
Tauwasser und
Feuchtigkeit
im Mauerwerk
Peter Rauch PhD
ISBN 978-3-00-036810-3

Herausgeber:
Dipl.-Ing.oec. Dipl.-Betrw.(FH), Ing. Peter Rauch Ph.D.

© Ingenieurbüro Peter Rauch,
Bucksdorffstr.28, D- 04159 Leipzig,
Tel./Fax. 0341/9015382
www.ib-rauch.de , Email: info@ib-rauch.de
ISBN 978-3-00-036810-3 11/2011

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch zu kopieren. Teile daraus dürfen entsprechend den üblichen Zitatregeln ohne Zustimmung kopiert werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Grundlagen
1.1. Einleitung
1.2. Wie funktioniert die Diffusion und was versteht man darunter?
1.3. Die Sorption oder Wasserdampfaufnahme (Adsorption und Kapillarkondensation)
1.4. Die Beschreibung des s_d-Wertes (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke)
1.5. Der Feuchtetransport durch Kapillare
2. Das Feuchteverhalten poröser Baukonstruktionen
2.1. Die Feuchtebelastung mineralischer Baustoffe
2.2. Der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitung
2.3. Der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und einer möglichen Durchfeuchtung der Bauteiloberfläche
2.3.1 Die Oberflächentemperatur
2.3.2. Der Einfluss der Feuchte auf das Wärmespeichervermögen eines porösen Baustoffs
2.4. Die Tauwasserbildung im Wandwinkel der Außenwand
2.5. Die Wärmekonvektion und die Einflussnahme auf die den Feuchtetransport
2.6. Der Einfluss der Wärmestrahlung auf die Temperatur der Bauteiloberfläche und das Trocknungsverhalten von porösen Baustoffen
3. Der Feuchtigkeitstransport an den Bauteiloberflächen und in der Baukonstruktion
3.1. Feuchtigkeitseigenschaften und -austausch der Baustoffe mit der Umgebung
3.2. Die Tauwasserbildung und die Durchfeuchtung massiver Bauteile
3.3. Feuchteschäden im Erdgeschoss und in Kellerräumen
3.4. Tauwasserbildung hinter einer Innendämmung
4. Trocknung von feuchten Bauteilen
4.1. Probleme beim feuchten Mauerwerk

4.2. Vertikale Verfahren zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes
4.3. Übersicht zu horizontalen Verfahren zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes
4.3.1. Übersicht zu mechanischen Verfahren
4.3.1.1. Abschnittsweises Aufstemmen per Hand
4.3.1.2. Abschnittsweises Aufsägen
4.3.1.3. Mauertrennung durch schrägen Trennschnitt, maschinell
4.3.1.4. Das maschinelle Einschlagen von Edelstahlblech
4.3.1.5. Die Unterfangungsverfahren
4.3.2. Querschnittsabdichtung durch drucklose und druckbehaftete Injektionsverfahren
4.3.3. Elektrophysikalische bzw. elektrokinetische Verfahren zur Mauertrocknung und Entsalzung
4.3.3.1. Prinzip der elektrochemischen Entsalzung und Reduzierung des kapillaren Wassertransportes (aktive Verfahren)
4.3.3.2. Beschreibung der Funktion der passiven Verfahren
4.3.3.3. Beschreibung der Funktion der aktiven Verfahren
4.3.3.4. Beschreibung der elektrodenlosen Elektroosmose
4.4. Übersicht von Verfahren zur Vermeidung von Kondenswasser an der Wandoberfläche
4.5. Trocknungsverfahren
4.5.1. Trocknungsgeräte
4.5.2. Infrarotstrahlung
4.5.3. Mikrowellentrocknungsverfahren
4.5.4. Temperaturgeregelte Heizstabtechnologie
4.6. Die Mauerfeuchtigkeit und die Funktionsweise ausgewählter Putzsysteme
4.6.1. Der Einfluss der Mauersalze auf den Feuchtetransport an Bauteiloberflächen
4.6.2. Wirkungsweise des Opferputzes oder Kompressenputzes
4.6.3. Zementgebundene Putze (sogenannter Sperrputz)
4.6.4. Funktionsweise eines Sanierputzes

5. Mauersalze
5.1. Mauersalze und die Durchfeuchtung des Mauerwerkes
5.2. Die Karbonatisierung
5.3. Die Entsalzung von Mauerwerk
5.3.1. Salzarten im Mauerwerk
5.3.2. Die Wirkungsmechanismen von Mauersalzen
5.3.3. Die Verfahren zur Entsalzung von Mauerwerk

1. Einleitung und Grundlagen
1.1. Einleitung

Das thermische Verhalten eines Gebäudes ist immer mit den Feuchtetransportprozessen in der Konstruktion gekoppelt. Die Wärme- und Feuchteflüsse beeinflussen sich gegenseitig. Bei historisch qualitativ guten Gebäuden wurde ein optimales Verhältnis erreicht. Werden nachträglich bewährte Konstruktion nur aus energetischen Gesichtspunkten verändert, so können diese feuchtetechnisch bereits nach kurzer Zeit versagen. Eine nachträgliche Veränderung erfordert in der Regel einen hohen Planungsaufwand für den Einsatz geeigneter Baustoffe und eventuell ergänzende bzw. neuer Baukonstruktionen.

Ein trockenes Mauerwerk ist eine Voraussetzung für ein Wohngebäude bzw. Arbeits- und Lagerstätte, welche lange ihre Funktion erfüllen sollen. Vom Gebäude dürfen keine Einflüsse auf die Gesundheit der Menschen oder Tiere ausgehen. Feuchtigkeit ist nicht nur eindringendes Wasser, sondern auch eine dauerhaft höhere Luftfeuchte, die im Extremfall zur Tauwasserbildung führt.

Die Feuchtigkeit in porösen Konstruktionen entsteht durch verschiedene Ursachen, wie Bodenfeuchtigkeit, Regenwasser, bei Havarien von Wasser führende Leitungen aber auch durch eine Tauwasserbildung. Die dabei auftretenden Feuchtigkeitstransportprozesse, wie die Wasserdampfdiffusion oder kapillare Wasserleitung wird durch den Feuchtegrad, die Feuchteverteilung, der jeweiligen Baustoffstruktur sowie vom Schichtaufbau der massiven Konstruktion bestimmt.

Hohe Feuchtigkeitsbelastungen führen zu einer lang- und mittelfristigen chemischen und physikalischen Zerstörung der Baustoffe. Die von außen durch die Feuchtigkeit eingetragene oder die sich aus dem Baustoff herausgelösten Salze reduzieren den Bindemittelanteil, sodass sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften verändern oder die Gefügestruktur lockern. Die Folgen können Einschränkungen der Nutzung oder der Standsicherheit sein.

Die Feuchtigkeit bietet aber auch günstige Lebensbedingungen für die Entstehung biologischer Bauschäden[1] aber auch für eine dauerhafte hohe Belastung der Räume durch Schimmelpilze und Bakterien. Die dadurch auftretenden Schäden führen zur Nutzungseinschränkung wegen gesundheitlicher Gefährdung der Bewohner oder im ungünstigen Fall zu einem Standsicherheitsverlust, was gerade bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen ein hoher Sanierungsaufwand bedeutet. Gegenwärtige konzentriert man sich bei den Ergründungen der Feuchtigkeitsursachen auf die Feuchteübertragung aus angrenzenden Bodenschichten und Bauteilen, auf die Tauwasserbildung und auf die nutzungsbedingt hervorgerufene Feuchteerhöhung. Dauerhafte Feuchteerhöhungen im Querschnitt der Konstruktionen als Folge ungünstiger konstruktiver Ausführungen und Baustoffeigenschaften werden dagegen nur ungenügend berücksichtigt. Die überzogenen gesetzlichen Wärmeschutzvorschriften vor allem in Deutschland verursachen nach der Sanierung im Altbaubereich zum Teil erhebliche Feuchteschäden. Ursachen sind fehlende oder mangelhafte Planung. In vielen Fällen sind sowohl die Planer aber auch die Handwerker mit der detaillierten Ausführung überfordert. Ein Teil der historischen Konstruktionen funktioniert feuchtetechnisch nur in der vorhandenen Ausführung. Die Forderungen aus der Energiewende und den damit verbundenen neuen Energiespargesetzen und Verordnungen (Hilfswerkzeuge sind die EnEV 2009, EnEG 2009, EEWärmeG, BImSchV 2010 und Heizkostenverordnung) führen zur Vernichtung eines Großteils der historischen Bausubstanz. Dies äußert sich in Standzeitverkürzung und gesundheitliche Probleme für die Bewohner durch Raumklimaveränderung.

Für die Beurteilung der Feuchteprozesse gibt es mathematische Modelle für die Berechnung gekoppelter Wärme- und Feuchtetransportprozessen im Mauerwerk sowie Untersuchungen der Feuchteverteilung in mineralischen Baustoffproben.[2] [3] Im Mittelpunkt stehen hierbei die Wasserdampfdiffusion, die Flüssigtransporte durch Kapillarkräfte sowie die Wärmeleitung und Enthalpieströme durch Feuchtebewegung mit Phasenänderung.[4] In der Praxis wirken unterschiedlichste Einflussfaktoren, sodass mithilfe dieser statischen Rechenverfahren nicht alle Situatio-

---

[1] *Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996, Berlin Ernst & Sohn, S. 53*

[2] *Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag*

[3] *Krus, Martin; Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe, theoretische Grundlagen und neue Messtechnik 1995, Diss., Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen Universität Stuttgart*

[4] Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 8, 21

nen hinreichend geklärt werden können. Künftig wird daher der Einsatz von dynamischen Rechenverfahren für die Diffusion in den massiven Konstruktionen an Bedeutung gewinnen. Thermische und hygrische Simulationsrechnungen zur Ermittlung der Feuchteverteilung in Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen auf der Grundlage des Glaserverfahrens sind kritisch zu bewerten. In einem Untersuchungsbericht warnt HAUSER mit folgendem Hinweis „*Der in Ansatz gebrachte Wassertransport in den Bauteilen berücksichtigt allein die Wasserbewegung infolge von Diffusion. Andere Transportphänomene, die wie die Kapillarleitung den Feuchtetransport dominieren können, bleiben unberücksichtigt. Auch die von den Materialeigenschaften abhängige Wasserspeicherfähigkeit wird nicht in Ansatz gebracht. Deshalb ist es mit dem Nachweisverfahren nicht möglich, Rückschlüsse auf die sich in Bauteilen ansammelnde Wassermenge zu ziehen und realistische Wassergehalte zu ermitteln.*“[5]

1.2. Wie funktioniert die Diffusion und was versteht man darunter?

In Gasen und Flüssigkeiten sind die Moleküle beziehungsweise Ionen in ständiger, statistisch nicht gerichteter Wärmebewegung. Besteht in einem Gasgemisch oder in einer Lösung für eine Substanz ein Konzentrationsgefälle, so wird es durch diese Bewegung ausgeglichen, die dabei zu einer statistisch gerichteten Bewegung, zur Diffusion wird. Ein gelöster Stoff diffundiert entlang seinem eigenen Gefälle.

Gasaustausch durch Bauteile findet in der Regel nur durch Diffusion statt. "Diffusion" nennt man die allmähliche Durchmischung verschiedener Gase (aber auch Flüssigkeiten und sogar Festkörper) ohne äußere Einwirkung, allein durch Molekularbewegung, bis die Verteilung der verschiedenen Moleküle überall gleich ist.

Die Diffusion ist ein Ausgleichsprozess, des unter Entropiezunahme zu einem weniger geordneten, also wahrscheinlicheren Zustand führt; sie findet zwangsläufig nach dem II. Hauptsatz der Thermodynamik statt.

---

[5] Hauser, Gerd: Forschungsvorhaben „Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 „Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren“ auf Konstruktion und Holzschutz von Außenbauteilen in Holzbauart“, Ingenieurbüro
Prof. Dr. Hauser GmbH, Wärme, Energie, Feuchte, Schall, Tageslicht, Baunatal, Zusammenfassung, Aktenz.: IBH 457/02, 31.01.2003

Der Widerstand, den ein Material der Diffusion von Wasserdampf oder anderen Gasen entgegenwirkt, hängt hauptsächlich von seinem Porengefüge ab; je mehr offene Poren, desto geringer der Widerstand. Der Porendurchmesser spielt für Wasserdampfmoleküle so gut wie keine Rolle, sie sind kleiner und leichter als fast alle anderen Luftmoleküle; Sauerstoffmoleküle haben zum Beispiel 60 % mehr Masse und Kohlendioxidmoleküle fast dreimal so viel. Die Diffusionsgeschwindigkeit einer Substanz ist etwa umgekehrt proportional der Wurzel aus ihrer Molmasse M (Diffusionskoeffizient $D \sim 1/\sqrt{W}$); größere Moleküle diffundieren also langsamer. Daher ist die Diffusionsgeschwindigkeit von Kohlendioxidmolekülen auch bereits in der Luft viel geringer als die von Wasserdampf, und so gibt es Bauteilschichten, die zwar die Diffusion von Kohlendioxid fast völlig absperren, der Wasserdampfdiffusion aber keinen allzu großen Widerstand entgegensetzen. Dieser physikalische Unterschied kann zum Beispiel bei der richtigen Auswahl der Beschichtung beim Schutz von Betonoberflächen genutzt werden, um einerseits eine gute Abtrocknung zu ermöglichen und andererseits den Karbonatisierungsprozess zu verzögern.

Die im Vergleich mit Wasserdampf, Sauerstoff oder Kohlendioxid meist riesige Moleküle von "Wohngiften" können durch Diffusion erst recht nicht aus der Raumluft entfernt werden, wie das in einigen baubiologischen Schriften immer wieder zu lesen ist. Für sie bildet auch die diffusionsfähigste Wand ein praktisch unüberwindliches Hindernis. Eine Reduzierung der Konzentration an Wohngiften lässt sich nur über ausreichendes Lüften erreichen.

Diffusionswiderstandswerte sind die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen und die daraus errechneten "diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken" (s_d-Wert). In Analogie zu diesen Werten, die nur die Diffusion von Wasserdampf durch ein Material beziehungsweise ein Bauteil betreffen, geben manche Baustoffkataloge vor allem bei Anstrichen und anderen Beschichtungen auch Widerstandswerte zur Kohlendioxiddiffusion an. Ergänzung: Die durch Diffusion zurückgelegte Wegstrecke ist proportional zur Wurzel der Zeit; Verdopplung der Wegstrecke bedeutet bereits vierfachen Zeitbedarf.[6, 7, 8]

---

[6] *Kur, Friedrich; Wohngifte, Handbuch für gesundes Bauen und Einrichtungen, 3. Aufl., Verlag Eichborn, 1993, S. 536*

[7] *Libbert, Eike; Allgemeine Biologie , VEB Gustav Fischer Verlag Jena 1986, S. 153*

[8] *Haupt, P.; Bauphysik 5/94, Stand Deutsche Bücherei (ZB 75 909) 24-5*

Der Nachweis der inneren Kondensatbildung zum Beispiel erfolgt immer noch nach dem Glaserschen Diffusionsschema (Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen gemäß DIN 4108-3:2001-07), das aber weder die hygroskopische Auf- und Entladung noch die kapillare Entspannung des Kondenswassers berücksichtigt. Probleme bei der diffusionstechnischen Berechnung ergeben sich dann, wenn es sich bei praktischen Gegebenheiten nicht ausschließlich um Diffusionsprozesse handelt. Kapillare Wassertransporte, die bei mehrschichtigem Wandaufbau an bestimmten Baustoffen auftreten, entziehen sich einer Berechnung.

1.3. Die Sorption oder Wasserdampfaufnahme (Adsorption und Kapillarkondensation)

Für das rasche Ausgleichen von Feuchtigkeitsschwankungen, zum Beispiel in einer Wohnung, sorgt die Sorptionsfähigkeit von Oberflächenmaterialien der Raumbegrenzungsflächen und der Einrichtungsgegenstände. Darunter versteht man die physikalischen und chemischen Materialeigenschaften, Wasserdampf oder andere dampfförmige Stoffe (Geruchsstoffe, Dämpfe von Löse- und Desinfektionsmitteln, Kunststoffmonomere) durch "Adsorption" an die Wände der Zellen, Poren und Kapillaren zu binden und beim Abnehmen der relativen Luftfeuchte (Sättigungsgrad der Luft mit Dämpfen aller Art) in der Umgebung durch "Desorption" wieder freizugeben.

Bei der Adsorption werden die Wassermoleküle ein- oder mehrschichtig angelagert. Handelt es sich bei den Wandbaustoffen um kapillar-poröse Stoffe, so erfolgt die Feuchtigkeitsregulierung auch an der inneren Oberfläche.

Man unterscheidet zwischen Stoffen, die eine hohe Ausgleichsfeuchte haben, wie zum Beispiele Holz und Naturfasern. Metalle, Glas, Schaumkunststoffe und andere anorganische Stoffe sind so gut wie nicht sorptionsfähig. Die Grenze wird bei einer Sorptionsfeuchte von 0,5 $_{\text{Masse}}$-% bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % gesetzt. Für eine gute Feuchtigkeitsregulierung sind die Wandflächen daher nicht mit geschossenen Strukturen, wie Metalltapeten oder Kunststoffplatten oder -folien zu beschichten. Die Räume müssen aber auch ein bestimmtes Raumvolumen haben. Die Praxis zeigt, dass oft die für die Sorption zur Verfügung stehenden Flächen im Schlafzimmer zu klein sind. Die Folge ist ein höher Anstieg der Raumluftfeuchte mit lokaler Feuchteanlagerung. Diese führt oft zu einer Schimmelpilzbildung an den kalten Wandoberflä-

chen.

Ebenso sollten die Wände der Bäder so wenig wie möglich Wandfliesen haben. Das Fliesen bis an die Decke sieht gut aus, ist aber feuchtetechnisch sehr ungünstig. Die adsorbierten Wasserdampfmoleküle bewirken bei natürlich-organischen Materialien wie Holz, Wolle, Textilien oder Papier sichtbare Formänderungen, indem sie die unter ihrem eigenen Gewicht in sich zusammengesunkenen Zellwände glätten und versteifen. Die Materialien beginnen zu quellen, und zwar um so stärker, je mehr Wasserdampfmoleküle an die Zellwand adsorbiert werden, bis bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % die Grenze erreicht ist. Auch bei weiterer Feuchtigkeitszufuhr - zum Beispiel durch Kapillartransport quillt das Material nicht mehr weiter beziehungsweise nur noch geringfügig auf. Bei der Desorption beginnen die Zellwände des Materials wieder zu schrumpfen - das Material "schwindet".

Da Schwinden und Quellen von der Menge der adsorbierten Wasserdampfmoleküle und die wiederum vom Grad der relativen Luftfeuchte abhängen, hat man schon lange solche Materialien in Geräten zur Luftfeuchtigkeitskontrolle eingesetzt. Man nannte sie deshalb auch "hygroskopisch", das heißt "feuchtigkeitsüberwachend". Bei Bau- und Einrichtungsmaterialien wendet man das Wort aber heute allgemein auf Stoffe mit ausgeprägter Sorptionsfähigkeit an; man spricht zum Beispiel von der "starken Hygroskopizität von unbehandeltem Holz".

Sorptionsfähig sind fast alle Materialien; das heißt, bei fast allen steigt oder sinkt die Materialfeuchte in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebung, bis zwischen beiden das hygroskopische Gleichgewicht hergestellt ist. Bei Stoffen mit großer Hygroskopizität geht das nur sehr viel schneller, und es werden große Wasserdampfmengen aufgenommen und auch wieder abgegeben. Die Baustoffe Holz und auch Lehm zeigen hier gute Eigenschaften.

Bei trockener Luft weist Holz ein Feuchtigkeitsgehalt von 8 bis 12 M% auf. Es kann jedoch bis zu mehr als 30 % seines Trockengewichts an Wasser aufnehmen, ehe es fühlbar feucht wird. Das hygroskopische Gleichgewicht liegt bei einer relativen Luftfeuchte von 100 %. Bei den meisten mineralischen Baustoffen liegt die höchstmögliche hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte bei 2 bis 3, maximal 5 %, so hat zum Beispiel Kork 10 %, Kalksandstein 5,0 % und Ziegel 1,5 %.

Sorptionsfähige Materialien senkten nicht die allgemeine Schadstoffbelastung der Raumluft durch Adsorption und "Neutralisierung" der Schadstoffe. Hierfür gibt es gesonderte Beschichtungssysteme, die durch physikalische oder chemische Prozesse die Schadstoffe binden.

In einem mit unversiegelten Holzflächen getäfelten Raum mit Polstermöbeln, schweren Gardinen und Wollteppichen (alles aus feinsten und reinsten Naturprodukten) ist zum Beispiel die Geruchsbelästigung durch Tabakrauch weniger groß als in einem gleich großen Raum mit Glas- und Stahlmöbeln, gekacheltem Boden, gefliesten Wänden und Rohbetondecke. Die sorptionsfähigen Materialien binden eine Menge der Geruchs- und Schadstoffe aus dem Tabakrauch - und geben sie, schön langsam, noch Wochen später wieder an die Raumluft ab. Ein wohnbiologisch sehr ungünstiger Raum aus Beton, Stahl, Glas und Keramik ist dagegen bereits nach einmaligem kräftigen Lüften wieder nahezu frei von Luftschadstoffen, wie Lösungs-, Putz- und Reinigungsmittel oder Kosmetika.[9, 10, 11] Diese Räume lassen sich wesentlich besser reinigen. An einem höheren Staubanteil ist gleichzeitig auch ein höherer Anteil an Mikroorganismen gekoppelt.

1.4. Die Beschreibung des s_d-Wertes (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke)

Die Fähigkeit von Baustoffen, für Wasserdampf durchlässig zu sein, wird durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl beschrieben. Wie diffusionsfähig eine Wand ist, hängt von den Materialien und der Dicke ihrer Schichten ab. Als Diffusionswiderstand einer Schicht gibt man die Luftschichtdicke in Metern an, die der Diffusion (Austausch von Wasserdampf- und Luftmolekülen) denselben Widerstand entgegensetzt, wie die betreffende Schicht. Je niedriger der Wert, desto weniger wird der Wasserdampf auf dem Weg von der warmen zur kalten Seite gebremst. Für offenporige Konstruktionen ist ein niedriger μ-Wert vorteilhaft, da die Entfeuchtung ungehindert und schnell ablaufen kann. Eine Aussage über die Wirkung eines Materials in einer gegebenen Konstruktion ist nur bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Dicke des Stoffes möglich.

---

[9] *Kur, Friedrich; Wohngifte, Handbuch für gesundes Bauen und Einrichtungen, 3. Aufl. 1993, Verlag Eichborn, S. 572*

[10] *Eichler Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchteschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 95*

[11] *Künzel, Helmut; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl., 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 216*

Den Wert dieser diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (abgekürzt s_d) bekommt man, wenn man den Wert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ) mit der Schichtdicke in Metern mal nimmt. Dieser μ-Faktor sagt jedoch nur aus, wie gut Wasserdampf (Radius von 0,14-016 nm) in einem Material im Verhältnis zu Luft (Radius von 0,2-028 nm)[12] diffundiert, aber nichts über die Diffusionsfähigkeit von Wasser. So lässt ein Zementputz (μ = 20) den Wasserdampf relativ gut durch, sperrt aber das Wasser beachtlich gut, da das Wassermolekül mit einem Radius von 0,28 nm relativ groß ist.[13] Dies gilt für viele Materialien, die kein Wasser durchlassen aber trotzdem (Wasserdampf-) diffusionsoffen sind, zum Beispiel Kunststoff-Zement-Putze oder Dispersionsfarben. Lehm oder nicht zu hoch gebrannte Ziegel lassen jedoch Wasserdampf und auch flüssiges Wasser diffundieren.[14]

Beispiel: Eine 36,5 cm dicke Mauerschicht aus Ziegelsteinen (μ = 8) hätte demnach eine äquivalente Luftschichtdicke von s_d = 8 x 0,365 m = 2,92 m.
Bei der Gipskartonverkleidung ergibt sich ein s_d-Wert = 8 x 0,0125 m = 0,1 m.

Anstrichmaterialien haben in der Regel ziemlich hohe Wasserdampf-Diffusionswiderstands-Werte. Da aber die Schichtdicken mit wenigen zehntel Millimeter nur sehr gering sind, beeinträchtigen sie die Diffusionsfähigkeit der Wand im Allgemeinen kaum. Jedoch wird aber die Sorption (Wasserdampfaufnahme) beeinflusst und das ist gerade für Innenräume zum Abbau der Feuchtespitzen in der Raumluft von Bedeutung..

So ist entspricht der s_d-Wert einer 0,5 mm dicken Schicht aus Leimfarbe[15] mit μ=180 ... 215,
s_d = 200 x 0,0005 m = 0,1 m.

Wird ein Kunstharzdispersionsanstrich[16] mit μ= 1800 verwendet, so liegt der s_d-Wert bei 0,9 m, also beim 9-fachen. Bei einem Ölsockelanstrich mit μ= 10.000 sind dies sogar 5 m. Damit wird

---

[12] *Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 30*
[13] *Zürcher, Christoph, Frank Thomas; Bauphysik Bau und Energie, 2.Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 53*
[14] *Oberrauch, Berhard; Bauphysikalische Daten über Lehm, Wohnung + Gesundheit 9/92 Nr. 64, S. 48/49*
[15] *König, Holger; Wege zum gesunden Bauen, 1997, Ökobuch Staufen b. Freiberg S. 95 ff*
[16] König, Holger; Wege zum gesunden Bauen, 1997, Ökobuch Staufen b. Freiberg, S. 95 ff

deutlich, warum früher gerade an dieser Wandbeschichtung in der Küche nach dem Kochen sich ein Feuchtigkeitsfilm (Kondenswasser) bilden konnte. Der sich darunter befindliche Putz bei Altbauten ist meistens schadhafter als die übrige Putzoberfläche.

In den beiden Beispielen in der Abbildung 1.1 in einer Wohnung in Kiew (Ukraine) wurden das Bad und die Küche vollständig mit Kunststoffpaneelen verkleidet, also mit einem wasserdampfsperrenden Material. Da man die Wohnung vermieten möchte, wollte man die künftigen Malerarbeiten vermeiden. Trotz des großen s_d-Wertes gibt es an der Oberfläche der Paneele in der Küche keine Probleme. In der Küche lag bei einer Außentemperatur um 5 °C und dicht schließender Fenster (Wärmeverbundfenster) eine Luftfeuchte um 50 % vor. Im Bad allerdings bildeten sich auf den Siliconfugen bereits nach 4 Monaten Schimmelpilze. (Die Silikonfuge ist bei dieser Wandverkleidung nicht erforderlich.) Die Entstehung von "Schwitzwasser" (Tauwasser) auf der Oberfläche der Paneele konnte über einen Zeitraum von mehreren Wochen nicht festgestellt werden. Bei sorptionsoffenen Flächen mit niedriger Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl werden Feuchtespitzen aus der Raumluft aufgenommen. Wegen der Paneele kann die Feuchte aus der Raumluft nicht aufgenommen werden. Luftfeuchte und eine Temperatur zwischen 20 bis 28 °C begünstigen das Wachstum von Schimmelpilzen.



Abb. 1.1: Die Wände und die Decke des Bades und der Küche wurden mit Paneelen aus Plaste verkleidet. Damit gibt es keine diffusionsoffene Wandflächen.

Werte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl unter:
μ = 10 zeigen eine sehr gute Diffusionsfähigkeit für Wasserdampf an;
10 - 50 sind mittlere Diffusionswerte;
bei Werten von 50 - 500 wird die Dampfdiffusion eingeschränkt;
bei 500 - 15.000 wird sie stark eingeschränkt;
ab 15.000 wirkt ein Material wasserdampfsperrend;
ab 100.000 ist ein Material dampfdicht.

