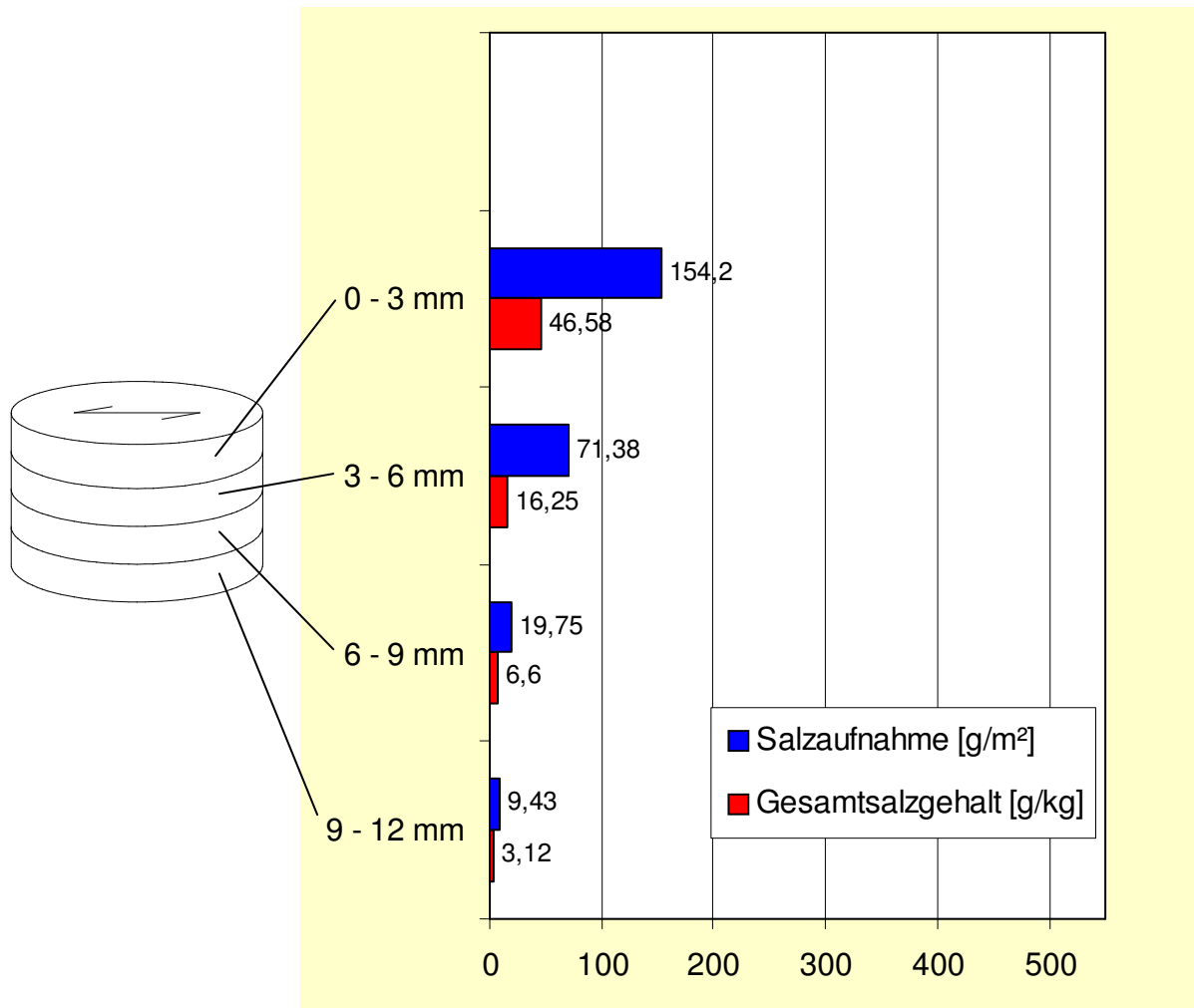


Diagramm 3.17 Salzverteilung Lutherhalle Ost Referenzprobe

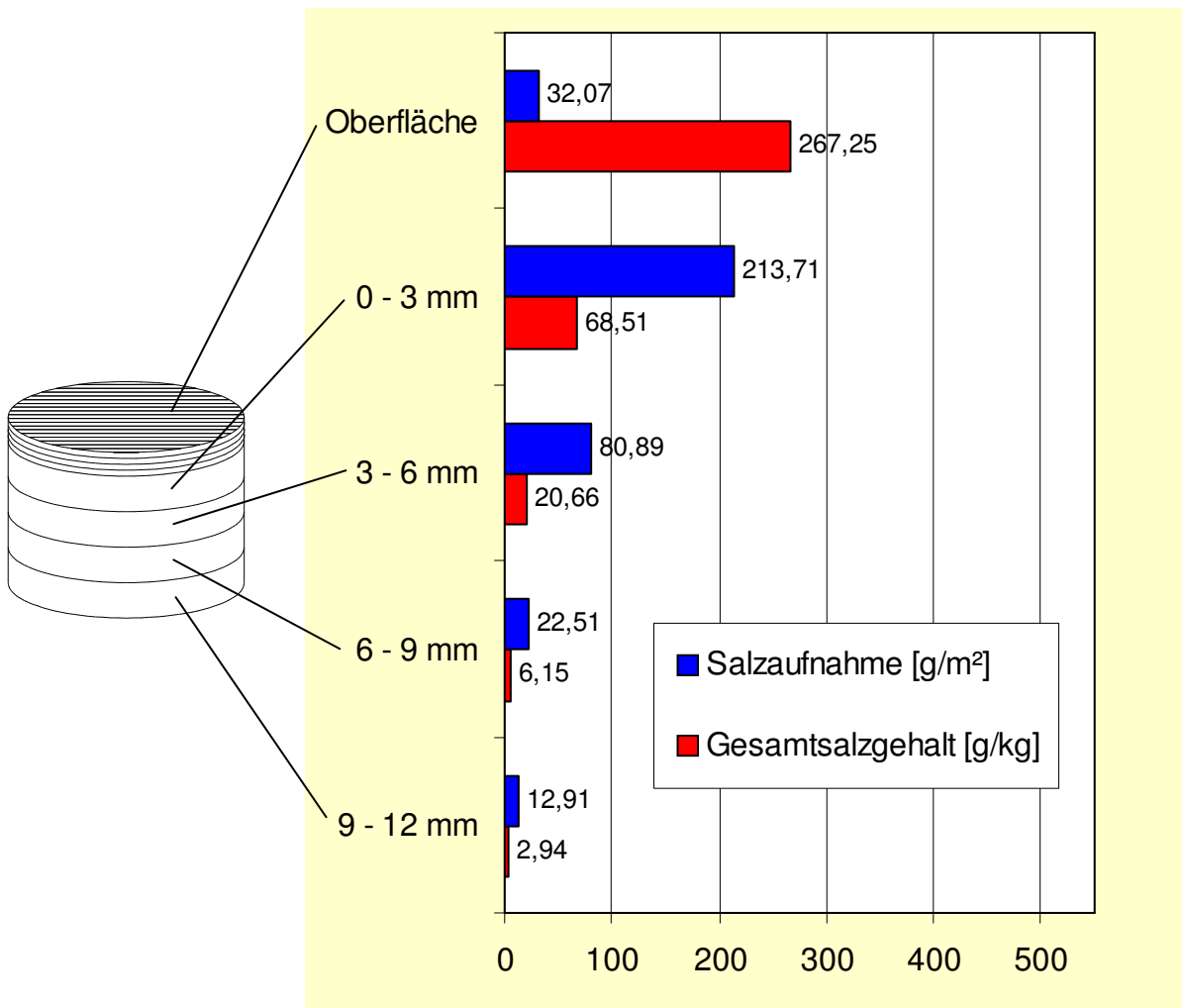


Diagramm 3.18 Salzverteilung Lutherhalle West Kernholz

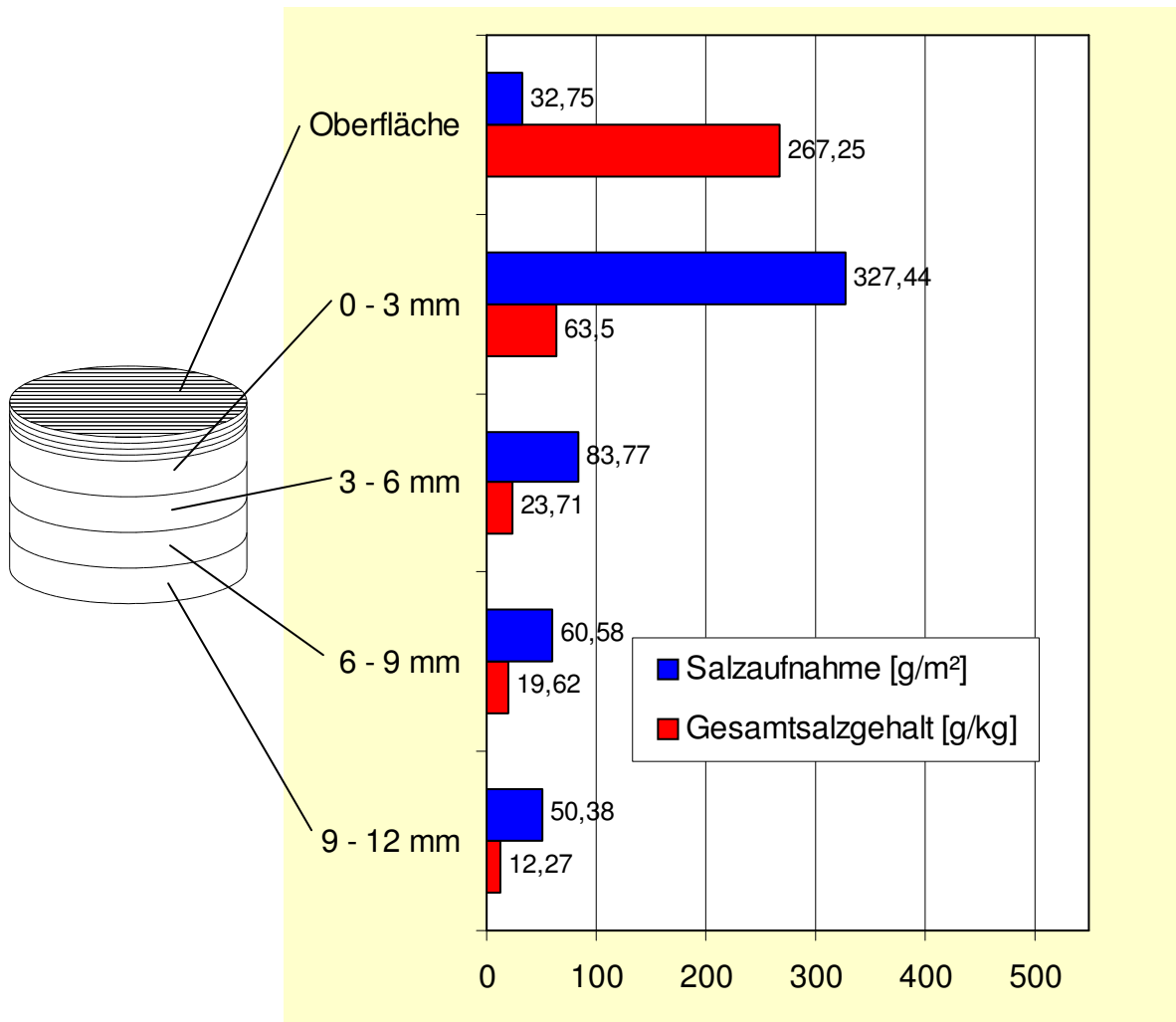


Diagramm 3.19 Salzverteilung Lutherhalle West Splintholz

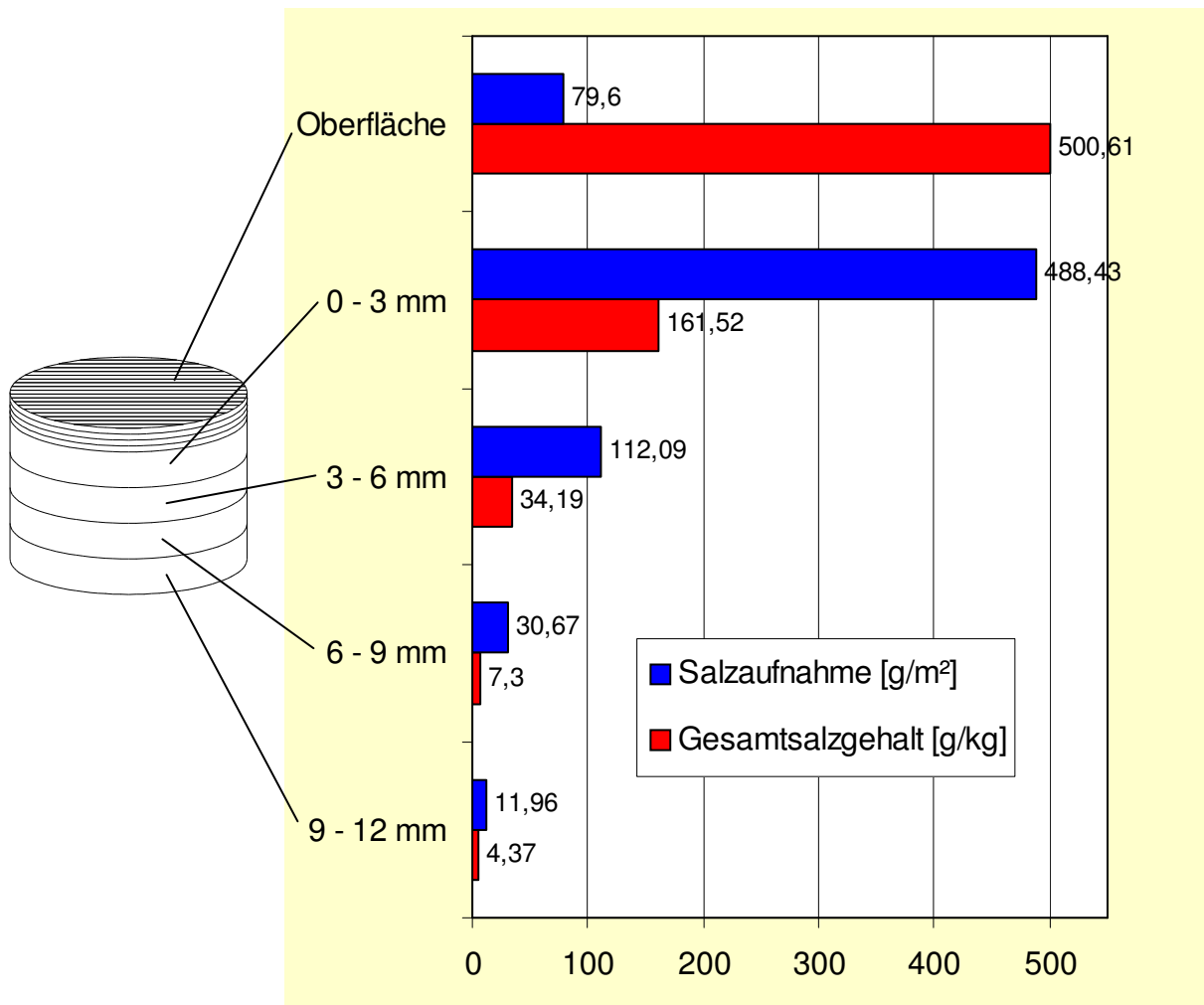


Diagramm 3.20 Salzverteilung Stadthalle Zerst Süd

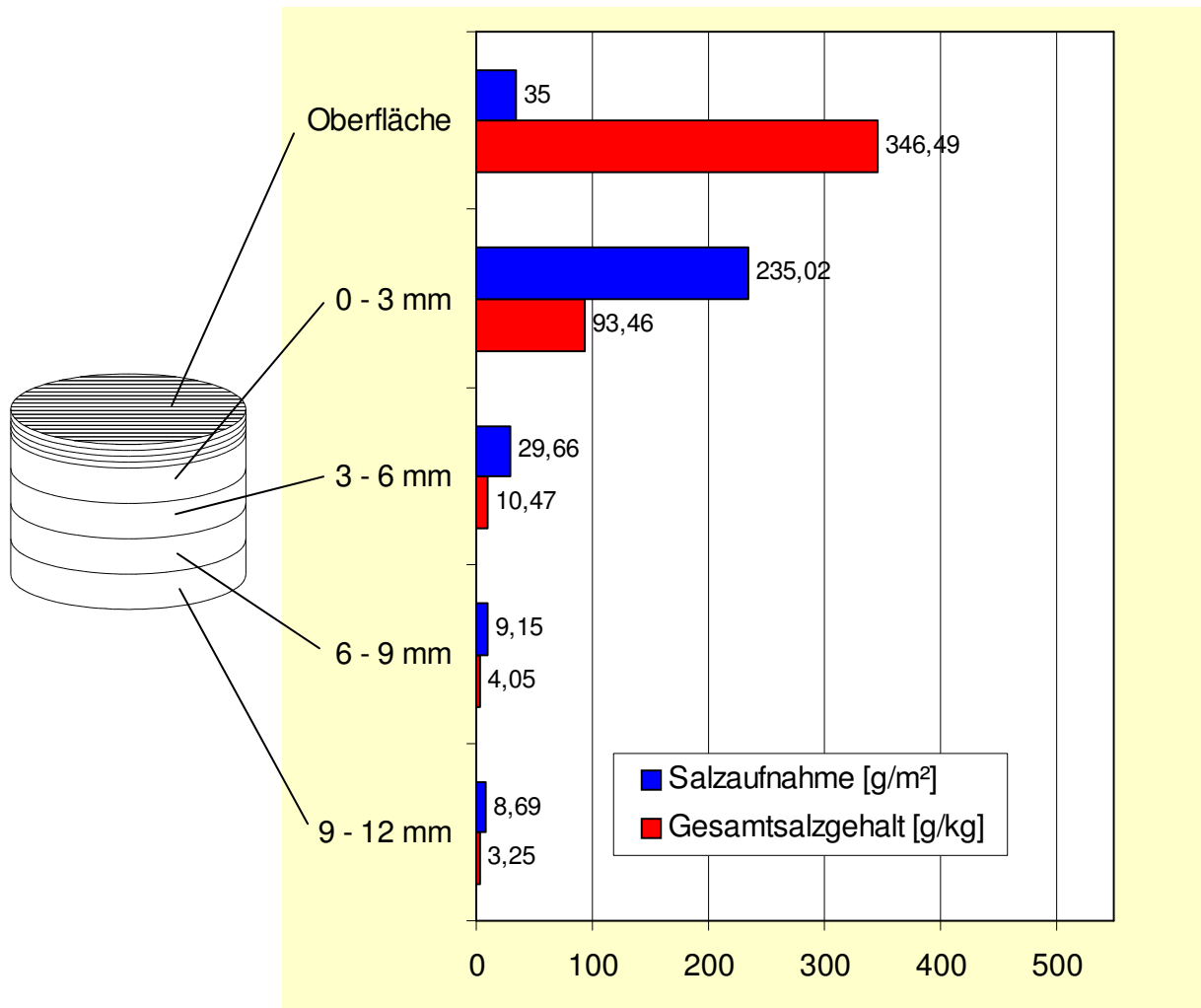


Diagramm 3.21 Salzverteilung Stadthalle Zerbst West

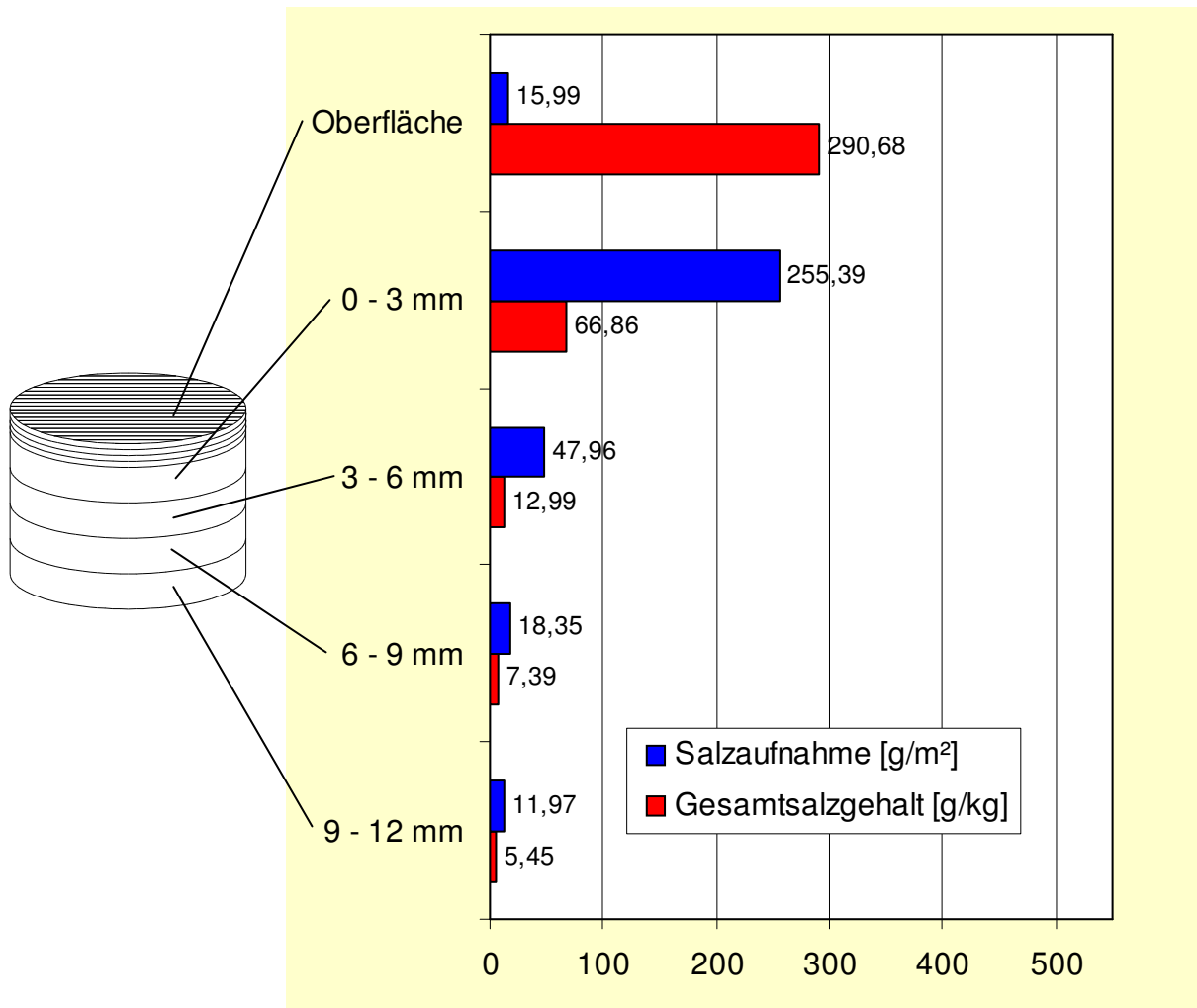


Diagramm 3.22 Salzverteilung Stadthalle Zerst Nord

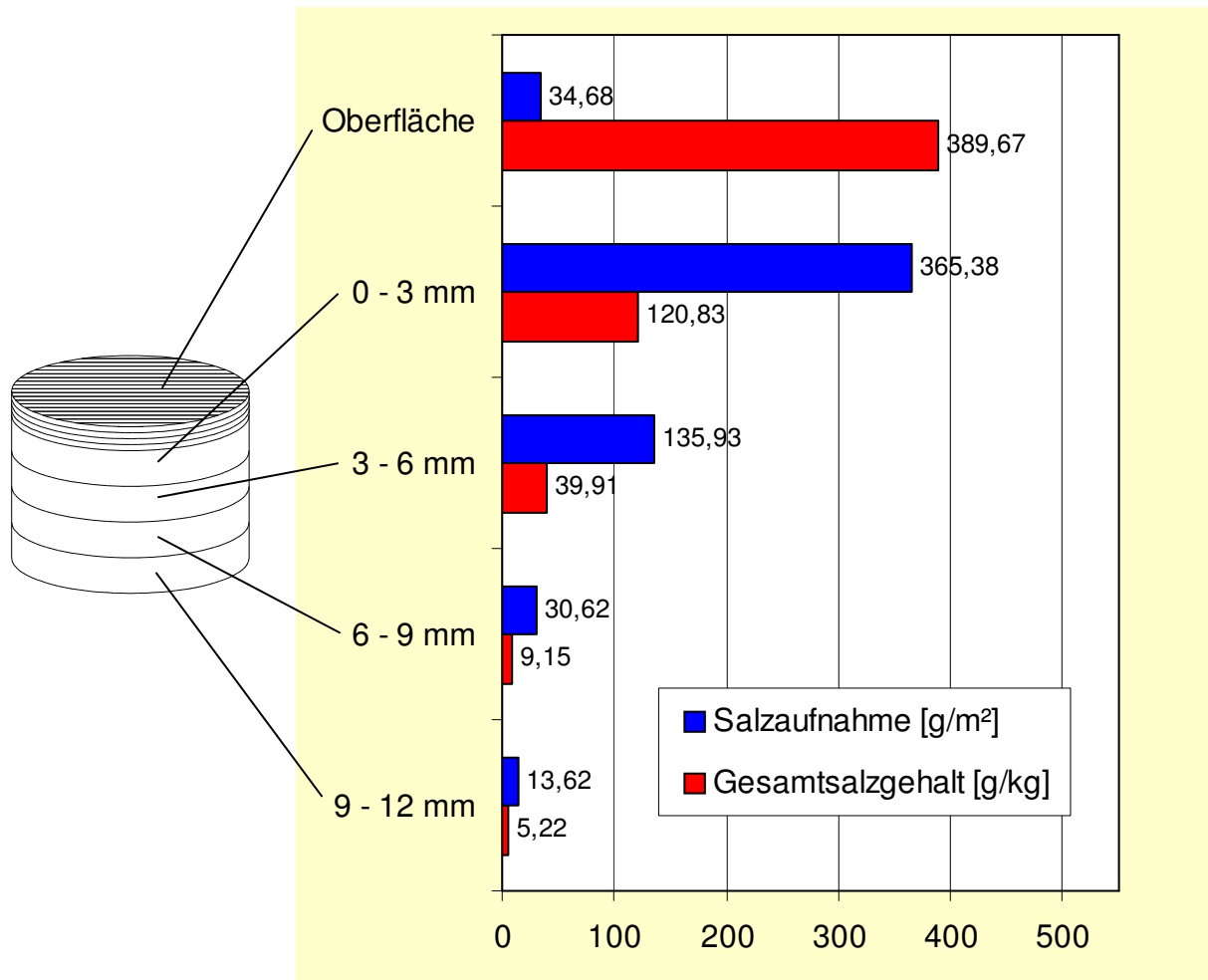


Diagramm 3.23 Salzverteilung Stadthalle Zerbst Ost

Wenn diese beiden Parameter nun verglichen werden, kommt zum Ausdruck, dass sich in der oberflächennahen zerfaserten Schicht zwar die größten Stoffmengenkonzentrationen befinden – teilweise bis 50 % Salz auf die gesamte Stoffmenge bezogen (Probe der Stadthalle Zerbst Süd Oberfläche - SZ S O), die größte Salzmenge ist aber prozentual unter der zerfaserten Oberfläche vorhanden.

Das sind 89 % der Gesamtsalzmenge bei SZ S.

Bei den anderen Proben ist ein ähnlicher Trend festzustellen.

Das bedeutet, dass es keinen Sinn ergibt, bei einer Beprobung nur die oberflächlich zerfaserte und stark mit Salz angereicherte Schicht zu entfernen, chemisch zu analysieren und aus diesen „Erkenntnissen“ eventuell sogar Sanierungsmaßnahmen ableiten zu wollen.

Der größte Teil der im Holz vorhandenen Salze befindet sich nämlich unter der Oberfläche und wird somit nicht erfasst.

3.2.4.2 Sorptionsverhalten

Nach der Behandlung mit einem Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmittel stellt sich mittelfristig in Abhängigkeit der umgebenden Luftfeuchte wieder eine Ausgleichsholzfeuchte ein. Die relative Luftfeuchte ist aber durch zeitliche Schwankungen gekennzeichnet (Tagesgänge und Jahresgänge – Abschnitt 3.2.1.3). D.h., in Abhängigkeit dieser Luftfeuchteschwankungen wird sich auch die Holzfeuchte verändern. Die Abhängigkeit der Holzfeuchte - die ja letztendlich den Holzwassergehalt charakterisiert - von der umgebenden Luftfeuchte wird über die gesamte Bandbreite mittels sog. Sorptions- (Feuchtaufnahme) bzw. Desorptionsisothermen (Feuchteabgabe) dargestellt.

Darrtrockenes Holz nimmt in einer feuchten Umgebung Feuchtigkeit aus der Luft auf. Diese Erscheinung wird Absorption genannt. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und der Kapillarstruktur kommt es bis zum Erreichen des Fasersättigungsbereiches zur Überlagerung der in Tabelle 3.3 dargestellten Vorgänge.

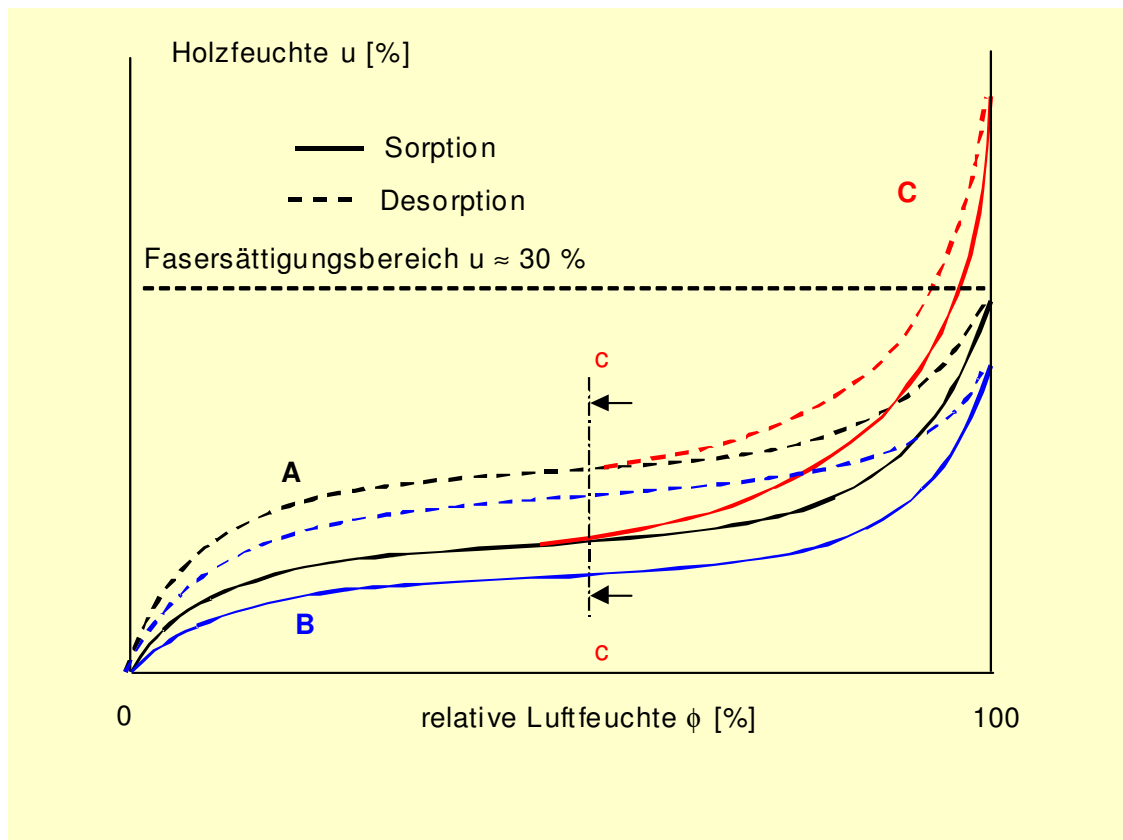


Diagramm 3.24 Sorptions- und Desorptionsisothermen des Holzes, A... Nullprobe, B... bei Abbau hydrophiler Bestandteile, C... bei Salzbeaufschlagung

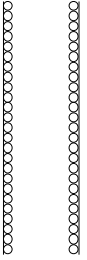
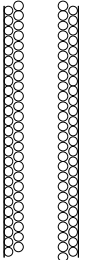
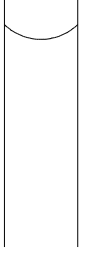
Vorgang / schematische Darstellung an der Kapillare	Rel. Luft- feuchte ϕ [%]	Holzfeuchte u [%]	Beschreibung
Chemisorption 	0 ... 6	≤ 20	Aufgrund freier Nebervalenzen in den amorphen Bereichen des Zellulosegerüsts werden die Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken zwischen benachbarte Zelluloseketten eingelagert. Es kommt zur Ausbildung einer monomolekularen Schicht.
Adsorption 	6 ... 15	≤ 60	Ursache für die Adsorption ist die aufgrund molekularer Anziehungskräfte stattfindende Anlagerung des Wassers in den Kapillaren des Mikrosystems. Es kommt zur Ausbildung einer polymolekularen Wasserschicht mit Flüssigkeitscharakter.
Kapillarkondensation 	> 15	$> 60 \dots 100$	In Kapillaren mit einem Radius $r < 10^{-6}$ m ist der Sättigungsdruck über der Flüssigkeit kleiner als über einer ebenen Flüssigkeitsoberfläche. Daraus folgt, dass ein Teil des Wasserdampfes in diesen Kapillaren eher kondensiert und sich als Flüssigkeit auf der Oberfläche des Zellwandsystems niederschlägt. Je kleiner der Kapillarradius, desto kleiner der Sättigungsdruck über der Flüssigkeit, (Gleichung 3.6).

Tabelle 3.3 Phasen der Sorption, nach [Niemz 1993]

Nach Thomsen gilt:

$$p_r = p_e \cdot \exp\left(-\frac{2\sigma\rho_D \cdot \cos\gamma}{p_e \cdot \rho_{Fl} \cdot r}\right) \quad (3.6)$$

- p_r Sättigungsdruck über engen Kapillaren in Pa
 p_e Sättigungsdruck über ebenen Flüssigkeitsoberflächen in Pa
 ρ_D Dampfdichte in kg/m³
 ρ_{Fl} Flüssigkeitsdichte in kg/m³
 r Kapillarradius in m
 σ Oberflächenspannung der Flüssigkeit in N/m
 γ Randwinkel zwischen Flüssigkeit und Feststoff in °

Die Verschiebung der Isothermen im Gegensatz zu nicht behandelten Hölzern wird vorerst qualitativ diskutiert, (Diagramm 3.24):

Kurve A: Sorption und Desorption einer nicht exponierten Holzprobe

Kurve B: a)

Unter der Voraussetzung, dass durch die Einwirkung von Chemikalien ein Abbau stark hydrophiler Bestandteile wie Hemizellulose bzw. amorpher Bereiche der Zellulose stattfindet, wird eine Verschiebung der Isothermen nach unten erfolgen.

b)

Wird die Holzfeuchte u auf die Masse des Holzes und des eingelagerten Salzes bezogen, muss folgende Gleichung in Ansatz gebracht werden:

$$u = \frac{(m_u + m_{\text{Salz}}) - (m_{\text{dtr}} + m_{\text{Salz}})}{(m_{\text{dtr}} + m_{\text{Salz}})} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Dies ergibt:

$$u = \frac{(m_u - m_{dtr})}{(m_{dtr} + m_{Salz})} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

u	Holzfeuchte in %
m_u	Masse der feuchten Probe in g
m_{dtr}	Masse der darrtrockenen Probe in g
m_{Salz}	Salzmasse in g

Rechnerisch würden also bei signifikanten Salzgehalten im Holz kleinere Holzfeuchtwerte ermittelt werden.

Kurve C: Ab dem Schnitt **c-c** kommt es zum Überschreiten einer ersten¹⁾ kritischen Feuchte bei Sorption. Nun lagern neben den hydrophilen Bestandteilen des Holzes die Salze ebenfalls Wasser aus der Luft an, was zu einer zusätzlichen Durchfeuchtung führt. Die Sorptionslinien verschieben sich nach oben.

1) es ist davon auszugehen, dass mehrere Salze aus der Lösung auskristallisiert sind

Diese genannten Vorgänge überlagern sich.

Auswertung der Sorptionsisothermen:

Vorerst ist anzumerken, dass mittels der berechneten Sorptionsisothermen nur auf den Zustand einer aus dem Holzverband herausgelösten Einzelprobe geschlossen werden kann. Inwieweit die Sorptionsisothermen von tiefer liegenden Schichten (z.B. 3-6 oder 6-9 mm) durch die oben aufliegende zerfaserte, stark versalzene Schicht beeinflusst werden, wird vorerst nicht erörtert.

Insgesamt kann eine signifikante Abhängigkeit zwischen Gesamtsalzgehalt einer Probe und dem Ansteigen der Sorptions- und Desorptionslinie ab einem bestimmten Luftfeuchtebereich konstatiert werden. Im Diagramm 3.25 wurden die Holzfeuchtewerte u aller gewonnenen Proben bei $\phi = 90\%$ in Abhängigkeit des Gesamtsalzgehaltes S aufgetragen. Eine lineare Regression der Streuwerte gehorcht bis zum Gesamtsalzgehalt von ca. 150 g/kg der Gleichung:

$$u = 0,088 S + 23,73 \quad (3.9)$$

u Holzfeuchte in %

S Gesamtsalzgehalt in g/kg

Oberhalb dieses Gesamtsalzgehaltes streuen die Werte zu stark. Dabei entspricht der Holzfeuchtegehalt bei geringer Versalzung dem des unbehandelten und unbeeinflussten Nadelholzes bei $\phi = 90\%$, nämlich $u \approx 20$ bis 25 %. Die hohe Streuung bei höherem Salzgehalt liegt einerseits an der unterschiedlichen Zusammensetzung der Salze und am unterschiedlichen pH – Wert sowie andererseits an den Eigenschaften des Holzes (Splint- o. Kernholz, Dichte usw.).

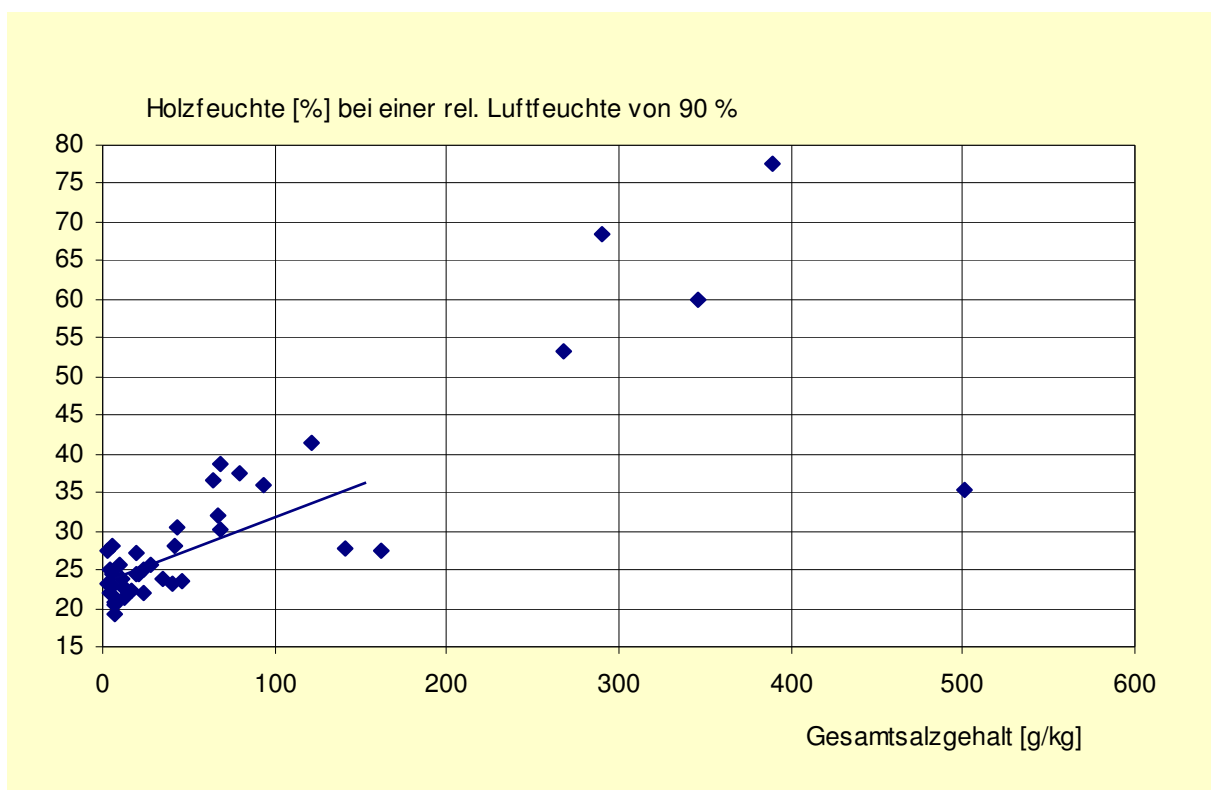


Diagramm 3.25 Abhängigkeit der Holzfeuchte vom Gesamtsalzgehalt

Die Sorptionsisothermen werden nun im Einzelnen analysiert.

Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg – Ostflügel, (Diagramme 3.26 bis 3.28):

Hier ist auffällig, dass bei den Proben LH 0-3 KH und LH 0-3 SH das stärkste Ansteigen der Linien in den oberen Luftfeuchtebereichen zu beobachten ist. In den oberflächennahen mazerierten Schichten (Probe LH O) wurde wahrscheinlich durch das Säubern ein Teil der hygroskopisch wirkenden Salze entfernt, so dass dessen Holzfeuchtemaximalwert unterhalb denen von LH 0-3 KH und LH 0-3 SH liegt. Der verstärkte Anstieg der Linien beginnt ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 70 %. Bei LH 3-6, 6-9 und 9-12 sowohl bei der Kernholz- als auch bei der Splintholzprobe ist ein deutlicher Gradient in die Tiefe festzustellen, d.h. die Holzfeuchte nimmt in den oberen Luftfeuchtebereichen weiter ab und erreicht in einer Tiefe von 9-12 mm die Werte eines vergleichbaren unbeeinflussten Holzes. Bei der Referenzprobe ist dieser ausgeprägte Gradient nicht zu beobachten, lediglich die Zone 0-3 mm hat etwas höhere Holzfeuchtemaximalwerte aufzuweisen.

Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg – Westflügel, (Diagramme 3.29 und 3.30):

Hier werden in der oberflächennahen Schicht (Probe LH O) die Maximalwerte erreicht. Sie liegen wesentlich über denen des Ostflügels. Durch das Aufbringen des Sanierungsmittels „Korasit LH“ wurden zusätzlich Salze in die Oberfläche eingetragen. Ansonsten ist auch der Gradient in die Tiefe zu beobachten. In einer Tiefe von 9-12 mm stellen sich wieder Normalwerte ein.

Dachstuhl der Stadthalle Zerbst, (Diagramme 3.31 bis 3.34):

Sämtliche Beprobungen ergaben in den oberflächennahen Schichten die höchsten Holzfeuchtwerte mit starkem Anstieg ab einer Luftfeuchte von ca. 65 %. Ab einer Tiefe von 3-6 mm bleiben die Werte unverändert auf normalem Niveau.

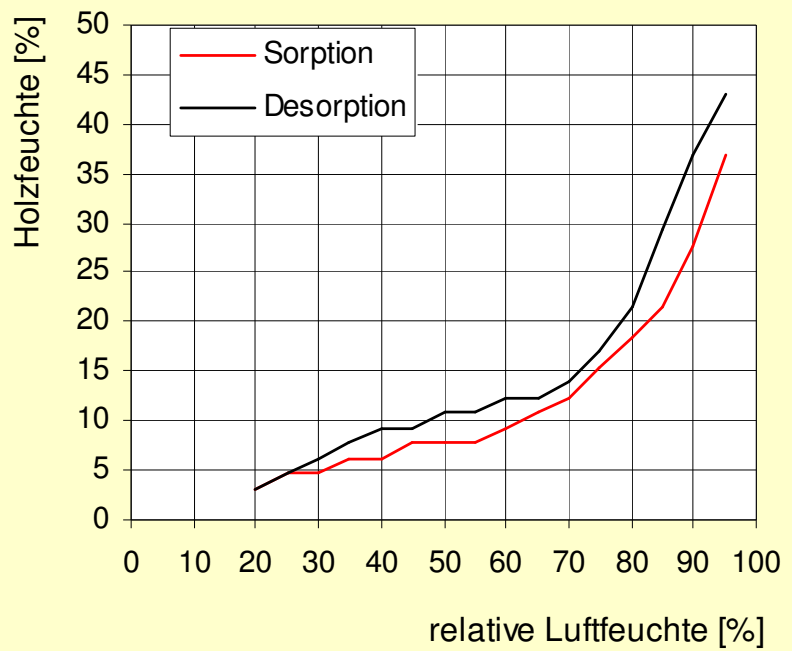
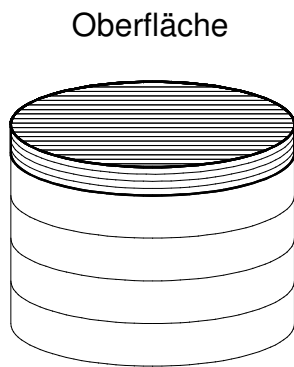


Diagramm 3.26 a Sorptionsisothermen – Probe LH O O

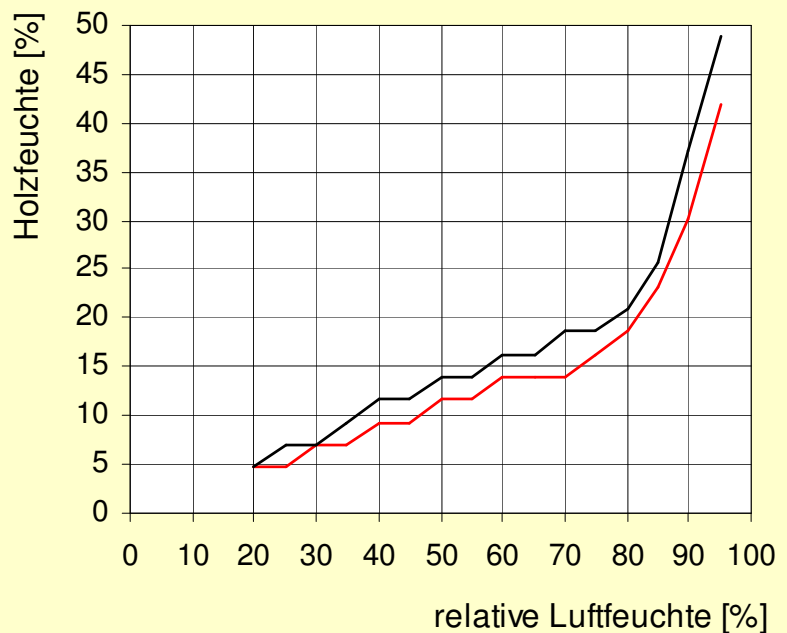
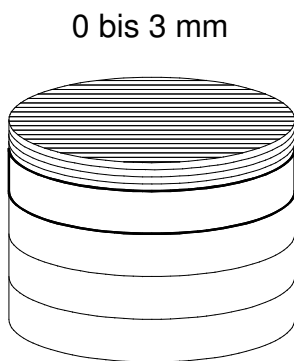


Diagramm 3.26 b Sorptionsisothermen – Probe LH O 0-3 KH

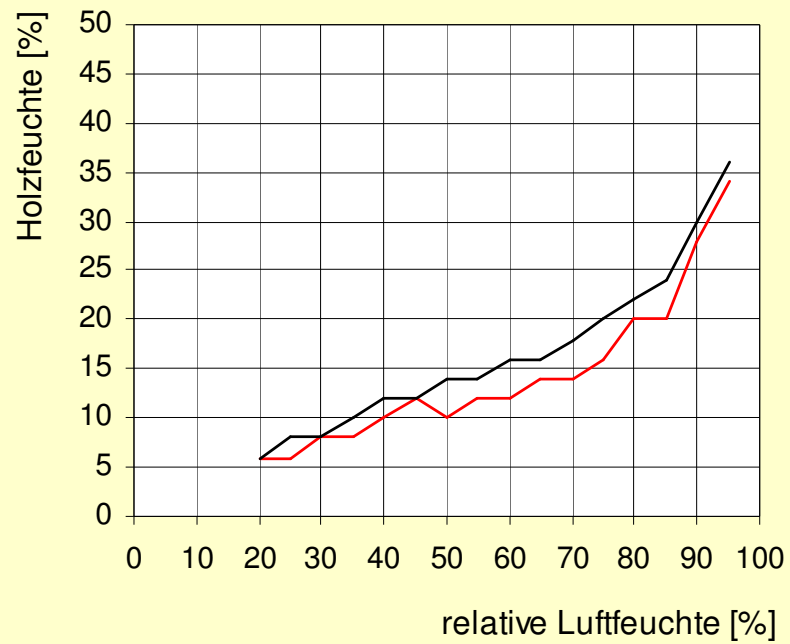
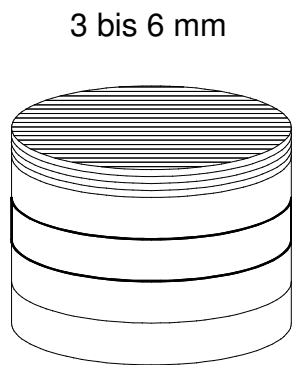


Diagramm 3.26 c Sorptionsisothermen – Probe LH O 3-6 KH

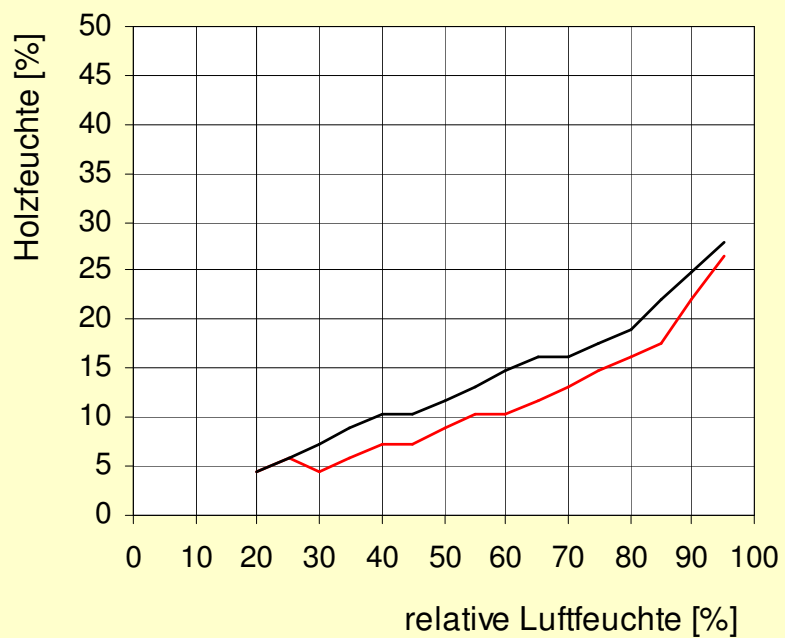
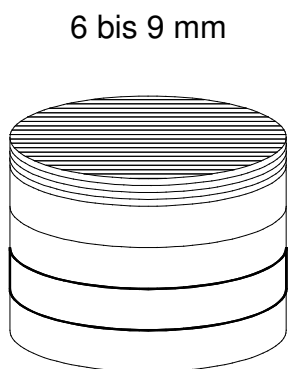


Diagramm 3.26 d Sorptionsisothermen – Probe LH O 6-9 KH

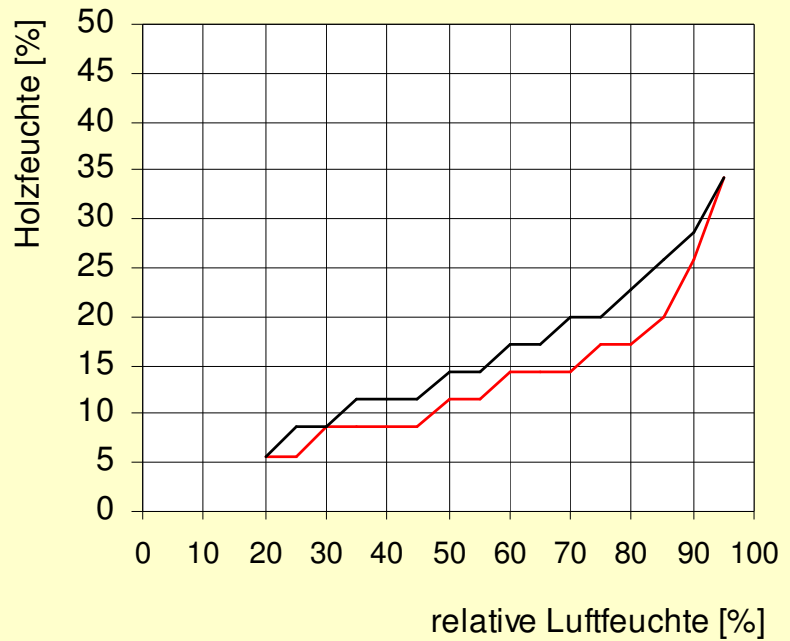
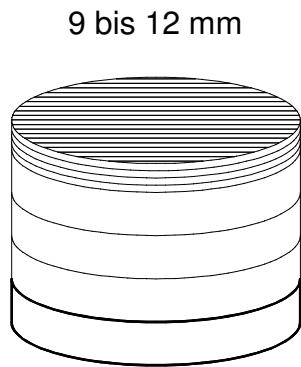


Diagramm 3.26 e Sorptionsisothermen – Probe LH O 9-12 KH

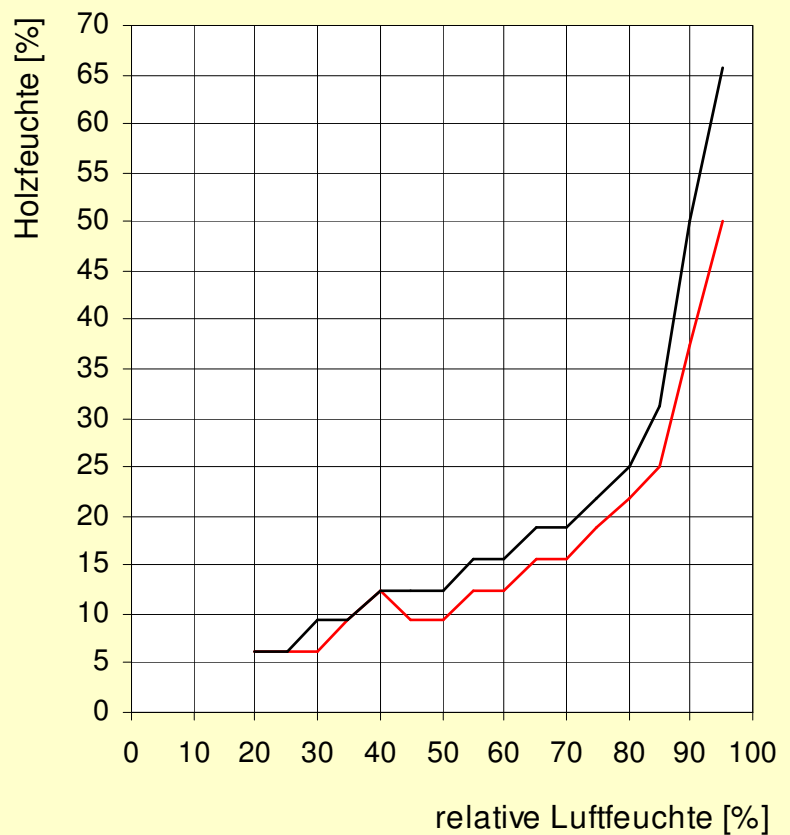
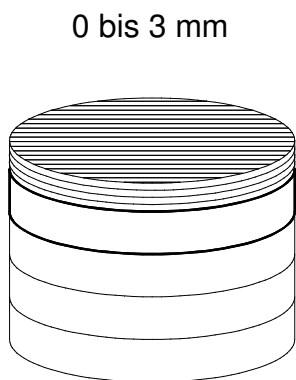


Diagramm 3.27 a Sorptionsisothermen – Probe LH 0-3 SH

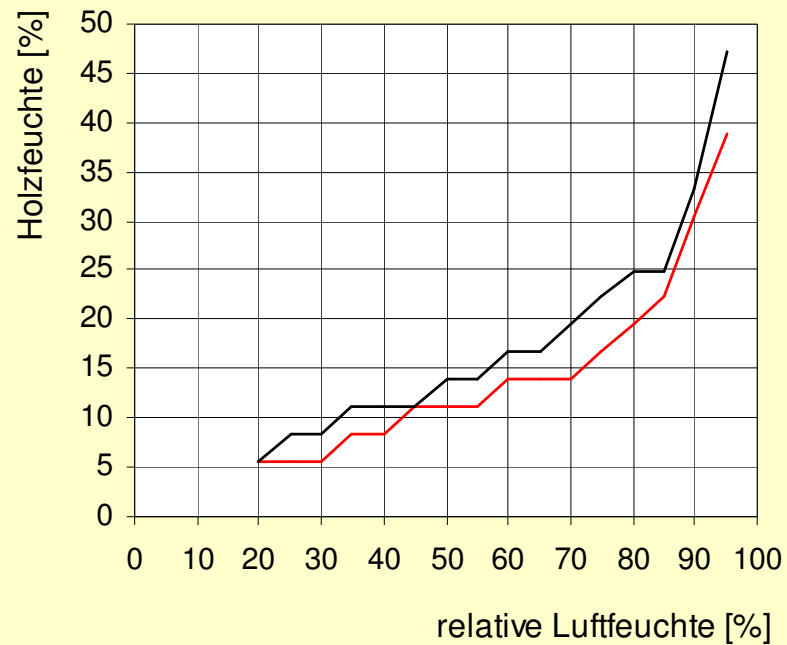
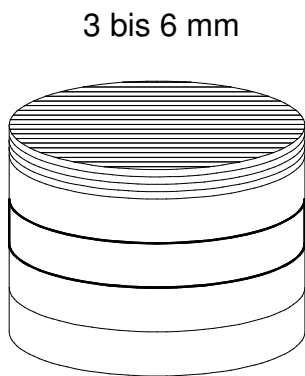


Diagramm 3.27 b Sorptionsisothermen – Probe LH O 3-6 SH

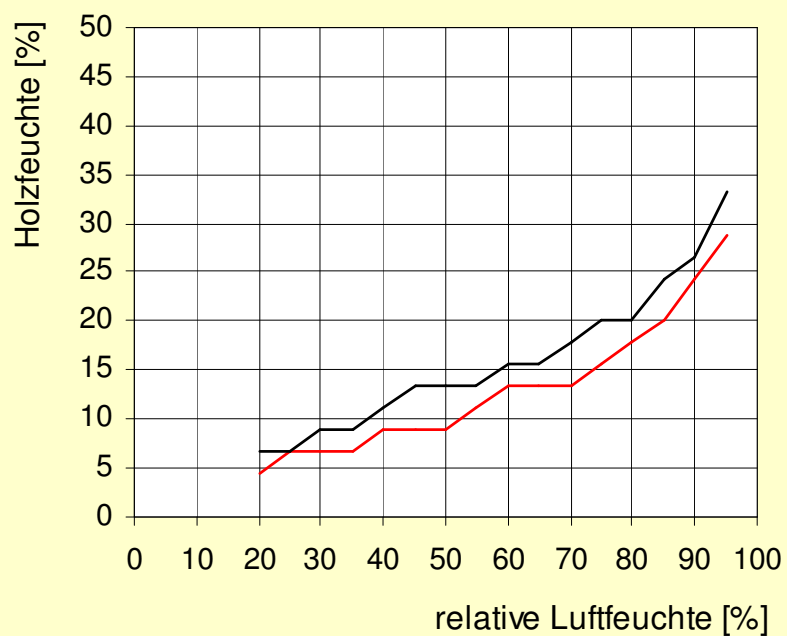
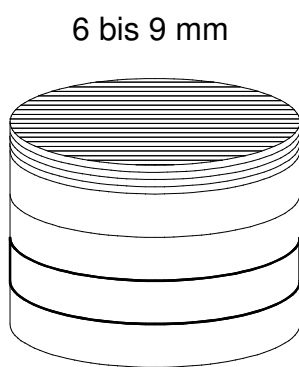


Diagramm 3.27 c Sorptionsisothermen – Probe LH O 6-9 SH

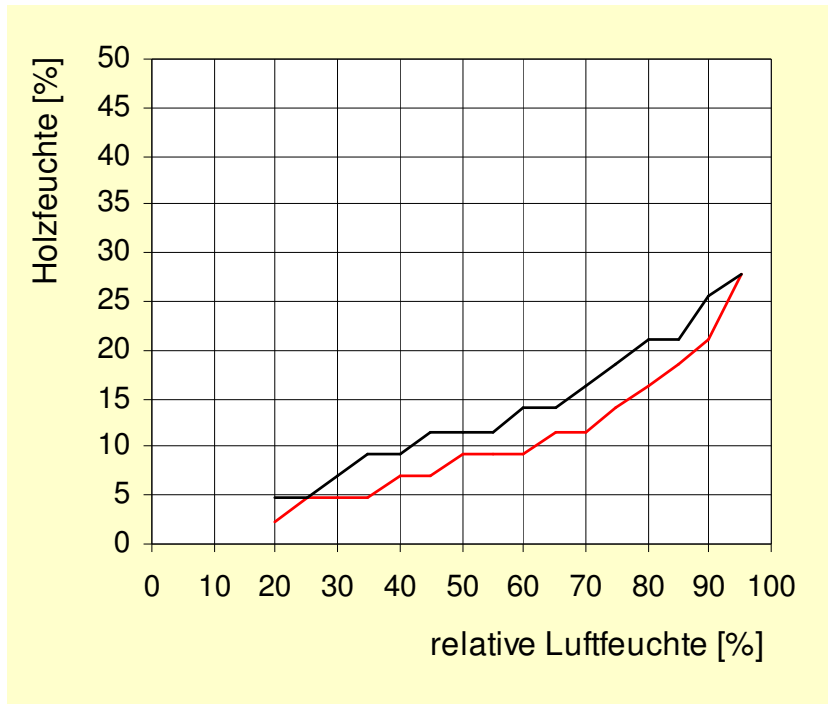
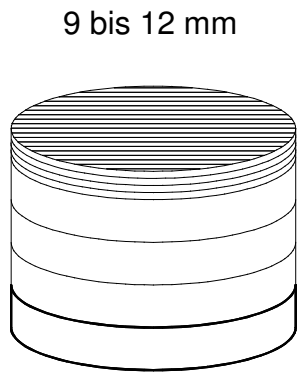


