

Helmut Künzel

Bauphysik und Denkmalpflege

Helmut Künzel

Bauphysik und Denkmalpflege

2. erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Informationen Der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8047-2

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9450-9

Layout: Dietmar Zimmermann

Lektorat: Susanne Jakubowski

Herstellung: Sonja Frank

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Konrad Triltsch GmbH, Ochsenfurt-Hohestadt

Druck: BELTZ Grafische Betriebe, Bad Langensalza

2. Nachdruck, April 2015

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2009

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

<http://www.baufachinformation.de>

Vorwort zur zweiten Auflage

Immer wieder stelle ich fest, dass bei Feuchteschäden an alten Gebäuden als Ursache viel zu häufig »aufsteigende Feuchte« in die Diskussion gebracht wird, obwohl ich seit mehr als einem Jahrzehnt in Wort und Schrift auf andere Ursachen mit gleichem Erscheinungsbild hinweise. Der Begriff »aufsteigende Feuchte« hat sich offenbar fest in die Vorstellung Vieler eingepägt.

Das Wesentliche und Typische für Feuchteschäden an alten Gebäuden kann aber am Treffendsten durch den Begriff »Feuchte-Akkumulation« beschrieben werden, die sich auf Grund der hygrothermischen Verhältnisse in alten Gebäuden einstellt. Diese Problematik setze ich deshalb mit eingehenden Begründungen und Erläuterungen an den Anfang der zweiten Auflage meines Buches.

Als zweite Schadensursache ist »Feuchteerhöhung durch Mauersalze« zu nennen und schließlich kommt »Feuchteerhöhung durch kapillare Wasseraufnahme« in Betracht, wozu auch die »kapillar aufsteigende Grundfeuchte« gehört.

Auf diese Ursachen sind alle auf erhöhte Mauerfeuchte bei Gebäuden auftretenden Schäden zurückzuführen, wobei die beiden ersten Schadensgruppen in der Regel nur bei alten Gebäuden zu finden sind.

Die übrigen Kapitel des Buches blieben unverändert, mit Ausnahme von Ergänzungen und Erweiterungen.

Im Sommer 2009

Helmut Künzel

Vorwort zur ersten Auflage

Die Bauphysik hat sich als Disziplin der Technischen Wissenschaften im Zuge des Wiederaufbaus nach dem Zweiten Weltkrieg etabliert. Die Anwendung neuer Baumaterialien, Dämmstoffe, Beschichtungen sowie neuer Baukonstruktionen und Baumethoden machte es notwendig, sich mit den physikalischen Vorgängen in den verschiedenartigen und oft mehrschichtigen Baukonstruktionen eingehender zu befassen.

Von diesen Entwicklungen im Neubau hatte die Altbausanierung und Denkmalpflege zunächst wenig Nutzen. Zwar sind auch hier neue Methoden entwickelt und neue Sanierungsmöglichkeiten angeboten worden, aber es fehlte an begleitenden Untersuchungen und wissenschaftlichen Bewertungen der neuen Möglichkeiten. Die Denkmalpfleger haben deshalb meist die alten und bewährten Methoden angewandt und haben sich gegenüber Neuerungen eher skeptisch gezeigt.

Heute ist die Situation anders. Durch den Rückgang des Neubaus befassen sich Forschung und Entwicklung mehr mit den Problemen des Altbaus. Zum anderen sind die Kenntnisse und Erfahrungen in der Bauphysik auf einem Stand angelangt, der es ermöglicht, die Anwendbarkeit und Auswirkung moderner Maßnahmen zutreffend zu bewerten. Die Experimentierzeit ist vorbei und die Übertragung bewährter Maßnahmen aus dem allgemeinen Bauwesen auf den Altbau und auf denkmalgeschützte Objekte ist gerechtfertigt. Die bauphysikalischen Erkenntnisse sind für Neubau und Altbau gleichermaßen gültig!

