

 SpringerWienNewYork

Altbausanierung  
Sonderband

Herausgegeben von  
Anton Pech

Michael Balak  
Anton Pech

# Mauerwerkstrockenlegung

Von den Grundlagen  
zur praktischen Anwendung

Zweite, aktualisierte Auflage

SpringerWienNewYork

Dipl.-Ing. Dr. Michael Balak  
Dipl.-Ing. Dr. Anton Pech  
Wien, Österreich

Der Abdruck der zitierten ÖNORMen erfolgt mit Genehmigung des Österreichischen Normungsinstitutes, Heinestraße 38, 1020 Wien.  
Benutzungshinweis: ON Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien,  
Tel. ++43-1-21300-805, Fax ++43-1-21300-818, E-mail: sales@on-norm.at

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© 2003, 2008 Springer-Verlag/Wien  
Printed in Austria

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Produkthaftung: Sämtliche Angaben in diesem Fachbuch/wissenschaftlichen Werk erfolgen trotz sorgfältiger Bearbeitung und Kontrolle ohne Gewähr. Insbesondere Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Eine Haftung der Herausgeber, der Autoren oder des Verlages aus dem Inhalt dieses Werkes ist ausgeschlossen.

Korrektorat: Mag. Sabine Wiesmühler  
Textkonvertierung und Umbruch: Grafik Rödl, 2486 Pottendorf, Österreich  
Druck und Bindearbeiten: Druckerei Theiss GmbH, 9431 St. Stefan, Österreich

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier – TCF  
SPIN: 12068418

Mit zahlreichen (teilweise farbigen) Abbildungen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

ISBN 3-211-83805-8 1. Aufl. SpringerWienNewYork  
ISBN 978-3-211-75777-2 SpringerWienNewYork

## VORWORT ZUR 2. AUFLAGE

Auf Grund einer Änderung der Normensituation in Österreich wurde eine Aktualisierung der entsprechenden Normenpassagen, vor allem der in Europa einzigen Normung zur Mauerwerkstroockenlegung, der ÖNORM-Serie B 3355 erforderlich. Ebenso haben neue Erkenntnisse und zusätzliche Erfahrungen der Autoren seit dem Erscheinen der 1. Auflage Anpassungen, Änderungen und Ergänzungen bewirkt, dies vor allem im Bereich der Injektionsverfahren und der elektrophysikalischen Verfahren sowie bei den flankierenden Maßnahmen.

Ausgehend von der Fachbuchreihe „Baukonstruktionen“ ist auch eine neue Fachbuchreihe „Altbausanierung“ derzeit in Planung, sodass die nun vorliegende aktualisierte 2. Ausgabe der „Mauerwerkstroockenlegung“ als Sonderband der neuen Reihe Altbausanierung in einem neuen Layout erscheint.

# VORWORT ZUR 1. AUFLAGE

Das vorliegende Fachbuch weist auf die Problematik des äußerst komplexen Fachgebietes der Mauerwerkstrockenlegung und auf die damit verbundenen häufigen Fehlschläge in der Praxis hin, zeigt aber vor allem Wege zum Erfolg unter besonderer Berücksichtigung der praktischen Umsetzbarkeit.

Die vermeidbaren Bauschadenskosten, verursacht durch unwirksame oder unzureichende Trockenlegungsmaßnahmen, belaufen sich in Österreich auf ca. 50 Millionen EURO pro Jahr. Die Ursachen für die häufigen Fehlschläge liegen in der Planung, Ausführung und Materialanwendung bzw. Materialqualität. Die Problematik bei der Planung liegt häufig darin, dass der Architekt oder planende Baumeister seine Fachkenntnis oft überschätzt und, ohne vorher aus Kostengründen eine entsprechende Bauwerksanalyse hinsichtlich Mauerwerkstrockenlegung durchführen zu lassen, Trockenlegungsmaßnahmen ausschreibt, die objektspezifisch oft nicht zielführend und/oder unzureichend sind. In der Praxis verlässt sich auch der Planer des Öfteren auf unqualifizierte oder produktorientierte Aussagen von Fachfirmen. Eine Umfrage bei ~40 Architekten in Österreich hat ergeben, dass 80% der Befragten von der ÖNORM B 3355 „Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk“ noch nie etwas gehört haben. Dadurch sind die vielen Fehlschläge auf dem Gebiet der Mauertrockenlegung verursacht durch Planungsfehler durchaus erklärbar.

Probleme bei der Ausführung liegen meist darin, dass das Personal von sogenannten Fachfirmen oft keine ausreichenden Fachkenntnisse hat und daraus Ausführungsfehler resultieren. Weiters sind oft auch die Anwendungsgrenzen der verwendeten Produkte nicht bekannt. Ergänzend dazu sind noch handwerkliche Fehlleistungen zu nennen. Die örtliche Bauaufsicht kann mehrheitlich die Ausführung von Trockenlegungsmaßnahmen aufgrund von mangelnder Fachkenntnis nicht ausreichend beurteilen und somit Fehlschläge nicht sofort erkennen.

Die häufigsten Fehlerquellen bei der Materialqualität ergeben sich aus dem Umstand, dass die Produkthersteller sowohl die Planer als auch die ausführenden Fachfirmen nicht ausreichend über die Anwendungsgrenzen ihrer Produkte informieren und teilweise auch zu hohe Erwartungen in die eigenen Produkte stecken. Nicht zu unterschätzen sind die Produkte zur nachträglichen Horizontalabdichtung von Mauerwerk, die über Baumärkte vertrieben werden, welche natürlich auch Anwendungsgrenzen besitzen, die jedoch von den „Heimwerkern“ objektspezifisch nicht überprüft werden bzw. vom Laien nicht überprüft werden können.

Das vorliegende Fachbuch soll einen Beitrag zur Reduktion und Vermeidung von Bauschäden, verursacht durch mangelhafte und/oder unzureichende Trockenlegungsmaßnahmen leisten und grundlegende Kenntnisse der Schadensursachen und der Sanierungsmöglichkeiten vermitteln.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Feuchtigkeit im Mauerwerk</b>	<b>1</b>
1 1	Feuchtigkeitsursachen	1
1 2	Porenstrukturen	2
1 3	Be- und Entfeuchtung	4
1 3 1	Transportvorgänge	5
1 3 2	Kapillarkondensation	10
1 3 3	Kondensation	10
1 3 4	Adsorption und Absorption	12
1 3 5	Wasserdampfdiffusion	12
1 4	Kapillarität	14
1 4 1	Steighöhe	14
1 4 2	Sauggeschwindigkeit	15
1 4 3	Kapillardruck	15
1 4 4	Wasseraufnahmekoeffizient	16
1 4 5	Wassereindringkoeffizient	16
1 4 6	Wasserkapazität	17
1 4 7	Verdunstungseinfluss	18
1 4 8	Auswirkungen	18
1 5	Bauschädliche Salze	20
1 5 1	Salzbildung	20
1 5 1 1	Salze im Ziegel	25
1 5 1 2	Salze im Mörtel	27
1 5 1 3	Salze in der Mauerwerksumgebung	28
1 5 1 4	Salze in Natursteinen	29
1 5 2	Kristallisation	29
1 5 3	Hydratation	30
1 5 4	Hygroskopizität, Osmose	31
1 5 5	Auswirkungen	33
1 5 5 1	Innenkrustenbildung	34
1 5 5 2	Außenkrustenbildung	35
1 6	Feuchtigkeitsquellen	36
1 6 1	Leckstellen	36
1 6 2	Niederschläge	36
1 6 2 1	Spritzwasser	36
1 6 2 2	Windeintrag	37
1 6 3	Bodenwässer	37
1 6 4	Baufeuchtigkeit	37
1 7	Frost	38
1 7 1	Frostwirkung bei Ziegelmauerwerk	39
1 7 2	Frostwirkung bei Natursteinmauerwerk	39
1 8	Organismen	40
<b>2</b>	<b>Historisches Mauerwerk</b>	<b>45</b>
2 1	Die Baustoffe	45
2 1 1	Der Ziegel	45
2 1 1 1	Zusammensetzung gebrannter Ziegel	46
2 1 1 2	Rohstoffe des Ziegels	46
2 1 1 3	Ziegelherstellung in der Gründerzeit	47
2 1 2	Die Steine	48
2 1 2 1	Die Steine des Keller- und Grundmauerwerks	49
2 1 2 2	Zusammensetzung und Eigenschaften der Steine	49
2 1 3	Der Mörtel	51
2 1 3 1	Die Entwicklung des Mörtels	51
2 1 3 2	Technologie der Bindemittel	53

2 2	Ziegelmauerwerk . . . . .	56
2 2 1	Abmessungen der Ziegel . . . . .	56
2 2 2	Ziegelverbände . . . . .	59
2 2 2 1	Läuferverband . . . . .	60
2 2 2 2	Binderverband . . . . .	61
2 2 2 3	Blockverband . . . . .	61
2 2 2 4	Kreuzverband . . . . .	62
2 2 2 5	Verbände hohler Mauern . . . . .	62
2 3	Natursteinmauerwerk . . . . .	66
2 3 1	Reines Natursteinmauerwerk . . . . .	66
2 3 1 1	Trockenmauerwerk . . . . .	66
2 3 1 2	Zyklopenmauerwerk . . . . .	67
2 3 1 3	Feldstein- und Findlingsmauerwerk . . . . .	67
2 3 1 4	Bruchsteinmauerwerk . . . . .	67
2 3 1 5	Schichtenmauerwerk . . . . .	69
2 3 2	Natursteinmauerwerk mit Ziegelbereichen . . . . .	70
2 3 2 1	Bruchsteinmauerwerk mit Ecken aus Ziegeln . . . . .	70
2 3 2 2	Mischmauerwerk . . . . .	71
2 4	Mauern aus Stampf- oder Gussmassen . . . . .	72
2 4 1	Lehmstampfbau (Lehmpisee) . . . . .	72
2 4 2	Kalksandstampfbau (Kalksandpisee) . . . . .	73
2 5	Fundierungen . . . . .	73
2 5 1	Grundbank . . . . .	73
2 5 2	Steinpackung . . . . .	74
2 5 3	Sandschüttung . . . . .	74
2 5 4	Betonbettung . . . . .	74
2 5 5	Fundierung auf Senkbrunnen . . . . .	75
2 5 6	Fundierung auf hölzernen Rosten . . . . .	75
2 5 6 1	Liegende Roste . . . . .	75
2 5 6 2	Pfahlroste . . . . .	77
2 5 7	Fundierung auf Pfeilern und Gurten . . . . .	78
2 6	Historische Abdichtungsmaßnahmen . . . . .	79
2 6 1	Die Abdichtungsmaterialien der Gründerzeit . . . . .	79
2 6 1 1	Glas . . . . .	79
2 6 1 2	Blei . . . . .	79
2 6 1 3	Asphalt . . . . .	80
2 6 1 4	Mastix-Zement . . . . .	80
2 6 1 5	Teer-Zement . . . . .	81
2 6 1 6	Portlandzement . . . . .	81
2 6 1 7	Imprägnierung der Ziegel mit Seife und Alaun . . . . .	82
2 6 2	Vertikale Abdichtungen . . . . .	82
2 6 3	Horizontale Abdichtungen . . . . .	84
2 6 4	Isoliergräben . . . . .	85
2 6 5	Luftschichten im Mauerwerk . . . . .	87
<b>3</b>	<b>Bauwerksanalyse und Sanierungskonzept . . . . .</b>	<b>89</b>
3 1	Bestandsaufnahme . . . . .	90
3 1 1	Bestandsaufnahme Gebäude und Umgebung . . . . .	90
3 1 2	Temperatur und Luftfeuchtigkeit . . . . .	92
3 2	Probenentnahme . . . . .	94
3 2 1	Entnahmeorte . . . . .	95
3 2 2	Methoden . . . . .	95
3 3	Baustoffanalysen . . . . .	98
3 3 1	Feuchtigkeitsgehalt . . . . .	98
3 3 2	Maximale Wasseraufnahme . . . . .	105
3 3 3	Durchfeuchtungsgrad . . . . .	108
3 3 4	Wassersättigungskoeffizient . . . . .	108
3 3 5	Restsaugfähigkeit . . . . .	109