Die Richtung der Diffusion wird von dem absoluten Feuchtegehalt der Luft bestimmt und ist so bei kalter Außenluft nach außen gerichtet. Sie ist nicht abhängig von der Richtung des Wärmestroms, sie kann dieser entgegengesetzt gerichtet sein. Wasserdampf kann trotz starker Abkühlung auf der anderen Seite der Wand herausdiffundieren, ohne seinen Aggregatzustand zu wechseln. Es findet keine Tauwasserbildung an der Oberfläche statt. Dies ändert sich jedoch, wenn sich auf der kalten Seite eine dichte Schicht befindet und sich ein Staubereich bildet, wo ein Dampfsättigungsdruck aufgebaut wird. Dann kann eine Kondensation ausgelöst werden.[17]
Bei zu geringem s_d-Wert bei einer Außenwand kann der Taupunkt bei feucht-kaltem Wetter für die nach außen diffundierende Feuchte aus der Raumluft schon unter verhältnismäßig normalen Bedingungen in der Wand liegen. An der Stelle beginnt dann die Durchfeuchtung der Wand um so stärker, je kleiner ihre Diffusionsfähigkeit ist.

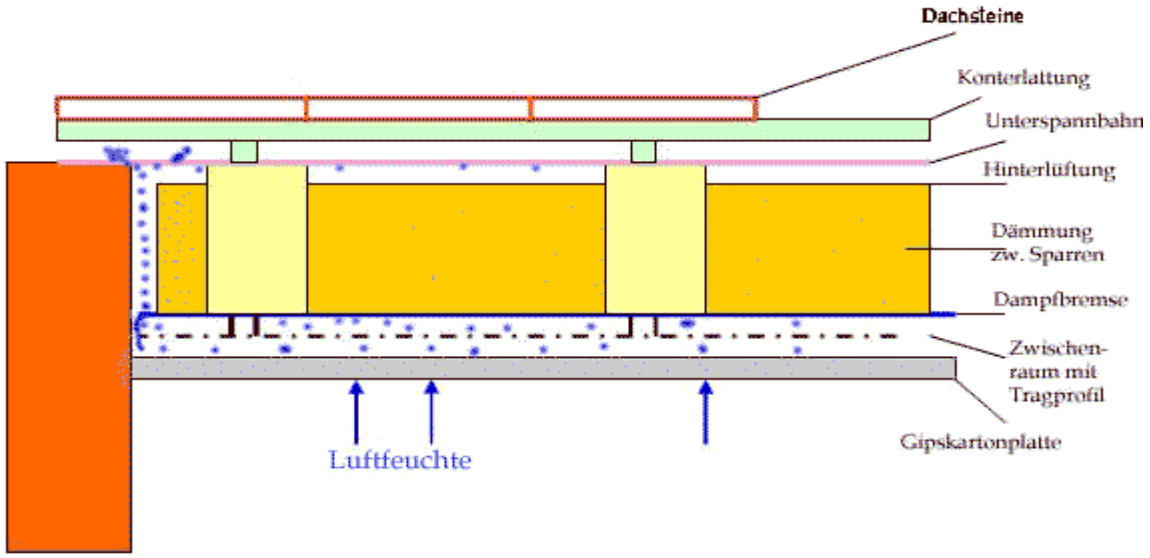
Für Außenwände gelten deshalb Werte zwischen s_d= 4 und s_d = 7 als besonders günstig. Diese Bedingungen erfüllen zum Beispiel 48er Ziegelwände.
Zur Vermeidung einer Wasserdampfkondensation bei mehrschichtigen Bauteilen soll von innen nach außen der Wärmedurchlasswiderstand zunehmen (Wärmedämmschicht außen) und die Dampfdurchlasswiderstände abnehmen. Diese Bedingungen werden zum Beispiel beim Wandaufbau, Innenputz, Kalksand, Vollsteine, Mineralwolle, Luftschicht, Fassadenplatte (Wand mit hinterlüfteter Fassade), erfüllt. Bleibt die Wand feucht, das ist gerade beim **Neubau zu beachten**, so liegt die Ursache daran, dass das Wasser hinter einer wasserdichten oder -abweisenden Außenschicht nicht entweichen kann. Dies ist zum Beispiel bei der Thermohaut der Fall, wo nur ungenügend Feuchtigkeit durch Diffusion entweicht und das Mauerwerk wird über lange

[17] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchteschutz, Bauverlag 1989, S. 95*

Zeit geschädigt.[18] Ein ähnliches Problem tritt auch im ausgebauten Dachgeschoss auf, hier sammelt sich das Kondenswasser in dem Zwischenraum Gipskartonplatte (innere Verkleidung) und der Dampfbremse. Hier spielen aber auch noch die Fugen und die Verlegung der Dämmung eine entscheidende Rolle (siehe Abb. 1.2). Das Kondenswasser tropft dann von der Platte in den Raum. Es wird dann angenommen, dass das Dach undicht ist. Die Ursache ist daher genau zu ermitteln.

In der folgenden Abb. 1.2 wird eine Dachschräge mit dem Anschuss an eine Giebelwand gezeigt. Die Dampfbremse wurde nicht fugendicht angeschlossen, das Gleiche gilt auch für Stöße. Trotz das die Gipskartonplatte fugendicht, mit Acryl oder Fugenband, an die Wand angeschlossen wurde, gelangt Feuchtigkeit (Diffusion) in den Hohlraum zwischen Platte und Dampfbremse. Durch Fugen in der Dampfbremse wird ein Unterdruck aufgebaut, infolge des bestehenden Dampfdruckgefälles. Die warme Innenraumluft ist bestrebt, nach außen zu gelangen. Bei einer Windlast wir der Windsog noch verstärkt. Dies wirkt sich auch auf die Diffusion aus. Durch Untersuchungen von Wagner zu Wasserdampftransport infolge von Diffusion und Konvektion wurde ermittelt, dass bei einem s_d-Wert = 10 m und mittlerer Diffusion aller 10 Stunden auf einer Fläche von 60 m^2 etwa der Inhalt eines Schnapsglases durch das Bauteil diffundiert. [19]

Abb. 1.2: Die Dampfbremse ist nicht fugendicht angeschlossen und die Raumluft gelangt so in die Dämmung und der Wasserdampf in der Luft kondensiert im äußeren kühleren Schichtaufbau.



[18] *Kur, Friedrich; Wohngifte, Handbuch für gesundes Bauen und Einrichtungen, 3. Aufl. Verlag Eichborn, 1993, S. 568*

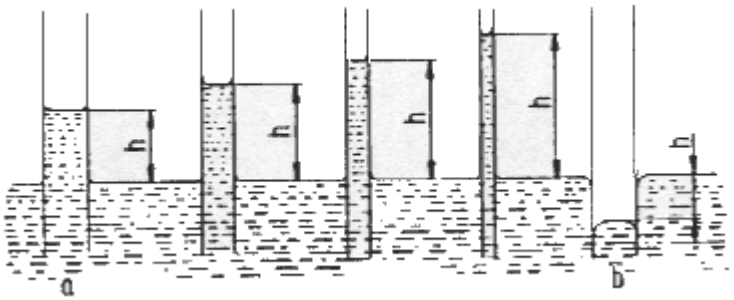
[19] *Colling, Francois; Lernen aus Schäden im Holzbau, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung Innovations- und Service GmbH, 2000, S. 132*

1.5. Der Feuchtetransport durch Kapillare

"*Als Kapillarität bezeichnet man das Verhalten von Flüssigkeiten in Kapillaren, auch Haarröhrchen genannt. Beim senkrechten Eintauchen eines engen Glasröhrchens mit innerem Durchmesser < 1 mm in eine benetzende Flüssigkeit steigt die Flüssigkeit in dem Kapillarrohr über den äußeren Flüssigkeitsstand empor, und zwar, um so mehr, je enger die Röhre ist (Kapillaraszension). Handelt es sich jedoch um eine nicht benetzende Flüssigkeit, zum Beispiel Quecksilber, so wird der Flüssigkeitsspiegel im Innern der Kapillaren gesenkt (Kapillardepression). Die Kapillarität beruht auf den zwischenmolekularen Kräften der Adhäsion und der Kohäsion. Sind die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen der Flüssigkeit größer als die Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und Rohrwand, so tritt Kapillardepression ein; sind dagegen die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte, so kommt es zu einer Kapillaraszension*" [20] (siehe Abb. 1.3).

Die Steighöhe ist dem Radius der Kapillare umgekehrt proportional. Sie hängt von der Fallbeschleunigung im Schwerefeld und von Eigenschaften der Flüssigkeit ab.

Abb. 1.3: Kapillare Steighöhe h bei a) benetzender Flüssigkeit zum Beispiel Wasser und b) nicht benetzender Flüssigkeit (zum Beispiel Quecksilber)



Benetzt die aufsteigende Flüssigkeit das Kapillarrohr vollständig, das heißt der Randwinkel ist gleich null, so lässt sich aus der kapillaren Steighöhe die Oberflächenspannung der betreffenden Flüssigkeit berechnen:

---

[20] *Friedrich Tabellebuch, Bau- und Holz, Ferd. Dümmler Verlag 1992, 2-4*
Autorenkollektiv, Leitfaden der Physik 6. Aufl. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1980, S. 118

Die von der Oberflächenspannung σ bewirkte Kraft $2 * \pi * r * \sigma * \cos \delta$ und das Gewicht der Flüssigkeitssäule $\pi * r^2 * h * \gamma * g$ halten sich bei einer bestimmten Höhe h das Gleichgewicht. Es ist:

$$h = \frac{2 * \sigma * \cos \delta}{r * \gamma * g} \qquad (1.1.)$$

h = Höhe in [m]
σ = Oberflächenspannung in [N/m]
r = Radius der Kapillare in [m]
γ = Volumen-Temperatur-Koeffizent in [kg/m^3]
g = Fallbeschleunigung in [m/s^2]

Bei vollkommener Benetzung ist der Randwinkel δ = 0º (zum Beispiel zwischen Glas und Wasser).
Beispiel: In einem sauberen Glasröhrchen (Kapillare) von 0,6 mm Durchmesser steigt Wasser (σ_{20^o} = 0,073 N/m) bis zu einer Höhe h von

$$h = \frac{2 \text{ x } 0{,}073 \text{ N} * \text{ l } * \text{ m}^3 * \text{ s}^3}{0{,}0003 \text{ m } * \text{ 1000 kg } * \text{ 9,81 m}} = 0{,}05 \text{ m},$$

wobei cos σ =1 wegen s =0º ist. [21]

Materialien mit stark ausgeprägter Kapillarität transportieren pro Quadratmeter benetzter Fläche in der ersten Stunde leicht 20 Liter und mehr. Je feuchter das Material wird, desto weniger Wasser nimmt es zusätzlich auf.

In Materialien mit stark ausgeprägter Kapillarität wird flüssiges Wasser beliebig weit transportiert, und zwar in einem Material jeweils von den feuchteren zu den trockeneren Regionen. In Bauteilen aus Schichten mit unterschiedlicher Kapillarstruktur wandert das Wasser immer in Richtung der Schicht mit den feineren Kapillaren (beziehungsweise mit dem höheren Wasseraufnahmekoeffizienten w); Schichten mit gröberen oder unvollkommeneren Kapillaren beziehungsweise kleineren Werten für w werden geradezu trocken gesaugt.

---

[21] *Friedrich Tabellenbuch, Bau- und Holz, Ferd. Dümmler Verlag 1992, 2-4*

Ein Kapillartransport von Wasser gegen den Wasserdampfdiffusionsstrom kommt oft vor, im Winter ist das sogar die Regel. Wenn in einem Baustoff mit ausgeprägter Kapillarität Wasserdampf auskondensiert, beginnt im selben Moment der Transport des Kondenswassers in Richtung der geringeren Materialfeuchte, also zur wärmeren Seite der Wand, wo das Kondenswasser wieder verdunsten kann. In solchen Schichten gibt es oft auch dann kein Durchnässen durch Kondenswasser, wenn sie rechnerisch zu erwarten wäre. Die Kapillarkräfte wirken beim senkrechten Transport auch gegen die Schwerkraft - theoretisch zwar nicht unbegrenzt, in der Praxis kann man die Schwerkraft aber vernachlässigen. Auf diese Weise bleiben in Altbauten auch Kellermauern ausreichend trocken, die nicht gegen Feuchtigkeit aus dem Boden abgesperrt wurden.

Man darf auf keinen Fall den Kapillartransport behindern. Im Keller durch eine dicht schließende innen liegende Feuchtigkeitssperre oder im oberirdischen Mauerbereich, wenn man die Fassade im Sockelbereich zum Schutz gegen das Spritzwasser wasserhemmende, Wasser abweisende (Hydrophobierung) oder sogar wasserdichte Beschichtung angebracht werden. Vor der Beschichtung müssen zunächst das Fundament und das Kellermauern gegen eindringende Feuchtigkeit aus dem Boden abgesperrt werden.

Besonders kritisch wird dies bei einer Altbausanierung, wenn der feuchte Sockel mit Klinker verkleidet oder ein dicht schließender Zementputz aufgetragen wird. Die Feuchtigkeit steigt dann weiter nach oben. In vielen Fällen kann dann die Feuchte erst in Höhe des Erdgeschosses nach innen und außen entweichen. Sinnvoll sind dann Verkleidungen mit seitlichen Lüftungsschlitzen, wie sie zum Beispiel in Prag im Sockelbereich angebracht wurden (Abb. 1.4).

Beim Austrocknen von fertiggestellten mineralischen Wänden, Böden oder Decken wird die überschüssige Feuchtigkeit zunächst nur durch Kapillartransport an die Bauteiloberflächen befördert, wo sie verdunstet. Wenn nicht mehr alle Materialporen mit Wasser gefüllt sind, beginnen die Wasserfäden in den Kapillaren zu reißen, die Trocknung verlangsamt sich, und allmählich setzt die Dampfdiffusion ein, bis sich das praktische Feuchtegleichgewicht einstellt. Das ist der Feuchtegehalt, der in jedem Bauwerk immer als Rest erhalten bleibt. Je nach Bauteildicke, Anfangsfeuchte, Besonnung, Durchlüftung und anderen äußeren Einflüssen dauert das mehrere Monate bis einige Jahre.

Abb. 1.4: Verkleidung des Sockels mit hinterlüften Platten, in Prag in der Ceskoslovenské armády.



Am längsten dauert es bei Materialien mit schwach ausgebildeter Kapillarität und einem hohen Sättigungswassergehalt. Am schnellsten geht es bei Baustoffen mit hoher Kapillarität, wie etwa Vollziegeln. Sie haben bei mittleren Rohdichten einen Wasseraufnahmekoeffizienten um 20-30 gegenüber Kalksandsteinen mit 10 und Gasbeton 4-8 und Kunstharzputz mit 1 $kg/m^2h^{0,5}$.
Die Kehrseite dieser wünschenswerten Eigenschaft ist, dass solche Ziegel auch chemisch aggressive Niederschläge schneller und weiter ins Bauteil transportieren als Materialien mit geringerer Kapillarität. Sehr viel besser als Vollziegel verhalten sich Lochziegel. Bei ihnen ist die beim Kapillartransport wirksame Fläche durch die Lochung verkleinert. Hochlochklinker oder Hochlochvormauerziegel sind deshalb für Sichtfassaden besonders gut geeignet. Der beste Schutz von Bauteilen aus Materialien mit hoher Wasseraufnahmefähigkeit sind hinterlüftete Verkleidungen (Holz, Schiefer) oder auch Fassadenbepflanzungen.

2. Das Feuchteverhalten poröser Baukonstruktionen

2.1. Die Feuchtebelastung mineralischer Baustoffe

Eine hohe Feuchtebelastung mineralischer Baustoffe führt langfristig zur chemischen oder physikalischen Zerstörung der Konstruktion. Gerade im Altbaubereich oder in Gebäuden, wo organische Baustoffe verwendet wurden, reicht bereits eine geringere Feuchte aus, um die organi-

schen Baustoffe, wie Holz, Holzwerkstoffe, organische Dämmstoffe usw., zu schädigen oder in kritischen Fall zu zerstören.

Eine erhöhte Feuchtigkeit in einer massiven Baukonstruktion kann verschiedene Ursachen haben.
Als Ursache für die Folge einer biologischen Schädigung an der Bauteiloberfläche und in der Konstruktion werden folgende Feuchtigkeitsentstehungen unterschieden:

- Tauwasserbildung an den Bauteiloberflächen und in der Konstruktion,
- äußere Feuchtebelastung durch Niederschlag und aus dem Gründungsbereich,
- Luftfeuchtigkeit (Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte) und
- Feuchtebelastung durch Leckagen von Wasser führenden Leitungen sowie defekter Konstruktionen[22]

Biologische Schäden an Bauteilen treten nur dann auf, wenn genügend Feuchtigkeit, eine geeignete Nahrung und ein optimaler Temperaturbereich vorliegen. Oft sind sehr schmale Grenzen zwischen Schadenfreiheit und Schädigung zu beobachten. Eine höhere Feuchtigkeit bei niedriger Temperatur muss nicht zwangsweise zu einer Schädigung führen. Dagegen kann bei gleicher oder sogar niedrigerer relativer Feuchte aber bei Zimmertemperatur von 20 - 23 °C eine biologische Schädigung auftreten, wie zum Beispiel Schimmelflecken an der Wand.

In zahlreichen Modellansätzen werden mehrdimensionale und instationäre Transportvorgänge in kapillar porösen Baustoffen berechnet. Auch das oft kritisierte Glaserverfahren berücksichtigt nicht Kapillartransporte, Sorptionseigenschaften und Einflüsse unter realen baulichen und klimatischen Randbedingungen.
Die thermodynamisch miteinander gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen finden gleichzeitig statt und beeinflussen sich gegenseitig. Enthalpieströme der Feuchtefelder sowie die Phasenänderung des Wassers beeinflussen die Wärmespeicherfähigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit und somit den Wärmetransport. Die Ansätze zur Berechnung der gekoppelten Differenzialgleichungen sind für die jeweilige Aufgabenstellung relativ genau, aber für eine praktische Anwendung aufwendig. In der Literatur werden verschieden numerische Berechnungsver-

[22] *Hierunter fallen verschiedene Anbindungen im Dach- und Fassadenbereich.*

fahren beschrieben.[23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30] Diese Verfahren dienen zur Bewertung von Wärme- und Feuchtetransportprozessen, um bautechnische Schäden durch Feuchtigkeit zu vermeiden.

Sie sind jedoch nicht geeignet geringe Feuchteerhöhungen im Querschnitt der Konstruktion darzustellen. Bereits eine geringe Feuchtezunahme, ob periodisch oder ständig, erhöht zum Beispiel die möglichen Fraßaktivitäten von Holz zerstörenden Insekten an den Balkenköpfen der Deckenbalken. Numerische Berechnungsansätze, die eine bestimmte Feuchte in der Außenwand zulassen aber einen möglichen Pilzbefall ausschließen, sind für eine Beurteilung einer Konstruktion einer Altbausubstanz mit Holzbalkendecken nicht ausreichend. Dies wird mit folgenden Tatsachen begründet:

1. n den älteren Mehrfamilienhäusern befinden sich bedingt durch die lange Standzeit in den Holzkonstruktionen und angrenzende Schüttung mehr oder weniger Larven von Holz zerstörende Insekten und Myzel oder Sporen von Holz zerstörende Pilze. Unter günstigen Lebensbedingungen, zum Beispiel höhere Feuchtigkeit, kommt es zum Wachstum.
2. Wird bei der Berechnung der Konstruktion ein Pilzbefall ausgeschlossen, da die Holzfeuchte zum Beispiel unter 20% liegt, so reicht aber die Höhe diese Feuchtigkeit für eine hohe Fraßaktivität von Holz zerstörenden Insekten aus.
3. In der Literatur werden Holzfeuchten von 17 bis 20 % angegeben, unter den der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrimans*) sein Wachstum einstellt. Ich konnte in mehreren Fällen Holzfeuchtigkeiten von 12 bis 13 % messen, die bereits längere Zeit vorlagen und der Pilz zeigte eine eindeutige Vitalität.
4. Untersuchte Leitungswasserschäden an Holzbalkendecken zeigen, dass nicht immer die

---

[23] Kießl, Kurt; Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung, Dissertation, Universität Gesamthochschule Essen 1983
[24] Häupl, Peter; Stopp, Horst; Feuchtetransport in Baustoffen und Bauwerksteilen Dissertation, Technische Universität Dresden 1987
[25] Philip, J.R.; De Vries, D.A.; Moisture movements in porous materials under temperature gradients, Transaction American Geophysical Union, Heft 2 (1957) S. 222-232
[26] Pedersen, C.R.; Combined heat and moisture transfer in building construction, Dissertation Technische Universität Dänemark, Lyngby 1998
[27] Radu, A. Vornicu, T.; Zweidimensionale Berechnung der Wärmeleit- und Wasserdampfdiffusionsvorgänge in Außenbauteilen, Bauphysik, Heft 1 (1988), S. 17-23
[28] Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetranspors in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation 1994 , Universität Stuttgart
[29] Bednar, T.; Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden –Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren, Dissertation 2000, Technische Universität Wien
[30] Anderseeon, A.; Computer programs for tow-dimensional heat, moisture air flow. Division of Building Technology, Lund, Instiute of Technology Report TVBH-3005, Schweden 1981

Feuchtemenge für den Schaden ausschlaggebend ist, sondern auch die periodisch anfallende kleine Wassermenge über einen langen Zeitraum. Analog kann dies auf eine Wandkonstruktion übertragen werden, wo sich periodisch Kondenswasser oder auch nur hohe Feuchtegrade zum Beispiel an Sperr- oder Grenzschichten einstellen.

5. Im Kurzbericht zur heizungstechnisch gestützten kapillaraktiven Innendämmung bei Holzbalkendecken wird zur numerischen Simulation folgende Feststellung getroffen: „*Derzeit erlauben die existierenden, kommerziell verfügbaren Rechenprogramme keine praxisgerechte, wirklichkeitsnahe Nachbildung der Luftströmung im Balkenkopfbereich einschließlich der Luftfeuchtebewegung und Phasenumwandlung unter Berücksichtigung des gekoppelten Energie- und Stofftransportes in den Baustoffen und Bauelementen, die den Luftzwischenraum am Balkenkopf begrenzen.*“[31]

Ausgangspunkt für biologische Schädigungen in Gebäuden mit Holzkonstruktionen ist eine bestimmte Feuchtigkeit. Massive Konstruktionen sind daher so zu gestalten, dass möglichst keine Durchfeuchtung erfolgt oder es muss eine **genügend schnelle Abtrocknung** gewährleistet sein. Diese Bedingungen werden durch normale Vollziegel und noch besser durch die früher verwendeten weich gebrannten Feldbrandsteine mit ihrer hohen kapillaren Saugwirkung erfüllt. Dabei dürfen die gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportprozesse nicht durch äußere und innere Sperrschichten behindert werden (Abb. 2.1.1). Untersuchungen der Transportvorgänge zeigen, dass der kapillare Feuchtetransport über die Schichtgrenze, Putz und Mauerwerk, behindert wird. KRUS, KÜNZEL, KIEßL vermuten, „*dass die Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze durch Kristallbildung von Salzen aus dem Putz ‚verstopfen'.*“ [32] Dabei handelt es sich um eine Widerstandsschicht von 1 mm, der abhängig von der Materialkombination ist. Diese verringert den Flüssigtransportkoeffizienten um einen Faktor von 200 bis 2000. Dieser Faktor fließt in ihre Berechnungsmodelle zum Feuchtetransport ein.

Werden bei einer Altbausanierung die Putzschichten durch andere Materialien ausgetauscht, die zum Teil auch noch durch Haftbrücken oder Aufbrennsperren zum Zweck der besseren Ver-

---

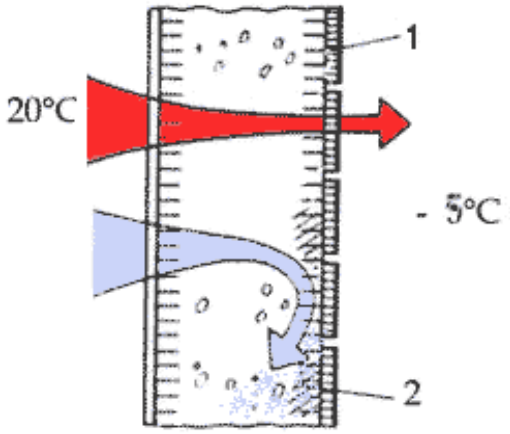
[31] *Steffen; Hansel, Frank; Jurk, Kasten; Toepel, Torsten; Strangfeld, Peter; Hygrothermische Untersuchung der Balkenköpfe von Einschubdecken bei innengedämmten Außenwänden unter Einbeziehung der Heizungstechnik, Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken , 2003, Fraunhofer IRB Verlag, S. 260*

[32] *Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 70*

arbeitung ergänzt werden, so hat dies einen Einfluss auf diese Schichtgrenze zwischen Putz und Mauerwerk. Auch wenn dieser Einfluss geringer ist, wie es in der Abb. 2.1.1 dargestellt wird, so kann es langfristig zur Feuchteerhöhung im Wandquerschnitt führen.

Gegen diese Grundvoraussetzungen einer schadensfreien Bauausführung wird gerade bei der heutigen Altbausanierung oft verstoßen. Historische Wandkonstruktionen bestehen vorwiegend aus gut Feuchte regulierenden Baustoffen Kalk und Ziegelsteinen, die heute bei der Sanierung durch kunststoffmodifizierte Beschichtungen versiegelt werden oder durch physikalisch chemisch ungünstigere Baustoffe ersetzt werden. Besonders gefährdet sind versiegte Holzbalkendecken (Fliesenbelag mit Schichtaufbau oder Fußbodenbeläge aus Kunststoff). Es werden selbst die seitlichen Lüftungsöffnungen unter den Fußleisten sowie die Dielung mit ihren Fugen verschlossen. Der ursprüngliche konstruktive Luft- und Feuchtigkeitsaustausch wird somit unterbunden.

Abb. 2.1.1: Eine äußere diffusionsdichte Schicht (1) behindert den Feuchtetransport nach außen und es kommt zur Durchfeuchtung der Konstruktion (2)



Die Schadenssammlungen [33, 34] zeigen meist nur eine prozentuale Verteilung von Feuchtigkeitsschäden im Gebäude. Es geht nicht hervor, wie viele gleichartige Konstruktionen vollständig schadensfrei oder ob gleichzeitig auch andere Einflussfaktoren an diesen Schäden beteiligt sind. Zum Beispiel gibt es in einem normalen Keller aus Ziegelsteinen keinen Holz zerstören-

---

[33] *Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden 1992*

[34] *Hofmeister, Gertrad; Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereich, Forschungsbericht Bd. 9, IRB-Verlag 1995*

den Pilzbefall, auch wenn eine äußere vertikale Abdichtung fehlt. Werden allerdings nasses Holz oder andere organische Stoffe gelagert, so ist ein Befall denkbar. Bedingter Wassereintrag von außen (z. B. Sickerwasser oder Hochwasser), Leistungswasserschäden oder unzureichende Lüftung durch den Einbau dichter Kellerfenster und -türen begünstigen einen biologischen Befall.