In den folgenden Ausführungen berichte ich über Forschungsergebnisse und Erfahrungen, die ich als Leiter der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und auch in der folgenden Zeit gewonnen habe. Die behandelten Themen entsprechen meinen hauptsächlich fachlichen Aktivitäten in den letzten Jahrzehnten. Ich wurde dabei von wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern des Instituts tatkräftig unterstützt: Herr Dieter Holz führte im Rahmen des Projektes »Kirchenheizung« mit vielen Messfahrten Untersuchungen in der gesamten Bundesrepublik durch und Frau Evelin Faßheber übernahm die mühsamen Auswertungen der damals gewonnenen Thermohygrografen-Aufzeichnungen. Anschließend lagen in den Händen von Herrn Theo Großkinsky und Herrn Hans Gottschling, wobei durch inzwischen verwendete Daten-Logger Meßwerterfassung und Auswertung deutlich komfortabler waren. Die Herren Werner Conrad und Ralf Kilian waren mir bei der Aufbereitung und Zusammenstellung der vielen Fotos eine große Hilfe. All diesen und weiteren, hier nicht namentlich genannten Helfern aus dem Institut möchte ich auch an dieser Stelle herzlich danken. Schließlich gilt mein Dank den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des IRB-Verlags für die angenehme Zusammenarbeit und für gute Anregungen in der Buchgestaltung.

Im Sommer 2006

Helmut Künzel

Inhaltsverzeichnis

Kapitel I – Feuchte Mauern

1	Feuchte-Akkumulation in Gebäuden alter Bauart	11
1.1	Luftfeuchte und Materialfeuchte	11
1.2	Tauwasserbildung und Verdunstung	12
1.3	Temperatur- und Feuchteverhältnisse in unbeheizten und intermittierend beheizten Gebäuden	14
1.4	Tauwasserbildung	17
1.4.1	Winterkondensation	17
1.4.2	Sommerkondensation	19
1.5	Der »bleibende Feuchtegehalt« in Gebäudewänden alter Bauart	20
1.6	Abhilfe und Beispiele aus der Praxis	21
1.6.1	Winterkondensation	21
1.6.2	Sommerkondensation	24
1.6.3	Abhilfe in beiden Fällen (Winter- und Sommerkondensation)	27
1.7	Vergleich mit heutigen Verhältnissen und Folgerungen	27
2	Herkunft und Wirkung von hygroskopischen Mauersalzen	29
2.1	Herkunft der Mauersalze	29
2.1.1	Frühere hygienische und sanitäre Verhältnisse	30
2.1.2	Entstehen und »Schürfen« von Mauersalpeter	35
2.1.3	Andere Salpetergewinnung	37
2.1.4	Weiterverarbeitung	37
2.1.5	Abschließende Überlegungen	40
2.2	Wirkung von Mauersalzen	41
2.2.1	Feuchteerhöhung – Begriffsdefinitionen und Beurteilung	41
2.2.2	Mauerschäden	45
2.3	Abhilfe und Beispiele aus der Praxis	46
2.4	Folgerungen	57
3	Feuchteerhöhung durch kapillare Wasseraufnahme	58
3.1	Kapillar aufsteigende Grundfeuchte	58
3.1.1	Frühere Untersuchungen	58
3.1.2	Neuere Untersuchungen	59
3.1.3	Erfahrungen und Ergebnisse aus der Praxis	62
3.1.4	Abhilfe und Beispiele aus der Praxis	64
3.1.5	Folgerungen	68
3.2	Regenfeuchte	68

3.2.1	Mechanismus des Feuchtetransport	68
3.2.2	Frühere Wandkonstruktionen	70
3.2.3	Heutige Wandkonstruktionen und Regenschutzanforderungen	71
3.2.4	Beispiel eines Schadens und Abhilfe	71
3.2.5	Folgerungen	73