Diagramm 3.27 d Sorptionsisothermen – Probe LH O 9-12 SH

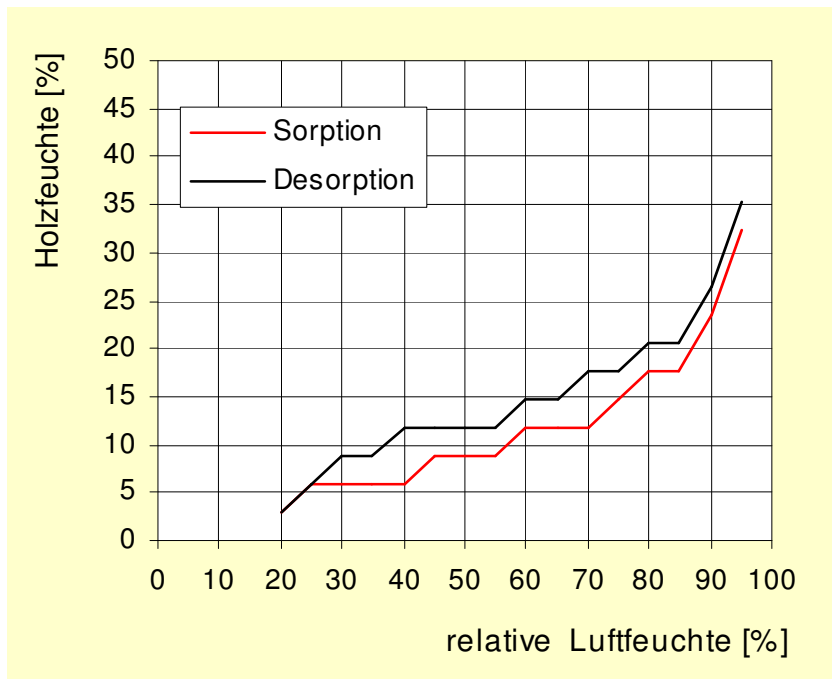
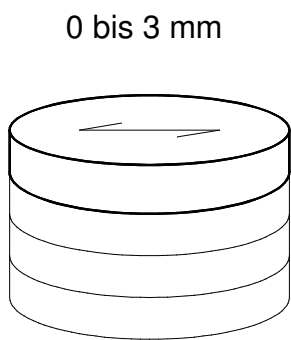


Diagramm 3.28 a Sorptionsisothermen – Probe LH O 0-3 R

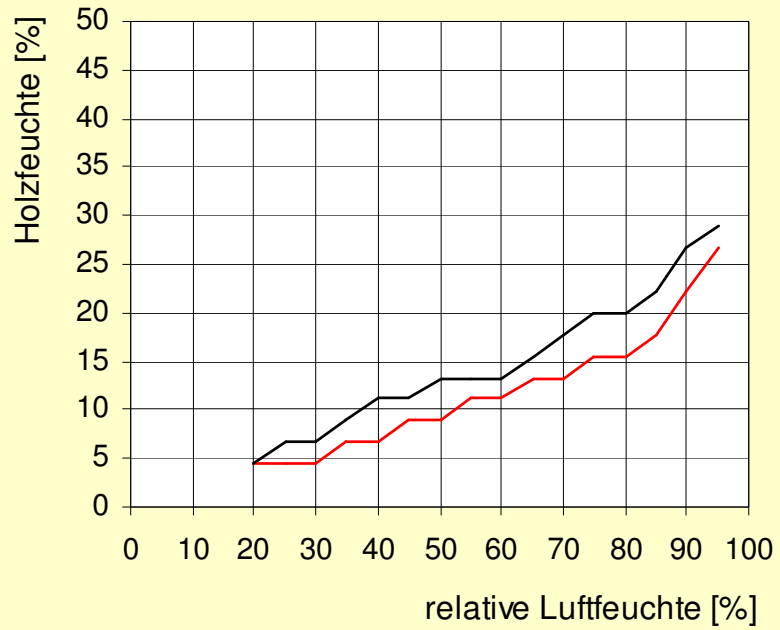
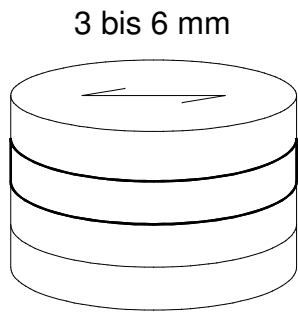


Diagramm 3.28 b Sorptionsisothermen – Probe LH O 3-6 R

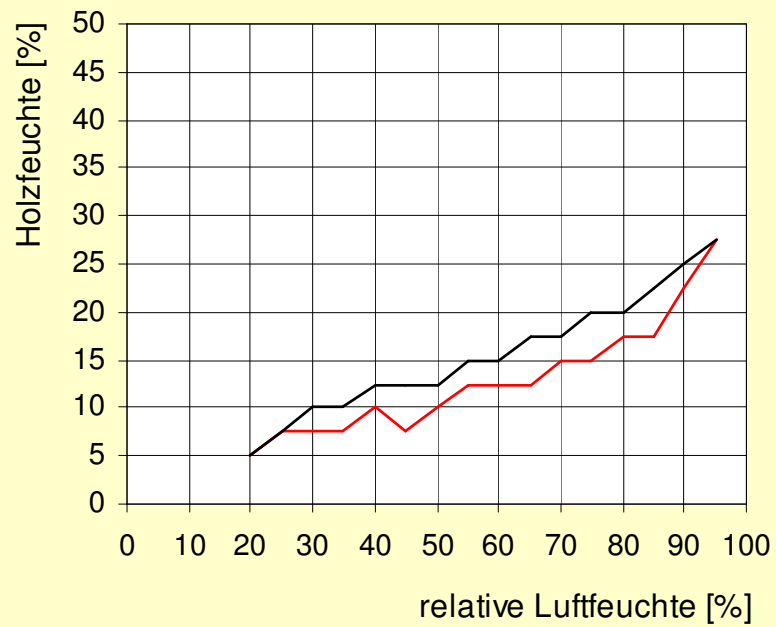
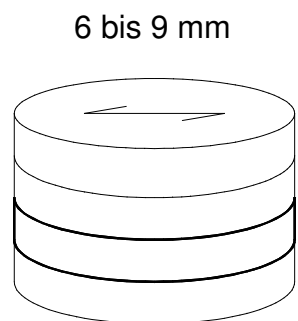


Diagramm 3.28 c Sorptionsisothermen – Probe LH O 6-9 R

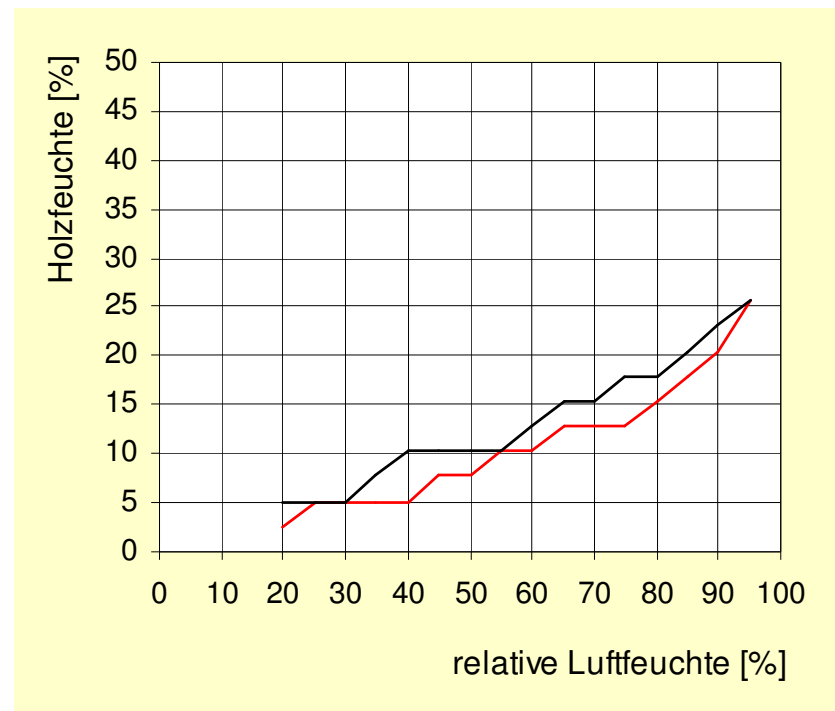
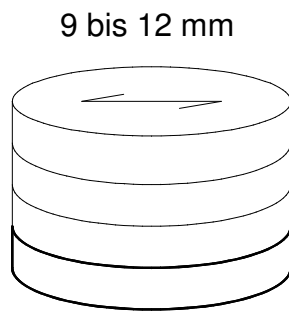


Diagramm 3.28 d Sorptionsisothermen – Probe LH O 9-12 R

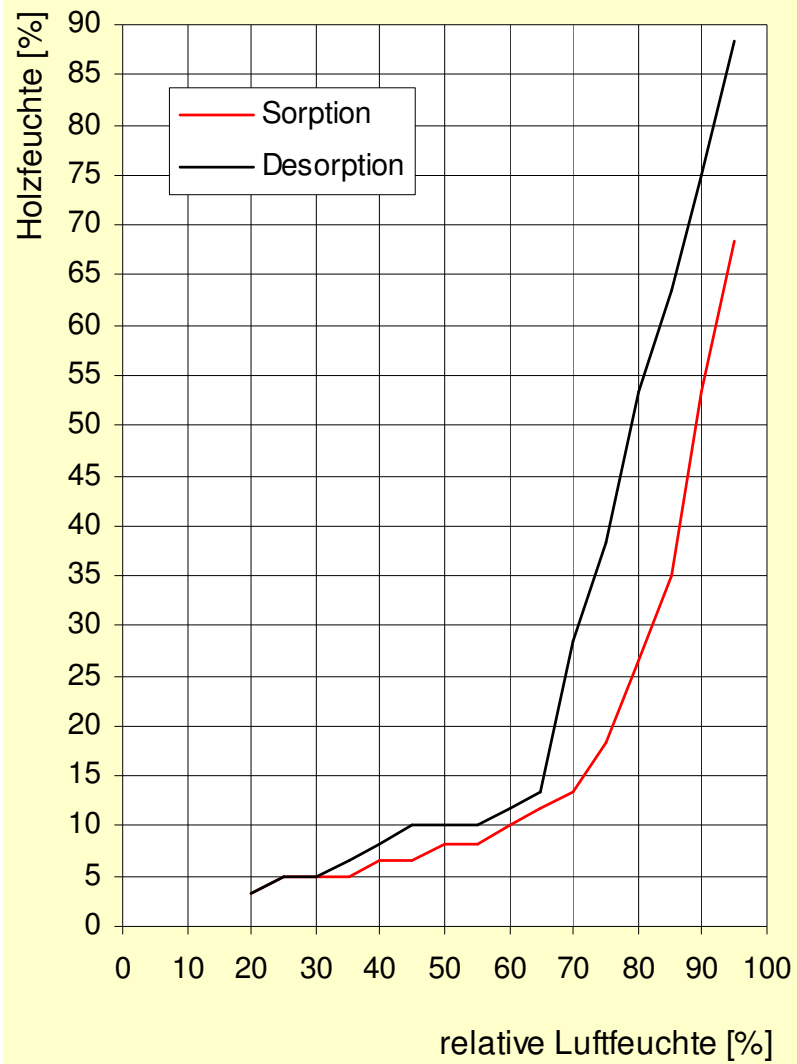
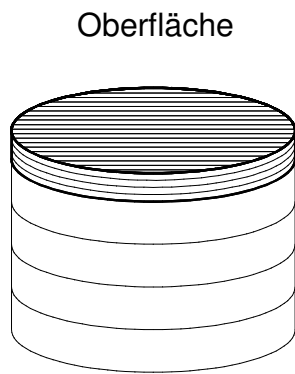


Diagramm 3.29 a Sorptionsisothermen – Probe LH W O

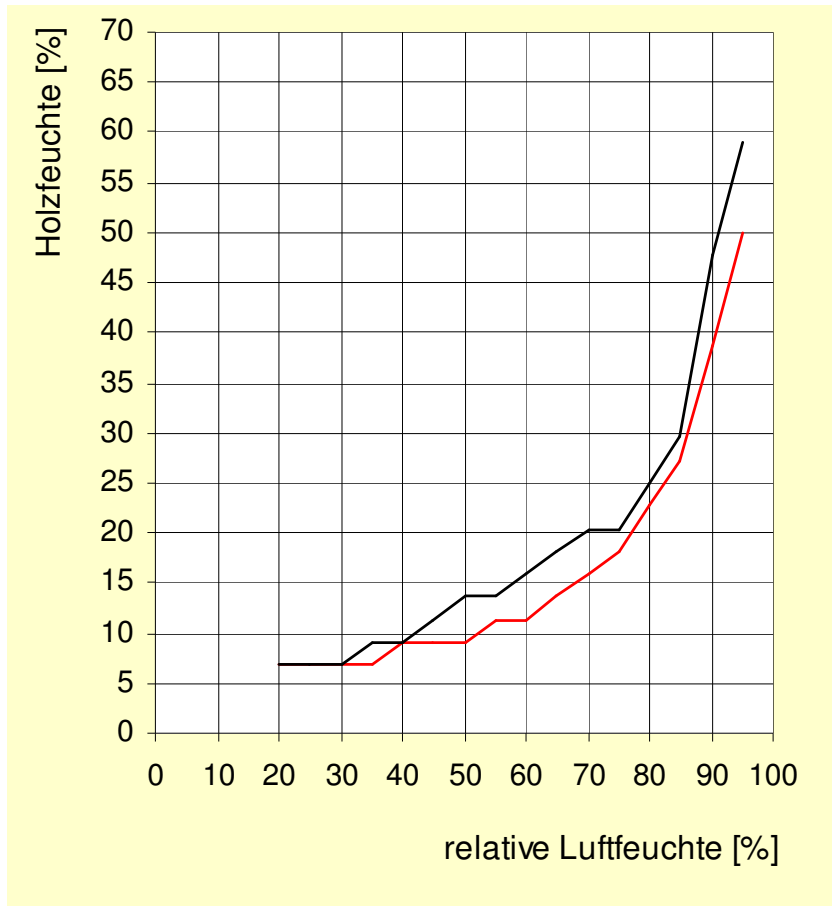
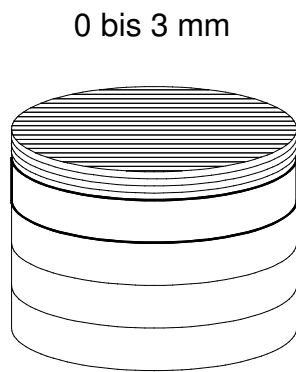


Diagramm 3.29 b Sorptionsisothermen – Probe LH W 0-3 KH

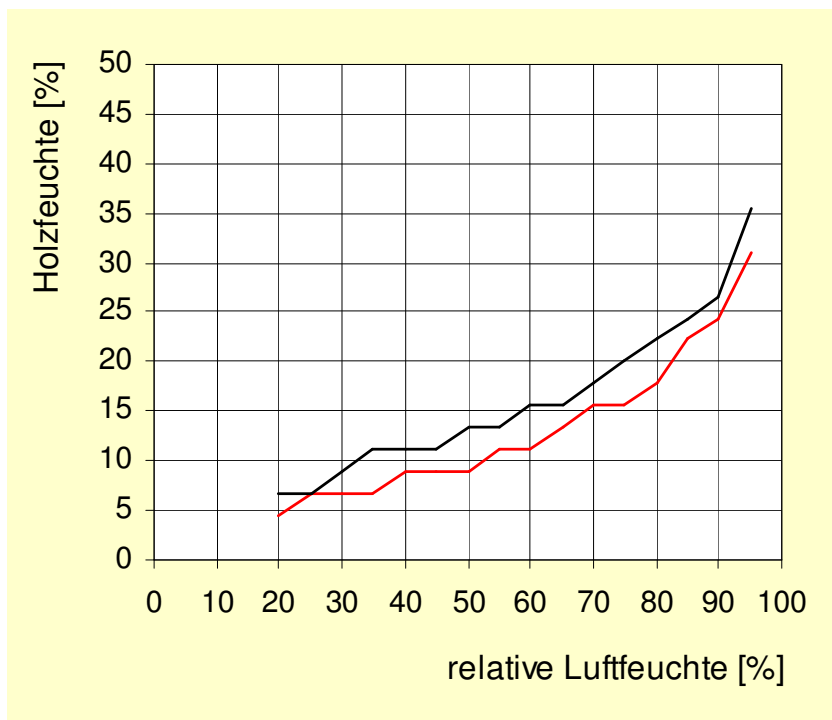
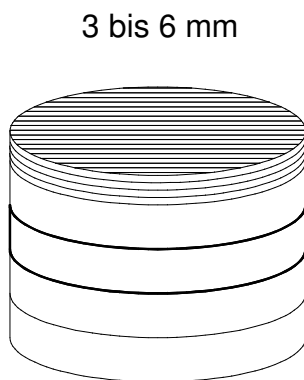


Diagramm 3.29 c Sorptionsisothermen – Probe LH W 3-6 KH

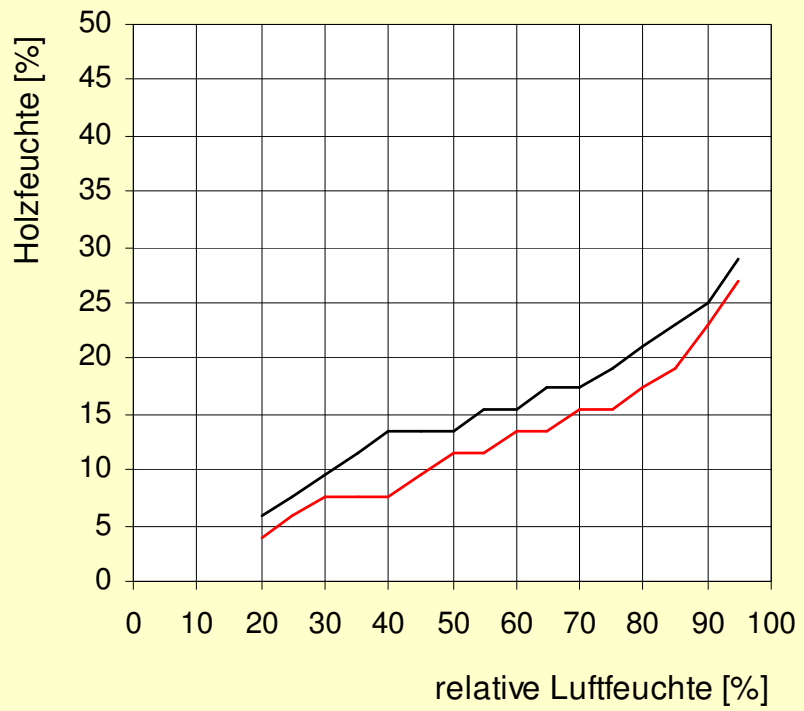
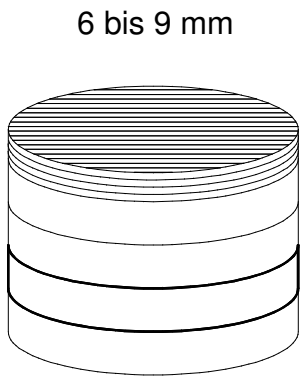


Diagramm 3.29 d Sorptionsisothermen – Probe LH W 6-9 KH

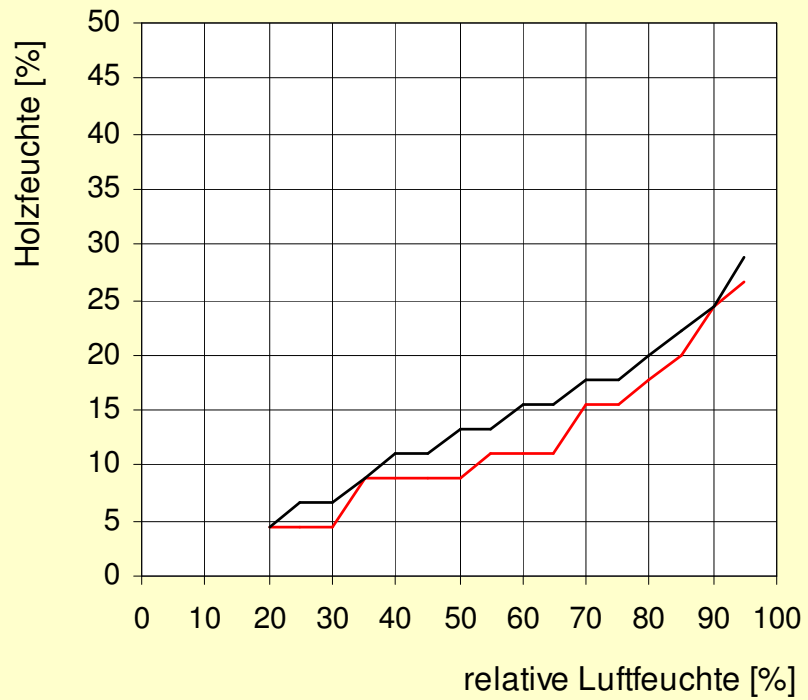
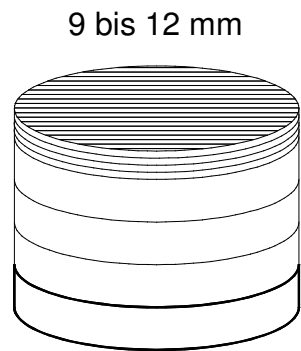


Diagramm 3.29 e Sorptionsisothermen – Probe LH W 9-12 KH

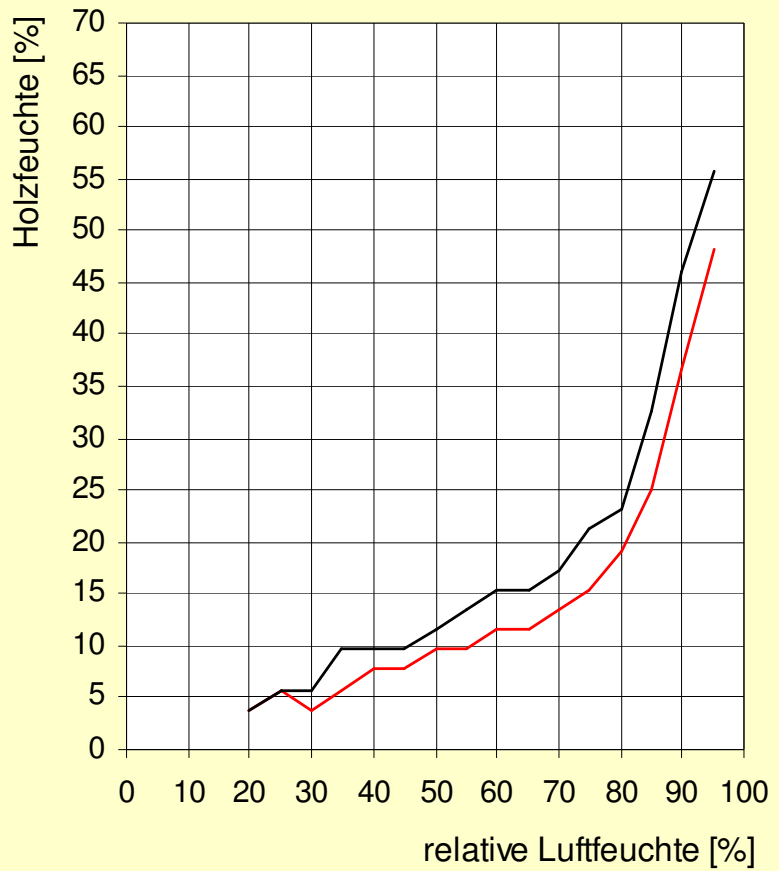
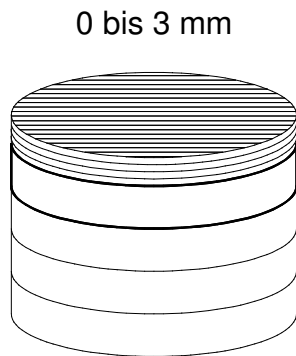


Diagramm 3.30 a Sorptionsisothermen – Probe LH W 0-3 SH

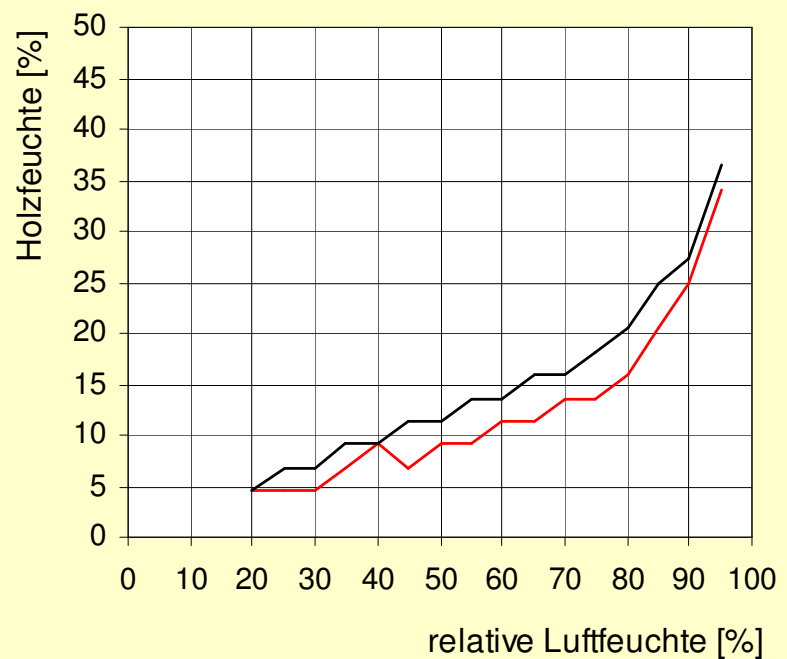
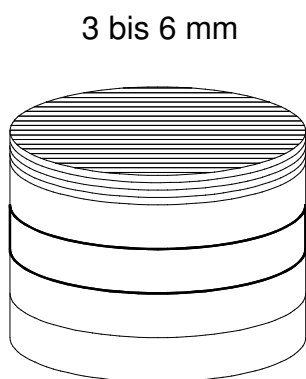


Diagramm 3.30 b Sorptionsisothermen – Probe LH W 3-6 SH

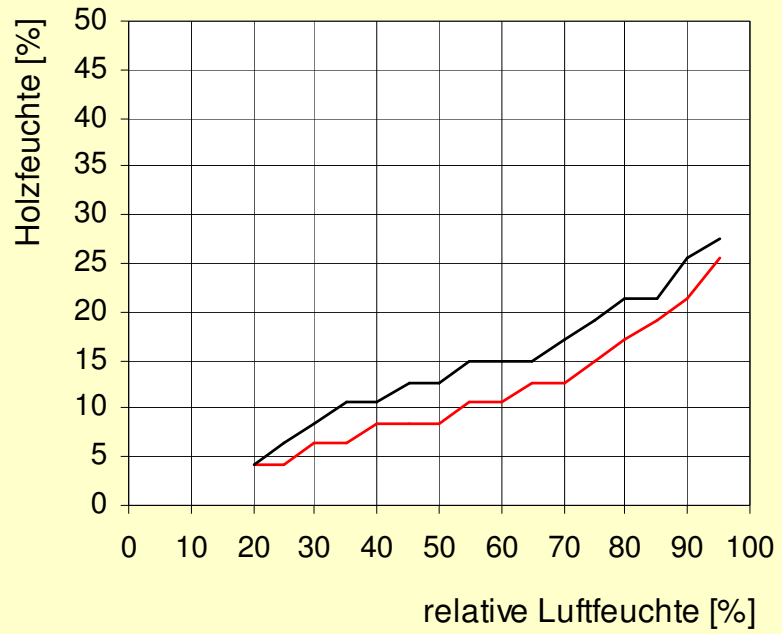
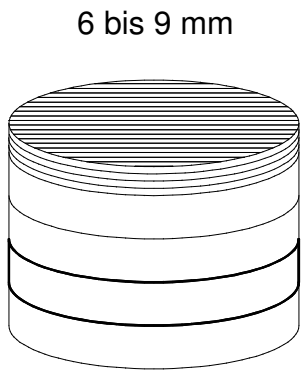


Diagramm 3.30 c Sorptionsisothermen – Probe LH W 6-9 SH

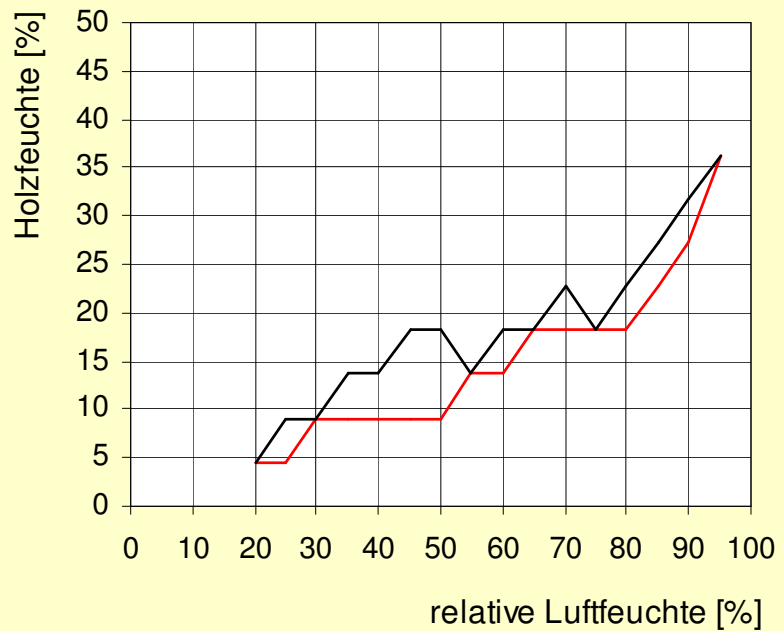
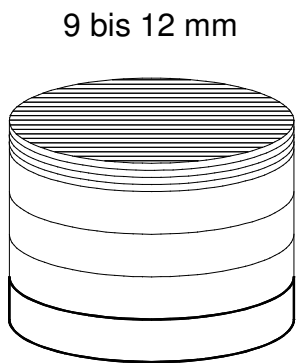


Diagramm 3.30 d Sorptionsisothermen – Probe LH W 9-12 SH

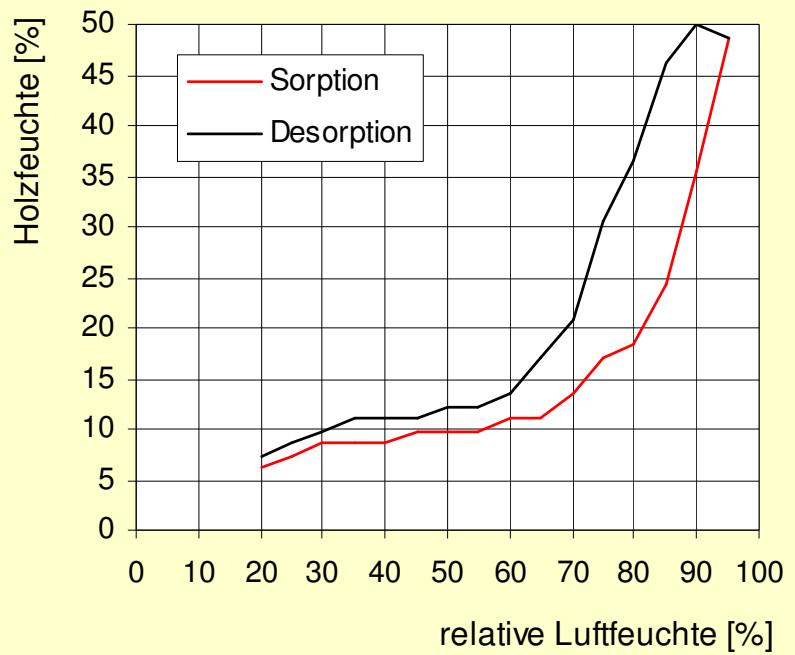
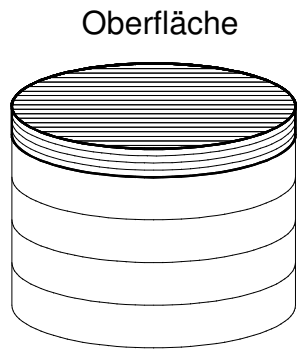


Diagramm 3.31 a Sorptionsisothermen – Probe SZ S O

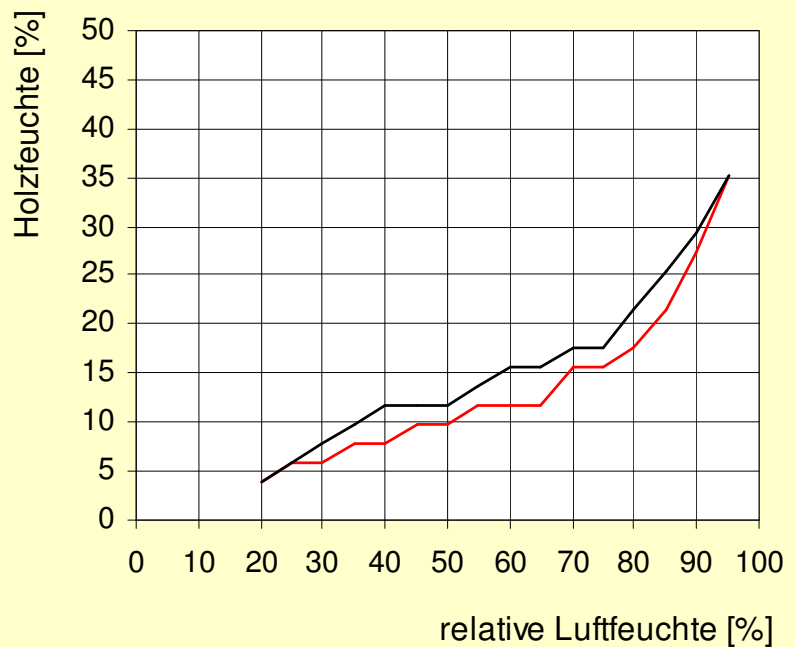
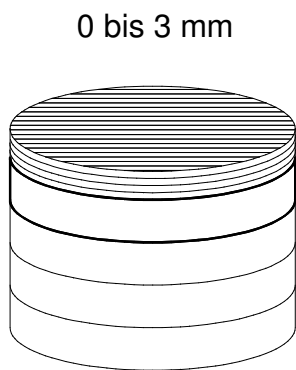


Diagramm 3.31 b Sorptionsisothermen – Probe SZ S 0-3 mm

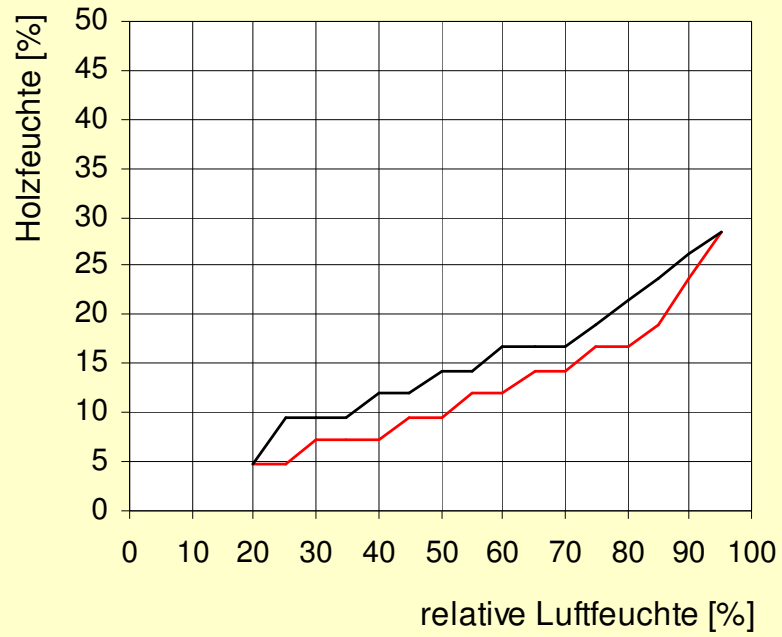
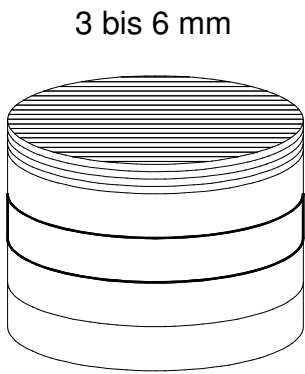


Diagramm 3.31 c Sorptionsisothermen – Probe SZ S 3-6 mm

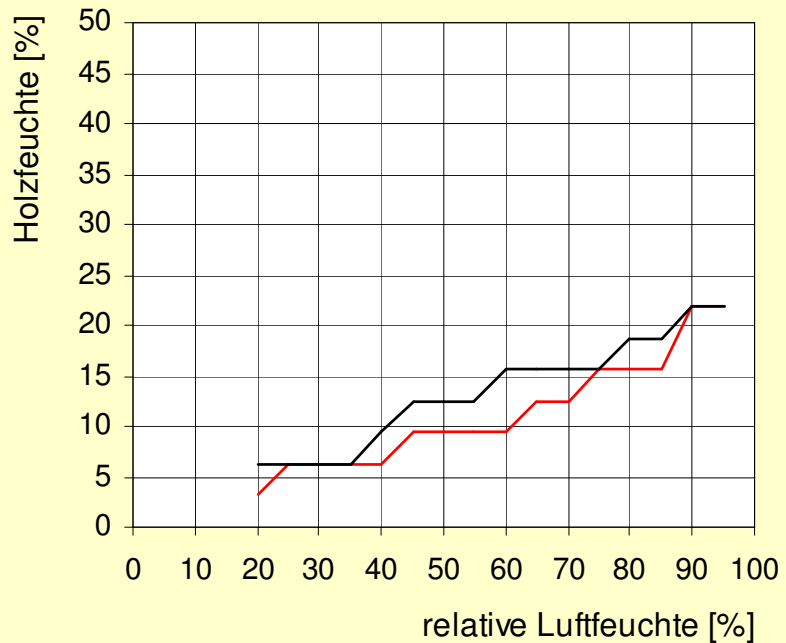
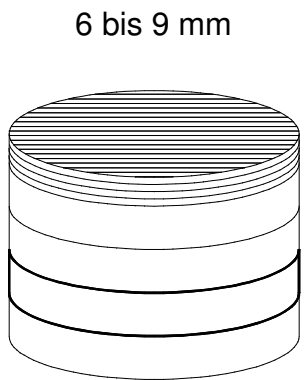


Diagramm 3.31 d Sorptionsisothermen – Probe SZ S 6-9 mm

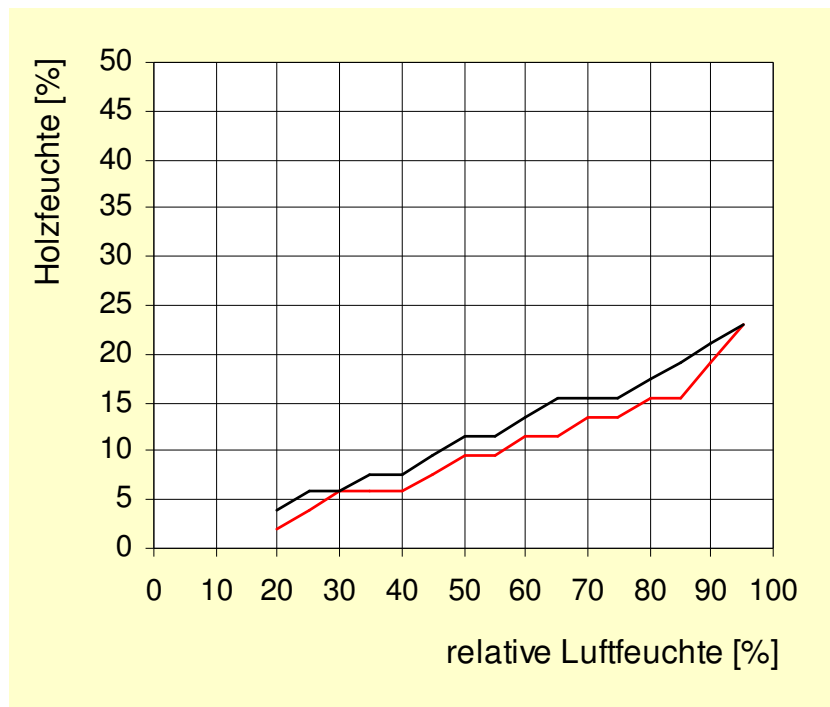
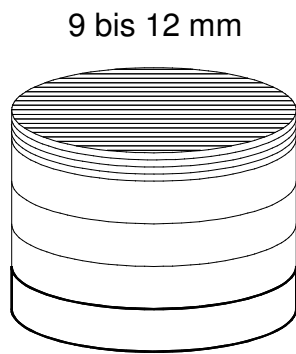


Diagramm 3.31 e Sorptionsisothermen – Probe SZ S 9-12 mm

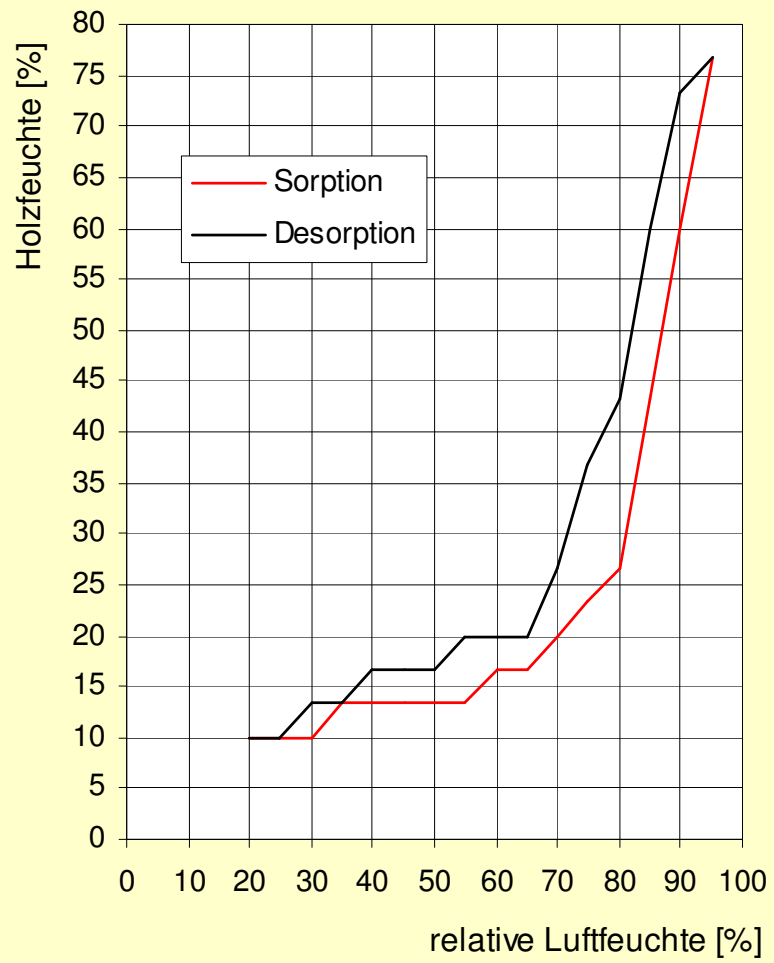
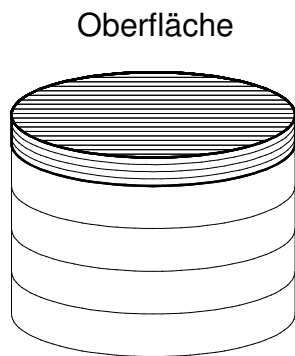


Diagramm 3.32 a Sorptionsisothermen – Probe SZ W O

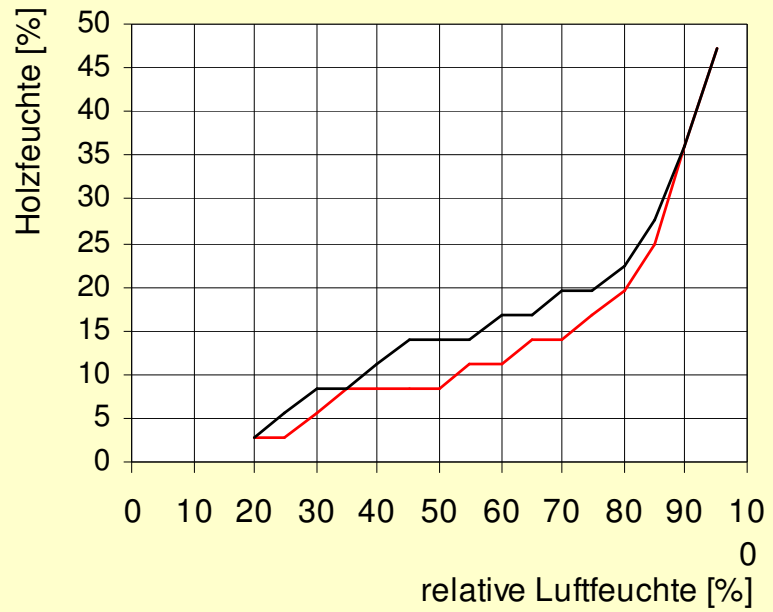
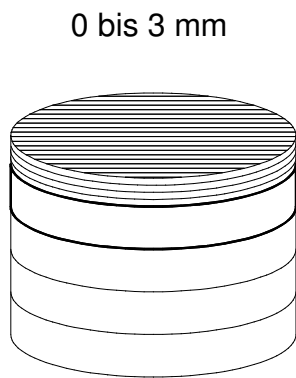


Diagramm 3.32 b Sorptionsisothermen – Probe SZ W 0-3

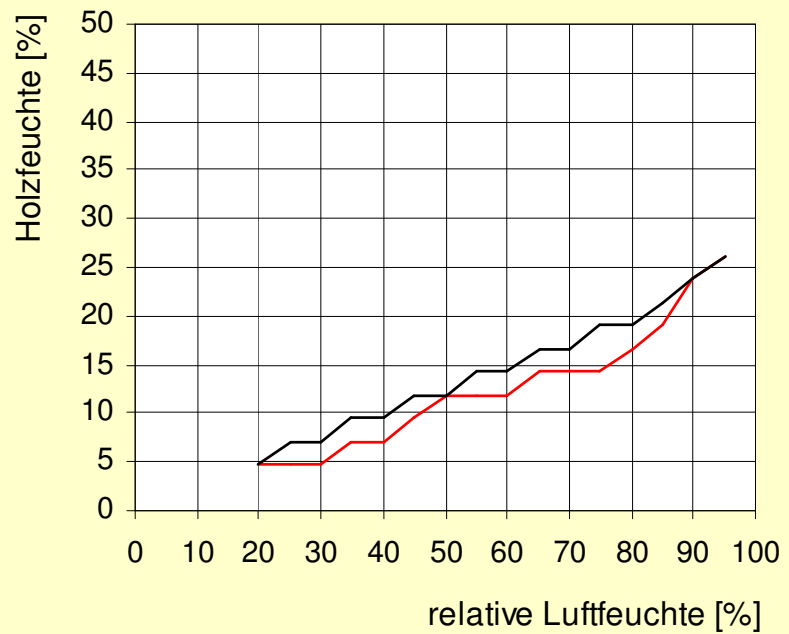
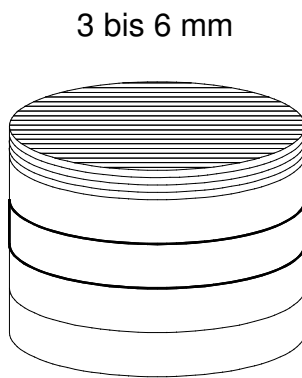


Diagramm 3.32 c Sorptionsisothermen – Probe SZ W 3-6

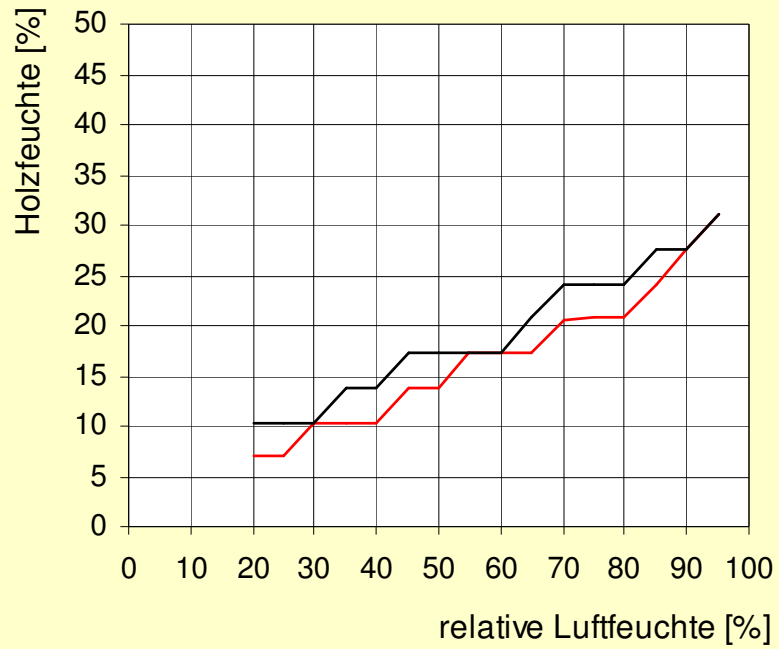
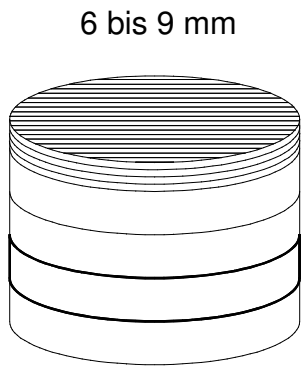


Diagramm 3.32 d Sorptionsisothermen – Probe SZ W 6-9

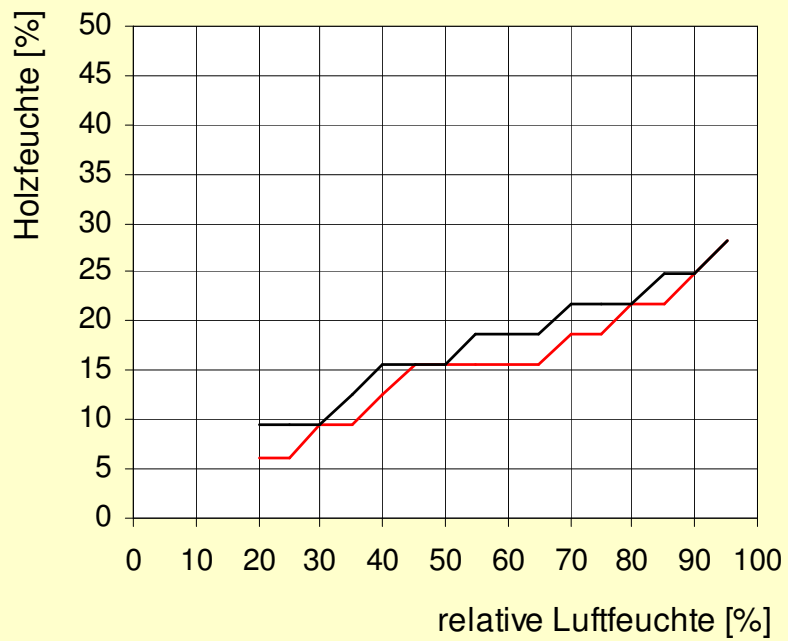
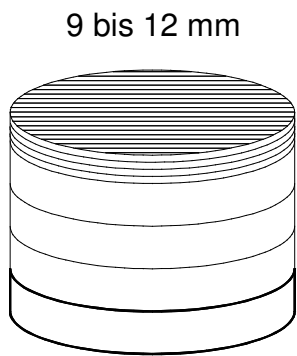


Diagramm 3.32 e Sorptionsisothermen – Probe SZ W 9-12

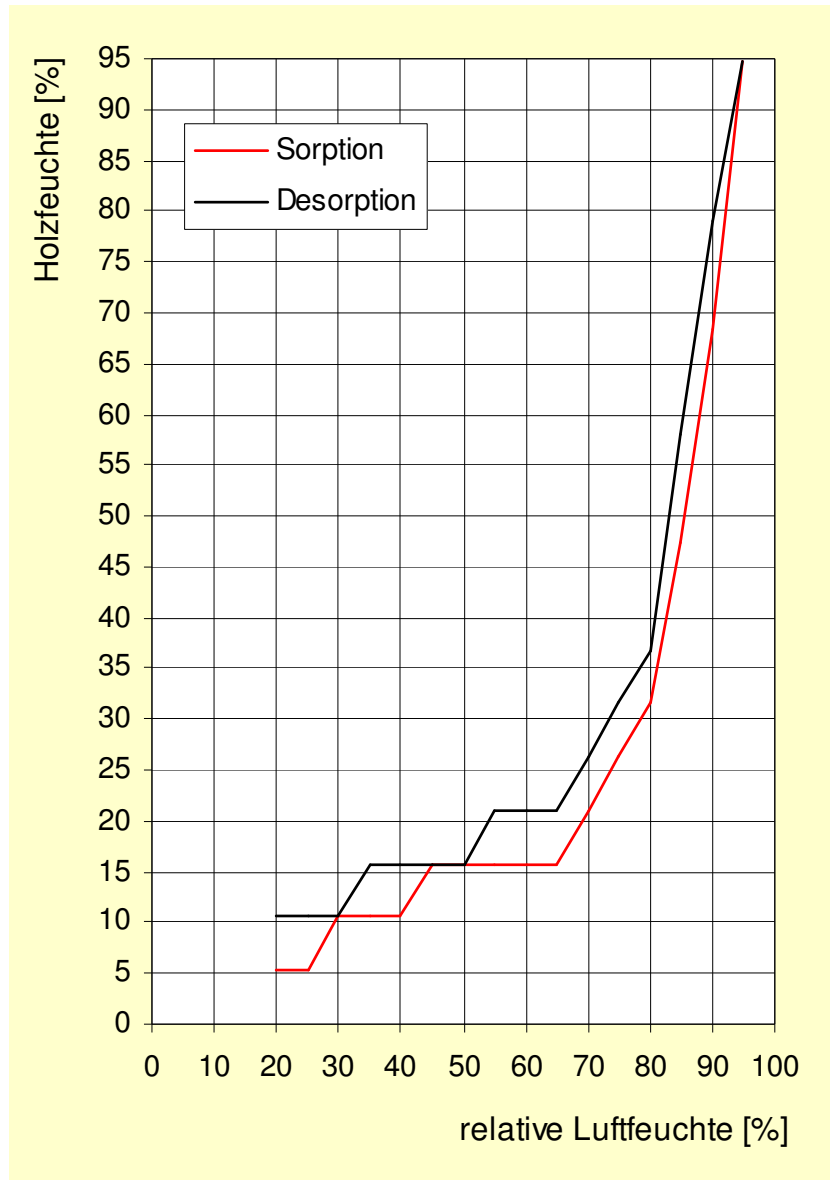
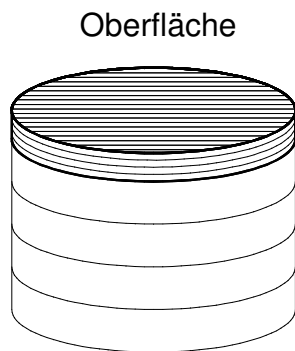


Diagramm 3.33 a Sorptionsisothermen – Probe SZ N O

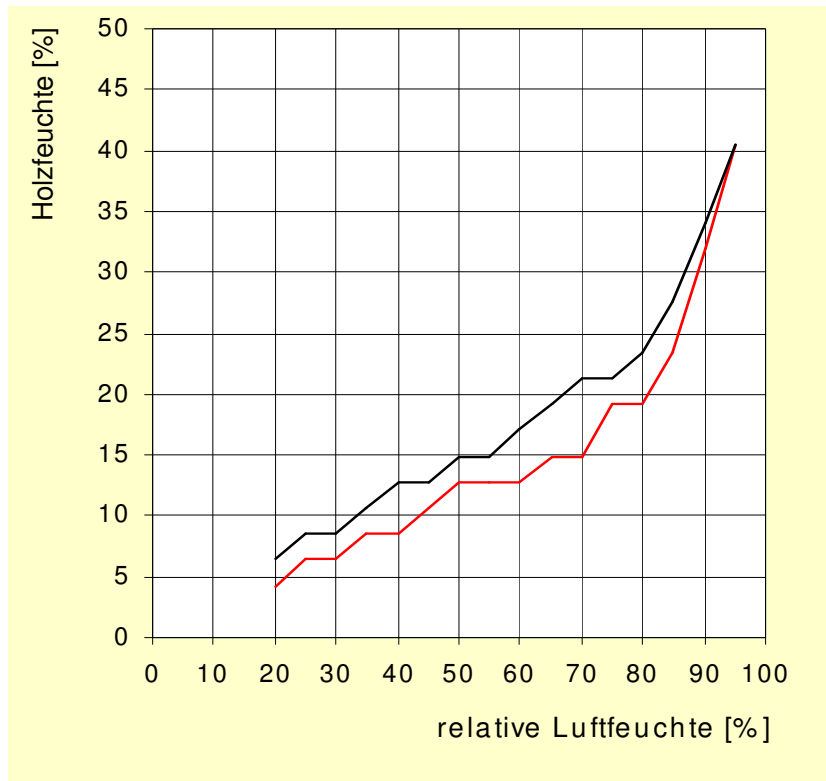
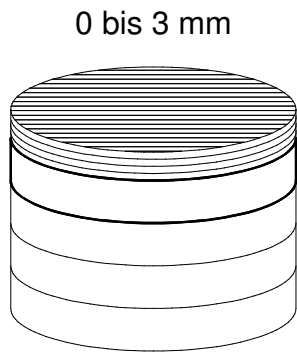


Diagramm 3.33 b Sorptionsisothermen – Probe SZ N 0-3

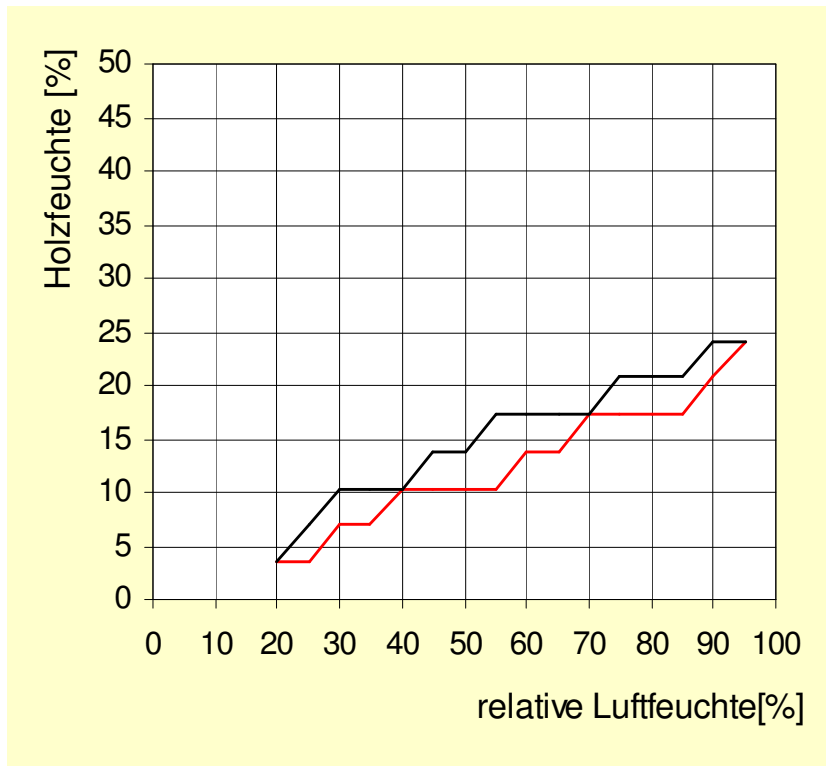
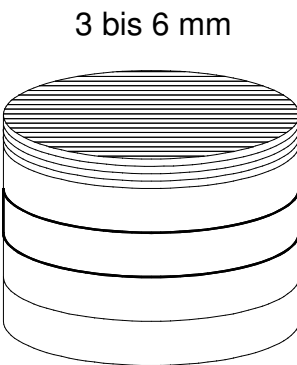