Am häufigsten erfolgt der Transport von Wasser in das Gründungsmauerwerk durch Sickerströmung. Unter hydrostatischem Druck dringt das Wasser in flüssiger Form in die Poren ein. Ebenfalls in flüssiger Form wird das Wasser durch die kapillare Saugkraft entgegen der Schwerkraft nach oben transportiert. Je enger die Kapillare ist, so höher kann das Wasser aufsteigen. Diese theoretisch unbegrenzte Höhe wird allerdings durch die Verdunstung begrenzt und es stellt sich ein Gleichgewicht ein. Kapillar brechende und verdunstungsoffene Wandflächen verhindern im Wesentlichen eine zu starke Durchfeuchtung. Im Gründungsbereich sind daher entsprechende vertikale und horizontale Verfahren zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes einzusetzen. Im Punkt 4. werden die wichtigsten Verfahren beschrieben.

Ein weiterer Wassertransport ist die Dampfdiffusion, deren Transportrichtung meistens von warm nach kalt und durch den Dampfdruck als treibende Kraft erfolgt. Es werden die Oberflächen der Poren mit Wasserdampf gesättigt und die Poren mit Wasser gefüllt. Anschließend kann das Wasser auch die nächsten Poren ausfüllen. Diese Dampfdiffusionsströme verbunden mit Phasenänderungen können für die Wärmebilanz von großer Bedeutung sein.[35]
Der Diffusion entgegengesetzt ist der Flüssigtransport, der weitgehend temperaturunabhängig von feucht nach trocken gerichtet ist.

Bei jedem Mauerwerk gibt es einen Gleichgewichtszustand für die Durchfeuchtungshöhe. Zwischen den beiden Größen, Wasseraufnahme und Wasserabgabe ist ein günstiges Verhältnis anzustreben. Nach diesem Prinzip funktionieren die Verfahren zur Mauerwerkstrocknung und -trockenhaltung. Die Wasseraufnahme wird durch Sperrschichten reduziert oder die Wasserabgabe durch diffusionsoffene Putze erhöht bzw. beides zusammen.[36]

---

[35] *Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 44*
[36] *Arendt, Claus; Seele, Jörg; Feuchte und Salze in Gebäuden 2000, Verlagsanstalt Alexander Koch, S.13-14*

„Gegenwärtig gibt es kritische Bemerkungen zur Existenz der aufsteigenden Feuchte an sich ... Es wird völlig zu Recht darauf verwiesen, dass insbesondere an historischen Bauwerken die Feuchteaufnahme aus der Luft gegenüber der aus dem Untergrund des Bauwerks überwiegt, weil hohe Konzentrationen löslicher Salze eine dominierende Rolle spielen."[37] *„Aufsteigende Feuchte: Diese Diagnose ist häufig nicht richtig, weil der Übergangswiderstand zwischen verschiedenen Stoffen, zum Beispiel Ziegelmörtel, sehr hoch ist. Die Steighöhe ist bei Ziegelmauerwerk deshalb etwa 20 cm, bei Bruchsteinmauerwerk kann sie etwas höher sein."*[38] Die Kapillarität spielt bei Baustoffen mit Porenradien zwischen 0,1 µm und 1 mm eine Rolle. Liegt die Größe der Kapillaren darunter oder darüber, so erfolgt praktisch keine aufsteigende Feuchte.[39]

In der Abb. 2.1.2 und 2.1.3 werden die Unterscheidungsmerkmale zwischen einer aufsteigenden Feuchtigkeit und der Kondensatbildung dargestellt. In den Wandquerschnitt einragende Holzbalken werden so unterschiedlich durch diese Feuchte belastet und in der Regel auch verschieden stark durch Holzzerstörer geschädigt. Treten Schäden auf, so hat man im Bild 2.1.2 vorwiegend am Randbereich einen Insektenbefall, der in Richtung Wandquerschnitt abnimmt.

Dieser Fall tritt in den oberen Etagen aber auch bei einer tauwassergefährdeten Innenwand auf, wenn der Nachbarraum nicht beheizt wird und dauerhaft eine niedrige Raumtemperatur hat. Deutlich erkennt man dies an der Schädigung auf der Oberseite am Deckenbalken direkt neben der Wand unter der Dielung. Bei der aufsteigenden Feuchte (Abb. 2.1.3) wird in der Regel der Balkenkopf vollständig geschädigt. Meistens sind hier auch Holz zerstörende Pilze vorhanden. Neben den Holzbalkendecken über einem Keller bestehen mehrheitlich die Decken im Erdgeschoss aus einer gemauerten Kappe oder Betondielen mit Schlackeschüttung und Lagerhölzer. Hier spielt bei einer Feuchtebelastung die Statik eine untergeordnete Rolle.
Problematisch ist hier nur ein Pilzbefall durch Holz zerstörende Pilze, wie zum Beispiel der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrimans)*.

---

[37] Forschung des Dahlberg-Instituts für Diagnostik und Instandsetzung historischer Bausubstanz e.V. Tagungsband der 9. Hanseatischen Sanierungstage "Putzinstandsetzung", Kühlungsborn 1998, Verlag Bauwesen Berlin 1998;
[38] Nürnberger, Elke; Bauforschung, Labor unter freiem Himmel, Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik AB unterhält in Holzkirchen die weltweit größte Freilandversuchstelle, Arconis I/99
[39] Zürcher, Christoph, Frank, Thomas; Bauphysik Baue und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 9

Abb. 2.1.2: Die Feuchteverteilung bei einer Tauwasserbildung ist an der Oberfläche am höchsten und nimmt in den Wandquerschnitt stark ab. Diese Feuchteverteilung liegt auch bei einer Salzbelastung (hygroskopische Durchfeuchtung) vor.

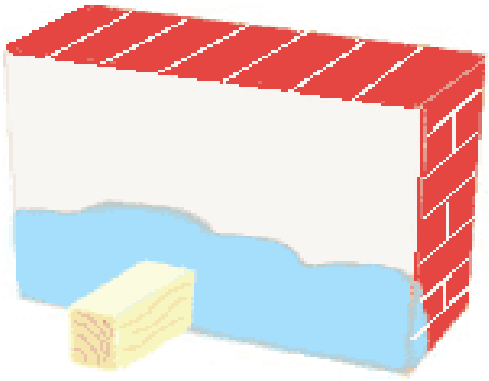
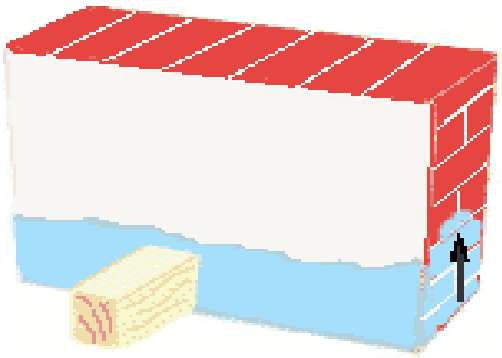


Abb. 2.1.3: Bei einer aufsteigenden Feuchtigkeit nimmt der Feuchtegehalt in Richtung des Mauerwerkquerschnittes zu und über die Mauerwerkshöhe ab.



Gerade im Erdgeschossbereich kommt es im Sommer auf dem Fußboden neben der Außenwand bei Altbauten zu einer Tauwasserbildung, wenn der Fußboden nicht gut gedämmt ist. Der Keller hat eine niedrige Raumtemperatur. Die Raumluft im Sommer hat in der Regel eine höhere relative Luftfeuchte als im Winter. Die Feuchte im unteren Mauerwerk bei älteren Wohngebäuden kann durch Kondenswasser verursacht werden, welches allein wirkt oder in Kombination mit einer aufsteigenden Feuchte oder Spritzwasser auftritt. In der Abb. 2.1.4 bildet sich im unteren Wandabschnitt in der Erdgeschosswohnung über der Tiefgarage bei einer etwa 10 Jahre alten Neubauwohnung mit Außendämmung Schimmel.

Abb. 2.1.4: Die Feuchte wird vorwiegend durch Kondenswasser verursacht.



Die Keller in älteren Mehrfamilienhäusern wurden so gebaut, dass eine bestimmte Feuchtigkeit vorhanden sein solle, da Kartoffel, Gemüse und Obst gelagert wurden. In vielen Fällen wurde keine Vertikaldichtung angelegt. Das seitlich eindringende Wasser transportierte aber auch gelöste Salze in den Wandquerschnitt. Dagegen wurden überwiegend Horizontaldichtungen aus Bitumenpappe bei dem Innenmauerwerk in die 2. oder 3. Steinlage über den Kellerboden und beim Außenmauerwerk in einer Höhe von ca. 1,60 bis 1,70 m eingelegt. Diese befindet sich teils oberhalb aber auch unterhalb der Geländeoberfläche. „*In den letzten Jahrzehnten hat man immer wieder versucht, die durch Feuchtigkeit bedingten Mauerwerk- und Putzschäden durch nachträgliche abdichtende Maßnahmen im Horizontal- und Vertikalbereich dauerhaft zu beseitigen. Dabei musste man immer wieder feststellen, dass dies nur bedingt möglich ist - viele der sichtbaren Schäden im feuchte- und salzbelasteten Mauerwerk in erster Linie auf die Wirkung von Salzen zurückzuführen sind*."[40] „*Trockenlegungsmaßnahmen ohne Entfernen der Salze ist der Feuchtehaushalt nicht auf kleiner 5 Masse-% zu reduzieren*."[41] Die hygroskopischen Eigenschaften der Mauersalze in Verbindung einer Tauwasserbildung an den kühleren Wandoberflächen stellen ein Problem für den historischen Fußbodenaufbau im Erdgeschoss dar. Von der gemauerten Kappe erfolgt ein Feuchteausgleich über die Fugen der Dielung mit der Raumluft im Erdgeschoss. Werden die Dielenbretter durch einen dicht schließenden Fußbodenbelag oder Estrichschicht verschlossen, so kommt es zum Feuchtigkeitsstau innerhalb der Schichten und eine biologische Schädigung der Holzteile findet statt, wie in der Abb. 2.1.5.

---

[40] *Weber, Helmut; Fehlervermeidung, Sanierputzsysteme im Langzeiteinsatz unter erschwerten Bedingungen, bausubstanz 4/1999, S. 42*

[41] *Ettel, Wolf-Peter u.a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992 Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 85-91*

Abb. 2.1.5: Auf die Dielung im Erdgeschoss wurde ein Gussasphalt aufgebraucht. Die Feuchtigkeit konnte nicht mehr entweichen und es bildete sich der Rosafarbener Saftporling (*Oligoporus placenta*).



Ein weiteres Problem ist die Oberflächentemperatur an den Wand- und Deckenkonstruktionen, die unter Umständen zur Tauwasserbildung führt. Hier findet ein komplizierter Einfluss auf die Baukonstruktion durch Wärmestrahlung, Wärmekonvektion und Wärmeleitung statt. Diese Transportmechanismen unterscheiden sich grundlegend von der Wärmeleitung durch die Materialschichten.[42]

Verschiedenen Einflussfaktoren können eine Temperaturerhöhung aber auch Absenkung bewirken. Dabei wirken innere aber auch äußere Einflüsse. Als beeinflussbare Größen soll hier das Nutzungsverhalten der Bewohner (Raumtemperatur, Luftfeuchte und Personenanzahl), der Standort der Möbel und der Heizung, die Heizungsart (Konvektions- oder Strahlungsheizung) sowie die Wandbeschichtung genannt werden. Nicht beeinflusst werden kann der Standort (Stadt oder Land, Solareinfluss zum Beispiel südliche Hanglage, Kältesee oder Bebauung in der Nachbarschaft). Treffen im ungünstigen Fall mehrere der genannten Faktoren zusammen, so kann die Baukonstruktion versagen und zu Feuchtigkeitsschäden führen. An anderer Stelle ist die gleiche Konstruktion vollständig schadensfrei. Das Zusammenwirken dieser verschiedenen Faktoren bestimmt den Feuchte- und Wärmestrom durch eine massive Konstruktion mit porösen Baustoffen. Veränderungen am vorhandenen schadensfreien bzw. schadensarmen Baukörper im Rahmen der Modernisierung sind genau zu prüfen, damit die bisherige bauphysikalische

---

[42] Zürcher, Christoph, Frank, Thomas; Bauphysik Baue und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S.28

Funktionsfähigkeit nicht außer Kraft gesetzt wird. Die DIN-Normen sind nicht zwangsläufig anerkannte Regeln der Technik. Sie werden durch den privat-gewerblich organisierten DIN e.V. aufgestellt. (BVerw.G. Beschluss vom 30.09.96 - 4 B 175/96.) Die Mangelfreiheit kann nicht ohne Weiteres einer DIN-Norm entnommen werden. Der Unternehmer schuldet ein mangelfreies Bauwerk und es ist seine Sache, diesen Erfolg herbeizuführen. Die Altbauten sind oft nach eigenen Bauregeln und Gesetzen erstellt worden, auf keinem Fall nach den aktuellen Normen. Deshalb sollte sich die Reparatur- und Neubaukonstruktion am bestehenden Gefüge anpassen. Bewährte Baumethoden sind besser als neue Sanierungswunder[43], wo noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen.

Die Auswahl zur optimalen Problemlösung zur Vermeidung von Feuchtebelastungen poröser Baustoffe wird durch die zahllosen Stoffparameter und deren starken Streuungen erschwert. So zeigen zum Beispiel die in der Fachliteratur veröffentlichen Werte für die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl einen großen Streubereich. Eine theoretische Durchdringung der Transportvorgänge die auf stationäre Bedingungen führt nur in der Regel zu punktuell theoretischen Ergebnissen, die sich nicht immer auf die Praxis übertragen lassen.

Die gekoppelten Wärme- und Stofftransporte in den porösen Baustoffen sind daher äußerst kompliziert. Die Regelmechanismen der Feuchtetransporte bei porösen Baustoffen sind bisher nur in ihren Ansätzen bekannt. Wie zum Beispiel die Sorption oder der Feuchtetransport durch einen porösen Baustoff. Eine theoretische Beschreibung der instationären Feuchtetransportvorgänge lässt sich aus dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nicht zweifelsfrei ableiten.

2.2. Der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitung

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Größe des Wärmestroms ist die Wärmeleitfähigkeit.
Dieser Proportionalitätsfaktor λ ist eine spezielle Eigenschaft der Stoffe, die auf die thermische Molekularbewegung zurückzuführen[44] und im geringen Maß von Temperatur sowie Druck

---

[43] Fischer, Konrad; Altbauten kostengünstig sanieren, 2007, GD-Verlag, S. 114
[44] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989; Bauverlag Berlin, S. 23

abhängig ist und experimentell ermittelt werden muss.[45] Besonders bei porösen Baustoffen wird die Größe der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt[46] bestimmt. „*Die Zunahme ist aber nur zum Teil auf die hohe Wärmleitfähigkeit des in den Poren oder Kapillaren vorhandenen Wassers ... zurückzuführen; auch der Energietransport bei dem in den Poren stattfindenden Wasserdampfdiffusionsvorgang wirkt sich auf den Wert der Wärmleitfähigkeit aus.*“[47] Gase sind schlechte Wärmeleiter mit der Größenordnung von $\lambda = 0{,}01$ bis 0,2 W/mK. Bei Wasser ist $\lambda = 0{,}587$ W/mK bei 10 °C und $\lambda = 0{,}604$ W/mK bei 20 °C groß. Sind die Poren bei einem Baustoff mit niedrigem λ-Wert (zum Beispiel Leichthochlochziegel $\lambda = 0{,}3$ W/mK) statt mit Luft, mit Wasser gefüllt, so erhöht sich hier die Wärmeleitfähigkeit. VÖLKNER[48] schätzt hierzu ein, da die Eigenschaften durch die wärmetechnischen Lufteinschlüsse (Lochung) bestimmt werden, ist der Einfluss geringer als bei früher gebräuchlichen schweren Baustoffen, wie den Vollziegeln. Können sich im Gründungsbereich aber die Lufteinschlüsse durch defekte Sperrschichten oder nach Überschwemmungen mit Wasser füllen, so sind sie den Vollsteinen feuchte- und wärmetechnisch unterlegen.

Der Hauptbestandteil des Mörtels ist der Sand. Der λ -Wert im trockenen Zustand von 0,33 W/mK erhöht sich im nassen Zustand auf $\lambda = 1{,}1$ W/mK.[49] Dagegen führt eine Feuchtebelastung des Klinkers mit $\lambda = 0{,}96$ W/mK zu einer verhältnismäßig geringeren Erhöhung des bereits hohen λ-Wertes. Sein Porenvolumen mit 5 bis 20 % ist kleiner als bei einem normalen Vollziegel mit 15 bis 30 %[50] und der Wasseraufnahmekoeffizient ist gleich null. Der Einfluss der Baustofffeuchte auf die Änderung der Wärmeleitfähigkeit ist nicht von der Rohdichte abhängig. Bei der Feuchtezunahme von 1 Masse-% bei Kalksandsein (1800 kg/m³) erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit um 8 %. Bei Ziegelsteinen (1200-2000 kg/m³) und gleicher Feuchtezunahme sind es 15 bis 20 %.[51] Wird bei den Baustoffen Blähtonbeton

---

[45] Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 207
[46] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989; Bauverlag Berlin, S. 24
[47] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 131
[48] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-27
[49] Meyer, Günter; Schiffner, Erich; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 365
[50] Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175
[51] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Aussenwänden, Diss. 2004 Universität Bochum, S. 2-27

und Hüttenbimsbeton die Feuchte von 5 voll.-% auf 15 voll.-% erhöht, so steigt die Wärmeleitfähigkeit um etwa 26 %.[52]

Die Wärmeleitfähigkeit ist zum Beispiel ein Bestandteil für die Berechnungen des Wärmestroms, des Wärmespeicherwertes oder des Wärmedurchgangskoeffizienten. Die Festlegung seiner Größe berücksichtigt den praktischen Feuchtegehalt (Dauerfeuchtigkeit).[53] Mit dem Feuchtegrad der Konstruktion ändert sich aber auch die Größe der Wärmeleitfähigkeit. Bei Natursteinen nimmt Sie annähernd linear mit dem Wassergehalt zu und kann den Wert bis 50 % erhöhen.[54]

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{u,\Psi}$ von der volumen- bzw. massenbezogenen Feuchte wird gemäß DIN ISO 10456[55] erfasst.

$$\lambda_{u,\Psi} = \lambda_{10,tr} \bullet F_m \qquad (2.1)$$

$$F_m = e^{fu\,(u2\,-u1)} \qquad (2.2)$$

$\lambda_{10,tr}$ = Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C, trocken
F_m = Korrekturfaktor
f_u = Feuchtebereich abhängiger Umrechnungsfaktor
u = praktischer Feuchtegehalt

Für die Anwendung der Korrektur- und Anpassungsfaktoren ist ein hoher messtechnischer Aufwand erforderlich. Dieser Berechnungsansatz ist für die tägliche praktische Arbeit gerade in der Altbausanierung nur in wenigen Fällen anwendbar.

Für die Berechnung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit λ (w) mineralischer Baustoffe schlägt KÜNZEL[56] einem Wärmeleitfähigkeitszuschlag b vor.

$$\lambda\,(w) = \lambda_0\,(1 + b \bullet w/\rho_s) \qquad (2.3)$$

λ (w) = Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs in [W/mK]
λ_0 = Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs in [W/mK]

---

[52] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2002, 2 .Aufl. Verlag Bauwesen Berlin, S. 53
[53] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989; Bauverlag Berlin, S. 95
[54] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 35
[55] DIN EN ISO 10456 (08.00) Baustoffe und –produkte – Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte
[56] Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 42

ρ_s = Rohdichte des trockenen Baustoffes in [kg/m³]
b = Wärmeleitfähigkeitszuschlag in [%/Mass.-%]
w = Wassergehalt in [kg/m³]

Der Wärmeleitfähigkeitszuschlag gibt an, um wie viel Prozent die Wärmeleitfähigkeit pro Masse-% Feuchte steigt. Er gibt in der Tabelle 4 folgende Werte für zwei ausgewählte Baustoffe an:

Blähton Bimsbeton ρ = 1400-2000 kg/m³, λ = 0,5-1,0 W/mK, b = 4%/M.-%

Normalbeton ρ = 2300 kg/m³, λ = 1,3-1,5 W/mK, b = 8%/M.-%.

Unter sehr definierten und kontrollierten Bedingungen wurden Messergebnisse aus den Einflüssen der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton erstellt.[57] Auch in diesem Fall ist für die Berechnung eine genaue Bestimmung der Rohdichte der Baustoffe und des volumen- oder massebezogenen Wassergehaltes erforderlich. Das ist in Regel mit einem hohen messtechnischen Aufwand verbunden. In der Praxis ist dies aus wirtschaftlichen Überlegungen nur bei ausgewählten Objekten möglich.

Da die Feuchtigkeit im Mauerwerk nur über einen entsprechenden messtechnischen Aufwand bestimmt werden kann, sollte für die praktische Anwendung die relative Luftfeuchte zugrunde gelegt werden. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der Feuchte im Baustoff und der Luftfeuchte, vergleiche Sorptionsisothermen. Steigt die Luftfeuchtigkeit an, so wirkt sich dies auch auf die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit λ aus. Da sich jeder Baustoff anders verhält, kann dies mit der nachfolgenden Formel ausgedrückt werden:

$$\lambda_x = \lambda \bullet [(1 + \varphi/100) \bullet x] \qquad (2.4)$$

λ_x = angepasste Wärmeleitfähigkeit unter praktischen Bedingungen in [W/mK]
λ = Wärmeleitfähigkeit nach Tabellenwert in [W/mK]
φ = relative Luftfeuchte in [%]
x = Faktor stoffabhängig und temperaturabhängig (ist experimentell zu ermitteln)

Das Mauerwerk und die angrenzende Luft stehen langzeitlich im Feuchtegleichgewicht. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte lässt sich gegenüber der Feuchte in der Konstruktion

---

[57] *Künzel, Helmut; Porenbetonbericht 11, Wärme- und Feuchteschutz. 2.durchges. Aufl. 2003, Bundesverband Porenbeton Selbstverlag, S. 3-4*

schneller und einfacher bestimmten. Die experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit lässt sich auf der Grundlage der relativen Luftfeuchten abschätzen. Zum Beispiel λ_{50} bei einer relativen Luftfeuchte um 50 % (normale Belastung) oder λ_{80} bei einer relativen Luftfeuchte um 80 % (in Räumen mit einer ständig hohen Luftfeuchte). Da sich an jedem Punkt im Wandquerschnitt sowie über den Jahreszyklus die Feuchtegrade unterscheiden, kann dieser Wert nur mit hinreichender Genauigkeit gewertet werden. Berechnungen führen nur zu einem genaueren theoretischen Ergebnis. Für die praktische Anwendung ist die Berücksichtigung der Feuchte im Baustoff mit einem Umrechnungsfaktor wenig sinnvoll.
Es ist für die Praxis daher sinnvoll eine zu erwartende langfristige Feuchtehöhe zu verwenden.
Ein Beispiel wäre:

$$\lambda_f = \lambda_{60} \qquad (2.5)$$

λ_f = angepasste Wärmeleitfähigkeit unter praktischen Bedingungen in [W/mK]
λ_{60} = Wärmeleitfähigkeit unter normaler Feuchtebelastung bei einer relativen Luftfeuchte von durchschnittlich 60 % in [W/mK]

In der Abb. 2.1.6 werden im Schema vereinfacht wichtige Einflussfaktoren dargestellt, die eine mögliche Einflussnahme auf die Oberflächentemperatur und Feuchte in einer massiven Wandkonstruktion haben. Die Stadien der Feuchtetransportvorgänge und Speichervorgänge können sich überlagern, sodass gerade im mittleren Feuchtebereich eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist.[58] In diesem Schema werden die wirkenden Feuchtetransportmechanismen Wasserdampfdiffusion verbunden mit den Phasenänderungen und kapillarer Wassertransport. Die Einflüsse durch Gravitation, elektrokinetische Felder oder die Ionenkonzentration sollen nicht gesondert hervorgehoben werden.

KÜNZEL[59] und auch KRUS[60] konzentrieren sich bei ihren Untersuchungen auf die Wasserdampfdiffusion und den kapillaren Wassertransport. Die anderen feuchtetechnischen Mechanismen werden mit entsprechenden Begründungen aus der Sicht ihrer bauphysikalischen Themen-

[58] *Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Aussenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-15*
[59] *Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 21, 43-44*
[60] *Krus, Martin; Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe, theoretische Grundlagen und neue Messtechnik 1995, Diss., Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen Universität Stuttgart, S. 89*

stellung als unerheblich bzw. vernachlässigbar eingeordnet. Ebenso werden die Wärme- und Feuchtetransporte über die Luftkonvektion nicht betrachtet.
In verschiedenen Arbeiten erfolgen Untersuchungen an Bauteilabschnitten oder Proben unter Laborbedingungen. Die gewonnenen Erkenntnisse klären jedoch noch nicht ausreichend die einzelnen Wirkungsmechanismen dieser Teilströme und ihre Wechselwirkung in der variantenreichen Praxis.

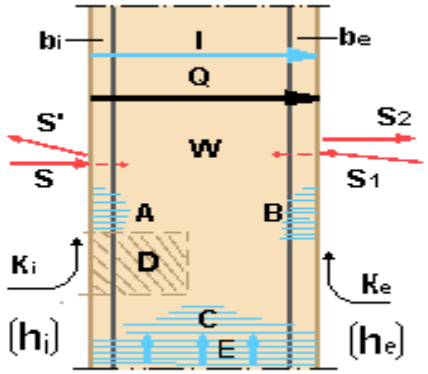
Die in der Grafik dargestellte Durchfeuchtung im Punkt A (Innenseite) stellt einen ungünstigen Fall dar. Bei der Kondenswasserbildung zum Beispiel im Bad oder an der unteren Außenwandoberfläche verändert sich das Wärmespeichervermögen des Baustoffs. Dieses setzt sich aus der Speicherfähigkeit des trockenen Baustoffs, des enthaltenen Wassers unter Berücksichtigung des Phasenwechsels zusammen.[61] Zur Erhöhung der Oberflächentemperatur des feuchten Baustoffs ist ein größerer Wärmeeintrag über die Konvektion und oder Strahlung erforderlich, als bei einem trocknen Baustoff. Siehe hierzu das Mollier h,x-Diagramm.

Dagegen ist eine äußere Durchfeuchtung im Punkt B (Außenseite) weniger kritisch, die durch äußere Niederschläge verursacht werden kann. Wird zum Beispiel ein Gesimsband durch Regen befeuchtetet, so vergrößert sich die spezifische Wärmespeicherkapazität. Dabei beträgt die spezifische Wärmekapazität für Luft c_p = 1,007 kJ/kgK (20°C), für Dampf c_{pD} = 1,86 kJ/kgK und für Wasser c_F = 4,182 kJ/kgK (20 °C).[62] Bei solarem Einfluss wird für einige Zeit Wärme an der Außenseite der Wandkonstruktion gespeichert. Hier ist aber auch der Energiebedarf zur Phasenveränderung zur Verdampfung (Verdunstungsenthalpie) von Wasser (bei 0 °C 2500 kJ/kg oder 50 °C 2383 kJ/kg)[63] zu beachten, die zur Abkühlung des Bauteils durch Wärmeentzug führt. Liegt eine niedrige Außentemperatur vor, so kommt auch noch die Schmelzwärme des Eises (333,4 kJ/kg) hinzu. Damit verändert sich auch die Isotherme im Wandquerschnitt und damit auch die Oberflächentemperatur an der Innenseite. In diesem Zusammenhang soll auch auf die 1953 durch die EMPA durchgeführten Versuche (siehe Punkt 2.1.2) hingewiesen werden. [64]

---

[61] *Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 35*
[62] *Meyer, Günter; Schiffner, Erich; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig Tafel 10.2 und 10.4, S. 366f*
[63] *Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996 Berlin Ernst & Sohn, S. 52*
[64] *Bosser, Paul; Wärmehaushalt und Mauerwerk, deutsche Bauzeitung db 9/08, S .58-62*

Abb. 2.1.6: Schema der möglichen Einflüsse auf die Oberflächentemperatur



Q = Wärmestrom durch die Wand

I = Wasserdampf-Diffusionsstrom
λ = Wärmeleitfähigkeit
$h_{i/e}$= Wärmeübergangskoeffizient
b = Wärmeeindringkoeffizient (1-2 cm)
S = Wärmestrahlung zur und von der Wand (1-2 mm)
A = Tauwasseranfall innen
B = Durchfeuchtung von außen, z. B. Regen
C = Mauerdurchfeuchtung
D = Deckenbalkenkopf
W = Wärmespeicherwert
K = Konvektion
E = Kapillarer Wassertransport

Die vollständige Durchfeuchtung des Wandquerschnitts im Punkt C führt zur Verringerung der inneren Oberflächentemperatur, da die Wärmeleitfähigkeit durch die Wandkonstruktion größer ist. Diese höhere Feuchtigkeit des Wandbaustoffs führt jedoch langfristig zur Zerstörung des Baukörpers, zum Beispiel durch Herauslösen der Bindemittel, den Hydrationsdruck gelöster Salze oder die treibende Wirkung durch den Wechsel des Aggregatzustandes des Wassers zu Eis im Winter und umgekehrt. Ebenso werden die Möglichkeiten einer biologischen Schädigungen der Konstruktion bzw. Baustoffe begünstigt.