Kapitel II – Heizen und Temperieren

1	Einleitung und Begriffsdefinitionen	75
2	Beheizen von Kirchen	75
2.1	Einfluss von Baumasse und Undichtheiten	76
2.2	Heizbetrieb und Raumklima	78
2.3	Lufttemperatur und Luftströmungen	83
2.4	Beispielhafte Sanierung: Salinenkapelle St. Rupert	84
3	Temperierung nach Großschmidt	90
3.1	Behauptete Funktionsweise und kritische Stellungnahme	91
3.2	Praktische Erfahrungen	92
3.2.1	Bauteiltemperierung/Feuchteschutz	92
3.2.2	Raumtemperierung/Heizenergieverbrauch	92
3.2.3	Raumheizung/Heizenergieverbrauch	93
3.3	Beurteilung und Folgerungen	93
3.4	Zweckmäßige Anwendung der Wandheizung	95
4	Folgerungen	95

Kapitel III – Fachwerk – eine historische Konstruktion

1	Bau- und Wohnverhältnisse in der Vergangenheit	97
1.1	Früheres Bauen	97
1.2	Früheres Wohnen	98
1.3	Regenschutz	99
1.4	Folgerungen für den Bauerhalt	99
2	Heutige Bau- und Wohnverhältnisse	100
3	Instandsetzen und Renovieren von Fachwerkbauten	101
3.1	Gefachdämmung	101
3.2	Außendämmung	102
3.3	Innendämmung	103

3.3.1	Wohnfeuchte	103
3.3.2	Regenfeuchte	105
4	Feuchtetechnische Eigenschaften von Holz	106
4.1	Wasseraufnahme und Quellen	106
4.2	Wasseraufnahme und Trocknen	107
5	Beispielhafte Schadensfälle	111
5.1	Putzablösung am Gefachrand	111
5.2	Fehlende Dampfbremse	111
5.3	Hydrophobierung	112
5.4	Luftschicht und Belüftung	113
6	Beurteilung und Folgerungen	114

Kapitel IV – Putze und Putztechnologie

1	Empirische Techniken und Regeln	117
1.1	Putze als äußerer Mauerabschluss	117
1.2	Eine neuere Regel	117
1.3	Putznormen von 1955 und 1967	118
1.4	Putznormen von 1985 und folgende	119
2	Werkmörtel und Putzsysteme	120
2.1	Werkmörtel statt Baustellenmörtel	120
2.2	Wasserabweisende Putzsysteme	120
2.3	Wärmedämmputzsysteme	122
2.4	Leichtputze	122
2.5	Sanierputzsysteme	122
2.6	Wärmedämmverbundsysteme	123
3	Weiterentwicklung der Putztechnologie	125
3.1	Verschiedene Putzfunktionen	125
3.2	Kenngrößen für Putze	126
3.3	Neue Prüfmethode	127
4	Anwendungen in der Denkmalpflege	128
4.1	Historische und moderne Putze	128
4.2	Die Verwendung von Zement und Zusatzmitteln	129
4.3	Ausführungsbeispiele	130
4.3.1	Konservierende Instandsetzung einer Kirchenfassade	130
4.3.2	Außenputz auf ungleichem, altem Mauerwerk	134
4.3.3	Außenputz mit Kalk als Bindemittel	134

4.3.4	Außenputz als Regenschutz	136
4.3.5	Zusatzdämmung mit einem WDV-System	137
5	Folgerungen	139

Kapitel V – Denkmalschutz

1	Konservieren und Restaurieren	141
2	Renovieren oder Sanieren	141
3	Rekonstruieren	143
4	Früheres Bauen und heutiges Wissen und Können	143

	Literaturhinweise	145
--	--------------------------	------------

	Sachregister	147
--	---------------------	------------

Kapitel I – Feuchte Mauern

Feuchte Mauern sind oft ein Problem bei Gebäuden alter Bauart. Das sind Gebäude mit dicken Mauern und großer Wärmespeicherfähigkeit, die nicht oder nur zeitweilig (intermittierend) beheizt werden. Häufig beeinflussen auch Salze die Mauerfeuchte. Als Schadensursache wird in solchen Fällen oft »aufsteigende Feuchte« diagnostiziert. In Wirklichkeit sind aber die anderen hygrothermischen Verhältnisse im Vergleich zu unseren heutigen wärmegeprägten und nach bauphysikalischen Gesichtspunkten konzipierten Gebäude die Hauptursache für die Feuchteverhältnisse bei alten Bauten.