Diagramm 3.33 c Sorptionsisothermen – Probe SZ N 3-6

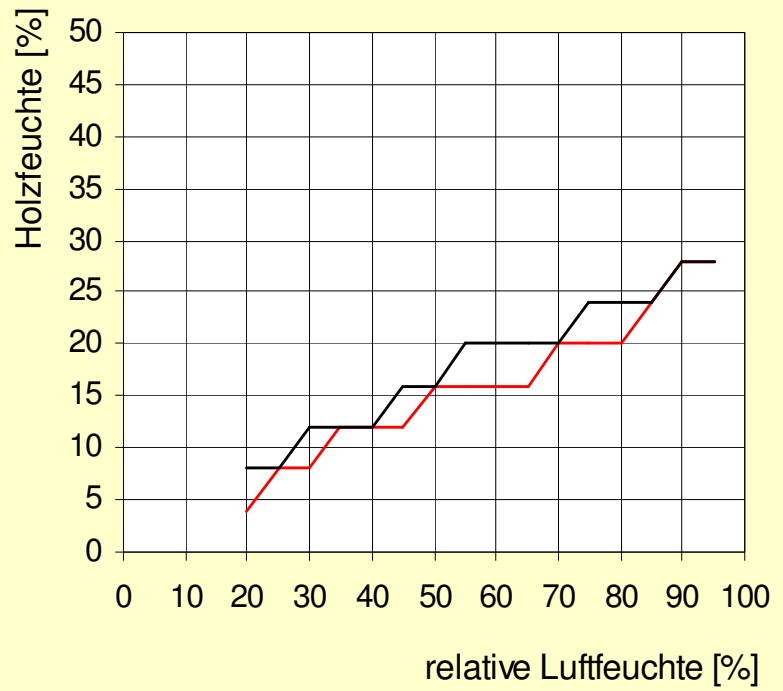
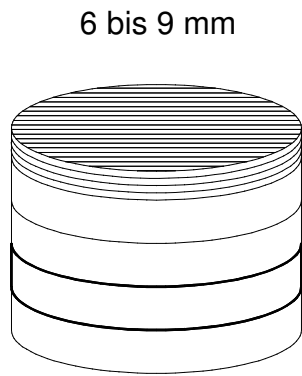


Diagramm 3.33 d Sorptionsisothermen – Probe SZ N 6-9

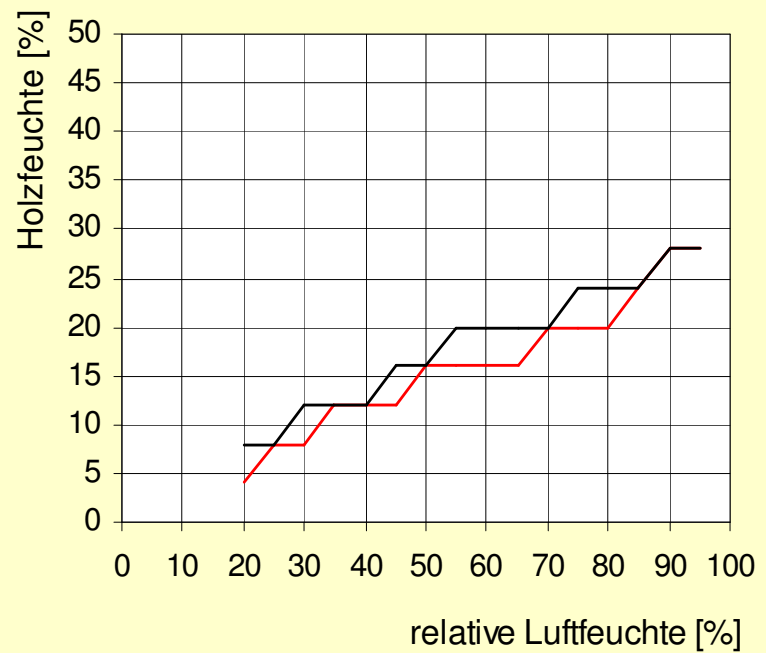
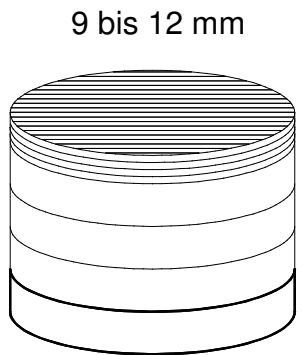


Diagramm 3.33 e Sorptionsisothermen – Probe SZ N 9-12

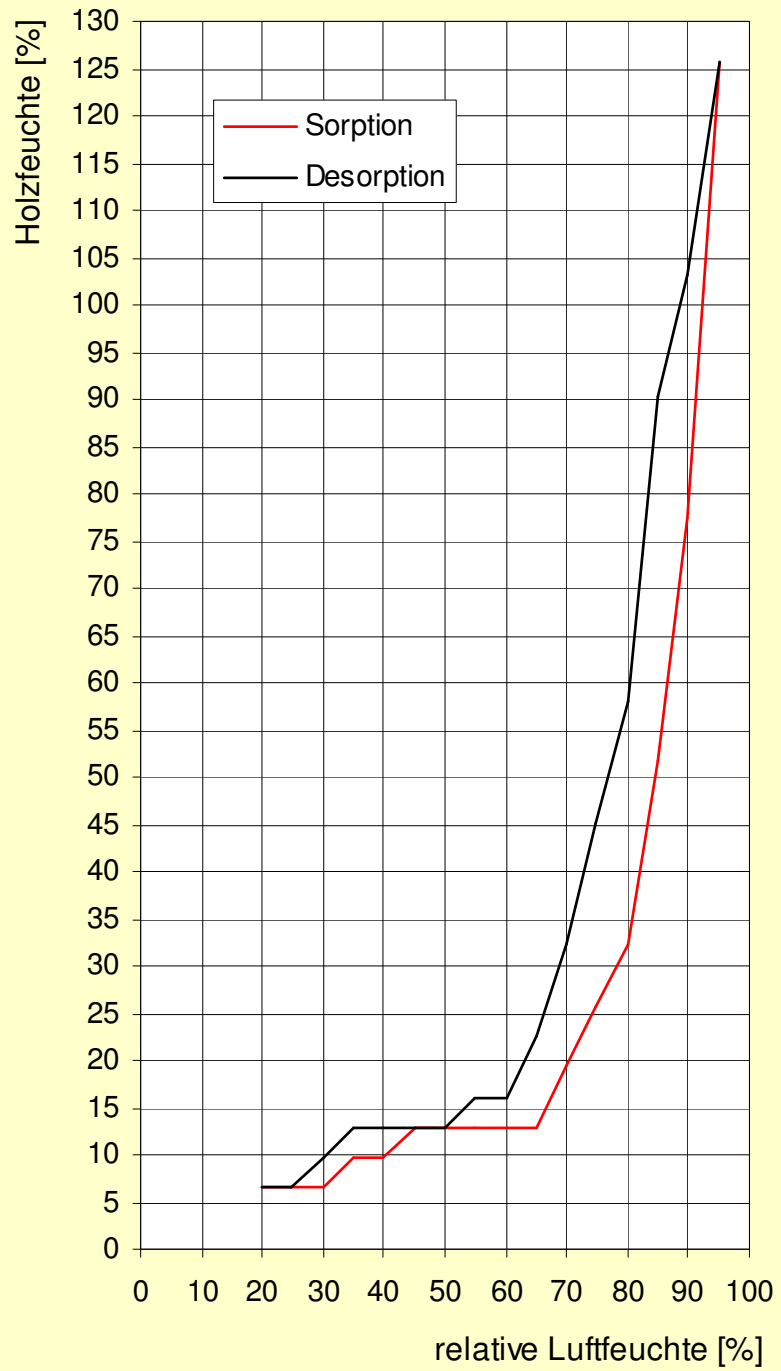
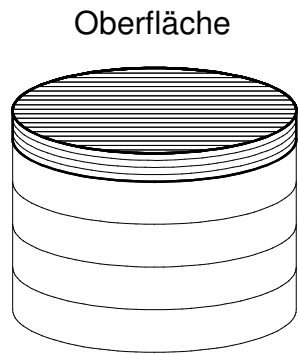


Diagramm 3.34 a Sorptionsisothermen – Probe SZ O O

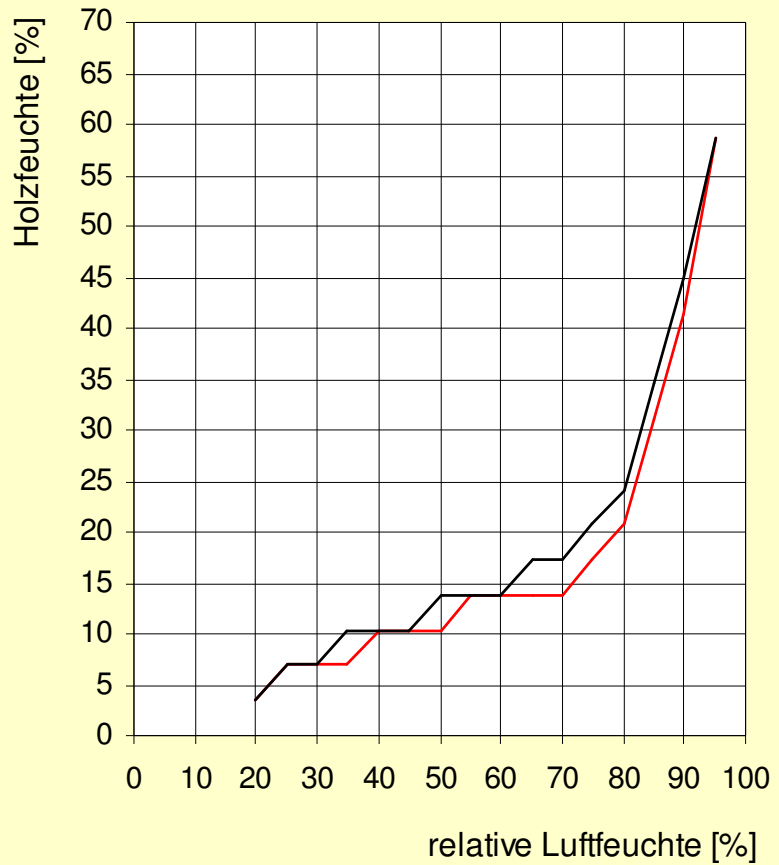
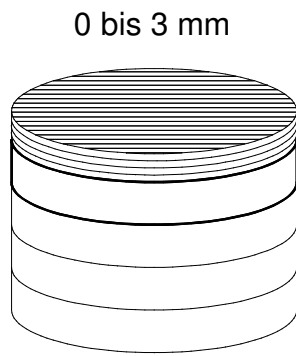


Diagramm 3.34 b Sorptionsisothermen – Probe SZ O 0-3

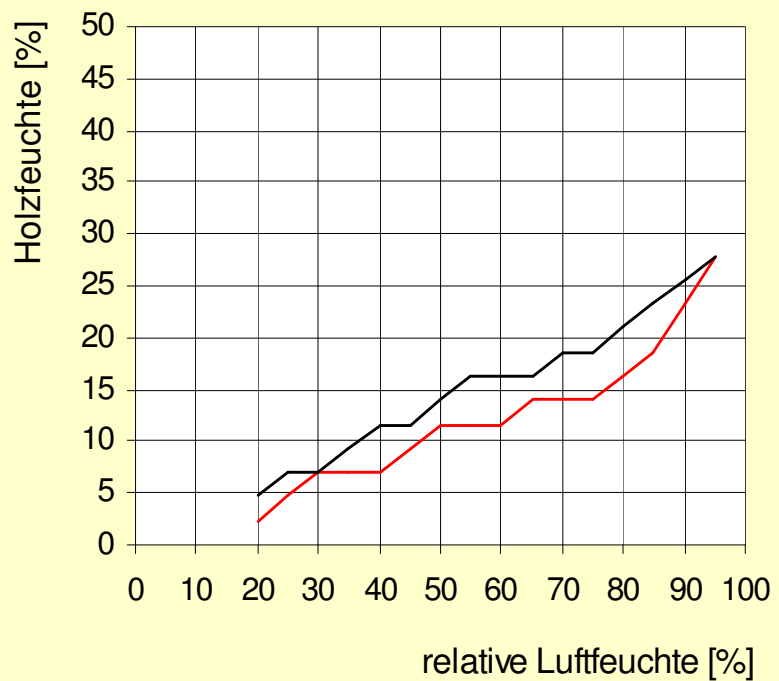
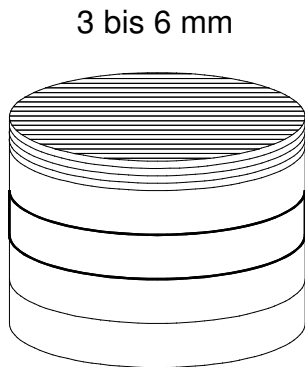


Diagramm 3.34 c Sorptionsisothermen – Probe SZ O 3-6

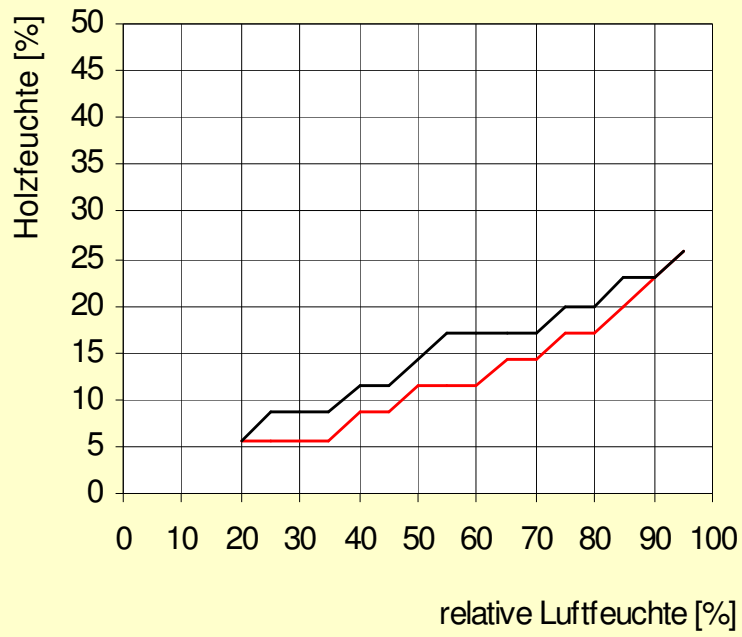
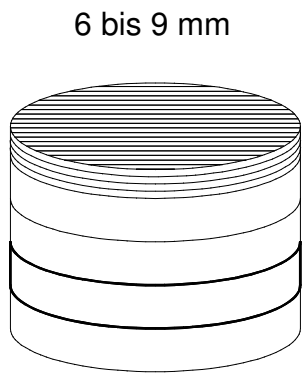


Diagramm 3.34 d Sorptionsisothermen – Probe SZ O 6-9

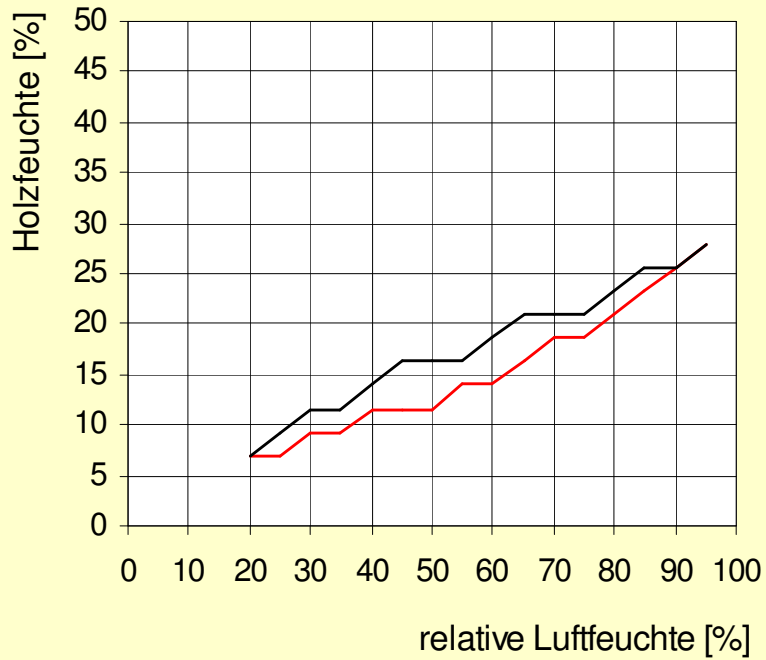
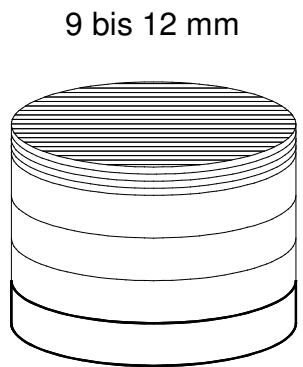


Diagramm 3.34 e Sorptionsisothermen – Probe SZ O 9-12

Bei allen Proben ist der sog. Hystereseeffekt erkennbar, d.h. dass sich der Feuchtegehalt, welcher sich bei Desorption einstellt, um einige Prozentpunkte höher liegt als bei der Sorption.

Damit kann zusammenfassend bestätigt werden, dass sich ab einer bestimmten kritischen relativen Luftfeuchte (hier bei ca. $\phi \approx 65$ bis 70 %) die Sorptionslinien stark nach oben verschieben. D.h., dass die Salze (bzw. deren Lösungen) und damit die Holzsubstanz ab diesem Bereich verstärkt Wasser aufnehmen. Dies führt zu einer vorzeitigen Sättigung der Zellwände (Mikrosystem) schon teilweise bei $\phi = 80$ bis 85 %. Bei höheren Luftfeuchten beginnt die freie Einlagerung in das Zellhohlraumssystem (Makrosystem). Die Menge des zusätzlich aufnehmbaren Wassers ist abhängig von der Art der Salze bzw. der Zusammensetzung der Ionenlösung und der Masse der im Holz vorhandenen Salze bzw. Ionen.

Eine Verschiebung der Sorptionslinien nach unten, möglicherweise aufgrund eines Abbaus und damit verstärkter Auslaugerscheinungen hydrophiler Bestandteile, konnte dahingegen bei den Proben vom Dachstuhl der Stadthalle Zerbst nach weitestgehender Entsalzung nicht nachgewiesen werden.

Tiefenbereich	bei $\phi = 35\%$					bei $\phi = 65\%$					bei $\phi = 95\%$				
	u_S	u_W	u_N	u_O	\bar{u}	u_S	u_W	u_N	u_O	\bar{u}	u_S	u_W	u_N	u_O	\bar{u}
Oberfläche	12,5	11,1	8,3	7,1	9,8	12,5	16,7	16,7	14,3	15,1	18,8	22,2	25,0	21,4	21,9
0-3 mm	10,0	8,7	6,7	8,8	8,6	15,0	17,4	10,9	17,6	15,2	25,0	26,1	21,7	23,5	24,1
3-6 mm	8,1	10,0	5,9	7,7	7,9	13,5	16,7	11,8	12,8	13,7	21,6	23,3	21,6	23,1	22,4
6-9 mm	6,9	8,0	10,0	8,1	8,3	13,8	12,0	16,7	13,5	14,0	20,7	24,0	26,7	21,6	23,3
9-12 mm	8,1	7,7	6,9	7,1	7,5	16,2	12,8	13,8	14,3	14,3	27,0	23,1	24,1	21,4	23,9

Tabelle 3.4 Mittelwerte der Holzfeuchte u in % bei relativer Luftfeuchte $\phi = 35, 65$ und 95% (entsprechende Schicht aus Süd, West, Nord und Ost nach Entsalzung)

Die gemessenen Werte entsprechen etwa den Ausgleichsfeuchten des unbehandelten nicht geschädigten Holzes. Es wird mit dieser Versuchsreihe damit der Nachweis erbracht, dass die erhöhte Feuchteaufnahme tatsächlich durch die hohen Salzgehalte in den oberflächennahen Schichten verursacht wird.

Bei den Oberflächenproben scheint sich eine etwas höhere mittlere Ausgleichsfeuchte bei $\phi = 35 \%$ und eine etwas niedrigere Ausgleichsfeuchte bei $\phi = 95 \%$ einzustellen. Dieser Sachverhalt gilt aufgrund der geringen Probenanzahl, der geringen Probenmasse und der großen Streuung der Werte allerdings als statistisch nicht gesichert.

3.3 Kristallisationsverhalten der Salze

3.3.1 Das Verhalten reiner und gemischter Salzsysteme

Entscheidend für das Zustandekommen der chemischen Holzkorrosion in Form von „Mazeration“ ist bei den untersuchten Fällen offensichtlich das Vermögen der eingelagerten Salze, vor allem unter den gegebenen Luftfeuchteschwankungen wiederholt Phasenwechsel zu vollziehen. Deshalb ist die Kenntnis von erheblicher Bedeutung, bei welchen Umgebungsbedingungen die eingelagerten Salze bzw. Salzgemische Lösungs- bzw. Kristallisationsphasen bilden. Dabei wird das Absinken der Umgebungsluftfeuchte bei Vorhandensein einer salzhaltigen Kapillarlösung die schwerwiegenderen Folgen verursachen. Das Unterschreiten der kritischen relativen Luftfeuchte führt nämlich zur Kristallisation des Salzes und somit zum Entstehen eines holzschädigenden „Kristallisationsdrucks“.

Die quantitative Ionenanalyse der mittels Eluationsverfahren gelösten Salze liefert Konzentrationsangaben über die im Lösungswasser vorhandenen Kationen und Anionen, (Abschnitt 3.2.4.1).

In jeder Probe befinden sich Kationen und Anionen in verschiedenen Konzentrationen und Zusammensetzungen. Bei den Proben der Stadthalle Zerbst wurden signifikante Konzentrationen an Sulfaten, Phosphaten und Fluoriden sowie Natrium, Kalium, Ammonium und Zink analysiert. Das Kristallisationsverhalten des vorliegenden Salzsystems kann nicht auf einfache Weise aus den Eigenschaften binärer Salzsysteme, z.B. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 / \text{H}_2\text{O}$, abgeleitet werden. Beim Vorhandensein von Salzgemischen ist das Kristallisationsverhalten nämlich sehr komplex.

Noch komplexer werden die Zusammenhänge, wenn die vorhandenen Ionenkombinationen die Bildung von Doppelsalzen und verschiedener Hydratphasen erlauben.

Für einfache Systeme, sog. Ionentriplets, einem Salzsystem mit einem gemeinsamen Ion – z.B. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 / (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – stehen Daten zur Verfügung.

Im Diagramm 3.35 ist die Löslichkeitskurve einer gemischten $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 / (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - Lösung bei einer Temperatur von 25°C dargestellt. Das Lösungsverhalten wird nun qualitativ diskutiert:

Zuerst wird die Lösung der Zusammensetzung A1 betrachtet. Die Lösung in den Kapillaren ist relativ niedrig konzentriert. Bei Absenkung der rel. Luftfeuchte der Umgebung gibt die Lösung Wasser ab und es kommt zur Aufkonzentration entsprechend der Linie A1 – B1. Am Punkt B1 ist die Lösung bezüglich $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ gesättigt. Wird die rel. Luftfeuchte weiter gesenkt, beginnt die Kristallisation von $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, d.h. die Lösung verarmt an Ammonium- und Sulfationen. Am sog. invarianten Punkt C ist die Lösung nun auch bezüglich $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ gesättigt. Bei einem Unterschreiten der des invarianten Punktes entsprechenden rel. Luftfeuchte kristallisiert die gesamte sich noch in der Lösung befindliche Salzmenge – also $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – aus und übt dadurch auf das Holz einen abträglichen „Kristallisationsdruck“ (infolge der Bildung von größeren, voluminöseren Kristallen) aus.

Analog kann das Verhalten der Lösung A2 beschrieben werden, mit dem Unterschied, dass zuerst $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ kristallisiert.

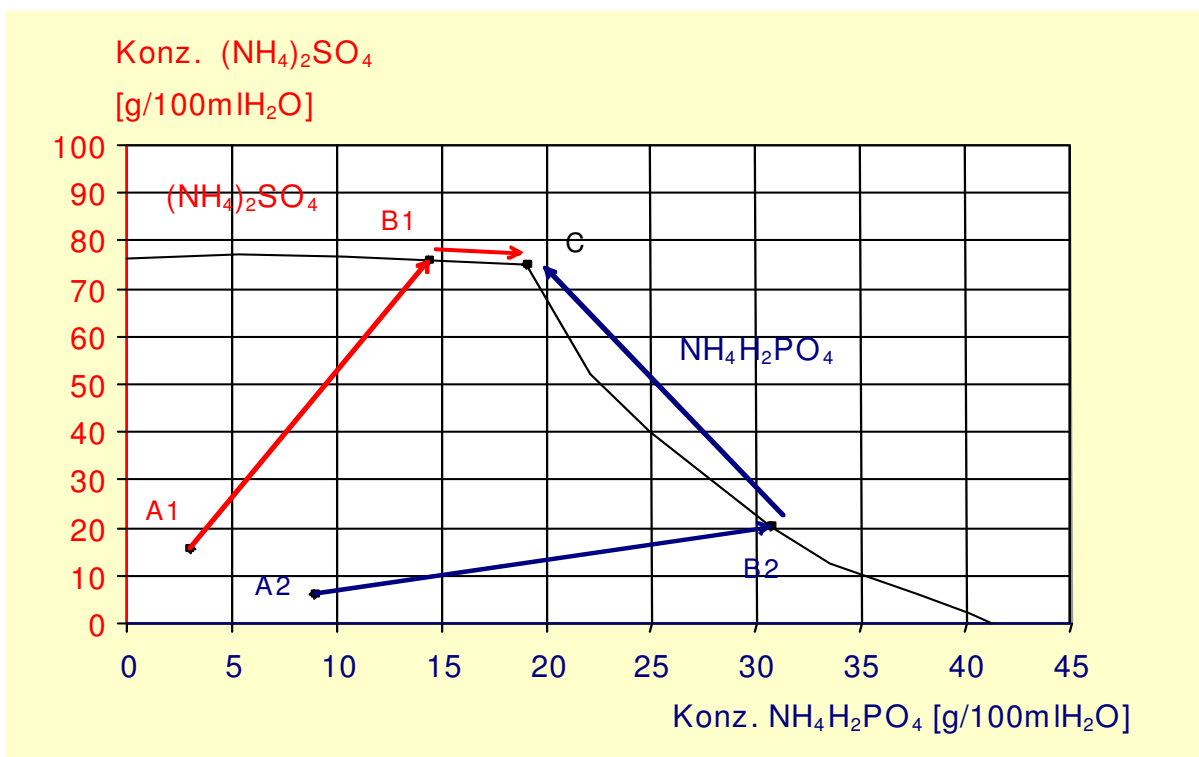


Diagramm 3.35 Kristallisationsverhalten gemischter $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 / (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - Lösungen, Daten aus [Gmelin]

3.3.2 Das System $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ am Beispiel der Lutherhalle zu Wittenberg (Ostflügel)

3.3.2.1 Methode und Randbedingungen

Die Analysen der Proben aus der Lutherhalle Wittenberg ergaben prozentual in der Summe die höchsten Konzentrationen an Phosphat-, Sulfat- und Ammoniumionen, so dass Diagramm 3.36 als Modell für die Beschreibung des Kristallisationsverhaltens des Systems $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ annäherungsweise herangezogen werden kann.

Das gemeinsame Ion ist bei diesem System das Ammoniumion. Die Ionenbilanz dieser betrachteten Ionen zeigt jedoch einen großen Fehler auf der Anionenseite. Es existiert also ein Überschuss an Anionen in Form von SO_4^{2-} (Tabelle 3.5) bzw. ein Mangel an NH_4^+ .

Masse absolut [mg]	Proben Lutherhalle									
	O O	O 0-3 KH	O 3-6 KH	O 6-9 KH	O 9-12 KH	O 0-3 SH	O 3-6 SH	O 0-3 R	O 3-6 R	O 6-9 R
PO_4^{3-}	17,67	7,61	4,26	1,61	2,64	9,61	3,70	0,30	0,44	0,17
SO_4^{2-}	48,13	15,19	10,14	4,54	7,61	10,79	7,76	12,30	5,02	1,34
NH_4^+	12,43	5,21	4,45	2,25	3,68	3,96	2,91	2,52	1,89	0,67
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	2,28	-	
Ionenbilanz Fehler [%]	55,8	48,1	28,6	14,2	8,5	58,4	42,1	4,6	11,5	10,4

Tabelle 3.5 Ionenbilanz. Der pH-Wert wurde nicht eingerechnet.

Bei Unterschreiten der für die Kristallisation kritischen Luftfeuchte kann dann jeweils nur soviel $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ bzw. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ kristallisieren, bis der Gehalt an NH_4^+ - Ionen in der Lösung erschöpft ist. Die restlichen Anionen verbinden sich mit anderen Kationen zu anderen Salzen. Ob dies vorher oder nachher geschieht, hängt von der Löslichkeit des entsprechenden Salzes ab. Dies kann im Modell (Diagramm 3.36) allerdings nicht berücksichtigt werden.

Im Diagramm 3.36 ist die Löslichkeitskurve in Abhängigkeit der PO_4^{3-} – und SO_4^{2-} - Ionenkonzentration in der Lösung dargestellt. Das gemeinsame Ion ist wiederum NH_4^+ .

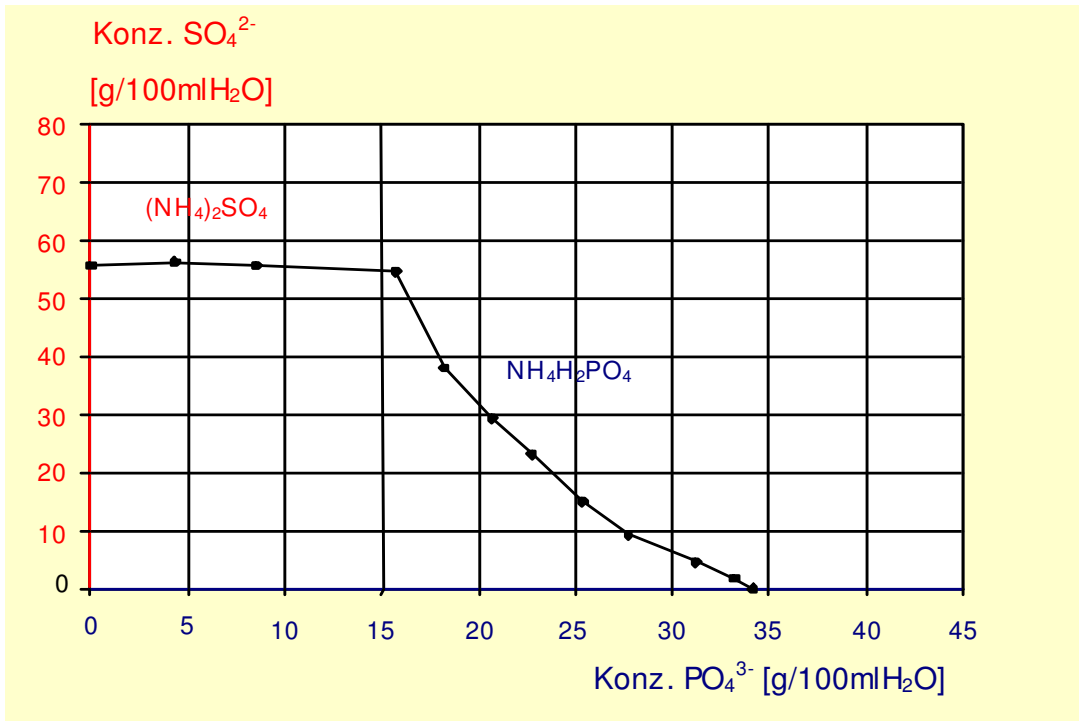


Diagramm 3.36 Modifizierte Löslichkeitskurve in Abhängigkeit der PO_4^{3-} – und SO_4^{2-} - Ionenkonzentration

Die Umrechnung erfolgt über die Verhältnisse der molaren Massen M gemäß:

$$\frac{M_{\text{SO}_4^{2-}}}{M_{(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4}} = \frac{96 \text{ g/mol}}{132 \text{ g/mol}} = 0,727 \quad \text{bzw.}$$

bzw.

$$\frac{M_{\text{PO}_4^{3-}}}{M_{\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4}} = \frac{95 \text{ g/mol}}{115 \text{ g/mol}} = 0,826$$

Der größte Anteil des Ionengemisches muss in der Summe aus PO_4^{3-} -, SO_4^{2-} - und NH_4^+ - Ionen bestehen, sonst wird das Löslichkeitsverhalten des Ionengemisches qualitativ zu stark von anderen Ionen beeinflusst. Als Grenzwert wird 75 % angesetzt. (Tabelle 3.6).

Die dick markierten Proben wurden dementsprechend untersucht.

Für die Berechnung der Konzentration an PO_4^{3-} – und SO_4^{2-} - Ionen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte ist die Kenntnis der jeweilige Wassermasse und der Ionenkonzentrationen notwendig.

C Ionenkonzentration in der wässrigen Lösung in mg/l H_2O

Probe	C [mg / l H_2O]	ΣC (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NH_4^+) [mg / l H_2O]	Anteil (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NH_4^+) [%]
LH O O	2817,98	2173,12	77,2
LH O 0-3 KH	1368,46	1120,63	81,9
LH O 3-6 KH	830,65	649,82	78,2
LH O 6-9 KH	551,7	409,68	74,3
LH O 9-12 KH	463,07	352,78	76,2
LH O 0-3 SH	1591,33	1316,79	82,8
LH O 3-6 SH	861,32	684,26	79,4
LH O 6-9 SH	391,87	277,29	70,8
LH O 9-12 SH	176,01	111,32	63,3
LH O 0-3 R	931,45	775,48	83,3
LH O 3-6 R	323,66	282,78	87,4
LH O 6-9 R	132,10	96,85	73,3
LH O 9-12 R	62,43	24,79	39,7

Tabelle 3.6 Anteil der PO_4^{3-} -, SO_4^{2-} - und NH_4^+ - Ionen (vgl. Anlage E – Konzentrationen auf g/kg Material bezogen)

Beide Parameter können jedoch nicht an einer Probe bestimmt werden. Nach dem Auslösen der Ionen aus der Probe (Eluation) würde der Einfluss der Salze auf den Verlauf der Sorptionsisothermen verloren gehen. Deshalb wurde jede Probe zu etwa gleichen Massen geteilt. An einer Teilprobe erfolgte die Bestimmung der Ionenkonzentration, an der anderen Teilprobe wurden die Sorptionsisothermen zwischen $\phi = 20$ und 95% aufgenommen.

3.3.2.2 Berechnung und Diskussion am Beispiel LH O 0-3 KH

Ausgangsdaten:

Volumen des entionisierten Wassers für die IC – Analyse (Anlage E)	$V_{\text{H}_2\text{O}} = 33,5 \text{ ml}$ (1 g Probenmaterial auf 50 ml H ₂ O)
Gesamtionenkonzentration (Anlage E)	$C = 1368,46 \text{ mg} / 1000 \text{ ml H}_2\text{O}$
Masse der IC – Probe bei $\phi = 65 \%$ (Anlage B)	$m_{\text{IC-65}} = 0,67 \text{ g}$
Masse der SI – Probe bei $\phi = 65 \%$ Desorption (Anlage B) SI ... Sorptionsisotherme	$m_{\text{SI-65}} = 0,50 \text{ g}$
Salzmasse in der IC – Probe (absolut)	$m_{\text{IC-Salz}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C = \frac{33,5 \text{ ml} \cdot 1368,46 \text{ mg}}{1000 \text{ ml H}_2\text{O}}$ $m_{\text{IC-Salz}} = 45,84 \text{ mg}$
Salzmasse in der SI – Probe (absolut) Unter der Voraussetzung, dass sich in beiden Teilproben (IC und SI) die gleiche Gesamtionenkonzentration C befindet.	$m_{\text{SI-Salz}} = \frac{m_{\text{SI-65}} \cdot m_{\text{IC-Salz}}}{m_{\text{IC-65}}}$ $= \frac{0,50 \text{ g} \cdot 45,84 \text{ mg}}{0,67 \text{ g}} = 34,21 \text{ mg}$

Tabelle 3.7 Ausgangsdaten

Ionenkonzentrationen C_x und absolute Ionenmassen $m_{\text{SI-x}}$:

Ion x	C_x [mg / 1000 ml H ₂ O] (Anlage E)	$m_{\text{SI-x}} = \frac{C_x \cdot m_{\text{SI-Salz}}}{C}$ [mg]
F ⁻	53,89	1,35
Cl ⁻	8,77	0,22
NO ₂ ⁻	0	0
NO ₃ ⁻	7,56	0,19
Br ⁻	37,3	0,68
PO₄³⁻	304,48	7,61
SO₄²⁻	607,68	15,19
Na ⁺	47,93	1,20
NH₄⁺	208,47	5,21
K ⁺	69,58	1,74
Mg ²⁺	4,53	0,11
Ca ²⁺	28,27	0,71
Summe	C = 1368,46 mg/1000 ml H ₂ O	$m_{\text{SI-Salz}} = 34,21 \text{ mg} = 0,034 \text{ g}$

Tabelle 3.8 Ionenkonzentrationen C_x und absolute Ionenmassen $m_{\text{SI-x}}$

Aufkonzentration der PO₄³⁻ - und SO₄²⁻ - Ionen bei Desorption in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte ϕ der Umgebung:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{SI-rF}} - m_{\text{SI-dtr}} \quad (3.10)$$

mit $m_{\text{SI-dtr}} = 0,43 \text{ g}$ (Anlage B)

$$C_{\text{PO}_4^{3-}} = \frac{m_{\text{SI-PO}_4^{3-}} \cdot 0,1}{m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.11)$$

bzw.

$$C_{\text{SO}_4^{2-}} = \frac{m_{\text{SI-SO}_4^{2-}} \cdot 0,1}{m_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.12)$$

$m_{\text{H}_2\text{O}}$	Masse des Wassers in der Probe in g
$m_{\text{SI-}\phi}$	Masse der Probe in Abhängigkeit der rel. Luftfeuchte ϕ (Anlage B) in g
$m_{\text{SI-dtr}}$	Darrtrockenmasse der Probe in g
$C_{\text{PO}_4^{3-}}$	Phosphationenkonzentration in g/100 ml H_2O
$C_{\text{SO}_4^{2-}}$	Sulfationenkonzentration in g/100 ml H_2O

Zeile	ϕ [%]	$m_{\text{SI-}\phi}$ [g]	$m_{\text{H}_2\text{O}}$ [g]	$m_{\text{SI-PO}_4}$ [mg]	$C_{\text{PO}_4^{3-}}$ [g/100 ml H_2O]	$m_{\text{SI-SO}_4}$ [mg]	$C_{\text{SO}_4^{2-}}$ [g/100 ml H_2O]	ver- fügb. $m_{\text{SI-NH}_4}$ [mg]	Ver- brauch $m_{\text{SI-NH}_4}$ [mg]
1	95	0,64	0,21	7,61	3,62	15,19	7,23	5,21	0
2	90	0,59	0,16	7,61	4,76	15,19	9,45	5,21	0
3	85	0,54	0,11	7,61	6,92	15,19	13,81	5,21	0
4	80	0,52	0,09	7,61	8,46	15,19	16,88	5,21	0
5	75	0,51	0,08	7,61	9,51	15,19	19,00	5,21	0
6	70	0,51	0,08	7,61	9,51	15,19	19,00	5,21	0
7	65	0,50	0,07	7,61	10,87	15,19	21,70	5,21	0
8	60	0,49	0,06	7,61	12,68	15,19	25,32	5,21	0
9	55	0,49	0,06	7,61	12,68	15,19	25,32	5,21	0
10	50	0,49	0,06	7,61	12,68	15,19	25,32	5,21	0
11	45	0,48	0,05	7,61	15,22	15,19	30,38	5,21	0
12	40	0,48	0,05	7,61	15,22	15,19	30,38	5,21	0
13	< 40		0,041	7,61	18,45	15,19	36,90	5,21	0
14	35	0,47	0,04	7,25	18,15	15,19	37,98	5,14	0,07
15	30	0,46	0,03	4,83	16,11	15,19	50,63	4,68	0,46
16	25	0,45	0,02				(76,00)		
17	20	0,45	0,02						

Tabelle 3.9 Aufkonzentration der PO_4^{3-} - und SO_4^{2-} Ionen in der Salzlösung

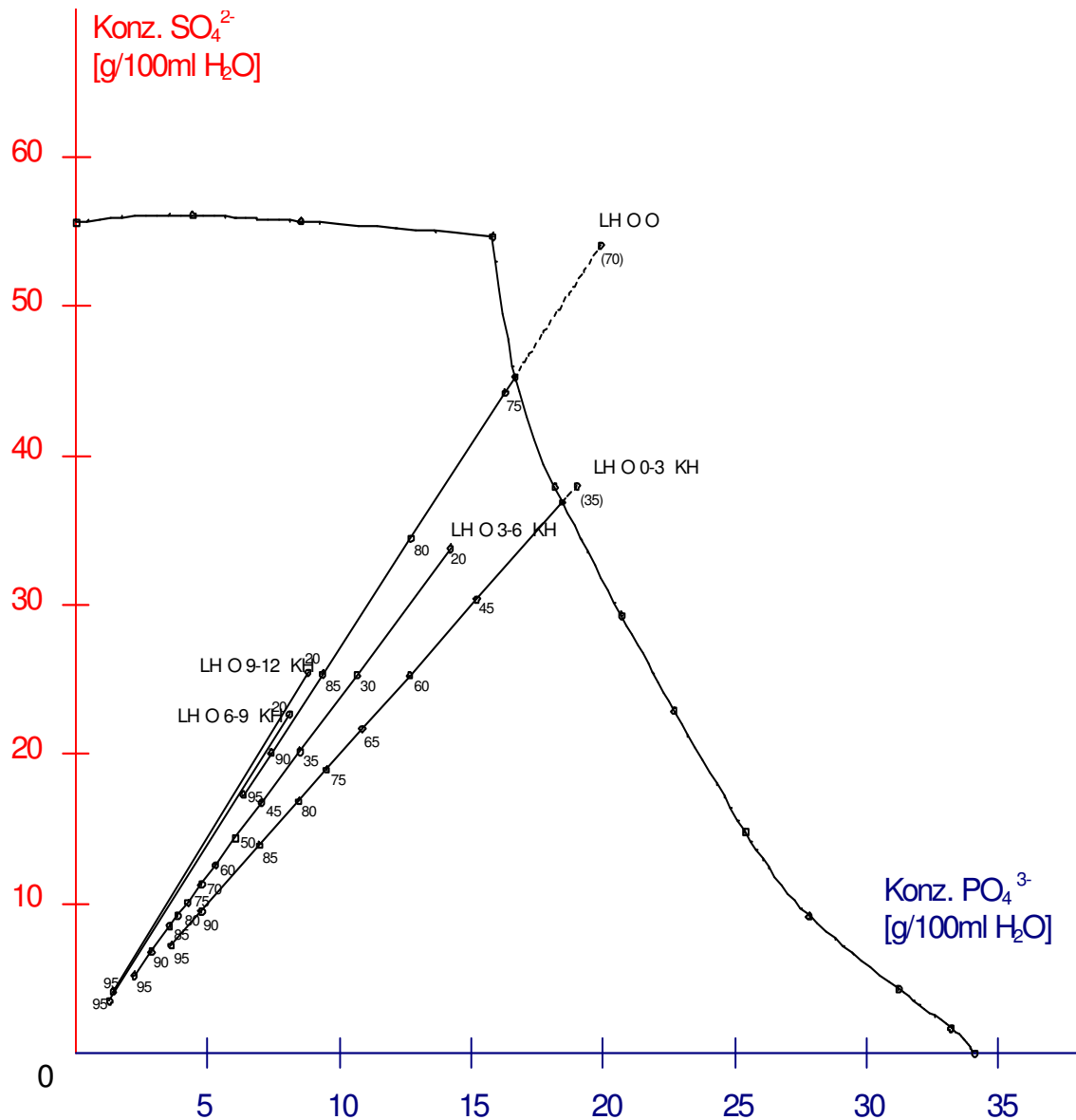


Diagramm 3.37 Kristallisationsdiagramm für die Probe LH O (...) KH

Diskussion des Kristallisationsverhaltens am Beispiel LH O 0-3 KH, (Tabelle 3.9 und Diagramm 3.37):

Zeile 1 bis 12:

Bei Absenken der relativen Luftfeuchte gibt die Kapillarsalzlösung kontinuierlich Wasser ab. Dadurch wird ein Ansteigen der PO_4^{3-} -, SO_4^{2-} - und NH_4^+ Ionenkonzentrationen verursacht.

Zeile 13:

Die Sättigungskonzentration bezüglich $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ wird bei Durchlaufen der Löslichkeitskurve erreicht. C (Konz.) $\text{PO}_4^{3-} = 18,45 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ und C (Konz.) $\text{SO}_4^{2-} = 36,90 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$. Beide Werte wurden im Diagramm graphisch ermittelt. Die entsprechende relative Luftfeuchte = ϕ_{krit} liegt zwischen 40 und 35 %.

Zeile 14:

Beim weiteren Absenken der rel. Luftfeuchte kristallisiert $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ aus. Die Lösung verarmt an PO_4^{3-} - und NH_4^+ Ionen. Konstant bleibt vorerst die Masse an SO_4^{2-} - Ionen in der Lösung. Bei $\phi = 35 \%$ befinden sich $C \text{ SO}_4^{2-} = 37,98 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ in der Lösung. Die entsprechende Phosphatkonzentration (Löslichkeitskurve) beträgt $C \text{ PO}_4^{3-} = 18,15 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ (graphisch ermittelt). In der Lösung befinden sich nun $7,25 \text{ g PO}_4^{3-}$ - Ionen. $0,36 \text{ g} = 7,61 \text{ g} - 7,25 \text{ g}$ sind als PO_4 in $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ gebunden und kristallisiert. Dazu wurde eine Menge von $0,07 \text{ g NH}_4^+$ - Ionen benötigt.

$$\Delta m_{\text{NH}_4} = \frac{M_{\text{NH}_4} \cdot \Delta m_{\text{PO}_4}}{M_{\text{PO}_4}} \quad (3.13)$$

$$\Delta m_{\text{NH}_4} = \frac{18 \text{ g/mol} \cdot 0,36 \text{ g}}{95 \text{ g/mol}} = 0,07 \text{ g}$$

In der Lösung verbleiben nur noch $5,14 \text{ g NH}_4^+$ - Ionen.

Zeile 15:

Bei $\phi = 30 \%$ befindet sich nun eine Sulfationenkonzentration $C \text{ SO}_4^{2-} = 50,63 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ in der Lösung. Die entsprechende Phosphationenkonzentration ist hier $C \text{ PO}_4^{3-} = 16,10 \text{ g}/100 \text{ ml H}_2\text{O}$ (ebenfalls graphisch ermittelt). $m_{\text{SI-PO}_4} = 4,83 \text{ mg}$. $2,42 \text{ g} = 7,25 \text{ g} - 4,83 \text{ g}$ sind in Form von $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ kristallisiert. Dazu wurde eine Menge von $0,46 \text{ g NH}_4^+$ - Ionen benötigt.

$$\Delta m_{\text{NH}_4} = \frac{18 \text{ g/mol} \cdot 2,42 \text{ g}}{95 \text{ g/mol}} = 0,46 \text{ g}$$

In der Lösung verbleiben nur noch 4,68 g NH_4^+ - Ionen.

Zeile 16 und 17:

Zwischen $\phi = 25$ und 20% wird der invariante Punkt C erreicht, (Diagramm 3.37). $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ist entsprechend der Verfügbarkeit der NH_4^+ - Ionen vollständig auskristallisiert, ebenso $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

3.3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den Diagrammen 3.38 und 3.39 sind die Konzentrationsverläufe der PO_4^{3-} - und SO_4^{2-} - Ionen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bis zur Sättigungskonzentration dargestellt. Probe LH (...) SH und Probe LH (...) R.

Schon ab einer relativen Luftfeuchte von $\phi = 75$ bis 70% kristallisiert die Kapillarlösung bei der Oberflächenprobe LH O O zu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Bei der Probe LH O 0-3 KH beginnt dieser Vorgang zwischen $\phi = 40$ bis 35% . Beide kritische Luftfeuchtebereiche werden auf Dachstühlen – jahreszeitlich bedingt – wiederholt und oftmals durchlaufen, so dass Phasenwechsel der eingelagerten Salze ermöglicht werden. (Diagramm 3.38).

Bei den Proben LH O 3-6 KH bis LH O 9-12 KH befinden sich die Ionen im untersuchten Luftfeuchtebereich $\phi = 95$ bis 20% ständig in Lösung, d.h. es kommt nie zur Kristallisation.

Bei Probe LH O 0-3 SH wird ebenfalls ein kritischer Bereich ($\phi = 60$ bis 50%) durchlaufen. Anders bei Probe LH O 3-6 SH: Hier liegt der kritische Bereich etwa bei $\phi = 20 \%$. Diese Luftfeuchte wird aber auf Dachstühlen praktisch nie erreicht. (Diagramm 3.38).

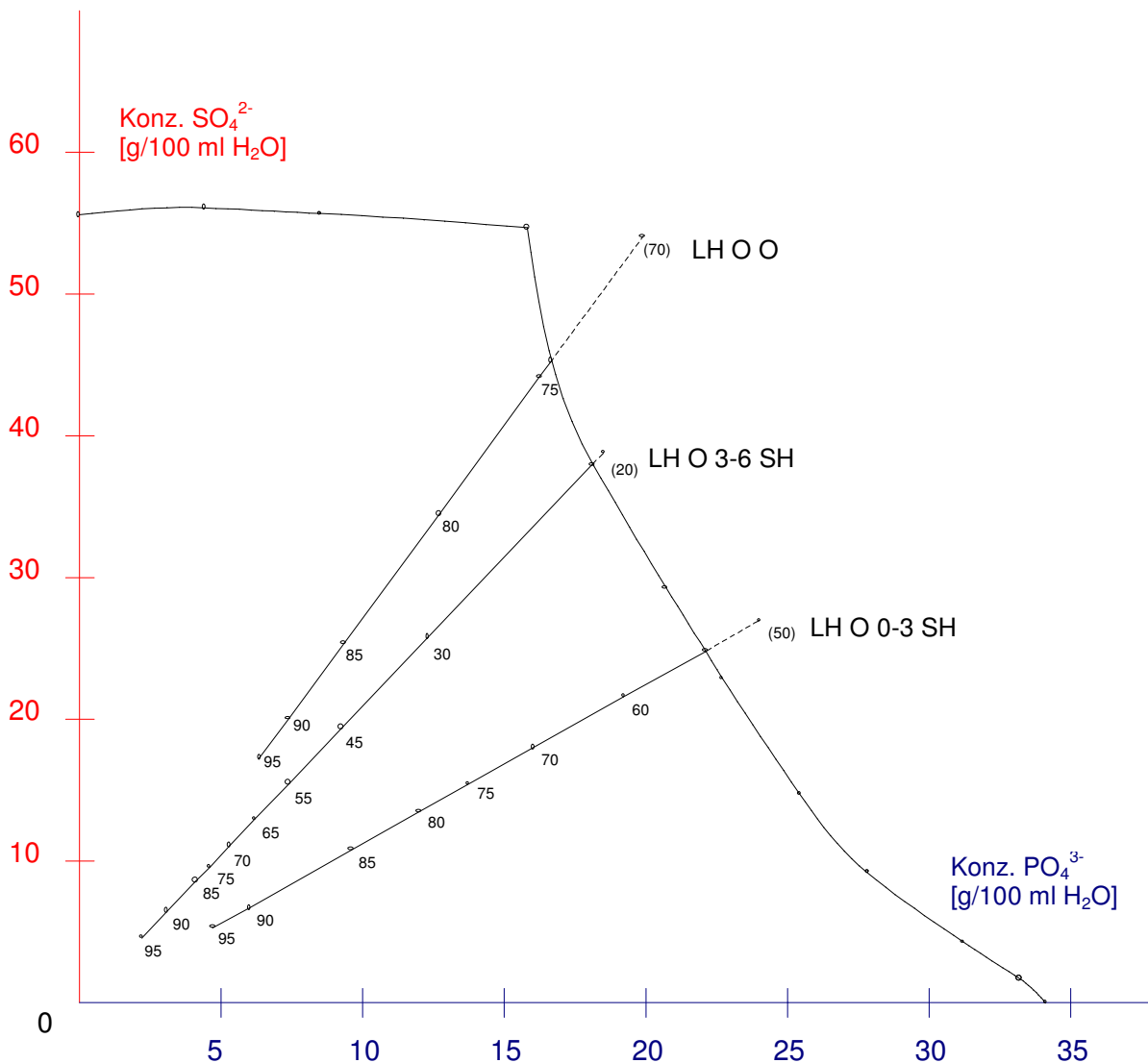


Diagramm 3.38 Kristallisationsdiagramm für LH O (...) SH

Bei der Referenzprobe wird die Sättigungskonzentration bezüglich $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ bei einer relativen Luftfeuchte $\phi = 25$ bis 20% überschritten. Auch diese Luftfeuchte wird gewöhnlich auf Dachstühlen nicht erreicht, so dass hier keine Kristallisation der in der Kapillarflüssigkeit existenten Ionen stattfindet. (Diagramm 3.39).

Neben SO_4^{2-} - und NH_4^+ - Ionen sind noch signifikante Ca^{2+} - Ionenkonzentrationen in Probe LH O 0-3 R enthalten. Diese sind aber aufgrund der geringen Löslichkeit von CaSO_4 ständig mit einem Teil der SO_4^{2-} - Ionen gebunden und somit für die Phasenbetrachtung nicht von Bedeutung. Dadurch reduziert sich der verfügbare SO_4^{2-} - Gehalt.

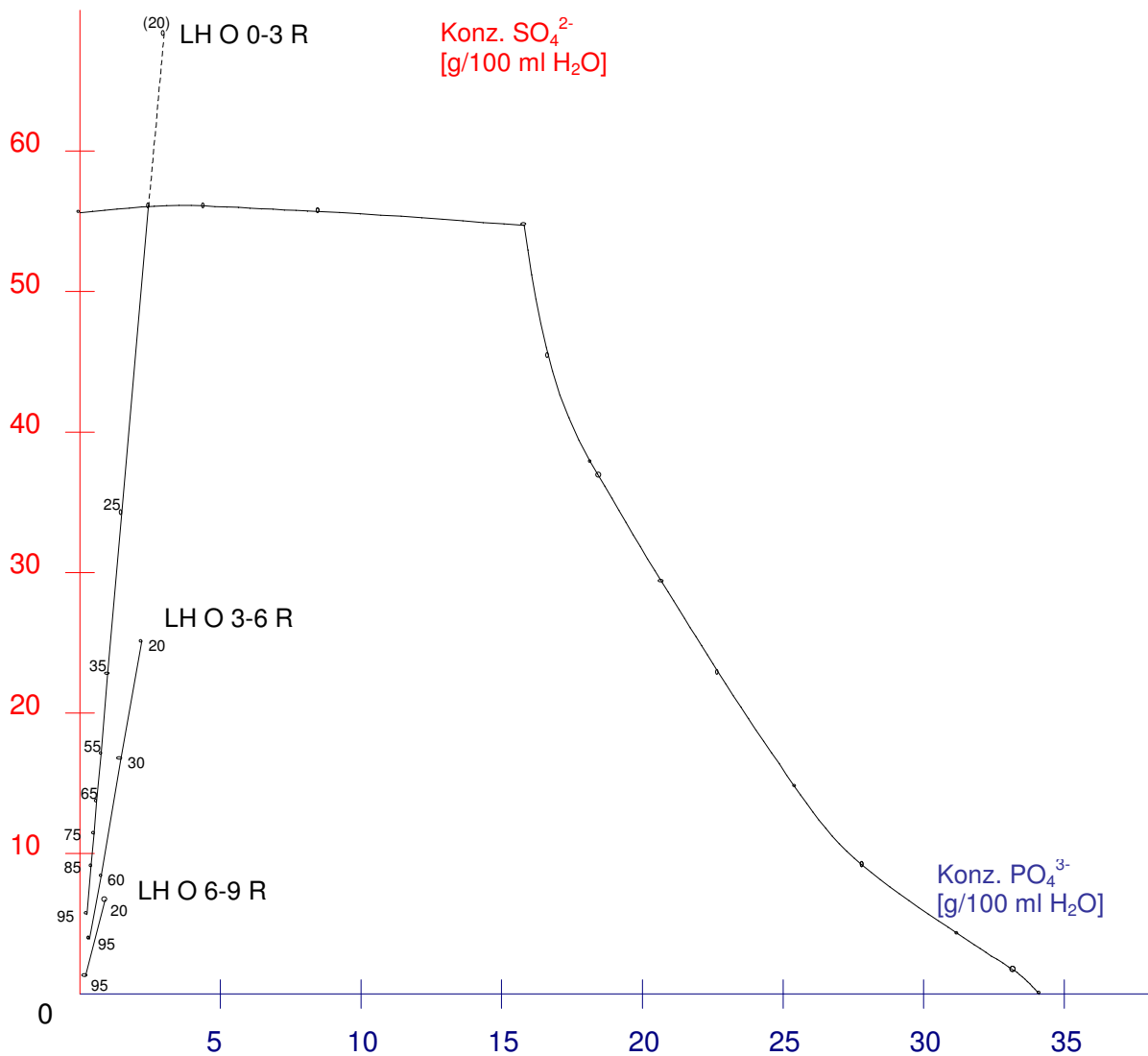


Diagramm 3.39 Kristallisationsdiagramm für die Probe LH O (...) R

Phasenwechsel können also nur direkt an der Oberfläche (Probe LH O O) bzw. in den unmittelbar darunter liegenden Schichten (Proben LH O 0-3 KH und LH O 0-3 SH) stattfinden. Tatsächlich war die Oberfläche der beprobten Dachstuhlssäule stark durch „Mazeration“ geschädigt. Selbst in der darunter liegenden Schicht 0 bis 3 mm ging die Schädigung zumindest im Frühholzbereich weiter, wenn auch der Faserverbund insgesamt noch vorhanden war.

Im Gegensatz dazu waren am beprobten Referenzbalken keine Schädigungen durch eine chemische Holzkorrosion erkennbar.

Dies lässt den Schluss zu, dass chemische Korrosion in Form von „Mazeration“ in den untersuchten Fällen nur dort auftritt, wo die eingedrungenen Salze das Vermögen besitzen, unter den vorhandenen Luftfeuchtebedingungen bzw. –schwankungen Phasenwechsel zu vollziehen, somit immer wieder auszukristallisieren und dadurch (infolge der örtlichen Bildung von größeren bzw. voluminöseren Kristallen) einen abträglichen „Kristallisationsdruck“ auf ihre Holz-Umgebung auszuüben.

3.4 Ergebnisse aus den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass sich einzelne Zellen oder Zellgruppen im Oberflächenbereich ablösen, (Bild 3.4 bis 3.6). Die Auflösung geschieht im Bereich der Mittelschicht. Die verholzte Zelle ist hier die festigkeitsrelevante Faser längs zur Stammachse, in dem Fall die Tracheide. In sich sind die abgelösten Zellen meist noch intakt. Die Schädigung ist sowohl im Frühholz als auch im Spätholz zu beobachten. Die Tiefe der Schädigung stellt sich unterschiedlich dar, sie reicht von einzelnen Zellen oder Zellgruppen bis hin zu ganzen Zellverbänden. Manche Holzstrahlen erscheinen aufgeweitet.

Die eigentliche Strukturschädigung - d.h. die wirkliche Mazerationsfront - reicht nur bis in eine sehr geringe Tiefe von wenigen Zellreihen. Ausnahmen sind Harzkanäle, Wandungen von Rissen und Übergangsbereiche Früh-/Spätholz. Dies lässt darauf schließen, dass im Allgemeinen die Schicht, in der die Schädigung voranschreitet, sehr schmal ist. Unterhalb dieser Schicht sind mikroskopisch keine Strukturschädigungen feststellbar. Die locker aufliegenden mazerierten Fasern können mit dem Finger abgerieben werden. Diese Schichtdicke beträgt 2 – 5 mm.

Im Vergleich dazu zeigt Bild 3.7 keine derartigen Schädigungen. Abgesehen von einer gewissen Oberflächenrauigkeit und einigen Mikrorissen sind keine Strukturveränderungen zu erkennen.

Anzumerken ist noch, dass hier natürlich nicht die gesamte geschädigte Schicht dargestellt werden kann. Die meisten locker aufliegenden Fasern und Faserbüschel gehen bei der Probenpräparation verloren. Erfasst wird nur die wirkliche Mazerationsfront.



Bild 3.4 Abgelöste Frühholz- als auch Spätholzzellen (Tracheiden). Auffällig sind auch Auflösungserscheinungen im Bereich des Harzkanales (Pfeile).