3 3 6	Hygroskopische Ausgleichsfeuchtigkeit .....	109
3 3 7	Bauschädliche Salze .....	111
3 3 8	Mörtel- und Putzbestandteile .....	112
3 3 9	Festigkeitsbestimmungen .....	114
3 3 10	Anstriche .....	117
3 3 11	Mikroorganismen .....	118
3 4	Bauwerksdiagnose .....	118
3 4 1	Feuchtigkeit .....	118
3 4 2	Bauschädliche Salze .....	122
3 4 3	Klima, Temperaturen .....	124
3 4 4	Materialien .....	124
3 4 5	Festigkeit .....	124
3 4 6	Anstriche .....	125
3 4 7	Organismen .....	125
3 5	Sanierungsplanung .....	125
3 5 1	Grundlagen des Sanierungskonzeptes .....	126
3 5 2	Sanierungsdetailplanung, Ausschreibung .....	129
3 6	Kontrolle der Wirksamkeit .....	129
3 6 1	Feuchtigkeit .....	130
3 6 2	Bauschädliche Salze .....	131
3 7	Bauwerksdiagnose – ÖNORM B 3355-1 .....	131
3 7 1	Bestandsaufnahme .....	132
3 7 2	Probenentnahme .....	132
3 7 3	Analysenkennwerte .....	134
3 7 4	Sanierungsplanung .....	136
3 7 5	Überwachung und Kontrolle .....	136
<b>4</b>	<b>Verfahren zur nachträglichen Horizontalabdichtung .....</b>	<b>145</b>
4 1	Mechanische Verfahren .....	147
4 1 1	Übersicht Verfahren .....	147
4 1 1 1	Maueraustauschverfahren .....	148
4 1 1 2	Chromstahlblechverfahren .....	149
4 1 1 3	Bohrkernverfahren .....	150
4 1 1 4	Bohrlochfrässlitzverfahren .....	151
4 1 1 5	Sägeverfahren .....	151
4 1 2	Statisch-konstruktive Auswirkungen .....	153
4 1 2 1	Vertikalverformungen im Schnittfugenbereich .....	153
4 1 2 2	Einsatzgrenzen und Materialkennwerte von bituminösen Abdichtungsbahnen und genoppten Stahlblechen .....	156
4 1 2 3	Aufnahme von Scherkräften .....	158
4 2	Injektionsverfahren .....	159
4 2 1	Verfahren und Materialien .....	161
4 2 2	Anwendungsbereiche und Einsatzgrenzen .....	166
4 2 3	Statik .....	167
4 3	Elektrophysikalische Verfahren .....	167
4 3 1	Verfahrensübersicht .....	174
4 3 2	Anwendungsbereiche und Einsatzgrenzen .....	174
4 3 3	Verfahrensdurchführung .....	176
4 4	Ungeeignete und/oder problematische Verfahren .....	177
4 4 1	Mauerlungen .....	177
4 4 2	Sperrputze .....	178
4 4 3	Kontaktlose Verfahren .....	178
4 4 4	Passive Osmose .....	179
4 4 5	Wandbeheizungen .....	180
4 4 6	Vorsatzschalen .....	181
4 4 7	Hinterlüftung .....	181
4 5	Horizontalabdichtung – ÖNORM B 3355-2 .....	181
4 5 1	Mechanische Verfahren .....	183

4 5 2	Injektionsverfahren	183
4 5 3	Elektrophysikalische Verfahren	184
<b>5</b>	<b>Flankierende Maßnahmen zur Mauerwerkstrockenlegung</b>	<b>199</b>
5 1	Entfeuchtung	199
5 2	Schadssalzreduktion	204
5 3	Vertikalabdichtungen	209
	5 3 1 1 Bituminöse Abdichtungen	210
	5 3 1 2 Kunststoffabdichtungen	211
	5 3 1 3 Dichtschlämmen, Sperrmörtel	211
	5 3 1 4 Flächeninjektionen	211
5 4	Putze	213
	5 4 1 1 Sanierputze	214
	5 4 1 2 Feuchtmauerputze	217
	5 4 1 3 Historische Putze	218
	5 4 1 4 Sockelputze	218
	5 4 1 5 Trockenputze	218
5 5	Anstriche	218
5 6	Drainagen	219
5 7	Wärmedämmung	220
5 8	Fußböden	223
5 9	Klimatische Maßnahmen	225
	5 9 1 Vorsatzschalen	225
	5 9 2 Lüftungsgräben	226
	5 9 3 Wandbeheizungen	227
5 10	Mauerwerksverfestigung	227
5 11	Flankierende Maßnahmen – ÖNORM B 3355-3	228
	5 11 1 Baustellenbezogene Maßnahmen	228
	5 11 2 Gebäudebezogene, bauphysikalische Maßnahmen und Drainagen	229
	5 11 3 Konstruktionsbezogene Maßnahmen	229
	5 11 4 Materialbezogene Maßnahmen	229
<b>6</b>	<b>Ausführungsdetails, Ausschreibung</b>	<b>235</b>
6 1	Ausführungsdetails und Anschlüsse	235
	6 1 1 Abdichtungsanschlüsse	235
	6 1 2 Putzfassade	238
	6 1 3 Steinsockel	239
	6 1 4 Vollwärmeschutzfassaden	239
	6 1 5 Innenbereich	240
6 2	Ausschreibung	241
6 3	Werkvertragsnorm – ÖNORM B 2202	267
	6 3 1 Ausschreibung, Angebote	267
	6 3 1 1 Angaben zum Leistungsverzeichnis	267
	6 3 1 2 Leistungspositionen	268
	6 3 1 3 Vom Auftraggeber zu erbringende Leistungen	269
	6 3 2 Bauleistungen, Vertragsbestimmungen	269
	6 3 2 1 Stoffe	269
	6 3 2 2 Ausführung	270
	6 3 2 3 Prüf- und Warnpflicht	270
	6 3 2 4 Nebenleistungen	271
	6 3 2 5 Abrechnung	272
	6 3 2 6 Gewährleistung, Sicherstellung	272
	6 3 2 7 Übernahme	273
	6 3 2 8 Sicherstellung	273
	Quellennachweis	275
	Literaturverzeichnis	276
	Sachverzeichnis	288

## Feuchtigkeitsursachen

1|1

Die Aufnahme von Feuchtigkeit in Bauteilen kann grundsätzlich entweder in flüssiger Form oder durch Wasserdampf, der im Mauerwerk in den flüssigen Aggregatzustand übergehen kann, erfolgen.

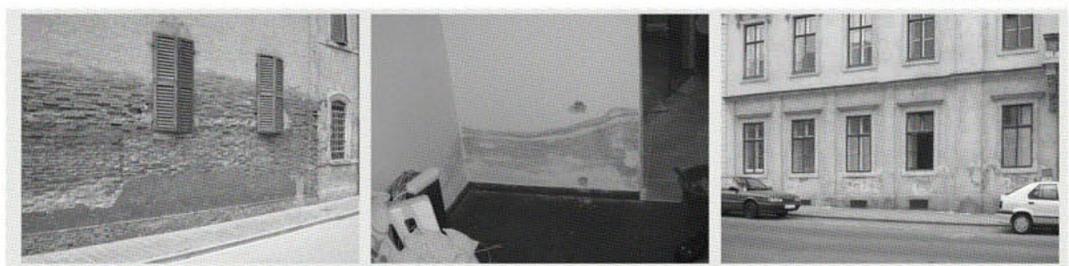
Tabelle 1.1: Feuchtigkeitsbeanspruchungen von Mauerwerk [92]

Wasseraufnahme in flüssiger Form	
Regen- und Spritzwässer Bodenwässer (Sickerwasser und Grundwasser) kapillarer Feuchtigkeitstransport vagabundierende Wässer aus undichten Wasserleitungen Wassereindringung von oben (Infiltration)	
Wasseraufnahme in dampfförmiger Form	
hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme Kondensation Kapillarkondensation Adsorption und Absorption der Luftfeuchtigkeit Windeinpressung feuchter Luft	
Wandinhärente Feuchtigkeit	
Baufeuchtigkeit	

Durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk ergeben sich an den Außenflächen der Erdgeschoßbereiche die dafür typischen Bilder von Verfärbungen, Putzablösungen und Zerstörungen (Bild 1.1 bis Bild 1.7, Bild 1.9, Bild 1.10, Bild 1.15, Bild 1.18). Zusätzlich können an feuchtigkeitsbelasteten Wänden Schimmel- und Algenbildungen auftreten, die ideale Wachstumsbedingungen vorfinden (Bild 1.16).

Durch erhöhte Feuchtigkeitsbelastungen werden aber auch in das Mauerwerk eingebaute Bauteile aus Holz wie Fenster- und Türstöcke stark in Mitleidschaft gezogen bzw. gänzlich zerstört (Bild 1.14, Bild 1.16).