1 Feuchte-Akkumulation in Gebäuden alter Bauart

1.1 Luftfeuchte und Materialfeuchte

Zwei Grundeigenschaften sind für die Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Gebäuden, vor allem alter Art, von entscheidender Bedeutung, nämlich die Luftfeuchte und die hygroskopische Materialfeuchte von porösen Stoffen, zu denen im Allgemeinen die üblichen Baustoffe zählen. Zu beachten ist dabei, dass der von der Luft aufnehmbare Wasserdampf von deren Temperatur abhängt und die durch Absorption von Wasserdampf aus der Luft in Baustoffen angereicherte sog. »hygroskopische Feuchte« von der relativen Luftfeuchte. In den Bildern 1 und 2 sind die Abhängigkeiten dargestellt, aus denen hervorgeht, dass sich die Aufnahme von Wasserdampf in porösen Stoffen um Größenordnungen von der

in der Luft unterscheidet. Während in Luft von 20 °C und 50 % rel. Feuchte gerade etwa 8 g/m³ Wasserdampf enthalten sind, sind es bei Sandsteinen 2 Vol.-% = 20 kg/m³ oder 20.000 g/m³. Der enorme Unterschied gilt allerdings für stationäre Verhältnisse, d. h., wenn sich in einem Baustoff ein gleichbleibender Sorptionsfeuchtegehalt für die jeweilige Luftfeuchte eingestellt hat. Dies kommt aber unter praktischen Bedingungen selten vor. Zwar können sich die relativ frei beweglichen Wasserdampfmoleküle in einem Luftvolumen bei Feuchteänderungen rasch gleichmäßig verteilen, nicht aber in einem Baustoff, in dem der materialtypische Diffusionswiderstand einem Ausgleich entgegenwirkt. Für die praktischen Verhältnisse ist es aber entscheidend, wie rasch sich Änderungen der rel. Luftfeuchte auf die Feuchte des Materials auswirken, das unmittelbar an die Luft grenzt. Hierüber geben die Messergebnisse in Bild 3 Auskunft. In diesem Bild sind flächenbezogene Änderungen (in g/m²) der aus der Umgebungsluft absorbierten bzw. desorbierten Feuchte bei Änderung der rel. Luftfeuchte von 40 % auf 80 % und umgekehrt wiedergegeben. Bedenkt man, dass der absolute Feuchtegehalt der Luft bei einer Änderung der rel. Feuchte von 40 % auf 80 % nur um 7 g/m³ zunimmt, dann ist der Einfluss der Wasserdampfsorption auch unter instationären Bedingungen als sehr groß zu bewerten. Dabei ist es wichtig, dass nicht nur die unmittelbare Oberflächenschicht, sondern auch tiefere Schichten an dem Sorptionseffekt beteiligt sind. Dies ist z. B. in Bild 3 an dem Kurvenverlauf »Tapete al-

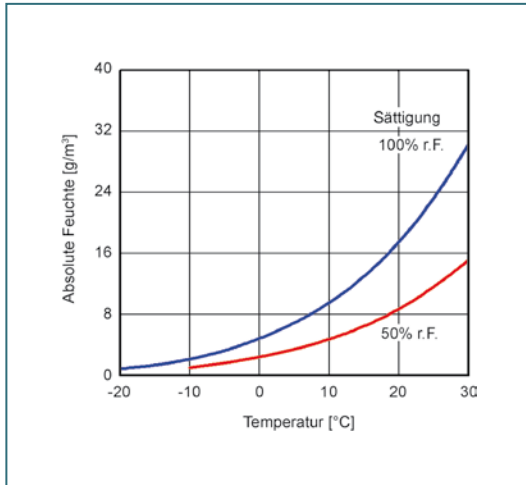


Bild 1: Zusammenhang zwischen der absoluten Feuchte der Luft bei Sättigung (100% relative Feuchte) und bei 50% relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur.