Diesen unterschiedlichen Einflüssen und Wechselwirkungen einer möglichen Feuchtebelastung im Wandquerschnitt ist der Deckenbalkenkopf im Punkt D ausgesetzt, der im günstigen Fall über viele Jahre schadenfrei und bei einer Feuchtebelastung einer biologischen Zerstörung ausgesetzt ist.

2.3. Der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und einer möglichen Durchfeuchtung der Bauteiloberfläche

2.3.1. Die Oberflächentemperatur

Hat eine poröse Bauteiloberfläche gegenüber der angrenzenden Luft eine größere Temperaturdifferenz, so wird die Oberfläche befeuchtet oder sie gibt Feuchte durch Sorption an die Luft ab. Eine mögliche Tauwasserbildung sowie die Sorptionsvorgänge hängen von der vorliegenden Höhe der Luftfeuchte, der Temperatur und jeweiligen Baustoffeigenschaften ab. Ungünstige Situationen führen zu einer Schimmelpilzbildung auf der Innenseite der Außenwand vor allem in Höhe des Fußbodens oder in den punktuellen Zimmerecken. Auf der Außenseite kommt es bei einer Tauwasserbildung zu einem Algenbewuchs.

Die Oberflächentemperatur an einer Bauteiloberfläche wird durch verschiedene Faktoren und ihre Wechselwirkungen bestimmt. Davon sind zum Beispiel der Durchfeuchtungsgrad, der Wärmeübergangswiderstand, die Luftgeschwindigkeit (Konvektion) die Wärmstrahlung oder die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs betroffen. Diese Werte sind in vielen Fällen nicht bekannt und müssen eingeschätzt werden. Etwas genauer lassen sich dagegen die Rohdichten bestimmen und der Schichtaufbau lässt sich eventuell aus den Bauunterlagen entnehmen.

„*Die Energiebilanz eines Bauteils wird ... nicht allein durch die Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Konvektion und Strahlung bestimmt, sondern auch durch den Transport von Wasser oder Dampf und damit verbundene Gefrier-, Tau-, Kondensations- und Verdampfungsvorgänge*."[65]

Gegenwärtige erfolgt die energetische Bewertung eines Gebäude nach dem Transmissionswärmeverlust durch eine ungestörte Bauteilfläche[66] (Abb. 2.3.1). Man geht davon aus, dass stationäre[67] Wärmeleitungen überwiegen. Die Wärmeleitung entsteht durch die Änderung der Abstände und der davon abhängigen Bindungskräfte bei den Bewegungen der Moleküle im festen Körper. Es werden langsamere Moleküle beschleunigt und schnellere ausgebremst.[68] Dabei ist

---

[65] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996, Berlin Ernst & Sohn, S. 53

[66] Homann, Martin; Wärmetechnische Anforderungen an die Gebäudehülle, ARCONIS, 4/00, S. 30

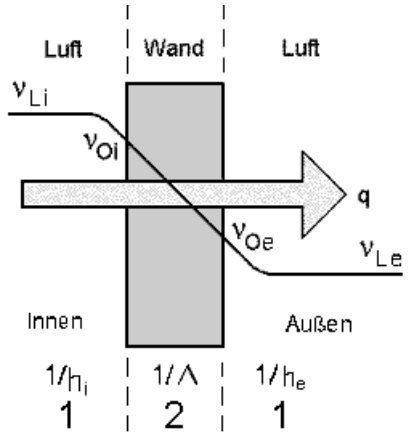
[67] Ist gekennzeichnet durch den gleichmäßigen Temperaturverlauf über einen längeren Zeitabschnitt bei konstantem Wärmstrom

[68] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996, Berlin Ernst & Sohn, S. 3

die Wärmeleitfähigkeit λ einer der wichtigsten Stoffgrößen im Wärmeschutz.[69] Auf diese Grundlage stützen sich die gegenwärtigen energetischen Berechnungen bei einem Gebäude.

Der Wärmedurchlasskoeffizient Λ kennzeichnet die Wärmemenge, die in einer Stunde durch jeden Quadratmeter eines Bauteils bekannter Dicke im Dauerzustand der Beheizung hindurchgeht, wenn der Temperaturunterschied zwischen der Luft auf beiden Seiten dieser Wand 1 K beträgt. Nach Fourier ist der im Stoff geleitete Wärmestrom Φ dem Temperaturgefälle dt/dx und der Wandfläche A senkrecht zum Wärmestrom proportional (siehe Abb. 2.3.1).[70]

Abb. 2.3.1: Wärmedurchgang durch eine ebene Wand, 1 = Wärmeübergang, 2 = Wärmeleitung



Der Wärmedurchlasskoeffizient berechnet sich aus:

$$\Lambda = \lambda/d \quad [W/m^2K] \qquad (2.6)$$

Λ = Wärmdurchlasskoeffizient in [W/m²K]
λ = Wärmeleitfähigkeit in [W/mK]
d = Wandstärke in [m]

Bei feuchten Baustoffen verändert sich die Wärmeleitfähigkeit und führt so zu einer Vergrößerung des Wärmedurchlasskoeffizienten. Die verschiedenen Baustofffeuchten sind dafür verantwortlich, dass gleiche Wandkonstruktionen mit demselben Baustoff energetisch unterschiedliche Eigenschaften haben. Dies wirkt sich auch auf die Oberflächentemperatur aus. Im Verfah-

---

[69] Schulz, Peter; Handbuch für Innenausbau, Schall-, Wärme-, Feuchte-, Brandschutz, 7. Aufl. 2000, Deut. Verlags-Anstalt Stuttgart München, S. 222
[70] Rauch, Peter; Schimmelpilze in Wohngebäuden, 2. Aufl. 2007, Verlag Peter Rauch, S. 132

ren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung nach KÜNZEL werden „*Bei der Berechnung des Wärmetransports“* die *„Wärmeleitung und Enthalpieströme durch Feuchtebewegung mit Phasenveränderung sowie die kurzwellige Sonnenstrahlung berücksichtigt*.“[71]

Die Berechnung des stationären Wärmestroms durch eine Wand erfolgt nach:

$$\Phi = UA\,(\vartheta i - \vartheta e) \qquad (2.7)$$

$$\vartheta i = \frac{\Phi}{U\,A} + \vartheta e \qquad (2.8)$$

ϑ = Temperatur in [°C]
Φ = Wärmestrom in [W]
hi = Wärmeübergangskoeffizient innen in [W/m²K]
he = Wärmeübergangskoeffizient außen in [W/m²K]
A = Fläche in [m²]
U = Transmissionswärmeverlust in [W/m²K]

Wird der Feuchtegehalt des Baustoffs nicht berücksichtigt, so können zwischen berechneter und der gemessenen Oberflächentemperatur Differenzen auftreten. Die energetischen Berechnungen sind somit ungenau.

2.3.2. Der Einfluss der Feuchte auf das Wärmespeichervermögen eines porösen Baustoffs

KÜNZEL[72] erfasst bei seiner Berechnung die spezifische Wärmekapazität der unterschiedlichen Phasen des Wassers. Allerdings lassen sich die jeweiligen und die Dauer der einzelnen Aggregatzustände sowie ihre Verteilung im Wandquerschnitt nur schätzen. Der volumen- bzw. massenbezogene Feuchtegehalt wird nicht nur von den stofflichen Eigenschaften bestimmt, sondern auch von den äußeren Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Wind, örtliche Lage (Klima)

---

[71] *Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 8, 64*

[72] *Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 40*

oder Solarstrahlung. Gerade die Solarstrahlung verursacht instationäre Verhältnisse im Wandquerschnitt, sodass ein ständiger Wechsel der Phasen des Wassers und der Enthalpie auftritt. Die Enthalpie setzt sich aus der Enthalpie des trockenen Baustoffs und des Wassers zusammen.

$$H = Hs + Hw \quad (2.9)$$

Die Enthalpie für den trockenen Baustoff berechnet sich aus:

$$Hs = \rho s * cs * \vartheta \quad (2.10)$$

Hs = Enthalpie des trockenen Baustoffs in [J/m³]
ρs = Rohdichte des Baustoffs in [kg/m³]
cs = spezifische Wärmekapazität in [J/kgK]
ϑ = Temperatur in [°C]
Hw = Enthalpie der Baustofffeuchte in [J/m³]

Die Größe der Enthalpie der Baustofffeuchte in der Formel 2.9 ist daher nur eine geschätzte Größe und beeinflusst das Ergebnis.

Das Mauerwerk besteht aus den Baustoffen Mauerstein und Mörtel, die sich recht unterschiedlich verhalten. Bei diesem nicht homogenen Wandaufbau treten örtlich schwankende Wärmeströme mit unterschiedlichen Oberflächentemperaturen auf.

Die Oberflächentemperaturen sowie die Wärmeleitfähigkeit müssen gemittelt werden. λm des Mauerwerkes ist experimentell an einem Prüfkörper mit mindestens 1 m Kantenlänge oder mithilfe numerischer Rechenverfahren zu ermitteln.[73]

KRUS[74] hat im Labor an Prüfkörper die Wasserverteilungen, das Saugverhalten und die Wasserweiterleitung gemessen. Die Ergebnisse zeigen wichtige theoretische Grundlagen für das Verständnis des Verhaltens der Feuchtigkeit unterschiedlicher Baustoffe. Es wirken jedoch in der Praxis so viele Einflussfaktoren auf ein Bauteil, siehe Abb. 2.1.6, sodass innerhalb eines Querschnitts und selbst in der Höhe unterschiedliche Feuchten vorliegen. Eine Bestimmung

---

[73] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 131
[74] Krus, Martin; Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe, theoretische Grundlagen und neue Messtechnik 1995, Diss., Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen Universität Stuttgart, S. 75f

einer durchschnittlichen oder gar maximalen Verdunstungsenthalpie an einer durch Niederschlag ausgesetzten Außenwand dürfte sich äußerst schwierig erweisen. Die Feuchtebelastung einer Fassade hängt von der Menge und Dauer des Niederschlags, aber auch von der Windbelastung ab, welche das Wasser an die Fassade drückt. Ebenso sind die Oberflächenstruktur und der s_d-Wert der Beschichtung von Bedeutung.

In zahlreichen Veröffentlichungen wird die Einflussnahme der instationären Wärmeströme unter dem Gesichtspunkt der energetischen Gewinne mithilfe des Wärmespeichervermögens der massiven Konstruktionen unterschiedlich betrachtet.[75, 76, 77, 78, 79] Bei diesen Beurteilungen geht es vordergründig um energetische Gewinne durch die passive Nutzung der Strahlungsenergie von der Sonne und den damit verbundenen Temperaturwechsel im massiven wärmespeicherfähigen Wandquerschnitt.

SCHMIDT [80] hatte für die näherungsweise Berechnung der instationären Wärmeleitung das nachfolgende Differenzverfahren entwickelt.

$$\frac{\Delta t\ (x = \text{konst.})}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{\Delta t\ (\tau = \text{konst.})}{\Delta x^2} \qquad (2.11)$$

Δx = Schichtdicke,
$\Delta \tau$ = Zeitabschnitt,
Δt = Änderung der Temperatur an einer bestimmten Stelle

---

[75] Bagda, Engin; in Weinmann, Kur; Handbuch Bautenschutz Bd. 2, Bauphysik und Bauchemie, Pkt. 4 Instationäre Wärme- und Feuchteströme durch Baustoffe, 1992, expert Verlag , S. 53ff
[76] Ebel, Jochen; Der u-Wert: nur stationär oder auch instationär? bauzeitung 3/02, S. 56 ff
[77] Sommerlicher Wärmeschutz: Massiv besser als Leichtbauweise, Das Bauzentrum/Baukultur 7-2003, S. 42
[78] Zürcher, Christoph; Frank, Thomas: Bauphysik - Bauen und Energie; Leitfaden für Planung und Praxis, Bd. 2, 1998 vdf Hochschul-Verlag der ETH Zürich und B.G. Teubner, Stuttgart, S. 40ff
[79] Borbran, Hans W.; Borbran-Wittfoht, Ingrid; Handbuch der Bauphysik 7. Aufl. 1994, vieweg,, S. 56f
[80] Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig S. 295

MEIER[81] berücksichtigt die absorbierte Solarstrahlung speicherfähiger Baustoffe als einen Bonus in der folgenden Formel:

$$u_{eff} = \frac{I}{d / \lambda + 0{,}17} - \frac{I \times a_s}{\Delta\theta_L} \times \frac{(b + f_d \times u)}{(b + f_d \times h_e)} \qquad (2.12)$$

b = Wärmeeindringkoeffizient in [Wh0,5/mK]
d = Abmessung der Außenkonstruktion, Dicke des Bauteils in [m]
λ = Wärmeleitfähigkeit der Außenkonstruktion in [W/mK]
I = durchschnittliche Strahlungsintensität während einer 12stündigen Einstrahlungszeit in [W/m^2]
U = Wärmedurchgangskoeffizient in [W/m^{2}K]
as = Strahlungsabsorptionsgrad [-]
Δ θL = Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in [K]
fd = Faktor, der den mitwirkenden Speicherquerschnitt der Konstruktion sowie die entsprechende Wärmeflusszeit berücksichtigt in [h ^{0,5}], für einen mitwirkenden Parabelquerschnitt gilt ein Faktor von 7,63
he = außerer Wärmeübergangskoeffizient in [W/m^{2}K], ein experimentell ermittelter Wert von 17,5 W/m^{2}K.
ρ = Dichte des Baustoffes in [kg/m^3]
c = spezifische Wärmekapazität in [Wh/kg K]

Diese Berechnungsmethode ergibt ein besseres praxisbezogenes Ergebnis als die Berechnung nach dem Transmissionswärmeverlust. Aber auch hier berücksichtigt der Wärmeeindringkoeffizient nicht die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Äußere Einflussfaktoren, wie die Wärmekonvektion oder die Strahlungsreflexion, werden nicht berücksichtigt. Mit dieser Formel kann nur $U_{eff.}$-Wert eines monolithischen Wandaufbaus berechnet werden.

Bei der gegenwärtigen Betrachtung der passiven Nutzung der Solarenergie geht es vordergründig um Energieeinsparmöglichkeiten. Dabei werden lediglich die Gewinne durch Fenster berücksichtigt. Aus der Sicht der Autoren der deutschen Wärmeschutzvorschriften sind mögliche energetische Gewinne aus Solarstrahlung nicht erwünscht, da sonst die nachträgliche Wärmedämmung auf der Fassade wirtschaftlich noch schlechter abschneiden würde. Messungen durch die Tampere University of Technology zeigten bei einer massiven Außenwand einen um ca. 30-40 % geringeren Energieverbrauch als die berechneten Werte nach den Bauvorschriften.[82]

---

[81] Meier, Claus; Energieeinsparverordnung und alternative Möglichkeiten, Vortrag am Institut für Aus- und Weiterbildung Quedlinburg 10.2.2001, S.12
[82] Ralf Lindberg; Impact of the Exterior Wall Structure on the Energy Efficiency of Building, Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering, Structural Engineering, Minna Teikari, Hannu Keränen

Durch nachträgliche Dämmmaßnahmen ändern sich die Eigenschaften des Feuchtetransportes in den porösen Wandkonstruktionen. Durch die passive Nutzung der Solarenergie erfolgen nicht nur instationäre Wärmeströme, sondern es werden auch die Feuchtetransportprozesse im Querschnitt des Mauerwerkes aktiviert. Gerade der letzte Punkt wird in der energetischen Betrachtung vernachlässigt. Verschiedene grafische Darstellungen in der Literatur zeigen die Verteilung der Globalstrahlung nach der Himmelsrichtung.[83, 84, 85]

In Abhängigkeit von den Baustoffeigenschaften und dem Schichtaufbau erfolgt durch die passive Nutzung der Solarenergie eine Reduzierung der Feuchtigkeit im massiven Mauerwerk. Die Feuchtebelastungen an den Balkenköpfen bei Gebäuden mit Holzbalkendecken sind z. B. auf der Wetterseite geringer als auf der ständig beschatteten Nordfassade, welche nur selten einer Niederschlagsbelastung ausgesetzt ist. Diese Aussage wird auch durch eine Versuchsdurchführung an einer westlichen Sandsteinfassade am 08.09. und 09.09.1992 bestätigt. Hier wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperatur am 2. Tag durch die Sonnenstrahlen um 20 K über der Umgebungstemperatur anstieg, obwohl ähnliche Temperatur- und Feuchteverhältnisse vorlagen. Die Verdunstung der Feuchte im Mauerwerk „*verbessern sich durch die Sonneneinstrahlung um ein Vielfaches und führen dadurch zu einer deutlichen Trocknungsbeschleunigung.*“ Es wird weiterhin festgestellt, dass der starke Einfluss der Sonneneinstrahlung dazu beiträgt, dass exponierte Bauteile häufig weniger geschädigt sind als geschützte verschattete Bereiche.[86]

Ältere Mehrfamilienhäuser mit Holzbalkendecken wurden auch aus statischen Gründen mit stärkerem Außenmauerwerk errichtet siehe Tabelle 2.1.

Damit lag primär das Wärmespeichervermögen bei den Außenwänden. Moderne Konstruktionen kommen mit schlanken Außenwänden aus, sodass sich bei ordentlicher Planung das Wärmespeichervermögen im Gebäudeinneren (Zwischenwände und Decken) befindet.[87]

---

[83] Werner, Hanns; In Gösele, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10.Aul., 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 193
[84] Bobran, Hans W.; Handbuch der Bauphysik 7. Aufl. 1994, Verlag vieweg, S. 51
[85] Prox, Werner; Passive Sonnenenergienutzung – Planungshinweise und Bauteile RKW Merkblatt 80, S. 3 in Wirtschaftliche Energienutzung an Gebäuden RKW-Verlag 1989
[86] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag S. 40
[87] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin, S. 114

Tabelle 2.1: Übersicht der Wandquerschnitte der Außenwände [88]

	Erdgeschoss	I. OG	II. OG	III. OG	IV. OG
Wien 1870	790 cm	790 cm	632 cm	632 cm	470 cm
Bayern 1886	740 cm	595 cm	595 cm	450 cm	450 cm
DIN 4106 1953	490 cm	365 cm	365 cm	365 cm	365 cm

Bei den heutigen gut regelbaren Zentralheizungen hat eine große Wärmespeicherfähigkeit keine Auswirkungen auf den Energieverbrauch.[89] Dies verleidet den Nutzer jedoch zur Temperaturänderung der Raumluft, zum Beispiel die Absenkung der Temperatur in der Nacht. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Nachtabsenkung sowohl bei leichter als auch schwerer Konstruktion Wärmeenergie eingespart wird.[90] Auskünfte von Bewohnern, die gegenüber ihren Nachbarn keine Nachtabsenkung durchgeführt haben, sind zum gegenteiligen Ergebnis gekommen. Es kommt einmal darauf an, wie groß die Temperaturdifferenz ist und wie lange eine niedrigere Temperatur der Raumluft vorliegt bzw. wie viel Stunden es pro Tag im Raum wärmer sein soll.

Bei der Absenkung verringert sich die innere Oberflächentemperatur als Folge der niedrigeren durchschnittlichen Raumtemperatur, was zur Erhöhung der angrenzenden relativen Luftfeuchte und somit zur Feuchtezunahme an der Innenseite der Bauteiloberfläche führt, welche durch Diffusion in den Wandquerschnitt transportiert wird. Bei kurzen Erwärmungsphasen kann diese Feuchte nicht mehr vollständig an die Raumluft abgegeben werden.

Diese Situation kommt gerade bei Konvektionsheizungen vor, wo kurzzeitig die Lufttemperatur erwärmt wird, aber der Wärmeträger Luft eine feuchte Wand mit seinem wesentlich höheren Wärmespeichervermögen nur ungenügend erwärmen kann. Bei einer annähernd gleichen Raumtemperatur kommt es somit zur geringen Feuchteerhöhung der massiven Außenwand mit

---

[88] Ahnert, Rudof; Krause, Karl-Heinz; Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Gründung, Wände, Decken, Dachtragwerke, 1. Aufl. 1985,Verlag für Bauwesen , S. 18 Tafel 5
[89] Werner, Hanns; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10.Aul. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 191
[90] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 141

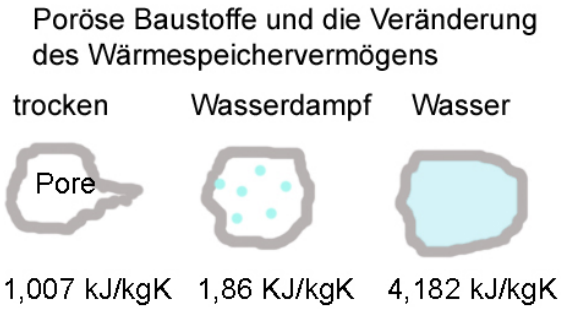
porösen Baustoffen. Bei einer Leichtbaukonstruktion nehmen die Umhüllungsflächen im Verhältnis weniger Feuchte auf, hier ist eine gewisse Nachtabsenkung sinnvoll.

Bei Bauwerken mit tragenden Holzkonstruktionen wirkt sich bereits eine geringe durchschnittliche Erhöhung der Holzfeuchtigkeit ungünstig aus. Die Fraßaktivität der Holz zerstörenden Insekten ist vordergründig vom Feuchtegehalt des Holzes abhängig.

Baustoffe haben meist ein unterschiedliches Adsorptions- und Desorptionsverhalten. Die Abtrocknung der Bauteiloberfläche, zum Beispiel beim Baustoff Blähtonbeton, erfolgt in einem höheren Niveau und kann so langfristig zur höheren Durchschnittsfeuchte des massiven Bauteils führen.

Für den Feuchtetransport und dem Feuchteausgleich zwischen dem Ziegelmauerwerk, mit der niedrigsten Dauerfeuchte von 1 bis 1,5 Vol.-% aller Baustoffe,[91] und den Holzbalken der Deckenkonstruktion ist auch das Wärmespeichervermögen der Außenwände von Bedeutung. Dieses setzt sich aus der Enthalpie des trockenen Baustoffs und des Wassers zusammen. Sind die Poren mit flüssigem oder dampfförmigem Wasser gefüllt, so verändert sich das Wärmespeichervermögen der Konstruktion (siehe Abb. 2.3.2).

Abb. 2.3.2: Der Einfluss der Feuchte auf das Wärmespeichervermögen eines porösen Baustoffes.



Ungünstig wirken sich Natursteinwänden und sehr dicke Wandkonstruktionen, wie zum Beispiel bei Burgen und Schlössern, wegen ihrer hohe Tauwassergefährdung als Folge der großen Wärmespeicherfähigkeit aus. Bei Wandkonstruktionen aus Natursteinen liegt im Vergleich zum Ziegelmauerwerk ein höherer Schädigungsgrad an den Balkenköpfen der Deckenbalken vor.

---

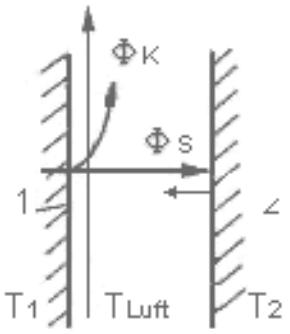
[91] *Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial, 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175*

Bei den untersuchten Wandkonstruktionen aus Natursteinen lag eine höhere Feuchte an der Wandoberfläche vor. In Einzelfällen konnte sich selbst an Holz freien Wandabschnitten der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrimans*) bilden. Als Nahrungsgrundlage dienten hier Staubablagerungen oder sich mit der Wandoberfläche berührende organische Gegenstände (Holzregale, Papier usw.). Technisch lässt sich dies nur über eine ausreichende Temperierung der Wandoberflächen mit Hilfe von Strahlungsheizung verhindern. Früher wurde dieses Tauwasser durch eine hohe Lüftungsrate verringert.

Der Wärmestrom an der Bauteiloberfläche setzt sich aus konvektivem Wärmeübergang und der Wärmestrahlung zusammen, Abb. 2.3.3 und Formel 2.13. ZÜRCHER[92] ergänzt dies noch durch Wärmeleitung. Die Wärmeleitung der Luft (λ=0,025 W/mK bei 0 °C) ist gegenüber den anderen Größen klein.

Abb. 2.3.3: Schematische Darstellung des Wärmestroms an einer Wandoberfläche[93]

TLuft = Raumluft



$$\Phi = \Phi_K + \Phi S \qquad (2.13)$$

ΦK = Konvektion
ΦS = Wärmestrahlung
T1/2 = Oberflächentemperatur

---

[92] *Zürcher, Christoph, Frank, Thomas; Bauphysik Baue und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S.28*

[93] *Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 205*

Innerhalb eines Gebäudes sind diese Größen noch annähernd genau bestimmbar. Dagegen sind die Wärmeströme des Gebäudes mit seiner Umgebung sehr komplex. So hängt die Größe des Wärmeübergangs von der Lage des Objektes und der Gebäudegeometrie ab. Noch komplizierter ist die Bewertung des Einflusses der Wärmestrahlung. Die Hüllfläche des Gebäudes steht in Wechselwirkung zur Fläche der Umgebung, die sich aus einer Vielzahl von Einzelwerten zusammensetzt. Es findet ein Strahlungsaustausch mit der Umgebung statt, wie zum Beispiel beheizte oder unbeheizte Nachbargebäude, Bäume aber auch mit dem Weltall. Ein Körper mit der Temperatur über null Kelvin emittiert (eigene) nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz Wärmestrahlung aber reflektiert auch einen Teil der auftreffenden fremden Strahlung. Im Punkt 2.6 wird darauf ausführlicher eingegangen.