Beispiel 1.1: Feuchtigkeitssschäden durch kapillar aufsteigende Feuchtigkeit



Beispiel 1.2:  
Feuchtigkeits-  
schäden durch  
Baugebrechen

Sanierputze, Dichtschlämmen, Sperrputze, Vorsatzschalen und ähnliche die Diffusion behindernde oder verändernde Schichten oder Schalen können zwar kurz- bis mittelfristig eine optische Sanierung des betroffenen Wandbereiches erzielen, die dahinter aktiven Mechanismen des Feuchtigkeits- und Schadensalztransportes zeigen jedoch nach einiger Zeit wieder die typischen Schadensbilder (Bild 1.6, Bild 1.8, Bild 1.9, Bild 1.10, Bild 1.15).

Im Bereich von undichten Regenabfallrohren kann eine deutlich höhere Feuchtigkeitsaufnahme festgestellt werden (Bild 1.11, Bild 1.12). Ein gegenläufiges Bild zeigt sich über Kellerfenstern, wo der vertikale kapillare Feuchtigkeitstransport unterbrochen ist und im Sturzbereich eine höhere Verdunstungsfläche vorliegt (Bild 1.03). Wassereindringung von oben in Wand und Decke kann durch eine schadhafte Dachrinne, einen schadhaften Dachhautbereich oder durch andere Schäden an wasserführenden Leitungen verursacht werden (Bild 1.13).



Das typische Bild eines kapillaren Feuchtigkeitstransportes muss nicht immer ursächlich mit fehlenden oder mangelhaften Horizontal- und Vertikalabdichtungen im Gründungsbereich zusammenhängen. Ausgehend von schadhafte Wasser- und Abwasserleitungen, fehlerhaften Terrassenentwässerungen, mangelhafter Gefälleausbildung des an ein Objekt anstehenden Terrains beginnt ab dem Zeitpunkt des Feuchtigkeitseintrages in den Wandbildner der kapillare Feuchtigkeitstransport. Besonders verstärkt zeigen sich diese Schäden auch im Innenbereich, wenn im feuchtigkeitsbelasteten Wandbereich Gips oder gipshältige Baustoffe eingesetzt werden (Bild 1.17).

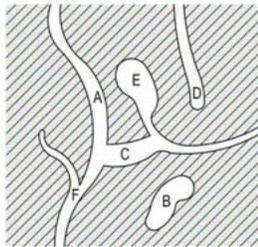
## 1|2

### Porenstrukturen

Die Porosität der Wandbaustoffe beeinflusst in beträchtlichem Ausmaß die Frostbeständigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und chemische Beständigkeit sowie die Kapillarität. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Porenarten: die Eigenporen, welche sich in den Ausgangsstoffen befinden, und die Haufwerksporen, die bei der Verbindung der Ausgangsstoffe entstehen. Es kann auch zwischen natürlichen und künstlichen Poren unterschieden werden. Haufwerksporen sind ausschließlich natürlich, da sie beispielsweise beim Mörtel oder Beton durch unzureichende Verdichtung entstehen. Hingegen können Eigenporen natürlichen oder künstlichen Ursprungs sein.

Die natürlichen Eigenporen sind stoffspezifisch, etwa Poren in Natursteinen, Schotter, Tonmineralien. Die künstlichen Eigenporen werden durch besondere

Maßnahmen erzeugt, etwa das Material durch Treibgas zu blähen, durch Erwärmung mittels Dampf einen Blähvorgang hervorzurufen oder sehr heißes Material schnell abzukühlen, sodass Luftporen entstehen.



- A: durchgehende Pore
- B: geschlossene Pore
- C: Verbindung
- D: Sackpore
- E: Flaschenhals
- F: Verzweigung

**Abbildung 1.1:**  
Schematische Darstellung – Porenformen und -arten

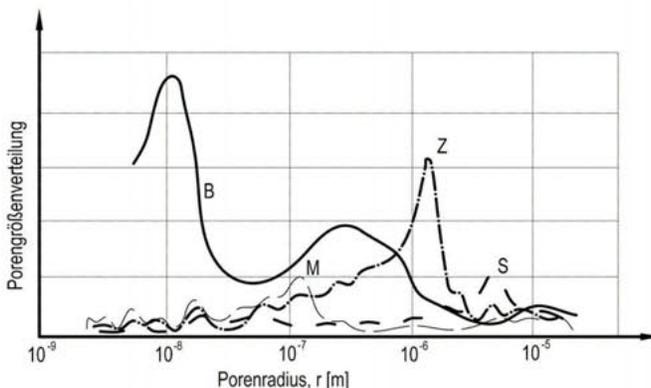
Bezüglich der Porenform bzw. Porengeometrie unterscheidet man zwischen durchgehenden Poren bzw. Kapillarporen, Sackporen, geschlossenen Poren, Verzweigungen, Verbindungen und Flaschenhalsporen.

Der Wassertransport erfolgt bei Kapillarporen bzw. durchgehenden Poren nahezu ungehemmt. Bei durchgehenden Poren mit sehr geringem Durchmesser („effektive“ Kapillarporen) geht der Feuchtigkeitstransport durch Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand vor sich. Die Steighöhe geht dabei über jene hinaus, die dem hydrostatischen Druck entspricht.

Wichtig für die Feuchtigkeitsaufnahme eines Baustoffes sind sowohl die Porengröße als auch der Porenabstand. Ein kapillarer Feuchtigkeitstransport setzt ein entsprechendes Porenvolumen und eine entsprechende Porenform sowie eine Porengröße voraus.

Durchmesser [m]	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
Mikroporen							
Makroporen							
Gelporen							
Kapillarporen							
Luftporen							

**Tabelle 1.2:**  
Porenarten



- Z ... Ziegel
- S ... Sandstein
- M ... Mörtel
- B ... Beton

**Abbildung 1.2:**  
Porengrößenverteilungen nach [92] [41]

Je kleiner der Porenradius, desto größer ist die mögliche kapillare Steighöhe, jedoch desto geringer sind auch die durch die Poren transportierten Flüssigkeitsmengen. In geschlossenen Poren findet kein Feuchtigkeitstransport statt.

Das Unterscheidungsmerkmal für Makro- und Mikroporen in der Physik ist die Tatsache, dass erstere die Fähigkeit besitzen, sich mit Wasser zu füllen, wenn sie einen Radius von mehr als  $10^{-7}$  m aufweisen.

1|3

## Be- und Entfeuchtung

Die Wasserzufuhr von unten und das Ausmaß der Verdunstung beeinflussen die Steighöhe des Wassers, d.h. die Feuchtigkeit steigt so lange, bis zwischen beiden Vorgängen Gleichgewicht eingetreten ist.

Knapen [16] vertrat die Ansicht, dass bei einer gewissen Höhe ein Gleichgewicht bzw. ein Überwiegen der Kohäsion der Flüssigkeit gegenüber der kapillaren Anziehung durch die Porenwände eintrete. Dass dieses Verhältnis zwischen diesen beiden Kräften von der Höhe abhängen soll, ist nicht einzusehen. Das kapillare Aufsteigen der Mauerwerksfeuchtigkeit ist nicht mit dem kapillaren Aufsteigen in Röhren vergleichbar. Das Wasser steigt in den Röhren zufolge behinderter Verdunstung bis zu einer maximalen Höhe und kommt dann zum Stillstand. In den Mauern hingegen findet aufgrund der Verdunstung eine fortwährende Wasserbewegung statt. Des Weiteren ist eine ununterbrochene Wassersäule keineswegs die notwendige Voraussetzung für das Aufsteigen des Wassers. Es genügt, dass die einzelnen Tröpfchen durch die Dampfphase miteinander verbunden sind.

Die Luft an der Mauerwerksoberfläche ist auch bei geringem relativem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebungsluft immer gesättigt. Die Verdunstung ist daher nicht vom Wassergehalt der Mauer, sondern nur von der Größe der feuchten Fläche abhängig. Aus diesem Grund erfolgt die Verdunstung der Mauerwerksfeuchtigkeit, zumindest eine gewisse Zeit lang und unabhängig von den Eigenschaften des Mauerwerks, gleich wie die eines freien Wasserspiegels. Erst nach einiger Zeit, wenn das Wasser in der Oberflächenschicht den Verdunstungsverlust nicht mehr mit der nötigen Geschwindigkeit ersetzt, kommen die verschiedenen kapillaren Eigenschaften des Mauerwerks in der Verdunstungskurve zum Ausdruck.

Früher wurde auch immer wieder versucht, ein Mauerwerk mittels wasserdichter Anstriche trockenenzulegen. Da die Feuchtigkeit aufgrund der dadurch fehlenden Verdunstungsmöglichkeit noch höher steigt, war dies eine Fehlentscheidung. Ebenso wie wasserdichte Anstriche verhindern auch Beläge aus Naturstein oder Keramik die Verdunstung. Bei sehr dichten Steinplattenverkleidungen wurde empfohlen, diese hohl zu legen und den Hohlraum mit Lüftungen zu versehen (nicht vergleichbar mit einem hinterlüfteten Sockel). Diese Maßnahme ist jedoch ebenfalls nicht sinnvoll, da noch zusätzlich die zumindest zeitweise feuchtwarme Innen- oder Außenluft in den Hohlraum eindringt, an der kälteren Mauerwerksoberfläche kondensiert und das Mauerwerk zusätzlich befeuchtet (Bild 1.10). Abbildung 1.3 zeigt die Werbeschrift eines wasserdichten Anstriches,

die fälschlicherweise auf die Möglichkeit der Trockenlegung hinweist und somit die Bevölkerung falsch informierte.

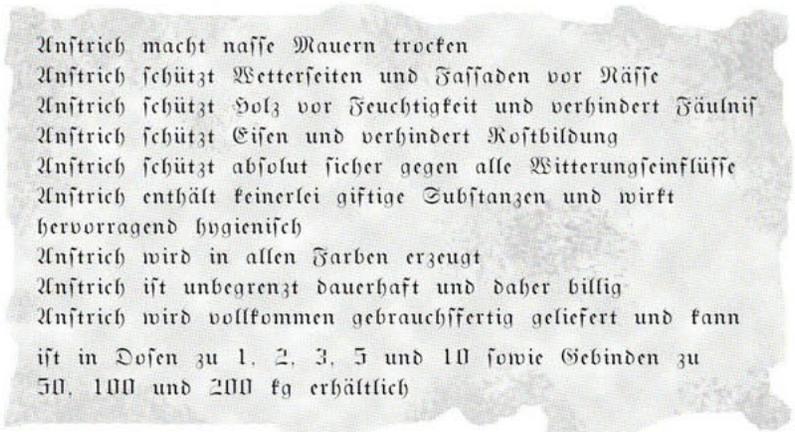


Abbildung 1.3: Werbeschrift eines wasserdichten Anstriches [16]

### Transportvorgänge

Poröse Stoffe können aus ihrer Umgebung Feuchtigkeit in flüssigem oder dampfförmigem Zustand in ihre Hohlräume aufnehmen und dort unter dem Einfluss verschiedenster treibender Kräfte transportieren. Dem Diffusionsstrom des Wasserdampfes, ausgelöst durch ein Partialdruckgefälle, steht der Transport des flüssigen Wassers als so genannte Kapillarleitung aufgrund von adhäsionsbedingten Zugkräften gegenüber.