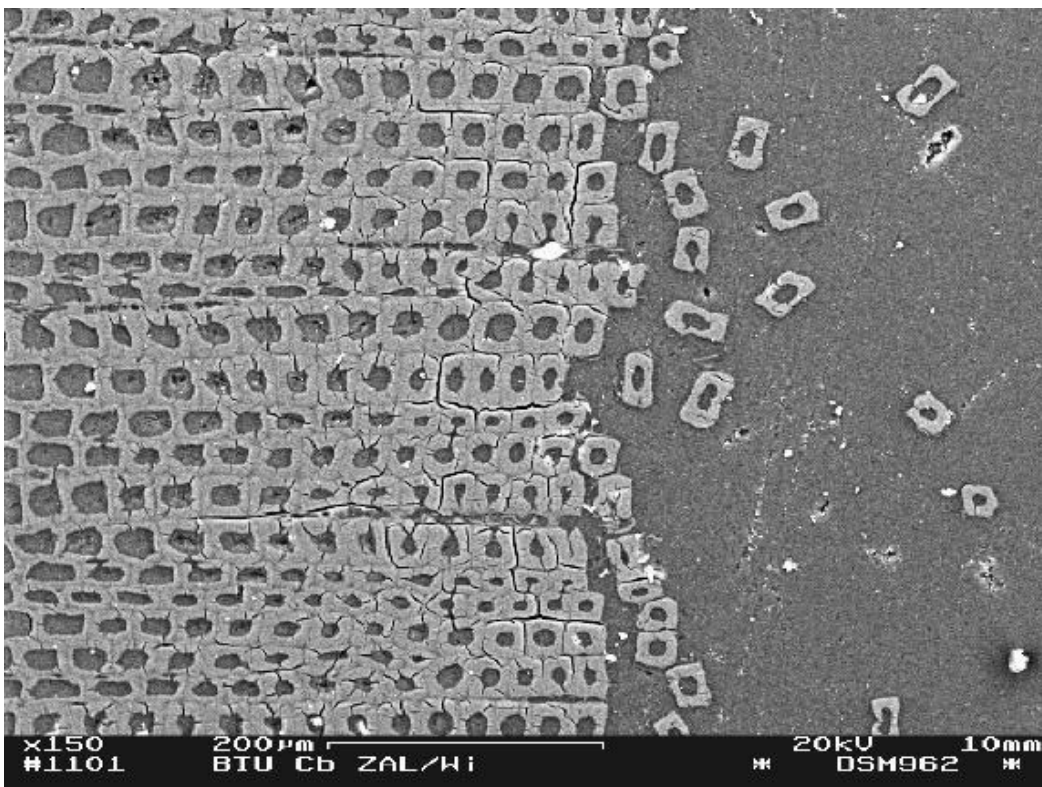


Bild 3.5 Abgelöste Spätholzzellen

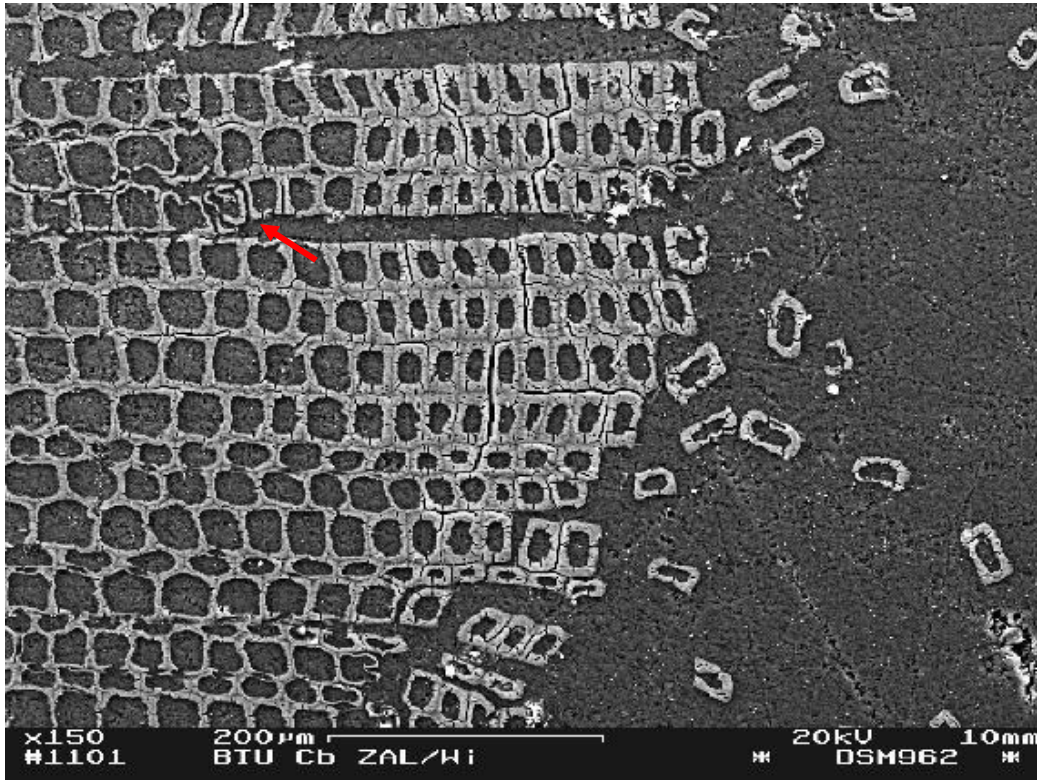


Bild 3.6 Abgelöste Zellen bzw. Zellgruppen. Entlang der Harzstrahlen scheint die Schädigung tiefer zu gehen (Pfeil).

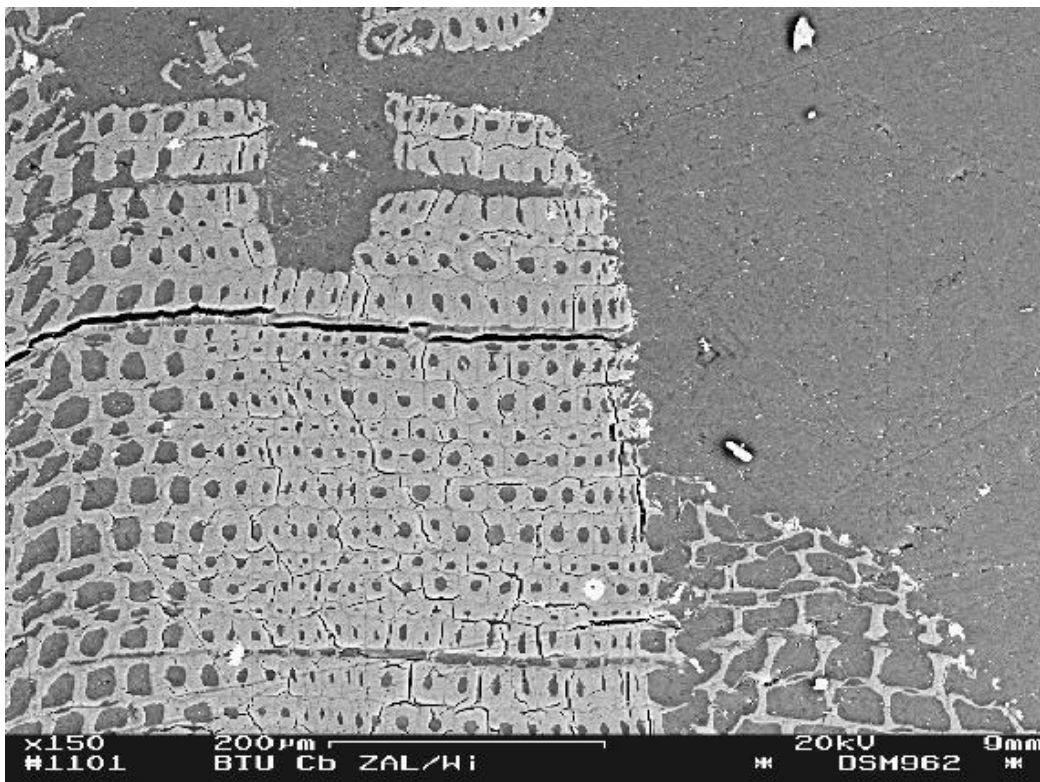


Bild 3.7 Referenzprobe vom Ostflügel (Dachstuhl Lutherhalle Wittenberg). Die schwarzen Risse sind infolge der Epoxidharzeinbettung entstanden und sind nicht der eigentlichen zu untersuchenden Materialschädigung zuzuordnen.

3.5 Mechanisch – technologische Prüfungen an labormäßig beanspruchten Proben

3.5.1 Versuchsziel

Mit Salzlösungen behandelte Proben aus KiefernSplintholz wurden einer definierten Wechselklimabeanspruchung ausgesetzt. Nach bestimmten Zyklen wurden Biegeversuche zum Nachweis von Veränderungen der Festigkeit und des Verformungsverhaltens durchgeführt. Außerdem wurden korrosive Veränderungen an den Proben untersucht.

3.5.2 Versuchsdurchführung

Proben

Um größtmögliche Effekte zu erreichen, wurde der Probenquerschnitt – hier besonders die statische Höhe – sehr klein gewählt. Aus Leisten (ca. 14 x 4 mm) wurden 100 mm lange fehlerfreie Stücke heraus getrennt. Fehlerfrei bedeutet in dem Sinne, frei von Ästen, Rissen und biologischen Schädigungen. Die Faserrichtung verläuft annähernd parallel zu den Seitenflächen der Probe. Außerdem verläuft eine Querschnittskante der Probe in radialer Richtung (parallel der Holzstrahlen). (Bild 3.8).

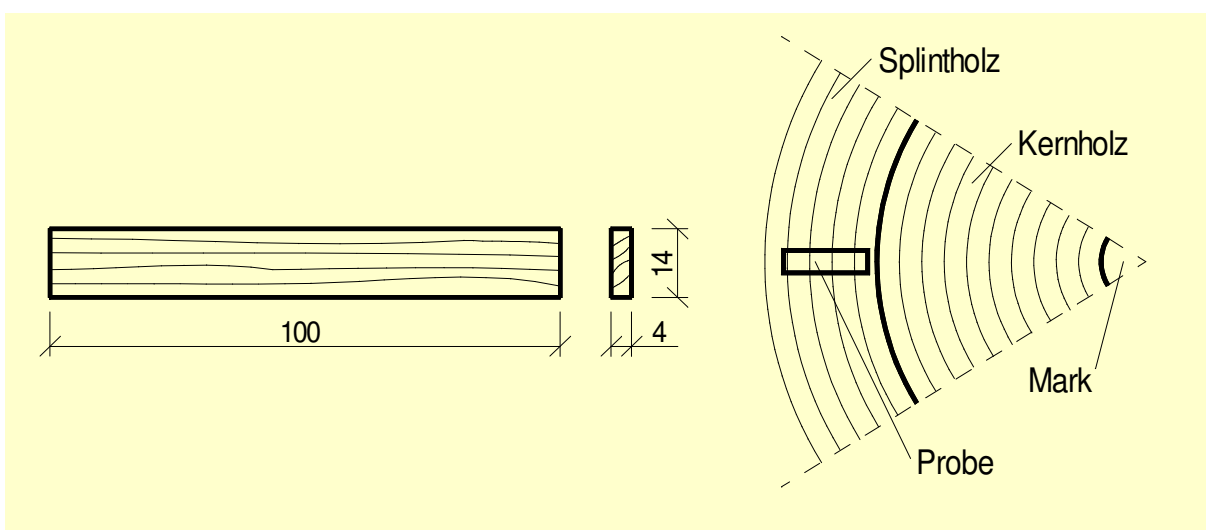


Bild 3.8 Probenbeschaffenheit (alle Angaben in mm) und Einschnittbereich

Behandlung

Hierbei sollten die Verhältnisse wirklichkeitsnah simuliert werden, welche zur korrosiven Schädigung von Dachstuhlholzern nach entsprechenden Behandlungen mit Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln führen.

Als korrosiv wirkende Chemikalie wurde ein Gemisch aus 20 % iger $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – und 20 % iger $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – Lösung (Mischungsverhältnis 1 : 1) hergestellt. Beide Salzlösungen waren Hauptbestandteil von Flammschutzmitteln (Abschnitt 2.1.1) und wurden auch signifikant bei den Ionenanalysen nachgewiesen, (Abschnitt 3.2.4.1).

Als Wechselklimabeanspruchung kamen zwei Zyklen zur Anwendung, (Übersicht 3.4 und 3.5).

Zyklus I			
Zeitdauer t [h]	Temperatur θ [°C]	rel. Luftfeuchte ϕ [%]	Hintergrund
24	23	70	Es sollte eine Holzfeuchte von $u \approx 13 \dots 14$ % erreicht werden. Dieser Wert entspricht der auf den Dachstühlen vorherrschenden mittleren Ausgleichsfeuchte, welche in etwa vor dem Aufbringen der Schutzmittel existent gewesen sein muss.
Besprühen der Proben mit o. g. Salzlösung / mit Wasser*			
24	40	25	Damit wurden die auf dem Dachstuhl ermittelten Tagesgänge simuliert, (Abschnitt 3.2.1.3).
24	23	90	

*) die eine Hälfte der Proben wurden beidseitig mit Salzlösung, die andere Hälfte mit Wasser besprüht (Nullproben) und nach einer Eindringzeit der Flüssigkeit von insgesamt 20 min wieder in den Klimaschrank gebracht.

Übersicht 3.4 Zyklus I

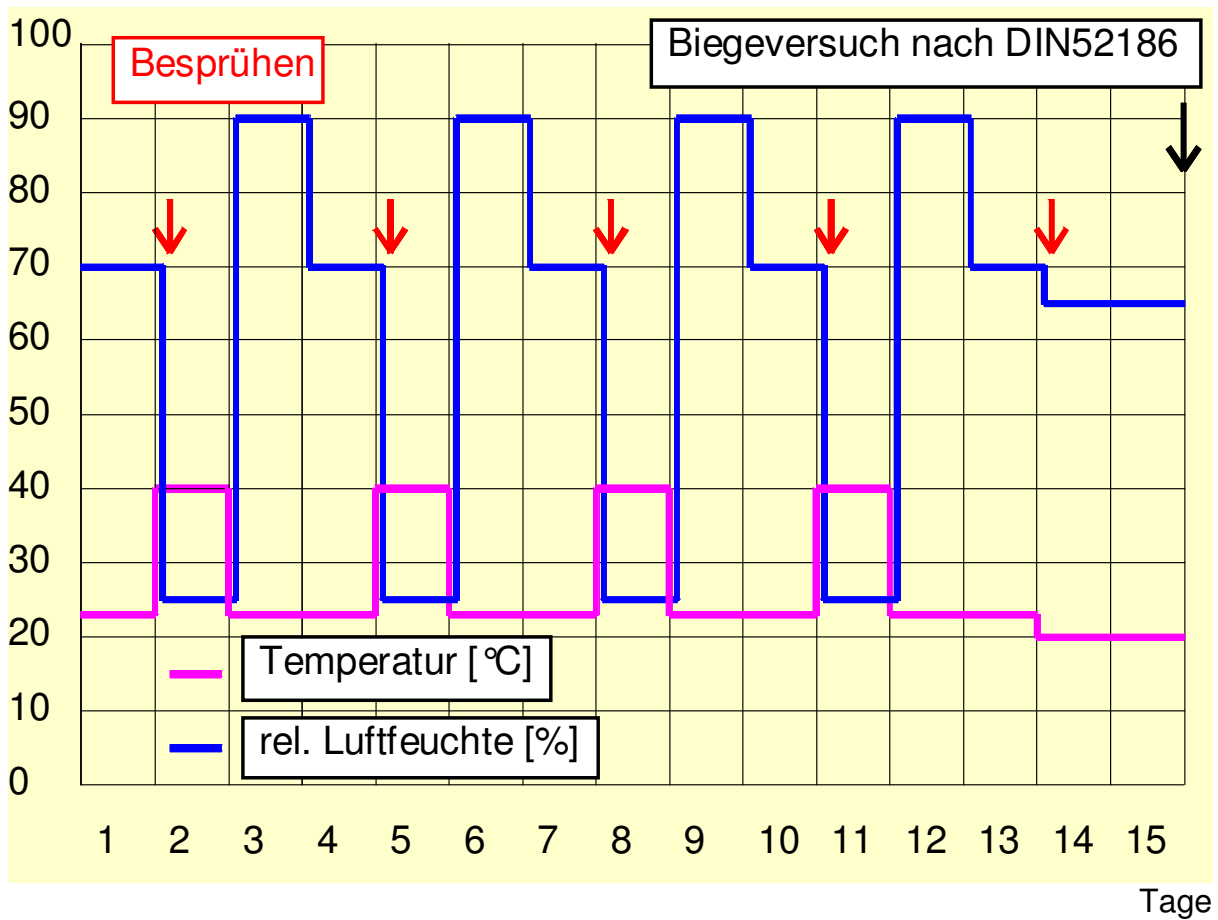


Diagramm 3.40 Schematische Darstellung der Zyklen I zwischen zwei Biegeprüfungen

Zyklus II			
Zeitdauer t [h]	Temperatur θ [°C]	rel. Luftfeuchte ϕ [%]	Hintergrund
24	40	25	Weitere Simulation der Tagesgänge ohne Aufbringen von Salzlösung
24	23	90	

Übersicht 3.5 Zyklus II

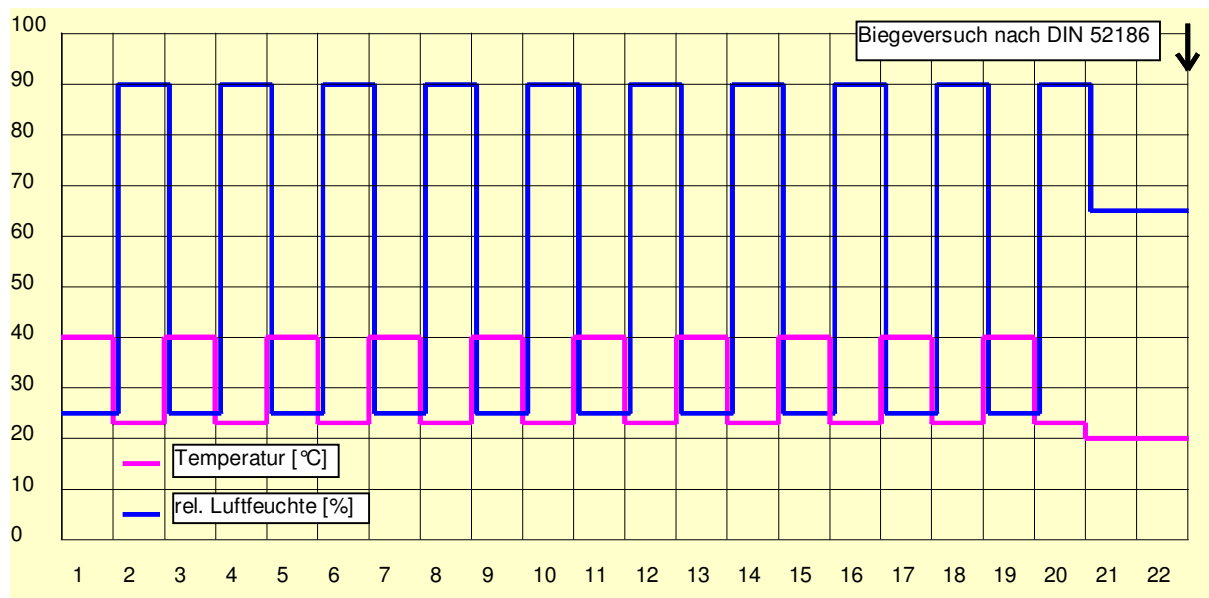


Diagramm 3.41 Schematische Darstellung der Zyklen II zwischen zwei Biegeprüfungen

Beanspruchungszyklen

Nach jeweils 4 x Zyklus I wurden Biegeversuche an 5 mit Salzlösung beaufschlagten Proben und an 5 Nullproben durchgeführt, (Diagramm 3.40).

Nach 30 Zyklen war das Salzaufnahmevermögen der Proben erschöpft, so dass auf Zyklus II umgestellt wurde. Jetzt wurden nach jeweils 10 Zyklen Biegeversuche durchgeführt. (Diagramm 3.41).

Salzaufnahme

Im Diagramm 3.42 ist die Salzaufnahme $A_{F(n)}$ in Abhängigkeit der Anzahl der Behandlungen n dargestellt, dazu wurden 5 Proben unmittelbar vor dem Besprühen mit Salzlösung gewogen $m_{70(0)}$ bzw. $m_{70(n)}$ oder – anders ausgedrückt – nach $\theta = 23^\circ\text{C}$ und $\phi = 70\%$ und daraus die Salzaufnahme berechnet. Bei $\phi = 70\%$ ist noch keine zusätzliche Wasseraufnahme durch die hygroskopische Wirkung der Salze zu erwarten, so dass annähernd die Beziehung $m_{\text{Salz}} = m_{70(n)} - m_{70(0)}$ gilt.

$$A_{F(n)} = \frac{m_{70(n)} - m_{70(0)}}{A} \quad (3.14)$$

$A_{F(n)}$	Salzaufnahme in g/m^2
$m_{70(n)}$	Masse bei $\phi = 70\%$ nach n mal Besprühen mit Salzlösung in g
$m_{70(0)}$	Masse der Nullprobe bei $\phi = 70\%$ in g
A	abgewickelte Fläche der Probe in mm^2

$$A = (0,10 \times 0,014 + 0,10 \times 0,004 + 0,014 \times 0,004) \times 2 = 0,0019 \text{ m}^2$$

Durch die Probenbeschaffenheit wird die größere Flüssigkeitsaufnahme an den Stirnflächen relativiert.

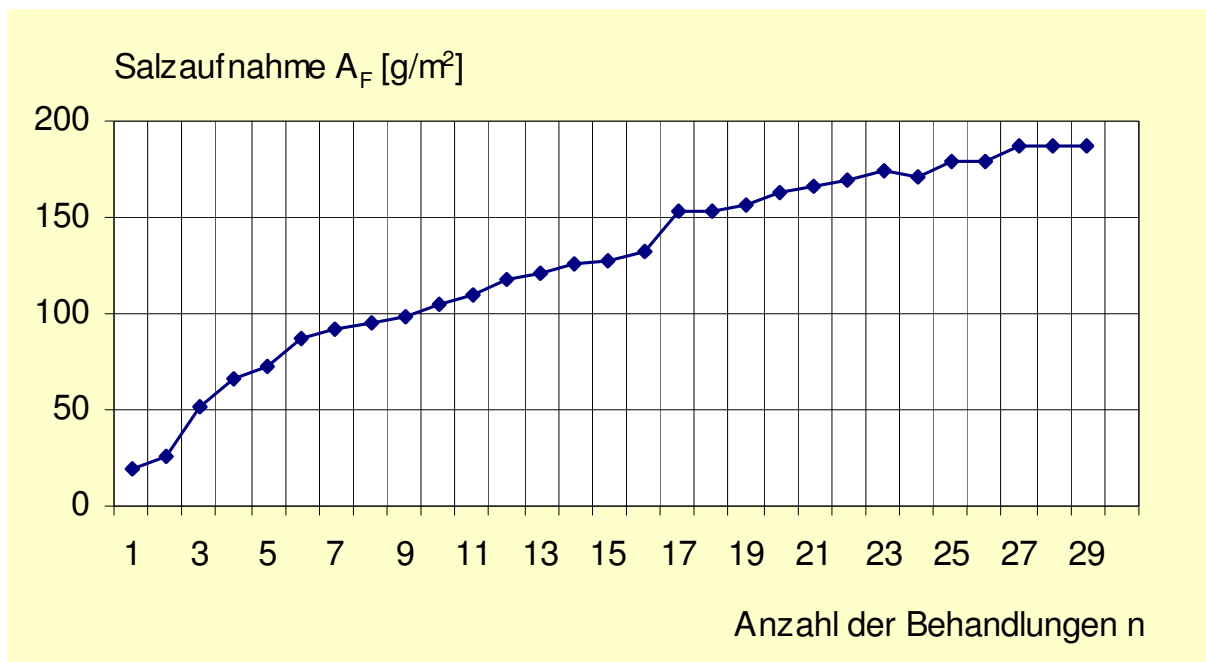


Diagramm 3.42 Salzaufnahme in Abhängigkeit der Anzahl der Aufträge von Salzlösung (Besprühen)

Biegeversuch in Anlehnung an DIN 52186

Vor den Biegeversuchen wurden alle Proben im Normalklima $\theta = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 65\%$ bis zur Gewichtskonstanz nach DIN 52183 gelagert.

Als statisches System wurde die Dreipunktbelastung gewählt. Die statische Höhe beträgt ca. 4 mm.

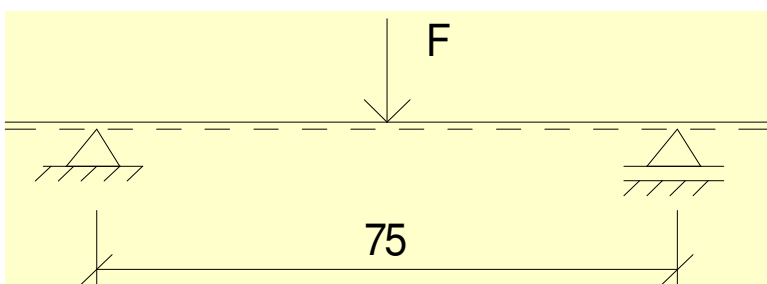


Bild 3.9 Statisches System einer Dreipunktbelastung

Die Prüfgeschwindigkeit v_F wurde so gewählt, dass nach ca. 1 bis 2 min die Höchstlast, in diesem Fall die Bruchlast, erreicht wird. Die Versuche wurden mit einer Wegsteuerung gefahren. Die Vorlast F_V muss etwa $1/5$ der Höchstlast $\max F$ betragen.

Prüfgeschwindigkeit $v_F = 3 \text{ mm/min}$

Vorlast $F_V = 60 \text{ N}$

Aus der elastischen Durchbiegung der Probe wurde zuerst der Biegeelastizitätsmodul E_B bestimmt. Dazu wurden jeweils 3 Messungen durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Die Messung der mittigen Durchbiegung erfolgte mit einem externen Wegaufnehmer.

$$E_B = \frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (3.15)$$

Danach wurde der Wegaufnehmer entfernt, die Probe entlastet und anschließend die Last bis zum Versagen (Bruch) der Probe aufgebracht. Aus der Höchstlast $\max F$ berechnet sich die Biegefestigkeit wie folgt:

$$\sigma_B = \frac{3 \cdot \max F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3.16)$$

$\max F$ Höchstlast (Bruchlast) in N

h Probenhöhe in mm

b Probenbreite in mm

l Stützweite in mm, $l = 75 \text{ mm}$

σ_B Biegefestigkeit in N/mm^2

E_B Biegeelastizitätsmodul in N/mm^2

ΔF Kraftdifferenz im elastischen Verformungsbereich der Probe in N

Δf die der Kraftdifferenz ΔF entsprechende Durchbiegung in Probenmitte in mm

3.5.3 Ergebnisse / Auswertung

Die Einzelergebnisse der Prüfung sind tabellarisch in Anlage G zusammengestellt.

Bezeichnungen:

I – 5 ref / salz Zyklus – Anzahl der Zyklen, Referenzprobe / mit Salzlösung
besprühte Probe

l_{Pr} Länge der Probe in mm

3.5.3.1 Abhängigkeit von Biegeelastizitätsmodul und Biegefestigkeit von der Rohdichte der Nullproben

Die Diagramme 3.43 und 3.44 zeigen die Abhängigkeit des Biegeelastizitätsmoduls E_B und der Biegefestigkeit σ_B von der Rohdichte ρ_R der Nullproben.

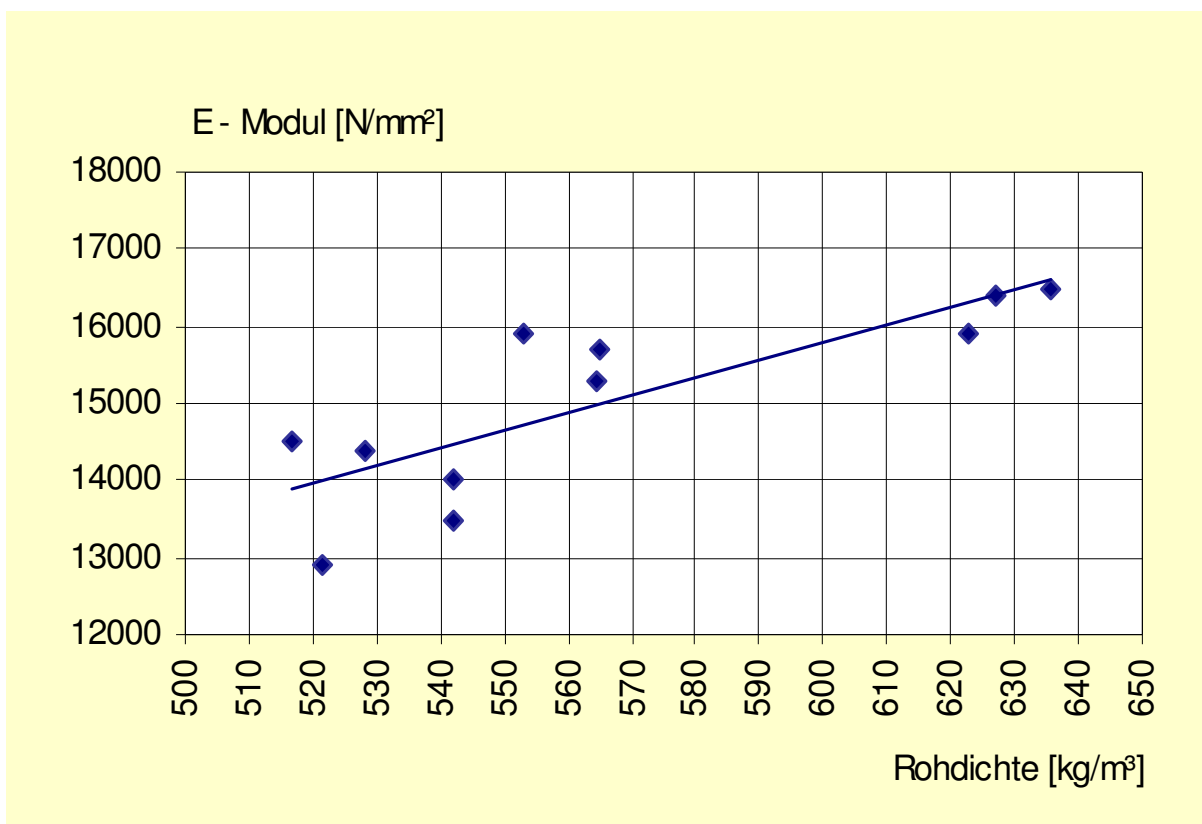


Diagramm 3.43 Biegeelastizitätsmodul in Abhängigkeit der Rohdichte (Nullproben)

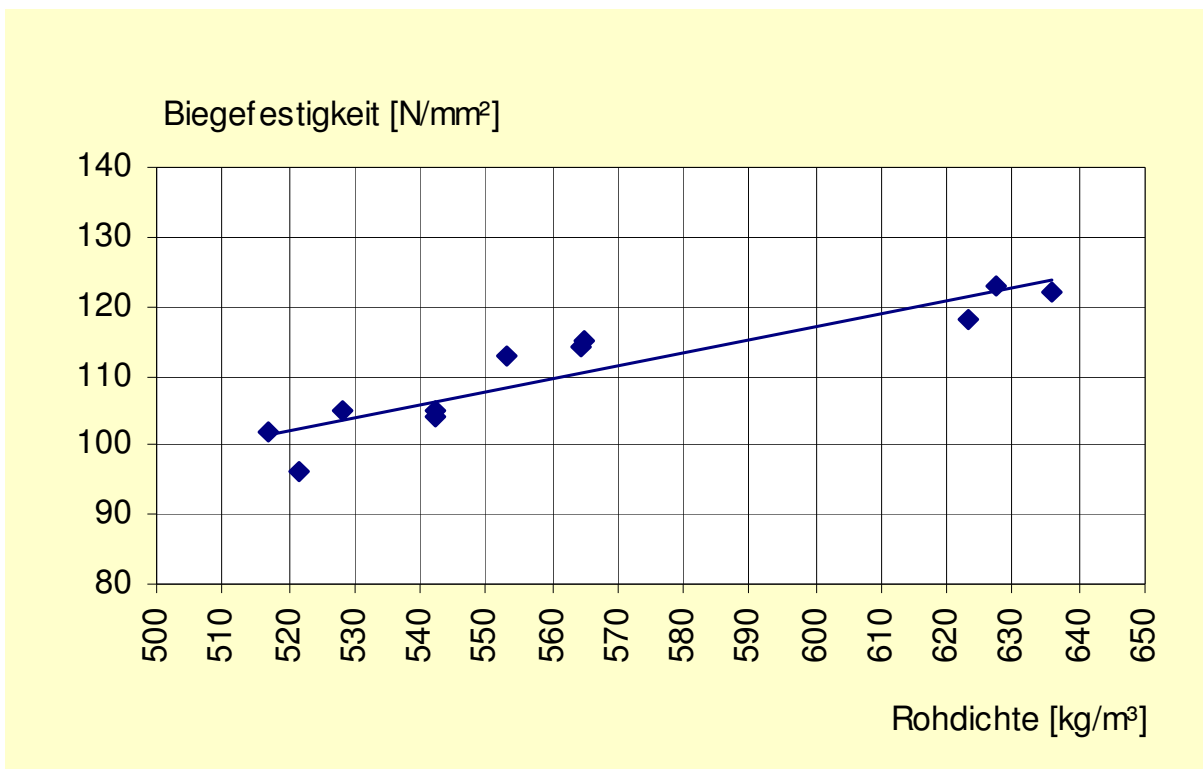


Diagramm 3.44 Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte (Nullproben)

Kiefernholz besitzt nach DIN 68364 eine mittlere Rohdichte von $\rho_R = 520 \text{ kg/m}^3$. Die ermittelten Rohdichten der Proben liegen teilweise erheblich über den in der DIN angegebenen Werten. Zwischen E – Modul / Rohdichte und Biegefestigkeit / Rohdichte existieren lineare Korrelationen. Dieser Trend wird durch die eigenen Untersuchungen bestätigt. Die vergleichsweise hohen Elastizitäts- und Festigkeitswerte der Proben sind folgendermaßen begründet:

- überdurchschnittlich hohe Rohdichte,
- weitestgehende Fehlerfreiheit der Proben,
- kleine Prüfkörper,
- geringe Jahrringbreite.

In DIN 68364 ist eine mittlere Biegefestigkeit von $\sigma_B = 80 \text{ N/mm}^2$ und ein mittlerer E – Modul von $E = 11000 \text{ N/mm}^2$ angegeben.

In den Diagrammen 3.43. und 3.44 sind außerdem die natürlichen Streuungen der Eigenschaften im Probenumfang ersichtlich.

3.5.3.2 Entwicklungen von E – Modul und Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Zyklen (Dauer der Wechselklimabeanspruchung)

Die Abhängigkeiten sind in den Diagrammen 3.45 und 3.46 dargestellt.

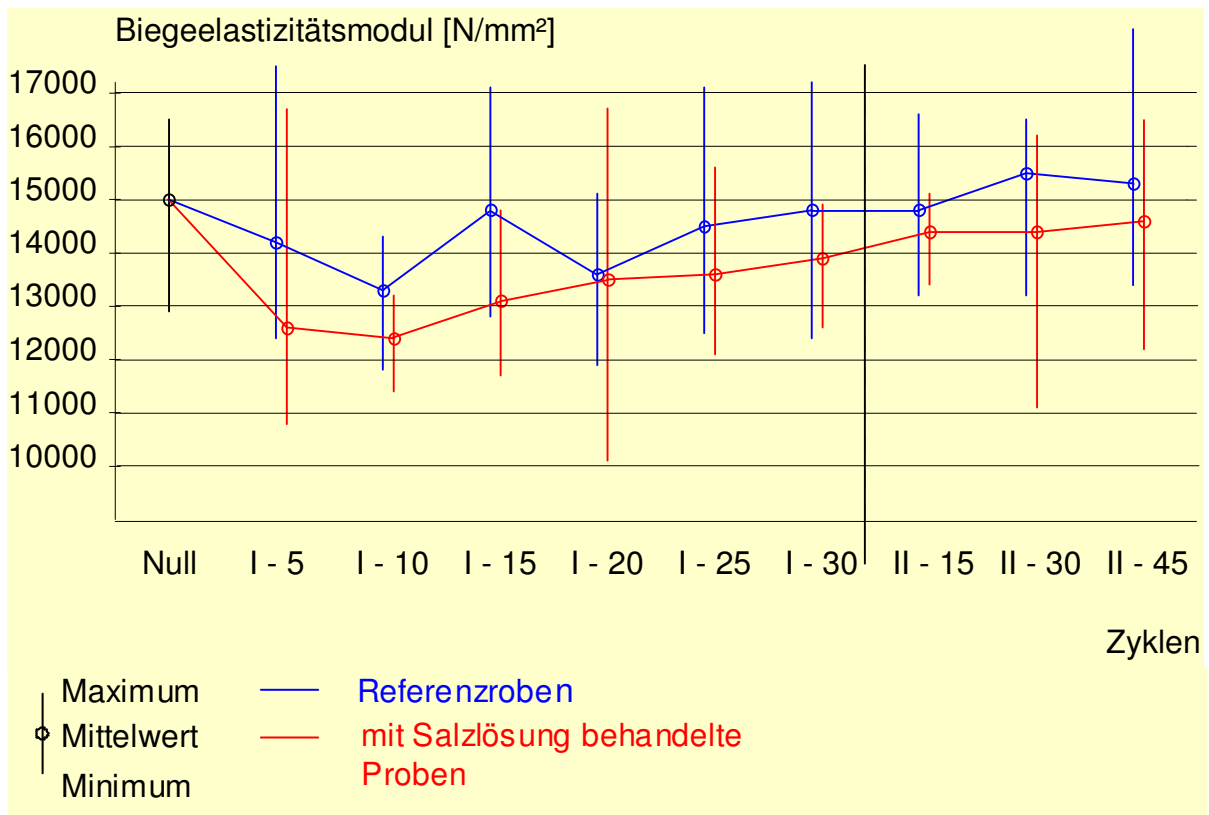


Diagramm 3.45 Entwicklung des Biegeelastizitätsmodul in Abhängigkeit der Anzahl der Behandlungszyklen

Bei den Referenzproben ist kein deutlicher Trend abzuleiten. Dagegen fällt bei den mit Salzlösung behandelten Proben der starke anfängliche Abfall des E-Moduls auf. Nach etwa 10 Behandlungszyklen I scheint der Biegeelastizitätsmodul aber wieder ständig zu steigen und erreicht bei der Umstellung auf Zyklus II fast den Ausgangswert der Nullprobe.

Mit fortschreitender Anzahl von Zyklus I wird immer mehr Salzlösung in die hölzernen Proben eingebracht. Das Salz nimmt nach der Kristallisation als voluminöse Kristalle im Kapillarsystem örtlich ein größeres Volumen ein. Dadurch könnte auch eine Verbundwirkung mit der Holzsubstanz entstehen, was zu einer Erhöhung der Steifigkeit führt und somit ein Ansteigen des E – Moduls verursacht. Dieser Effekt überlagert offensichtlich im Versuchszeitraum – also auch noch nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen – die strukturschädigende Wirkung der Salze auf den Biegeelastizitätsmodul durch die örtliche Bildung von voluminösen Salzkristallen in höherer Konzentration.

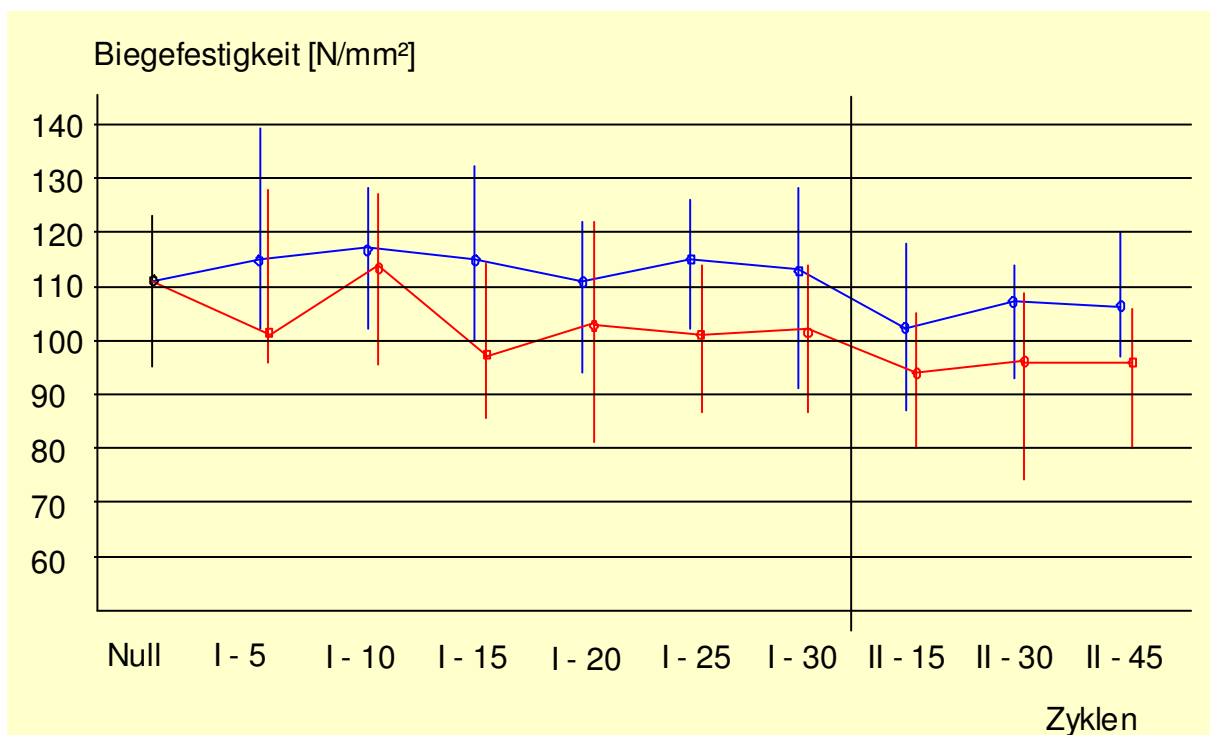


Diagramm 3.46 Entwicklung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Behandlungszyklen

Die Biegefestigkeit verhält sich anders. Diese sinkt bei den mit Salzlösung behandelten Proben gegenüber der Nullprobe um ca. 14 % und liegt im Mittel etwa 10 % unter der Biegefestigkeit der Referenzproben, wobei die Differenz zwischen Referenz- und mit Salzlösung behandelten Proben nicht größer zu werden scheint.

Offensichtlich gewinnt hier die strukturschädigende Wirkung der Salze an Einfluss auf die Biegefestigkeit. An den mit Wasser behandelten Referenzproben scheint auch ein geringer Festigkeitsverlust nachweisbar zu sein: Wasser löst bei niedrigen Temperaturen die wasserlöslichen Inhaltsstoffe heraus, bei höheren Temperaturen werden Hemizellulosen abgebaut.

3.5.3.3 Fehlerdiskussion

Die Versuchsergebnisse werden aufgrund unübersehbarer, störender Einflüsse, Unzulänglichkeiten subjektiver Beobachtung und natürlicher Streuungen von Werkstoffeigenschaften und Versuchsparametern beeinflusst.

Biegeelastizitätsmodul und Biegefestigkeit werden jeweils nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen an einer Stichprobe mit einem Umfang $n = 5$ (Nullprobe $n = 11$) ermittelt. Die Versuchsbedingungen streuen innerhalb dieser Stichprobe und auch von Stichprobe zu Stichprobe. Als Gründe dafür sind anzuführen:

- ***Natürliche Streuung der Werkstoffeigenschaften (Jahrringbreite, Faserabweichungen, Dichte, Abmessungen usw.)***

Die natürliche Streuung der Werkstoffeigenschaften spiegelt sich in der Streuung der Werte von Biegeelastizitätsmodul und Biegefestigkeit wieder, (Diagramme 3.43 und 3.44).

- ***Die sich einstellende Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Biegeversuche nach Normklimalagerung.***

Um diesen Einfluss auf die Ergebnisse zu erfassen, wurde an den Nullproben, an den Referenzproben und an den mit Salzlösung behandelten Proben nach Ablauf des letzten Zyklus die Holzfeuchte mittels der Darmmethode ermittelt, (Tabelle 3.10).

Holzfeuchte		
U _{Null} [%]	U _{II-45ref} [%]	U _{II-45salz} [%]
13,8	14,2	14,2
14,1	13,9	13,7
14,3	14,2	13,6
15,3	14,1	14,0
14,3	14,2	14,0
14,1		
14,2		
13,9		
14,2		
14,1		
14,2		
$\bar{u}_{\text{Null}} = 14,2 \%$	$\bar{u}_{\text{II-45ref}} = 14,1 \%$	$\bar{u}_{\text{II-45salz}} = 13,9 \%$
S _{Null} = 0,39	S _{II-45ref} = 0,33	S _{II-45salz} = 0,24

* Vor dem Normalklima wurde immer das Klima $\theta = 23^\circ\text{C}$ / $\phi = 90 \%$ durchlaufen

Tabelle 3.10 Holzfeuchte (Mittelwert \bar{u} und Standardabweichung S) bei Desorption*

Die Holzfeuchten liegen sowohl innerhalb der Stichprobe als auch zwischen den Stichproben ziemlich dicht beieinander, so dass die Holzfeuchtedifferenzen ($\Delta u = 0,9 \%$) nur einen sehr untergeordneten Einfluss auf den Biegeelastizitätsmodul und die Biegefestigkeit haben können.

- **Unterschiedliches Flüssigkeits- und damit Salzaufnahmevermögen der einzelnen Proben**
- **Handlungen und subjektive Beobachtung (Besprühen, Ausmessen der Probe, Wägen usw.)**

Diese Faktoren können unter Ausschaltung aller systematischen Fehler und evtl. erfolgter Korrekturen als zufällige Fehler zusammengefasst werden. Um eine quantitative Aussage über die wahrscheinliche Abweichung vom wahren Wert zu erhalten, sind die Stichprobenumfänge zu gering.

3.5.3.4 Mikroskopische Strukturuntersuchungen

Nach der Beanspruchung 30 x Zyklus I und 45 x Zyklus II waren makroskopisch keine oder noch keine für eine chemische Korrosion in Form von „Mazeration“ typischen Strukturschädigungen erkennbar. Lediglich auf der Oberfläche entstanden weiße kristalline Ausblühungen.

Auch die Bruchbilder zeigten bei Biegebelastung gegenüber den Nullproben keine makroskopischen Abweichungen. Die Brüche gestalteten sich meist langfasrig – vor allem in der Zugzone, wobei bei den mit Salzlösung behandelten Proben die oberflächennahe Schicht unter der Lupe etwas zerfaserter erschien.

Die mikroskopische Untersuchung mittels Auflichtmikroskop ergab tatsächlich eine Separation der Zellen bei langfasrigen Brüchen in der Zugzone, (Bild 3.10). Die Struktur der oberflächennahen Schicht ist im Unterschied zu den Referenzproben teilweise bis zur Einzelzelle aufgelöst. Das deutet auf eine beginnende Strukturschädigung in Form von „Mazeration“ hin.

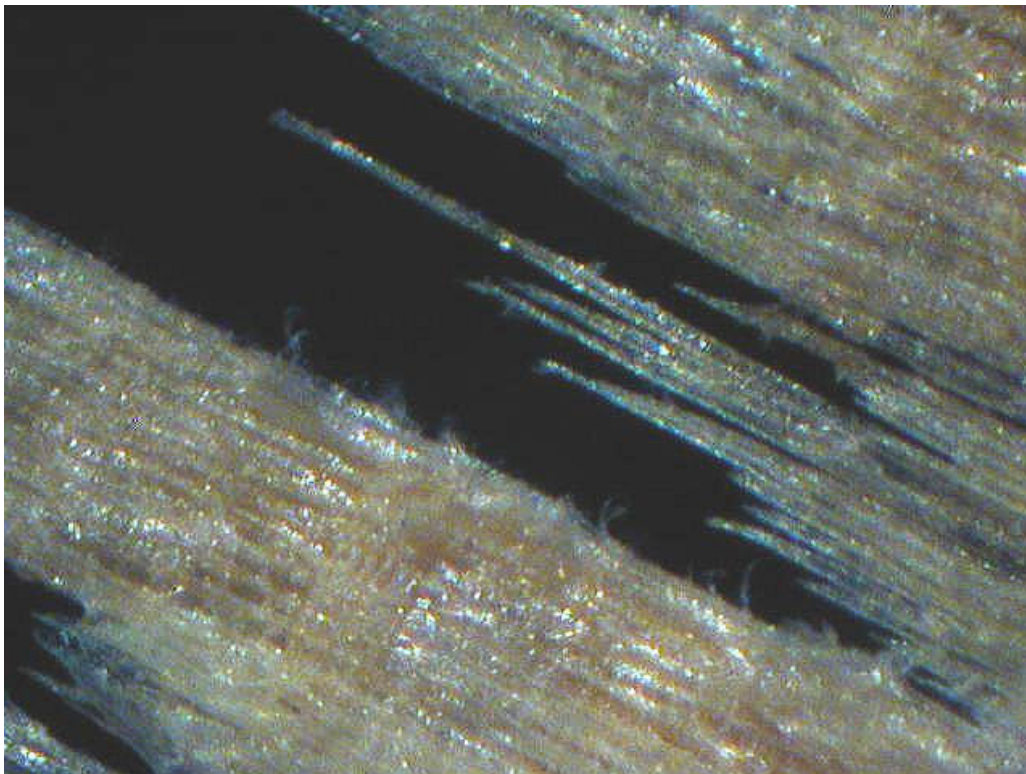


Bild 3.10 Separation von Fasertracheiden (Bildmitte) in der Zugbruchzone beim Biegeversuch

3.6 Verlauf der Holzfeuchte unter der geschädigten Oberflächenschicht

Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen steht die Fragestellung ob infolge der hohen Salzgehalte an der Holzoberfläche ein starker Holzfeuchtegradient – zumindest temporär bei Änderung der Umgebungsbedingungen – zwischen Oberfläche und Holzinnerem ausgebildet wird.

Dazu wurde an mit Salzlösung behandelten und der definierten Wechselklimabeanpruchung ausgesetzten Proben (Abschnitt 3.4) stündlich die Holzfeuchte u mittels Darrmethode bei einem Wechsel von Klima $\theta = 40^\circ\text{C} / \phi = 25\%$ auf Klima $\theta = 23^\circ\text{C} / \phi = 90\%$ ermittelt (im Zyklus II-45). Um den Gradienten zwischen Oberfläche und Tiefe feststellen zu können, wurde nach folgendem Schema beprobt, (Bild 3.11):

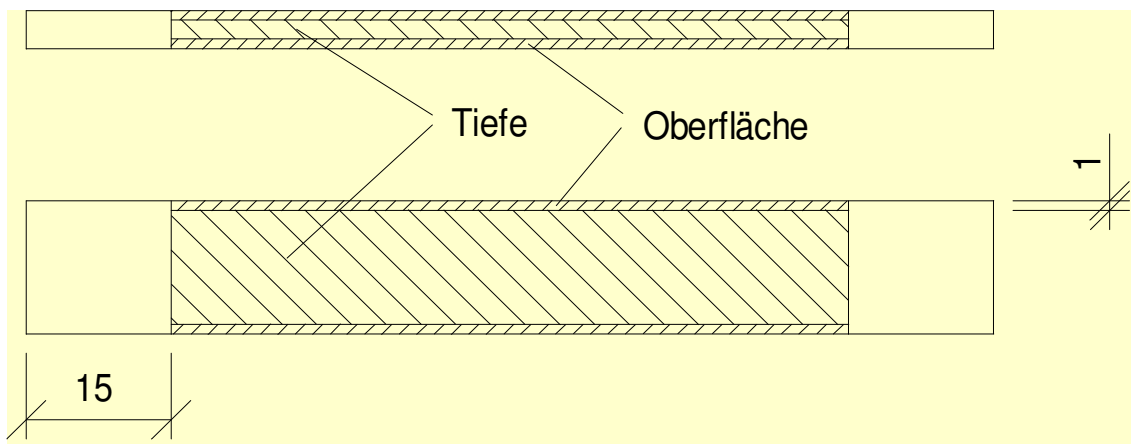


Bild 3.11 Beprobungsschema. Die Hirnholzbereiche (ca. 15 mm) wurden nicht beprobt um den Einfluss der größeren Salzaufnahme und Feuchtaufnahme bzw. -feuchteabgabe weitestgehend auszuschließen.

Die Holzfeuchten (u) sind im Diagramm 3.47 dargestellt.

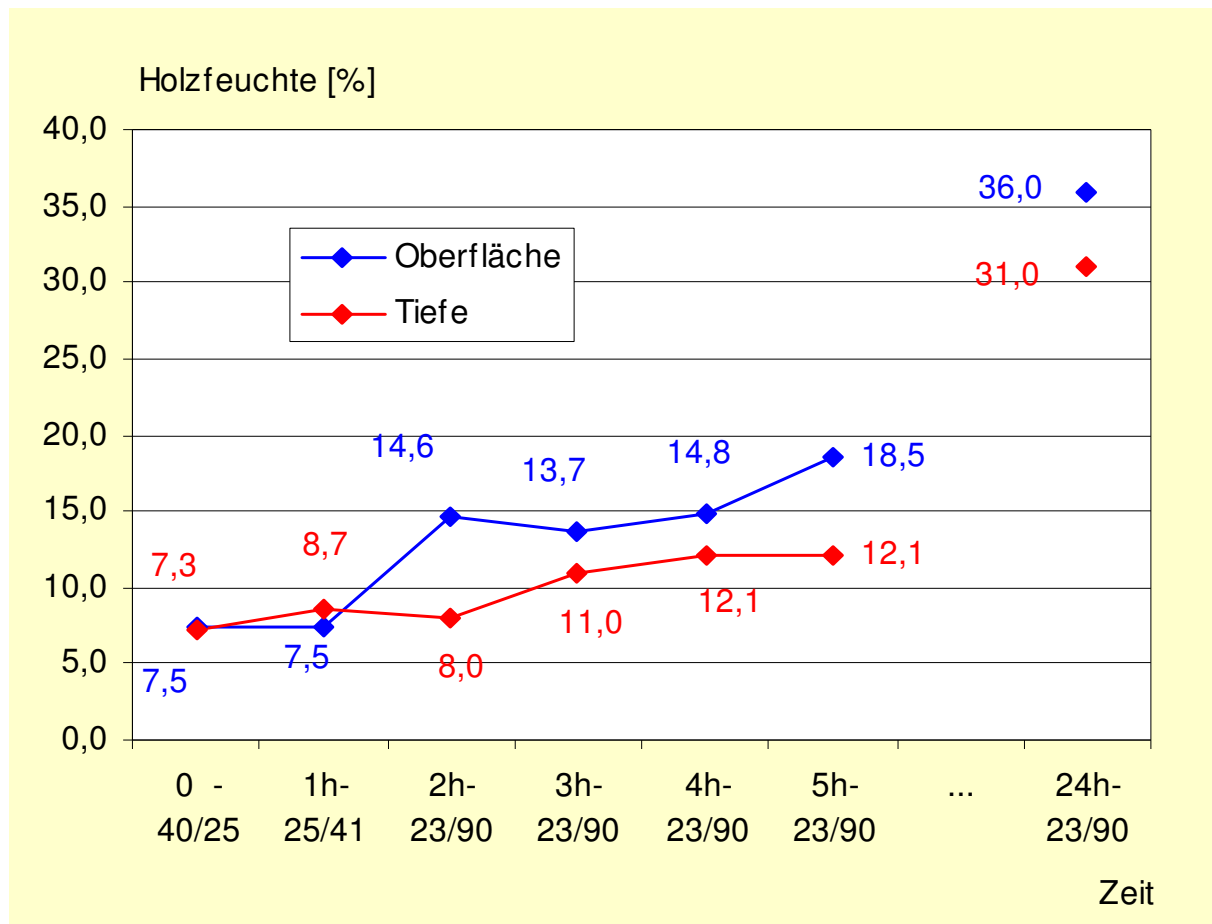


Diagramm 3.47 Abhängigkeit der Holzfeuchte von der Zeit beim Übergang von

$\theta = 40^\circ\text{C} / \phi = 25\%$ auf $\theta = 23^\circ\text{C} / \phi = 90\%$.

Beprobt wurden Hölzer im Zyklus II-45. Unter Berücksichtigung der natürlichen Streuung der Hölzer und des unterschiedlichen Aufnahmevermögens der Salzlösung stellt sich immer ein mehr oder weniger großes Holzfeuchtegefälle von der Oberfläche ausgehend ein.

Parallel wurde die Holzfeuchte einer Nullprobe nach 24 Stunden $\theta = 23^\circ\text{C} / \phi = 90\%$ gemessen: $u_{\text{Oberfläche}} = 21,7\%$ und $u_{\text{Tiefe}} = 22,0\%$. Die Holzfeuchte entspricht derjenigen des unbehandelten Nadelholzes bei $\phi = 90\%$. Auch nach einem 24 Stundenzyklus ist kein Holzfeuchtegefälle zwischen Oberfläche und Tiefe festzustellen. Es hat sich also überall in der Nullprobe die Ausgleichsholzfeuchte eingestellt.

Eine ähnliche Tendenz ist auch nach der Beprobung einer stark durch chemische Holzkorrosion geschädigten Dachlatte festzustellen. Außerdem galt es hier festzustellen, wie sich die stark versalzene Oberflächenschicht auf die Holzfeuchte der darunter liegenden Schichten auswirkt. Die Dachlatte wurde einer Klimabeanspruchung jeweils 24 Stunden $\theta = 35^\circ\text{C} / \phi = 35\%$ im Wechsel mit $\theta = 23^\circ\text{C} / \phi = 90\%$ ausgesetzt und nach jedem Zyklus nach dem Schema (Bild 3.12) beprobt.

Ein Teil der mazerierten Oberflächenschicht wurde vor dem Zyklus immer entfernt, so dass nach einem Zyklus die Holzfeuchte mit und ohne Einfluss der geschädigten und stark versalzene Schicht erfasst werden konnte.

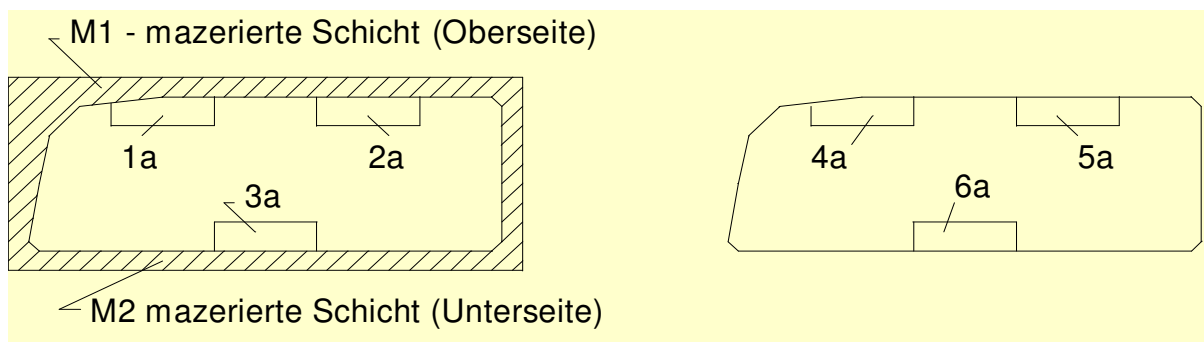


Bild 3.12 Beprobungsschema (Dachlatte)

Die Bestimmung der Holzfeuchte an den mit einem Forstnerbohrer entnommenen Proben erfolgte nach der Darmmethode. Die Ergebnisse sind im Diagramm 3.48 dargestellt.

In Auswertung der Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Feuchtaufnahme der mazerierten und versalzene Oberflächenschicht (Probe M1 und M2) ist erwartungsgemäß groß infolge der hygroskopischen Wirkung der Salze. Dies drückt sich in Holzfeuchten $u = 31$ bis 47% bei einer rel. Luftfeuchte von $\phi = 90\%$ aus.
- Zwischen den Proben unter der mazerierten Schicht (1a bis 3a) und den Proben nach Entfernen der mazerierten Schicht (4a bis 6a) existieren hinsichtlich ihrer Holzfeuchte keine nennenswerten Unterschiede.

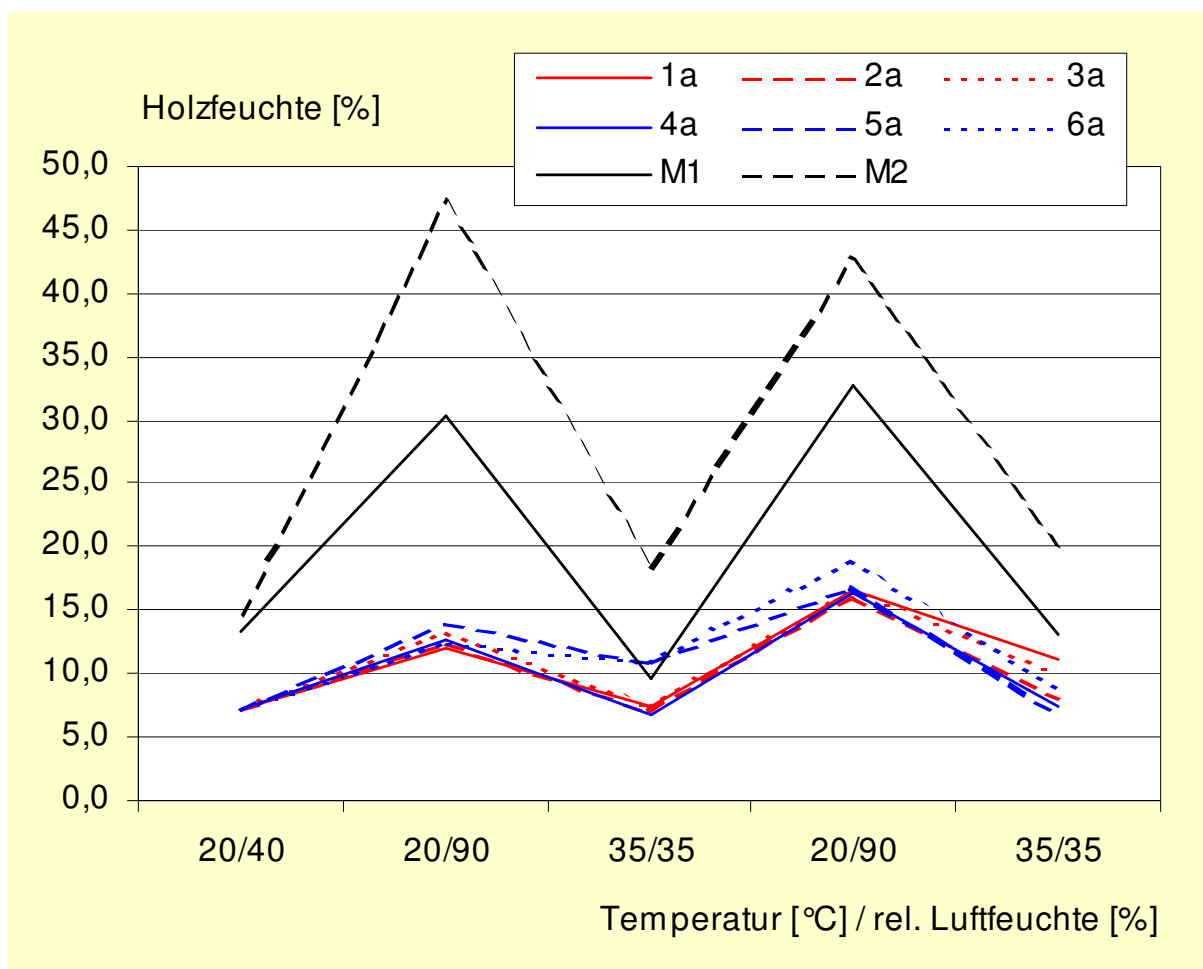


Diagramm 3.48 Holzfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen

- Insgesamt scheint sich die Holzfeuchte der Proben 1a bis 6a langsam „hochzuschaukeln“. Dies ist sicher auch darin begründet, dass unter den gewählten Klimabedingungen die Sorption schneller verläuft als die Desorption.