Bei einem Gebäude gilt:
Energie kann weder aus Nichts entstehen noch in Nichts vergehen, sondern sich die einzelnen Energiearten nur ineinander verwandeln. Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.[94]

Die Wärmebilanz bei einem Gebäude resultiert aus Teilströmen. Die wichtigsten Ströme sind:

a) Konvektion, Wärmeaustausch zwischen Gasgemisch (Luft) und Stoffoberfläche,
b) Infrarotstrahlung, Wärmeaufnahme des Baustoffs durch Sonnenstrahlung oder Infrarotheizung,
c) Langwellige Strahlung, Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Umgebung.
d) Wärmeleitung, Wärmeaustausch zwischen Stoffoberfläche und dem Baustoff [95]

Einzelne Wirkungsmechanismen dieser Teilströme und ihre gegenseitige Beeinflussung sind bisher nicht ausreichend geklärt. In porösen Baustoffen kommt noch der sich ständig veränderliche Feuchtegehalt hinzu. Erhält zum Beispiel ein Sims von 3 Seiten Wärmestrahlung und wird dieser durch einen kurzen Niederschlag durchfeuchtet, so muss die Verdunstung sowie die Wärmeableitung von fließendem Wasser unter gleichzeitiger Erhöhung der Wärmespeicherka-

---

[94] Clausius, Rudolf; Die mechanische Wärmetheorie, 3. Aufl. 1887, Vieweg Braunschweig, S. 81
[95] Bagda, Engin; in Weinmann, Kur; Handbuch Bautenschutz Bd. 2, Bauphysik und Bauchemie, Pkt. 4 Instationäre Wärme- und Feuchteströme durch Baustoffe, 1992, expert Verlag, S. 56

pazität und damit erhöhten Wärmeaufnahmefähigkeit der Strahlung berücksichtigt werden. Diese sehr komplexen Prozesse lassen sich zurzeit noch nicht in Modellrechnungen praxisrelevant nachvollziehen. Ebenso ist eine messtechnische Erfassung der Einzelfaktoren wegen der gegenseitigen Beeinflussung nur sehr schwer möglich.

2.4. Die Tauwasserbildung im Wandwinkel der Außenwand

Die Dauer und höhe der Feuchtebelastungen im Wandwinkel hängt vom Raumklima, der Heizungsart, der Art der Oberflächenbeschichtung und der Einrichtungsgegenstände ab. Durch diese äußeren Einflussfaktoren können in der gleichen oder ähnlichen Wohnung aber bei verschiedenen Nutzern unterschiedliche Feuchtebelastungen (optisch meist als Schimmel erkennbar) auftreten.

Im Wandwinkel ist der Wärmestrom gegenüber der Fläche dichter, was zur Absenkung der Oberflächentemperatur und so zur Erhöhung der Feuchte im oberflächennahen Bereich führt. In vielen Fällen kommt es zu Feuchteschäden. Eine erhöhte Feuchte bietet aber auch günstige Bedingungen für die Entstehung von Schimmelpilzen oder im ungünstigen Fall kann es auch zu einem Befall durch den Hausschwamm [96] [97] an Holzbalkendecken kommen**.**
Besonders betroffen sind die unteren Wandbereiche der Außenwandecken. Diese punktuelle Außenwandecke wird durch einen Wärmedurchgangskoeffizienten X charakterisiert. Zur Ermittlung des X-Wertes ist eine 3-D-Berechnung des zu beurteilenden Anschlusses sowie eine 2-D-Berechnung für die linearen Wärmebrücken der Bauteilflächen, die sich dreidimensional treffen, erforderlich. Ebenso wie der Ψ-Wert (linearer Wärmedurchgangskoeffizient), welcher den zusätzlichen Wärmestrom im Bereich einer Wärmebrücke im Vergleich zum ungestörten Bauteil angibt, besitzt diese Größe nicht immer Aussagekraft.[98] Die Berechnungen dienen dem wärmetechnischen Nachweis, um zusätzliche Verluste an Außenwandwinkeln zu erfassen. Da die

---

[96] Wetzell, Otto W.; Wendehorst, Bautechnische Zahlentafeln 26. Aufl.1994, BG. Teubner Stuttgart Beuth Verlag Berlin und Köln, S. 131
[97] Reuter, Gunhild; Schimmelpilz in der Wohnung 2006 Dashöfer Holding Ltd., Zypern & Verlag Dashöfer GmbH, Hamburg, S. 2
[98] Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Wärmebrücke: Berechnung – Bilanzierung –Vermeidung S. 488-490 in: Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn

Berechnung des X- und Ψ-Wertes zu aufwendig ist, sieht die EnEV alternativ pauschale Aufschläge ΔU_{WB} vor.

An den Wandoberflächen können Temperaturdifferenzen von 7 bis 10 K gegenüber der Raumlufttemperatur auftreten. Im ungünstigen Fall sind diese Differenzen noch größer, wenn zum Beispiel durch aufgestellte Möbel, lange Vorhänge oder eine ungünstige Anordnung der Heizkörper eine ausreichende Temperierung der Außenwandbereiche nicht möglich ist.

Abb. 2.4.1: Schimmelpilzbildung an einer Gebäudeaußenecke, Raumlufttemperatur 17,6 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 53 %



Die Folge ist eine Tauwasserbildung an der Wandoberfläche bzw. es stellt sich unmittelbar an der Oberfläche eine hohe relative Luftfeuchte ein. Aber auch bei neuen massiven Wandkonstruktionen mit einem Wärmedämmverbundsystem treten Feuchteschäden in den Wandecken mit Schimmelpilzbildungen auf, wie zum Beispiel in der Abb. 2.4.2, wo bei einem 10 Jahre alten Gebäude die Planungsfehler durch eine Außendämmung nicht ausgeglichen werden.

Werden bei der Altbausanierung die Empfehlung der DIN (DIN EN ISO 6946, DIN 4108-3, DIN EN ISO 10211-1) ungeachtet der jeweiligen konstruktiven Ausführung befolgt, so kann bei fehlender oder ungeeigneter Planung sich die zu erwartende Standzeit der Gebäude mit Holzbalkendecken verkürzen. Bei bisher trockenen Bauteilquerschnitten kommt es lokal zur Er-

höhung der Feuchte. Dies ist gerade bei der Fachwerksanierung ein großes Problem, wenn zu sehr die ursprüngliche Konstruktion verändert wird. Auf diese Probleme wird auch im Punkt 3.4. ausführlicher eingegangen.

Abb. 2.4.2: Massive Schimmelbildung an einer massiven Außenwand mit Wärmedämmung bei einem 10 Jahre alten Gebäude, die relative Luftfeuchte direkt neben der Wand über dem Fußboden betrug 50 %.



In verschiedenen Publikationen werden rechnerisch ermittelte Isotherme im massiven Wandquerschnitt und in der Außenwandecke [99, 100, 101, 102] oder mit Hilfe von Infrarotaufnahmen Temperaturunterschiede an Fassaden grafisch dargestellt. Bei ordnungsgemäßer Anwendung und fachlicher Beurteilung ist die IR-Aufnahme ein nützliches Werkzeug zur Bestimmung von möglichen Schwachpunkten, wie erhöhter Wärmefluss oder starke Durchfeuchtungen. Das Verfahren wird aber leider oft auch dazu benutzt, eine nachträgliche Dämmmaßnahme zu begründen, im dem die am Tag eingespeicherte Solarwärme als Wärmeverlust interpretiert wird.

---

[99] Jaroslav Římal, Marcus Hermes; Die energiesparende Gebäudehülle, GFF 12/2006, S. 28ff
[100] Höherer Wohnwert durch Ziegelbauweisen, bau-zeitung 52(1998)12 S. 43-45
[101] Königwinter, Peters; Wärmebrücken im Mauerwerksbau beachten, Baumarkt 10/99 S. 10-15
[102] Schild, E.; Casselmann, H.F.; Dahmen, G. Pohlenz, R.; Bauphysik –Planung und Anwendung, 4. Auflage, 1990 Vieweg Verlag Braunschweig

1953 wurde die Eidgenössischen-Material-Prüfanstalt (EMPA) 5 Jahre lang an Versuchshäuschen Auswirkungen der Feuchte auf den instationären U-Wert ermittelt. Hier wurde mit Widerstandsmessungen an Wandkonstruktionen festgestellt, dass in den Wintermonaten eine Austrocknung und im Sommer eine Durchfeuchtung erfolgt. Im Oktober war der U-Wert am geringsten, obwohl der feuchteste Zustand vorlag. Mit der Austrocknung verschlechtert sich der Wärmedämmwert um 30 %. Die Ergebnisse dieser Messreihe lassen sich nicht mit den konventionellen Berechnungsmethoden der Bauphysik klären, [103] da sich eigentlich die Wärmeleitung verringert.

BOSSERT nimmt an, dass sich „*die eingedrungene Feuchtigkeit die Wärmespeicherfähigkeit im Außenbereich von Wänden erhöht und somit die solare Zustrahlung bereits auf niederstem Niveau energiewirksam wird*."[104]
M. E. kann nur eine niedrige Feuchte auf der äußeren Wandseite zur Erhöhung des o. g. energetisch wirksamen Speichervermögens beitragen. Bei höherer Feuchtigkeit erfolgt eine kapillare Weiterleitung, die die Eigenschaft der Wärmedämmung des Bauteils mindert.[105] Auf die Bedeutung der Feuchte für die Wärmeleitfähigkeit wird im Absatz 2.2 ausführlich eingegangen.

Wasserdampfdiffusion wird von dem Konzentrationsgefälle der absoluten Luftfeuchte bestimmt. Im Winter ist dieses Gefälle zwischen der kalten Außenluft und der Raumluft am größten. M. E. stellt die Differenz der Enthalpie der feuchten Luft eine weitere Kraft des Feuchtetransportes dar. Nach dem Mollier-h,x-Diagramm hat zum Beispiel Luft mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 40 % (entspricht einer absoluten Luftfeuchte von 6 g/kg) eine Enthalpie von h_{1+x} = 35 kJ/kg. Im Winter ist die Enthalpie der Außenluft unabhängig von der Höhe der relativen Luftfeuchte kleiner. Nach dem II. Hauptsatz findet neben dem Temperatur- und Druckaustausch auch ein Konzentrationsausgleich statt, bis alle angrenzenden Energiesysteme das gleiche Niveau erreichen. Die Gleichgewichtsfeuchte der Baustoffe ist somit im Winter niedriger als im Sommer. Diese praktischen Erkenntnisse wurden früher zum Trocknen der neu errichteten Gebäude durch das „Auswintern" genutzt. Dieser Trocknungsvorgang erfolgt an allen porösen Bauteiloberflächen und kann durch niedrige Oberflächentempera-

---

[103] *Bossert, Paul; Nagel; Energieverbrauchsanalysen von Hochbauten, Deutsche Bauzeitung 9/1982, S. 58-62*
[104] *Bossert, Paul; Die 8 energierelevanten Faktoren der Aussenwand, 20.06.2003*
[105] Schmitt, Heinrich; Heene, Andreas; Hochbaukonstruktion, 14. Aufl. 1998, Friedr. Viehweg Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig, S. 53

turen an lokalen Teilflächen durch Kondenswasserbildung überlagert werden. Die höchste Luftfeuchtigkeit in den Räumen liegt im späten Herbst vor, die dann über den Winter absinkt und im März den niedrigsten Wert erreicht. Im Holz verarbeitenden Gewerbe ist dies bekannt. Daher wird ein Parkett oder die Dielenbretter im März verlegt, da das Holz die niedrigste Feuchte und damit das kleinste Volumen (Schwinden) hat.

Wurde früher den latenten Wärmebrücken wenig Beachtung geschenkt, so haben diese mit den hohen Anforderungen an den Wärmeschutz an Bedeutung gewonnen und können berechnete Wärmedämmwerte illusorisch machen.

Wärme- und feuchtigkeitstechnische Berechnungen können wichtige Hinweise auf eventuell Verbesserungen der Baukonstruktion geben. Es sind aber nur Näherungsrechnungen, die trotz hoch entwickelter Formeln keine übermäßige Präzision zulassen, da zum Teil die Daten für die Berechnung geschätzt werden müssen.

Die zuverlässige Bestimmung der Rohdichten kann nur mechanisch erfolgen oder es liegt ein Produktdatenblatt. Der Wärmeleitrechenwert λ ist abhängig von der Rohdichte, der Porenstruktur und dem Feuchtigkeitsgehalt. Beim gleichen Baustoff können je Hersteller schon größere Abweichungen auftreten. Bei historischen Baustoffen können diese Größen nur geschätzt werden. In Leipzig wurde zum Beispiel nach dem II. Weltkrieg Großblöcke aus Leichtzuschlag-Beton Ziegelsplitt hergestellt. Verwendet wurden die alten Ziegel der Ruinen. Waren die ersten Ziegel in der Qualität noch relativ gut, so wurden diese durch die freie Bewitterung der Schutthaufen immer mehr durchfeuchtet und die Salze wurden aus dem Baustoff herausgelöst. Bei den Außenwänden dieser Gebäude mit diesem Baustoff sind zum Teil erhebliche Eigenschaftsunterschiede vorhanden.

Trotz gleicher Ausbildung haben alle 4 Außenwände eines Gebäudes einen anderen Feuchtegehalt.[106] OSWALD schlug vor, dass die innere Temperatur in der Bauteilecke überschläglich mit einem verdreifachten inneren Wärmeübergangswiderstand berechnet werden kann.[107] EICH-

[106] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin, S. 223
[107] Oswald, R.; Wärmebrücken in Außenwänden, Vortag Altbausanierung am 11.1.1993 an der IHK Leipzig

LER/ARNDT[108] schlagen einen raumseitigen Wärmeübergangskoeffizienten von h_i = 6,0 W/m²K, entspricht 1/ h_i = 0,17 m²K/W, zur Überprüfung eines Bauteils auf Tauwasser[109] vor und RUDOLFI/MÜLLER[110, 111] rechnen mit h_i = 5,0 W/m²K. Mehlhorn verweist darauf, dass für eine Prüfung der möglichen Tauwasserbildung die Verringerung der Außentemperatur um 5 °C und 1/ h_i = 0,17 m²K/W nur für große U-Werte gilt, aber nicht, wenn sich zum Beispiel große Übergardinen usw. vor der Außenwand befinden.[112]

Nach der Näherungsformel von STUPPERICH[113] ergibt sich für die einschichtigen Außenwände eine Temperatur in der Ecke nach:

$$\vartheta_{I,E} = \vartheta_i - \frac{\vartheta i - \vartheta e}{1{,}26 + 3 \cdot R} \quad [\text{in °C}] \qquad (2.14)$$

Im Fachbereichsstandard TGL 35424-03 wurde folgende Beziehung aufgestellt:

$$\vartheta_{I,E} = \frac{0{,}023 + R}{0{,}402 + R} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad [\text{in °C}] \qquad (2.15)$$

$\vartheta_{I,E}$ = Temperatur Innenecke in [°C]
ϑ_i = Innentemperatur in [°C]
ϑ_e = Außentemperatur in [°C]
R = Wärmedurchlasswiderstand in [m²K/W]

Nach EICHLER/ARNDT ergeben sich für die Formel 2.14. „*recht günstige, nicht immer glaubhafte Ecktemperaturen*“. Merklich tiefere Temperaturen ergeben sich aus der Formel 2.15.[114]

---

[108] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst ; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin, S. 181
[109] Schneider, Klaus-Jürgen; Bautabellen, 9. Aufl. 1990, Werner Verlag, S. 10.16
[110] Rudolfi, R.; Müller, R.; Bauphysikalische Temperaturberechnung in FORTRAN. Band 1 Zwei- bzw. dreidimensionale stationäre Probleme des Wärmeschutzes. Stuttgart 1985
[111] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 196
[112] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996, Berlin Ernst & Sohn, S. 78
[113] Stupperich, F. R.; Wärmeschutz im Hochbau Karlsruhe, 1979, Verlag C.F. Müller
[114] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin, S. 181

Die DIN 4102-2 fordert für den ungünstigsten Punkt der Innenoberfläche im Wohnungsbau die Einhaltung bei üblichen Randbedingungen einen Temperaturfaktor $f_{Rsi} \geq 0{,}7$. Wobei der „ungünstigste Punkt“ sich auf Flächen und zweidimensionale Anschlüsse beschränkt, aber für die erforderliche Oberflächentemperatur in der punktbezogenen Ecke (dreidimensionale Raumanschlüsse) keine einheitliche Reglung gibt.

Die Berechnung der Temperatur an der Innenwandoberfläche erfolgt nach:

$$\vartheta_{si} = f_{Rsi} \bullet (\vartheta_i - \vartheta_e) + \vartheta_e \qquad (2.16)$$

f_{Rsi} = Temperaturfaktor
ϑ_{si} = Temperatur der Innenoberfläche in [°C]
ϑ_e = Temperatur der Außenluft in [°C] (DIN 4108-2 ϑ_e = -5°C)
ϑ_i = Temperatur Raumluft in [°C] (DIN 4108-2 (ϑ_i = 20 °C)

Für eindimensionale Fälle (flächige, ungestörte Bauteile) erfolgt die Berechnung des Temperaturfaktors nach:[115]

$$f_{Rsi}^{1D} = \frac{R + Rse}{Rsi + R + Rse} \qquad (2.17)$$

f_{Rsi}^{1D} = Temperaturfaktor für eindimensionalen Fall
R = Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils in [m²K/W]
R_{se} = äußerer Wärmeübergangswiderstand in [m²K/W] (DIN EN ISO 10211-1, R_{se}= 0,04 m²K/W)
R_{si} = innerer Wärmeübergangswiderstand in [m²K/W] (DIN EN ISO 10211-1, R_{si} für obere Raumhälften 0,25 m²K/W, untere Raumhälften 0,35 m²K/W und Beeinträchtigung durch Möbel 0,5 m²K/W)

Bei der geometrischen Wärmebrücke sind die Stoffeigenschaften gleich, jedoch ist die innere und äußere Wandoberfläche unterschiedlich groß. *„Dadurch divergieren die Wärmestromlinien im Winkelbereich und die Oberflächentemperatur im Winkel ist niedriger als in der Wandfläche.“*[116] Eigene praktische Temperaturmessungen zeigen, dass die Temperatur an der äußeren Wandoberfläche gegenüber der Gebäudeecke niedriger ist. Bei massiven Wandkonstruktionen liegen diese Temperaturdifferenzen zwischen 1 bis 2 K und bei einer massiven Konstruktion

---

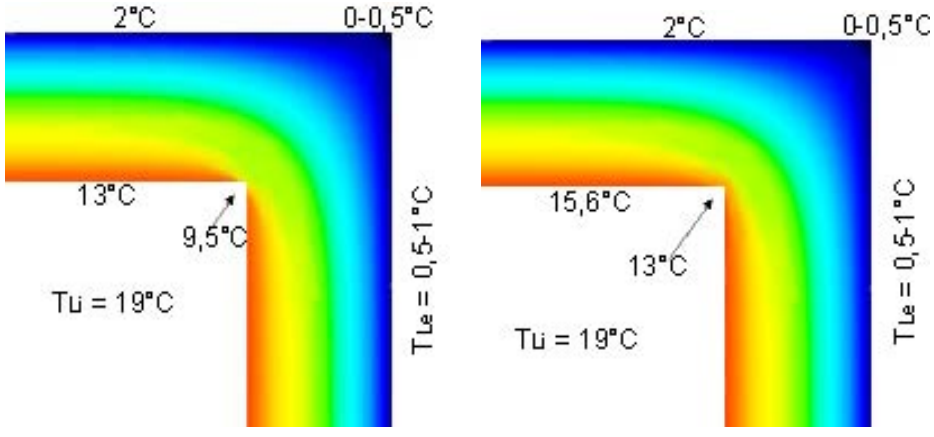
[115] *Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Wärmebrücke: Berechnung – Bilanzierung –Vermeidung S.481, 491 in: Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn*
[116] *Wetzell, Otto W.; Wendehorst Bautechnische Zahlentafel, 28. Aufl. 1994, B.G. Teubner Stuttgart, S. 132*

mit einer äußeren Wärmedämmung bei 0,5 K. Für eine allgemeingültige Aussage müssten jedoch ausreichend viele Messdaten an verschiedenen Objekten ermittelt werden.

Anhand eines praktischen Beispiels bei einer Erdgeschosswohnung sollen die praktischen Ergebnisse mit den Berechnungen der Formel 2.14 und 2.15 verglichen werden. Wichtig hierbei ist die zeitnahe Erfassung der äußeren und inneren Temperaturen an der Gebäudeecke.

Die Temperaturwerte wurden am 16.3.2006 8.00 Uhr bei einem frei stehenden Gebäude in Markkleeberg ermittelt. Für den Wandaufbau wird ein Mauerwerk aus Ziegel (1800) mit λ = 0,81 W/mK, einer Wandstärke von 40 cm (aus 1,5 cm Innenputz, Ziegel 36,5 cm und 2 cm Außenputz) angenommen. (Vereinfacht gilt der gleiche λ -Wert für den Putz und die Ziegelsteine.) Die Temperatur der Außenluft betrug ϑe = 0 °C (-0,5 bis 1,0 ºC), die Oberflächentemperatur ϑse = 2 ºC und die Temperatur an der Ecke ϑse-Ecke = 0,0 °C (bis 0,5 ºC). Die Oberflächentemperaturen betrugen in der Innenecke ϑsi-Ecke = 13 °C (1 m über den Fußboden), über den Fußboden in der Zimmerecke 9,5 ºC, an der Innenwandfläche ϑsi = 15,6 °C (1 m über den Fußboden) und 13 ºC über dem Fußboden. Die Zimmertemperatur betrug 19 ºC bei einer relativen Luftfeuchte von circa 50 %, siehe Abb. 2.4.3.
Bei der vorliegenden Luftfeuchte ergibt sich an der Wandoberfläche mit 13 °C eine relative Luftfeuchte von circa 70 % und in der Ecke über dem Fußboden bei 9,5 °C circa 87 %.[117]

Abb. 2.4.3: Beispiel der Temperaturverteilung an einer massiven Wandecke im Fußbodenbereich in einer Erdgeschosswohnung, links Fußbodenhöhe und rechts 1 m über den Fußboden



[117] *Rauch, Peter; Schimmelpilze in Wohngebäuden Anlage 4: Temperatur-Feuchte-Grafik, 2. Aufl. 2007, Verlag Peter Rauch, S. 123*

Nach der Formel 2.14 ergibt sich ein Wert für die Oberflächentemperatur an der Innenseite der Ecke nach:

$$\vartheta_{i,E} = 19 - \frac{19 - 0}{1{,}26 + 3 \bullet 0{,}49} = \underline{12{,}0\ °C}$$

und nach der Formel 2.15

$$\vartheta_{i,E} = \frac{0{,}023 + 0{,}49}{0{,}402 + 0{,}49} \bullet (19 - 0) = \underline{10{,}9\ °C}$$

Diese berechneten Werte für die geometrische Ecke, mit jeweils von 12 °C und 10,9 °C, liegen unterhalb des gemessenen Wertes mit 13 °C. Sie sind aber auch höher als der Temperaturwert im kritischen punktbezogenen Eckpunkt über dem Fußboden mit nur 9,5 °C. Mit der Berechnung kann nur ungenügend genau die Feuchte an der Innenseite der Ecke bestimmt werden.

Betrachtet man die Tabelle zur Taupunkttemperatur in der DIN 4108, so liegt der Taupunkt bei einer Lufttemperatur von 19 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei einer Temperatur von 8,3 °C. Also etwas niedriger als die gemessene Oberflächentemperatur. Damit lässt sich auch der Schimmel in der Abb. 2.4.1 erklären, da die Schimmelbildung ab einer relativen Luftfeuchte von circa 80 % beginnt. „*Bei relativen Luftfeuchten ab 80 % kommt es zur Kondensation von Wassermolekülen in Baustoffporen geringen Durchmessers (Kapillarkondensation)*."[118] Entscheidend für die Durchfeuchtung der Konstruktion sind die Eigenschaften der Wandbeschichtung, die den Feuchtetransport in den Wandquerschnitt begünstigen oder behindern.

Im nachfolgenden Beispiel wird die minimale Innenoberflächentemperatur nach den Formeln 2.16 und 2.17 berechnet werden. R_{si} = 0,35 m²K/W für unteren Wandabschnitt und Rse = 0,04 m²K/W.

---

[118] *Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Wärmebrücke: Berechnung – Bilanzierung –Vermeidung S.481 in: Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn*

$$f_{Rsi}^{1D} = \frac{0{,}49\ m^2K/W + 0{,}04\ m^2K/W}{0{,}35\ m^2K/W + 0{,}49\ m^2K/W + 0{,}04\ m^2K/W} = \underline{0{,}6}$$

$$\vartheta_{si} = 0{,}6\ (19\ °C - 0\ °C) + 0\ °C = \underline{11{,}4\ °C}$$

Die minimale Innenoberflächentemperatur von 11,4 °C liegt somit unterhalb der gemessenen Oberflächentemperatur von 13 °C über der Fußbodenleiste an der Außenwand.

Die Beurteilung eines Risikos zur Schimmelpilzbildung oder des Tauwasseranfalls im dreidimensionalen Schnitt kann nach einem Näherungsverfahren in der DIN EN ISO 10211-2 erfolgen.[119] Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden.

In die bauphysikalische Berechnung zur Bewertung der Wärmeverluste an den Wandecken gemäß der DIN 10211-1[120] geht die Wärmeleitfähigkeit λ des Wandbaustoffs als Rechengröße für die Bestimmung weiterer Rechengrößen ein. Das setzt eine exakte Bestimmung dieser Größe voraus, was ein Problem ist, wenn ein Teil des Wandbaustoffs durchfeuchtet ist. Da sich die Wärmeleitfähigkeit mit dem Anstieg der Feuchtigkeit im Baustoff erhöht.[121] Die Wärmeleitfähigkeit bestimmt den Wärmedurchgangskoeffizienten (Formel 2.6) und dieser ist ein Bestandteil der Berechnung des Wärmstroms (Formel 2.7). Damit geht die Größe der Wärmeleitfähigkeit in die Berechnung des thermischen Leitwertes L ein.

$$L_{ij} = \frac{\Phi}{(\vartheta_i - \vartheta_e)} \qquad (2.18)$$

Lie = thermischer Leitwert in [W/K]
$\vartheta_{i/e}$ = Temperatur innen/außen in [°C]
Φ = Wärmestrom in [W]

---

[119] DIN EN ISO 10211-2 6.01: Wärmebrücken im Hochbau, Teil 2: Berechnung der Wärmeströme und Oberflächentemperatur; Linienförmige Wärmebrücken
[120] DIN EN ISO 10211-1 11.95 Wärmebrücken im Hochbau; Teil 1, Wärmeströme und Oberflächentemperaturen, Allgemeine Berechnungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
[121] Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial, 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175

Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ ist Bestandteil der Formel 2.6 (Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten) und geht auch in die Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ (Formel 2.19) oder in den punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten X ein.

$$\psi = L^{2D} - U \bullet l \qquad (2.19)$$

ψ = linearer Wärmedurchgangskoeffizient bzw. Wärmebrücken-Verlustkoeffizient in [W/mK]
L^{2D} = thermischer Leitwert aus der 2-D-Berechnung in [W/m K]
l = Länge des ‚ungestörten' Bauteils in [m]
U = Wärmedurchgangskoeffizient in [W/m²K]

Der ψ-Wert gibt an, wie groß der zusätzliche Wärmestrom in der Gebäudeecke gegenüber einer Wandfläche bei gleicher Bezugsgröße ist. Wenn $\psi \leq 0{,}01$ W/mK ist, so spricht man von wärmebrückenfrei. Dieser ψ-Wert gibt allerdings keine Auskunft über die Dämmqualität, da eine wärmetechnisch ungünstige Konstruktion wärmebrückenfrei einfacher auszuführen ist, als eine mit einem geringen U-Wert.[122]

In der Abb. 2.4.4 zeigt die Infrarotaufnahme einer massive Gebäudeecke mit Außendämmung. In den dazugehörigen Isothermen treten Temperaturdifferenzen zwischen der Ecke und der Außenwandfläche von circa 2 bis 3 K auf. (In der linken Zimmerecke sind es 5 K, jedoch steht hier der Fernseher auf einem kleinen Regal und die Temperierung ist durch die gestörte Luftanströmung ungünstiger.) In der Ecke liegt eine Oberflächentemperatur von 19,6 °C bei einer Raumtemperatur von circa 23 °C und einer Außentemperatur von -5 °C vor.