1|3|1

Tabelle 1.3: Feuchtigkeitstransportmechanismen in Feststoffen

Lösungsdiffusion	Wassermoleküle quasi oder echt gelöst in Flüssigkeit oder Gel. Moleküle des durchwandernden Körpers müssen relativ beweglich sein, z.B. quellbar, aber nicht kristallin.
Wasserdampfdiffusion	Wassermoleküle im Gaszustand in der Luft von Poren. Durchgehende Porenräume erforderlich.
Oberflächendiffusion	Wassermoleküle diffundieren in dünner Schicht auf Porenwandungen. Durchgehende Porenräume erforderlich. Stets mit Dampfdiffusion gekoppelt.
Kapillarität	Flüssiges Wasser fließt in Poren eines Körpers unter der Wirkung seiner Oberflächenspannung. Poren des Körpers durchgehend und wasserbenetzbar.
Sickerströmung	Flüssiges Wasser fließt in den Poren infolge von Druckunterschieden, die Oberflächenspannung ist ausgeschaltet.
Elektrokinese	Flüssiges Wasser strömt unter der Wirkung eines elektrischen Feldes in Poren.

Eine klare Unterteilung in Dampf- und Flüssigkeitstransport ist aber streng genommen aufgrund der Koexistenz von flüssiger und dampfförmiger Phase nicht möglich. Experimente haben gezeigt, dass auch Größe, Art und Form der inneren Hohlräume die Bindung und somit auch den Transportmechanismus der Wassermoleküle beeinflussen. In Festkörpern stellen Feuchtigkeitsverlagerungs-

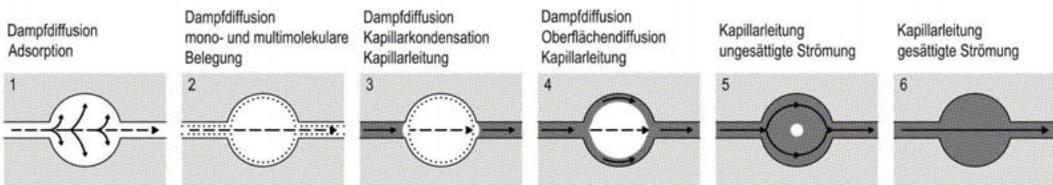
prozesse ein komplexes Gleichgewicht verschiedener Transportvorgänge dar. Phasenübergänge sowie Sorptionsverhalten poröser Stoffe gegenüber Wasserdampf bewirken zudem eine gegenseitige Beeinflussung dieser Transportphänomene.

In Tabelle 1.3 sind die verschiedenen Transportmechanismen in Feststoffen vergleichend gegenübergestellt, ihre Merkmale aufgezeichnet und Beispiele für Materialien, in denen diese Mechanismen häufig anzutreffen sind, angegeben.

Das gleichzeitige Auftreten ganz verschiedener Transportmechanismen hängt in zweierlei Hinsicht entscheidend vom Wassergehalt ab. Einerseits von der Höhe des durchschnittlichen Wassergehaltes und andererseits vom Gradienten des örtlichen Wassergehaltes. Man kann in Abhängigkeit von der Höhe des durchschnittlichen Wassergehaltes eines porösen Stoffes sechs verschiedene Wasseraufnahme- bzw. in umgekehrter Reihenfolge Wasserabgabestadien feststellen.

Es ist praktisch nicht möglich, einen bestimmten Feuchtigkeitsgehalt einem definierten Transportmechanismus zuzuordnen. Besonders undurchsichtig ist der Wassertransport in porösen Stoffen auch vor allem deswegen, da bei Trocknungs- und Durchfeuchtungsprozessen der Wassergehalt von Ort zu Ort wechselt und zudem zeitabhängig ist.

Abbildung 1.4:  
Wasseraufnahmestadien [52]



Die Wasseraufnahmestadien beginnen bei einem trockenen Baustoff bei der Dampfdiffusion und der Feuchtigkeitsaufnahme mittels Adsorption und führen über die Kapillarkondensation und die Oberflächendiffusion bis zur Kapillarleitung mit einer gesättigten Strömung zu einem wassergesättigten Baustoff.

Beim Feuchtigkeitstransport durch das innere Hohlräumssystem spielt der Impulsaustausch für die Art des Transportprozesses eine entscheidende Rolle. Ob die Stöße entweder zwischen Einzelmolekülen oder zwischen Wand und Molekül stattfinden, hängt vom Verhältnis der freien Weglänge  $\lambda$  des Moleküls zum Porendurchmesser  $d$ , der so genannten Knudsenzahl  $K_n$ , ab.

(1.1)

$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$

Wassermoleküle erfahren bei ihrer Bewegung durch die Porenräume untereinander Zusammenstöße, und zwar umso häufiger, je höher der Druck bzw. je höher die Teilchendichte ist. Die Strecke, die ein Teilchen von einem Zusammenstoß bis zum nächsten im Mittel durchläuft, heißt mittlere freie Weglänge  $\lambda$ .

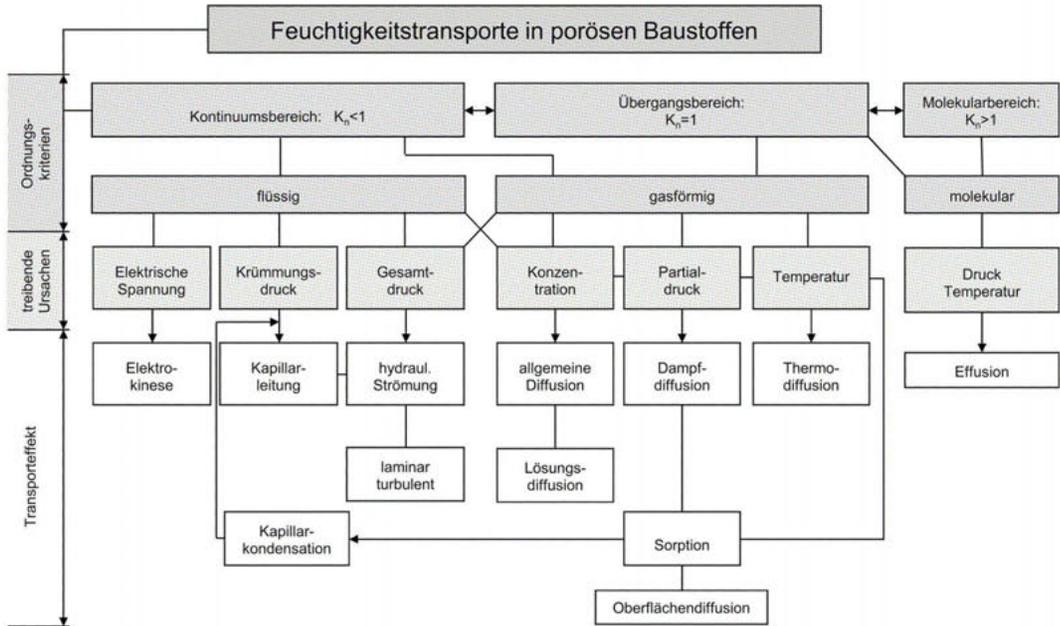
Damit können die Transportmechanismen grundsätzlich drei verschiedenen Bereichen zugeordnet werden:

$K_n \gg 1$  Molekularbereich – Effusion

$K_n = 1$  Übergangsbereich

$K_n \ll 1$  Kontinuumsbereich – Diffusion und/oder laminare Strömung

Abbildung 1.5:  
Feuchtigkeitstransporte in porösen Baustoffen nach [52]



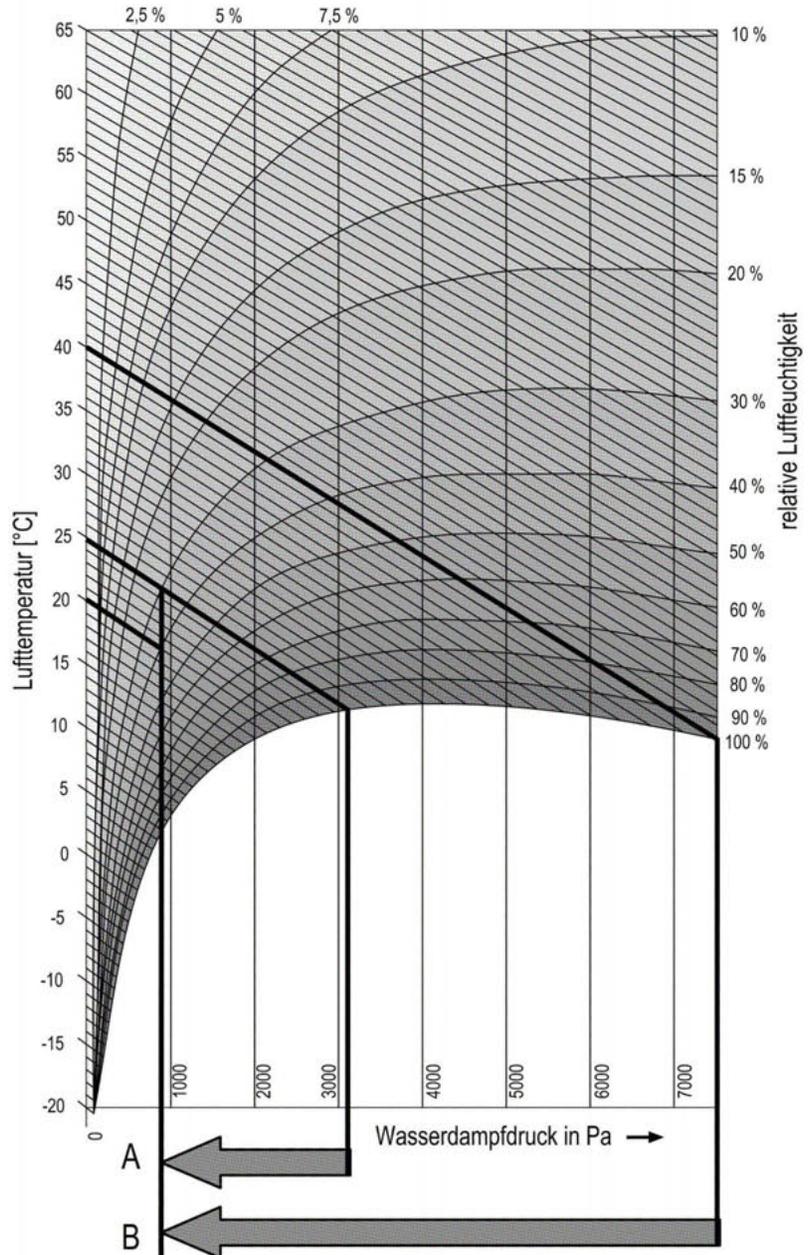
Da die freie Weglänge sowohl von Temperatur als auch Druck abhängt, ändern sich die Knudsenbereiche je nach Zustandsbedingungen. Bei üblichen Umgebungsbedingungen repräsentieren Poren mit  $d$  kleiner als  $10^{-8}$  m den Molekularbereich, Poren zwischen  $10^{-8}$  m und  $10^{-6}$  m den Übergangsbereich und Transporträume größer als  $10^{-6}$  m den Kontinuumsbereich.