4 **Ableitung von Ursachen und Mechanismen der Schädigung aus den Untersuchungsergebnissen**

Es wird davon ausgegangen, dass bei dem hier vorliegenden Beanspruchungsfall, anorganische Salze aus Holz- und Flammschutzmitteln die Hauptursache für die chemische Korrosion mit dem Schadbild der „Mazeration“ darstellen.

4.1 **Aufnahme und Eindringverhalten der korrosionsauslösenden Holzschutz- und Holzflammschutzmittel**

Die flüssige Salzlösung wird direkt durch Streichen oder Sprühen ohne äußeren Druck mit der Holzoberfläche in Kontakt gebracht. Man spricht deshalb auch von einem drucklosen Verfahren gegenüber z.B. der Trogränkung oder der Druckimprägnierung, wo ein hydrostatischer bzw. hydraulischer äußerer Druck aufgebracht wird.

Holz kann als ein kapillarporöses Material betrachtet werden, d.h. es besteht aus einem miteinander verbundenen System von Kapillaren. Unterschieden werden muss zwischen Makro- ($r > 0,1 \mu\text{m}$) und Mikrokapillaren ($r < 0,1 \mu\text{m}$) [Langendorf 1976]. Die Mikrokapillaren können Flüssigkeit auch aus der Dampfphase aufnehmen. Dies ist die so genannte Kapillarkondensation.

In einer Kapillare, welche senkrecht in einer benetzenden Flüssigkeit steht, kann folgendes Kräftegleichgewicht aufgestellt werden, (Bild 4.1):

$$P r^2 \pi + K - S - R = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{mit } P = 0 \text{ und } R = 0 \quad \text{folgt: } K - S = 0 \quad (4.2)$$

$$K = 2r \pi \sigma \cos \nu \quad (4.3)$$

$$S = r^2 \pi h \rho g \quad (4.4)$$

Aus Gl. 4.2, 4.3 und 4.4 berechnet sich die Steighöhe:

Aus den Gleichungen sind folgende wichtige Abhängigkeiten ableitbar:

$h = f(1/r)$ Je kleiner der Kapillarradius, desto höher steigt die Flüssigkeit; aus (4.5)

$v = dh/dt = f(r)$ Je größer der Kapillarradius, desto größer die Sauggeschwindigkeit des Meniskus; aus (4.8)

$v = dh/dt = f(1/h)$ Je größer die Steighöhe, desto geringer die Sauggeschwindigkeit; aus (4.8)

Außerdem geht aus den Gesetzen der Kapillarphysik hervor, dass weite Kapillaren von engen ausgesaugt werden.

Diese bekannten Gesetzmäßigkeiten fließen nun in die weiteren Betrachtungen ein.

Ausgangszustand (Zustand vor der Schutzmittelbehandlung)

Das Holz besitzt zum Zeitpunkt vor der Behandlung im Oberflächenbereich eine Ausgleichsfeuchte von ca. $u \approx 12$ bis 18 % entsprechend der vorherrschenden relativen Luftfeuchte, (Abschnitt 3.2.1.3). Die Porenwände sind mit einer polymolekularen Wasserschicht mit Flüssigkeitscharakter bedeckt. Kapillarkondensation verursacht in Abhängigkeit vom Porendurchmesser eine zusätzliche Wassereinlagerung. In den makroskopischen Hohlräumen - z.B. Lumen, Tüpfelöffnungen - befindet sich kein Wasser.

Benetzung mit Schutzmittel - Salzlösung

Die Salzlösung tritt schnell in das zugängliche Makrokapillarsystem wie angeschnittene Tracheiden, Holzstrahlen, Tüpfelöffnungen aber auch Mikrorisse ein und kommt schnell zum Stehen, so dass die Makrokapillaren nur weniger Zellreihen (und das auch nicht überall) mit Salzlösung gefüllt sind, (Bild 4.2 (1)). Jede Zellwandöffnung (z.B. Hoftüpfel zwischen benachbarten Tracheiden, Tüpfel zwischen Längs- und

Holzstrahltracheiden) wirkt wie eine kurze Kapillare, die Öffnung füllt sich zwar noch mit Flüssigkeit, die dahinter liegende Kapillare mit größerem Durchmesser aber nicht.

In die Kapillaren der Zellwände erfolgt die Aufnahme langsamer, dafür aber tiefer, (Bild 4.2 (2)).

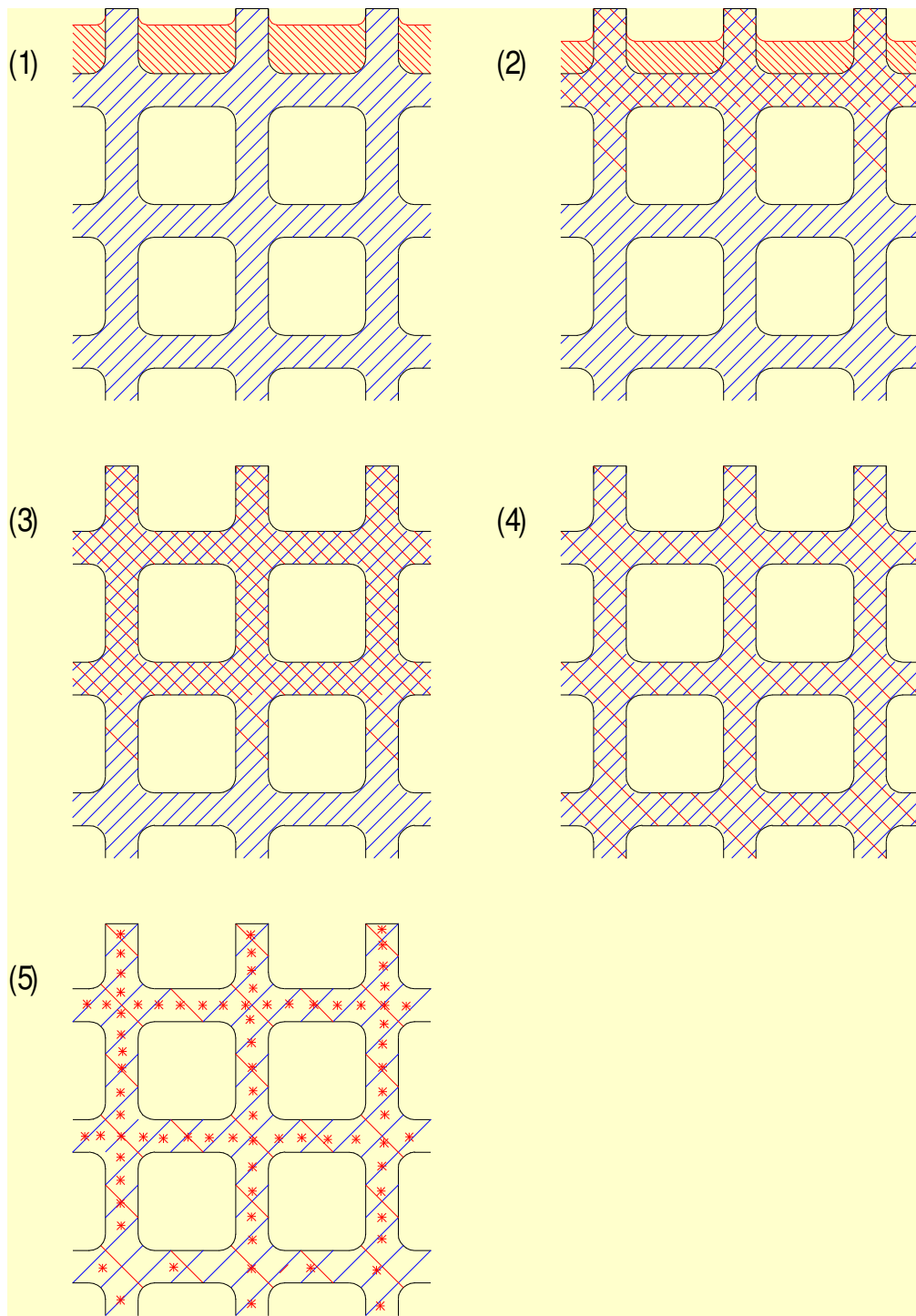


Bild 4.2 Schematische Darstellung der Salzaufnahme in die Hohlräume des Mikrokapillarsystems

Die gefüllten Makrokapillaren werden von den Mikrokapillaren ausgesaugt, so dass die Makrokapillaren bald wieder ohne Flüssigkeit sind. Die Salzlösung vermischt sich mit dem Wasser in den Mikrokapillaren der Zellwände. (Bild 4.2 (3)).

Lösungsdiffusion (nach der Behandlung)

Holz besitzt eine seiner Umgebung angepasste Ausgleichsfeuchte, d.h. in den Zellwänden ist immer ein bestimmter Anteil von Feuchtigkeit eingelagert. Stößt die Salzlösung auf das in den Mikrokapillaren vorhandene Wasser, kommt es zur sog. Lösungsdiffusion. Zunächst bildet sich eine klare Trennfläche zwischen den Flüssigkeiten. Die Ionen sind – ähnlich wie die Moleküle in einem idealen Gas – ständig in Bewegung, d.h. rein statistisch werden zuerst einige, in Abhängigkeit der Zeit immer mehr Salzionen die Grenzfläche durchdringen und auch wieder zurückkehren. Es entsteht eine Ionen – Bewegung von Bereichen mit hoher Konzentration zu Bereichen niedrigerer Konzentration und zwar solange bis ein Konzentrationsausgleich vollzogen ist. Das System befindet sich dann im Gleichgewicht.

Dieser Ausgleichsvorgang kann im sog. ersten FICK' schen Diffusionsgesetz beschrieben werden:

$$\frac{dm}{dt} = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (4.9)$$

dm/dt	Rate des Massentransfers pro Zeiteinheit in $kg/(cm^2s)$
D	Diffusionskoeffizient in $kg/(cms\%)$
dc/dx	Rate der Änderung der Konzentration in x-Richtung in $\%/cm$ (von der Grenzfläche weg)

Die praktische Bedeutung liegt nun darin, dass, nachdem die Salzlösung in den Kapillaren zum Stillstand gekommen ist, sich die Salze aus der Transportflüssigkeit entfernen und in das bereits vorhandene Wasser hinein diffundieren. Dies geschieht ebenfalls durch Zellwandbestandteile hindurch. Man spricht hier von der Permeabilität, also der Fähigkeit von Partikeln teilweise oder vollständig durch Membranen hindurch zu diffundieren. Es gilt der Grundsatz: Je mehr Feuchtigkeit in den Zellwänden

vorhanden ist, desto tiefer dringen die Salze in das Holz ein. Die Salzkonzentration wird aber insgesamt geringer. (Bild 4.2 (4)).

Die Diffusion ist von folgenden Faktoren abhängig [Buro 1956, Eaton 1993]:

- Feuchtigkeit - Die Diffusionsfähigkeit steigt mit der Holzfeuchtigkeit.

Manche Autoren gehen davon aus, dass bei den meisten Kernhölzern – z.B. Fichte, Douglasie – eine schnelle Diffusion nur im Makrokapillarsystem (Lumen) und diese deshalb dann bei Holzfeuchten unter 30 bis 35% (Fasersättigungsbereich) überhaupt nicht stattfinden kann [Eaton 1993]. Dies ist hier nicht relevant: Die Lumen sind nicht wie beim saftfrischen Holz mit Wasser gefüllt.

- Temperatur - Die Diffusionsfähigkeit steigt mit der Temperatur.

- Ionen-Ladung und Interaktion mit der Zellwand

Durch Fixierung (z.B. chromathaltige Holzschutzmittel) an und in den Zellwänden wird eine weitere (und ev. schnellere) Diffusion behindert. Dies ist auch nicht relevant: Die betrachteten Holzschutz- und Holzflammschutzmittel Komponenten sind nicht fixierend.

- Konzentration – Die Diffusionsgeschwindigkeit ist umso höher, je größer der Konzentrationsunterschied ist.

Wird sehr trockenes Holz mit Salzlösung höherer Konzentration benetzt, geschieht nach [Leiß 1992] allerdings Folgendes: Infolge der Kapillarkräfte der trockenen Zellwände wird rasch das Wasser aus der Lösung gesaugt. Die Konzentration der Restlösung nimmt zu, bis es u.U. zum Auskristallisieren in den Zell- und Zellwandhohlräumen im unmittelbaren Oberflächenbereich kommt.

- Faserrichtung - Es gilt für die Diffusion: längs >> radial > tangential.
- Dichte – Bei Hölzern mit geringerer Dichte findet die Diffusion schneller und tiefer statt.

Verteilung im Mikrokapillarsystem (nach der Behandlung)

Salze sind im Lösemittel Wasser allgemein vollkommen in Ionen gespalten. Ist der aufgelöste Stoff – in diesem Fall, die Ionen - so verteilt, dass er nur noch in Form von Einzelteilchen vorliegt, spricht man von „echten Lösungen“. Die Ionen in den Holzschutz- und Holzflammschutzmittellösungen besitzen Durchmesser von ca. 0,1 bis 0,4 nm (Tabelle 4.1) und sind somit für das Auge unsichtbar. Die Lösung erscheint vollkommen klar.

Bis in welche anatomischen Makro- und Mikrobereiche der Salztransport stattfinden kann, hängt von der Partikelgröße – bei dem hier interessierenden Fall – vom Ionen- durchmesser bzw. von der Größe der Ionenstruktur (z.B. SO_4^{2-} , PO_4^{3-} oder NO_3^-) ab. Tabelle 4.1 zeigt die Durchmesser einiger Metallkationen und Nichtmetallanionen.

Kation	Ionendurchmesser [nm]	Anion	Ionendurchmesser [nm]
Na^+	0,194	F^-	0,266
K^+	0,266	Cl^-	0,362
Mg^{2+}	0,132	SO_4^{2-} u. PO_4^{3-}	mittlere Bindungslänge im tetraedrisch gebauten Ion: 0,151
Ca^{2+}	0,198		
NH_4^+	0,286		

Tabelle 4.1 Durchmesser von Kationen und Anionen [Holleman 1984]

Die kleinste sichtbare Struktureinheit einer Zellwandschicht ist die Mikrofibrille. Diese fasst eine Anzahl von Zellulosekettenmolekülen bündelförmig zusammen, diese Moleküle sind allgemein längs zur Mikrofibrillenachse angeordnet, aber nur teilweise parallel. Zwischen den Mikrofibrillen befinden sich die sog. Interfibrillarräume, diese besitzen eine Ausdehnung von 10 nm und sind teilweise mit nichtzellulosischen Materialien wie Hemizellulose und Lignin gefüllt. Zwischenräume gibt es auch in den Mikrofibrillen, die sog. Intrafibrillarräume, diese besitzen eine Ausdehnung von ca. 1 nm [Wagenführ 1999, Tsoumis 1991]. (Bild 4.3). Die Zellulosefibrillen lagern sich wiederum zu sog. Agglomerationen zusammen, zwischen den Fibrillen befinden sich Hemizelluloseschichten unterschiedlicher Breite und teilweise Lignin.

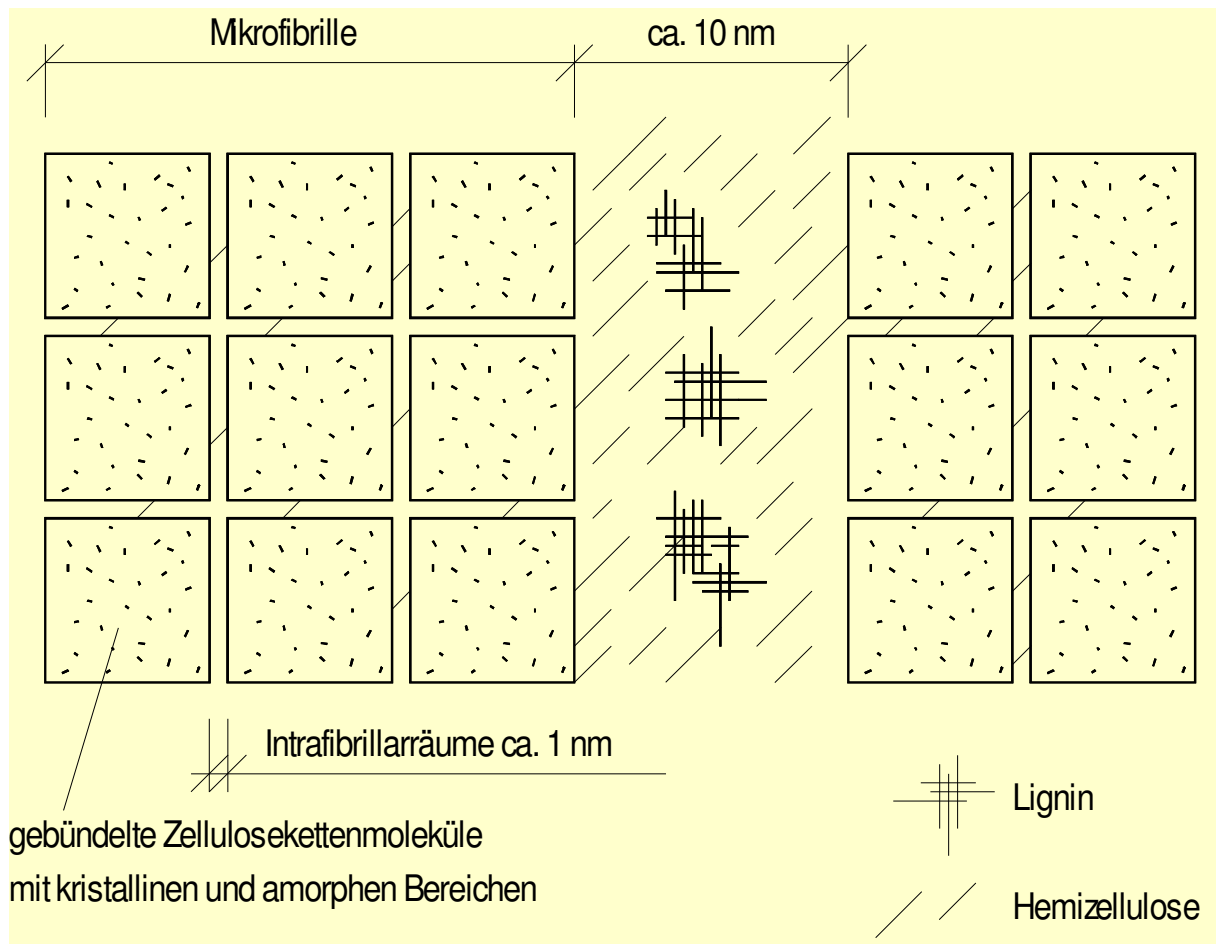


Bild 4.3 Anordnung von Zellulose, Lignin und Hemizellulose in der hölzernen Zellwand

Das bedeutet, dass diese Räume für Wassermoleküle, für andere organische bzw. anorganische Moleküle und auch für Ionen – wie in Tabelle 4.1 ersichtlich – zugänglich sein müssen.

Es existieren einige Untersuchungen zur Eindringtiefe und zur Verteilung von wässrigen Salzlösungen über den Zellwandquerschnitt. Eine Behandlung mit CuSO_4 – Lösung [Fengel 1971] ergab nahezu überall eine hohe Konzentration in den Bereichen der Mittelschicht mit hohem Hemizellulosegehalt (Primärwand P und der Sekundärwand 1 S1), (Bild 4.4, Tabelle 4.2 und Diagramm 4.1). Außerdem wurden in den hemizellulosereichen Tori der Hoftüpfel ebenfalls hohe Konzentrationen beobachtet. Es kann gefolgert werden, dass die Flüssigkeit dort am besten eindringen kann, wo der höchste Gehalt an Hemizellulosen vorhanden ist. Andere Untersuchungen ergaben einen höheren Gehalt von chlorhaltigen Holzschutzmitteln im Bereich der S2 als in der ligninreichen Mittellamelle [Bodner 1991].

Wandschicht	Zellulose [%]	Hemizellulosen [%]	Lignin [%]
Frühholz			
Mittelschicht (Mittellamelle+Primärwand)	2,0 (13,9)*	3,9 (27,1)	8,5 (59,0)
Sekundärwand 1	4,4 (36,4)	4,4 (36,4)	3,3 (27,2)
Sekundärwand 2 und 3	42,9 (58,4)	10,6 (14,4)	19,9 (27,2)
Gesamtwand	49,3	18,9	31,7
Spätholz			
Mittelschicht (Mittellamelle+Primärwand)	1,3 (13,7)	2,6 (27,4)	5,6 (58,9)
Sekundärwand 1	2,7 (34,6)	2,7 (34,6)	2,4 (30,8)
Sekundärwand 2 und 3	48,2 (58,4)	12,0 (14,5)	22,4 (27,1)
Gesamtwand	52,2	17,3	30,4

() * Werte auf die Wandschicht bezogen

Tabelle 4.2 Verteilung der chemischen Bestandteile in der Zellwand nach [Fengel 1969]

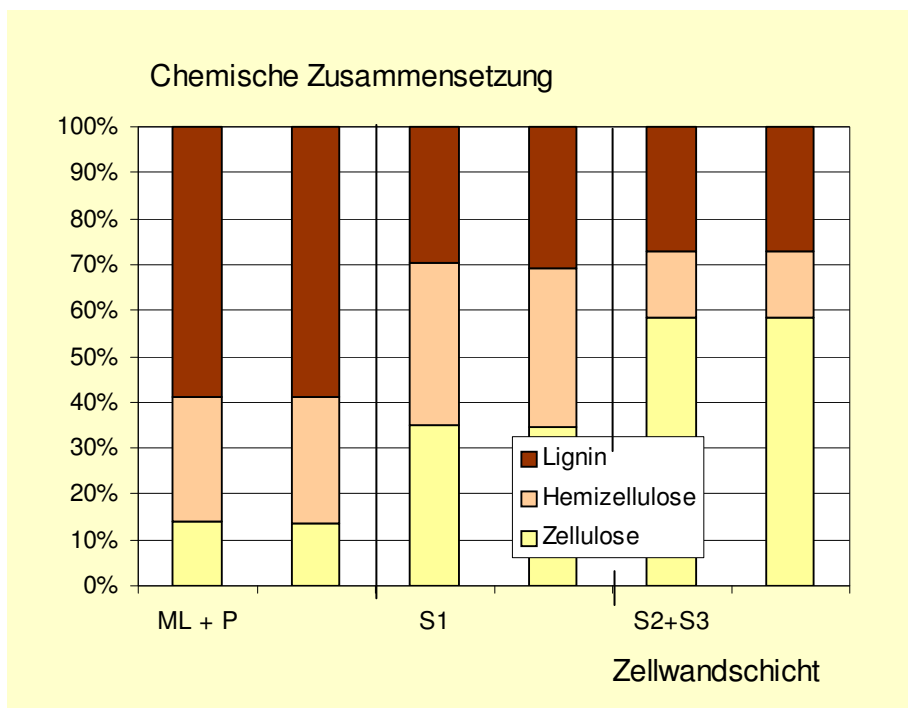


Diagramm 4.1 Chemische Zusammensetzung der einzelnen Zellwandschichten

(links: Frühholz, rechts: Spätholz, ML... Mittellamelle, P... Primärwand, S... Sekundärwand)

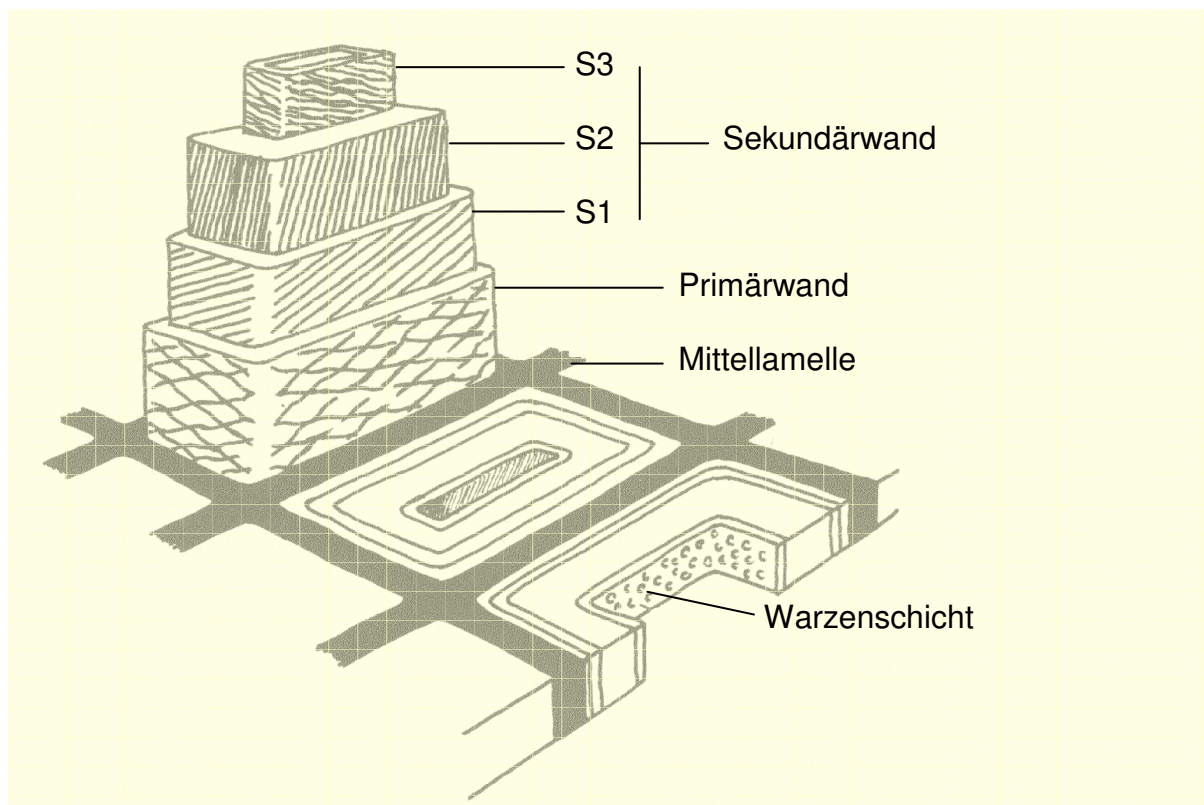


Bild 4.4 Schichtenaufbau der Zellwand nach [Eaton 1993]

Offensichtlich kommt es zur Akkumulation von Salzlösung dort, wo infolge Kapillarezug und/oder Lösungsdiffusion die Lösung am besten vordringen kann. Dies sind die Bereiche mit hohem Mikrofibrillenanteil, also Primärwand und Sekundärwand, wo entsprechende Interfibrillar- bzw. Intrafibrillarräume eine Lösungsaufnahme ermöglichen. Die Packungsdichte ist in der Primärwand geringer als in der Sekundärwand, so dass die größte Lösungsakkumulation wahrscheinlich im Bereich der Primärwand stattfindet.

Hemizellulose besitzt bei gleicher rel. Luftfeuchtigkeit das höhere Wasserabsorptionsvermögen gegenüber Zellulose gefolgt von Lignin [Bossard 1984]. Dies bedeutet, dass die Bereiche mit hohem Hemizelluloseanteil – das ist die Primärwand, gefolgt von der Sekundärwand* – das meiste Wasser binden und somit eine gute Lösungsdiffusion ermöglichen.

*) In Tabelle 4.2 und im Diagramm 4.1 wird nicht zwischen Mittellamelle und Primärwand unterschieden, weil der Übergang fließend ist. Der höchste Hemizelluloseanteil befindet sich auf der Primärwandseite mit der entsprechend geringsten Ligninkonzentration.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die größte Aufnahme der Salzlösung in der Primärwand stattfindet, gefolgt von den Sekundärwandschichten.

Wasserabgabe (nach der Behandlung)

Nach der Behandlung verdunstet das Lösemittel Wasser entsprechend den umgebenden klimatischen Bedingungen Temperatur und relativer Luftfeuchte, d.h. es kommt zur Desorption des eingelagerten Wassers durch die Diffusion von Wasser vom Inneren des Holzes nach außen. Nach einer gewissen Zeit stellt sich wieder eine Ausgleichsfeuchte im Mikrokapillarsystem ein.

Zusammenfassung

Es liegt nach der Schutzmittelbehandlung und der Abgabe des überschüssigen Lösemittels Wasser nun bei entsprechenden Bedingungen – wie niedrige rel. Luftfeuchte – eine höhere Konzentration von Ionen im sog. gebundenen Wasser in den Zellwänden vor, als anfangs im aufgetragenen wässrigen Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmittel.

Ob es nun schon nach dieser ersten Behandlung oder erst nach einer Vielzahl von Weiteren zur Auskristallisation von Salzen vorrangig im Mikrokapillarsystem und evtl. auf der Oberfläche des Makrokapillarsystems kommen kann, hängt vorrangig von der umgebenden rel. Luftfeuchte, der Zusammensetzung und der Konzentration der sich im Wasser befindlichen Ionen ab. (Bild 4.2 (5)).

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, erfolgten früher nach bestimmten Zyklen weitere Behandlungen mit Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmitteln, ebenfalls durch Streichen oder Sprühen. Es gelten die gleichen Aufnahmemechanismen, mit dem Unterschied, dass bei jedem Arbeitsgang unter gleichen Ausgangsbedingungen weniger Salzlösung aufgenommen wird. Dies hat folgende Gründe: Die Kapillaren im Mikrosystem sind in den oberflächennahen Zellreihen mit Salzlösung bzw. Salzkristallen verstopft. Damit ist ein Teil der Inter- bzw. Intrafibrillarräume gefüllt und steht für die Aufnahme weiterer Salzlösung nicht zur Verfügung. Außerdem wird durch den nun niedrigeren Konzentrationsunterschied $dc_{n+1} < dc_n$ die Diffusion der Ionen in tiefere

Holzschichten gebremst. Diese Annahmen werden durch die Salzaufnahme A_F in g/m^2 in Abhängigkeit der Anzahl der Applikationen n bestätigt. Der Anstieg der Kurve verläuft degressiv, (Diagramm 3.42). Einschränkend muss allerdings erwähnt werden, dass im Vergleich zu Bauteilen in Originalabmessung bei den Biegeproben die Diffusion in tiefere Schichten theoretisch nicht stattfinden kann. Die Probenhöhe beträgt hier 4 mm.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Salzaufnahme überwiegend kapillar erfolgt und dass die Diffusion bei den vorherrschenden Holzfeuchten nur eine untergeordnete Rolle spielt, jedoch immerhin noch so stark ist, dass teilweise auch noch in Tiefen von 3 bis 6 mm signifikante Ionenkonzentrationen gemessen wurden, (Abschnitt 3.2.4.1). Auffällig ist aber bei Proben der deutliche Gradient von der Oberfläche ausgehend.

Als Konsequenz dieser mehrmaligen Aufträge von Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln ergeben sich hohe Ionenkonzentrationen im unmittelbaren Oberflächenbereich, dort wo sich vertikale Kapillaren wie z.B. Holzstrahlen oder kleine Risse befinden, kann die Flüssigkeit natürlich weiter eindringen und somit auch örtlich höhere Ionenkonzentrationen in tieferen Schichten verursachen.

4.2 Mechanismus der Schädigung

Die im Abschnitt 3.3 gewonnenen Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass unter den gegebenen klimatischen Bedingungen auf den untersuchten Dachstühlen, die durch die Holzschutz- und Holzflammschutzbehandlung in der Zellwand gelangten Salze wiederholt Phasenwechseln unterliegen. Dies ist aber nur im unmittelbaren Oberflächenbereich der behandelten Hölzer – nämlich dort wo sich hohe Salzkonzentrationen in den Zellwänden befinden - möglich. In diesen Bereichen wurden tatsächlich strukturelle Zerstörungen des Holzes in Form der „Mazeration“ beobachtet.

Es werden nun für diese konkrete Schädigung alle Aspekte der Beanspruchung S (engl. stress) und der Beanspruchbarkeit R (engl. resistance) zusammengefasst.

Unter der Bedingung:

$$S > R \quad (4.10)$$

muss mit einer Materialschädigung gerechnet werden.

Die Beanspruchung S steht für alle Einwirkungen (Lasten, Schnittgrößen, vorhandene Spannungen), die Beanspruchbarkeit R steht für den inneren Widerstand bei Schädigung (Abmessung, Festigkeit, Formänderungsverhalten).

4.2.1 Beanspruchung

4.2.1.1 Kristallisationsdruck / Hydratationsdruck

In Abschnitt 3.3 konnte nachgewiesen werden, dass die gegebenen Wechsel der Holzfeuchte- und Klimabedingungen häufig zu Über- und Unterschreitungen der Sättigungskonzentration der Salzlösung im Kapillarsystem führen müssen. Dies ist die Ursache für den Übergang von der gelösten in die kristallisierte Form der Salze und umgekehrt.

Bilden sich bei der Auskristallisation örtlich voluminöse Salzkristalle, üben diese auf ihre Holz-Umgebung somit einen abträglichen „Kristallisationsdruck“ aus. Das führt zur Beanspruchung des Kapillargefüges.

Für Naturstein und keramische Baustoffe liegen diesbezüglich umfangreiche Untersuchungen vor [Duttlinger 1993].

Mechanismen der Beanspruchung:

a) Hydrostatischer Kristallisationsdruck

$$p_k = \frac{R \cdot T}{\Delta v} \cdot \ln\left(\frac{c}{c_s}\right) \quad (4.11)$$

- p_k Kristallisationsdruck (hydrostatisch) in N/mm^2
 R Gaskonstante in J/Kmol bzw. Nm/Kmol
 T Absolute Temperatur in K
 Δv Volumenzunahme in m^3/mol
 c/c_s Grad der Übersättigung (Verhältnis gegebener zur Sättigungskonzentration)

Der Druck kommt zustande, wenn ausgeschiedene Salzkristalle einen größeren Volumenbereich einnehmen als die gesättigte „Mutterlösung“ im gleichen örtlichen Volumenbereich. Es erfolgt allerdings eine Selbstbremsung des Systems bei höheren Löslichkeiten bei größerem Druck. [Duttlinger 1993].

b) Linearer Wachstumsdruck

$$p_{lw} = \frac{R \cdot T}{v} \cdot \ln\left(\frac{c}{c_s}\right) \quad (4.12)$$

- p_{lw} Linearer Wachstumsdruck in N/mm^2
 v Molvolumen der kristallinen Substanz in m^3/mol

Die Formel zur Berechnung des linearen Wachstumsdruckes, wie sie in der heutigen Literatur verwendet wird, stammt von C.W. Correns und W. Steinborn [Correns 1939]. Das Kristallwachstum geht in Abhängigkeit des Widerstandes der Kapillarwand weiter. Außerdem ist der sich aufbauende Druck abhängig von der Temperatur, dem Molvolumen der kristallinen Substanz und dem Grad der Übersättigung. Bei geringen Belastungen und Übersättigungen korrelieren gemessene und theoretisch ermittelte Drücke gut miteinander [Correns 1939]. Das Wachsen des Kristalls ist nur möglich, wenn zwischen Kristall und Hindernis – in dem Fall die Kapillarwand – ein Lösungsfilm, welcher als Diffusionsraum dient, ausgebildet werden kann. Dieser besitzt teilweise Festkörpereigenschaften, so dass gerichtete Druckkräfte übertragen werden können [Kühne 1997].

c) Hydratationsdruck

Einige Salze (z.B. Natriumsulfat) sind in der Lage bei Über- bzw. Unterschreitung bestimmter Temperatur- und rel. Luftfeuchtebereiche Wasser in Form von Hydraten in ihr Kristallgitter einzulagern bzw. wieder abzugeben.

$$p_h = \frac{R \cdot T}{\Delta v} \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (4.13)$$

p_h Hydratationsdruck in N/mm²

Δv Volumendifferenz zwischen Hydratphase und wasserfreier Phase in m³/mol

p_0/p Verhältnis Wasserdampfdruck der Luft bei T zu Dampfdruck über dem hydratisierten Salz bei T

In der Literatur wird bis heute nahezu unverändert das Modell und die Berechnungsformel (Gl. 4.13) nach H. Mortensen von 1933 als gültig angesehen, obwohl Hydratationsdrücke im Gegensatz zu den linearen Wachstumsdrücken nie genauer experimentell bestimmt worden sind. Außerdem ist die Herleitung der Formel nicht einsichtig. [Duttlinger 1993].

Bewertung

Das Wirken eines Hydratationsdruckes tritt in den Hintergrund, da bei dem hier untersuchten Fall keine Salze primär in das Holz eingebracht wurden, welche bei den vorhandenen klimatischen Bedingungen Hydratphasen bilden können, (Abschnitt 3.2.4.1). Die ermittelten Ionenkombinationen lassen aber immerhin die Möglichkeit von hydratbildenden Salzen zu, vor allem wo die Kombination mit signifikanten Na⁺ und SO₄²⁻ - Ionenkonzentrationen auftritt. Dies ist beim Westflügel der Lutherhalle Wittenberg gegeben, wobei allerdings mit dem Sanierungsmittel „Korasit LH“ behandelt wurde. Eine röntgendiffraktometrische Analyse der Ausblühungen an der Holzoberfläche ergab u.a. Na₂SO₄ in der wasserfreien Phase Thenardite. Das reine System Natriumsulfat – Wasser bildet unterhalb einer Temperatur von $\theta = 32,4$ °C eine Hydratphase abhängig von der relativen Luftfeuchte, (Diagramm 4.2).

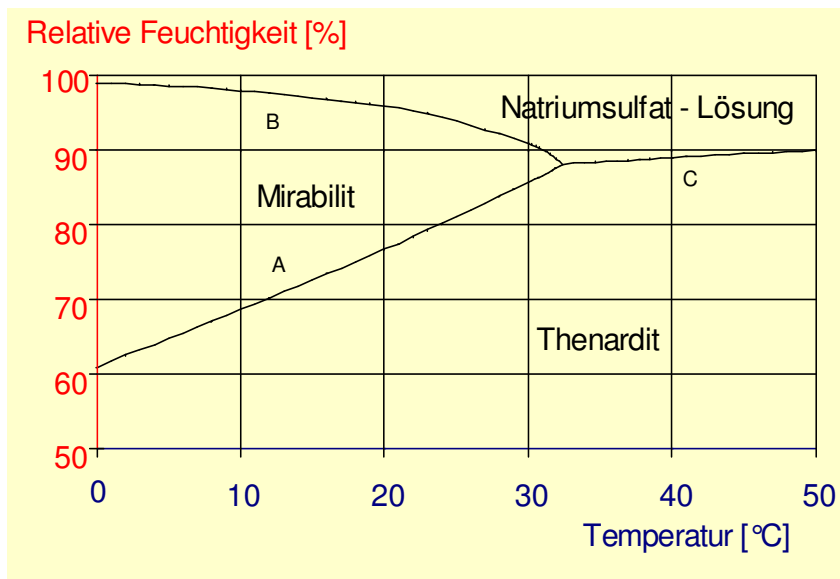


Diagramm 4.2 Das System Natriumsulfat / Wasser bei einer Temperatur von $\theta = 0 \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ aus [Steiger 1996]

Unter den gegebenen Bedingungen auf dem Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg kann die Linie A durchaus regelmäßig überschritten werden, was die Ausbildung eines periodisch wirkenden Hydratationsdrucks ermöglicht.

W. Duttlinger geht allgemein davon aus, dass die Beanspruchung von porösen Strukturen durch einen hydrostatischen Kristallisationsdruck vermutlich eine untergeordnete Rolle spielt [Duttlinger 1993]. Die größere Beanspruchung ist durch den linearen Wachstumsdruck gegeben, welcher beim Kristallwachstum entsteht.

Bei Überschreiten der Gleichgewichtskurve im Zustandsdiagramm (Diagramme im Abschnitt 3.3) setzt die Kristallisation (Keimbildung) i.a. nicht sofort ein. Es muss eine gewisse, u.U. sogar beträchtliche Übersättigung erreicht werden. Es sei denn, es existiert schon ein bereits vorhandener Kristall, dann wäre schon eine geringfügige Übersättigung für eine Phasenneubildung ausreichend. Neben dieser *homogenen Keimbildung* (also der Keimbildung aus der homogen übersättigten Lösung) muss noch der Vorgang der *heterogenen Keimbildung* aus einer übersättigten Lösung betrachtet werden. Dabei scheiden sich Kristalle an Fremdpartikeln oder auch an kristallinen oder nicht kristallinen Gefäßwänden ab. Die heterogene Keimbildungshäufigkeit ist gegenüber der homogen begünstigt, auch hier ist nur eine geringfügige Übersättigung ausreichend [Kleber 1990].

Befinden sich Salzlösungen im Kapillarsystem der hölzernen Zellwand, ist die heterogene Keimbildung ausschlaggebend. Die Kapillarwände bestehen aus kristallinen bzw. amorphen Zelluloseketten, Hemizellulose bzw. Lignin. Für die Kristallkeimbildung ist also bereits eine geringfügige Übersättigung der Lösung ausreichend.

Die Kristallisation findet in größeren Kapillaren bevorzugt statt. Die Anzahl der Kristallkeime ist in einem größeren Lösungsvolumen größer. In kleineren Kapillaren enthaltene Lösungen senken bei Keimbildung ihre Konzentration und damit ihren Übersättigungsgrad schneller ab. Außerdem ist die Kristallisation in größeren Kapillaren auch aufgrund des dabei vorhandenen geringeren chemischen Potentials energetisch bevorzugt. [Kühne 1997].

Das bedeutet, dass die Kristallisation – unter der Voraussetzung, dass sich im Makrokapillarsystem keine Lösung befindet – bevorzugt in den Zellwandbereichen stattfindet, wo die größten Kapillarräume vorhanden sind. Das sind die Interfibrillarräume in der weniger dicht gepackten Primärwand bzw. die Übergangsbereiche zwischen den einzelnen Zellwandschichten wie Primärwand / Sekundärwand 1.

Wird das Kristallwachstum durch die Wände der Kapillaren, Hohlräume oder fibrillaren Zwischenräume behindert, kommt es zur Beanspruchung des Gefüges. So dass besonders die Querverbindungen zwischen den Zelluloseketten – in den amorphen Bereichen* – und die der Mikrofibrillen bzw. Mikrofibrillenagglomerationen beansprucht werden. (Bild 4.3).

* Bereiche niedrigerer molekularer Ordnung, in denen die Zelluloseketten nicht parallel verlaufen und nicht durch die stabilen Wasserstoffbrückenbindungen verbunden sind.

4.2.1.2 Quellen und Schwinden

Eine Feuchtigkeitsaufnahme bzw. -abgabe verursacht ein Quellen bzw. Schwinden des Holzes und zwar bis zum Fasersättigungspunkt. Die Salzanreicherungen an der Holzoberfläche sorgen ab einer bestimmten kritischen relativen Luftfeuchte ϕ_{krit} für mehr Feuchtigkeitsaufnahme im Oberflächenbereich. Dies wurde mittels der über der Tiefe gestaffelten Sorptionsisothermen nachgewiesen, ermittelt an den Proben aus den Dachstühlen in Wittenberg und Zerbst (Abschnitt 3.2.4.2), außerdem an den salzbeaufschlagten Proben aus der Wechselklimabeanspruchung und an der Dachlatte (Abschnitt 3.6).

Es muss also zumindest zeitweise ein Feuchtegefälle zwischen Tiefe und Oberfläche existieren.

Durch das feuchteabhängige Quell- und Schwindverhalten müssen Spannungen im Oberflächenbereich entstehen, weil – z.B. bei Feuchteaufnahme – die äußeren Schichten die trockeneren oder noch trockeneren inneren Schichten am Quellen behindern.

Durch einen großen Feuchtegradienten – verursacht durch Salzeinlagerungen im Oberflächenbereich – wird der Effekt des Spannungsaufbaus zumindest bis zum Erreichen des Fasersättigungsbereiches verstärkt.

4.2.2 Beanspruchbarkeit

4.2.2.1 Mechanische Funktion der Zellwand

Die Festigkeit des Holzes hat seine Ursache in den Eigenschaften der Holzfaser. Holz kann als eine Ansammlung von röhrenförmigen Fasern bzw. Zellen angesehen werden, welche miteinander verklebt sind. Die Zellwand ist zu unterschiedlichen Anteilen aus den drei Polymeren Zellulose, Hemizellulose und Lignin zusammengesetzt. Die Zellulose ist vorrangig für Festigkeit parallel zur Faserrichtung verantwortlich. Grund dafür sind der hohe Polymerisationsgrad und die lineare Ausrichtung der Zellulosekettenmoleküle, vor allem in der Sekundärwand S2 parallel zur Stammachse des Baumes. (Bild 4.4). Hemizellulose wirkt als Matrix für die Zellulose und erhöht somit die Packungsdichte in der Zellwand. Inwieweit die Hemizellulose festigkeitssteigernd wirkt, ist weitestgehend unbekannt. Die Hemizellulose könnte allerdings verbindend zwischen den Zelluloseketten und dem amorphen Lignin dienen [Winandy 1984]. Lignin ist eine phenolische Verbindung und wirkt im Zusammenhang mit der Hemizellulose aussteifend auf die Zellulosekettenmoleküle. (Bild 4.3).

Alle drei Komponenten tragen also zu verschiedenen Anteilen zur Festigkeit des Holzes bei.

4.2.2.2 Mechanische Schwachstellen in der Zellwand

Um Schwachstellen in der Zellwand zu lokalisieren, wurden im Verlauf der Holzforschung vielfältige Bruchuntersuchungen durchgeführt und die Bruchbilder mit mikroskopischen Methoden analysiert.

Bei der Erörterung der Schwachstellen muss von unterschiedlichen Belastungssituationen ausgegangen werden, z.B. Zug- (längs oder quer zur Faserrichtung), Biege-, Druck-, Scherbeanspruchung.

Bei einer **Biegebeanspruchung** kommt es in der Zugzone zur Einschnürung der Zellen und der Zellwände. Daraus entstehen Querkräfte, welche dazu führen können, dass einzelne Zellwandschichten voneinander getrennt werden. Dies bewirkt eine Lastumlagerung und dadurch später einen glatten Abriss der Zellen. Den größten Einfluss auf das Aussehen der Querbruchfläche hat die Belastungsdauer, mehr als die Holzfeuchte gefolgt von der Temperatur. So wurde beim Kurzzeitbiegeversuch nach DIN 52189 rasterelektronenmikroskopisch meist ein mehr oder weniger glatter Abriss der Zellen ohne Delamination in der Zugzone beobachtet. Lediglich in den Tüpfelbereichen kam es zur Ablösung. Dagegen führte die Schlagbiegung meist zur Delamination im Übergangsbereich Sekundärwände S1/S2 bzw. Sekundärwand S1/Primärwand P [Zimmermann 1994].

Die Mittellamelle kann aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als sehr duktil angenommen werden, d.h. während des Bruchgeschehens bei Zugbeanspruchung treten in der Mittellamelle bei intakter Sekundärwand nur geringe Spannungen auf. [Winandy 1984].

Auch beim Versagen infolge einer **Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung** oder infolge von **Schub** werden zwei Bruchtypen unterschieden [Niemz 1993]:

- Bruchverlauf innerhalb der Primärwand bzw. der Mittellamelle – Primärwand – Region, (Bild 4.5)
Der Bruch ist zumeist abgestuft. Die Bruchart entsteht bei langsamer und gleichmäßiger Belastung. Die Bruchausbreitung erfolgt langsam.
- Bruchverlauf senkrecht zu den Zellwandschichten bei schlagartiger Belastung, (Bild 4.6).

Auch bei diesen Beanspruchungsarten gelten also die Übergangsbereiche zwischen den einzelnen Schichten als Schwachstelle, hier besonders im Bereich der Primärwand.

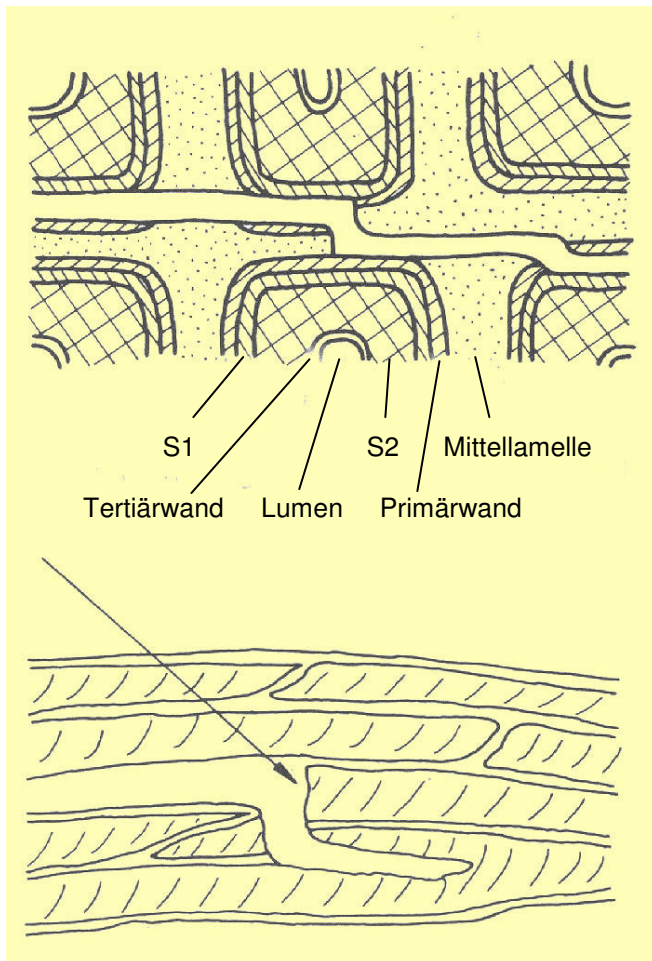


Bild 4.5 Bruchbild bei langsamer Belastung
[Niemz 1993]

Bild 4.6 Bruchbild bei schneller Belastung
[Niemz 1993]

4.2.2.2 Herabsetzung der Beanspruchbarkeit durch einen sauren Angriff

Die Flamm- bzw. Holzschutzmittelbehandlungen und die Immissionen von Schadgasen – vor allem Schwefeldioxid – bewirken eine Übersäuerung der Oberflächenbereiche des Holzes auf den untersuchten Dachstühlen.

Die Ursachen der Übersäuerung können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Saure Reaktion der Salzlösungen aus dem Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmittel, vor allem der Kombinationsmittel „Dohnalit Pyro I“ und Dohnalit FPI“, (Abschnitt 2.1.3 und 3.1),
- Abgabe von Fluorwasserstoff aus fluoridhaltigen Holzschutzmitteln bzw. dessen Bestandteilen, dieser bildet mit dem im Holz gebundenen Wasser Fluorwasserstoffsäure, (Abschnitt 2.1.3),

- Einwirkung von Schwefeldioxid auf das Holz und Bildung von Schwefelsäure über mehrere Oxidationstufen in Abhängigkeit der Feuchtigkeit, (Abschnitt 3.1).

Die pH – Wert – Messungen (Abschnitt 3.2.4.1) bestätigen diesen Sachverhalt. Die pH – Werte liegen bei allen Proben an der Oberfläche deutlich unter denen des unbehandelten Holzes. Dies trifft sowohl für die Dachstuhlhälzer der Stadthalle Zerbst als auch der Lutherhalle Wittenberg zu.

Dies beinhaltet, dass in der Kapillarflüssigkeit in den Zellwänden immer ein bestimmter Anteil von überschüssigen Säurerestionen vorhanden ist. Diese Kapillarflüssigkeit übt somit einen sauren Angriff auf die Zellwandbestandteile und –strukturen aus. Aufgrund der gemessenen pH – Werte ($\text{pH} \approx 3,5$ bis 4), im Vergleich zum unbehandelten Holz ($\text{pH} \approx 5$ bis 6), kann von einem schwach sauren Angriff ausgegangen werden.

In der Literatur wird pauschal ein Wert $\text{pH} < 2$ bzw. $\text{pH} < 2,5$ als kritisch angesehen. Ab diesen pH – Werten muss mit Holzerstörungen und Festigkeitsminderungen gerechnet werden. [Mönck 1973, Mönck 1975]. Allerdings fehlt der Hinweis, wie der pH – Wert ermittelt wurde.

Anders dagegen bei den Untersuchungen von S.T. Lebow. [Lebow 1999]. Sperrholzplatten aus Southern Pine, wie sie in Nordamerika oft im Holzhausbau verwendet werden, wurden mit 75%iger Diammoniumphosphat – Lösung imprägniert. Die Platten wurden bei 48°C getrocknet und anschließend bei $\theta = 60^\circ\text{C}$ / $\phi = 75\%$ gelagert.

Die Biegefestigkeit σ_B und der pH – Wert zu Beginn, sowie nach 160 Tagen und 290 Tagen sind in den Diagrammen 4.3 und 4.4 dargestellt. Die Dicke der Proben betrug 12 mm, die Breite 150 mm und die Stützweite beim Biegeversuch 600 mm.

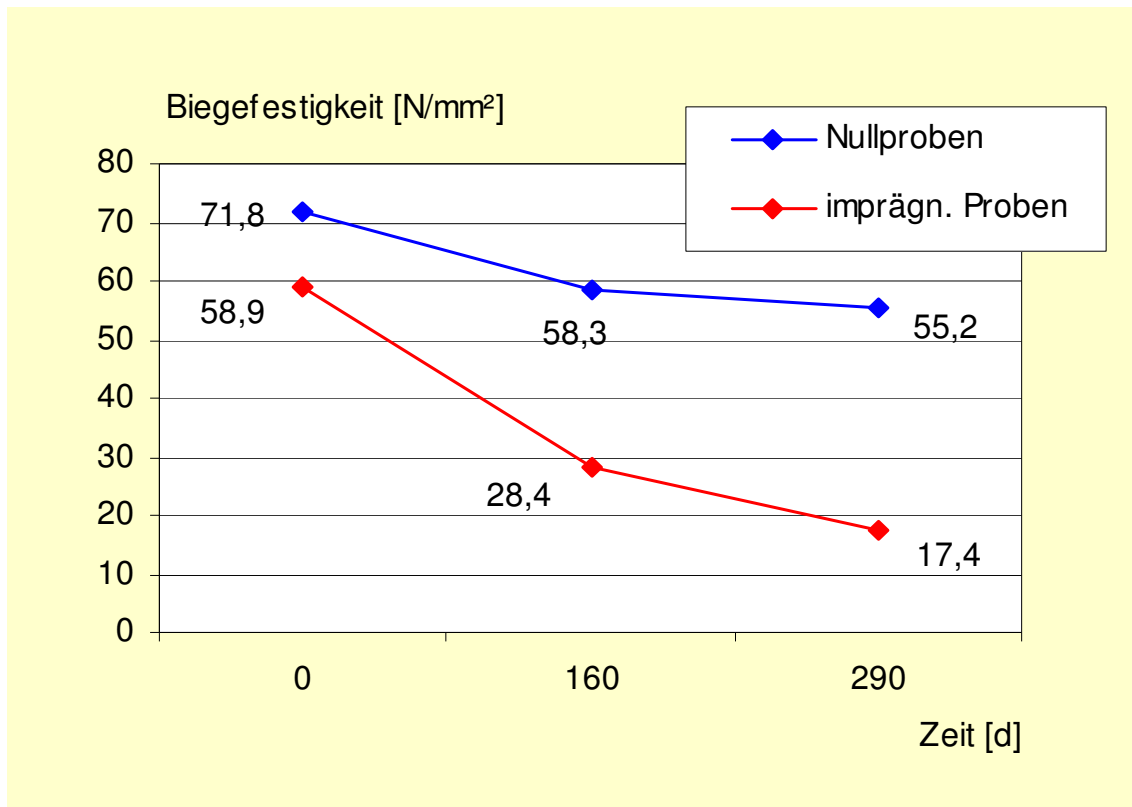


Diagramm 4.3 Biegefestigkeit σ_B über der Zeit, nach [Lebow 1999]

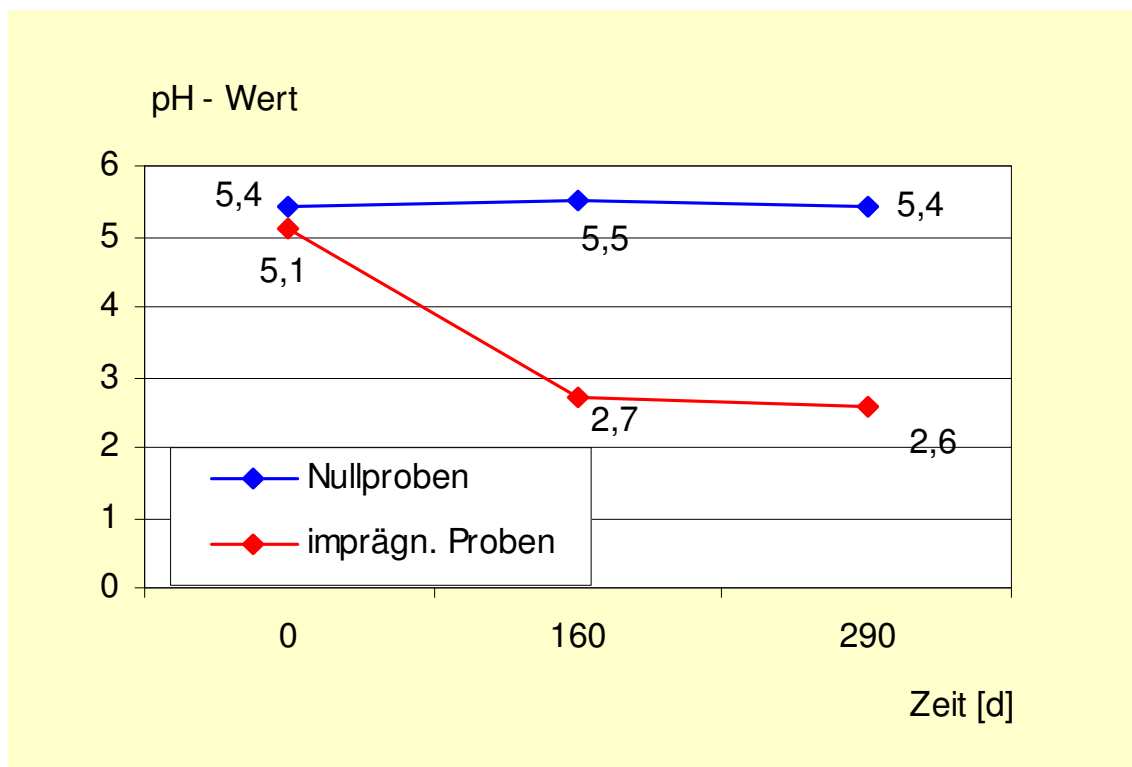


Diagramm 4.4 pH – Wert über der Zeit, nach [Lebow 1999]

Als Ursache für den starken pH – Wert – Abfall nach 160 Tagen wird die Bildung von Phosphorsäure unter Abspaltung von Ammoniak angegeben, (Abschnitt 2.1.1). Diese thermische Reaktion findet offensichtlich – wenn auch langsam - schon bei Temperaturen von 60°C statt. Der chemisch saure Angriff bewirkt bei hohen Temperaturen und entsprechenden Luftfeuchten einen Abbau von Zellwandbestandteilen. Damit ist der starke Rückgang der Biegefestigkeit zu erklären.

Dachstühle in Wittenberg und Zerbst

Bei den pH – Wert – Messungen an den Hölzern der Dachstühle in Wittenberg und Zerbst (Abschnitt 3.2.4.1) wurde im Verhältnis 1 g Holz auf 50 ml Wasser eluiert, bei den Versuchen in [Lebow 1999] im Verhältnis 1g Holz auf 20 ml Wasser.

Die Umrechnung von pH = 2,7 (in 20 ml) auf den entsprechenden Wert auf 50 ml bezogen, ergibt über die Beziehung:

$$\text{pH} = -\lg c_{\text{H}^+} \quad (4.14)$$

c_{H^+} Wasserstoffionen – Konzentration in mol/l

einen pH – Wert von 3,1.

Die eigenen pH – Wert – Messungen an den Oberflächen der Hölzer ergaben Minimalwerte von pH = 3,7 (Lutherhalle Wittenberg) und pH = 3,5 (Stadthalle Zerbst). Deshalb ist davon auszugehen, dass auch hier – wenn auch nicht in dem Umfang, wie die Untersuchungen in [Lebow 1999] ergaben – die Beanspruchbarkeit in den Randschichten der Hölzer durch einen chemisch sauren Angriff herabgesetzt ist.

Mit Salzlösungen behandelte und einer definierten Wechselklimabeanspruchung ausgesetzte Proben, Abschnitt 3.5

Die Entwicklung der pH-Werte und der Sulfationenkonzentrationen in Abhängigkeit der Anzahl der Zyklen I (oder anders ausgedrückt: in Abhängigkeit der Anzahl der Salzbehandlungen) zeigt Diagramm 4.5.