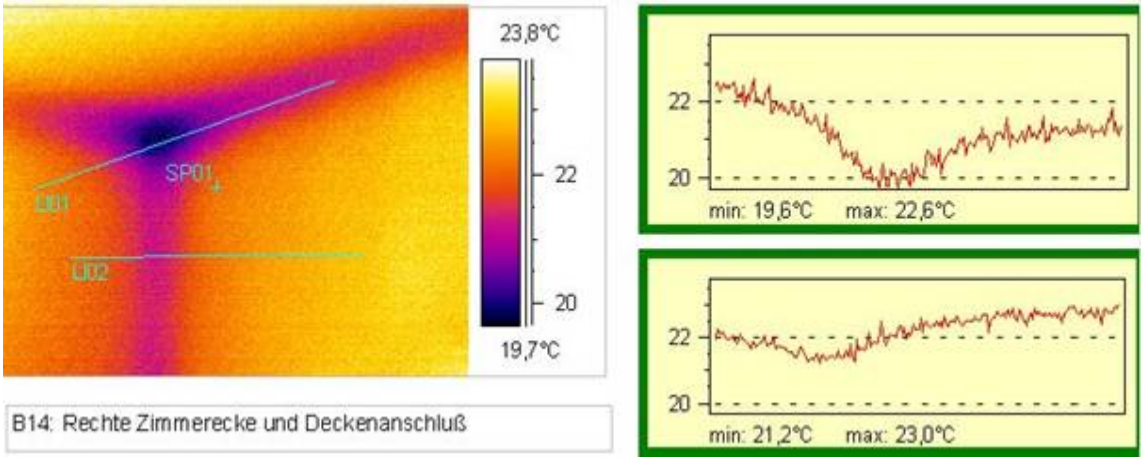
Damit liegen etwa annähernd gleiche Temperaturverhältnisse wie in der theoretischen Betrachtung von ŘIMAL/HERMES[123] zum Verhalten der Temperaturen in den Zimmerecken zwischen einer zweischaligen Wand (Wärmedämmung 12,0 cm und Innenwand aus Beton 17,5 cm) und einer monolithischen Wand mit je U = 0,3 W/m²K vor. Diese Berechnungen erfolgen auf der Grundlage angepasster Randbedingungen gemäß EN ISO 10211[124] mit einem inneren Wärmeüber-

---

[122] Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Wärmebrücke: Berechnung – Bilanzierung –Vermeidung S.488-489 in: Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn
[123] Jaroslav Římal, Marcus Hermes; Die energiesparende Gebäudehülle, GFF 12/2006, S. 32
[124] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : DIN EN ISO 10211-1, Wärmebrücken im Hochbau. Wärmeströme und Oberflächentemperaturen. Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren. Deutsche Fassung EN ISO 10211-1:1995. Ausgabe November 1995; Beuth Verlag GmbH, Berlin.

gangswiderstand Rsi = 0,25 m²K/W, einen U-Wert von 0,3 W/m²K in der ebenen Fläche und den Temperaturen im Raum mit 20 °C sowie außen -5 °C.

Abb. 2.4.4: IR-Aufnahme einer Zimmerdecke, Neubau mit Wärmedämmverbundsystem



Es ergibt sich eine innere Oberflächentemperatur in der Zimmerecke von 17 °C für die zweischalige Wand bzw. 15,9 °C für die monolithische Wand. Diese theoretischen Berechnungen zeigen, dass eine Wandkonstruktion mit Wärmedämmverbundsystem nicht zwangsläufig zu einer wesentlich höheren Oberflächentemperatur in der inneren Ecke führt. Sie stellten weiterhin fest, dass bei einer massiven Gebäudeecke gegenüber einer mit einer äußeren Wärmedämmung ein geringerer Wärmebrückenverlust von knapp 42 % auftritt.

Ergänzend soll auf die Untersuchungen durch das Fraunhofer Instituts für Bauphysik verwiesen werden. Hier wurden aus wärmeschutztechnischer Sicht verschiedene Ziegelaußenwandkonstruktionen untersucht. Dabei schnitt ein 49 cm starkes Leichtziegelmauerwerk zuzüglich Putz mit einem rechnerischen U-Wert von 0,46 W/m²K gegenüber einer 24-cm-Hochlochziegelwand mit 23 cm Polystyrol-Außendämmung und einem U-Wert von 0,16 W/m²K bezüglich der mittleren Heizleistung etwas besser ab.[125]

[125] *Werner, H.; Marquardt, R.; Schaube, H.; Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen, Bericht über den 1. und 2. Untersuchungsabschnitt, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Aussenstelle Holzkirchen 5.7.1983, Bl. 33 Bild 3, Bl. 38 Bild 8*

WERNER[126] stellt in einer Abbildung eine prozentuale Verteilung der Wärmeströme durch eine monolithische, außen und innen gedämmte Außen- und Innenecke mit U= 0,6 W/m²K, ϑ_i = 20 °C und ϑ_e = -10 °C gegenüber. Auch hier schneidet die Konstruktion mit der Außendämmung ungünstiger ab. Nachfolgend die Gegenüberstellung:

- ebene Wand (q =18 W/m²) = 100%
- Außenecke monolithische Wand = 110%
- Außenecke Außendämmung = 125%
- Außenecke Innendämmung = 100%

„*Eine außen angeordnete Dämmschicht derselben Art und Dicke bringt nur die halbe Dämmleistung, da die Wärmestromdichte des dilatierenden Wärmestroms innenseitig wesentlich dichter ist als außen.*“[127] Die Autoren schlagen zur Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur einer Außenwandecke eine Innendämmung in einer Breite von 50 cm vor. Ein gleicher Vorschlag erfolgt auch in FISCHER.[128]

Durch die nachträgliche Innendämmung der Innenecke ist eine Temperierung der Oberfläche möglich. Damit wird die unmittelbare Tauwassergefährdung reduziert. Voraussetzung ist eine fachgerechte Ausführung. Mit der Innendämmung wird allerdings nicht das eigentliche Problem gelöst, sondern nur in einen anderen Teil des Gebäudes verschoben.[129] Mit jeder Innendämmung verlagert sich die niedrige Temperatur von der Außenseite in den Wandquerschnitt hinein. So sind zum Beispiele bei einer Innendämmung die Balkenköpfe verstärkter Diffusionsvorgänge ausgesetzt[130]. Besonders betroffen sind die Auflagebereiche der Streichbalken.

Zu beachten ist aber auch, dass die Tauwasserbildung in der Gebäudeecke durch weitere Faktoren erfolgen kann, das sind zum Beispiel im Innenbereich die Verringerung der Raumlufttempe-

---

[126] Werner, Hanns; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl., 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 188
[127] Eichler, Friedrich; Arndt, Horst ; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin S.180
[128] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 195
[129] Willems, Wolfgang; Schild, Kai; Wärmebrücke: Berechnung – Bilanzierung –Vermeidung S.482 in: Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn
[130] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 301

ratur, der Anstieg der relativen Luftfeuchte, die Größe der Luftströmung in der Raumecke sowie der Abstand und Standort der Heizung. Steht außerdem das Gebäude noch ungünstig, so kann es gerade im Winter durch den kalten Wind zu einer zusätzlichen Abkühlung einzelner Bauteile kommen.

2.5. Die Wärmekonvektion und die Einflussnahme auf die den Feuchtetransport

Im Bauwesen berechnet man den Wärmeübergangskoeffizienten vereinfacht nach der DIN 4108 mit h_i= 7,69 W/m²K bzw. $1/h_i$= 0,13 m²K/W für innen und $1/h_e$= 0,04 m²K/W für außen.[131] In der Literatur werden für die unterschiedlichen Bauteile und Situationen Wärmeübergangskoeffizienten 1/h mit den Werten von 0,01 bis 0,21 m²K/W ausgewiesen.[132, 133] Dieser Koeffizient für den Wärmeaustausch an der Oberfläche setzt sich aus der Konvektion und Strahlung zusammen (Formel 2.20).[134]

$$h = h_{cv} + h_r \qquad \text{(alte Schreibweise: } \alpha = \alpha_k + \alpha_s) \qquad (2.20)$$

h_{cv} (α_k) = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in [W/m²K]
h_r (α_s) = strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient in [W/m²K]

Zwischen den nebeneinanderliegenden energetischen Systemen erfolgt so lange ein Energieausgleich, bis beide Systeme die gleiche Temperatur haben. Ist die Wandoberflächentemperatur niedrig, so gibt die angrenzende Raumluft so lange Wärme an die Wand ab, bis ein gleiches Temperaturniveau erreicht wird bzw. auch umgekehrt. Dabei übertragen die Gasmoleküle die Energie bei Stößen untereinander und an der Oberfläche. In der Abb. 2.5.1 wird der Verlauf der turbulenten Lüftströmung an einer Wandfläche dargestellt. Direkt an der Wandoberfläche liegt die größte Temperaturdifferenz vor. Bei der Berechnung des Wärmeübergangs (Abb. 2.3.1.) wird ein Proportionalitätsfaktor h verwendet. „*Er stellt den Wärmestrom dar, der auf 1 m²*

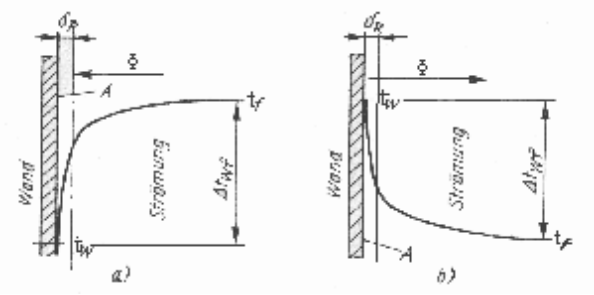
---

[131] *DIN 4108-4 Tafel 10.16a*
[132] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989; Bauverlag Berlin S. 227*
[133] *Bobran, Hans; Handbuch der Bauphysik, 7.Aufl. 1994, vieweg, S. 54*
[134] *Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 46*

Wandfläche je Kelvin Temperaturgefälle übergeht. h_K ist nicht wie λ ein Stoffwert.“[135] Die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten h wird durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt. Das sind:[136, 137]

- die Strömungsgeschwindigkeit und laminare oder turbulente Strömung,
- die physikalischen Eigenschaften der strömenden Luft (Dichte, spezifische Wärmekapazität, kinematische Zähigkeit),
- die geometrische Gestaltung und Abmessungen des um- oder durchströmten Bauteils und
- die Oberflächenbeschaffenheit (glatt, rau).

Abb. 2.5.1: Temperaturverlauf beim Wärmeübergang
a) Wärmeübergang von der Luft an die Wand
b) Wärmeübergang von der Wand an die Luft[138]



Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft entlang einer ebenen Wand bestimmt die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten h. Raue Oberflächen führen zur Störung oder zur Verkleinerung der laminaren Randschichten. Dies verursacht eine turbulente Strömung und erhöht so den Wärmeübergang um ein Vielfaches. Mit diesem Wärmetransport erfolgt gleichzeitig auch der Feuchtetransport.

Nachfolgend erfolgt ein Beispiel zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten.

---

[135] *Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig S. 220*
[136] *Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig S. 220*
[137] *Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 115*
[138] *Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 220*

Bei der Lufttemperatur von 9,5 ºC beträgt die kinematische Zähigkeit ν 14,23 •10^{-6} m^2/s und die Wärmeleitfähigkeit 0,002524 W/mK.[139] (Diese Werte ändern sich bei einer Temperaturänderung auf 13 ºC nur sehr gering, sodass diese Werte für die nachfolgenden Berechnungen für den gesamten Bereich der Zimmerecke gelten).

Es wird der mittlere Wärmeübergangskoeffizient für die längst angeströmte Wand berechnet. Die Ausgangswerte sind: t_f = 9,5 ºC, Luftgeschwindigkeit ω = 0,1 m/s. (Beim Sitzen wird eine Luftgeschwindigkeit über 0,1 m/s bereits als unangenehm empfunden.[140]) Stoffwerte für Luft ν =14,23 •10^{-6} m^2/s und λ= 0,02524 W/mK, l = 1 m. Die Prendtl-Zahl ist in Gasen wenig temperaturabhängig, so gilt für $Pr_w = Pr_f = 0,71$.

Berechnung Reynolds-Zahl:

$$Re_f = \omega l / \nu \qquad (2.21)$$

$$= 0,1\ m/s \cdot 1m / 14,23 \cdot 10^{-6}\ m^2/s = 7027$$

$$7,027 \cdot 10^3 < 10^5$$

Damit gilt voll laminare Grenzschicht nach:

$$Nu_f = 0,664\ Re_f^{0,5}\ Pr_f^{0,43}\ (Pr_f/Pr_w)^{0,25} \qquad (2.22)$$

$$= 0,664\ (7027)^{0,5} \cdot 0,71^{0,43} \cdot 1$$

$$= \underline{48}$$

$$h = Nu_f \cdot \lambda / l \qquad (2.23)$$

$$= 48 \cdot 0,02524\ W/mK\ / 1\ m$$

$$= \underline{1,2\ W/m^2K}$$

ω = Strömungsgeschwindigkeit in [m/s]
ν = kinematische Zähigkeit des strömenden Stoffes in [m²/s]
l = Abmessung des Körpers in [m]
Pr_f = Prendelzahl, Stoffwert bei Flüssigkeitstemperatur
Nu = Nußelt-Zahl
Pr_w = Prendelzahl, Stoffwert bei Wandtemperatur

---

[139] *Die Werte wurden aus den Tafelwerten interpoliert. Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig S. 368*

[140] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst ; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz 1989, Bauverlag Berlin S. 87*

Bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s liegt der Wärmeüberganskoeffizient bei 1,2 W/m²K. Zum Vergleich gibt die DIN 4108 für h_i= 7,69 W/m²K an.
Bei einer Luftgeschwindigkeit zum Beispiele von 1m/s liegt ebenfalls noch eine voll laminare Grenzschicht vor. Nach der obigen Berechnung ergibt sich für h = 3,34 W/m²K.

Erhöht sich die Luftgeschwindigkeit entlang der Wandfläche auf ω = 1,5 m/s, so liegt eine in Turbulenz umschlagende Grenzschicht vor.

Berechnung Reynolds-Zahl:

$Re_f = \omega l / \nu$

$= 1{,}5 \text{ m/s} \cdot 1\text{m} / 14{,}23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1{,}05 \cdot 10^5$

$1{,}05 \cdot 10^5 > 10^5$ und damit liegt eine in Turbulenz umschlagende Grenzschicht vor und es gilt:

$Nu_f = 0{,}037 \, Re_f^{0,8} \, Pr_f^{0,43} \, (Pr_f/Pr_w)^{0,25}$ (2.24)

$= 0{,}037 \, (1{,}05 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0{,}71^{0,43} \cdot 1$

$= \underline{332}$

$h = Nu_f \cdot \lambda / l$

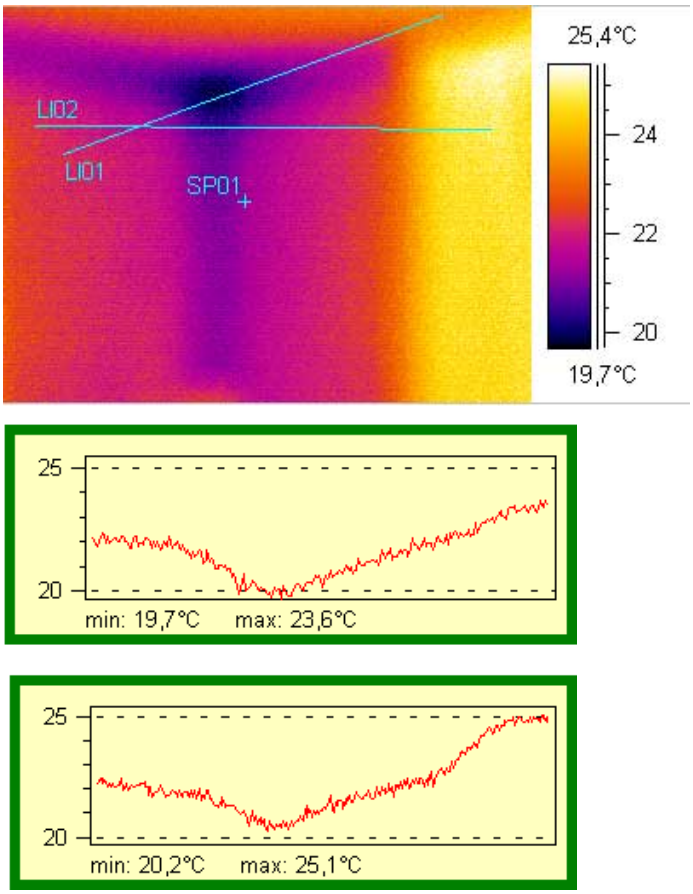
$= 332 \cdot 0{,}02524 \text{ W/mK} / 1 \text{ m}$

$= \underline{8{,}4 \text{ W/m}^2\text{K}}$

Bereits bei der geringen Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 1 m/s auf 1,5 m/s ändert sich der Wärmeübergangskoeffizienten von 3,34 auf 8,4 W/m²K. Damit wird der Einfluss der Luftströmung auf den Wärmeübergangskoeffizienten deutlich. Soll die Konstruktion möglichst wenig Wärme abgeben, so ist diese so zu gestalten, dass die angrenzende Luft nur langsam strömen kann. Bei ungünstigen Standorten der Gebäude, z. B. nebeneinander mit einem geringen Abstand und Staudruck, können Düseneffekte auftreten. Die betreffenden Wandflächen kühlen dann gerade im Winter sehr stark ab. Neben der Wärmeübertragung spielt aber auch der Feuchtetransport eine wichtige Rolle. Zur Vermeidung von Durchfeuchtungen durch Tauwasser müssen die Konstruktionen gut und schnell abtrocknen können. Gerade bei Betonbauten, wie Brücken, wird so der Karbonatisierungsprozess verringert.

In der Abb. 2.5.2 wird eine frei zugängliche rechte Zimmerdecke mit den dazugehörigen Isothermen gezeigt. Durch die Möbel wird jedoch die Luftwalze der Konvektionsheizung behindert. Die Strömungsgeschwindigkeit und damit ist die Wärmeübertragung von der warmen Raumluft an die Wandoberfläche geringer.

Abb. 2.5.2: IR-Aufnahme der linken Zimmeraußenecke, wo die warme Luft durch Möbel nicht richtig einströmen kann.

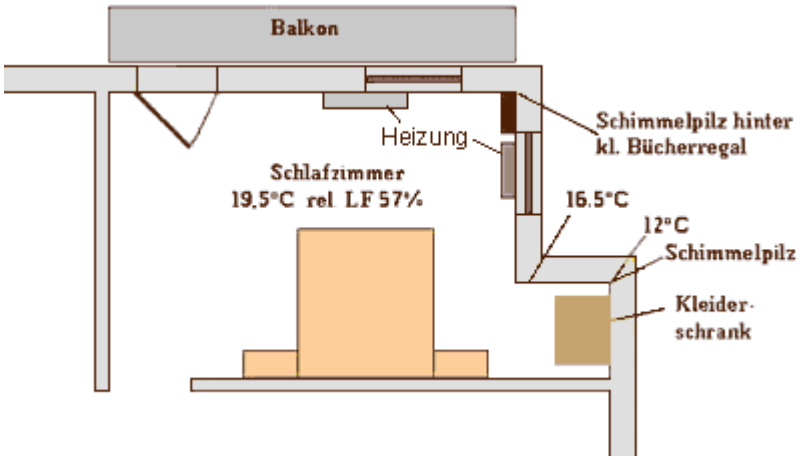


Mit der Verringerung der Luftbewegung werden auch der Wärmeübergangskoeffizient sowie die Oberflächentemperatur kleiner. Die Folge ist jedoch dann eine mögliche Durchfeuchtung der Wandoberfläche aufgrund der höheren relativen Feuchte der angrenzenden Raumluft. Damit entsteht eine widersprüchliche Situation, es wird Wärmeenergie auf Kosten einer Durchfeuchtung der inneren Bauteiloberflächen gespart.

Für eine ausreichende Temperierung aller Wandoberflächen ist gerade bei Konvektionsheizungen der Standort des Heizkörpers im Raum sehr wichtig. Bei dem Schimmelpilzschaden in der

Außenwandecke in der Abb. 2.4.1 befindet sich der Nachtspeicherofen auf der gegenüberliegenden Raumseite neben der Innenwand. Die von dem Ofen abgegebene Warmluft erzeugt vorwiegend nur neben der Innenwand eine Luftwalze. Die Giebelseite sowie diese Außenwandecke werden nur unzureichend temperiert. Eine ungleichmäßige Erwärmung langer oder verwinkelter Räume ist in vielen Fällen auf einen falschen Standort der Konvektionsheizkörper zurückzuführen. Die Folgen sind eine Bildung von Kondenswasser und oder Schimmel an der inneren Wandoberfläche. Als Beispiel einer ungünstigen Raumgeometrie soll das Zimmer in der Abb. 2.5.3 einer ungedämmten Ziegelaußenwand gezeigt werden. Die Standorte des Wäscheschrankes und des kleinen Bücherregals sind ungeeignet. Aber auch ohne Schrank in die Nische würde durch die Konvektionsheizung nur wenig warme Luft an diesen Wandabschnitt gelangen. Hier müsste mindestens ein zusätzlicher kleiner Heizkörper aufgestellt werden.

Abb. 2.5.3: Unzweckmäßige Anordnung der Heizkörper und fehlerhafter Standort der Möbel.



Die Probleme des falschen Standorts der Heizkörper treten aber auch in Räumen mit ordnungsgemäßer Außendämmung auf. Diese gleiche Auffassung zur Ursache der Feuchteschäden hat JAROCH[141] auf dem Feuchtetag 1999 in Berlin vertreten und dies durch praktische Beispiele belegt.

In den nachfolgenden zwei Beispielen werden Ausführungsfehler bei einer Konvektionsheizung gezeigt. In der Abb. 2.5.4 wird die Richtung des Wärmestroms durch das überragende Fensterbrett so verändert, dass der untere Teil der Fensteröffnung nicht

[141] *Jaroch, U.; Feuchtigkeit in Gebäuden - Ursachen und Nachweisverfahren in: DGZfP- Berichtsband BB 69-CD Poster 4; Feuchtetag '99, BAM Berlin 7./8.Okt. 1999*

ausreichend durch einströmende Warmluft erwärmt werden kann. Ebenso wird die Wirkung des Heizkörpers stark eingeschränkt. Im zweiten Beispiel in der Abb. 2.5.5 befindet sich der Heizkörper teilweise hinter der Wandverkleidung. Ein Teil der warmen Luft strömt in diesen Zwischenraum und nicht in den Raum.

Deckenstrahlungsheizkörper ergeben Luftgeschwindigkeiten von nur 0,05 m/s und Konvektionsheizungen jedoch von etwa 0,2 m/s.[142] Mithilfe der Wärmestrahlungen bleibt die Luftgeschwindigkeit niedrig. Die Oberflächentemperatur ist dabei höher als die der angrenzenden Raumluft.

Abb. 2.5.4: Der Wärmestrom wird durch die überstehende Fensterbank behindert (Leipzig, Deutschland).



Abb. 2.5.5: Der Wärmestrom wird durch die überstehende Fensterbank und die Wandverkleidung behindert (Kiew, Ukraine).



[142] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst ; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 87*

2.6. Der Einfluss der Wärmestrahlung auf die Temperatur der Bauteiloberfläche und das Trocknungsverhalten von porösen Baustoffen

Bei der Temperaturstrahlung spielt die Temperatur der Raumluft keine Rolle. Sie dient nicht wie bei der Konvektion als Wärmträger. Für die Übertragung der Wärmeenergie durch Strahlung ist kein Stoff als Träger erforderlich, wie bei der Übertragung der Wärmeenergie von der Sonne auf die Erde. Die Wärmestrahlung oder auch Temperaturstrahlung hängt von der jeweiligen Temperatur des strahlenden Körpers ab. Von der Oberfläche des Körpers werden aus der inneren Energie entstehende elektromagnetische Wellen geradlinig mit Lichtgeschwindigkeit ausgesendet (emittiert). Die Temperaturstrahlung umfasst den Wellenlängenbereich 0,8 bis 800 µm, wobei der Hauptanteil der ausgestrahlten Wärmeenergie im Bereich um 0,8 bis 10 µm liegt und für das menschliche Auge (0,4 bis 0,8 µm) nicht sichtbar ist.

Eine auftreffende Wärmestrahlung wird von der Bauteiloberfläche absorbiert und reflektiert. Bei einem Fenster wird die Strahlung zusätzlich hindurch gelassen. "*Die in einem Körper absorbierte Strahlung wird in innere Energie zurück verwandelt. Das geschieht bei den meisten festen und flüssigen Körpern in einer sehr dünnen Randschicht; ..., bei Nichtleitern bis 1 mm Tiefe.*"[143] Im Bild 2.6.1 wird die Situation der Oberflächentemperatur bei einem 36er-Mauerwerk bei einer Wärmekonvektion und Wärmestrahlung bei einer Raumtemperatur von 20 °C gegenübergestellt. Bei einer Konvektionsheizung liegt bei einer Außentemperatur von -10 °C die innere Oberflächentemperatur rechnerisch bei 14 °C und in der Praxis bei 13 °C. Die abfallend verlaufende Isotherme durch den Wandquerschnitt hat somit eine Differenz zur Oberflächentemperatur auf der Außenseite mit ca. -9 °C von ca. 22 K. Bei einer Strahlungsheizung liegt die Oberflächentemperatur auf der Innenseite etwas höher als die Lufttemperatur mit 20 °C. Danach müsste sich eine Differenz von größer 29 K ergeben. Nach der Formel 2.7 müsste der stationäre Wärmestrom bei einer Strahlenheizung um ca. 30 % größer sein. Die Praxis zeigt aber, dass eine Strahlenheizung eher weniger Energie verbraucht als eine Konvektionsheizung.

Damit ist die gegenwärtige Methode zur Ermittlung der Schichtgrenztemperatur nicht korrekt. Der Verlauf der Isotherme im Randbereich der Oberfläche bei einer Strahlenheizung bzw. bei

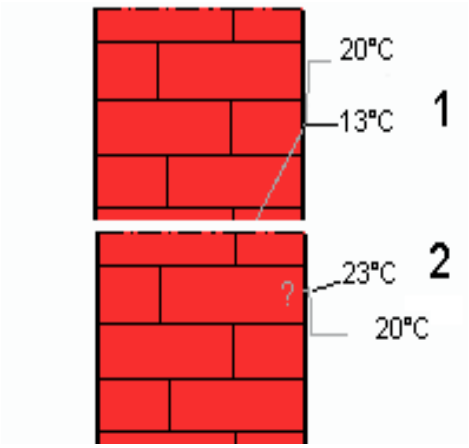
---

[143] *Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 247-248*

einem Strahlungsaustausch kann nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nicht definiert werden.

Abb. 2.6.1: Ausschnitt des Verlaufs der Isotherme an der Wandoberfläche bei einer Raumtemperatur von 20 °C

1 = bei einer Konvektionsheizung und
2 = Wärmestrahlung.



Eine Wärmestrahlung begünstigt den Feuchtetransport an den Oberflächen. Untersuchungen und die feuchtetechnische Bewertung von 4481 Deckenbalkenköpfen in älteren Mehrfamilienhäusern zeigen, dass auf der nördlichen Fassade 212 Balkenköpfe durch Anobien und auf der südlichen Fassade 131 Balkenköpfe geschädigt sind.[144] Damit wird der positive Einfluss der Wärmestrahlung auf das Trocknungsverhalten der porösen Wandschichten deutlich. Dabei ist zu beachten, dass die Südwestfassade die Wetterseite ist und ständig durch Niederschlag belastet wird. Dagegen bleibt die Nordfassade meistens trocken.