Wie viel Feuchtigkeit ein Mauerwerk an die Umgebungsluft abgeben kann, hängt primär vom Wasserdampfdruckgefälle ab. Je größer der Wasserdampfdruck in der Wand und je kleiner der Wasserdampfdruck der Umgebungsluft ist, desto schneller geht die Mauerwerksaustrocknung vor sich. Die Größenordnung der Wasserdampfdruckdifferenz kann aus dem  $i$ - $\chi$ -Diagramm (Abbildung 1.06) entnommen werden. Das Beispiel zeigt, dass durch eine Erwärmung der Wand (Pfeil B) und ohne raumklimatische Maßnahmen ein bis zu drei Mal höheres Wasserdampfdruckgefälle eintritt als bei einer alleinigen Reduktion der Raumluftfeuchtigkeit (Pfeil A).

Beispiel A:      Raumtemperatur 25°C      rel. Luftfeuchtigkeit 30%  
                     Wandtemperatur 25°C      rel. Luftfeuchtigkeit 100%  
                     Dampfdruckgefälle = 3169 – 950 = 2219 Pa

Beispiel B:      Raumtemperatur 20°C      rel. Luftfeuchtigkeit 40%  
                     Wandtemperatur 40°C      rel. Luftfeuchtigkeit 100%  
                     Dampfdruckgefälle = 7380 – 936 = 6444 Pa

Abbildung 1.6:  
i- $\chi$ -Diagramm



Der Trocknungsprozess beginnt mit der Kapillarleitung. In weiterer Folge ist dann nur mehr die Wasserdampfdiffusion für den Feuchtigkeitstransport verantwortlich. Die Abschätzung der ausdiffundierenden Wassermenge kann nach Formel (1.2) erfolgen.

$$q_D = \lambda_D \frac{\Delta p}{d}$$

$q_D$	Wasserdampfstromdichte	[mg/(m <sup>2</sup> · h)]
$\lambda_D$	Dampfleitfähigkeit (für Ziegel 0,100 bis 0,175)	[mg/(m · h · Pa)]
$d$	Wanddicke	[m]
$\Delta p$	Dampfdruckdifferenz	[Pa]

(1.2)

Für die Entfeuchtungsgeschwindigkeit ist es wichtig, dass einerseits die Kapillarausgänge durch geeignete Maßnahmen, etwa durch Abstrahlen der Wandoberflächen mit Aluminiumsilikat, geöffnet werden und andererseits der Wasserdampfübergangskoeffizient und somit auch der Dampfübergang an der Wandoberfläche durch Luftanblasung möglichst groß wird.

Im folgenden Diagramm nach O. Krischer sind die drei Trocknungsperioden mit den zugehörigen Wassertransportmechanismen und qualitativen Verdunstungsgeschwindigkeiten ersichtlich.

- Phase 1:            1-Kapillarleitung, gesättigte Strömung  
                       2-Kapillarleitung, ungesättigte Strömung
- Phase 2:            3-Dampfdiffusion, Oberflächendiffusion, Kapillarleitung  
                       4-Dampfdiffusion, Kapillarkondensation, Kapillarleitung
- Phase 3:            5-Dampfdiffusion, mono- und multimolekulare Belegung  
                       6-Dampfdiffusion, Adsorption

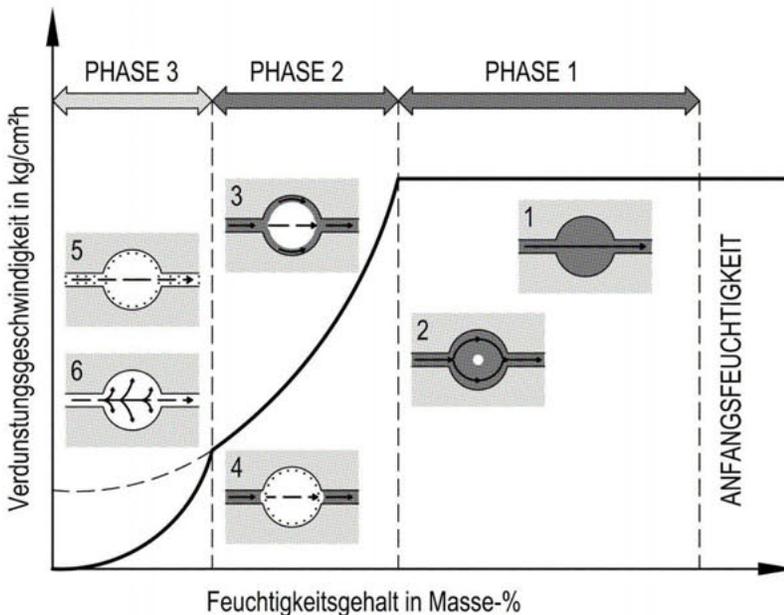


Abbildung 1.7:  
Trocknungsperioden  
nach O. Krischer

Zusammenfassend ergeben sich folgende Grundsätze, die für eine rasche Wandentfeuchtung verantwortlich sind:

- Wasserdampfdruckgefälle möglichst groß
- Wasserdampfübergang an der Oberfläche möglichst groß
- Kapillarausgänge an der Oberfläche müssen geöffnet werden.

1|3|2

### Kapillarkondensation

In feinen Kapillaren kommt es bereits schon unterhalb des Sättigungsdampfdruckes zur Kondensation. Dadurch kann bereits ab relativen Luftfechtigkeiten von 70–80% in einer feinen Kapillare Kondensat ausfallen und sich dadurch die Kapillare mit Wasser füllen. Für den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und Porenradius gilt:

(1.3)

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{R \cdot T \cdot \rho \cdot r}$$

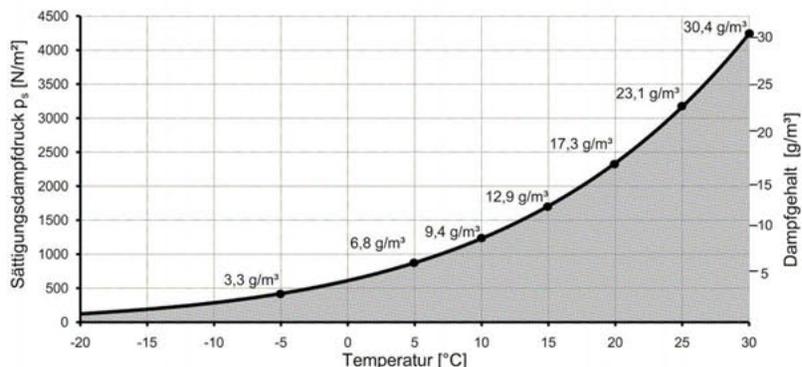
$p$	vorhandener Dampfdruck	[Pa]
$p_0$	Sättigungsdampfdruck	[Pa]
$\sigma$	Oberflächenspannung des Wassers	[N/m]
$r$	Kapillarradius	[m]
$\rho$	spezifisches Gewicht des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$T$	absolute Temperatur	[°C]
$R$	Gaskonstante	[-]
$\alpha$	Benetzungswinkel zwischen Flüssigkeit und Kapillarenwand	~20° [°]

1|3|3

### Kondensation

Grundsätzlich enthält die Luft immer einen gewissen Prozentsatz Wasserdampf. Sie kann aber nur eine bestimmte, von der Temperatur abhängige Wasserdampfmenge (Sättigungsmenge) aufnehmen. Es gibt zwei Gründe, warum es zur Kondensation, d.h. zur Ausscheidung des überschüssigen Dampfgehaltes in Form von flüssigem H<sub>2</sub>O, kommt. Erstens besteht die Möglichkeit, dass bei konstanter Lufttemperatur mehr Wasserdampf zugeführt wird, sodass der Wasserdampfgehalt die Sättigungsmenge erreicht und die Luft das überschüssige Wasser ausscheidet. Die zweite Möglichkeit entsteht, wenn bei konstantem Wasserdampfgehalt die Temperatur reduziert und damit die Taupunkttemperatur erreicht wird.

Abbildung 1.8:  
Abhängigkeit des  
Wasserdampfgehaltes  
von der  
Lufttemperatur



Trifft nun die feuchte Luft auf die Wandoberfläche, wird sie bei einem guten Wärmeleiter schneller, bei einem schlechten langsamer abgekühlt und scheidet Wasser aus, falls die Temperatur unter die Taupunkttemperatur sinkt. Wird die Taupunkttemperatur erst im Mauerwerksinneren erreicht, kondensiert die feuchte Luft erst dort.