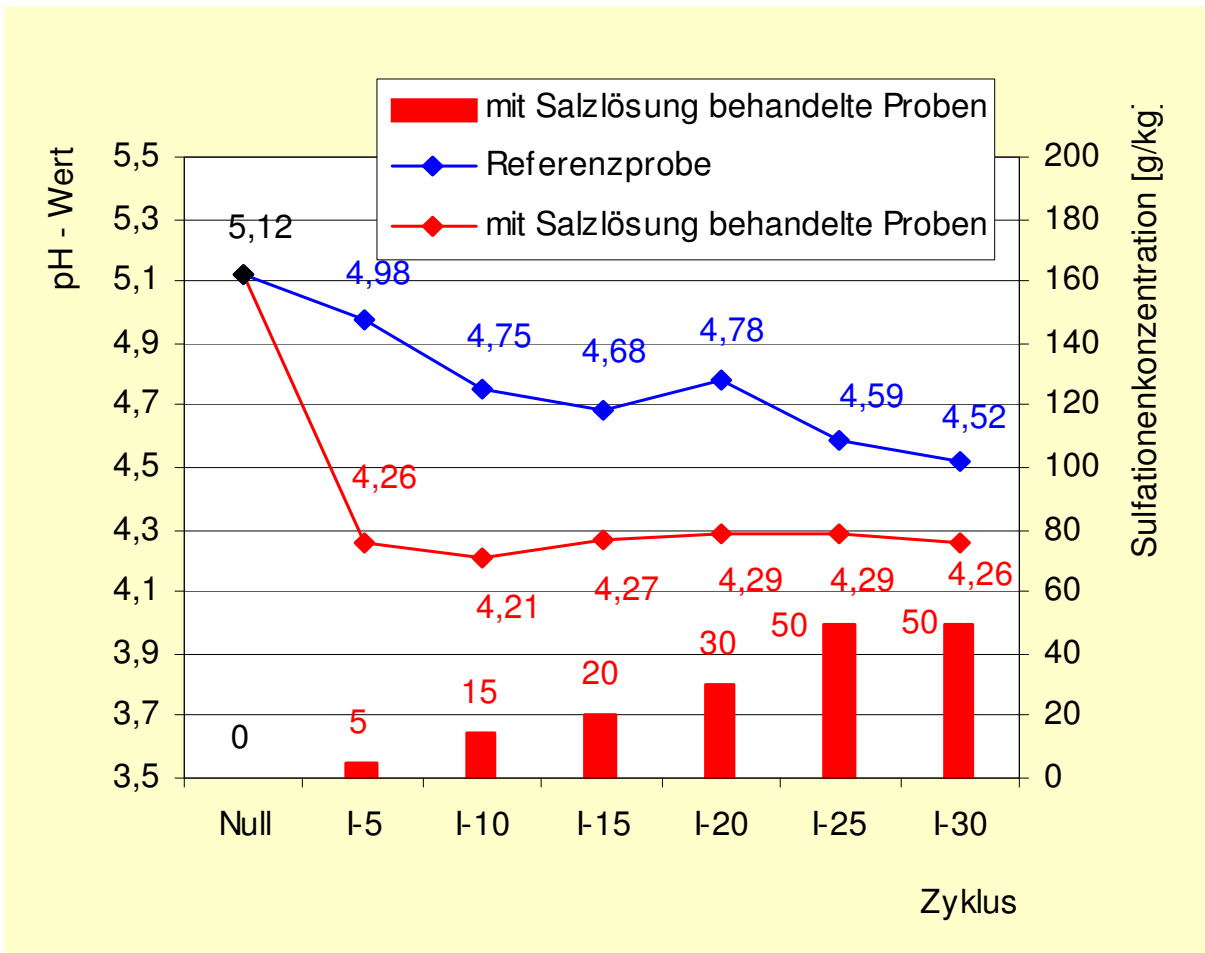


Diagramm 4.5 pH – Wert und Sulfationenkonzentration in g/kg

Die mittels Forstnerbohrer (Tiefe: 2 mm; Durchmesser 20 mm) gewonnenen Proben wurden im Verhältnis 1 g Holz auf 50 ml Wasser eluiert. Im Eluat wurde der pH – Wert gemessen und mittels Teststreifen „Merckoquant“ die Sulfationenkonzentration in mg/l bestimmt und in g Sulfat / kg Holz umgerechnet.

Nach 5 Behandlungszyklen sinkt der pH – Wert bei den mit Salzlösung behandelten Proben stark ab, bleibt danach aber weitestgehend konstant, währenddessen die Sulfationenkonzentration – stellvertretend für die Gesamtsalzkonzentration – kontinuierlich mit jedem Behandlungszyklus steigt.

Der pH – Wert der Referenzproben sinkt langsam, erreicht aber im Versuchszeitraum nicht den Wert der mit Salzlösung behandelten Proben. Wahrscheinlich werden auf-

grund der langen thermischen bzw. auslaugenden Behandlung (unmittelbar nach Besprühen mit Wasser wurden die Proben sofort wieder in den Klimaschrank mit $\theta = 40^\circ\text{C}$ gebracht) die an die Hemizellulose gebundenen Acetylgruppen CH_3CO - unter Bildung von Essigsäure abgespalten. Das würde das geringe Absinken des pH – Wertes über der Zeit bei den Referenzproben erklären.

Die auf den Dachstühlen in Wittenberg und Zerbst gemessenen geringen pH – Werte an der Oberfläche der Hölzer konnten mittels Besprühen von entsprechenden Salzlösungen im Labormaßstab nicht erreicht werden. Dafür müssen zwei Gründe angeführt werden:

1.

Im Labormaßstab war es nicht möglich, ebenso hohe Salzkonzentrationen einzubringen wie sie an den Hölzern der Dachstühle in Wittenberg und Zerbst gemessen wurden. Immer unter der Annahme, dass die Lösung der Salze sauer reagiert, muss sich das auf den pH – Wert auswirken. Als Vergleichswert soll die Salzaufnahme A_F in g/m^2 betrachtet werden: Im Tiefenbereich 0 – 3 mm bewegt sich die Salzaufnahme zwischen $A_F = 214$ und $327 \text{ g}/\text{m}^2$ (Lutherhalle Wittenberg) und $A_F = 235$ und $488 \text{ g}/\text{m}^2$ (Stadthalle Zerbst). (Tabelle 3.1). Im Gegensatz dazu beträgt die maximale Salzaufnahme bei den labormäßig behandelten Proben $A_F = 187 \text{ g}/\text{m}^2$. Die Dicke dieser Proben beträgt ca. 4 mm und die Salzaufnahme findet von beiden Seiten statt. Somit können diese Werte verglichen werden.

2.

Im Labor existieren keine weiteren Quellen für eine potentielle Versäuerung, wie

- das Einwirken von Schwefeldioxid und damit die Bildung von Schwefelsäure und
- das Abspalten von Fluorwasserstoff aus Holzschutzmitteln unter der Entstehung von Fluorwasserstoffsäure.

4.2.3 Zusammenfassung

Die Umstände, welche zu einer Strukturschädigung führen können, werden nun in der Übersicht 4.1 qualitativ zusammengefasst.

Beanspruchung	Beanspruchbarkeit (Widerstand)
<p>Spannung infolge Bildung örtlich voluminöser Salzkristalle:</p>	<p>Naturgegebene Bereiche mit geringer Festigkeit in der Zellwand (Schwachstellen):</p>
<p>Entsprechende Lösungskonzentrationen und Umgebungsbedingungen führen zur Salzkristallisation, verbunden mit Volumenvergrößerung und damit zur Entstehung von Druckkräften. Dadurch entstehen Spannungen in der Primärwand bzw. den Übergängen zwischen Primärwand / Sekundärwand 1.</p>	<p>Anhand des Bruchverhaltens bei äußerer Belastung können Schwachstellen in der Zellwand lokalisiert werden.</p> <p>Bei Biegebeanspruchung in der Zugbruchzone:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Delamination in den Übergängen Sekundärwand 1 und 2 (bei schlagartiger Belastung), 2) Querbruch der Sekundärwand 2 bei weiterer Laststeigerung <p>Bei Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bruch in der Mittelschicht (Mittellamelle + Primärwand bzw. in der Primärwand, - Bruch zwischen den Zellwandschichten bei schlagartiger Belastung

Spannungen infolge Feuchtegradient:	Festigkeitsreduzierung infolge Einwirkung saurer Salzlösungen:
<p>Der Feuchtegradient zwischen Oberfläche und Tiefe verursacht Spannungen.</p> <p>Feuchteaufnahmen: Quellbehinderung der äußeren durch die innere Schicht → Druckspannung in der äußeren Schicht,</p> <p>Feuchteabgabe: Schwindbehinderung der äußeren durch die innere Schicht → Zugspannung in der äußeren Schicht</p>	<p>Bei Einwirkung sauer reagierender Salzlösungen erfolgt ein Abbau vorrangig von Hemizellulose. Unter den Voraussetzungen, dass sich die meiste Salzlösung in der Primärwand und Sekundärwand 1 und sich die höchste Hemizellulose – Konzentration in diesem Bereich befindet, muss es besonders dort bei entsprechenden pH – Werten zur Reduzierung der Festigkeit kommen.</p>

Übersicht 4.1 Zusammenfassung der Beanspruchung / Beanspruchbarkeit

Auffällig ist, dass gerade in den anatomischen Bereichen die größte Beanspruchung stattfindet, wo sich auch die naturgegebenen Schwachstellen in der Zellwand befinden und wo zusätzlich Festigkeitsreduzierungen durch Einwirkung von sauer reagierenden Salzlösungen entstehen, nämlich immer in der Primärwand bzw. den angrenzenden Schichten Sekundärwand 1 und in der Mittellamelle, wobei Primärwand und Mittellamelle einen nahtlosen Übergang bilden.

Die Spannungen infolge Quellen und Schwinden können eine Lockerung des Gefüges bewirken. Hierbei gelten als Schwachstellen mehr die Holzstrahlen und Jahrringgrenzen [Niemz 1993].

Unter der Bedingung:

$$\Sigma \text{ Beanspruchung} < \Sigma \text{ Beanspruchbarkeit (Widerstand)}$$

ist mit keiner Schädigung zu rechnen. Dagegen bei:

$$\Sigma \text{ Beanspruchung} > \Sigma \text{ Beanspruchbarkeit (Widerstand)}$$

muss es zur Schädigung, in diesem Fall zur Korrosion (Verlust des Faserverbundes) bzw. zur Reduzierung der Holzfestigkeit im Oberflächenbereich kommen. (Bilder 4.7 und 3.4 bis 3.6).

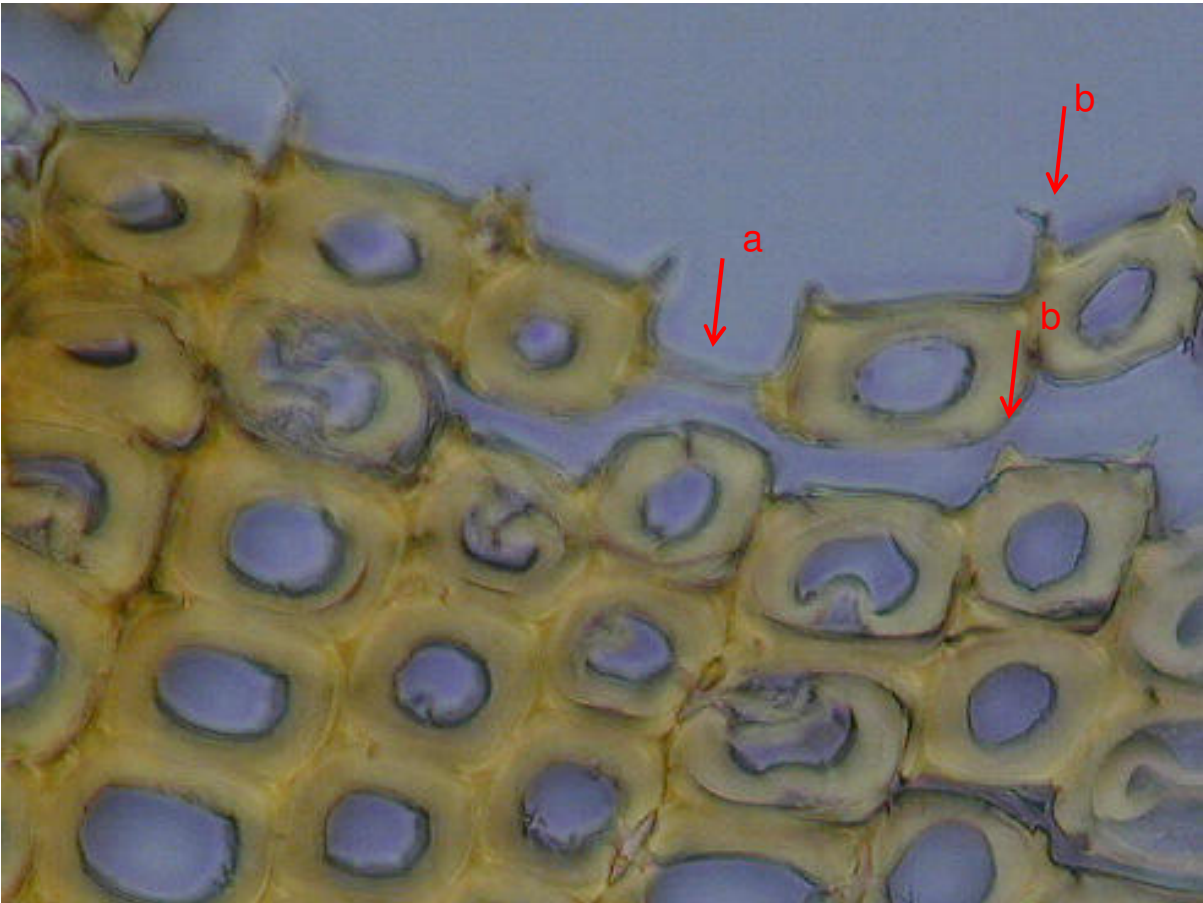


Bild 4.7 Lichtmikroskopische Aufnahme von delaminierten Spätholztracheiden (Lutherhalle Wittenberg)

Mikroskopisch scheint sich zu bestätigen, dass die Trennung der Zellen im Bereich Primärwand und Sekundärwand 1 verläuft. Zu erkennen an den noch im Verbund bestehenden Mittellamellen (a) und Zellwandzwickeln (b), welche in ihrer Konsistenz ebenfalls der Mittellamelle entsprechen.

5 Praktische Bedeutung (Bauwerkssicherheit)

Die durchgeführten Betrachtungen und Untersuchungen sollen Aufschluss darüber geben, ob die geschädigten Hölzer eine Beeinträchtigung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion darstellen. Hierzu müssen folgende Punkte erörtert werden:

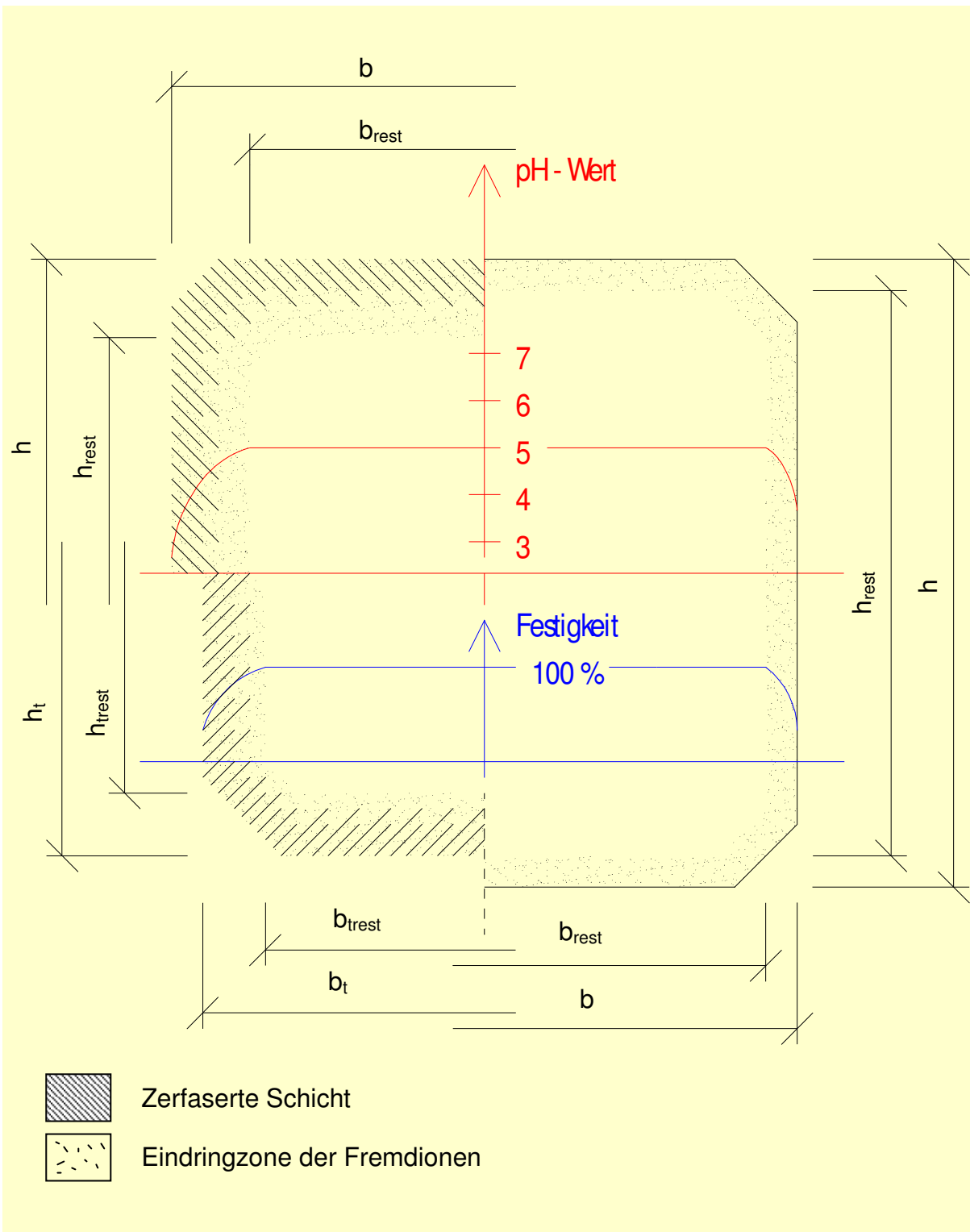
- a) Wie gestaltet sich die Querschnittsminderung bzw. welcher tragfähige Restquerschnitt ist anzusetzen?
- b) Wie ist die Festigkeit des Restquerschnitts einzuschätzen?
- c) Wie ist der zeitliche Verlauf der Schädigung zu beurteilen?
- d) Ist die Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln und Anschlüssen gefährdet?

Bild 5.1 zeigt schematisch die Situation an einem durch chemische Korrosion geschädigten Holzquerschnitt mit und ohne „Mazeration“.

5.1 Größe des tragfähigen Restquerschnittes

Die zerfaserte oberflächennahe Schicht liefert keinen Beitrag zur Festigkeit und muss deshalb vollständig vom statischen Querschnitt in Abzug gebracht werden. Die darunterliegende Schicht ist aber auch noch durch einen verringerten pH – Wert und durch eine erhöhte Ionenkonzentrationen gekennzeichnet. Deshalb ist hier die Festigkeit reduziert. Die Übergänge zwischen den Schichten sind fließend. Die Werte erreichen jedoch bald wieder jene des ungeschädigten Holzes (pH \approx 5 und keine auffälligen Ionenkonzentrationen).

Bei pH – Werten um 3,1 sinkt die Festigkeit auf ca. 25 % der Ausgangsfestigkeit (Abschnitt 4.2.2 [Lebow 1999]) nach einer Temperatur - Langzeitwirkung von $\phi = 66^\circ\text{C}$, bei pH – Werten um 4,2 und zeitweise Temperaturen von $\phi = 40^\circ\text{C}$ (Abschnitt 4.4.3.2) immerhin noch auf ca. 85 %.



- b Bauteilbreite in mm
 h Bauteilhöhe in mm
 b_{rest} Restbreite in mm
 h_{rest} Resthöhe in mm
 b_{trest} Restbreite in Abhängigkeit der Zeit in mm
 h_{trest} Resthöhe in Abhängigkeit der Zeit in mm

Bild 5.1 Querschnitt eines durch chemische Korrosion geschädigten Querschnittes mit (links) und ohne „Mazeration“ (rechts)

Auf dem Dachstuhl der Stadthalle Zerbst wurden in 0 bis 3 mm Tiefe, also unter der zerfaserten Schicht, im vermeintlich ungeschädigten Holz, pH – Werte zwischen 3,75 und 4 und auf dem Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg (Ostflügel) ein pH – Wert von 3,75 an der zerfaserten Oberfläche sowie bei der vermeintlich ungeschädigten Referenzprobe gemessen. (Abschnitt 3.2.4.1).

Deshalb ist davon auszugehen, dass in diesen Randschichten die Festigkeit reduziert ist, bis wieder für das Holz normale pH – Werte von ca. 5 bis 5,5 erreicht werden. Eine quantitative Aussage kann aus folgenden Gründen nicht getroffen werden:

- Die Festigkeitsreduzierung infolge eines niedrigen pH – Wertes ist abhängig von der Dauer der sauren Einwirkung, von der Temperatur, von der Luftfeuchtigkeit, der Art sowie Zusammensetzung des einwirkenden Mediums und von der Holzart (Nadelhölzer sind resistenter als Laubhölzer).
- Der Einfluss auf die Festigkeitsreduzierung kann durch andere Einflüsse überlagert werden – z.B. das Wirken eines Kristallisationsdrucks im makroskopisch ungeschädigten Bereich. Dieser Kristallisationsdruck kann aber trotzdem mikroskopische Strukturschädigungen hervorrufen, was sich negativ auf die Festigkeit in diesem Querschnittsbereich auswirkt.
- Der Gradient aller Kennwerte von der Oberfläche aus beginnend, lässt einen funktionalen Verlauf der Festigkeit von 0 auf 100 % erwarten.
- Der Einfluss der Holzfeuchte

Um beim rechnerischen Nachweis eines derart geschädigten Holzbauteils auf der „sicheren Seite“ zu liegen, muss deshalb der Querschnitt soweit abgemindert werden, bis die **pH – Werte** wieder **4,5 bis 5,5** erreichen und keine nennenswerten Ionenkonzentrationen im Holz nachweisbar sind – **Gesamtsalzgehalt S < 20 g/kg**. Diese Werte werden meist in einer Tiefe zwischen 3 und 6 mm erreicht.

Der Wert von $S < 20$ g/kg hat den Hintergrund, dass bei dieser Konzentration die Salze bei den festgestellten klimatischen Umgebungsbedingungen (Abschnitt 3.2.1.3) weitestgehend in Lösung bleiben (Abschnitt 3.3) und die Sorptionsisothermen weitestgehend denen des unbehandelten Holzes entsprechen (Abschnitte 3.2.4.1 und 3.2.4.2).

Damit werden die beschriebenen festigkeitsmindernden Faktoren ausgeschlossen.

5.2 Festigkeit des Restquerschnittes

Unter der Voraussetzung, dass im Restquerschnitt keine kritischen pH – Werte und keine erhöhten Ionenkonzentrationen (Abschnitt 5.1) vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass dort eine dem nicht geschädigten Holz entsprechende Festigkeit vorliegt.

Im Abschnitt 3.6 wurde das Verhalten der Holzfeuchte unter der geschädigten Oberfläche untersucht. Man untersuchte also, ob die versalzene und geschädigte Oberflächenschicht, eventuell tiefere Schichten bezüglich der Holzfeuchte gegenüber nicht geschädigten Hölzern beeinflusst. Das tritt offensichtlich nicht ein.

Aus diesem Grund kann die Festigkeit des Restquerschnittes entsprechend der Ausgleichsfeuchte des nicht geschädigten Holzes angenommen werden.

Dieser Sachverhalt wird durch experimentelle Untersuchungen von K. Erler weitestgehend bestätigt. In der Arbeit [Erler 1988] wurden Konstruktionshölzer aus Gebäuden der Kali- bzw. Düngemittelindustrie untersucht. Die Schädigungen waren vergleichbar mit den festgestellten Schäden auf den Dachstühlen der Lutherhalle Wittenberg und der Stadthalle Zerbst. Der Unterschied besteht darin, dass manche Stoffe in der Kali- bzw. Düngemittelindustrie alkalisch reagieren (z.B. Kalidünger, Harnstoff) und deshalb vorrangig das Lignin in den Mittellamellen abbauen. Festgestellt wurde, dass die Biegefestigkeiten in den Randbereichen nur etwa 30 bis 40 % der Werte im Mittelbereich erreichen.

Die Reduzierung der Festigkeit – allerdings wieder mit starkem Gradienten – ist bis in eine Tiefe von 10 - 12 mm zu verfolgen. pH – Wert – Abweichungen vom normalen Holz wurden aber nur bis in eine Tiefe von ca. 6 mm gemessen. Zu den Festigkeitswerten fehlen allerdings die Holzfeuchten. So kann nicht nachvollzogen werden, ob die Reduzierungen jenseits der 6 mm auf eine Strukturschädigung infolge alkalischen Angriffs bzw. der Wirkung von Salzen, oder auf eine erhöhte Holzfeuchte in den Randschichten zurückzuführen ist. Einige Salze bzw. Mischdünger der Kaliindustrie sind sehr hygroskopisch. Bei Natriumchlorid z.B. beträgt die kritische rel. Luftfeuchte $\phi \approx 75\%$ und bei Magnesiumchlorid $\phi \approx 33\%$. $MgCl_2$ kommt in Form des $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ (Carnallit) in Kaliumsalzlagerstätten vor. Die Innenbereiche hatten hohe Werte aufzuweisen. Diese lagen etwa bei 80 – 90 % von gutklassigem Neuholz – nach einer Standzeit von 50 bis 70 Jahre. W. Mönck [Mönck 1995] mindert pauschal alle zulässigen Spannungen nach einer Dauerstandsbelastung – z.B. hundertjähriger Hölzer in Dachstühlen – um den Faktor 0,8 ab. Dieses Herangehen ist aber in der Fachwelt umstritten. Dem Verfasser der vorliegenden Arbeit sind keine Untersuchungen bekannt, wo ein Festigkeitsverlust von nicht geschädigten Hölzern über der Zeit statistisch nachgewiesen ist.

Wenn man also bei starken Schädigungen, zum Beispiel von einer oberflächennahen Strukturschädigung von 5 mm („Mazeration“) und einer sich darunter befindenden festigkeitsgeminderten Schicht von 3 – 6 mm Tiefe ausgeht, ergibt dies in Summe etwa 10 mm.

Das heißt, der vorhandene Querschnitt muss bei diesem Beispiel ringsherum um 1 cm abgemindert werden. Bei Hölzern mit großem Querschnitt wird demnach in den seltensten Fällen – natürlich in Abhängigkeit der Beanspruchungsart und der aktuellen Auslastung – ein Standsicherheits- bzw. Gebrauchstauglichkeitsproblem vorliegen. Bei kleinen (z.B. Dachlatten) bzw. schlanken Querschnitten ist aber schnell die zulässige Auslastung überschritten. Dies soll mittels der abzumindernden Querschnittswerte bei umlaufender 1 cm tiefer Schädigung verdeutlicht werden. Die Diagramme wurden für Bauteile mit 6, 12, 24 cm Breite errechnet. Die Abminderung ist in Abhängigkeit der Bauteilhöhe dargestellt, (Diagramme 5.1 bis 5.3).

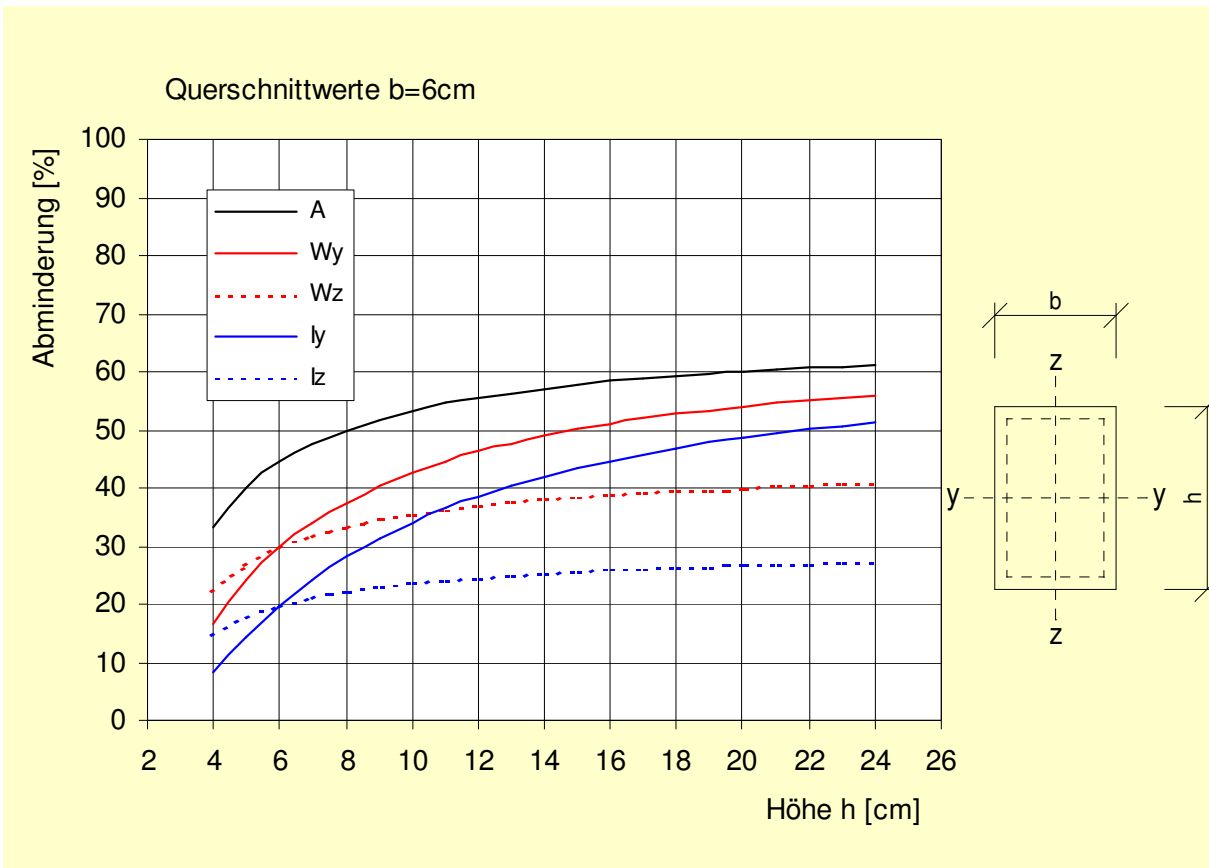


Diagramm 5.1 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite $b = 6\text{ cm}$

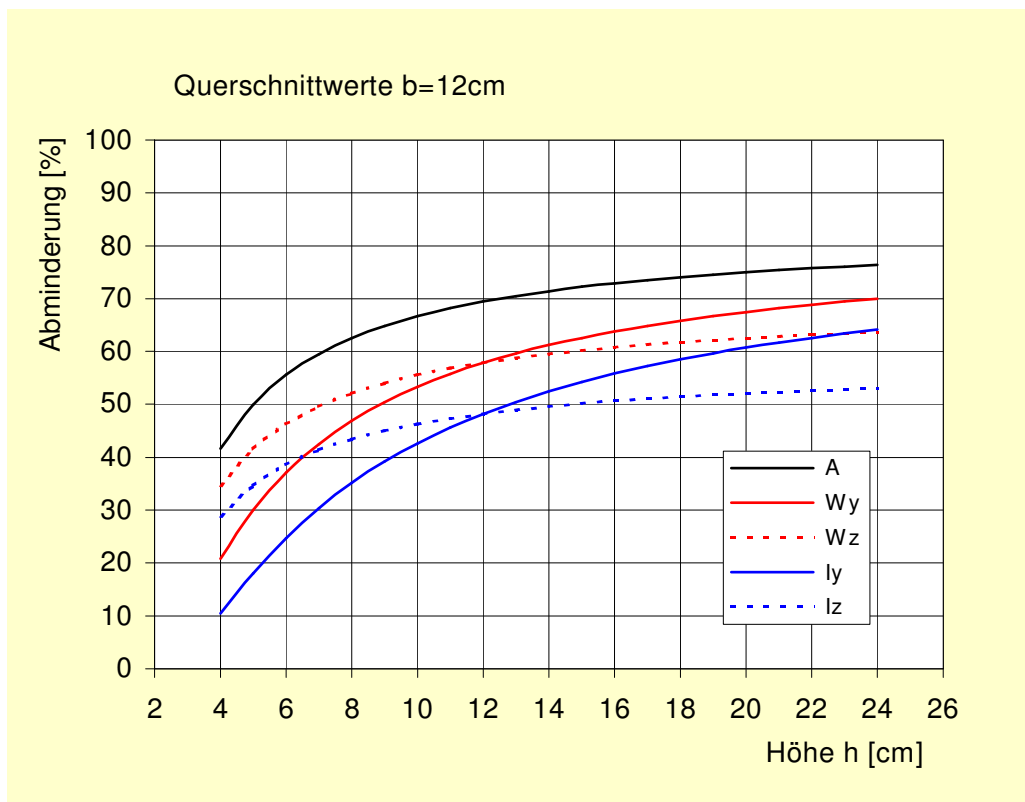


Diagramm 5.2 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite $b = 12\text{ cm}$

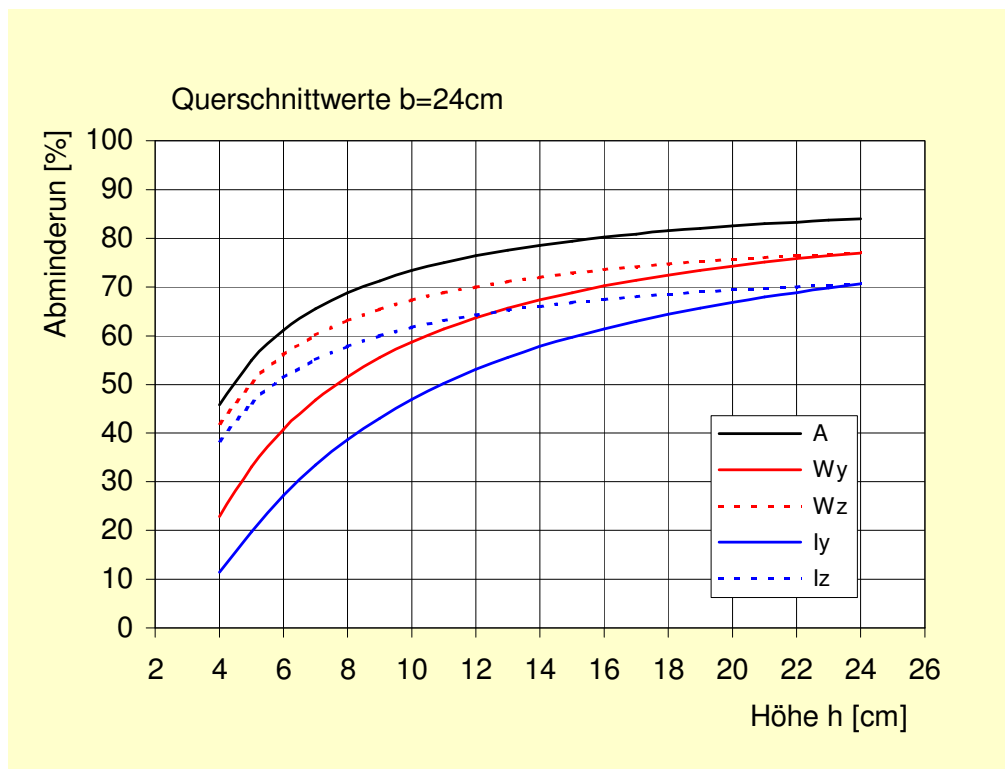


Diagramm 5.3 Abminderung von Fläche A, Widerstandsmoment W und Trägheitsmoment I bei einer Breite b = 24 cm

Geschädigte Dachlatten – z.B. – müssen in den meisten Fällen ersetzt werden. Dachlatten werden i.d.R. auf Doppelbiegung beansprucht. Bei einer Dachlatte 4/6 cm reduziert sich das anrechenbare Widerstandsmoment bei starker Schädigung durch eine chemische Holzkorrosion auf ca. 18 % (W_y) bzw. 22 % (W_z), das Trägheitsmoment sogar auf ca. 8 % (I_y) bzw. 16 % (I_z).

Der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit bei Doppelbiegung lautet nach BEKS 1-16 (DIN 1052 – neu):

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{und} \quad (5.1)$$

$$k_{red} \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.2)$$

mit

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_y}{W_{y,n}} \quad \text{und} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_z}{W_{z,n}} \quad (5.4)$$

M_y	Biegemoment um die y – Achse in kNm
M_z	Biegemoment um die z – Achse in kNm
$W_{y,n}$	Nettowiderstandsmoment auf die y – Achse bezogen in cm ³
$W_{z,n}$	Nettowiderstandsmoment auf die z – Achse bezogen in cm ³
$\sigma_{m,y,d}$	Bemessungswert der Biegespannung um die y – Achse in N/mm ²
$\sigma_{m,z,d}$	Bemessungswert der Biegespannung um die z – Achse in N/mm ²
$f_{m,y,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit um die y – Achse in N/mm ²
$f_{m,z,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit um die z – Achse in N/mm ²
k_{red}	Abminderungsfaktor; $k_{red} = 0,7$ für Rechteckquerschnitte

Meist beträgt die Gesamttiefe der Schädigung aber weniger als 10 mm. Bei Bedarf muss diese im Einzelnen ermittelt werden. Dazu kann nach Abschnitt 3.2.2 beprobt werden. Es sind pH – Wert Messungen durchzuführen. Außerdem muss über die Tiefe die Bestimmung der Holzfeuchte und der Ionenkonzentrationen erfolgen.

Eine Alternative stellt die Entnahme von Bohrkernen dar. Diese sollten einen Durchmesser von 10 bis 15 mm besitzen. Diese werden z.B. in 5 mm dicke Zylinderscheiben segmentiert und in Druckplatten mit Ausrundungen entsprechend ihrer Durchmesser gelegt und auf Druck parallel zur Faserrichtung bis zum Bruch beansprucht (Bild 5.2). Man erhält somit ein tiefengestaffertes Festigkeitsprofil in 5 mm Schritten und kann abschätzen, wann die unbeeinträchtigte Festigkeit im Inneren des Bauteils wieder erreicht ist.

Zwischen Bohrkernfestigkeit und der Druckfestigkeit der Normprobe nach DIN 52185 bestehen gute Korrelationen. Das Verhältnis der Mittelwerte der Festigkeit von Bohrkern und Normprobe beträgt bei Eiche $\sigma_{Bohrkern} / \sigma_{Normprobe} = 1,18$, bei Buche 1,01 und bei Fichte 1,25 – Mindestdurchmesser der Proben $d = 15$ mm [Lißner 2000].

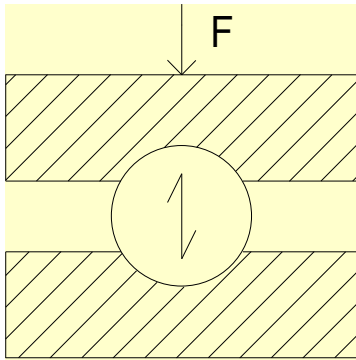


Bild 5.2 Bohrkern in Druckschale

5.3. Zeitlicher Verlauf der korrosiven Schädigung

Es steht zur Disposition, wie die Dicke der geschädigten – also der abzumindernden – Schicht über der Zeit zunimmt. Laut K. Erler [Erler 1988] gestaltet sich bei Hölzern aus der Düngemittel- bzw. Kaliindustrie die Zunahme erst progressiv und nach Ausbildung einer mazerierten Oberfläche degressiv. Auch wenn innerhalb dieser Arbeit der Nachweis nicht erbracht werden konnte, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schädigung von Dachstuhlhölzern infolge Überdosierungen bzw. Fehlanwendungen von Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln qualitativ ähnlich verhält.

Die Ursachen und die Randbedingungen für die Korrosionsschädigung ähneln sich bei Konstruktionshölzern in der Düngemittel- bzw. Kaliindustrie und auf Dachstühlen mit Einträgen von ungeeigneten Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln. Es ist anzunehmen, dass sich auch hier die Zunahme der Korrosionsschichtdicke, also $\Delta b = b - b_{\text{trest}}$ bzw. $\Delta h = h - h_{\text{trest}}$ degressiv verläuft.

Bild 1.1 stellt den Verlauf schematisch dar. Die Bauteildicke d entspricht Δb und Δh . Auffällig ist, dass ungefähr mit Ausbildung einer zerfaserten Randschicht die Kurve einen degressiven Verlauf annimmt. Dies gilt sowohl unter Einbeziehung der zerfaserten, als auch ohne Einbeziehung der zerfaserten Schicht. Die korrosive Wirkung scheint sich ab diesem Zeitpunkt abzuschwächen.

Als Ursachen dafür müssen folgende Zusammenhänge angeführt werden:

In der zerfaserten Randschicht befinden sich hohe Ionenkonzentrationen. Durch das Dickenwachstum der zerfaserten Randschicht gehen der aktiven Zone der Schädigung (Bereich zum ungeschädigten Holz) Salze verloren, so dass sich der Schädigungsprozess verlangsamen muss. Oftmals fallen ganze Faserbüschel hinunter bzw. hängen vorhangartig an den Hölzern, (Foto 11 und 12 – Anlage A). Dies verursacht eine Konzentrationsabnahme im Oberflächenbereich. Die für die Phasenwechsel der Salze kritischen Umgebungsbedingungen bezüglich relativer Luftfeuchte und Temperatur werden in geringerer Anzahl durchlaufen. Der pH – Wert nimmt für ungeschädigtes Holz typische Werte an.

Außerdem könnten dick zerfaserte Oberflächenschichten als eine Art Patina oder Schutzschicht wirken. Starke und schnelle Luftfeuchte- bzw Temperaturänderungen werden dadurch gepuffert. Die korrosive Beanspruchung innerer Holzschichten wird somit abgebremst.

5.4 Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln und Anschlüssen

5.4.1 Zimmermannsmäßig hergestellte Verbindungen

Bei den meisten historischen Dachtragwerken sind zimmermannsmäßig hergestellte Verbindungen anzutreffen, wie Versatz, Zapfen, Verblattung, Verkämmung und Klaue. (Bild 5.3). Die aufzunehmenden Kräfte werden i.d.R. durch Druckkontakt übertragen, ggf. auch über Reibung. Die Hölzer werden statisch geschwächt, besonders wenn die druckübertragenden Flächen entsprechend klein sind.

Wird nun die Größe der druckübertragenden Fläche durch einen Querschnittverlust infolge chemischer Korrosion vermindert, kann die Auslastung einer Verbindung durchaus größer als 100 % werden. Das soll am Beispiel eines durch eine chemische Holzkorrosion geschädigten Knotenpunktes verdeutlicht werden. Als Vergleichswert wird der Bemessungswert der Normalkraft F_d in der Klasse der Lasteinwirkungsdauer „ständig“ für die Strebe nach BEKS 1-16 (DIN 1052 – neu) ermittelt. (Bild 5.4). Das Beispiel zeigt den Rechengang für einen ungeschädigten Stirnversatz.

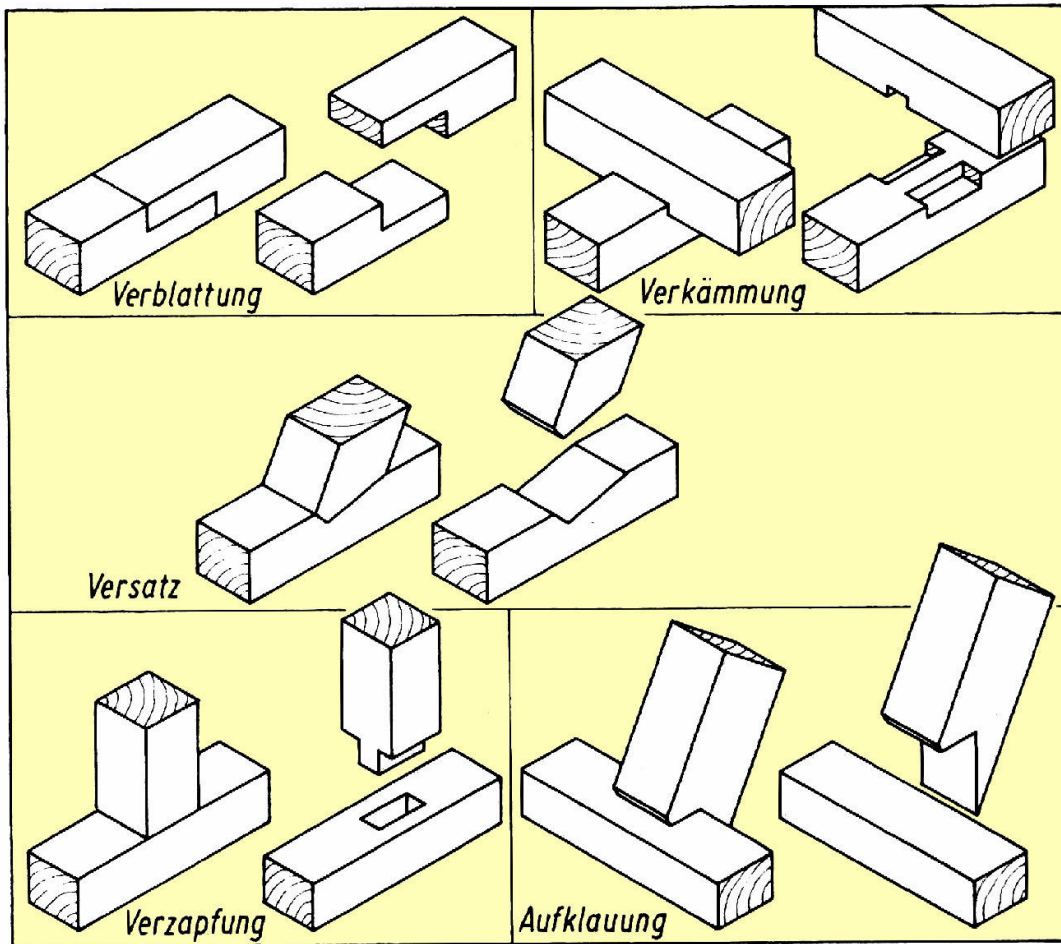


Bild 5.3 Grundformen der zimmermannsmäßigen Verbindungen, aus [Mönck 1998]

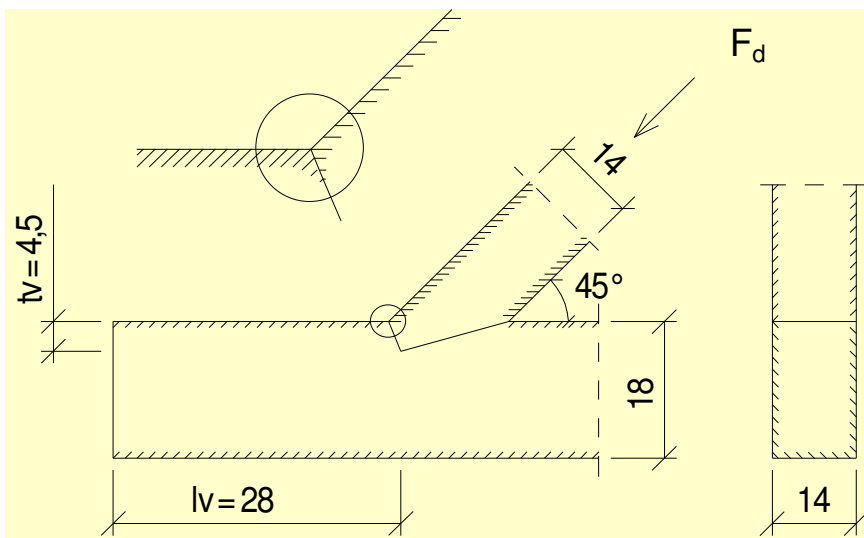


Bild 5.4 Stirnversatz mit einer oberflächennahen Schädigung

Berechnung eines Stirnversatzes ohne Abminderung des Querschnitts nach dem Schlusssentwurf Bemessungsnorm Holzbau BEKS - 2002

Ausgangswerte für den Versatz (Bild 5.4):

$$\alpha = 45^\circ$$

$$t_v = 4,5 \text{ cm}$$

$$l_v = 28 \text{ cm}$$

Die Bedingung

$$t_v \leq h/4 \text{ für } \alpha \leq 50^\circ \quad (5.5)$$

ist mit $t_v = 4,5 \text{ cm} = 18 \text{ cm} / 4 \text{ cm}$ somit erfüllt.

$$\gamma_{M,\text{Holz}} = 1,3$$

Nutzungsklasse NK: 2 ($u = 10$ bis 20%), CD 24

Klasse der Lasteinwirkungsdauer KLED: ständig - z.B. bei Kombination der Einwirkung $1,35(g+t)$

Nach Tabelle M. 1 (BEKS 2002) ergibt sich $k_{\text{mod}} = 0,6$.

$$X_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad (5.6)$$

$$f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2 \quad f_{c,0,d} = \frac{0,6 \cdot 21}{1,3} = 9,69 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2 \quad f_{c,90,d} = \frac{0,6 \cdot 2,5}{1,3} = 1,15 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2 \quad f_{v,d} = \frac{0,6 \cdot 2,7}{1,3} = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

α	Strebenneigungswinkel in °
t_v	Versatztiefe in cm
l_v	Vorholzlänge in cm
h	Balkenhöhe in cm
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeitseigenschaft, $\gamma_M = 1,3$ für Holz und Holzwerkstoffe
k_{mod}	Modifikationsbeiwert
g	Eigengewicht der Konstruktion
t	technologische Last
X_d	Bemessungswert der Baustoffeigenschaft
X_k	Charakteristischer Wert der Baustoffeigenschaft
$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung in N/mm ²
$f_{c,0,k}$	Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung in N/mm ²
$f_{c,90,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung in N/mm ²
$f_{c,90,k}$	Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung in N/mm ²
$f_{v,d}$	Bemessungswert der Schubfestigkeit in N/mm ²
$f_{v,k}$	Charakteristischer Wert der Schubfestigkeit in N/mm ²

Nachweis:

$$\frac{\sigma_{c,\alpha/2,d}}{k_{\alpha/2} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (5.7)$$

$$k_{\alpha/2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{f_{v,d}} \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \cos^4 \frac{\alpha}{2}}} \quad (5.8)$$

$$k_{\alpha/2} = \frac{1}{\sqrt{(8,43 \sin^2 22,5^\circ)^2 + (7,75 \sin 22,5^\circ \cdot \cos 22,5^\circ)^2 + \cos^4 22,5^\circ}}$$

$$k_{\alpha/2} = 0,32$$

$$\text{aus } \sigma_{c,\alpha/2,d} = \frac{F_d \cdot \cos^2 \alpha/2}{b_{\text{ef}} \cdot t_v} \quad (5.9)$$

$$F_d = \frac{\sigma_{c,\alpha/2,d} \cdot b_{\text{ef}} \cdot t_v}{\cos^2 \alpha/2} = \frac{k_{\alpha/2} \cdot f_{c,0,d} \cdot b_{\text{ef}} \cdot t_v}{\cos^2 \alpha/2} = \frac{0,32 \cdot 9,69 \text{ N/mm}^2 \cdot 140 \text{ mm} \cdot 45 \text{ mm}}{\cos^2 22,5^\circ}$$

$$\underline{\underline{F_d = 22887 \text{ N}}}$$

b_{ef} Bauteilbreite in cm

$\sigma_{c,\alpha/2,d}$ Bemessungswert der Druckspannung unter einem Winkel in N/mm²

$k_{\alpha/2}$ Abminderungsfaktor

F_d Bemessungswert der Normalkraft in N

Die Entwicklung des Bemessungswertes der Normalkraft F_d der Strebe in Abhängigkeit der festigkeitsgeminderten Randschicht ist in Tabelle 5.1 und Diagramm 5.4 dargestellt. Die Berechnung erfolgt gemäß Beispiel.

Festigkeits- geminderte Randschicht d [mm]	b_{ef} [mm]	t_v [mm]	$b_{\text{ef}} \times t_v$ [mm ²]	F_d [N]	F_d [%]
0	140,0	4,50	630,00	22887	100
2,5	135,0	4,25	573,75	20844	91,1
5,0	130,0	4,00	520,00	18891	82,5
7,5	125,0	3,75	468,75	17029	74,4
10,0	120,0	3,50	420,00	15258	66,7

Tabelle 5.1 Bemessungswert der Normalkraft F_d in der Strebe und die erforderlichen Ausgangsdaten

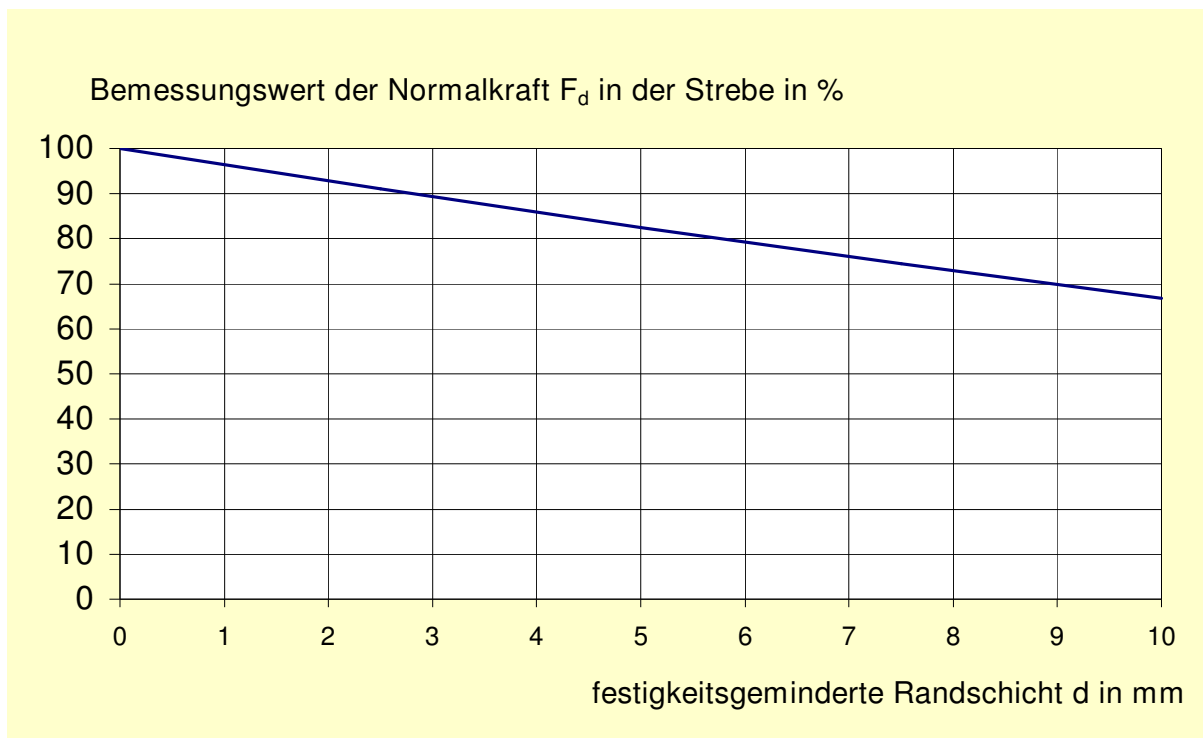


Diagramm 5.4 Bemessungswert der Normalkraft (F_d) in Abhängigkeit der festigkeitsgeminderten Randschicht (d)

Im Diagramm 5.4 kommt zum Ausdruck, dass bereits bei einer umlaufenden gleichmäßigen Schädigung von ca. 10 mm von diesem gewählten Versatz nur noch 67 % der sonst aufnehmbaren Druckkraft übertragen werden kann. Die Tragfähigkeit des Anschlusses wird also deutlich reduziert. An der Kontaktstelle muss sogar mit tieferen Schädigungen gerechnet werden, weil dort die aufgebrachten Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmittel durch die Kapillarwirkung tiefer eindringen können, so dass die druckübertragende Fläche bei starken Schädigungen noch weiter verkleinert sein kann. Diese Bereiche derartig geschädigter Anschlüsse sind deshalb jeweils sehr genau zu untersuchen.

5.4.2 Mechanische Verbindungsmittel

Eine weitere Gruppe bilden die mechanischen Verbindungsmittel. Diese übertragen Kräfte oder Momente von einem Holzbauteil auf ein anderes. Neben den Verbindungsmitteln sind oft plattenförmige Zwischenglieder aus Metall, Holz oder Holzwerkstoffen eingebaut. Die Verbindungsmittel bestehen meistens aus Metall und

werden in die zu verbindenden Bauteile eingeschlagen, eingepresst, eingeschraubt oder in vorbereitete Vertiefungen eingelegt.

Stahlteile, welche im Holz eingebettet sind, werden durch das Holz vor Stahlkorrosion geschützt. Sind dagegen die Verbindungsmittel direkt dem Angriff korrosionsauslösender Medien ausgesetzt, ist mit einer Stahlkorrosion zu rechnen, z.B. bei Schraubenenden, Unterlegscheiben, Stahlzuggliedern usw. Die Fotos 13 und 14 – Anlage A zeigen korrodierte Flachstähle und Bolzen an Hängesäulen.

Welche korrosive Wirkung wasserlösliche Holzschutz- und Holzflammschutzmittel auf stählerne Verbindungsmittel ausüben, soll an dieser Stelle nicht näher erörtert werden. Ein Stahlkorrosions-Risiko liegt aber vor.

Im modernen Holzbau ist der vorbeugende Korrosionsschutz in DIN 1052 neu – Tabelle 2 geregelt. Bei starker Korrosionsbelastung sind Dübel, Bolzen, Stabdübel, Nägel und Holzschrauben mit mittleren Zinkschichtdicken von 55 µm erforderlich. Stahlbleche und Nagelplatten sind aus nichtrostendem Stahl zu fertigen bzw. mit einem Korrosionsschutz nach DIN 55928-8 bzw. DIN EN ISO 12944-5 zu beaufschlagen.

Das Foto 15 – Anlage A zeigt einige Verbindungsmittel nach Einlagerung in eine Salzlösung und nach einer Beanspruchung mit den Wechselklima – Zyklen nach Abschnitt 3.5. Bei dieser - allerdings extremen - Beanspruchung war offensichtlich teilweise der Korrosionsschutz nicht ausreichend. Auf Dachstühlen existiert nicht die simulierte starke Beanspruchung. Dagegenzuhalten ist aber, dass Stähle in Form von Bolzen, Nägeln, Flachstählen, Ankern usw. bei historischen Dachkonstruktionen keinen bzw. nicht den Korrosionsschutz erhielten, welcher heutigen Standards genügen würde.

6 Sanierung durch Holzschutz- und Holzflammschutzmittel geschädigter Dachstuhlhälzer

6.1 Sanierungsziele

Die Zielstellungen einer Sanierung von korrosionsgeschädigten Dachstühlen können sich sehr unterschiedlich gestalten. Nicht immer sind mit entsprechenden Sanierungsmaßnahmen alle Ziele erreichbar. Oftmals gehen das technisch Durchführbare und beispielsweise die Forderungen der Denkmalpflege auseinander. Der Sanierungsplaner sieht sich mit Interessenkonflikten und Zwängen konfrontiert. Diese entstehen aus teilweise widersprechenden Zielstellungen:

- Verhinderung des Fortschreitens der Schädigung, um die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit zu erhalten, sowie um einen weiteren Substanzverlust zu vermeiden.
- Beseitigung der zerfaserten Oberflächenschicht und Salzausblühungen, um vorrangig die optische Ästhetik wiederherzustellen.
Dagegen stehen Forderungen, die Hölzer im aktuellen Zustand zu belassen, um möglichst viel Originalsubstanz und damit historische Bearbeitungsspuren, wie Zimmermannszeichen zu bewahren.
- Dekontaminationsmaßnahmen an stark belasteten Hölzern, um Gefahren für Mensch und Umwelt einzudämmen.
- Verstärkung bzw. Austausch von Bauteilen, um die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit wiederherzustellen.

6.2 Sanierungsstrategien

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit geht hervor, dass ein häufig stattfindender Phasenwechsel der anorganischen Salze, welche besonders an der Oberfläche angereichert sind, für das Zustandekommen der chemischen Holzkorrosion in Form von

„Mazeration“ primär verantwortlich ist. Die schwach saure Einwirkung der vorhandenen Medien scheint diesen Prozess zu begünstigen.

Es ist also für die Einstufung jedes Schadensfalls entscheidend, ob die eingedrungenen anorganischen Salze unter den vorherrschenden Feuchte- bzw. Temperaturschwankungen auf dem Dachstuhl häufigen Phasenwechseln unterliegen und damit in der Lage sind, die Holzoberflächenstruktur langfristig zu schädigen.

Um dies zu vermeiden, sind in der Praxis folgende Strategien einzeln oder in Kombination anwendbar:

1. Reduzierung des Salzgehaltes im Oberflächenbereich mit dem Ziel, den kritischen Luftfeuchtebereich so weit abzusenken, dass die im Holz verbleibenden Restsalze unter den gegebenen Bedingungen nicht mehr auskristallisieren können,
2. Veränderung der bauphysikalischen Randbedingungen (relative Luftfeuchte und Temperatur),
3. Reduzierung der von der relativen Luftfeuchte abhängigen stark schwankenden Feuchteabgabe und –aufnahme des Holzes (Holzfeuchte),
4. Salzumwandlung bzw. Neutralisation, um das Löslichkeitsverhalten der Salze zu verändern, d.h. um leicht wasserlösliche in schwerlösliche Salze zu überführen und den pH-Wert zu beeinflussen.