An der Oberfläche der porösen Konstruktion wirken immer die konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten (Formel 2.20) gleichzeitig. Hinzu kommt das Verhältnis Reflexion und Transmission, welches von der jeweiligen Oberflächenstruktur bestimmt wird. Weitere Einflüsse erfolgen durch die Größe der Wärmeeindringkoeffizienten und der Sorption (Feuchte in den Poren der Baustoffe) sowie durch eine mögliche Verschattung. Ebenso ist die Eindringtiefe von der Periodenlänge der Temperaturschwankung abhängig. Kurze Temperatur-

---

[144] *Řimal, J.; Rauch. P.; Damages due to humidity transfer in porous materials, February 2010 Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering, This articles sis has been supported by the Grant Agency of the Czech Republic with grant No. 103/09/1149, S. 41*

strömungen dringen weniger tief in den Baustoff ein.[145] Bei einer sorptionsfähigen Wand wird bei einer Temperaturerhöhung abhängig von der Eindringtiefe die Feuchte entzogen. Ist die Temperatur an der Grenzschicht höher, so kann die Luft in den Poren eine größere Wasserdampfmenge aufnehmen und an die angrenzende Luftschicht abgeben. Eine treibende Transportkraft ergibt sich durch die Enthalpiedifferenz bei den unterschiedlichen Temperaturen. Die gegenseitigen Abhängigkeiten der zahlreich wirkenden Parameter an der Wandoberfläche verhindern eine ausreichend genaue theoretische Durchdringung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge, die durch den Einfluss der Wärmestrahlung an der porösen Wandoberfläche erfolgen. Die Durchführung brauchbarer Experimente ist daher äußerst kompliziert. Bisher sind solche auch nicht bekannt.

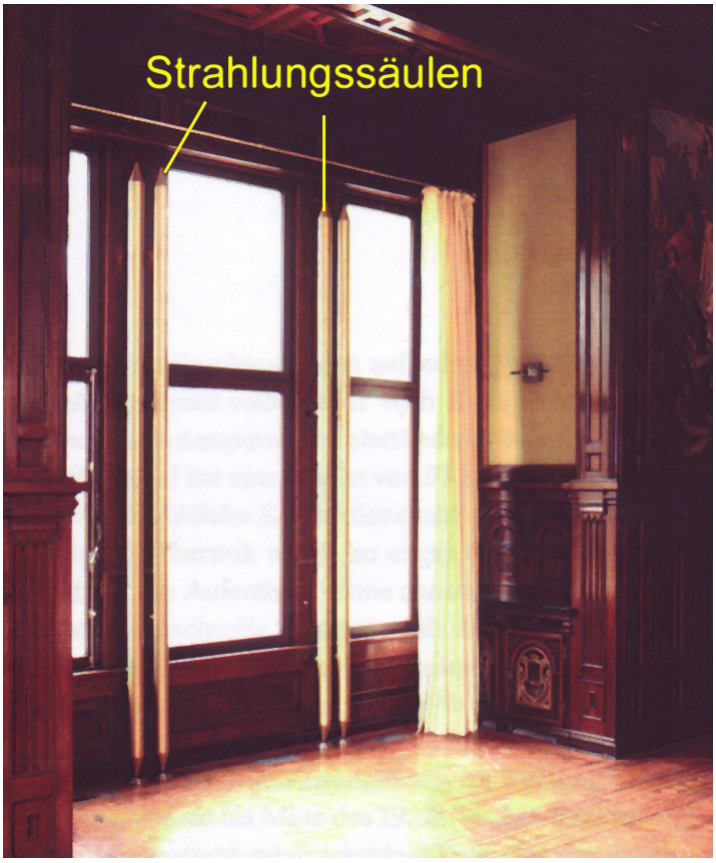
In einem Schlosssaale mit Strahlungssäulen (Abb. 2.6.2) wurde bei praktischen Messungen festgestellt, das Holz, Mauerteiloberflächen und Textilien in einem Abstand von größer 2 m von der Strahlungssäule die gleiche Oberflächentemperatur aufweisen,[146] obwohl diese Stoffe unterschiedliche Wärmeeindringkoeffizienten haben. Dieser Sachverhalt konnte bisher nicht geklärt werden, da sich wegen der Wärmeeindringkoeffizienten b auch unterschiedliche Oberflächentemperaturen ergeben müssten. Ist dieser B-Wert klein, wie bei Holz, so kommt es zum Wärmestau bzw. einer höheren Oberflächentemperatur.
Das geringe Wärmespeichervermögen dünner Putzschichten auf Wärmedämmplatten verursacht gerade auf der südlichen Fassade eine große Temperaturschwankung. Vollziegel mit einem größeren b-Wert leiten dagegen die Wärme in den Wandquerschnitt und haben so eine niedrigere Oberflächentemperatur. Mit den Strahlungssäulen konnte das tauwassergefährdete dicke Mauerwerk getrocknet und die relative Luftfeuchte im Saal gesenkt werden. Durch die höhere Oberflächentemperatur nimmt die Wandoberfläche keine Feuchtigkeit aus der Raumluft auf, sondern gibt dies ab (Desorption). Mit der höheren Oberflächentemperatur an der Randschicht ist der Wärmetransport größer, was sich günstig auf den Feuchtetransport im Wandquerschnitt auswirkt. Wandkonstruktionen, die einer höheren Wärmestrahlung ausgesetzt sind, haben im Durchschnitt eine niedrigere Feuchtehöhe. Diese praktischen Erkenntnisse werden bei der Trocknung mithilfe der Infrarotstrahler genutzt. Auf die Problematik Strahlenheizung, wie

---

[145] Zürcher, Christoph; Frank, Thomas; Bauphysik Bau und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 40
[146] Schmidt, Joachim; Auskunft von am 20.6.2008 zum Kaulbachsaal im Schloss Bredeneek; Zum Beitrag Wärme wie vom Sonnenschein, gas 3/2007, S. 26f

Unterputz-Wandheizung, Sockelleistenheizung, Elektro-Strahlplatten oder andere Konstruktionen wird im Punkt 4 weiter eingegangen.

Abb. 2.6.2: In diesem Schlosssaal kam es selbst an den Innenwänden durch Kondenswasserbildung zu Feuchteschäden. Durch die Strahlenheizung (Säulen) wurde eine gleichmäßige Temperierung erzielt und die Raumfeuchte reduziert. [147]



Bei einer Konvektionsheizung besteht dagegen die Gefahr einer Durchfeuchtung Konstruktionen aus porösen Baustoffen. Eine Nachtabsenkung, welche energetisch bis zu 30% mehr Energie verbrauchen kann,[148] verursacht immer eine Feuchtezunahme an den äußeren und im Extremfall auch an den inneren Wandoberflächen.

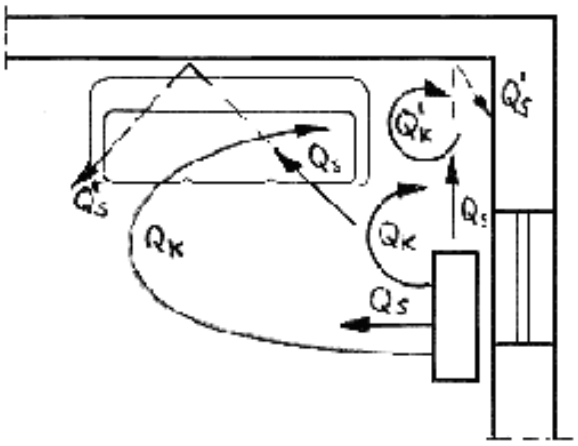
Mit der Umstellung der Heizung mit einem hohen Strahlungsanteil, zum Beispiel Kachelofen, zur reinen Konvektionsheizung, werden die Wandoberflächen vorwiegend nur noch durch die Luftwalze temperiert. Diese kann aber nicht über all ausreichend warme Luft heranführen, so-

---

[147] *Auskunft von Joachim Schmidt 20.6.2008 Kaulbachsaal im Schloss Bredeneek;*
[148] *Fischer, Konrad; Altbauten kostengünstig sanieren, 2007, GD-Verlag, Gentlemen's Diges, Berlin, S. 132*

dass besonders die unteren Wandabschnitte und Außenecken eine niedrige Oberflächentemperatur haben, siehe Punkt 2.4. Für die Ausbildung der Luftwalze und der Erwärmung aller Bauteilflächen ist auch der Standort des Heizkörpers entscheidend. Demgegenüber breitet sich die Wärmestrahlung gleichmäßig in alle Richtungen aus. Ein Teil der auftreffenden Strahlung wird von den Bauteiloberflächen und Einrichtungsgegenständen absorbiert und reflektiert (Abb. 2.6.3)

Abb. 2.6.3: Vereinfachtes Schema der Verteilung der Wärmstrahlung Qs und Wärmekonvektion QK (Luftwalze). An den Randbereichen oder Innenecken bilden sich kleine Luftwalzen Q`$_K$. Ein Teil der auftreffenden Wärmestrahlung vom Heizkörper wird reflektiert Q`s.



Eine Wandoberfläche emittiert nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz Wärmestrahlung. Es wird ein Teil der auftreffenden Strahlung reflektiert. Es geht von jeder Bauteiloberfläche stets emittierte (eigene)[149] und reflektiert (fremde) Strahlung aus. Haben die inneren Bauteilflächen eine unterschiedliche Oberflächentemperatur, so erfolgt ein Strahlungsaustausch. Die Wärmestrahlung von einem kühleren Bauteil führt nicht zur Erwärmung eines wärmeren Bauteils (II. Hauptsatz). Die Strahlung verlässt nicht den geschossenen Raum. Es ist also sehr sinnvoll, dass die innen liegenden Bauteile ein großes Wärmespeichervermögen haben. Das sind in der Regel die Wände, Decken und Fußböden. Diese geben dann noch über eine lange Zeit Wärmestrahlung an die Außenwand ab, auch wenn die Heizung abgestellt ist. Die innere Oberfläche der Außenwand kühlt somit nicht so schnell ab. Bei der Wärmestrahlung treten bei den Bauteiloberflächen relativ kleine Temperaturdifferenzen auf. Für die gleichmäßige Feuchtigkeitsregulierung der Raumluft wird so eine größere Bauteiloberfläche einbezogen. Hingegen haben bei

[149] *Alle Körper strahlen langwellige Wärmeenergie.*

einer Konvektionsheizung die Oberflächenabschnitte der Wände bzw. Bauteile zum Teil größere Temperaturunterschiede. Über den Fußboden liegen die niedrigsten Temperaturen vor und es kommt punktuell zur Tauwasserbildung.

Die Berechnung des übertragenen Wärmestroms zwischen zwei parallel gleichgroßen Flächen erfolgt nach der Formel:[150, 151]

$$Q_S = \frac{A \cdot C_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \qquad (2.25)$$

Q_S = Wärmestrom (neues Symbol Φ)
ε = Emissionsverhältnis
A = Fläche in [m²]
T = Temperatur in [K]
C_s = Strahlungskoeffizient in [W/m²K⁴]

Um den Wärmeaustausch durch Strahlung wie eine Wärmeübertragung berechnen zu können, führt man einen Temperaturfaktor a und den Wärmeübergangskoeffizienten h_r ein.[152] Diese Berechnung wird an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

In der Praxis sind jedoch die Flächen unterschiedlich groß. Die Berechnung erfolgt dann nach der Formel:

$$Q_S = \frac{A_1 \, C_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \qquad (2.26)$$

Viel komplexer ist der solare Wärmestrom an der Außenseite eines Gebäudes. Meist wird sich hier nur auf die Absorption beschränkt. So KÜNZEL „*Bei der Berechnung des Wärme-*

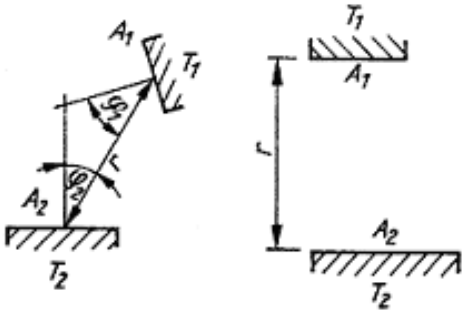
---

[150] Günter Meyer, Erich Schiffner; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 255
[151] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 119
[152] Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanns; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 120

transports werden Wärmeleitung und Enthalpieströme durch Feuchtebewegung mit Phasenänderung sowie die kurzwellige Sonnenstrahlung berücksichtigt.“[153]

Die Außenflächen, mit denen ein Strahlungsaustausch erfolgt, sind weder gleich groß und liegen zusätzlich schräg zueinander. Es trifft nur ein Teil der von einer Fläche ausgehenden Strahlung die andere (Abb. 2.6.4).[154, 155] Der Strahlungsaustausch hängt von der Temperaturdifferenz der n-Flächen und deren Emissionsverhältnisse, den jeweiligen zu einander stehenden Winkeln und der Entfernungen ab. Als Lösungsmethoden stehen analytische Verfahren (Doppelintegrale), ein grafisches Verfahren, die experimentelle Modelluntersuchung und weitere Verfahren zur Verfügung.[156]

Abb. 2.6.4: Wärmestrahlung bei zueinander liegenden, sich nicht umhüllenden Flächen



Eine Beurteilung des Strahlungsaustauschs bei einem frei stehenden Gebäude ist daher äußerst kompliziert. Selbst die Infrarottemperatur der Wandoberfläche auf der Schattenseite ändert sich ständig. Auch bei massiven Konstruktionen sinkt die Infrarottemperatur teilweise unter der Temperatur der Außenluft. Allerdings weniger wie bei einer gedämmten Fassade (Abb. 2.6.5). „*In horizontale Richtung ist die Einstrahlung infolge der sehr tiefen emittierenden Atmosphärenschicht am größten, in vertikaler Richtung infolge der dünnen emittierenden Atmosphärenschicht am geringsten.*“ In horizontaler Richtung entspricht die effektive Temperatur der Umgebungstemperatur und in vertikale Richtung stark darunter. „*Diese*

---

[153] Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss. 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 8

[154] Mayer, Günter; Schiffner, Erich; Technische Thermodynamik, 2. Aufl. 1983, Fachbuchverlag Leipzig, S. 254 ff

[155] Bockhardt, Hans-Dieter; Güntzschel, Peter; Poetschukat, Armin; Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure, 1. Aufl. 1981, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, S. 209f

[156] Autorenkollektiv: Lehrbriefreihe: Technische Wärmelehre. I-III. Dresden: Zentralstelle für das Hochschulfernstudium 1969, Lbf. 7-10

Richtungsabhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung hat zur Folge, dass die Außentemperatur Tw von horizontalen Gebäudeflächen stärker unter die Lufttemperatur fällt als die Außenwandtemperatur von vertikalen Gebäudeflächen."[157] Die Umgebung kann sowohl aus Bäumen, Häusern oder einem freien Feld bestehen, die sehr unterschiedlich in den Strahlungsaustausch eingebunden sind. Diese Zusammenhänge werden zum Beispiel in der Betrachtung zum langwelligen Strahlungsaustausch an der Oberfläche durch BAGDA[158] nicht ausreichend berücksichtigt.

$$q^4 = qU \cdot \varepsilon O - qO = \sigma \cdot (\varepsilon O \cdot \varepsilon U \cdot TU^4 - \varepsilon O \cdot TO^4) \qquad (2.27)$$
$$= \sigma \cdot \varepsilon O \cdot (\varepsilon U \cdot TU^4 - TO^4)$$

q^4 = langwelliger Wärmeaustausch
$\varepsilon O = 0{,}95$ Emissionskoeffizient der Oberfläche
$\varepsilon U = 0{,}90$ Emissionskoeffizient für die Umgebung
$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K Steffan-Bolzmann-Konstante
TU = Umgebungstemperatur = Lufttemperatur in [K]
TO = Oberflächentemperatur in [K]

DREYER[159] beschreibt die effektive Temperatur durch einen effektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Problematisch ist bei dieser Berechnung die Bestimmung der Strahlungstemperatur der Umgebung, die allein nicht ausreicht, sondern hier sind auch die Entfernungen und die Einstrahlwinkel zu den Gebäuden, Bäume usw. von Bedeutung.

$$T_{eff} = T_a + \frac{1}{h_{eff}} \cdot (I \cdot \alpha + (T_r - T_a) \cdot h_r)$$
$$mit: h_{eff} = h_c + h_r \qquad (2.28)$$

T_a = Lufttemperatur in [K]
h_c = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in [W/m²K]
T_r = Strahlungstemperatur der Umgebung in [K]
h_r = Strahlungswärmeübergangskoeffizient in [W/m²K]
I = solare Einstrahlung in [W/m²]
α = Absorptionsgrad der Oberfläche

---

[157] *G. Finger, F. Kneubühl, F. Thiébaud, Ch. Zürcher, Th Frank, Zürcher; Verbesserung des Energiehaushaltes von Gebäuden durch Minderung der Wärmestrahlung von Fenstern und Fassaden, Schweizer Ing. u. Architekten 1979, S. 4*

[158] *Bagda, Engin; in Weinmann, Kur; Handbuch Bautenschutz Bd. 2, Bauphysik und Bauchemie, Pkt. 4 Instationäre Wärme- und Feuchteströme durch Baustoffe, 1992, expert Verlag, S. 57*

[159] *Dreyer, J.; Bednar, T.; Deseyve, C.; Beurteilung der thermischen Performance der Gebäudehülle unter Berücksichtigung des Strahlungsverhaltens bei der Ermittlung des Wärmeverlustes von Bauteilen, Bericht des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Fachbereich Bauphysik TU Wien, 21. Sept. 2004*

Die Strahlungstemperatur an der Oberfläche der Außenwand wird von der Temperatur der Umgebung (Häuser, Bäume, Boden usw.), der Himmelsrichtung und dem Winkel zum Himmel (horizontal oder vertikal) bestimmt. Ebenso ist die Beschattung zu berücksichtigen. Die Gewichtung erfolgt über die Einstrahlzahlen nach:

$$T_r = \sqrt[4]{F_{Himmel} \cdot T_{Himmel}^4 + F_{Umgebung} \cdot T_{Umgebung}^4 + F_{Boden} \cdot T_{Boden}^4} \qquad (2.29)$$

mit F_{xxx} = Anteil
T_{xxx} = Strahlungstemperatur

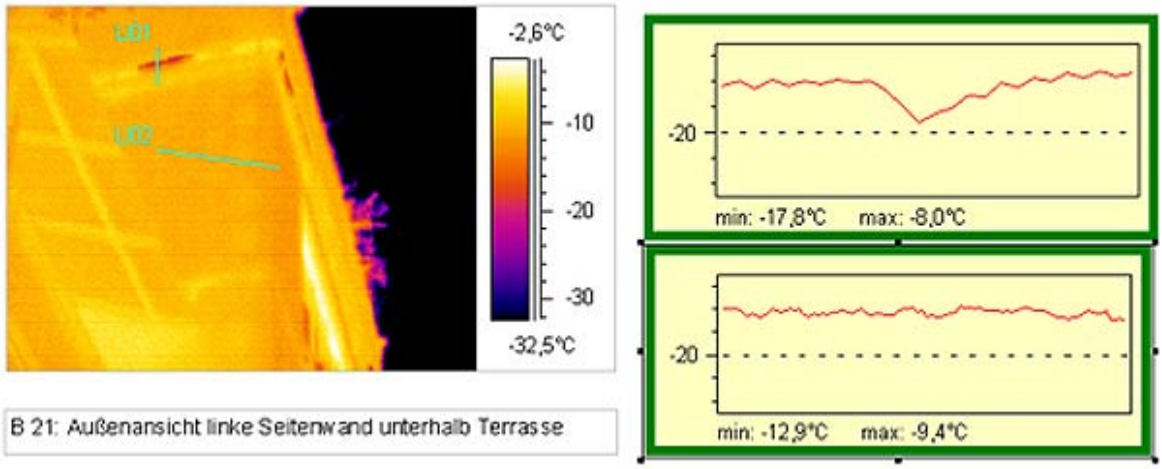
Der Begriff Strahlungstemperatur stammt vom Wiener Mathematiker Walter HEINDL. Er dient zur Beurteilung einer besseren Aussage zum thermischen Verhalten von opaken (undurchlässigen) Außenwänden. Aber auch mit der weiter entwickelten instationären Berechnungsmethode konnten die Ergebnisse der Messergebnisse von WIECHMANN/VARSEK[160] in Bruchsal beim Justus Knecht Gymnasium an einer einschaligen 40 cm starken Ziegelwandaußenwand im 2. Obergeschoss am 19. bis 22.2.82 nicht beurteilt werden. Das von HEINDL verwendete Computerprogramm wich (21. Juli 1983) 400 bis 600 % von den gemessenen Werten ab.[161]

Der Strahlungsaustausch mit seiner Strahlungsabsorption und Reflexion hat nicht nur eine thermische Bedeutung. An wärmere Oberflächen lagert sich weniger Feuchtigkeit an (Tauwasserbildung), wenn die angrenzende Luft eine niedrigere Temperatur hat. Daneben werden aber auch die Feuchtetransporte in der Konstruktion und vor allem an den Randschichten aktiviert. Im Beispiel in der Abb. 2.6.5 sinkt die Oberflächentemperatur bei dem Wärmeverbundsystem weit unter die Lufttemperatur. Bei diesem System kann nur eine helle Farbbeschichtung verwendet werden, damit die dünne Putzschicht keine Risse bekommt. Mit der kleineren Strahlungsabsorption gegenüber dunkleren Putzen wird weniger solare Wärme aufgenommen. Was bei einer Thermohaut ohnehin kein Sinn machen würde.

---

160 H.H. Wiechmann, Z.Varsek; Energieeinsparung wie sei ein Planer praktiziert, rationeller bauen 2/83 S. 33
161 Bosser, Paul; Stellungnahme S. 4 zum Schlussbericht von Prof. Jürgen Dreyer, Institut für Hochbau und Technologie der TU-Wien, zur Literaturrecherche bezügl. Untersuchungen zum theoretisch ermittelten und tatsächlich benötigten Heizwärmebedarf von Gebäuden unterschiedlicher Bauweise Wien, 19. Juni 2007

Abb. 2.6.5: IR-Aufnahme eines Wärmedämmverbundsystems am 24.10.2003, 8.30 Uhr in Leipzig, die Lufttemperatur betrug -5 ºC die Infrarottemperatur auf der Oberfläche gedämmte ca. -13 ºC hatte.



B 21: Außenansicht linke Seitenwand unterhalb Terrasse

Bei beschatteten Flächen oder bedeckten Himmel ist die Zeitperiode größer, wo ein Tauwasserfilm bzw. eine höhere Feuchte an der Fassade vorliegt. Dies kann zu einer Algenbildung führen. Was aber nicht ausreichend beachtet wird, sind die Schimmelpilze unmittelbar an der Fassade. Diese benötigen für ihr Wachstum weniger Feuchtigkeit und gelangen bei der täglichen Lüftung in die Wohnung. Statt einer Verdünnung der Mikroorganismen kann es im ungünstigen Fall dann zu einer Erhöhung kommen. In der Abb. 2.6.6 wird eine Fassade mit Wärmeverbundsystem und starker Algenbildung gezeigt.

Abb. 2.6.6: Fassade mit einem Wärmedämmverbundsystem. Deutlich sind die Folgen der Tauwasserbildung zu erkennen. Die Schlagdübel, hier als helle Flecken zu sehen, sind kleine Wärmebrücken.



Durch Infrarotverspieglung der Fassade und Fenster lässt sich die Wärmestrahlung von Gebäuden reduziert und damit eine Energieeinsparung erzielen.[162] Gleichzeitig mit der Verringerung des Wärmestroms wird aber auch der Feuchtetransport in einer porösen Wand reduziert. Es geht hierbei um den Feuchteaustausch der Randschichten der Konstruktion mit der angrenzenden Luftschicht. Bei solarer Wärmestrahlung wird die Höhe der absorbierten Sonnenstrahlung von der Absorptionszahl der Pigmente in den Beschichtungsstoffen (Dispersion, Kunstharz oder Wasserglas) bestimmt.[163] Hierdurch lassen sich gerade bei hoher Strahlenabsorptionszahl neben der zusätzlichen Gewinnung von solarer Wärme auch Trocknungseffekte erzielen. Dazu muss die äußere Wandschicht sorptionsoffen sein.

Durch einen hellen Farbton können Risse des Putzes auf einer Außendämmung vermieden werden. In vielen Fällen handelt es sich um einen Kunststoffputz mit einer:

Strahlungsabsorptionszahl von $\mu = 0{,}30$ bis 0,40 und einer

Reflexionszahl von $\mu = 0{,}60$ bis 0,70

Auf massiven Wänden hingegen können durchgefärbte Kalkputze mit dunkler Einfärbung appliziert werden, welche eine:

Strahlungsabsorptionszahl von $\mu = 0{,}65$ bis 0,80 bei einer

Reflexionszahl von $\mu = 0{,}35$ bis 0,20 aufweisen.[164]

Bei der äußeren Wärmedämmung hat die geringe Putzschicht nur ein sehr kleines Wärmespeichervermögen gegenüber einer massiven Wandkonstruktion. Die äußere Oberfläche ist somit einer großen Temperaturschwankung ausgesetzt, siehe Abb. 2.5.5. Gerade im Winter liegt die Infrarottemperatur der Wandoberfläche überwiegend unterhalb der Lufttemperatur. Für die energetische Berechnung der Konstruktion werden aber äußere Oberflächentemperaturen oberhalb der Lufttemperatur verwendet, wie sie bei massiven Konstruktionen vorliegen. Zum Vergleich werden in den Schemata (Abb. 2.6.7) die Wärmeströme während der kalten Jahreszeit bei verschiedenen Wandkonstruktionen gegenübergestellt. Bei einer massiven Wand (Bild A)

---

[162] G. Finger, F. Kneubühl, F. Thiébaud, Ch. Zürcher, Th Frank, Zürcher; Verbesserung des Energiehaushaltes von Gebäuden durch Minderung der Wärmestrahlung von Fenstern und Fassaden Schweizer Ing. u. Architekten 1979

[163] Bagda, Engin; in Weinmann, Kur; Handbuch Bautenschutz Bd. 2, Bauphysik und Bauchemie, Pkt. 4 Instationäre Wärme- und Feuchteströme durch Baustoffe, 1992, expert Verlag, , S. 56

[164] Bossert, Paul; Die 8 energierelevanten Faktoren der Außenwand, vom 20.06.2003

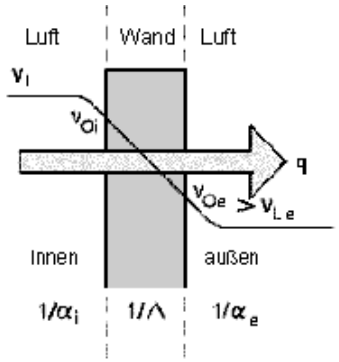
ist der Wärme- und damit auch der Feuchtestrom von innen nach außen gerichtet. Bei einer äußeren Wärmedämmung erfolgt ein Wärmestrom von innen bis zur äußeren Wandoberfläche und zeitweise ein zweiter Wärmstrom von der wärmeren Außenluft zur kühleren Wandoberfläche (Bild B). Kann die äußere Wetterschutzschutzschicht zum Beispiel bei einer Kerndämmung genügend Wärme speichern (Bild C), so ist auch hier wie bei Bild A der Wärmestrom von innen nach außen gerichtet. Feuchtetechnisch stellt die Konstruktion im Bild A die günstigste Variante dar. Der Feuchtetransport ist unmittelbar mit dem Wärmestrom gekoppelt und sorgt so immer für eine ausreichende Austrocknung der Wandkonstruktion. Im Bild B erfolgt eine Beseitigung der bei Altbauten typischen Wärmebrückenzone im Auflagebereich der Decken sowie die periodisch wechselnden Temperatur- und Feuchteeinflüsse.[165] Entgegen steht aber der fehlende positive solare Einfluss auf das massive Mauerwerk, welcher für trockene Wände sorgt. Nicht einschätzbar sind die Feuchteerhöhung an der Grenzschicht zwischen Mauerwerk und Dämmschicht und deren Rückkopplung bis in den Wandquerschnitt. Genauere praktische Erkenntnisse werden sich in 2 bis 3 Jahrzehnten ableiten lassen. Wie nachteilig sich sperrende Schichten auf der Außenfassade auf Holzkonstruktionen auswirken, zeigen Schäden an Fachwerkgebäuden. In vielen Bundesstaaten in den USA sind WDVS, wie sie in Deutschland zur Anwendung kommen, nicht mehr erlaubt, da es bei den Ständerbauten vermehrt zum Befall durch den Echten Hausschwamm gekommen ist. Von Vorteil dürften mineralische Dämmputze oder hinterlüfte Fassaden sein. Der Schichtaufbau im Bild C ist typisch für Plattenbauten und kommt in der Regel im Altbaubereich nicht vor.