Die Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf in Luft ist also von der Temperatur abhängig. So beträgt der maximale Gehalt an Wasserdampf bei 0°C nur 4,8 g/m<sup>3</sup>. Mit zunehmender Temperatur steigt er dann auf 597 g/m<sup>3</sup> bei 100°C an. Unter RELATIVER LUFTFEUCHTIGKEIT versteht man dabei den tatsächlichen Gehalt an Wasserdampf im Vergleich zum maximal möglichen Gehalt bei einer bestimmten Temperatur. Die ABSOLUTE LUFTFEUCHTIGKEIT hingegen gibt die in 1 m<sup>3</sup> Luft enthaltene Wassermenge [g/m<sup>3</sup>] an. Tabelle 1.4 enthält die Taupunkttemperaturen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit, d.h. beispielsweise, dass bei einer Temperatur von 21°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% bei Unterschreiten der Temperatur von 14,2°C der Taupunkt erreicht wird und Kondensat ausfällt. Im Wohnbereich stellen sich in der Regel folgende Werte der relativen Luftfeuchtigkeiten ein:

Wohnräume	40 bis 55%
Schlafzimmer	50 bis 65%
Küchen	55 bis 85%
Badezimmer	65 bis 90%

**Tabelle 1.4:**  
Taupunkttemperaturen  $t_s$  gemäß EN ISO 13788 [230] in Abhängigkeit von Temperatur  $t_L$  und Luftfeuchtigkeit

Temperatur $t_L$ [°C]	relative Luftfeuchtigkeit $\phi$ [%]														
	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	
30	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1	
29	9,7	12,0	14,0	15,9	17,5	19,0	20,4	21,7	23,0	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1	
28	8,8	11,1	13,1	15,0	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,1	24,2	25,2	26,2	27,1	
27	8,0	10,2	12,3	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1	
26	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1	
25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1	
24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1	
23	4,5	6,7	8,7	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2	
22	3,6	5,8	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2	
21	2,8	5,0	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2	
20	1,9	4,1	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2	
19	1,1	3,2	5,1	6,8	8,4	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2	
18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2	
17	-0,7	1,4	3,3	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2	
16	-1,5	0,6	2,4	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2	
15	-2,4	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,0	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2	
14	-3,3	-1,2	0,6	2,3	3,8	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2	
13	-4,1	-2,1	-0,3	1,4	2,8	4,2	5,4	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2	
12	-5,0	-3,0	-1,2	0,5	1,9	3,3	4,5	5,6	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2	
11	-5,9	-3,8	-2,1	-0,5	1,0	2,3	3,5	4,7	5,7	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2	
10	-6,8	-4,7	-3,0	-1,4	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2	

Üblicherweise wird die enthaltene Wasserdampfmenge rechnerisch erfasst durch den so genannten DAMPFDRUCK  $p$  [N/m<sup>2</sup> oder Pa]. Die maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge wird durch den SÄTTIGUNGSDAMPFDRUCK  $p_s$

gekennzeichnet. Gemäß ÖNORM B 8110-2 kann der Wasserdampf-sättigungsdruck auch über nachfolgende Formeln ermittelt werden:

(1.4)

$$p_s = 4,689 \cdot \left( 1,486 + \frac{t}{100} \right)^{12,30} \quad \text{für } -20^\circ \text{C} \leq t < 0^\circ \text{C}$$

$$p_s = 288,68 \cdot \left( 1,098 + \frac{t}{100} \right)^{8,02} \quad \text{für } 0^\circ \text{C} \leq t \leq 30^\circ \text{C}$$

$p_s$	Wasserdampf-sättigungsdruck	[Pa]
$t$	Temperatur	[°C]

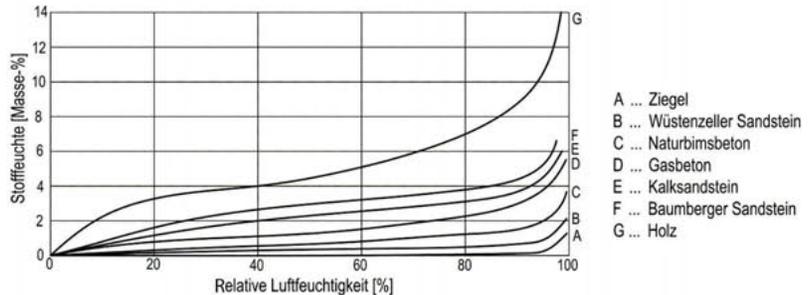
1|3|4

### Adsorption und Absorption

Eine weitere, wenn auch meist nicht ausschlaggebende Art der Feuchtigkeitsaufnahme ist die der ADSORPTION. Dabei dringt das in gasförmigem Zustand befindliche Wasser in die Poren des Mauerwerks ein.

Die Menge des adsorbierten Wassers hängt von der Höhe des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft und von der inneren Oberfläche des Mauerwerks ab. Je höher die Luftfeuchtigkeit und je größer die innere Oberfläche ist, d.h. je mehr Poren vorhanden sind, desto größer die adsorbierte Wassermenge. Allgemein gilt, dass die Adsorption die Aufnahme von Gasen, Dämpfen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche fester Körper ist. Sie beruht auf Molekularkräften. Für sich allein, d.h. ohne andere mitwirkende Feuchtigkeitsquellen, richtet die Adsorption kaum große Schäden an.

Abbildung 1.9:  
Adsorptionsfeuchtigkeiten von Baustoffen nach [73]



Ein ähnlicher Begriff ist die ABSORPTION, bei der ebenfalls Gase oder Dämpfe von festen, aber auch flüssigen Stoffen aufgenommen werden. Im Gegensatz zur Adsorption ist hier die aufgenommene Gasmenge proportional dem Gasdruck anstelle der inneren Oberfläche.

1|3|5

### Wasserdampfdiffusion

Als Wasserdampfdiffusion wird jener Vorgang bezeichnet, bei dem die Wasserdampfmoleküle durch einen Bauteil wandern, und zwar in der Richtung des Dampfdruckgefälles. Die Moleküle wandern vom Ort des höheren Dampfdrucks zum Ort des niedrigeren Dampfdrucks. Die Intensität der Molekülwanderung

hängt vom Dampfdruckgefälle, von der Hohlraumcharakteristik und der Dicke des Bauteiles ab.

Der Kennwert für die Wasserdampfdurchlässigkeit ist der WASSERDAMPFDIFFUSIONSWIDERSTANDSFAKTOR  $\mu$ , welcher eine Stoffkonstante ist. Der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor ist eine Vergleichszahl, die angibt, um wie viel der Diffusionswiderstand eines Stoffes größer ist als jener einer gleich dicken Luftschicht. Er ist daher dimensionslos. Üblicherweise wird aber auch der Diffusionswiderstand, bezeichnet als diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ , als Produkt  $\mu$  mal der Stoffdicke  $d$  angegeben.

$$s_d = \mu \cdot d$$

(1.5)

Material	Diffusionswiderstandsfaktor $\mu$ [-]	Schichtdicke $d$ [mm]	Diffusionswiderstand $s_d$ [m]
Buchenholz	2-70	50	0,10-3,50
Fichtenholz	100-250	25	2,50-6,25
Mauerziegel	6-12	300-900	1,80-10,80
Klinker	380-470	30	11,40-14,10
Kiesbeton	30	200	6,00
Gasbeton	6-10	240	1,44-2,40
Kalkputz	11	25	0,28
Zementputz	19	25	0,48
Kunstharzputz	140	2	0,28
Bitumenpappe 500er	4000-18000	2	8,00-36,00
Heißbitumen	85000-105000	1	85,00-105,00

Tabelle 1.05:  
Diffusionswiderstände verschiedener Baustoffe

Es ist zu erkennen, dass poröse Stoffe wesentlich kleinere  $\mu$ -Werte besitzen als dichte. Vergleicht man z.B. Mauerziegel mit Klinker, so ist das Diffusionswiderstandsverhältnis etwa 1:50. Die Wasserdampfmenge, die tatsächlich durch die betreffende Baustoffschicht diffundiert, kann nach Formel (1.6) berechnet werden.

$$g = \frac{p_1 - p_2}{\frac{R_D \cdot T}{D} (\mu \cdot d \cdot n)}$$

(1.6)

$g$	diffundierender Wasserdampf	[g/(m <sup>2</sup> · h)]
$p_1 - p_2$	Wasserdampfpartialdruckgefälle	[Pa]
$\mu$	Diffusionswiderstand	[-]
$d$	Baustoffdicke	[m]
$n$	Faktor Temperaturkorrektur $\mu$ -Werte (meist vernachlässigbar)	
$R_D \cdot T/D$	Dampfleitzahl der Luft $\sim 1 \cdot 5 \cdot 10^6$ bei 20°C	[Pa · m · h/kg]
$R_D$	Gaskonstante für Wasserdampf	
$T$	Bauteiltemperatur	[°C]
$D$	Diffusionswert des Wasserdampfes	

Weist ein Bauteil zu beiden Seiten unterschiedliche Lufttemperaturen und relative Luftfeuchtigkeiten auf, so kann im Inneren der Taupunkt unterschritten werden, wodurch in diesem Bereich Kondensation eintritt. Wenn auf den einander gegenüberliegenden Oberflächen einer homogenen Wand aus porösem

Werkstoff die gleiche Temperatur herrscht, können die beiderseitigen Wasserdampfpartialdrücke noch so verschieden sein, ohne dass mit einer Kondensatbildung im Inneren der Wand gerechnet werden muss. Der für die Wandtemperatur geltende Sättigungsdampfdruck  $p_s$  liegt in sämtlichen oberflächenparallelen Wandschichten höher als der Partialdruck  $p$ , und zwar selbst dann, wenn die relative Luftfeuchtigkeit auf der einen Wandseite 99% betragen sollte.

Grundsätzlich ist von Bedeutung, wie viel und in welcher Zeit sich Kondensat in der kalten Jahreszeit ansammelt und in der warmen Jahreszeit wieder ablüftet bzw. verdampft, um einen Bauteil beurteilen zu können. Es kommt nur dann zu Schäden, wenn die eingedrungene Wassermenge größer als die abgeführte ist. Die Beurteilung eines Wandquerschnittes hinsichtlich Kondenswassergefährdung und die Dimensionierung einer Dampfsperre sollten immer nach bauphysikalischen Rechenverfahren erfolgen (siehe Baukonstruktionen Band 1: Bauphysik [27]).

1|4

## Kapillarität

Bodenfeuchtigkeit ist stets vorhanden. Entweder in Form von Sickerwasser, Grundwasser oder auch Abwasser (aus schadhafte Kanälen). Da in vielen Fällen bei Altbauten die Feuchtigkeitsabdichtung fehlt bzw., falls vorhanden, entweder unzureichend oder im Laufe der Zeit unwirksam wurde, kann das Bodenwasser ungehindert in den Kellermauern aufsteigen. Die Intensität der Durchfeuchtung hängt natürlich vom Wasserandrang ab. Das Mauerwerk besitzt, gleichgültig ob es aus Ziegel oder Naturstein besteht, eine gewisse Porosität, d.h. eine mehr oder minder große innere Oberfläche, die lebhaft Kapillarerscheinungen auslöst.

Kommt ein Baustoff mit Wasser in Berührung, lagern sich Wasserteilchen an der Oberfläche an, sofern die Adhäsionskräfte zwischen Baustoff- und Wassermolekülen größer sind als die Kohäsionskräfte zwischen den Wassermolekülen selbst. Durch die Adhäsion des Baustoffes und die Oberflächenspannung des Wassers sowie mittels Diffusion, fallweise auch durch die Schwerkraft, gelangt dann das Wasser durch enge Kapillaren in das Innere des Stoffes.

Die kapillare Wasseraufnahme wird im Wesentlichen durch zwei Gesetze beschrieben, die kapillare Steighöhe und die kapillare Sauggeschwindigkeit. Die im Folgenden angeführten Formeln sind nur für den Idealfall, d.h. ohne Berücksichtigung der Flüssigkeitsverdunstung während des kapillaren Aufstieges, gültig.