lein« (aufgebracht auf eine Metallplatte) und Tapete auf Weißkalkputz bzw. auf Kalkzementputz zu erkennen. Die Eigenschaften der jeweiligen Putze beeinflussen die Sorption deutlich, wobei es interessant ist, dass der im Allgemeinen besser saugende Kalkputz (gegenüber flüssigem Wasser) eine geringere Wasserdampf-Absorptionsfähigkeit hat als der dichtere Kalkzementputz.

Die unterschiedliche Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf durch die Raumluft und durch poröse Stoffe kann durch folgende Abschätzung verdeutlicht werden: Ein Raum mit 4 m × 5 m Grundfläche und 2,5 m Höhe hat ein Volumen von 50 m³. Wenn die rel. Raumluftfeuchte von 40% auf 80% erhöht wird, dann steigt der Feuchtegehalt des Raumluftvolumens um insgesamt 50 × 7 = 350 g. Von 45 m² der Wandfläche mit

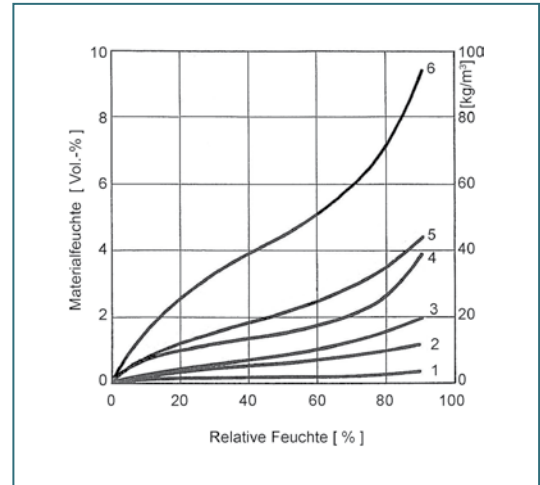


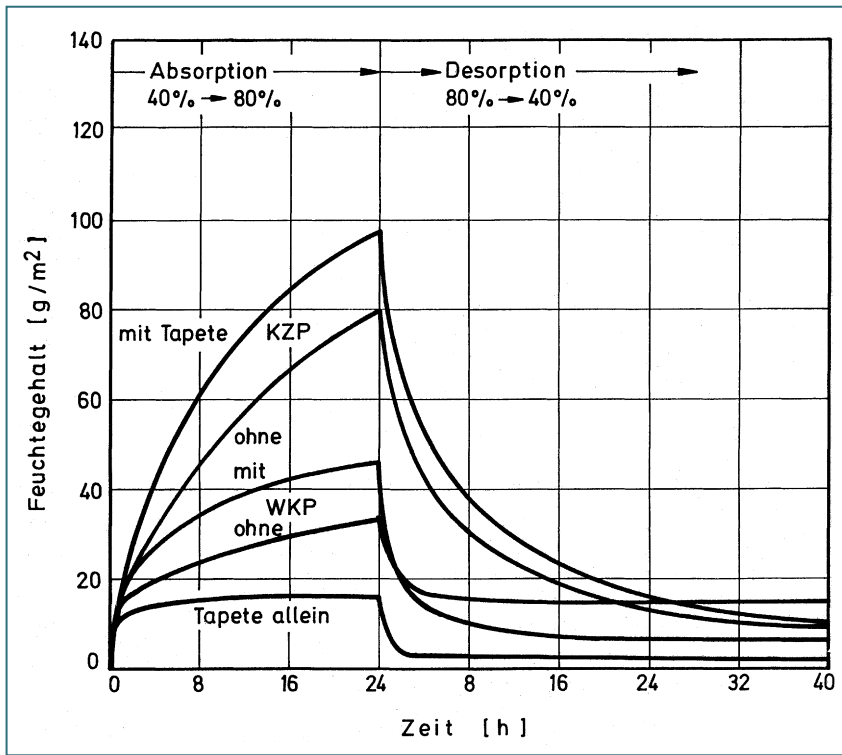
Bild 2: Zusammenhang zwischen der Sorptionsfeuchte verschiedener Baustoffe und der relativen Luftfeuchte bei 20 °C (Ordinate links in Vol.-% und rechts in kg / m³).