Nachfolgend werden diese möglichen Maßnahmen näher erörtert und bewertet.

6.2.1 Reduzierung des Salzgehaltes

Mechanische Verfahren

Das Entfernen der belasteten Holzoberfläche kann mechanisch, z.B. mit einem Strahlverfahren (Quarzsand, Glaspudermehl, Schmelzkammerschlacke, Basalt usw.), sowie mit Bürst-, Schleif- und Hobelverfahren erreicht werden. Hier besteht allerdings immer die Gefahr, dass die weicheren Frühholzbereiche stärker ausgeräumt werden, so dass die Holzoberfläche deutlich strukturiert wird, (Bild 6.1). Ein alleiniges Entfernen der zerfaserten Oberflächenschicht wird in den meisten Fällen nicht ausreichend sein und kann sich sogar negativ auswirken (Schutzwirkung einer Patina – Abschnitt 5).

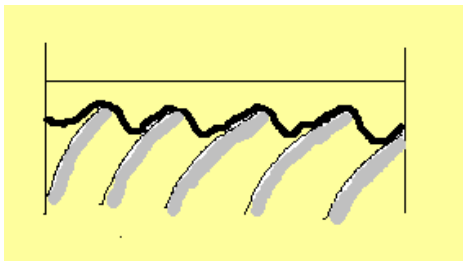


Bild 6.1 Holzoberfläche nach Einsatz eines mechanischen Verfahrens

Der Einsatz dieser mechanischen Verfahren erfordert eine Reihe von Sicherheitsvorkehrungen. Fluoridhaltige Stäube, diese können aus den Holzschutzmitteln bzw. der Holzschutzkomponente von Kombinationsmitteln stammen, z.B. signifikant auf dem Dachstuhl der Stadthalle Zerbst (Abschnitt 3.2.4.1), wirken stark haut- und schleimhautreizend sowie toxisch [Leiß 1992].

Außerdem besteht die Gefahr, dass sich aufgrund von Einträgen biozidhaltiger organischer Holzschutzmittel Wirkstoffe wie DDT, PCP oder Lindan im Staub, im Holz bzw. in der Raumluft befinden, (Abschnitt 2.1.4).

Bei allen mechanischen Verfahren ist auf eine staubarme Bearbeitung zu achten, d.h. entsprechende Absaugeinrichtungen sind unbedingt vorzusehen. Strahlgut¹⁾ und anfallende andere Materialien sind entsprechend den einschlägigen abfallrechtlichen Bestimmungen zu transportieren und zu entsorgen. Es ist für eine wirksame Abschottung der angrenzenden Bereiche und anderer Bauteile (z.B. Wände) zu sorgen. Einer feuchten Endreinigung ist der Vorzug zu geben. Bei der Sanierung sind Unfall-

verhütungsvorschriften und Durchführungsanweisungen (z.B. VGB 48 – 28.1 Strahlarbeiten) zu beachten. Weiterhin sind die Gesundheitsschutzbestimmungen einzuhalten.

Diese Hinweise sollten bei der Ausschreibung berücksichtigt werden. Bei der Vergabe muss darauf geachtet werden, dass nur zertifizierte Fachbetriebe mit entsprechenden Erfahrungen berücksichtigt werden.

- 1) Das Strahlgut setzt sich aus dem eigentlichen Strahlmittel und dem abgestrahlten belasteten Holzpartikeln zusammen. Es handelt sich hierbei um besonders überwachungsbedürftige Reststoffe bzw. Abfälle. Diese sind in der TA-Abfall im Anhang C nach übergeordneten Sortiermerkmalen zusammengefasst und durch einen Abfallschlüssel gekennzeichnet. Die TA-Abfall enthält entsprechende Entsorgungshinweise (eine stoffliche Verwertung ist ausgeschlossen). Für die abgestrahlten belasteten Holzpartikel trifft der Abfallschlüssel 17214 zu, d.h.: Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend anorganisch. Als Beispiel werden mit wasserlöslichen Holzschutzmitteln imprägnierte Hölzer und Holzpartikel aufgeführt. Für Flammschutzmittel trifft dieser Sachverhalt ebenfalls zu. Die Entsorgung auf Deponien wird durch die Bestimmungen der neuen Abfallgesetzgebung zunehmend ausgeschlossen. Deshalb ist eine thermische Verwertung die best geeignete Entsorgungsart falls sich keine Einschränkungen bezüglich des verwendeten Strahlmittels ergeben.

Entsalzung mit Kompressen

Bei der Sanierung von salzgeschädigtem Mauerwerk sind seit einiger Zeit bestimmte Kompressenmaterialien zur Entsalzung erprobt und auch in der Praxis im Einsatz.

Auf das Mauerwerk werden angefeuchtete Lagen von Zellulose oder Zellstoffbahnen gelegt, um somit die Salze im Mauerwerk zu mobilisieren. Es wird also ein nach außen gerichteter Kapillarwasserstrom erzeugt, welcher die Salze aus dem Mauerwerk hinaus in die Kompressenschicht transportieren soll.

Bewährt hat sich ein zweistufiges Verfahren, wobei eine erste unter Folie gehaltene Komresse ein Inlösengehen der Salze bewirken soll, danach folgt eine verdunstungsaktive Komresse ohne Abdeckung, [Wallasch 1999].

Dieses Verfahren ist auch bei der Entsalzung von durch Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln geschädigten Dachstuhlhölzern denkbar. Die Effektivität hängt von verschiedenen Randbedingungen ab:

- Dicke, Art und Feuchtegehalt des Kompressenmaterials,
- Holzfeuchte und Tiefe der eingedrungenen Salze,
Dafür spricht, dass bei den untersuchten Dachstuhlhölzern die Salze im Gegensatz zum Mauerwerk nur in einer wenige Millimeter dicken Oberflächenschicht angereichert sind.
- Zeit,
- Innenraumklima.

Ein Hauptproblem besteht wahrscheinlich darin, dass die oberflächennahen Salze in tiefere Schichten wandern können, dass sich der Effekt praktisch umkehrt. Deshalb sind in dieser Hinsicht Untersuchungen nötig, um die für das Verfahren optimalen Materialien und Parameter zu finden. Außerdem sollte generell bei all diesen Verfahren eine analytische Begleitung stattfinden.

6.2.2 Veränderung der bauphysikalischen Randbedingungen (rel. Luftfeuchte und Temperatur)

Diagramm 6.1 zeigt qualitativ, in welchem Bereich die relative Luftfeuchte ϕ schwankt. In den Monaten des höchsten Sonnenstandes wird die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert naturgemäß größer ausfallen, aufgrund der stärkeren Austrocknung des Dachraums an sonnigen und warmen Tagen. ϕ und $\Delta\phi$ ist außerdem abhängig ob und wie darunterliegende Geschosse beheizt werden, sowie von der konstruktiven Ausbildung der Dachhaut und der Decke zum Dachgeschoss.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass fast das gesamte Jahr hindurch an vielen Tagen die kritische Luftfeuchte zwischen einem oberen und einem unterem Wert im Tagesgang durchschritten wird.

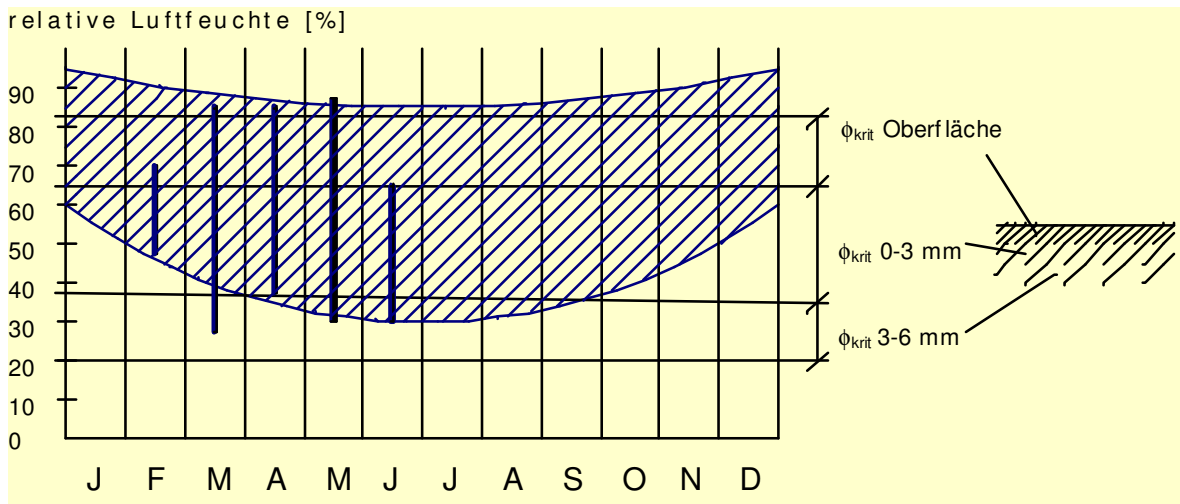


Diagramm 6.1 Möglicher Schwankungsbereich der relativen Luftfeuchte $\Delta\phi$ eines belüfteten historischen Daches und die tatsächlich gemessene Schwankungsbreite zw. Maximal- und Minimalwert im jeweiligen Monat, (Abschnitt 3.2.1.3). Der für einen Phasenwechsel der Salze kritische Luftfeuchtebereich ϕ_{krit} wurde für den Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg anhand der Ergebnisse in Abschnitt 3.3 abgeschätzt.

Durch den Einbau von Lüftungziegeln bzw. einen geeigneten bauphysikalischen Aufbau der Dachhaut kann erreicht werden, dass sich im Sommer der Dachraum infolge Sonneneinstrahlung weniger aufheizt und infolgedessen die rel. Luftfeuchte nicht so weit absinkt. Andererseits kann die im Winter aus den unteren Geschossen aufsteigende warme und mit Feuchtigkeit angereicherte Luft besser abgeführt werden, so dass die Maximalwerte der rel. Luftfeuchte im Dachraum gedrosselt werden.

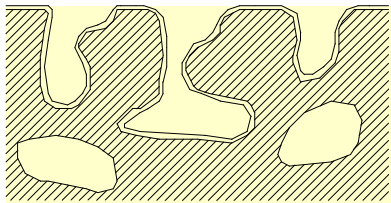
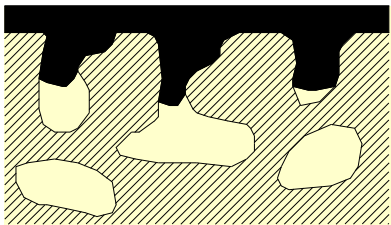
Idealerweise muss konstruktiv angestrebt werden, dass die Differenz der rel. Luftfeuchte $\Delta\phi$ in jeder Jahreszeit ein Minimum erreicht. Damit können die strukturschädigenden Phasenwechsel der Salze im Holz vermindert werden.

6.2.3 Reduzierung der Feuchtaufnahme und –abgabe des Holzes

Feuchtaufnahme und –abgabe und der sich daraus ergebende Betrag der Holzfeuchte u ist wesentlich abhängig von der Änderung der umgebenden rel. Luftfeuchte ϕ und von Art und Menge der eingelagerten Salze.

Wenn es gelingt, die Feuchteaufnahme bzw. –abgabe durch entsprechende Oberflächenbehandlungen zu reduzieren, wird verhindert, dass der für die Phasenänderung kritische Luft- bzw. Holzfeuchtebereich häufig durchschritten wird. Hier ist die Anwendung von Beschichtungssystemen in Form von Lacken oder das Aufbringen von Siliziumverbindungen (Verkieselung) denkbar.

Übersicht 6.1 stellt grundlegende Unterschiede zwischen den zwei wichtigsten Oberflächenbehandlungen dar.

Oberflächenbehandlung	Charakteristik
<p>Imprägnierung</p> 	<p>Durch das Imprägniermittel werden die oberflächennahen Porenwände (Zellwände) ausgekleidet, der Querschnitt wird nur unwesentlich verengt. Durch hydrophobierende Zusätze kann eine wasserabweisende Wirkung erzielt werden. Die Zellwände werden vom Mittel penetriert.</p>
<p>Beschichtung</p> 	<p>Auf der Oberfläche bildet sich ein geschlossener Film, die Poren sind teilweise gefüllt. Das Beschichtungsmittel (z.B. Lack) ist kaum bzw. nicht penetrierend. Unterschieden wird – in Abhängigkeit von der Pigmentierung - zwischen farbloser, lasierender oder deckender Beschichtung.</p>

Übersicht 6.1 Oberflächenbehandlungen bei Holz

Zum Beispiel kam auf dem Dachstuhl des Gebäudes der Landesregierung Potsdam ein Alkydharz zum Einsatz. Hier lag das typische Schadbild der „Mazeration“ infolge häufigen Einsatzes des Kombinationsmittels „Dohnalit Pyro I“ vor. Anfang der neunziger Jahre wurde die Holzoberfläche gestrahlt (Strahlgut: Basalt). Es blieb eine strukturierte Oberfläche zurück. Danach wurden einige Hölzer mit einem leicht bräunlich pigmentierten Alkydharz „Rustikal – decor“ der ehem. Fa. SIGMA Unitecta Farben GmbH gespritzt. Das Alkydharz in dieser Form besitzt durch seine diffusionshemmende¹⁾ Eigenschaft eine feuchtigkeitspuffernde Wirkung. Außerdem wird die Oberfläche verfestigt. Es trat im Nachhinein keine erneute „Mazeration“ auf. Dage-

gen trat auf einer Musterfläche, welche leicht mittels einer Mantelfläche rotierender Bürsten mechanisch behandelt und danach in diesem Zustand belassen wurde, nach einiger Zeit wieder „Mazeration“ auf. (nach Mitteilung Dipl.-Ing. Flohr).

1) Die Wasserdampf – Diffusionswiderstandszahl beträgt bei Alkydharzlacken $\mu = 15000 - 25000$ [Böttcher 2001], damit sind diese Lacke stark diffusionshemmend.

Auch das Aufbringen von Mitteln auf der Basis von hydrophobierenden Siliziumverbindungen, die sog. Verkieselung, ist eine Art der Imprägnierung. Dadurch wird der Oberflächenbereich des Holzes modifiziert. Die Si – Verbindungen gehen chemische Verbindungen mit Holzzellwandkomponenten ein. Dadurch wird das Holz wasserabweisend und es erfährt ein besseres Quell- und Schwindverhalten, d.h. die Dimensionsstabilität wird verbessert. Außerdem erhöht sich die Dauerhaftigkeit. Allerdings sind dem Verfasser der vorliegenden Arbeit keine Versuche bzw. Anwendungen bei salzgeschädigten Hölzern bekannt. Problematisch ist sicherlich die Verträglichkeit der Siliziumverbindungen mit den im Holz vorhandenen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln.

6.2.4 Anwendung von Sanierungsmitteln

Auf dem Markt befinden sich einige Schutz- bzw. Sanierungsmittel, welche nach Entfernen der zerfaserten Schicht auf das Holz aufgetragen werden und welche durch die chemische Umwandlung der Salze (Verringerung der Löslichkeit, Neutralisation) ein Fortschreiten der „Mazeration“ verhindern sollen.

Problematisch ist bei allen diesen Behandlungen, dass im Holz bzw. an der Oberfläche neue Salzbildungen in Kauf genommen werden müssen. Teilweise verbleiben diese Salze irreversibel im Holz auf Grund ihrer sehr geringen Löslichkeit und ihrer Reaktionsfreudigkeit mit Zellwandkomponenten. Dies führt zu einer insgesamt größeren Anreicherung im Oberflächenbereich. Deshalb müssen bei jeder Sanierung vorerst Musterflächen angelegt werden, um das Verhalten des Holzes (bezüglich einer erneut möglichen mechanischen Strukturschädigung, Salzausblühungen, Feuchteverhalten usw.) zu prüfen.

Hersteller	Handelsname	Chemische Basis	Verarbeitung	Beschriebene Wirkung
Kurt Obermeier GmbH & Co.KG ¹⁾	Korasit LH (nicht mehr auf dem Markt)	Natriumsalz einer Hydroxycarbonsäure (z.B. Natriumlaktat)	Entfernen der gelockerten Holzfasern, Lieferform 1 : 1 mit Wasser verdünnen (40%-ige Lösung), 2 bis 3 Anstriche: 100 bis 500 g/m ² nach 2 bis 3 Jahren wiederholen	Stoppen der hydrolytischen Spaltung durch Pufferung und Konstanthalten der Holzfeuchte auf hohem Niveau, um ein Fortschreiten der Schädigung durch phys. Einflüsse zu verhindern
Remmers Bauchemie GmbH ²⁾	Aidol [®] Holzsanierung MZ	Alkydharz (wasseremulgierbar) mit einer gewissen Wasserdampfdurchlässigkeit, Triethylamin	Entfernen der gelockerten Holzfasern, zweimaliges Auftragen: 200 bis 300 ml/m ²	Verfestigung, Verbindung mit der im Holz vorhandenen Flusssäure (HF) zu einer festen salzartigen Verbindung, Neutralisation, Immobilisierung von im Holz eingelagerten Salzen

1) aus [Z2, Z3]

2) aus [Z4, Z5]

Übersicht 6.2 Anbieter von Sanierungsmitteln

Auf dem Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg haben sich beispielsweise Na⁺ - Ionen aus dem Korasit LH mit den schon im Holz vorhandenen SO₄²⁻ - Ionen zum wasserhaltigen Glaubersalz Na₂SO₄ · 10H₂O kristallisiert. Auf den Hölzern haben sich dadurch im Nachhinein starke weiße Ausblühungen gebildet, (Foto 12 – Anlage A).

Die Wirkungsweise von Aidol[®] Holzsanierung MZ beruht auf der Annahme, dass durch die Bildung von Flusssäure HF aus der Zersetzung von Ammoniumfluorid

NH₄F Ligninbestandteile angegriffen werden und dass dadurch die „Mazeration“ ausgelöst wird [Z5].

Erstens wird allerdings aber bei einem schwach sauren Angriff lediglich Hemizellulose, bei stärkerem Angriff auch Zellulose abgebaut und zweitens kann die Wirkung von Flusssäure nur im Zusammenspiel mit anderen Faktoren betrachtet werden.

Entscheidend für die Oberflächenschädigungen von Holz sind Salze in hohen Konzentrationen im Oberflächenbereich, welche aufgrund ihrer ständigen Phasenwechsel eine mechanische Strukturschädigung des Holzes hervorrufen.

6.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Sanierungsstrategien

Übersicht 6.3 gibt einen Überblick über Vor- und Nachteile der einzelnen Sanierungsstrategien.

Ein zusätzlicher Eintrag von Chemikalien (vor allem Verkieselung, Sanierungsmittel) birgt immer die Gefahr der Neubildung von chemischen Verbindungen im Oberflächenbereich, deren Langzeitwirkung bezüglich eines Schadenfortschritts nur schwer einzuschätzen bzw. vorherzusagen ist. Dies gilt vor allem, wenn sich im Verlauf der Nutzung die bauklimatischen und/oder bauphysikalischen Umgebungsbedingungen ändern.

Deshalb ist bei der Sanierung immer eine Variante vorzuziehen, bei welcher der größte Teil der korrosionsauslösenden Salze entfernt wird. Der Sanierungserfolg kann hierbei durch flankierende Maßnahmen, wie Vergünstigung der bauphysikalischen Randbedingungen und/oder eine schichtbildende Oberflächenbehandlung, positiv beeinflusst werden.

Verfahren / Maßnahme	Vorteile	Nachteile
Mechanische Verfahren (Bürst- und Schleifverfahren, Strahlen)	<ul style="list-style-type: none"> • Die geschädigte und mit Salzen angereicherte Schicht ist weitestgehend entfernt. • Mit den Salzen werden gleichzeitig – falls vorhanden – Kontaminationen infolge chlorierter Kohlenwasserstoffe entfernt.¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • Originalsubstanz mit eventuell historischen Abbundzeichen und Bearbeitungsspuren geht verloren. • Strukturierung der Holzoberfläche, u.U. kreisförmige Bearbeitungsspuren • Hoher Aufwand bezüglich Arbeitsschutz und Entsorgung des Strahlgut / Holz / Chemikalien Gemenges.
Kompressen	<ul style="list-style-type: none"> • Originalsubstanz kann u.U. erhalten werden ²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchteeintrag ins Holz • aufwendig, langwierig • keine Erfahrung in der Praxis
Veränderung der bauphysikalischen Randbedingungen (rel. Luftfeuchte und Temperatur)	<ul style="list-style-type: none"> • Originalsubstanz kann u.U. erhalten werden ²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> • u.U. hoher konstruktiver Aufwand
Absperrung des Holzes mit diffusionshemmenden, dauerelastischen Decklacken (z.B. Alkyd)	<ul style="list-style-type: none"> • Originalsubstanz kann u.U. erhalten werden ²⁾ • Verfestigung der Oberfläche • Erreichen größerer Dimensionsstabilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Verträglichkeit mit den im Holz vorhandenen Chemikalien u.U. nicht gegeben • Möglichkeit der Rissbildung → kapillares Eindringen von Wasser → Austrocknung wird behindert → Gefahr von Pilzbefall • Nachbehandlung nach 2 bis max. 5 Jahren

Konservierung der Oberfläche mit Siliziumverbindungen		<ul style="list-style-type: none"> • Verträglichkeit mit den im Holz vorhandenen Chemikalien u.U. nicht gegeben (z.B. alkalische Reaktion von Wasserglas $M_2O \cdot nSiO_2$) • milchig weißer Überzug bei Wasserglas ³⁾ • Irreversibel aufgrund der chemischen Fixierung an Zellwandkomponenten
Sanierungsmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Originalsubstanz kann u.U. erhalten werden ²⁾ • Verfestigung der Oberfläche (Aidol[®] Holzsanierung MZ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verträglichkeit mit den im Holz vorhandenen Chemikalien u.U. nicht gegeben, z.B. Ausblühungen von Glaubersalz (Korasit LH), • meist irreversibel und weitere Aufkonzentration von Chemikalien im Oberflächenbereich

1) Die höchste Konzentration dieser chlorierten Kohlenwasserstoffe befindet sich meist einige Millimeter unter der Holzoberfläche aufgrund der leichtflüchtigen Eigenschaften der meisten Verbindungen. Deshalb besteht die Gefahr, dass durch das mechanische Entfernen der oberflächennahen Bereiche gerade die Schicht mit der größten Kontamination wieder freigelegt wird. Hier besteht unbedingte Notwendigkeit von Voruntersuchungen.

2) Hier ist natürlich ebenfalls ein mechanisches Entfernen der lose aufliegenden Fasern vorgesehen (weiche Bürsten, Staubsauger), ohne dass eine profilierte Oberfläche entsteht bzw. in tiefere Schichten eingegriffen wird. Bei starker und tiefer Schädigung sind Abbundzeichen, Bearbeitungsspuren etc. sowieso unwiederbringlich verloren. Bei leichten Schädigungen bleiben diese aber bei der Anwendung schonender mechanischer Verfahren erhalten und sichtbar.

3) Natrium- und Kaliumsilikate (Wasserglas) sind auch als Verkieselungen von Holzoberflächen als Brandschutz bekannt. Auf älteren Dachstühlen lässt sich dieser milchigweiße Überzug noch oft feststellen. Nach 1942 sollte er als ein Mittel gegen Brandbomben der beginnenden Luftangriffe auf deutsche Städte wirken. Durch die Verkieselung wird eine höhere Dauerhaftigkeit des Holzes erreicht. Die damals behandelten Hölzer sind bis heute recht unversehrt, zumindest von Insektenbefall.

Übersicht 6.3 Vor- und Nachteile einzelner Sanierungsstrategien

6.3 Sanierungslösungen für die untersuchten Fallbeispiele

Neben Holzschutz- und Holzflammschutzsalzen befinden sich zusätzlich signifikante Kontaminationen von chlorierten Wasserstoffen (p,p'-DDT und Lindan) in den Dachstuhlhölzern der Lutherhalle Wittenberg.

Lindan, aber mehr noch DDT, verbleiben jahrzehntelang im Holz und werden nur langsam – auch noch nach langer Zeit – über die Dampfphase an die Raumluft abgegeben. Manche Biozide besitzen eine gewisse „Kriechneigung“, d.h. sie bewegen sich vom Inneren des Holzes an die Oberfläche und kristallisieren dort in Form kleiner Nadeln aus (DDT). Als Lösemittel wurde wahrscheinlich „Laval 300“ verwendet. Währenddessen der größte Teil der aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffe abgedampft ist, verbleiben höhersiedende Naphthene länger im Holz und stellen auch jetzt noch ein beträchtliches Gefährdungspotential dar. [Unger 2002, Horn 1999].

Auf dem Markt befinden sich etliche Sanierungsmittel, welche diese Biozide durch eine zweite Substanz im Holz maskieren, also im chemischen Sinne unkenntlich machen sollen. Die im Holz vorhandenen Biozide werden entweder abgesperrt, die Biozide werden also am Austreten gehindert, oder sie werden in eine nicht toxische chemische Form umgewandelt.

Sind die Hölzer nur mit den benannten Bioziden belastet, ist der Einsatz solcher Mittel vielleicht erfolgreich. Anders auf dem Dachstuhl der Lutherhalle. Hier sind weitere Chemikalieneinträge generell nicht zu empfehlen. Eine mechanische Oberflächenbehandlung allein würde auch nicht ausreichend sein, weil die infolge der Bohrlochtränkung (Abschnitt 3.2.1.1) tief in das Holz eingedrungenen organischen Biozide ohnehin nicht erfasst würden. Außerdem ist im Vorfeld zu klären, ob eine Sanierung bezüglich organischer Biozide überhaupt einen Sinn ergibt. Ein Dachgeschossausbau für Wohn- oder Arbeitszwecke ist am Objekt Lutherhalle Wittenberg nicht vorgesehen. Deshalb sind Konzentrationen in der Raumluft, im Staub und im Holz auf dem Dachstuhl irrelevant, die in den darunter liegenden Geschossen existenten Konzentrationen allerdings nicht. Deshalb sind diese Räume bei Überschreitung der

Grenzwerte zu dekontaminieren, auf jeden Fall aber staubdicht vom Dachgeschossbereich abzutrennen.

Die zerfaserte Schicht ist mechanisch mit einem schonenden Verfahren zu entfernen. Bei der Verwendung der Mantelfläche rotierender Bürsten z.B. hält sich die Beeinträchtigung infolge Oberflächenstrukturierung in Grenzen. Wenn ein stärkerer Strukturierungsabtrag akzeptabel ist, können auch Strahlverfahren eingesetzt werden. Danach ist eine Beschichtung mit einem diffusionshemmenden Klarlack zu empfehlen, um erneute Phasenwechsel der im Holz verbliebenen Salze zu verhindern. Auf alle Fälle sollte vorerst eine Musterfläche angelegt werden, um den Erfolg der Sanierungsmaßnahme mindestens 6 Monate lang zu testen.

Auf dem Dachstuhl der Stadthalle Zerbst könnte ähnlich verfahren werden. Allerdings wurden dort keine Anzeichen eines Einsatzes von organischen Bioziden vorgefunden. Jedoch sollten auch hier die unteren Bereiche abgedichtet werden, weil hohe Fluoridkonzentrationen in der Luft bzw. im Staub ebenfalls Gesundheitsschäden hervorrufen können.

Die tragenden Dachstuhlhölzer beider Objekte können in die Gefährdungsklasse GK 0 nach DIN 68800 – 3 eingestuft werden. Eine Ausgleichsholzfeuchte von $u < 20\%$ sollte gewährleistet sein. Außerdem sind die Hölzer von mindestens drei Seiten einsehbar, so dass sie auf einen eventuellen Insektenbefall kontrollierbar sind. Es kann also auf einen erneuten chemischen Holzschutz verzichtet werden, wobei sogar davon ausgegangen werden kann, dass der vorhandene Holzschutz größtenteils noch wirksam ist. Lediglich Sparrenfußpunkte und mauerwerksberührende Hölzer müssen u.U. der GK 2 zugeordnet werden, d.h. es ist ein chemischer Nachschutz mit pilzwidriger (P) und insektenvorbeugender (lv) Wirksamkeit vorzusehen. Dazu bedarf es aber einer gesonderten Begutachtung.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird zuerst die korrosive Schädigung von Holz infolge der Anwendung von spezifischen (flüssigen) Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln auf Dachstühlen dargestellt. Zudem wird der bisherige Erkenntnisstand zur Wirkung von manchen Salzen (Düngemittel, Kaliindustrie, phosphathaltige Flammschutzmittel usw.) auf die Beständigkeit bzw. die Korrosion von Holz zusammengefasst und ausgewertet.

Im nächsten Abschnitt werden die allgemein schadauslösenden Faktoren und Randbedingungen einer Holzkorrosion beschrieben. Demnach wird abgeklärt, welche Holzschutz- und Holzflammschutzmittel in der Vergangenheit zum Einsatz kamen, ebenso die physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Wirkstoffe, sowie die klimatischen, atmosphärischen und die baulich konstruktiven Umgebungsbedingungen ihres Einsatzgebietes.

Die Holzkorrosionsschäden traten immer dort verstärkt auf, wo in den 70iger und 80iger Jahren häufig und in hohen Konzentrationen spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel auf die Hölzer gesprüht wurden, in der ehem. DDR die Fabrikate „Dohnalit FPI“ und „Dohnalit Pyro I“. Diese Mittel besaßen eine kombinierte Wirkung. Sie waren nämlich vorbeugend gegen holzschädigende Organismen eingestellt und bewirkten zudem die Verminderung der Brandanfälligkeit zum Erreichen der Einstufung „Schwer brennbar“.

Als Ursache für die chemische Holzkorrosion wurde in diesen Fällen manchmal auch das Wirken eines zeitweisen Kristallisationsdruckes der Salze der Kombinationsmittel auf die Holzstruktur vermutet, jedoch wissenschaftlich nicht abgeklärt.

Dieser Druck kann sich allerdings nur beim langsamen Übergang von der gelösten in die kristalline Salzphase aufbauen. Ob dieser Phasenwechsel vollzogen werden kann und wie oft, hängt wiederum von der Art und der Konzentration der an der Holzoberfläche angereicherten Salze ab. Zudem wird er von den klimatischen Umgebungsbedingungen - relative Luftfeuchte (ϕ), Temperatur (θ) - des Holzes beein-

flusst. Unter ungünstigen Bedingungen wirkt eine schwellende Feuchtigkeits- und Trocknungsbeanspruchung besonders abträglich auf das Holz bzw. auf die Holzmikrostruktur, welche somit langfristig zur nachhaltigen Kristallisationsdruck – Materialschädigung führen kann.

Um wissenschaftlich fundiert abzuklären, ob der manchmal vermutete Schadensmechanismus zutrifft und in welchen Einzelschritten die Holzkorrosion abläuft, wurde die vorliegende Arbeit angefertigt.

Um demnach zuerst feststellen zu können, ob und unter welchen Bedingungen die Phasenwechsel vom gelösten zum kristallisierten Salz und umgekehrt stattfinden, wurden Dachstuhlhölzer an zwei beispielhaften Objekten eingehend beprobt. Bei den Objekten handelt es sich um die Dachstühle der Lutherhalle in Wittenberg und der Stadthalle in Zerbst.

Auf beiden Dachstühlen traten an den Hölzern die typischen Holzkorrosionsschäden infolge der mehrmaligen Anwendung von spezifischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln auf.

Für die Untersuchungen war es notwendig, ein spezielles und praktikables Beprobungsschema zu entwickeln, welches es erlaubt, sowohl chemische und physikalische Kenndaten einer geschädigten Holzoberfläche, als auch der ungeschädigten Bereiche im Holztiefenprofil ermitteln zu können.

An jeder Probe wurde hierzu ionenchromatographisch die Zusammensetzung und Menge der im Holz vorhandenen Ionen analysiert. Außerdem wurden für jede Probe die Sorptionsisothermen in einem Luftfeuchtebereich von $\phi = 20$ bis 95 % ermittelt.

Es zeigte sich, dass zumindest auf dem Dachstuhl der Lutherhalle die Ionenkombination $\text{PO}_4^{3-} / \text{SO}_4^{2-} / \text{NH}_4^+$ in den Oberflächenschichten der Hölzer vorherrschend ist. Zudem gelang es, das Löslichkeitsverhalten des Systems: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ aus den Parametern der Ionenkonzentration und der vorhandenen Wassermenge im Holz in Abhängigkeit von der umgebenden relativen Luftfeuchte (ϕ) darzustellen.

Mit diesem Modell können die Bedingungen für einen Phasenwechsel der Holzschutz- und Holzflammschutzsalze vorausberechnet werden.

Demnach kommt es bei manchen Oberflächenproben schon beim Unterschreiten einer relativen Luftfeuchte von lediglich $\phi = 70$ bis 75% zur Kristallisation zuerst des Salzbestandteiles $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ des Holzschutz- bzw. Holzflammschutzmittels. In Übereinstimmung hiermit trat an diesen Proben verstärkt eine chemische Holzkorrosion in Form einer „Mazeration“ auf, also eine Oberflächenschädigung durch den Kristallisationsdruck von langsam auskristallisierten Salzen der Holzschutz- und Holzflammschutzmittel. Die Holzkorrosion erfolgte im Gegensatz zu Nullproben, bei denen es unter den gegebenen klimatischen Bedingungen auf Dachstühlen nicht zur Salzkristallisation kommen kann und welche demnach auch keine strukturellen Schädigungen erlitten.

Es konnte demnach ein eindeutiger Zusammenhang hergestellt werden zwischen der Strukturschädigung des Holzes und der Möglichkeit der langsamen Kristallbildung der im Oberflächenbereich auskristallisierten Salze und somit der Bestandteile von vormalig mehrmals angewendeten spezifischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln.

Um die vorherrschenden klimatischen Bedingungen auf einem Dachstuhl zu erfassen, wurden auch beispielhaft über einen längeren Zeitraum auf dem Dachstuhl der Stadthalle Zerbst die relative Luftfeuchte (ϕ) und die Temperatur (θ) im Tagesgang gemessen. Es zeigte sich hierbei, dass die für eine Auskristallisation der eingelagerten Salze der Kombinationsmittel kritischen Luftfeuchten häufig unterschritten werden.

Mittels der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen, eigenen theoretischen Überlegungen und der Auswertung anderer Arbeiten wurde somit wissenschaftlich eindeutig abgeklärt, unter welchen Umständen die Holzkorrosion eintritt:

- Nach der Schutzmittelbehandlung reichern sich im Holz-Oberflächenbereich in der „Primärwand“ und der „Sekundärwand 1“ bzw. in deren Übergangsbereichen der Zellwand die gelösten Salze der Holzschutz- und Holzflammschutzmittel an.

- Kommt es aufgrund der Änderung der Umgebungsbedingungen zur langsamen Salzkristallisation, bewirkt die somit ermöglichte Bildung voluminöser Kristalle vorrangig einen Kristallwachstumsdruck auf die Holzumgebung und somit auf die Bestandteile der Holzzellwände.
- Die Holz-Zellwandschichten „Primärwand“ und die „Sekundärwand 1“ bzw. deren Übergangsbereiche sind die mechanischen Schwachstellen der Zellwand.
- Diese Holz-Zellwandschichten werden zudem zusätzlich geschwächt durch den schwach sauren Angriff der meist sauer reagierenden Holzschutz- und Holzflammschutzsalze.
- Zusätzlich können auch saure Umweltschadstoffe einwirken. Der schwach saure Angriff führt nämlich zum Abbau von Teilen der Hemizellulose, deren höchste Konzentration sich wiederum in der „Primärwand“ und der „Sekundärwand 1“ befindet.
- Folglich tritt bei höherem Kristallisationsdruck eine Gefügeschädigung in Form einer „Mazeration“ ein.

Demnach verfügt man jetzt über die Kenntnis des wissenschaftlich abgeklärten Schadensmechanismus der „Mazeration“ durch spezifische Holzschutz- und Holzflammschutzmittel.

Im Gegensatz zu manchmal früheren Vermutungen, dass alleinig durch das Vorhandensein von spezifischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln eine Kristallisationsdruckschädigung eintreten kann, sind unbedingt zusätzlich spezifische Umgebungseinwirkungen für das Zustandekommen der „Mazeration“ erforderlich.

Weiterhin wurde die Auswirkung der korrosiven Beanspruchung durch spezifische Holzschutz- bzw. Holzflammschutzsalze auf die Festigkeit und das Holzverformungsverhalten an kleinen fehlerfreien Proben im Biegeversuch nach DIN 52183 ermittelt:

- Während der E – Modul keine signifikante Veränderung zeigte, war die Biegefestigkeit am Ende der Versuchsserie gegenüber derjenigen der Nullproben um ca. 14 % deutlich herabgesetzt. Strukturschädigungen – nämlich separierte Tracheiden – an der Bruchstelle (äußerer Rand der Zugzone) zeigen die korrosive Schädigung der Oberfläche.
- Ob die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines derart geschädigten hölzernen Bauteils beeinträchtigt wird, hängt von der aktuellen Auslastung und von der Schädigungstiefe ab.
- Die stark zerfaserte Oberflächenschicht trägt nicht zur Festigkeit bei. Es muss jedoch auch eine darunter liegende, nicht oder noch nicht durch die „Mazeration“ geschädigte Schicht in Abzug gebracht werden, bis der Gesamtsalzgehalt $S < 20 \text{ g/kg}$ beträgt und die pH – Werte wieder 4,5 bis 5,5 erreichen.
- Dies gilt, obwohl der Verlauf der Schädigung sich degressiv gestaltet, aufgrund der ständigen Konzentrationsabnahme der Schadsalze im Oberflächenbereich.

Die Nutzungsfähigkeit entsprechender Räume ist durch die Staubbildung infolge „Mazeration“ eingeschränkt.

Die Tragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln und -verbindungen wird durch die chemische Holzkorrosion vermindert. Dies gilt vor allem, wenn zimmermannsmäßige Verbindungen verhältnismäßig kleine druckübertragende Flächen besitzen (z.B. Stirnversätze).

Weiterhin ist zu beachten, dass die im Holz-Oberflächenbereich konzentriert vorliegenden Salze bei metallischen Bauteilen eine Metallkorrosion fördern.

Aus den Befunden und Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit folgt auch übergeordnet, dass bei der künftigen Entwicklung von Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln die Auswirkungen von abträglichen Kristallisationsdrücken der eingesetzten Salz-Anteile berücksichtigt werden müssen.

Diesbezüglich sollte man insbesondere demnach nur derartige Mittel entwickeln, welche nur einmalig aufgebracht werden müssen und welche niedrige Salzanteile besitzen.

Literatur

- Becker, G., Berghoff, W. 1963. Die Fluorwasserstoff - Abgabe anorganischer Fluor - Verbindungen aus Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 9 - 9, S. 346 - 362
- Bellmann, F., Harksen, M.-L., Werner, R. 1979. Die Denkmale der Lutherstadt Wittenberg
- Besold, G. 1982. Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Dissertation Universität München
- Besold, G.; Fengel, D. 1983 a. Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Teil 1: Begasungsversuche und Untersuchung der Extrakte. Holz als Roh- und Werkstoff 41, S. 227-232
- Besold, G.; Fengel, D. 1983 b. Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Teil 2: Veränderungen an den Polysacchariden und am Lignin. Holz als Roh- und Werkstoff 41, S. 265-269
- Besold, G.; Fengel, D. 1983 c. Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Teil 3: Sorptionsversuche, Festigkeitsprüfung und Erstellung eines Beurteilungsschemas. Holz als Roh- und Werkstoff 41, S. 333-337
- Bodner, J.; Pekny, G. 1991. Die Holzschutzmittelverteilung innerhalb der Zellwand (Distribution of wood preservatives within the cell wall). Holzforschung und Holzverwertung 43 - 2, S.46-48
- Bosshard, H. H. 1984. Holzkunde/2. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. überarbeitete Auflage.
- Böttcher, P.; 2001. Schäden an lackierten Holzfenstern – ein zwangsläufiges Ereignis. Vortrag auf dem 5. Eipos – Sachverständigentag Holzschutz (Dresden)
- Burmester, A. 1963. Untersuchungen über den Einfluß von Holzschutzmitteln auf die Holzfestigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 21, S. 393-409
- Burmester, A. 1970. Langzeiteinwirkung von Holzschutzmitteln auf Holzeigenschaften. Holz als Roh- und Werkstoff 28, S. 478-485
- Buro, A., Becker, G. 1956. Der Einfluß von Wassergehalt, Eigenschaften und Veränderungen von Nadelhölzern auf die Diffusion von Natriumfluorid in der Zellwand. Holz als Roh- und Werkstoff 14, S. 388-403
- Busse, U., Rietz, G. 1987. Möglichkeiten und Grenzen der Herabsetzung der Brennbarkeit von Holz durch den Einsatz von Flammschutzmitteln. Holztechnologie 28 - 5, S. 227-229
- Chemical Rubber Company. CRC handbook of chemistry and physics.
- Correns, C.W.; Steinborn, W. 1939. Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. Zeitschrift für Kristallographie 101, S. 117 - 133
- Doyle, A.K.; Ruddick, J.N.R. 1994. The Microdistribution of Alkylammonium Compounds in Ponderosa Pine Sapwood. Holzforschung 48 - 2, S. 106-112
- Duttlinger, W.; Knöfel, D. 1993. Salzkristallisation und Salzschadensmechanismen. In: Jahresberichte Steinerzfall – Steinkonservierung. S. 197 - 213
- Eaton, R.A., Hale, M.D.C. 1993. Wood. Decay, pests and protection.
- Erler, K. 1984. Wirkungen aggressiver Lösungen auf Kiefernholz. Holztechnologie 25 - 5, S. 249 - 252
- Erler, K. 1988. Bauzustandsanalyse und Beurteilung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Korrosion des Holzes. Habilitationsschrift TH Wismar.
- Erler, K. 1990. Korrosion und Anpassungsfaktoren für chemisch-aggressive Medien bei Holzkonstruktionen. Holztechnologie 31 - 5, S. 228 - 232
- Erler, K. 1998. Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. Bautechnik 75 - 8, S. 530-538
- Erler, K. 2000. Chemische Korrosion von Holz und Holzkonstruktionen. Bauforschung T 2916 Fraunhofer IRB
- Fengel, D. 1969. The ultrastructure of cellulose from wood. Wood Sci. Technol. 3. S. 203 -217

- Fengel, D. 1971. The distribution of aqueous solutions within wood. J. Polym. Sci. Part C36, S.141-152
- Fengel, D.; Bartels, H.J. 1980. Über die Einwirkung von Säuren auf Fichtenholz. Holzforschung 34 – 6, S. 201-206
- Fengel, D.; Hardell H.-L. 1983. Systematische Untersuchungen der Wirkung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Teil 4: Elektronenmikroskopische Beobachtungen. Holz als Roh- und Werkstoff 41, S. 509-513
- Fengel, D.; Wegener, G. 1989. Wood: Chemistry, Ultrastrukture, Reactions. 2nd edn. de Gruyter, Berlin
- Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry
- Gorski, J.; Jablonski, M.; Matejak, M. 1994. Über der Einfluß des sauren Regens auf den statischen Elastizitätsmodul des Laub- und Nadelholzes. Forestry and Wood Technology 45, S. 95 – 98
- Härtner, H.; Peek, R.D.; Klipp, H.; Barth, V. 1995. Wirksamkeit und Umweltverhalten von Holzschutzmitteln auf der Basis Kupfer / Polymeres Betain. Band zur 20. Holzschutz – Tagung Rosenheim
- Heimeshoff, B. 1988. Zimmermannsmäßige Holzverbindungen. Informationsdienst Holz
- Holleman, A.F.; Wiberg, N. 1985. Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 91.-100. Auflage
- Horn, W.; Roßkamp, E.; Ulrich, D. 1999. Aktuelle DDT- und Lindankonzentrationen in Wohnräumen nach intensivem Holzschutzmitteleinsatz auf Dachböden in der Vergangenheit. Texte 70/99 Umweltbundesamt
- Jablonski, M.; Matejak, M. 1994. Untersuchungen über den Einfluß von saurem Regen auf die Druckfestigkeit von künstlich gealtertem Laubholz. Forestry and Wood Technology 45, S. 99 – 104
- Karsten, R. 1989. Bauchemie: für Studium und Praxis. 8. überarb. Aufl. Karlsruhe
- Kerner, G.; Ritter, H. 1984. Grundlagenuntersuchungen zur Beständigkeit von Nadelschnittholz gegen Mineraldünger. Holztechnologie 25 – 5, S. 233 – 237
- Kirk, H.; Kerner, G. 1978. Informationen der ASMW – Prüfstelle „Holzschutzmittel“ zu aktuellen Holzschutzproblemen. Holzindustrie 31 - 5. S. 137 – 139
- Kirk, H. 1978. Verzeichnis der vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) anerkannten Holzschutzmittel, holzschützenden Anstrichstoffe und holzpflegenden Anstrichstoffe (Holzschutzmittelverzeichnis 1978). Holzindustrie 31 - 5. S. 143 – 146
- Kirk, H. 1983. Verzeichnis der vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) anerkannten Holzschutzmittel, holzschützenden Anstrichstoffe und holzpflegenden Anstrichstoffe (Holzschutzmittelverzeichnis 1983/84). Holzindustrie 36 - 5. S. 143 – 146
- Kleber, I.; Bautsch, H.J.; Bohm, J. 1990. Einführung in die Kristallographie. 17., stark bearbeitete Auflage
- Kothe, E. 1992. Holzschutzgutachten zu den Ursachen und Auswirkungen der chemischen Korrosion an den Konstruktionshölzern und der Dachschalung des Werkstatt- und Bürogebäudes des Busbahnhofes Dresden-Blasewitz. Unveröffentlicht
- Kothe, E; Schwar, A. 1998. Gutachten über die Auswirkung einer chemischen bzw. thermischen Entschichtung an den Fensterrahmen und Fensterflügeln aus Holz der Gebäude des ehem. Garnisonslazarets in Potsdam. Unveröffentlicht
- Kothe, E; Schwar, A. 1999. Gutachten über die Ursachen, Erscheinungsformen und Auswirkungen der chemischen Korrosion an den Konstruktionshölzern des Dachstuhles im Gebäudekomplex des Landgerichtes Bielefeld. Unveröffentlicht
- Kollmann, F., Cote, W. 1984. Principles of wood science and technology, Vol. I: Solid wood.
- Krässig, H. 1990. Cellulose: Morphologie, Struktur, Zugänglichkeit und Reaktivität – Vortrag. Papier 44 - 12, S. 617-624
- Kühne, H.-C. 1997. Untersuchungen zum Einfluß der Porenstruktur auf die Dauerhaftigkeit baukeramischer Produkte bei Einwirkung von Salzen oder Frost. Dissertation TU Hamburg-Harburg
- Kürschner, K. 1962. Chemie des Holzes

- Langendorf, G. 1988. Holzschutz.
- Langendorf, G. Schuster, E.; Wagenfür, R. 1976. Rohholz
- Latscha, H.P. 1993. Anorganische Chemie. Chemie – Basiswissen
- Lebow, S.T.; Winandy, R.-E. 1999. Effect of fire-retardant treatment on plywood pH and the relationship of pH to strength properties. *Wood Science and Technology* 33 – 4. S. 285 – 298
- Leiß, B. 1992. Holzschutzmittel im Einsatz
- LeVan, S.-L.; Ross, R.-J.; Winandy, R.-E. 1990. Effects of Fire Retardant Chemicals on the Bending Properties of Wood at Elevated Temperatures. US Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-498
- Ließner, K.; Rug, W. 2000. Holzbausanierung
- Manig, M; Hübsch W. 1997. Gefährdung des verbauten Holzes durch chemische Korrosion und deren Auswirkungen auf das Tragverhalten von Holzbauteilen. Diplomarbeit BTU Cottbus
- Matejak, M.; Jablonski, M. 1994. Über den Einfluß von saurem Regen auf die Druckfestigkeit des Kiefern- und Fichtenholzes. *Forestry and Wood Technology* 45, S. 91 – 94
- Meierhofer, U.A. 1985. Zum Sorptions- und Quellverhalten von imprägniertem Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43, S. 17-21
- Militz, H.; Homan, W.J. 1991. Vorbehandlung mit Fichtenholz mit Chemikalien mit dem Ziel der Verbesserung der Imprägnierbarkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50, S. 485-491
- Mönck, W. 1973. Schadensanalyse an Holzkonstruktionen – Auswirkungen langjähriger chemischer Angriffe auf freitragende Holzkonstruktionen (Teil I). *Bauzeitung* 2, S. 90 – 94
- Mönck, W. 1975. Holzerstörungen bei freitragenden Konstruktionen von Mineraldünger-Lagerhallen. *Holztechnologie* 16 – 1, S. 22 – 28
- Mönck, W. 1995. Schäden an Holzkonstruktionen. 2. stark bearbeitete Auflage
- Mönck, W. 1998. Holzbau – Bemessung und Konstruktion unter Beachtung von Eurocode 5. 13., vollständig neu bearbeitete Auflage
- Müller, K. 1993. Holzschutzpraxis – Ein Handbuch in Tabellen
- Niemz, P. 1993. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe
- Parameswaran, N. 1981. Micromorphology of Spruce Timber after Long-term Service in a Potash Store House. *Holz als Roh- und Werkstoff* 39, S. 149-156
- Peylo, A.; Willeitner, H. 1995. Die Problematik von Bor in der Außenverwendung. Band zur 20. Holzschutz – Tagung Rosenheim
- Rafalski, H.J. 1996. Techniken und ökonomische Bewertung von Holzschäden. Skript zum Kontaktstudium Holzschutz des EIPOS e.V. Dresden. Unveröffentlicht.
- Rafalski, H.J. 1999. Aktuelle Informationen zu Holzschutzproblemen inklusive Kommentar zu DIN 68800 / 04. Skript zur 6. Quedlinburger Holzbautagung
- Richter, K.; Sell, J. 1992. Untersuchung der kapillaren Transportwege im Weißtannenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50, S. 329 – 336
- Seifert, K. 1967. Der chemische Einfluß schwach sauren Milieus auf die Holzsubstanz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 25 - 7, S. 265 – 267
- Siau, J. F. 1984. Transport processes in wood. Springer Series in Wood Science
- Steiger, M.; Dannecker W. 1995. Hygroskopische Eigenschaften und Kristallisationsverhalten von Salzgemischen. *Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung* 1995, S. 115 - 128
- Schmidt, O. 1993. Holz- und Baupilze. 1. Auflage

- Schwar, A. 2000. Expertise zu den durch chemische Korrosion geschädigten Konstruktionshölzern des Dachstuhles im Schloß Doberlug. Unveröffentlicht.
- Sweet, M.S.; Winandy, J.E. 1999. Influence of Polymerization of Cellulose and Hemicellulose on Strength Loss in Fire-Retardant-Treated Southern Pine. *Holzforschung* 53 – 3, S. 311-317
- Tsoumis, G. 1991. *Science and Technology of Wood*.
- Unger, A. 1998. Umweltschädliche Holzschutzmittel. Möglichkeiten der Dekontaminierung und Maskierung. *Restauro* ..- 3, S. 186 - 191
- Unger, A. 2002. Dekontamination und Maskierung biozidbelasteter Hölzer. Skript zum Sachverständigentag 11.12.2002 Dresden Eipos e.V. Unveröffentlicht
- Wagenführ, R. 1984. *Anatomie des Holzes*. 1. Aufl.
- Wagenführ, R. 1999. *Anatomie des Holzes. Strukturanalytik – Identifizierung – Nomenklatur – Mikrotechnologie*. 5. völlig überarbeitete Auflage
- Wallasch, S. 1999. Instandsetzung von Ziegelmauerwerk. Reihe Altbausanierung., Bd. 1
- Wegener, G.; Fengel, D. 1986. Untersuchungen zur Beständigkeit von Holzbauteilen in aggressiven Atmosphären. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44, S. 201 – 206
- Willeitner, H.; 1995. Trends des chemischen Holzschutzes. Skript zur Sachverständigenausbildung Dresden Eipos e.V. Unveröffentlicht
- Willeitner, H.; 1996. Holzschutz – Informationen für Bauherren, Architekten und Ingenieure. Broschüre des Freistaates Sachsen
- Winandy, J.E. 1984. The Chemistry of Wood Strength. In: Rowell, R.M. *The Chemistry of Solid Wood*.
- Winandy, J.E. 1995. Effects of Fire Retardant Treatments After 18 Months of Exposure at 150 °F (66 °C). US Department of Agriculture. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-0264
- Zimmermann, T.; Sell, J.; Eckstein, D. 1994. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Zugbruchflächen von Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 52 – 4, S. 223 – 229

Webseiten

- (1) www.wittenberg.de
- (2) chemfinder.cambridgesoft.com
- (3) www.umweltbundesamt.de

Verordnungen, Gesetze, Zulassungen, Patente

- Z1 DIN Sicherheitsdatenblatt 04/91 für Dohnalit Pyro I der Fa. Dohna – Chemie GmbH
- Z2 Korasit LH – Technisches Merkblatt Stand 09/1998
- Z3 Offenlegungsschrift DE 19814237 A1 – Deutsches Patent- und Markenamt
- Z4 Aidol® Holzsanierung MZ – Technisches Merkblatt Stand 07/2002
- Z5 Offenlegungsschrift DE 19535664 C2 – Deutsches Patent- und Markenamt

Normen

DIN 1052	Holzbauwerke. 04/1988
E – DIN 1052	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken; Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau (Entwurf). 05/2000
BEKS 1-16	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken; Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau (Schlussentwurf Bemessungsnorm Holzbau). 07/2002
DIN 4102 - 4	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. 03/1994
DIN EN ISO 12944 - 5	Beschichtungsstoffe; Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme; Teil 5: Beschichtungssysteme. 07/1998
DIN 50014	Klimate und ihre technische Anwendung; Normalklimate. 07/1985
DIN 52161 - 1	Prüfung von Holzschutzmitteln; Nachweis von Holzschutzmitteln, Probenahme aus Bauholz. 03/1976
DIN 52183	Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. 11/1977
DIN 52185	Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. 05/1979
DIN 52186	Prüfung von Holz; Biegeversuch. 06/1978
DIN 55928 – 8	Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge; Korrosionsschutz von tragenden dünnwandigen Bauteilen. 07/1994
DIN 68800 – 3	Holzschutz; Vorbeugender chemischer Holzschutz. 04/1990
DIN 68364	Kennwerte von Holzarten; Festigkeit, Elastizität, Resistenz. 11/1979

Anlage A - Fotodokumentation



Foto 1 Lutherhalle Wittenberg - Teilansicht



Foto 2 Lutherhalle Wittenberg – Teilansicht der Hängekonstruktion zur Aufnahme der Deckenlasten



Foto 3 Stadthalle Zerbst - Giebelansicht

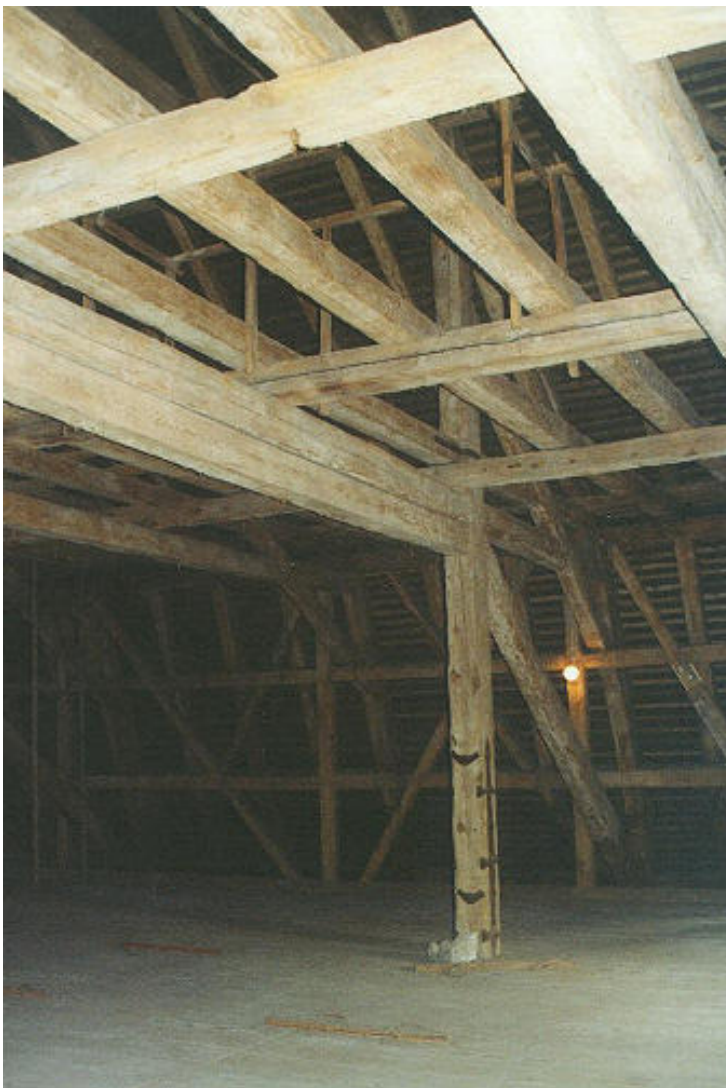


Foto 4 Stadthalle Zerbst – Teilansicht des Dachstuhles



Foto 5 Stadthalle Zerbst – Tafel mit Angaben zur Holzschutz- und Holzflammschutz-Mittelbehandlung



a)

b)

Foto 6 Stadthalle Zerbst (Südseite) – Beprobung an einer Stütze der Stuhlkonstruktion (a). Korrodierter Nagel im Bereich der Probenentnahme (b).



a)

b)

Foto 7 Stadthalle Zerbst (Westseite) – Beprobung an einem Riegel der Stuhlkonstruktion (a). Erste Salzausblühungen nach einem Jahr im Bereich des Astes.



a)

b)

Foto 8 Stadthalle Zerbst (Nordseite) – Beprobung an einer Strebe der Stuhlkonstruktion (a). Feststellbar sind erste Salzausblühungen auf der gesamten Fläche nach einem Jahr (b).



a)



b)



c)

Foto 9 Stadthalle Zerbst (Westseite) – Beprobung an einer Strebe in der Binderebene (a). Fortschreiten der Mazeration ein Jahr nach der Beprobung (b), (c).