1|4|1

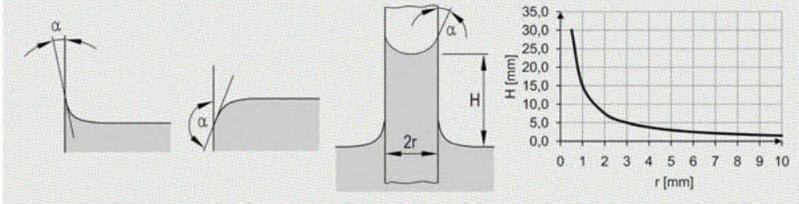
## Steighöhe

Die kapillare Steighöhe  $H$  einer Flüssigkeit hängt von der Oberflächenspannung, dem Benetzungswinkel eines Tropfens, der Dichte der Flüssigkeit, der Erdbeschleunigung und vom Porenradius ab. Die kapillare Steighöhe  $H$  ist dann indirekt proportional dem Kapillarradius und kann wie folgt errechnet werden.

$$H = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{r \cdot \rho \cdot g} \approx \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{r}$$

(1.7)

H	kapillare Steighöhe	[m]
$\sigma$	Oberflächenspannung der Flüssigkeit	[N/m]
$\alpha$	Benetzungswinkel zwischen Flüssigkeit und Kapillarenwand $\sim 20^\circ$	[°]
r	Kapillarradius	[m]
$\rho$	spezifisches Gewicht der Flüssigkeit	[kg/m <sup>3</sup> ]
g	Erdbeschleunigung	[9,8 m/s <sup>2</sup> ]



Beträgt der Kapillarradius  $r < 10^{-8}$  m oder  $r > 10^{-4}$  m, dann ist eine Kapillarität nicht mehr möglich.

### Sauggeschwindigkeit

Die kapillare Sauggeschwindigkeit kann direkt proportional aus dem Kapillarradius ermittelt werden. Je größer die Kapillaren, desto schneller wird Flüssigkeit hinauftransportiert. Für den kapillaren Feuchtigkeitstransport gilt demnach, dass in feinkapillaren Baustoffen eine sehr große kapillare Steighöhe erreicht werden kann und der kapillare Feuchtigkeitstransport sehr langsam vor sich geht. Die kapillare Sauggeschwindigkeit errechnet sich laut Formel (1.8) mit K als Konstante, die sich aus der Gleichung für die Sauggeschwindigkeit ergibt.

$$v = K \cdot r \quad K = \frac{r}{8 \cdot \eta \cdot x} \left( \frac{2 \cdot \sigma}{r} - g \cdot \rho \cdot x \right)$$

1|4|2

(1.8)

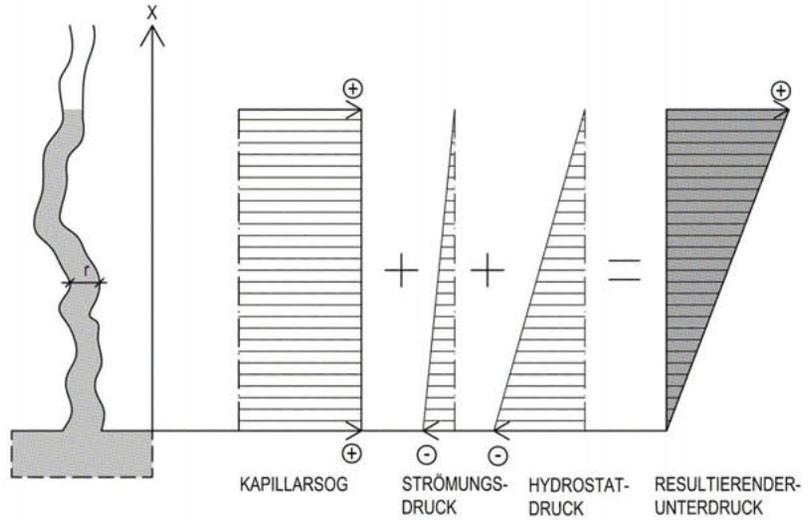
r	Kapillarradius	[m]
x	Steighöhe des Wassers	[m]
$\eta$	Viskosität des Wassers $\sim 10^{-3}$	[N·s/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Oberflächenspannung des Wassers $\sim 72 \cdot 10^{-3}$	[N/m]
$\rho$	spezifisches Gewicht des Wassers = 1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
g	Erdbeschleunigung $\sim 9,8$	[m/s <sup>2</sup> ]

### Kapillardruck

Die Druckverhältnisse in einer Kapillarpore resultieren aus der Überlagerung von Kapillarsog, hydrostatischem Druck und Strömungsdruck. Je dünner die Kapillare, desto höher der Kapillardruck. Dieser Druck wird allerdings nicht erreicht, da das Wasser an die Umgebung der Kapillare immer wieder abgegeben wird und sich im Gleichgewicht zwischen Saugkraft (Levitation) und Verdunstung befindet.

1|4|3

Abbildung 1.10:  
Druckverhältnisse  
in einer Kapillarpore  
nach [2]



1|4|4

### Wasseraufnahmekoeffizient

Die Wassermenge  $W$  [kg/m<sup>2</sup>], die von einem porösen Material aufgenommen wird, das mit Wasser in direktem, drucklosem Kontakt steht, kann vereinfacht abgeschätzt werden mit Formel (1.9).

(1.9)

$$W = w\sqrt{t}$$

$W$	Wassermenge	[kg/m <sup>2</sup> ]
$w$	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m <sup>2</sup> · h <sup>0,5</sup> )]
$t$	Zeit	[h]

Der Wasseraufnahmekoeffizient ist jedoch abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Stoffes und wird in der Praxis am feuchten Baustoff bestimmt.

(1.10)

$$w = \frac{W}{\sqrt{t}}$$

$w$  gibt somit die Steigung der Geraden an, die die Wasseraufnahme beschreibt. Zahlenmäßig können die Grenzen von 2,0 und 0,5 kg/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup> für die Materialeigenschaften wasserhemmend oder wasserabweisend angesetzt werden.

$w \leq 2,0 \text{ kg/(m}^2\text{h}^{0,5}\text{)}$	wasserhemmend
$w \leq 0,5 \text{ kg/(m}^2\text{h}^{0,5}\text{)}$	wasserabweisend

1|4|5

### Wassereindringkoeffizient

Der Wassereindringkoeffizient  $B$  beschreibt die Wanderung der Wasserfront im Baustoff, der Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  im Gegensatz dazu die aufgesaugte Wassermenge bezogen auf die Saugfläche [kg/m<sup>2</sup>] eines Baustoffes beim Eintauchen ins Wasser.

$$x = B \cdot \sqrt{t}$$

x	Abstand zwischen Saugfläche und Wasserfront im Baustoff	[m]
t	Zeit	[h]
B	Wassereindringkoeffizient	[m/h <sup>0,5</sup> ]

(1.11)

## Wasserkapazität

Bei kapillarer Durchfeuchtung des Baustoffes entspricht die Wasserkapazität  $\Phi_K$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] dem maximalen Feuchtigkeitsgehalt. Sie ist im Allgemeinen kleiner als die Sättigungsfeuchtigkeit  $\Phi_s$ , bei der alle Kapillaren und Poren gefüllt sind.

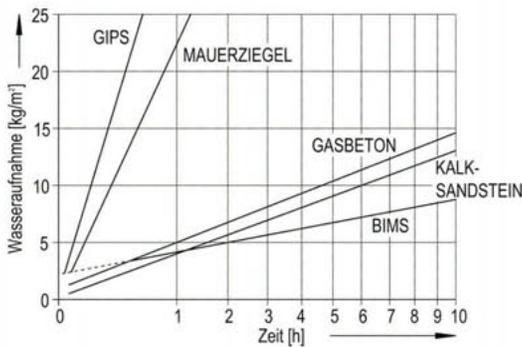


Abbildung 1.11:  
Abhängigkeit der kapillaren Wasseraufnahme von der Zeit nach [25]

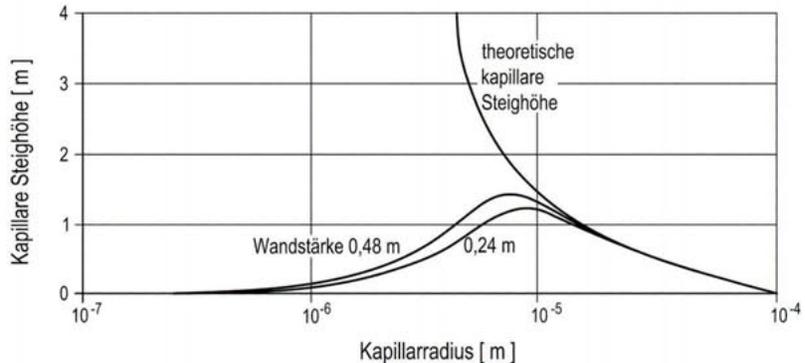
Tabelle 1.6:  
Baustoffkennwerte Wasseraufnahme nach [25]

Material	Rohdichte [ kg/m <sup>3</sup> ]	Wasseraufnahmekoeffizient W [ kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	Wassereindringkoeffizient B [ m/s <sup>0,5</sup> × 10 <sup>-3</sup> ]	Wasserkapazität $\Phi_K$ [ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Sättigungsfeuchtigkeit $\Phi_s$ [ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Vollziegel	1750	25,10	2,24	0,19	0,29
	2175	2,90	0,56	0,09	0,13
Hochlochziegel	1155	8,30	0,73	0,19	0,22
	1165	8,90	0,81	0,18	0,18
Kalksandstein	1635	7,70	0,46	0,27	0,36
	1755	3,00	0,21	0,24	0,34
	1760	5,50	0,42	0,22	0,35
	1795	5,40	0,39	0,22	0,32
	1880	3,20	0,29	0,18	0,27
	1920	3,20	0,26	0,20	0,27
Schwerbeton	2290	1,80	0,22	0,14	
	2410	1,10	0,09	0,19	0,22
Gasbeton	630	4,60	0,28	0,28	0,72
	600	4,20	0,25	0,28	0,71
	530	4,00	0,23	0,29	0,74
	620	6,50	0,38	0,29	0,72
Gipsbauplatten	900	69,00	2,36	0,49	
	600	38,00	1,80	0,36	
Weißkalkputz		7,00			
Kalkzementputz		2,00–4,00			
Zementputz		2,00–3,00			

## Verdunstungseinfluss

Die Verdunstung beruht auf dem Übergang des Wassers von der flüssigen in die gasförmige Phase ohne externe Energiezufuhr. In einem porösen Baustoff beginnt der Vorgang an der Bauteiloberfläche, zu der durch kapillaren Feuchtigkeitstransport aus dem Bauteilinneren Flüssigkeit nachtransportiert wird. Ist die Verdunstungsmenge größer als die kapillar transportierte Flüssigkeitsmenge, verlagert sich die Verdunstungsfront allmählich in das Bauteilinnere.