- 1: Vollziegel 1720 kg / m³
- 2: Wüstenzeller Sandstein 2300 kg / m³
- 3: Naturbimsbeton 670 kg / m³
- 4: Porenbeton 500 kg / m³
- 5: Kalksandvollstein 1740 kg / m³
- 6: Holz (Fichte) 430 kg / m³

Kalkputz ohne Fenster (2 × (4 + 5) × 2,5) werden unter den gleichen Bedingungen nach Bild 3 innerhalb 4 Stunden rund 45 × 20 = 900 g Wasser absorbiert, wobei die Absorption von Fußboden, Decke und Textilien noch hinzukommt. Dies zeigt, dass bei hygrothermisch instationären Vorgängen die Raumluftfeuchte durch die Sorptionseigenschaften der angrenzenden Stoffe entscheidend beeinflusst wird.

1.2 Tauwasserbildung und Verdunstung

Wenn die Temperatur einer Wandoberfläche gleich oder niedriger ist als die Taupunkttem-

**Bild 3:**

Wasserdampf-Absorption von Kalkzementputz (KZP) und Weißkalkputz (WKP) ohne und mit Raufasertapete sowie von der Tapete allein (aufgeklebt auf Metallplatte) bei Änderung der relativen Luftfeuchte von 40% auf 80% und anschließende Desorption bei Absenken der Luftfeuchte von 80% auf 40% (Messung an Proben im Klimaraum)

peratur der angrenzenden Luft, bildet sich an dieser Oberfläche Tauwasser. Ist hingegen die Oberflächentemperatur höher als die Taupunkttemperatur der Luft, dann kann überschüssige Feuchte an die Luft abgegeben werden. Die dadurch bedingten Vorgänge der Befeuchtung und Verdunstung sind bekannte Tatsachen. Die damit zusammenhängenden energetischen Effekte werden allerdings weniger berücksichtigt. Bei der Tauwasserbildung, also dem Übergang von der gasförmigen in die flüssige Phase des Wassers, wird Wärme freigesetzt und im umgekehrten Fall - der Verdunstung - muss Wärme zugeführt werden. Durch Nicht-Erfüllung der energetischen Erfordernisse können die Vorgän-

ge der Verdunstung bzw. der Tauwasserbildung reduziert bzw. blockiert werden.

Wenn z.B. keine Wärme zur Verdunstung von außen zugeführt wird, dann unterkühlt die verdunstende Fläche (Verdunstungskühlung) bis der Taupunkt der Luft erreicht ist und die Verdunstung zum Stillstand kommt. Umgekehrt erwärmt sich die betaute Fläche durch die abgegebene Latentwärme des Wasserdampfes bis der Taupunkt erreicht ist und dann keine weitere Taubildung mehr auftritt. Die Temperaturverhältnisse allein - Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur - ermöglichen somit keine zutreffende Beurteilung.