Foto 10 Herabhängende vorhangähnliche Faserbündel



Foto 11 Herabgefallene Faserbündel



Foto 12 Lutherhalle Wittenberg – stark geschädigte Oberfläche einer Schwalbenschwanzverblattung mit Holznagel



Foto 13 Stadthalle Zerbst – Korrodierte Flachstähle an den Hängesäulen



Foto 14 Lutherhalle Wittenberg – Korrodierte Flachstähe an den Hängesäulen

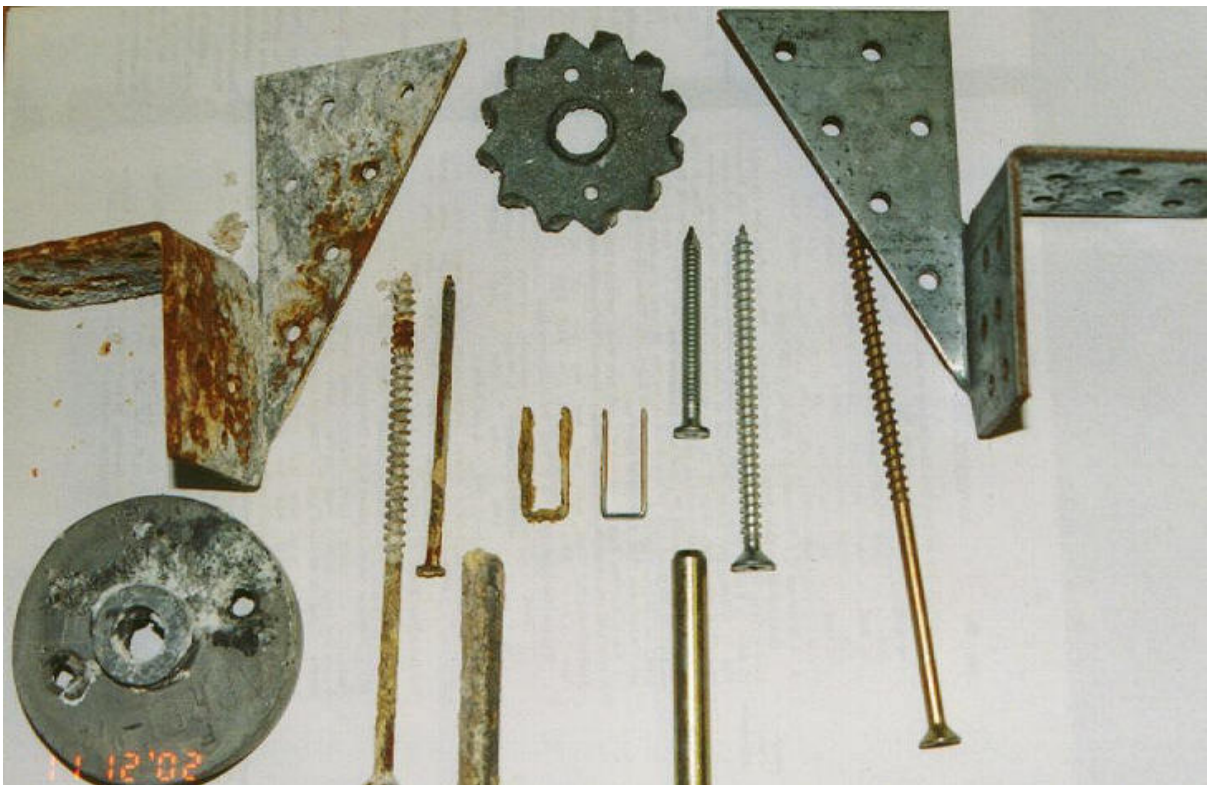


Foto 15 Korrodierte stählerne Verbindungsmittel (links) nach Einlagerung in Salzlösung und Wechselklimabeanspruchung im Vergleich zu Nullproben (rechts)

Anlage B I – Masse der IC – Proben bei $\phi = 65 \%$

Probe	m_{IC-65} [g]
LH O 0-3 K	0,67
LH O 3-6 K	0,78
LH O 6-9 K	0,56
LH O 9-12 K	0,72
LH O 0-3 S	0,76
LH O 3-6 S	0,74
LH O 6-9 S	0,67
LH O 9-12 S	1,01
LH O 0-3 R	0,66
LH O 3-6 R	0,87
LH O 6-9 R	0,50
LH O 9-12 R	0,50
LH W 0-3 K	0,48
LH W 3-6 K	0,72
LH W 6-9 K	0,65
LH W 9-12 K	0,80
LH W 0-3 S	1,04
LH W 3-6 S	0,62
LH W 6-9 S	0,71
LH W 9-12 S	0,76
LH O O	1,69
LH W O	0,53

Probe	m_{IC-65} [g]
SZ S 0-3	0,38
SZ S 3-6	0,55
SZ S 6-9	0,74
SZ S 9-12	0,50
SZ S O	0,68
SZ W 0-3	0,38
SZ W 3-6	0,41
SZ W 6-9	0,34
SZ W 9-12	0,50
SZ W O	0,66
SZ N 0-3	0,66
SZ N 3-6	0,65
SZ N 6-9	0,45
SZ N 9-12	0,40
SZ N O	0,33
SZ O 0-3	0,62
SZ O 3-6	0,58
SZ O 6-9	0,53
SZ O 9-12	0,42
SZ O O	0,54

Anlage B II – Masse der SI – Proben

Probe	mSI-20	mSI-25	mSI-30	mSI-35	mSI-40	mSI-45	mSI-50	mSI-55	mSI-60	mSI-65	mSI-70	mSI-75	mSI-80	mSI-85	mSI-90	mSI-95
	Absorption [g] →															
LH O 0-3 K	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,51	0,53	0,56	0,61
LH O 3-6 K	0,53	0,53	0,54	0,54	0,55	0,56	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58	0,60	0,60	0,64	0,67
LH O 6-9 K	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,44	0,47
LH O 9-12 K	0,71	0,72	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,83	0,86
LH O 0-3 S	0,34	0,34	0,34	0,35	0,36	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,39	0,40	0,44	0,48
LH O 3-6 S	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,43	0,44	0,47	0,50
LH O 6-9 S	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,51	0,51	0,51	0,52	0,53	0,54	0,56	0,58
LH O 9-12 S	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,55
LH O 0-3 R	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,42	0,45
LH O 3-6 R	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53	0,55	0,57
LH O 6-9 R	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,45	0,46	0,47	0,49
LH O 9-12 R	0,42	0,43	0,43	0,43	0,44	0,43	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,49	0,51
LH W 0-3 K	0,47	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51	0,52	0,54	0,56	0,61	0,66
LH W 3-6 K	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,53	0,55	0,56	0,59
LH W 6-9 K	0,47	0,47	0,47	0,49	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,52	0,52	0,53	0,54	0,56	0,57
LH W 9-12 K	0,53	0,54	0,55	0,55	0,55	0,56	0,57	0,57	0,58	0,58	0,59	0,59	0,60	0,61	0,63	0,65
LH W 0-3 S	0,54	0,55	0,54	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58	0,58	0,59	0,60	0,62	0,65	0,71	0,77
LH W 3-6 S	0,46	0,46	0,46	0,47	0,48	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,53	0,55	0,59
LH W 6-9 S	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
LH W 9-12 S	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,59
LH O O	0,67	0,68	0,68	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	0,83	0,89
LH W O	0,62	0,63	0,63	0,63	0,64	0,64	0,65	0,65	0,66	0,67	0,68	0,71	0,76	0,81	0,92	1,01

Probe	mSI-95	mSI-90	mSI-85	mSI-80	mSI-75	mSI-70	mSI-65	mSI-60	mSI-55	mSI-50	mSI-45	mSI-40	mSI-35	mSI-30	mSI-25	mSI-20	mSI-dtr
	Desorption [g] →																
LH O 0-3 K	0,64	0,59	0,54	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,46	0,45	0,43
LH O 3-6 K	0,69	0,65	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,50
LH O 6-9 K	0,48	0,45	0,44	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37	0,35	
LH O 9-12 K	0,87	0,85	0,83	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,68
LH O 0-3 S	0,53	0,48	0,42	0,40	0,39	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34	0,32
LH O 3-6 S	0,53	0,48	0,45	0,45	0,44	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38	0,36
LH O 6-9 S	0,60	0,57	0,56	0,54	0,54	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,45
LH O 9-12 S	0,55	0,54	0,52	0,52	0,51	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45	0,45	0,43
LH O 0-3 R	0,46	0,43	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,35	0,34
LH O 3-6 R	0,58	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,54	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,45
LH O 6-9 R	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45	0,45	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,41	0,41	0,41	0,39
LH O 9-12 R	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,43	0,42	0,40
LH W 0-3 K	0,70	0,65	0,57	0,55	0,53	0,53	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,44
LH W 3-6 K	0,61	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,48	0,45
LH W 6-9 K	0,58	0,56	0,55	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,45
LH W 9-12 K	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,60	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,52
LH W 0-3 S	0,81	0,76	0,69	0,64	0,63	0,61	0,60	0,60	0,59	0,58	0,57	0,57	0,55	0,55	0,54	0,52	0,50
LH W 3-6 S	0,60	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,44
LH W 6-9 S	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22
LH W 9-12 S	0,60	0,59	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,46
LH O O	0,93	0,89	0,84	0,79	0,76	0,74	0,73	0,73	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,65
LH W O	1,13	1,05	0,98	0,92	0,83	0,77	0,68	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,63	0,63	0,62	0,60

Probe	Absorption [g]															
	mSI-20	mSI-25	mSI-30	mSI-35	mSI-40	mSI-45	mSI-50	mSI-55	mSI-60	mSI-65	mSI-70	mSI-75	mSI-80	mSI-85	mSI-90	mSI-95
SZ S O	0,87	0,88	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,93	0,96	0,97	1,02	1,11	1,22
SZ S 0-3	0,53	0,54	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,57	0,59	0,59	0,60	0,62	0,65	0,69
SZ S 3-6	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,52	0,54
SZ S 6-9	0,53	0,54	0,55	0,55	0,55	0,56	0,57	0,57	0,58	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,62	0,64
SZ S 9-12	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,39	0,39
SZ W O	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38	0,43	0,48	0,53
SZ W 0-3	0,37	0,37	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,43	0,45	0,49	0,53
SZ W 3-6	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45	0,46	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,50	0,52	0,53
SZ W 6-9	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,41
SZ W 9-12	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38
SZ N O	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25	0,28	0,32	0,37
SZ N 0-3	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,53	0,53	0,54	0,54	0,56	0,56	0,58	0,62	0,66
SZ N 3-6	0,47	0,47	0,47	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55
SZ N 6-9	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,36
SZ N 9-12	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32
SZ O O	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,37	0,39	0,41	0,47	0,55	0,65
SZ O 0-3	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,35	0,38	0,41	0,46
SZ O 3-6	0,44	0,45	0,46	0,46	0,46	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,51	0,53	0,55
SZ O 6-9	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55
SZ O 9-12	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,43	0,44

Probe	Desorption g																
	mSI-95	mSI-90	mSI-85	mSI-80	mSI-75	mSI-70	mSI-65	mSI-60	mSI-55	mSI-50	mSI-45	mSI-40	mSI-35	mSI-30	mSI-25	mSI-20	mSI-dtr
SZ S O	1,22	1,23	1,20	1,12	1,07	0,99	0,96	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,88	0,82
SZ S 0-3	0,69	0,66	0,64	0,62	0,60	0,60	0,59	0,59	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,51
SZ S 3-6	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,46	0,44	0,42
SZ S 6-9	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55	0,54	0,52
SZ S 9-12	0,39	0,39	0,39	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,32
SZ W O	0,53	0,52	0,48	0,43	0,41	0,38	0,36	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,30
SZ W 0-3	0,53	0,49	0,46	0,44	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,36
SZ W 3-6	0,53	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,42
SZ W 6-9	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35	0,35	0,35	0,32
SZ W 9-12	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,29
SZ N O	0,37	0,34	0,30	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,19
SZ N 0-3	0,66	0,63	0,60	0,58	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,51	0,51	0,50	0,47
SZ N 3-6	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,47	0,44
SZ N 6-9	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,31	0,30	0,29
SZ N 9-12	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25
SZ O O	0,65	0,63	0,59	0,49	0,45	0,41	0,38	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,33	0,33	0,31
SZ O 0-3	0,46	0,42	0,39	0,36	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,30	0,29
SZ O 3-6	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,46	0,45	0,43
SZ O 6-9	0,55	0,54	0,54	0,53	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,43
SZ O 9-12	0,44	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,35

Anlage C I - Berechnung der Salzaufnahme A_F (Lutherhalle Wittenberg)

Probe	aus Anl. BI m_{IC-65} [g] 65/20	aus Anl. BII m_{SI-65} [g] 65/20	Σm_u [g]	S [g/kg]	m_{Salz} [g]	Fläche A [m ²]	A_F [g/m ²]
LH O 0-3 K	0,67	0,49	1,16	68,39	0,079	0,00031416	252,52
LH O 3-6 K	0,78	0,57	1,35	41,55	0,056	0,00031416	178,55
LH O 6-9 K	0,56	0,40	0,96	27,60	0,026	0,00031416	84,34
LH O 9-12 K	0,72	0,76	1,48	23,14	0,034	0,00031416	109,01
LH O 0-3 S	0,76	0,37	1,13	79,56	0,090	0,00031416	286,17
LH O 3-6 S	0,74	0,41	1,15	43,08	0,050	0,00031416	157,70
LH O 6-9 S	0,67	0,51	1,18	19,58	0,023	0,00031416	73,54
LH O 9-12 S	1,01	0,48	1,49	8,80	0,013	0,00031416	41,74
LH O 0-3 R	0,66	0,38	1,04	46,58	0,048	0,00031416	154,20
LH O 3-6 R	0,87	0,51	1,38	16,25	0,022	0,00031416	71,38
LH O 6-9 R	0,50	0,44	0,94	6,60	0,006	0,00031416	19,75
LH O 9-12 R	0,50	0,45	0,95	3,12	0,003	0,00031416	9,43
LH W 0-3 K	0,48	0,50	0,98	68,51	0,067	0,00031416	213,71
LH W 3-6 K	0,72	0,51	1,23	20,66	0,025	0,00031416	80,89
LH W 6-9 K	0,65	0,50	1,15	6,15	0,007	0,00031416	22,51
LH W 9-12 K	0,80	0,58	1,38	2,94	0,004	0,00031416	12,91
LH W 0-3 S	1,04	0,58	1,62	63,50	0,103	0,00031416	327,44
LH W 3-6 S	0,62	0,49	1,11	23,71	0,026	0,00031416	83,77
LH W 6-9 S	0,71	0,26	0,97	19,62	0,019	0,00031416	60,58
LH W 9-12 S	0,76	0,53	1,29	12,27	0,016	0,00031416	50,38
LH O O	1,69	0,72	2,41	140,91	0,340	0,01	33,96
LH W O	0,53	0,67	1,20	267,25	0,321	0,01	32,07

Anlage C II – Berechnung der Salzaufnahme A_F (Stadthalle Zerbst)

Probe	aus Anl. BI m_{IC-65} [g] 65/20	aus Anl. BII m_{SI-65} [g] 65/20	Σm_u [g]	S [g/kg]	m_{Salz} [g]	Fläche A [m ²]	A_F [g/m ²]
SZ S O	0,68	0,91	1,59	500,61	0,796	0,01	79,60
SZ S 0-3	0,38	0,57	0,95	161,52	0,153	0,00031416	488,43
SZ S 3-6	0,55	0,48	1,03	34,19	0,035	0,00031416	112,09
SZ S 6-9	0,74	0,58	1,32	7,30	0,010	0,00031416	30,67
SZ S 9-12	0,50	0,36	0,86	4,37	0,004	0,00031416	11,96
SZ W O	0,66	0,35	1,01	346,49	0,350	0,01	35,00
SZ W 0-3	0,38	0,41	0,79	93,46	0,074	0,00031416	235,02
SZ W 3-6	0,41	0,48	0,89	10,47	0,009	0,00031416	29,66
SZ W 6-9	0,34	0,37	0,71	4,05	0,003	0,00031416	9,15
SZ W 9-12	0,50	0,34	0,84	3,25	0,003	0,00031416	8,69
SZ N O	0,33	0,22	0,55	290,68	0,160	0,01	15,99
SZ N 0-3	0,66	0,54	1,20	66,86	0,080	0,00031416	255,39
SZ N 3-6	0,65	0,51	1,16	12,99	0,015	0,00031416	47,96
SZ N 6-9	0,45	0,33	0,78	7,39	0,006	0,00031416	18,35
SZ N 9-12	0,40	0,29	0,69	5,45	0,004	0,00031416	11,97
SZ O O	0,54	0,35	0,89	389,67	0,347	0,01	34,68
SZ O 0-3	0,62	0,33	0,95	120,83	0,115	0,00031416	365,38
SZ O 3-6	0,58	0,49	1,07	39,91	0,043	0,00031416	135,93
SZ O 6-9	0,53	0,50	1,03	9,15	0,009	0,00031416	30,00
SZ O 9-12	0,42	0,40	0,82	5,22	0,004	0,00031416	13,62

Anlage D - Tabellarische Zusammenstellung von Gesamtsalzgehalt S und Salzaufnahme A_F

Dachstuhl der Lutherhalle Wittenberg			Dachstuhl der Stadthalle Zerbst		
Probe	Gesamtsalz- gehalt S [g/kg] ¹⁾	Salzaufnahme A _F [g/m ²] ²⁾	Probe	Gesamtsalz- gehalt S [g/kg] ¹⁾	Salzaufnahme A _F [g/m ²] ²⁾
LH O O	140,91	33,96	SZ S O	500,61	79,60
LH O 0-3 KH	68,39	252,52	SZ S 0-3	161,52	488,43
LH O 3-6 KH	41,55	178,55	SZ S 3-6	34,19	112,09
LH O 6-9 KH	27,60	84,34	SZ S 6-9	7,30	30,67
LH O 9-12 KH	23,14	109,01	SZ S 9-12	4,37	11,96
		Σ 658,38			Σ 722,75
LH O O	140,91	33,96	SZ W O	346,49	35,00
LH O 0-3 SH	79,56	286,17	SZ W 0-3	93,46	235,02
LH O 3-6 SH	43,08	157,70	SZ W 3-6	10,47	29,66
LH O 6-9 SH	19,58	73,54	SZ W 6-9	4,05	9,15
LH O 9-12 SH	8,80	41,74	SZ W 9-12	3,25	8,69
		Σ 593,08			Σ 317,52
LH O 0-3 R	46,58	154,20	SZ N O	290,68	15,99
LH O 0-3 R	16,25	71,38	SZ N 0-3	66,86	255,39
LH O 3-6 R	6,60	19,75	SZ N 3-6	12,99	47,96
LH O 9-12 R	3,12	9,43	SZ N 6-9	7,39	18,35
		Σ 254,75	SZ N 9-12	5,45	11,97
					Σ 349,66
LH W O	267,25	32,07	SZ O O	389,67	34,68
LH W 0-3 KH	68,51	213,71	SZ O 0-3	120,83	365,38
LH W 3-6 KH	20,66	80,89	SZ O 3-6	39,91	135,93
LH W 6-9 KH	6,15	22,51	SZ O 6-9	9,15	30,62
LH W 9-12 KH	2,94	12,91	SZ O 9-12	5,22	13,62
		Σ 362,09			Σ 579,62
LH W O	267,25	32,75			
LH W 0-3 SH	63,50	327,44			
LH W 3-6 SH	23,71	83,77			
LH W 6-9 SH	19,62	60,58			
LH W 9-12 SH	12,27	50,38			
		Σ 554,24			

1) auf Holz in Normalklima 20/65 + Salzmasse bezogen

2) abhängig von der Schichtdicke (bzw. Probenmasse) – größere Schichtdicke ergibt vergleichsweise größere Salzmenge pro Quadratmeter bei gleichem Gesamtsalzgehalt

Anlage E I – Ergebnisse der Ionenchromatographie (IC) - Analyse (Lutherhalle Wittenberg)

Probe	pH-Wert	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Summe	V _{H₂O}
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
LH O 0-3 K	4,18	53,9	8,8	<0,1	7,6	27,3	304,5	607,7	47,9	208,5	69,6	4,5	28,3	1368,5	33,5
LH O 3-6 K	5,07	35,4	9,7	<0,1	10,4	39,8	147,0	349,5	27,7	153,3	36,9	3,3	17,7	830,7	39,0
LH O 6-9 K	4,98	25,9	9,7	<0,1	10,9	32,1	78,5	221,6	18,7	109,5	29,1	2,6	13,0	551,7	28,0
LH O 9-12 K	4,99	16,1	8,3	<0,1	9,5	19,3	66,8	192,7	14,0	93,3	27,7	2,9	12,5	463,1	36,0
LH O 0-3 S	4,20	38,2	8,5	<0,1	9,6	33,6	519,5	583,2	63,1	214,2	85,7	3,7	32,1	1591,3	38,0
LH O 3-6 S	4,69	16,4	8,4	0,1	11,0	39,4	176,2	369,6	45,4	138,5	39,3	1,4	15,7	861,3	37,0
LH O 6-9 S	4,67	6,8	10,7	<0,1	15,1	39,9	55,6	147,6	16,9	74,1	20,8	1,0	3,5	391,9	33,5
LH O 9-12 S	4,53	4,5	9,4	<0,1	14,7	13,4	18,7	62,0	7,8	30,7	12,4	0,7	1,9	176,0	50,5
LH O 0-3 R	3,74	1,5	6,5	<0,1	6,7	<0,1	15,3	631,0	9,2	129,2	11,9	3,2	117,0	931,5	33,0
LH O 3-6 R	4,42	0,6	7,8	<0,1	12,9	<0,1	17,1	193,0	6,5	72,7	5,8	1,0	6,3	323,7	43,5
LH O 6-9 R	4,71	0,4	9,6	<0,1	15,1	<0,1	7,7	59,4	4,4	29,8	3,5	0,4	2,0	132,1	25,0
LH O 9-12 R	5,07	0,8	11,1	<0,1	15,1	<0,1	<5,00	6,3	5,2	13,5	3,3	0,4	1,8	57,4	25,0
LH W 0-3 K	4,42	-	8,1	1,8	10,3	0,8	158,9	651,6	190,5	244,1	25,0	4,3	74,6	1370,1	24,0
LH W 3-6 K	5,96	0,7	9,9	0,2	16,5	0,8	41,6	171,8	43,4	97,0	10,9	1,7	19,0	413,5	36,0
LH W 6-9 K	6,01	0,4	10,1	<0,1	17,1	<0,1	8,0	39,6	11,5	23,7	7,2	0,7	5,0	123,3	32,5
LH W 9-12 K	5,37	0,4	7,8	<0,1	15,2	<0,1	<5,00	2,0	5,6	10,1	9,8	0,4	2,5	53,8	40,0
LH W 0-3 S	4,42	2,4	11,9	2,6	14,4	3,7	213,8	509,4	268,4	133,5	60,2	4,6	45,2	1270,0	52,0
LH W 3-6 S	5,29	-	14,8	0,5	19,7	2,7	88,1	162,8	57,2	63,7	38,3	3,9	22,1	473,7	31,0
LH W 6-9 S	4,85	-	15,3	0,6	17,6	1,5	79,3	111,3	59,4	69,2	22,5	2,7	12,5	392,0	35,5
LH W 9-12 S	5,30	-	12,9	0,1	14,8	0,9	35,8	75,9	33,8	46,3	11,4	2,0	11,3	245,2	38,0
LH O O	3,73	141,7	7,8	<0,1	8,0	19,2	490,8	1337,0	102,0	345,3	272,2	6,6	87,4	2818,0	84,5
LH W O	4,48	28,1	10,8	<0,1	10,6	1,3	360,9	3213,0	1424,8	100,8	65,0	14,4	143,6	5373,2	26,5

- keine eindeutige Identifizierung des Peaks infolge Überlagerung mit Acetat

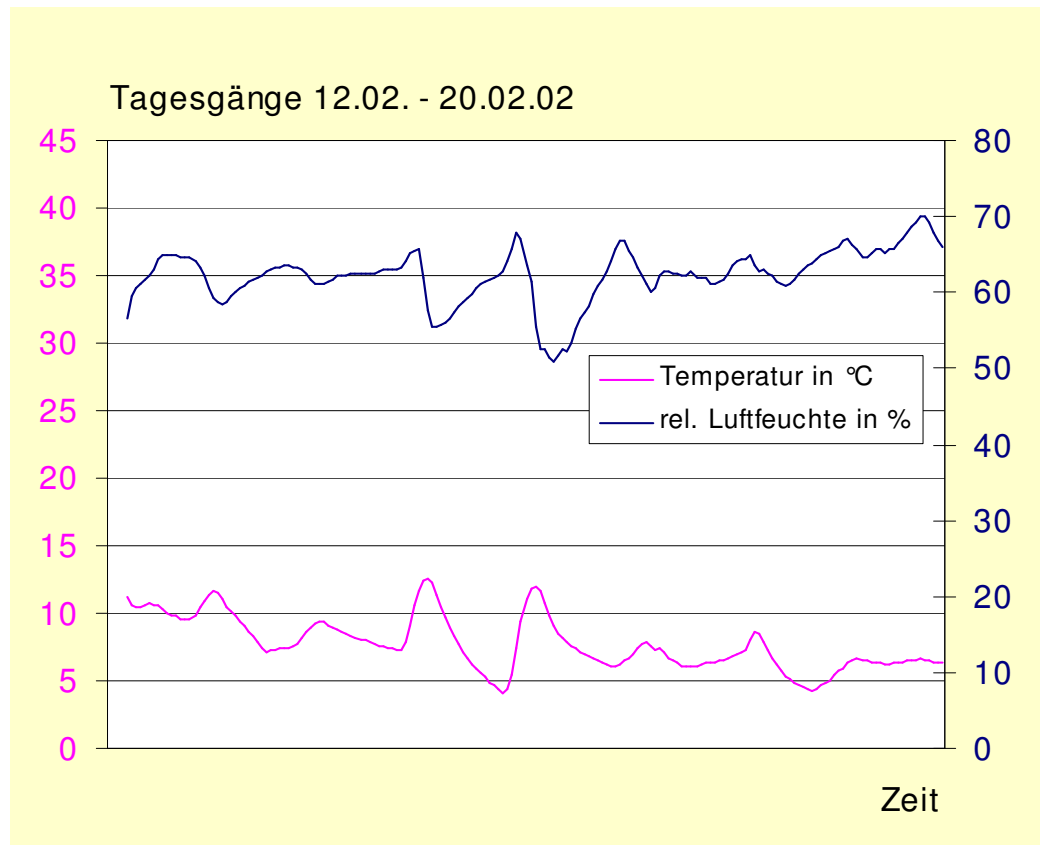
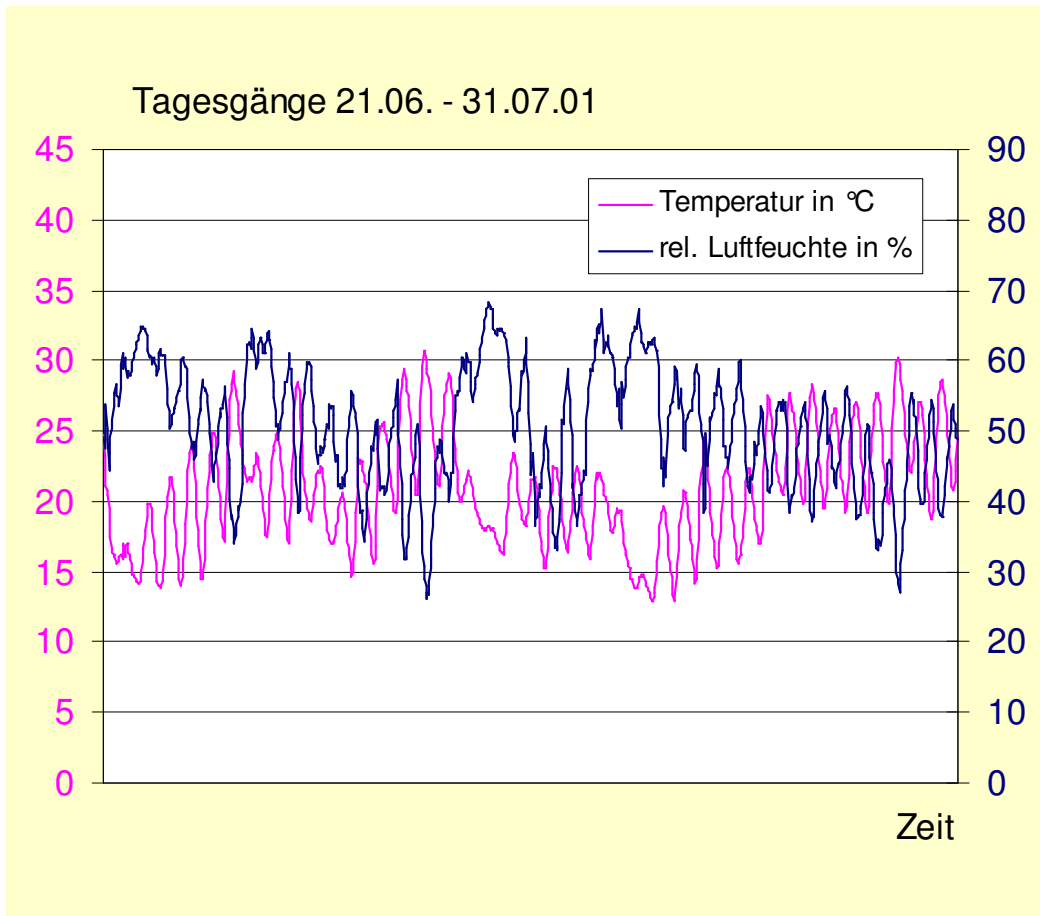
Probe	pH-Wert	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Summe	V _{H₂O}
		[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
LH O 0-3 K	4,18	2,7	0,4	0,0	0,4	1,4	15,2	30,4	2,4	10,4	3,5	0,2	1,4	68,4	33,5
LH O 3-6 K	5,07	1,8	0,5	0,0	0,5	2,0	7,3	17,5	1,4	7,7	1,8	0,2	0,9	41,5	39,0
LH O 6-9 K	4,98	1,3	0,5	0,0	0,5	1,6	3,9	11,1	0,9	5,5	1,5	0,1	0,6	27,6	28,0
LH O 9-12 K	4,99	0,8	0,4	0,0	0,5	1,0	3,3	9,6	0,7	4,7	1,4	0,1	0,6	23,2	36,0
LH O 0-3 S	4,20	1,9	0,4	0,0	0,5	1,7	26,0	29,2	3,2	10,7	4,3	0,2	1,6	79,6	38,0
LH O 3-6 S	4,69	0,8	0,4	0,0	0,5	2,0	8,8	18,5	2,3	6,9	2,0	0,1	0,8	43,1	37,0
LH O 6-9 S	4,67	0,3	0,5	0,0	0,8	2,0	2,8	7,4	0,8	3,7	1,0	0,0	0,2	19,6	33,5
LH O 9-12 S	4,53	0,2	0,5	0,0	0,7	0,7	0,9	3,1	0,4	1,5	0,6	0,0	0,1	8,8	50,5
LH O 0-3 R	3,74	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,8	31,5	0,5	6,5	0,6	0,2	5,8	46,6	33,0
LH O 3-6 R	4,42	0,0	0,4	0,0	0,6	0,0	0,9	9,7	0,3	3,6	0,3	0,1	0,3	16,2	43,5
LH O 6-9 R	4,71	0,0	0,5	0,0	0,8	0,0	0,4	3,0	0,2	1,5	0,2	0,0	0,1	6,6	25,0
LH O 9-12 R	5,07	0,0	0,6	0,0	0,8	0,0	0,0	0,3	0,3	0,7	0,2	0,0	0,1	2,9	25,0
LH W 0-3 K	4,42	0,0	0,4	0,1	0,5	0,0	7,9	32,6	9,5	12,2	1,2	0,2	3,7	68,5	24,0
LH W 3-6 K	5,96	0,0	0,5	0,0	0,8	0,0	2,1	8,6	2,2	4,9	0,5	0,1	1,0	20,7	36,0
LH W 6-9 K	6,01	0,0	0,5	0,0	0,9	0,0	0,4	2,0	0,6	1,2	0,4	0,0	0,2	6,2	32,5
LH W 9-12 K	5,37	0,0	0,4	0,0	0,8	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,5	0,0	0,1	2,7	40,0
LH W 0-3 S	4,42	0,1	0,6	0,1	0,7	0,2	10,7	25,5	13,4	6,7	3,0	0,2	2,3	63,5	52,0
LH W 3-6 S	5,29	0,0	0,7	0,0	1,0	0,1	4,4	8,1	2,9	3,2	1,9	0,2	1,1	23,7	31,0
LH W 6-9 S	4,85	0,0	0,8	0,0	0,9	0,1	4,0	5,6	3,0	3,5	1,1	0,1	0,6	19,6	35,5
LH W 9-12 S	5,30	0,0	0,6	0,0	0,7	0,0	1,8	3,8	1,7	2,3	0,6	0,1	0,6	12,3	38,0
LH O O	3,73	7,1	0,4	0,0	0,4	1,0	24,5	66,9	5,1	17,3	13,6	0,3	4,4	140,9	84,5
LH W O	4,48	1,4	0,5	0,0	0,5	0,1	18,0	160,7	71,2	5,0	3,3	0,7	7,2	268,7	26,5

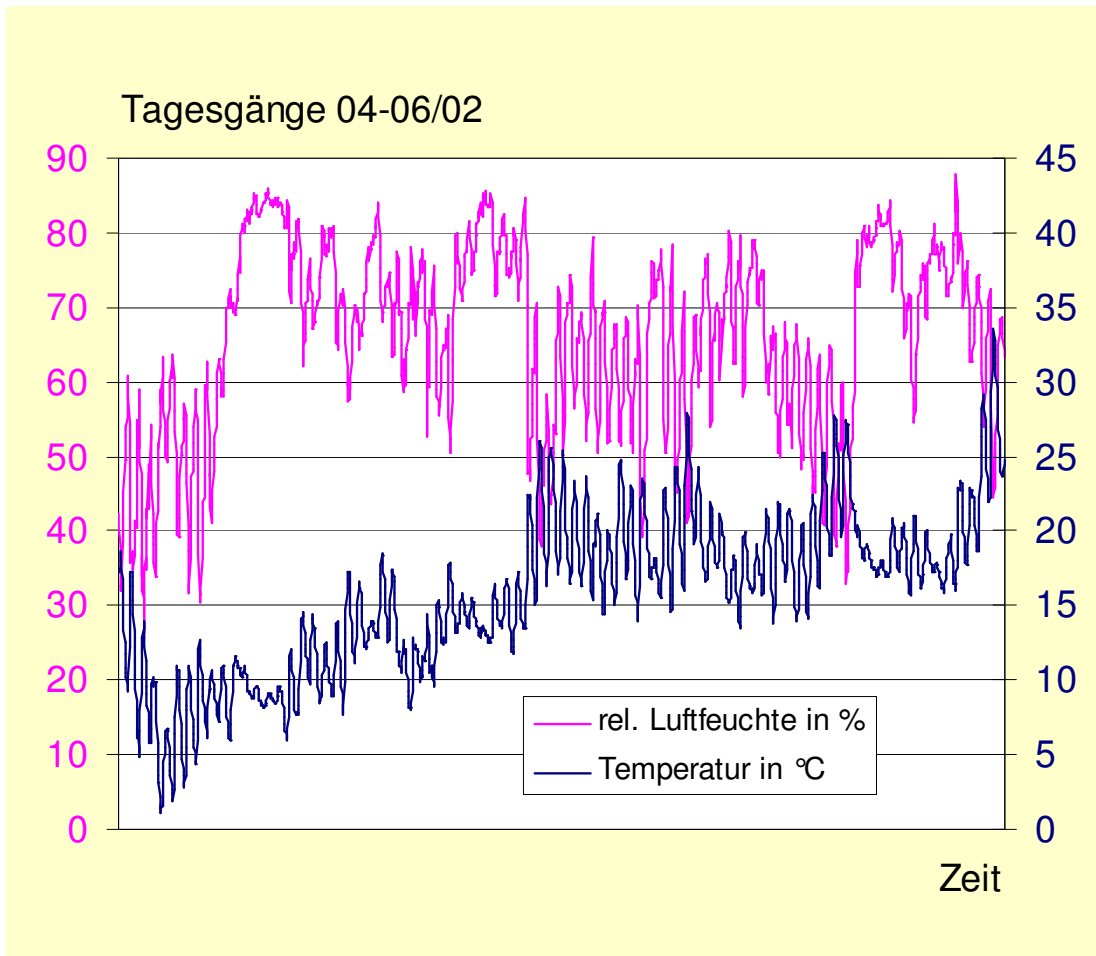
Anlage E II – Ergebnisse der Ionenchromatographie (IC) - Analyse (Stadthalle Zerbst)

Probe	pH	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Li ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Zn ²⁺ mg/l	Summe mg/l	V _{H2O} [ml]
SZ S 0-3	4,04	623,5	13,5	<0,1	21,2	12,5	313,2	959,1	<0,01	114,9	226,8	176,6	2,2	36,8	730,0	3230,4	19,0
SZ S 3-6	4,20	101,0	15,6	<0,1	17,6	9,8	104,9	238,9	<0,01	37,6	73,7	35,6	4,4	24,4	20,3	683,8	27,5
SZ S 6-9	5,01	19,5	8,7	<0,1	3,0	5,5	<20	54,8	<0,01	11,4	20,5	7,8	3,2	10,1	1,5	146,0	37,0
SZ S 9-12	5,63	10,9	6,6	<0,1	0,5	4,0	<20	22,3	<0,01	5,4	11,9	5,6	2,3	16,6	1,4	87,4	25,0
SZ S O	4,33	1698,5	x	x	4,7	5,0	2670,0	3313,3	<0,01	313,9	647,7	445,2	5,2	42,7	866,0	10012,2	34,0
SZ W 0-3	3,76	179,2	8,4	<0,1	3,7	7,9	326,0	742,0	<0,01	166,8	286,6	25,4	8,2	33,7	81,3	1869,3	19,0
SZ W 3-6	5,51	10,2	12,1	<0,1	4,5	7,3	<20	104,0	<0,01	21,4	27,1	4,1	2,5	16,0	0,3	209,5	20,5
SZ W 6-9	5,93	4,5	13,2	<0,1	1,5	5,8	<20	16,1	<0,01	11,1	9,1	2,8	3,4	13,0	0,4	81,0	17,0
SZ W 9-12	5,51	3,5	8,5	<0,1	0,5	4,3	<20	11,4	<0,01	6,7	3,8	2,0	2,6	21,4	0,3	65,0	25,0
SZ W O	3,36	819,2	x	x	1,0	5,3	1003,0	3306,4	<0,01	636,3	423,3	190,0	20,8	68,6	456,0	6929,8	33,0
SZ N 0-3	3,85	146,4	12,3	x	18,5	8,1	217,7	596,0	<0,01	121,9	108,9	48,5	4,0	24,8	30,4	1337,2	33,0
SZ N 3-6	4,60	15,5	10,7	<0,1	14,2	8,6	37,7	71,4	<0,01	30,6	37,6	13,4	3,9	13,6	2,7	259,8	32,5
SZ N 6-9	5,16	9,9	9,8	<0,1	3,9	6,6	<20	59,5	<0,01	14,9	17,6	7,1	3,7	13,5	1,5	147,9	22,5
SZ N 9-12	5,47	7,3	8,7	<0,1	1,0	4,7	<20	44,7	<0,01	11,8	7,8	4,7	3,9	13,9	0,7	109,1	20,0
SZ N O	4,02	846,2	x	x	6,4	6,1	743,2	2490,8	<0,01	460,9	294,1	518,4	11,8	61,8	374,0	5813,6	16,5
SZ O 0-3	4,01	88,9	11,9	x	20,5	9,0	<20 mg	1411,0	<0,01	223,4	249,4	351,9	4,9	20,2	25,5	2416,6	31,0
SZ O 3-6	4,89	26,7	15,7	<0,1	22,4	14,4	285,0	249,1	<0,01	43,5	51,5	75,9	1,9	11,3	0,8	798,2	29,0
SZ O 6-9	5,26	26,6	11,9	<0,1	2,7	6,3	<20	57,3	<0,01	19,8	13,9	29,1	3,2	11,6	0,5	183,0	26,5
SZ O 9-12	5,23	13,0	7,4	<0,1	0,4	3,3	<20	31,9	<0,01	10,5	10,3	12,9	2,6	11,3	0,8	104,4	21,0
SZ O O	4,24	x	x	x	10,4	6,7	2553,7	3125,3	<0,01	423,9	521,1	774,2	10,5	45,6	322,0	7793,4	27,0

Probe	pH	F [g/kg]	Cl [g/kg]	NO ₂ ⁻ [g/kg]	Br [g/kg]	NO ₃ ⁻ [g/kg]	PO ₄ ³⁻ [g/kg]	SO ₄ ²⁻ [g/kg]	Li ⁺ [g/kg]	Na ⁺ [g/kg]	NH ₄ ⁺ [g/kg]	K ⁺ [g/kg]	Mg ²⁺ [g/kg]	Ca ²⁺ [g/kg]	Zn ²⁺ [g/kg]	Summe [g/kg]	V _{H2O} [ml]
SZ S 0-3	4,04	31,2	0,7	0,0	1,1	0,6	15,7	48,0	0,0	5,7	11,3	8,8	0,1	1,8	36,5	161,5	19,0
SZ S 3-6	4,20	5,0	0,8	0,0	0,9	0,5	5,2	11,9	0,0	1,9	3,7	1,8	0,2	1,2	1,0	34,2	27,5
SZ S 6-9	5,01	1,0	0,4	0,0	0,2	0,3	0,0	2,7	0,0	0,6	1,0	0,4	0,2	0,5	0,1	7,3	37,0
SZ S 9-12	5,63	0,5	0,3	0,0	0,0	0,2	0,0	1,1	0,0	0,3	0,6	0,3	0,1	0,8	0,1	4,4	25,0
SZ S O	4,33	84,9	0,0	0,0	0,2	0,3	133,5	165,7	0,0	15,7	32,4	22,3	0,3	2,1	43,3	500,6	34,0
SZ W 0-3	3,76	9,0	0,4	0,0	0,2	0,4	16,3	37,1	0,0	8,3	14,3	1,3	0,4	1,7	4,1	93,5	19,0
SZ W 3-6	5,51	0,5	0,6	0,0	0,2	0,4	0,0	5,2	0,0	1,1	1,4	0,2	0,1	0,8	0,0	10,5	20,5
SZ W 6-9	5,93	0,2	0,7	0,0	0,1	0,3	0,0	0,8	0,0	0,6	0,5	0,1	0,2	0,7	0,0	4,1	17,0
SZ W 9-12	5,51	0,2	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0	0,6	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	1,1	0,0	3,2	25,0
SZ W O	3,36	41,0	0,0	0,0	0,1	0,3	50,2	165,3	0,0	31,8	21,2	9,5	1,0	3,4	22,8	346,5	33,0
SZ N 0-3	3,85	7,3	0,6	0,0	0,9	0,4	10,9	29,8	0,0	6,1	5,4	2,4	0,2	1,2	1,5	66,9	33,0
SZ N 3-6	4,60	0,8	0,5	0,0	0,7	0,4	1,9	3,6	0,0	1,5	1,9	0,7	0,2	0,7	0,1	13,0	32,5
SZ N 6-9	5,16	0,5	0,5	0,0	0,2	0,3	0,0	3,0	0,0	0,7	0,9	0,4	0,2	0,7	0,1	7,4	22,5
SZ N 9-12	5,47	0,4	0,4	0,0	0,1	0,2	0,0	2,2	0,0	0,6	0,4	0,2	0,2	0,7	0,0	5,5	20,0
SZ N O	4,02	42,3	0,0	0,0	0,3	0,3	37,2	124,5	0,0	23,0	14,7	25,9	0,6	3,1	18,7	290,7	16,5
SZ O 0-3	4,01	4,4	0,6	0,0	1,0	0,5	0,0	70,5	0,0	11,2	12,5	17,6	0,2	1,0	1,3	120,8	31,0
SZ O 3-6	4,89	1,3	0,8	0,0	1,1	0,7	14,3	12,5	0,0	2,2	2,6	3,8	0,1	0,6	0,0	39,9	29,0
SZ O 6-9	5,26	1,3	0,6	0,0	0,1	0,3	0,0	2,9	0,0	1,0	0,7	1,5	0,2	0,6	0,0	9,2	26,5
SZ O 9-12	5,23	0,7	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0	1,6	0,0	0,5	0,5	0,6	0,1	0,6	0,0	5,2	21,0
SZ O O	4,24	0,0	0,0	0,0	0,5	0,3	127,7	156,3	0,0	21,2	26,1	38,7	0,5	2,3	16,1	389,7	27,0

Anlage F – Tagesgänge der Stadthalle Zerbst





Anlage G – Ergebnisse der Biegeversuche nach DIN 52183

Nullproben

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Länge l _{Pr} [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ _B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]	Masse m [g]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Holzfeuchte u [%]
13,0	4,7	99,1	261	102	14500	3,13	517	13,8
13,0	4,7	100,3	289	113	15900	3,39	553	14,1
12,9	4,7	99,6	267	105	14400	3,19	528	14,3
13,8	4,6	100,2	319	123	16400	3,99	627	15,3
13,7	5,0	99,2	371	122	16500	4,32	636	14,3
12,9	4,7	99,9	242	96	12900	3,16	522	14,1
13,0	4,7	99,6	264	104	14000	3,30	542	14,2
13,1	4,6	100,1	257	105	13500	3,27	542	13,9
12,9	5,1	99,9	341	114	15300	3,71	564	14,2
13,8	5,0	99,8	363	118	15900	4,29	623	14,1
12,9	5,1	99,3	344	115	15700	3,69	565	14,2
Mittelwert				111	15000		565	14,2

Proben: I-5ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ _B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,0	4,7	262	103	12400
13,0	4,7	256	100	12400
12,9	5,1	377	126	15400
13,7	4,6	352	139	17500
13,1	4,7	274	106	13200
Mittelwert			115	14200

Proben: I-5salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ _B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
12,9	5,1	381	128	16700
13,1	4,8	237	88	10800
13,1	4,8	263	98	11600
13,2	4,8	259	96	11400
13,1	4,7	251	97	12600
Mittelwert			101	12600

Proben: I-10ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ _B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,8	5,1	407	128	14300
13,1	4,7	291	113	13200
13,0	5,1	384	128	14100
13,1	4,7	261	102	11800
13,1	4,7	295	115	13200
Mittelwert			117	13300

Proben: I-10salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
14,0	4,7		349	127	13200
13,0	4,8		290	109	12300
13,1	4,8		273	102	11400
13,2	4,8		282	104	12000
13,8	5,2		419	126	13200
Mittelwert				114	12400

Proben: I-15ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,2	4,7		259	100	12800
13,8	4,6		332	128	17100
12,9	5,1		321	108	14200
13,8	5,0		404	132	15800
13,1	4,7		277	108	13900
Mittelwert				115	14800

Proben: I-15salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,2	4,8		229	85	11700
13,1	4,8		247	92	12600
13,1	4,8		261	97	13200
13,0	5,2		358	115	14800
13,1	4,8		254	95	13000
Mittelwert				97	13100

Proben: I-20ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,7	4,6		294	114	15100
13,0	4,7		239	94	11900
13,7	5,0		356	117	14000
12,9	4,7		270	106	13100
13,8	5,0		374	122	14000
Mittelwert				111	13600

Proben: I-20salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
14,0	4,8		296	104	13900
13,3	4,9		230	81	10100
14,0	4,7		302	110	14500
12,9	4,7		311	123	16700
13,2	4,8		267	99	12300
Mittelwert				103	13500

Proben: I-25ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,1	4,7		269	105	12500
13,0	4,7		317	124	14100
12,9	5,1		304	102	13200
13,7	5,0		386	126	17100
12,9	5,1		356	119	15600
Mittelwert				115	14500

Proben: I-25salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,4	4,9		295	103	12100
13,2	4,9		242	86	12500
13,2	4,9		256	91	12700
13,9	5,1		254	110	15000
13,0	5,1		243	114	15600
Mittelwert				101	13600

Proben: I-30ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,7	5,0		389	128	17200
13,0	4,7		260	102	13700
13,1	4,8		244	91	12400
13,8	4,7		311	115	15200
13,7	5,0		387	127	15700
Mittelwert				113	14800

Proben: I-35salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,9	5,2		379	114	14700
13,2	4,9		258	92	12600
13,2	4,9		242	86	12700
13,9	4,8		294	103	14500
13,8	5,2		382	115	14900
Mittelwert				102	13900

Proben: II-15ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,8	5,1		372	117	16600
12,7	5,2		360	118	16100
13,0	5,2		223	71	11000
13,2	4,8		235	87	13200
13,1	4,8		232	87	13300
Mittelwert				102	14800

Jahring - Verkrümmung

Proben: II-15salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Länge l [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]
13,8	5,2		347	105	15100
13,0	5,3		339	104	14700
13,2	4,9		224	80	14400
13,2	4,9		244	87	13400
13,1	4,8		255	95	14500
Mittelwert				94	14400

Proben: II-30ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Länge l _{pr} [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E _B [N/mm ²]	Masse m [g]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Holzfeuchte u [%]
13,7	5,1	99,6	359	114	16000	4,56	655	14,6
12,9	4,8	98,8	246	93	13200	3,64	595	14,8
13,8	5,1	99,9	348	109	15200	4,49	639	14,8
12,9	5,1	99,4	340	114	16500	4,06	621	14,4
13,9	4,7	100,0	291	107	16500	4,68	716	15,3
Mittelwert				107	15500		645	14,8

Proben: II-30salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]	Länge l_{Pr} [mm]	Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E_B [N/mm ²]	Masse m [g]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Holzfeuchte u [%]
13,1	5,2	99	339	108	16100	4,41	651	14,2
13,2	5,0	100,6	216	74	11100	3,65	550	13,7
13,2	5,2	99,9	326	103	14900	4,34	633	13,6
13,9	4,7	99,2	298	109	16200	4,72	728	14,0
13,2	4,8	99,9	236	87	13600	3,66	578	14,0
Mittelwert				96	14400		628	13,9

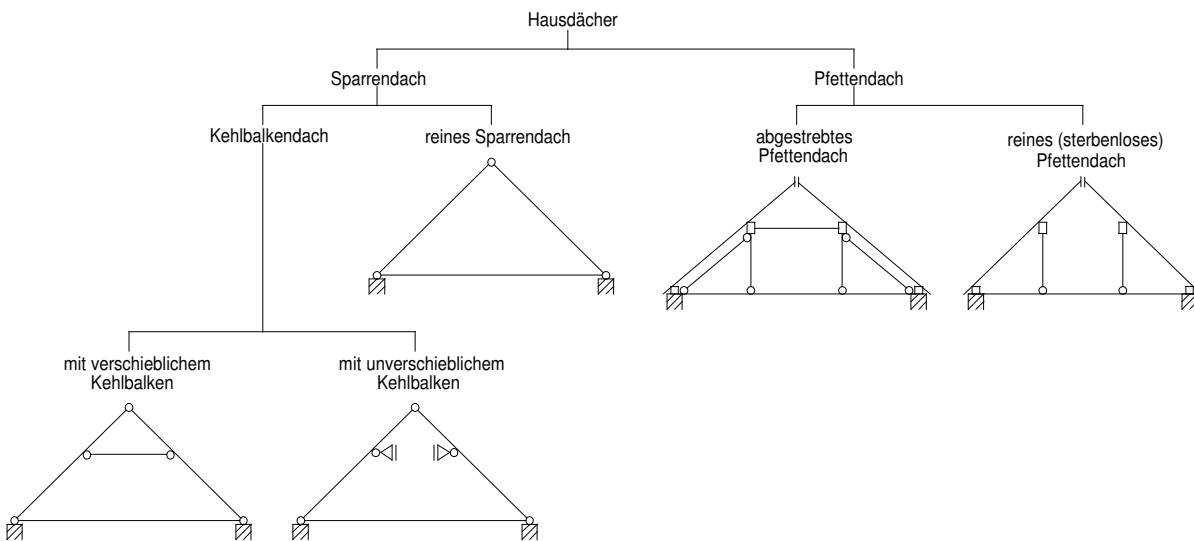
Proben: II-45ref

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E_B [N/mm ²]
13,9	4,7		302	111	16000
13,1	4,8		261	97	13400
13,8	4,6		311	120	18200
13,0	4,7		272	107	14700
13,0	5,2		301	96	14300
Mittelwert				106	15300

Proben: II-45salz

Breite b [mm]	Höhe h [mm]		Höchstkr. max F [N]	Biegefestigk. σ_B [N/mm ²]	E - Modul E_B [N/mm ²]
13,9	4,7		287	105	15600
13,1	4,9		255	91	13400
13,9	4,7		290	106	16500
13,2	4,9		226	80	12200
12,9	5,2		311	100	15300
Mittelwert				96	14600

Anlage H I – Übersicht zu den statisch konstruktiven Grundsätzen der Hausdächer, nach [Mönck 1998]

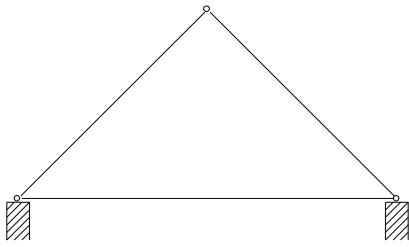


Anlage H II – Vor- und Nachteile der Dachsysteme

	Vorteil	Nachteil
Sparrendach	<ol style="list-style-type: none"> 1) Die darunter liegende Decke erhält keine zusätzlichen vertikalen Einzelasten aus dem Dachausbau. 2) Ein nachträglicher Ausbau des Dachgeschosses wird nicht durch Stützen u.ä. behindert. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Der aus lotrechten Lasten entstehende zusätzliche Horizontalschub erfordert aufwendige Anschlüsse. Sind Dremelwände nicht in der Lage, diesen Horizontalschub aufzunehmen, ist eine Sonderkonstruktion erforderlich. 2) Die Sparrenlage beiderseits des Firstpunktes ist voneinander abhängig. Auswechslungen und Dachdurchbrüche, z.B. im Bereich von Schornsteinen, werden dadurch kompliziert. 3) Beim Einbau von Dachgauben können sich, auf Grund der hohen örtlichen Beanspruchungen der Randsparren, statisch – konstruktive Probleme ergeben.
Pfettendach	<ol style="list-style-type: none"> 1) Kein zusätzlicher Horizontalschub aus lotrechten Lasten. Aufwendige Anschlüsse an die Unterkonstruktion können entfallen. 2) Durch die Verwendung von First- und/oder Mittelpfetten ist die Sparrenlage auf beiden Dachseiten unabhängig voneinander. 3) Der Einbau von Dachgauben ist statisch – konstruktiv einfacher. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Die Decken werden durch erhebliche Lasten aus Pfettenstielen belastet (nicht bei Pfettenauflagerungen auf vorhandene, tragende Zwischenwände). 2) Ist ein Dachgeschossausbau vorgesehen, beeinflussen sich Grundrissplanung und Dachkonstruktion gegenseitig.

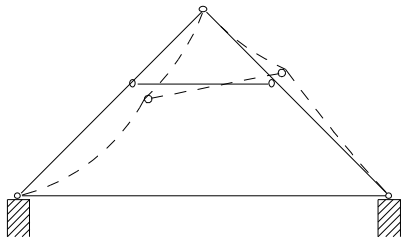
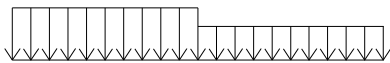
Anlage H III – Übersicht Sparrendach

Reines Sparrendach

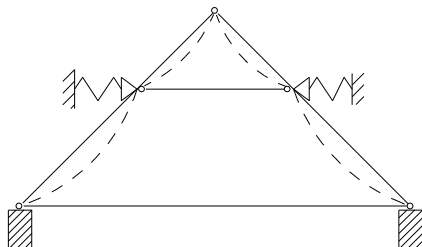
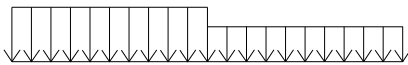


Jedes Sparrenpaar bildet mit dem dazugehörigen Balken bzw. einer Holztafel ein statisch bestimmtes Dreigelenksystem. Der Gespärreabstand beträgt i.d.R. 0,7 bis 1,2 m (der größere Wert bei älteren Gebäuden). Sparren werden hauptsächlich auf Biegung und Druck beansprucht. Der an den Sparrenfußpunkt auftretende Horizontalschub ist über geeignete Konstruktionen in die darunterliegenden Bauteile einzuleiten (z.B. Versatz). Das reine Sparrendach ist nur für kleine Hausbreiten bis 7,50 m geeignet [Mönck 1998].

Kehlbalkendach (verschieblich):



Kehlbalkendach (unverschieblich):



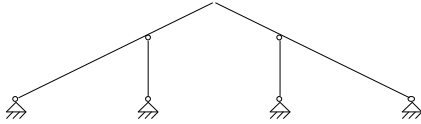
Das Kehlbalkendach gehört entwicklungsgeschichtlich zu den Sparrendächern, jede Gespärreebene ist aber mit einem Kehlbalken ausgesteift. Es wird unterschieden zwischen dem verschieblichen Kehlbalkendach und dem unverschieblichen Kehlbalkendach.

Beim verschieblichen Kehlbalkendach ist die Kehlbalkenlage verschiebbar. Bei symmetrischer Belastung und Ausbildung (z.B. Schnee) wirkt das verschiebbare wie das unverschiebbare Kehlbalkendach. Bei asymmetrischen Belastungen (z.B. Wind) oder symmetrischer Belastung und asymmetrischer Ausbildung wird der Sparren stärker auf Biegung beansprucht, es kommt zu größeren Verschiebungen. Beim unverschieblichen Kehlbalkendach muss die Kehlscheibe bzw. der -verband kraftschlüssig in den Giebelwänden und/oder geeigneten Zwischenwänden gelagert werden. Kehlscheiben können aus Holzwerkstoffplatten oder -schalungen bestehen, Kehlverbände aus einzelnen Kehlbalken (Vertikalstab), drucksteifen Gurten (Bohlen) und druckschlaffen Diagonalen (z.B. Stahldiagonalen).

Die Längsaussteifung gegen Windlasten auf Giebel oder gleichwirkende andere Lasten erfolgt sowohl beim Sparren- als auch beim Kehlbalkendach über Dachscheiben oder über Verbände aus Windrispen im Zusammenwirken mit den Sparren

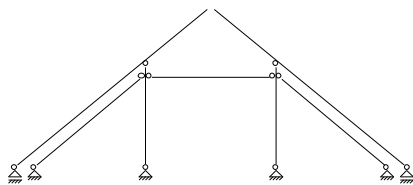
Anlage H IV – Übersicht Pfettendach

Pfettendach (strebenlos):



Die Pfette verläuft parallel zum First. Es wird unterschieden zwischen First-, Mittel- und Fußpfette, deren Lagerung erfolgt entweder auf tragenden Wänden oder auf Pfettenstühle. Die Sparren sind auf den Pfetten frei aufliegend und werden auf Druck und Biegung beansprucht.

Pfettendach (abgestrebt):

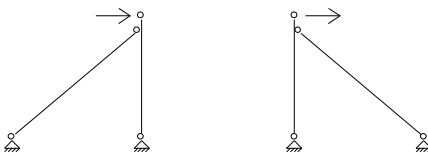


In der Grundform wird zwischen dem strebenlosen ($\alpha \leq 30^\circ$) und dem abgestrebt Pfettendach ($\alpha > 30^\circ$) [Mönck 1998] unterschieden.

Beim strebenlosen Pfettendach lagern die Sparren i.d.R. gelenkig auf einer Fuß- und Mittel- oder Firstpfette, wobei das feste Auflager an der Fußpfette angenommen wird, First- und Mittelpfettenaullager sind als horizontal verschieblich anzusetzen.

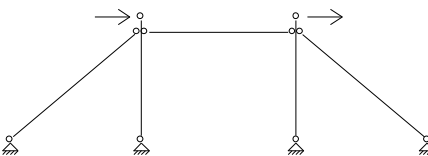
Beim abgestrebt Pfettendach ist die Mittelpfette über Streben ausgesteift, so dass dort ein festes Auflager entsteht. Der Fußpunkt wird horizontal entlastet und kann als verschiebliches Auflager angenommen werden.

Windbock:



Die Mittelpfetten werden im Gegensatz zum strebenlosen Pfettendach auf Doppelbiegung beansprucht. Je nachdem ob die Strebe über ihre Anschlüsse Druck- und Zugkräfte oder nur Druckkräfte aufnehmen kann, wirkt diese im Zusammenhang mit Stiel und Zange als Windbock oder Windstuhl zur Dachaussteifung in Querrichtung. Die Strebenanschlüsse im Windstuhl können als zimmermannsmäßige Verbindungen ausgebildet werden, da diese nur Druckkräfte zu übertragen brauchen.

Windstuhl:



In Längsrichtung erfolgen die Aufnahme von giebelseitigen Windlasten und die Stabilisierung durch Kopfbänder oder auch über Windverbände oder durch Anordnung von Scheiben in Holztafelbauweise zwischen den Stielen.

Anlage I – Gefährdungsklassen für Bauholz nach DIN 68800 - 3

Gefährdungs- klasse (GK)	Holzbean- spruchung	Anwendungsbereiche	Holzgefährdung durch				Erforderliche Prüfprädikate der Holzschutzmittel
			Insek- ten	Pilze	Auswa- schung	Moder- fäule	
0	Innen verbautes Holz, ständig trocken	wie GK 1 unter Berücksichtigung von 1)	nein	nein	nein	nein	-
1		Innenbauteile bei einer mittl. relat. Luftfeuchte bis 70 %, Holzfeuchte u < 20 % sichergestellt und gleichartig beanspruchte Bauteile	ja	nein	nein	nein	lv
2	Holz, das weder dem Erdkontakt noch direkt der Witterung oder Auswaschung ausgesetzt ist; vorübergehende Befeuchtung möglich	Innenbauteile bei einer mittl. relat. Luftfeuchte über 70 %, Holzfeuchte u > 20 % und gleichartig beanspruchte Bauteile	ja	ja	nein	nein	lv P
Innenbauteile in Nassbereichen, Holzteile wasserab- weisend abgedeckt							
Außenbauteile ohne unmittelbare Wetterbeanspruchung							
3	Holz der Witterung oder Kondensation ausgesetzt, aber nicht in Erdkontakt	Außenbauteile mit Wetterbeanspruchung ohne ständigen Erdkontakt und/oder Wasserkontakt	ja	ja	ja	nein	lv P W
Innenbauteile in Nassräumen							
4	Holzteile mit ständigen Erd- und/ oder Süßwasser- kontakt, auch bei Ummantelungen; für Kühltürme so- wie für Holz im Meerwasser gel- ten besondere Bedingungen	Holz in dauerndem Erdkontakt oder stän- dig starker Befeuch- tung ausgesetzt	ja	ja	ja	ja	lv P W E

1) Die GK 0 liegt vor wenn:

- im Bereich der GK 1 Farbkernhölzer verwendet werden, die einen Splintholzanteil unter 10 % aufweisen oder Holz im üblichen Wohnklima oder vergleichbaren Räumen verbaut ist und gegen Insektenbefall allseitig durch eine geschlossene Bekleidung abgedeckt oder Holz zum Raum hin so offen angeordnet ist, dass es kontrollierbar bleibt,
- im Bereich der GK 2 splintfreie Farbkernhölzer der Resistenzklassen 1, 2 oder 3 nach DIN 68364 verwendet werden,
- im Bereich der GK 3 splintfreie Farbkernhölzer der Resistenzklassen 1 oder 2 nach DIN 68364 verwendet werden,
- im Bereich der GK 4 splintfreie Farbkernhölzer der Resistenzklassen 1 nach DIN 68364 verwendet werden

Abstracts

Overdosed and repeated application of certain wood preservative and flame retardant in conjunction with specific environmental conditions causes in the long term surface corrosion on wood with the specific type of damage "maceration". The conditions starting "maceration" and the subsequent damage mechanisms were clarified for some typical ion combinations of wood preservatives and flame retardant. Furthermore, the effect on the building safety (loss of cross section, strength of cross section, load carrying capacity of joints) were evaluated. Different strategies of reconstruction were discussed. For two roof framings effected proposals for reconstruction based on the existing situation were submitted.

Zusammenfassung

Das überdosierte und mehrmalige Auftragen von spezifischen Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln führt im Zusammenwirken mit entsprechenden Umgebungsbedingungen langfristig zu einer oberflächennahen Korrosion des Holzes mit dem speziellen Schadensbild der „Mazeration“. Es wurden die Randbedingungen für das Zustandekommen der „Mazeration“ für einige typische vorliegende Ionenkombinationen aus Holzschutz- und Holzflammschutzmitteln sowie der sich daraus entwickelnde Schadensmechanismus abgeklärt. Weiterhin wurde der Einfluss der Schädigung auf die Bauteilsicherheit (Querschnittsminderung, Festigkeit des Restquerschnittes, Tragfähigkeit von Verbindungsmitteln und Anschlüssen) behandelt. Erörtert wurden verschiedene Sanierungsstrategien, für zwei betroffene Dachstühle wurden aufgrund der gegebenen Situation Sanierungsvorschläge unterbreitet.