Abbildung 1.12:  
Zusammenhang  
Kapillarradius –  
Verdunstung [2]



Durch die Überlagerung der Mechanismen des kapillaren Feuchtigkeitsaufstieges, der durch die Kapillare transportierten Flüssigkeitsmenge und der Verdunstung ergibt sich im Mauerwerk ein Gleichgewichtszustand für die Feuchtigkeit im Mauerwerk. Die maximale kapillare Steighöhe des Wassers in einem Baustoff wird dann nahezu erzielt, wenn die Verdunstungsintensität sehr gering ist (Bild 1.9, Bild 1.10, Bild 1.15).

## Auswirkungen

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Flüssigkeit im Mauerwerk immer um eine Salzlösung und nicht um „reines“ Wasser handelt. Die Mauerfeuchtigkeit befindet sich in ständiger, wenn auch sehr langsamer Bewegung, und zwar von unten nach oben. Es kann dabei zwischen zwei Bewegungsarten unterschieden werden: die der Flüssigkeit selbst und die der Wanderung von Salzen innerhalb der Flüssigkeit (Diffusion). Aufgrund dieser Vorgänge findet ein ständiger Austausch statt. Salze gelangen aus dem Boden in das Mauerwerk, vom Mörtel in den Ziegel oder umgekehrt. Das Wasser verdunstet schließlich an der Wandoberfläche, wodurch dort die Salze sichtbar als „Ausblühung“ zurückbleiben. Weiters besteht die Möglichkeit, dass die in der Luftfeuchtigkeit gelösten Salze (z.B. Sulfate) vom Mauerwerk aufgenommen werden.

Im Allgemeinen haben diffundierende Salze das Bestreben, sich möglichst gleichmäßig über den gesamten Feuchtigkeitsbereich auszubreiten. Die Diffusionsströmungen werden aber in Wirklichkeit von den kapillaren Strömungen wesentlich beeinflusst. Dadurch kommt es bei Ziegelmauerwerk zu einer Salzanreicherung in den obersten Teilen der Feuchtigkeitszone, wo sich auch die größten Schäden entwickeln, da die Kapillarströmungen stärker als die Diffu-

sionsströmungen sind. Bei sehr dichten Natursteinen hingegen sind die kapillaren Bewegungen nicht wesentlich stärker als die Diffusionsströmungen. Die Schäden sind daher auf größere Flächen verteilt und nicht so scharf abgegrenzt wie an den Ziegelwänden.

Nachfolgende Faktoren sind für die Schädigung des feuchten Mauerwerks maßgebend:

- Frostsprengung
- Absprengung durch Kristallisations- oder Hydratationsdruck der Salze
- Zerstörung des Mörtels durch Umwandlung in Sulfate und Abfuhr desselben als Ausblüfung
- Begünstigung der Krustenbildung
- Begünstigung der Kondensation
- Begünstigung der Organismen (Hausschwamm)
- Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit.

#### *Ziegelmauerwerk*

Bei Ziegelwänden ist besonders bezeichnend, dass die Zerstörungszone (sichtbare Feuchtigkeitsgrenze) meist ziemlich scharf ausgeprägt ist. Dies nur dann, wenn neben der aufsteigenden Feuchtigkeit nicht andere Feuchtigkeitsquellen (z.B. Kondensation) dazukommen. Verbindet sich aufsteigende Feuchtigkeit mit Kondenswasser, entstehen unregelmäßige feuchte Flecken.

#### *Natursteinmauerwerk*

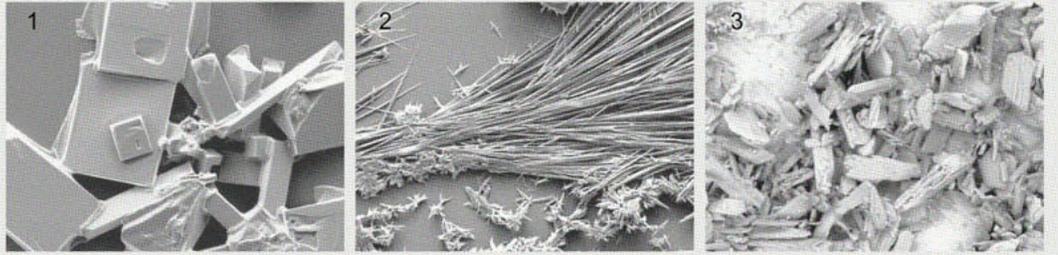
Je nach der Gesteinsgüte kommt es zu verschiedenen schweren Schäden durch aufsteigende Bodenfeuchtigkeit. Bei weichen, porösen Kalksteinen, etwa dem Leithakalk, entsteht meist eine Vielzahl von Krusten, unter denen ein völliges Erweichen mit anschließendem sandigem Zerfall des Gesteins eintritt. Bei dichten Kalksteinen (z.B. Marmor) wird die Politur aufgrund der aufsteigenden Feuchtigkeit matt. Die durchfeuchteten Stellen begünstigen auch das Ansetzen von Staub und Algen. Bei körnigen kristallinen Marmoren ist neben der „Erblindung“ sogar ein Kornzerfall möglich. Die Sandsteine und Granite krusten ebenfalls im Inneren wie die Kalksteine ab.

#### *Mischmauerwerk*

Oft beschränken sich die Zerstörungen beim Mischmauerwerk nur auf eines der beiden Materialien, z.B. den Ziegel. Die Begründung liegt darin, dass erstens die aufsteigende Feuchtigkeit beim Erreichen des besseren Wärmeleiters, also z.B. des Granits, kondensiert und das Kondenswasser vom Ziegel aufgenommen wird und zweitens der Ziegel die Feuchtigkeit seinem Nachbarn wegnimmt. Grundsätzlich kann aber nicht die Regel aufgestellt werden, dass immer nur das poröse Material stärker leidet. Ein poröser Stein verträgt die Salzausblühungen und somit den entstehenden Kristallisationsdruck aufgrund seiner großen Poren und der dadurch bestehenden Möglichkeit der ungehinderten Ausdehnung der Salzkristalle besser als ein dichtes Gestein. Dies gilt allerdings nur, wenn zwei verschiedene Gesteine bei einem Mischmauerwerk zusammentreffen. Bei der Kombination Ziegelstein leidet in der Regel der Ziegel.

## 1|5 Bauschädliche Salze

Beispiel 1.3:  
Salzkristalle  
(1) Chlorid  
(2) Karbonat  
(3) Sulfat



Üblicherweise zeigen sich die Salze, sobald das feuchte Mauerwerk durch Wind und Ausfall feuchter Witterung austrocknet, aber natürlich auch in der Verdunstungszone im Bereich der maximalen kapillaren Steighöhe. Die im Wasser gelösten Salze gelangen aufgrund des Trocknungsvorganges an die Oberfläche und erscheinen dort nach dem Verdunsten des Wassers und der dadurch entstehenden Kristallisation der Salze als Überzug (Bild 1.3, Bild 1.5). Die weißen Salzausblühungen bestehen ihrer chemischen Zusammensetzung nach aus Sulfaten, Chloriden, Nitraten und Carbonaten. Gelbe und grüne Ausblühungen hingegen stammen von Vanadaten- oder Molybdänverbindungen.

## 1|5|1 Salzbildung

Unter Salzen versteht man in erster Linie Umsetzungsprodukte von Säuren und Basen, die unter Bildung von Salzen und Wasser miteinander reagieren. Dabei tritt das Metallion der Base an die Stelle des Wasserstoffions der Säure.

Salze wie  $\text{CaSO}_4$  – Gips,  $\text{MgCO}_3$  – Magnesit,  $\text{CaCO}_3$  – Kalkstein,  $\text{CaSiO}_3$  – Calciumsilikat und  $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$  – Aluminiumsilikate stellen wichtige Rohstoffe unserer Baumaterialien und Bindemittel dar. Sie können nicht als bauschädliche Salze, die hinsichtlich einer Mauerwerksanalytik für eine Mauerwerkstrockenlegung maßgebend sind, bezeichnet werden.

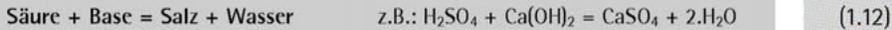
Beispiel 1.4:  
Salzbildung bei Gips

Base	+	Säure	=	Salz
Calcium-Hydroxid gelöschter Kalk	+	Schwefelsäure	=	Calciumsulfat + Wasser Gips
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	+	$\text{H}_2\text{SO}_4$	=	$\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Ca	+	H	=	$\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
OH		SO <sub>4</sub>		
OH		H		

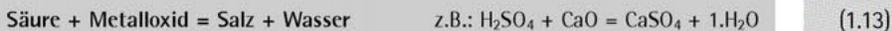
Tabelle 1.7:  
Überblick über die  
wichtigsten Salze  
nach [19]

	Basen						Bezeichnung Salze	
	NaOH Natron- lauge	KOH Kalilauge	Mg(OH) <sub>2</sub> Mg- Hydrox.	Ca(OH) <sub>2</sub> Ca- Hydrox.	Al(OH) <sub>3</sub> Al-Hydrox	NH <sub>4</sub> OH AMM.- Hydrox.		
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Schwefelsäure	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfate	
HNO <sub>3</sub> Salpetersäure	NaNO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Nitrate	
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> Phosphorsäure	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Mg(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Al PO <sub>4</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Phos- phate	
Säuren	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Kohlensäure	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	-	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbo- nate
	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> Kieselsäure	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	MgSiO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	-	Silikate
HF Flusssäure	NaF	KF	MgF <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	Al F <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> F	Fluride	
HCl Salzsäure	NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	Al Cl <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> Cl	Chloride	
H <sub>2</sub> S Schwefel-W.St.	Na <sub>2</sub> S	K <sub>2</sub> S	MgS	CaS	Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-	Sulfide	

Grundsätzlich können die Salze auf verschiedene Arten entstehen. Hauptsächlich jedoch durch folgende Reaktion:



Die Basen entstehen durch Umsetzung von Metalloxiden und Wasser. Dadurch kann man bei der Salzbildung auch von Metalloxiden ausgehen.



Anstelle der Säuren kann man auch von den Nichtmetalloxiden ausgehen, da die Sauerstoffsäuren Hydroxide der Nichtmetalle sind.



Schließlich kann man auch noch anstelle der Metalloxide von den Metallen direkt ausgehen.



Zahlreiche Untersuchungen an den unterschiedlichsten Objekten ergaben eine Vielzahl von Salzen, die als „bauschädlich“ angesehen werden können. Als wich-