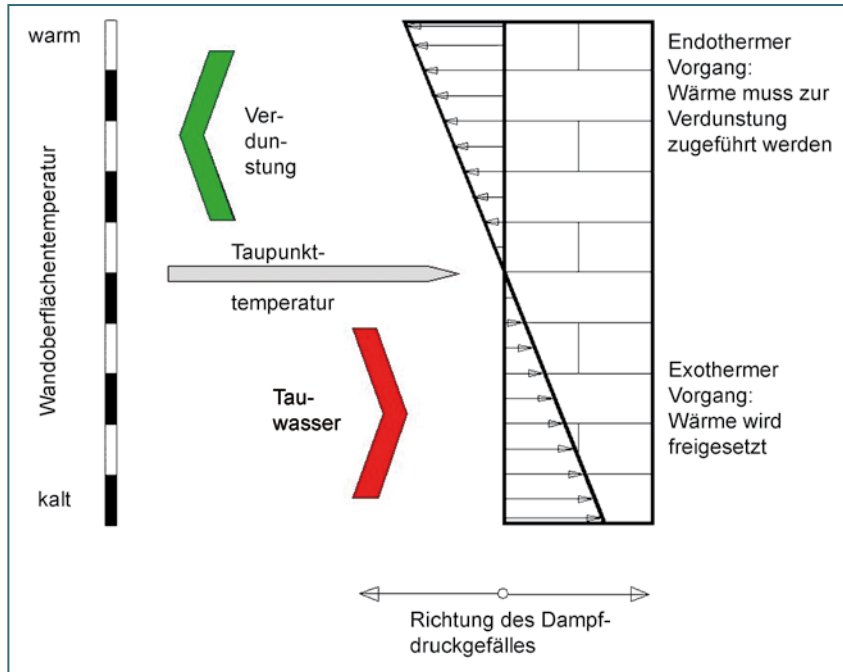


Bild 4: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wandtemperatur und Tauwasserbildung bzw. Verdunstung. Je größer der Abstand zwischen Wandtemperatur und Taupunkttemperatur ist, desto größer sind die umsetzbaren Feuchtemengen, wobei aber die energetischen Randbedingungen mitbestimmend sind.

Diese physikalischen Zusammenhänge werden durch die Schemadarstellung in Bild 4 erläutert. Tauwasserbildung ist ein exothermer Vorgang, bei dem Wärme freigesetzt wird, wogegen bei Verdunstung als endothermem Vorgang Wärme zugeführt werden muss. Je größer die Differenz zwischen Taupunkttemperatur und Oberflächentemperatur ist, desto größer sind die umsetzbaren Feuchtemengen bzw. Energien. Tauwasserbildung ist bei alten Gebäuden gewissermaßen »leichter« möglich als Verdunstung, zu der eine gezielte Wärmezufuhr erforderlich ist. Diese physikalischen Gegebenheiten sind – wie noch dargelegt wird – entscheidend für die Feuchteverhältnisse in alten Gebäuden.

1.3 Temperatur- und Feuchteverhältnisse in unbeheizten und intermittierend beheizten Gebäuden

In früheren Jahrhunderten war die Statik eines Gebäudes der vorrangige Gesichtspunkt. Die Wärmedämmung der Außenbauteile im Hinblick auf das Heizen und das Raumklima war demgegenüber sekundär. Repräsentative Gebäude wurden meist aus stabilen, dicken Wänden erbaut, die somit eine große Wärmespeicherfähigkeit haben.

Bei unbeheizten Gebäuden, wie z. B. Kirchen, ist das Raumklima im Winter und Sommer vom Außenklima abhängig, also von der Außenlufttem-

peratur und insbesondere von der Besonnung. Die besonnten Außenwände erwärmen sich und geben die Wärme an den angrenzenden Innenraum ab. Entsprechend der Wärmespeicherfähigkeit des gesamten Baukörpers hinkt die mittlere Raumlufttemperatur langfristig gegenüber der Außenlufttemperatur mehr oder weniger nach (Phasenverschiebung). Eine Erwär-

mung durch Sonneneinstrahlung über Fenster war bei den meist kleinen und einfachverglasten Fensterflächen demgegenüber gering. Bei zeitweiliger, intermittierender Beheizung – wie z.B. in Kirchen am Wochenende – erfolgt die Erwärmung rascher, wird aber ebenso durch die Wärmespeicherfähigkeit des Baukörpers beeinflusst.

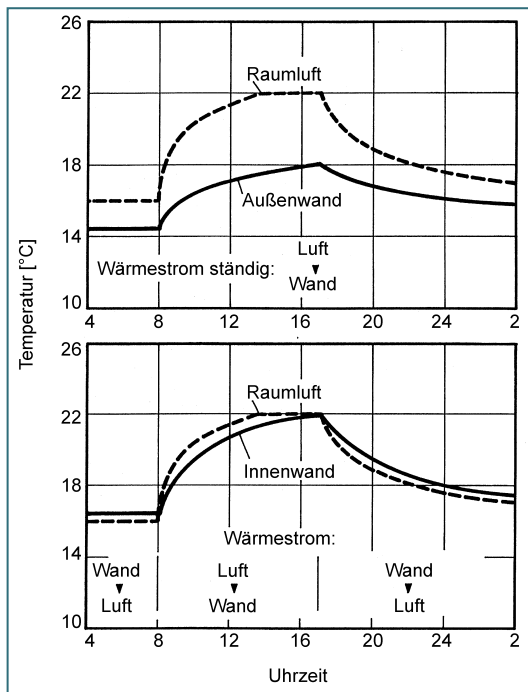


Bild 5: Temperaturverläufe beim Aufheizen und Auskühlen eines Büroraums bei etwa 0 °C Außenlufttemperatur oben: Raumluft und Außenwand (schwere Bauart, $k = 1,0 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$)

unten: Raumluft und Mittelwert von drei Innenwänden (Leichtbeton, 15 cm dick)

Bei der Außenwand fließt ständig der Wärmestrom von der Raumluft nach außen. Die Innenwände nehmen in der Heizphase Wärme auf und geben sie in der Auskühlphase wieder an die Raumluft zurück.

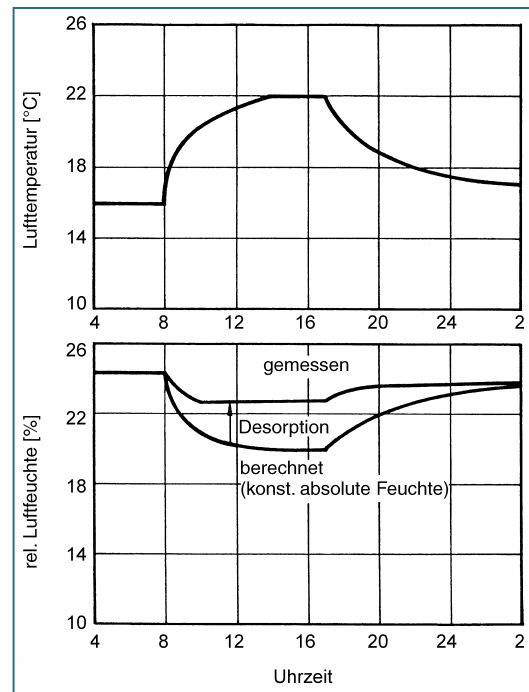


Bild 6: Verläufe der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte beim Aufheizen und Auskühlen eines Raumes bei etwa 0 °C Außenlufttemperatur. Mit der Erwärmung der Raumluft sinkt deren relative Feuchte. Dies bewirkt eine Feuchteabgabe von den Raumboflächen an die Raumluft infolge Wasserdampf-Desorption. Dadurch ist der Unterschied zwischen dem berechneten Verlauf der relativen Feuchte unter Annahme konstant bleibender absoluter Feuchte und dem gemessenen Verlauf bedingt. In der anschließenden Aufheizphase setzt wieder Absorption ein, wodurch der Verlauf der relativen Feuchte insgesamt ausgeglichener wird (Pufferwirkung durch Sorption).