---

[165] *Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 284*

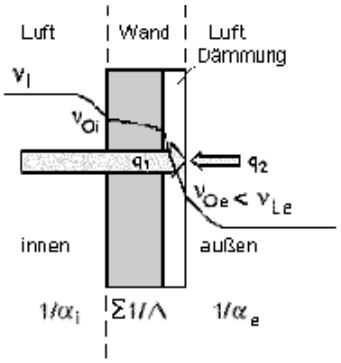
Abb. 2.6.7: Gegenüberstellung des bei unterschiedlichen Wandkonstruktionen

Bild A



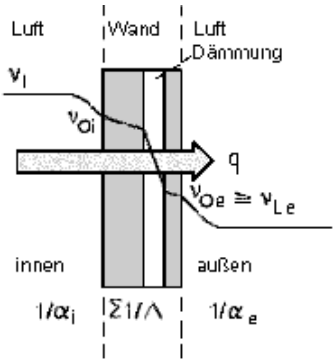
Bei einer massiven Wand ist der Wärmestrom von innen nach außen gerichtet.

Bild B



Bei einer Außenwand mit äußerer Wärmedämmung ist der Wärmestrom von innen nach außen gerichtet. Es liegt aber auch ein kleiner Wärmestrom von der wärmeren Außenluft auf die unterkühlte Fassade vor.

Bild C



Wärmestrom durch eine Außenwand mit Kerndämmung ist der Wärmestrom von innen nach außen gerichtet, vorausgesetzt, die Wetterschutzschicht verfügt über ein ausreichendes Wärmespeichervermögen.

Aber nicht nur bei wärmegedämmten Fassaden kommt es zu einer Algenbildung. Kann sich längere Zeit Tauwasser auf massiven Bauteiloberflächen bilden, so entstehen auch hier Algenbelägen. Die wichtigsten Ursachen sind:

- Ein Ziegelmauerwerk nimmt über undichte Fugen sowie porigen und wasserdurchlässigen Mörtel mehr Niederschlag auf, als es in der Folgezeit wieder abgeben kann. Hier spielt auch das örtliche Klima und Bepflanzung eine Rolle.
- Die Wetterschutzschicht wird einer überdurchschnittlichen Feuchtebelastung ausgesetzt, wie Spritzwasser, Vorsprünge oder Fensterbänke).
- Die auf der nördlichen Seite in unmittelbarer Nähe der Gebäude befindlichen Sträucher und Bäume bilden ein Mikroklima (Schatten und höhere Feuchtigkeit), was ein Algenbewuchs fördert.
- Auf der Wetterschutzschicht tritt zeitlich begrenzt Kondenswasserbildung auf.[166] Wegen des geringen Wärmespeichervermögens und dem Strahlungsaustausch mit der Umgebung sinkt die Oberflächentemperatur unterhalb der Außentemperatur ab.

[166] *Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 319*

- Fehlender Wärmefluss von innen oder fehlende solare Wärmespeicherung verursachen bei freie stehendem Mauerwerk oder im Beispiel von LORENZ [167] bei einer gemauerten Treppenwange zu einer lange anhaltenden Feuchte an der Oberfläche durch Kondenswasser.
- (Ruhende) Luftschichten hinter massive Wetterschalen (Natursteinplatten) und Metallverkleidungen kühlen unter die Außenlufttemperatur ab.[168] Auch hier ist eine Algenbildung bei entsprechendem Nahrungsangebot möglich.
- Die Materialeigenschaften der Beschichtungen, wie Sorption, Strahlungsabsorption und Reflexion beeinflussen die Höhe und Dauer der Feuchte an der Fassadenoberfläche.
- Sind Außenfenster ständig durch Kippstellung geöffnet, so kondensiert die Feuchtigkeit in der warmen Luft oberhalb des Fensters an der Fassade.[169]

3. Der Feuchtigkeitstransport an den Bauteiloberflächen und in der Baukonstruktion

3. 1. Feuchtigkeitseigenschaften und -austausch der Baustoffe mit der Umgebung

„*Die genaue Erfassung der sich zeitlich verändernden Feuchteverteilungen am Objekt über längere Zeiträume hinweg …*“ sind „*… oft nicht praktikabel oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich … Durch moderne laborexperimentelle und rechnerische Untersuchungen lässt sich aber das Feuchteverhalten eines Bauteils in Abhängigkeit von den Klimabedingungen voraussagen.*“[170] Für die Beurteilung eines langzeitlichen Feuchteverhaltens im Querschnitt von Ziegelwänden und im Gebäude können die verbauten Holzdeckenbalken herangezogen werden. Je feuchter die Balkenköpfe sind, um so stärker ist die Fraßaktivität der Holz zerstörenden Insekten. Kurzzeitige aber auch langzeitliche Feuchtebelastungen führen in der Regel zu Schäden an den Holzbalken. Der Schädigungsgrad lässt Rückschlüsse auf eine Feuchtebelastung und auch auf eine mögliche Feuchteverteilung im Wandquerschnitt zu. Zu beachten ist aber auch, dass die jeweilige Struktur der porösen Baustoffe das Feuchteverhalten bestimmt, siehe Abb. 3.1.1.

167Lorenz, Wolfgang; Hankammer, Gunter; Lassl, Karl; Sanierung von Feuchte- und Schimmelschäden, 2005, Rudolf Müller GmbH & Co KG Köln, S. 359

[168]Künzel, H; Wärme- und feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an vorgehängter Außenwandverkleidung, DBZ 11(1964)4

[169] Lorenz, Wolfgang; Hankammer, Gunter; Lassl, Karl; Sanierung von Feuchte- und Schimmelschäden, 2005, Rudolf Müller GmbH & Co KG Köln, S. 358

170 Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 6

Selbst gleiche Gebäude mit denselben Baustoffen am gleichen Standort können zum Teil recht unterschiedliche wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften aufzeigen. 1992 wurden 10 gleiche Doppelhäuser untersucht, die alle circa 35 Jahre alt waren. Die Häuser im Kohrener Land wurden durch 3 verschiedene Baufirmen mit gleichen Baustoffen aber unterschiedlicher Hersteller innerhalb weniger Jahre errichtet. Bei zwei Gebäuden lag eine hohe Salzbelastung vor, die durch die verwendeten Ziegelsteine verursacht wurde. Der verwendete Lehm für die Ziegelsteine war salzhaltig. Diese beiden Häuser waren extrem durch Schimmelpilze befallen.

Jeder Baustoff steht in einem Feuchtegleichgewicht zu seiner Umgebung. Es stellt sich so ein praktischer Feuchtegehalt ein (siehe Tabelle 3.1), der je nach dem Standort, der Nutzung und der Himmelsrichtung (Strahlungseinfluss durch die Sonne) abhängig ist. Bei der gespeicherten Feuchtigkeit in einer Außenwand handelt es sich um einen ständig veränderlichen Prozess. Es ist daher schwierig, den durchschnittlichen Feuchtegehalt anzugeben. Die außenklimatischen Bedingungen, wie Standort an der Küste oder im Binnenland, die Beanspruchung durch Schlagregen sowie die Jahreszeit wirken hier entscheidend auf die Feuchtigkeit in der Konstruktion ein. Bei gleichem Mauerwerk eines Gebäudes können je Ausrichtung vollkommen unterschiedliche Feuchteverteilungen vorliegen und sich so zusätzlich auf das Wärmeverhalten des Gebäudes auswirken.

Als kritischen Feuchtegehalt bezeichnet man die Wassermenge, die als untere Grenze für den möglichen kapillaren Wassertransport gilt. Das entspricht etwa einer durchschnittlichen Luftfeuchte von 90 %. Unterhalb dieses Feuchtigkeitsgehaltes kann kein kapillarer Wassertransport stattfinden, sondern nur noch eine Wasserdampfdiffusion.[171] In diesem Bereich wird die Feuchte vorrangig sorptiv an der Porenwandung gebunden.[172] Als praktischer und rechnerischer Feuchtegehalt wird der Feuchteanteil bezeichnet, der sich allmählich in allen kapillarporösen Bauwerksteilen als Durchschnittswert einstellt. Maßgebend sind die klimatischen Gegebenheiten und die Zellstruktur des Stoffes.

Für jeden porösen Baustoff, abhängig von der Größe des Porenraums und der Verteilung der Poren ergibt sich entsprechend seiner Kapillarstruktur ein anderer Wert. Unter normalen

---

[171] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996 Berlin Ernst & Sohn, S. 54

[172] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-7

Nutzungsbedingungen erreichen die meisten Baustoffe ihren spezifischen kritischen Feuchtegehalt nicht.[173]

Die Poren werden unterschieden in

- Makroporen > 10^{-4} m: Wasser wird in flüssiger Form gespeichert.
- Kapillarporen 10^{-7}- 10^{-4} m: Wasser wird durch Kapillarkräfte transportiert.
- Mikroporen <10^{-7}m: Wasser wird im Wesentlichen durch Diffusion transportiert. [174]
- Sorptionsporen (Gelporen) Ø < 0,1 mm: Sie verursachen die Gleichgewichtsfeuchte. Die Breitesten wirken bei langsamem Wassertransport mit.[175]

Die Feuchtigkeit des jeweiligen Bauteils hat einen Einfluss zum Beispiel auf eine mögliche Schädigung der verbauten Holzkonstruktionen. So wird Holz bereits ab einer Holzfeuchte zwischen 8 bis 10 % durch Holz zerstörende Insekten, wie den Gewöhnlichen Nagekäfer (*Anobium punctatum*) geschädigt, welcher die überwiegende Schädigung verursacht. Nach der Sorptionsisotherme wird diese Holzfeuchte bereits bei einer relativen Luftfeuchte von 50 bis 55 % erreicht. Im trockenen Holz (7 bis 8 %) kommt der Splintholzkäfer (*Lyctus linaris Goeze*) vor. Dieser ist jedoch weniger verbreitet. Es ist daher sehr wichtig, dass bei Gebäuden mit Holzkonstruktionen die Feuchtigkeit in der Konstruktion so niedrig wie möglich ist.

---

[173] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 34
[174] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-5
[175] Klaas, Helmut; Schulz, Erich; Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalkstein – Vorblendmauerwerk, Schadensfreies Bauen Bd. 13, 2. Aufl. 2002, Fraunhofer IRB Verlag, S. 38

Tabelle 3.1: Ausgewählte praktischer Feuchtegehalte von Baustoffen (Dauerfeuchtigkeitsgehalt),[176, 177, 178] Porenraum, Diffusionswiderstandszahl und Wasseraufnahmekoeffizient.[179]

Baustoffe	**Praktischer Feuchtegehalt** [Vol .-%]	**Porenraum** [Vol .-%]	**Diffusions-widerstands-zahl**	**Wasserauf-nahmekoeff. a** [kg/m²s^{0,5}]
Holz, Sperrholz, organische Faserdämmstoffe	15,0 $_{Mass.}$-%	-	-	-
Schaumkunststoffe aus Polystyrol	5,0 $_{Mass.}$-%	-	-	-
Beton	ca. 5,0	8-20	10-50	0,02-0,05
Leichtbeton	ca. 5,0	-	-	-
Gips, Anhydrit	ca. 2,0	-	-	-
Vollziegel	bis 2,5	15-30	3,5-10	0,05-0,5
Klinker	-	6-10	200-350	0
Kalkputz	-	20-25	10	0,01-0,02
Zementmörtel	-	12-18	20-30	0,03-0,05

Alle Baustoffe stehen in einem Feuchtegleichgewicht zur umgebenden Luft. Liegt zum Beispiel im Keller eine hohe Luftfeuchte vor, so wird diese Feuchte über die Ziegelsteine der gemauerten Kappe auf die Sand- oder Schlackefüllung mit den Lagerhölzern und Dielung übertragen. Die Holzfeuchte der Dielung im Erdgeschoss steigt dann sehr schnell an und befindet sich dann im Gefährdungsbereich von über 20 Prozent. Bei dieser Feuchtigkeit wachsen auch noch Holz zerstörende Pilze, wie zum Beispiel der Echte Hausschwamm, siehe auch Abb. 3.2.4. Es ist daher sehr wichtig, dass alle Bauteile möglichst eine niedrige Feuchtigkeit haben und immer schnell abtrocknen können. Günstig wirkt hier zusätzlich die Trennung der direkten Berührungsflächen zwischen den Baustoffen mit kleiner und großer Sorptionstherme durch einen Luftspalt oder eine Sperrschicht. Dabei darf allerdings die Sperrschicht nicht zu einem Feuchtestau innerhalb der Konstruktion führen.

In allen kapillarporösen Bauwerksteilen wird Feuchtigkeit gespeichert. Die Speicherung verläuft dynamisch und innerhalb desselben Bauteils oft sehr ungleichmäßig ab. Bei

---

[176] *Lothar Goretzki; bs 2/97 S. 42*
[177] *Wendehorst, R.; Baustoffkunde , 24. Aufl. 1994., Vicentz Verlag Hannover, S. 661f*
[178] *DIN 4103 Teil 4 Wärmeschutz im Hochbau, Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte 12.85*
[179] *Arendt; Claus; Trockenlegung, 1983, Deut. Verlags-Anstalt, S. 89*

kapillarporösen Bauwerksteilen stellt sich ein durchschnittlicher Dauerfeuchtigkeitsgehalt ein. Holz wird zum Beispiel durch eine Gleichgewichtsfeuchtigkeit gekennzeichnet, ist jedoch auch hygroskopisch, kann also aus der Luft Feuchtigkeit binden.

Der Feuchtigkeitsaustausch zwischen einem Bauteil und der angrenzenden Luft erfolgt auf folgende Arten:

- Aufnahme und Abgabe flüssigen Wassers über makroskopische Hohlräume (Kapillare und Poren), die Transportmechanismen sind der Kapillarsog und die Sickerströmung.
- Die Wasserdampfdiffusion erfolgt durch eine unterschiedliche Wasserdampfkonzentration der beidseitig angrenzenden äußeren und inneren Luftschicht.
- Aufnahme und Abgabe von Wasserdampf aus der Umgebungsluft (Hygroskopizität). Der Feuchtegehalt des Bauteils ändert sich mit der relativen Feuchte der angrenzenden Luft.[180, 181]
- Hinzu kommen die Temperaturen der Luft und der Bauteiloberfläche sowie die Luftgeschwindigkeit.

Die genannten Vorgänge verlaufen gleichzeitig. Verantwortlich für jede Feuchtigkeitsbewegung ist der Potenzialunterschied im Konstruktionsquerschnitt. Dabei kann das Wasser in einem Bauteil oder Baustoff lange Zeit bewegungslos beharren, aber auch in Bewegung geraten und zur Oberfläche des Bauteils transportiert werden. Wenn es dort verdunsten kann, wird ein Austrocknungsprozess eingeleitet, und der Feuchtigkeitsgehalt im porösen Baustoff nimmt ab. Die Richtung und Effektivität eines derartigen Wassertransportes hängt von gegebenen physikalischen Randbedingungen, vorhandenen Feuchtigkeitsverteilungen im Stoff und der Zellstruktur[182] ab. Welchen Einfluss die Temperatur und Konvektion auf das Austrocknungsverhalten hat, soll an zwei Situationen am Beispiel von Beton dargestellt werden.

---

[180] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 92-102
[181] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 13
[182] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 93

a) Lufttemperatur 20 °C, relative Luftfeuchte 50 %, Oberflächentemperatur 20 °C, Luftgeschwindigkeit 20 km/h, Verdunstung von der Oberfläche 0,6 kg Wasser je 1 m² in einer Stunde.
b) Lufttemperatur 30 °C, relative Luftfeuchte 40 %, Oberflächentemperatur 30 °C, Luftgeschwindigkeit 30 km/h, Verdunstung von der Oberfläche 1,5 kg Wasser je 1 m² in einer Stunde.[183]

Mit der Änderung der äußeren Klimafaktoren in der zweiten Situation erhöht sich die Verdunstungsmenge. Diese Beispiele zeigen, dass in der Praxis immer die Gesamtheit der Einflüsse betrachten werden muss.

Es gibt aber auch Stoffe, die praktisch keine bzw. nur eine vernachlässigbar kleine Wasseraufnahme besitzen. Im Bauwesen finden diese als Sperrschichten, Verkleidungen oder Isolierschichten Anwendung. Diese lassen keine Feuchte durch und können bei falscher Anordnung im Wandquerschnitt zum Feuchtestau und damit zur Durchfeuchtung des Bauteilquerschnitts führen.

Die meisten Baustoffe haben zwei verschiedene feuchteabhängige Transportfunktionen, das sind der Saugvorgang bei direktem Kontakt mit Wasser und die kapillare Weiterleitung, wenn der Saugvorgang beendet ist. Für eine abschätzende Berechnung des Flüssigtransportkoeffizienten kann der Wasseraufnahmekoeffizient für den Saugvorgang verwendet werden, aber „*der Transportkoeffizient für die Weiterleitung ist bislang schwer abschätzbar*“.[184] Gerade im Altbaubereich mit Holzkonstruktionen, wo bereits geringe Feuchteerhöhungen langfristig die Standsicherheit der tragenden Holzteile gefährden, führt eine unzureichende Einschätzung zu einem beträchtlichen wirtschaftlichen Schaden.

Eine interessante messtechnische Untersuchung an Proben wurde von KRUS, KÜNZEL, HARTWIG, KIEßL[185] zur Wasseraufnahme für das System Zementputz und Ziegel durchge-

---

[183] Lohmeier, Gottfried C.O.; Bergmann, Heinz; Post, Matthias; Praktische Bauphysik, 5. Aufl. 2005 B.G. Teubner Verlag, S. 289
[184] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 36
[185] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 55

führt. Dabei wurde festgestellt, dass über die obere offene Stirnfläche nach 12 Wurzelstunden mehr Wasser verdunstet, als über den Saugvorgang nachgeführt werden kann. Die Autoren vermuten, dass das Quellen des Zementsteins und damit die Verringerung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Zementputzes verantwortlich ist. Völlig anders verhält sich die abgedichtet Probe, hier kommt es zu keiner Verdunstung, sondern das Wasser in der Baustoffprobe strebt ein Maximalwert an. Diese Versuchsdurchführung zeigt, dass eine Sperrschicht zur Feuchteerhöhung und zur Durchfeuchtung des Wandquerschnitts führt. Die Fläche des Feuchteaustausches (Verdunstung) wird an eine andere Stelle verlagert. Bei den Versuchsdurchführungen erfolgt die kapillare Wasseraufnahme in horizontale Richtung. Beispiel für den Wasseraufnahmekoeffizienten ausgewählter Baustoffe sind in der Tabelle 3.2. aufgeführt.

$$m_{H2O} = A \sqrt{t} \qquad (3.1)$$

m_{H2O} = flächenbezogene Wassermenge in [kg/m²]
A = Wasseraufnahmekoeffizient in [kg/m² $h^{1/2}$]

Tabelle 3.2: Wasseraufnahmekoeffizienten ausgewählter Baustoffe

Baustoff	Dichte	Wasseraufnahmekoeffizienten
Backsteine	1150 kg/m³	8-9 [kg/m² $h^{1/2}$] und damit stark saugend, da A > 2,0
Beton	2400 kg/m³	1 [kg/m² $h^{1/2}$] und damit Wasser hemmend, da A ≤ 2,0
Kalkzement-Putz	1900 kg/m³	ca. 2,5 [kg/m² $h^{1/2}$] und damit stark saugend, da A > 2,0
Kunststoffdispersion	-	ca. 0,15 [kg/m² $h^{1/2}$] und damit wasserabweisend, da A ≤ 0,5.[186]

Hygroskopische Gleichgewichtsfeuchtigkeit ist ein Zustand, wo ein Stoff entsprechend seiner hygroskopischen Eigenschaften die maximal mögliche Wassermenge aus der umgebenen Raumluft aufnehmen kann. Die hygroskopischen Eigenschaften von Baustoffen werden durch Sorptionsisothermen gekennzeichnet.[187] Die Größe dieser hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte wird durch die Anzahl der Mikroporen im Baustoff bestimmt, siehe Abb. 3.1.1). Der Wasserdampfdruck in den Poren ist genauso groß wie in der Umgebungsluft. Die Wandbau-

[186] *Zürcher, Christoph, Frank, Thomas; Bauphysik Baue und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 9*
[187] *Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 34*

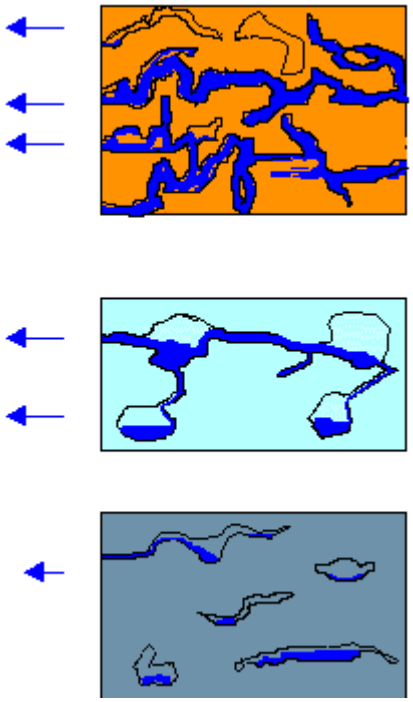
stoffe, Ziegel, Mörtel, und einige Natursteine, besitzen einen hohen Anteil an Mikroporen. Das kapillar-poröse System (nach außen offene Sackkapillare und Verbindungen untereinander) des Mauerziegels aus Luftporen und Haarröhrchen entsteht durch das Entweichen der Feuchtigkeit beim Trocknen und Brennen sowie durch die Verbrennung organischer Bestandteile.

Abb. 3.1.1: Feuchteverhalten verschiedener Baustoffe bezogen auf ihre Struktur [188, 189]

1. Gut ausgebildetes Kapillarsystem mit Kapillaren unterschiedlichen Durchmesser: Großes Wasseraufnahmevermögen, großes Feuchteabgabevermögen z. B. Ziegel, Gips

2. Geschlossenzellige Struktur mit wenigen Kapillaren zwischen den Zellen: Großes Wasseraufnahmevermögen, geringes Feuchteabgabevermögen nur über Wasserdampfdiffusion, z. B. Gasbeton

3. Struktur mit kleinen, abgeschlossenen Poren und Kapillaren: Geringes Wasseraufnahmevermögen, geringes Feuchteabgabevermögen, z. B. Schwerbeton, Blähtonbeton



Die Ausbildung der Kapillaren wird durch das Herstellungsverfahren bestimmt, wie Weich-, Strang- oder Trockenverpressung.[190] Dabei liegt das Porenvolumen bei normalen Ziegelsteinen zwischen 15 bis 30 % hingegen beim Klinker bei 5 bis 20 %.[191] Diese Materialstruktur ermöglicht dem Ziegel eine gute Wasseraufnahme in Form von Dampf und Wasser und kann im Vergleich zum Klinker bis achtmal größer sein.[192] Beim Brennvorgang der Klinker werden die Tonmineralien geschmolzen und ein großer Teil der „Sackkapillaren“, die an der Steinoberfläche enden, werden so verschlossen. Bei den weich verpressten Ziegelsteinen erfolgen eine schnelle und starke kapillare Wasseraufnahme und ein rascher kapillarer Rücktransport, was eine schnel-

[188] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 24, 92-102
[189] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für das Bauwesen Berlin, S. 41/42
[190] Klaas, Helmut; Schulz, Erich; Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalkstein – Vorblendmauerwerk, Schadensfreies Bauen Bd. 13, 2. Aufl. 2002, Fraunhofer IRB Verlag, S. 38
[191] Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175
[192] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag für Bauwesen Berlin, S. 62

le Austrocknung bedeutet. Bei den stranggepressten Vormauerziegeln liegt eine gerichtete Kapillarität vor. Sind diese Oberflächenkapillaren gefüllt, so wird kein weiteres Wasser mehr aufgenommen. Bei der Trocknung erfolgt der Rücktransport der Feuchtigkeit fast vollständig über die Oberflächenkapillaren. Die rasche Verdunstung geschieht an der Porenmündung.[193]

Das Wasser muss in flüssigem Zustand durch alle Schichten hindurch bis an die Oberfläche gelangen können. Diese Eigenschaften erfüllen nicht zu hoch gebrannte Ziegelsteine[194] und die Feuchte regulierenden Putze.

Bei einer Wandkonstruktion aus Ziegelsteinen erfolgt ein schneller Feuchtetransport durch Kapillarleitung und Diffusion zur trockenen Wandseite. Es kommt daher innerhalb einer Ziegelwand nur selten zur Kernfeuchte oder zu einem Feuchtigkeitsstau. Förderlich für den gekoppelten Feuchtetransport ist der geringe Wasserdampf-Diffusionswiderstand.
In der Ukraine Abb. 3.1.2 und 3.1.3 wurden und werden auch heute noch (Abb. 3.1.4) die Gebäude aus Ziegelsteinen errichtet. Wenn nicht starke Feuchtebelastungen vorliegen, wie z. B. durch eine kaputte Dachentwässerung, zeigen diese Mauerwerke keine äußeren Schäden.

Abb. 3.1.2: Kiew, Щербакова (Ukraine) Wohngebäude in Ziegelbauweise unverputzt.



[193] *Klaas, Helmut; Schulz, Erich; Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalkstein – Vorblendmauerwerk, Schadensfreies Bauen Bd. 13, 2. Aufl. 2002, Fraunhofer IRB Verlag, S. 38-40*
[194] *Oberrauch, Bernhard; Bauphysikalische Daten über Lehm, Wohnung + Gesundheit 9/92 –Nr. 64, S. 48*

Abb. 3.1.3: Vinnitsa, Вул. Пирогова (Ukraine) Wohngebäude in Ziegelbauweise unverputzt.



Abb. 3.1.4: Neu errichtetes Gebäude in Vinnitsa, Вул. Зодчих, (Ukraine), Mauerwerksbau 10 bis 11-stöckige Wohngebäude.



Der Diffusionswiderstandsfaktor μ wird im Labor ermittelt. Bei dünnen Schichten können enorme Abweichungen auftreten. Aber auch der Diffusionswiderstandsfaktor bei einzelnen Baustoffen kann sehr unterschiedlich sein. Zum Beispiel hat Sperrholz nach DIN 68705 einen μ-Wert 50 bis 400 oder Bitumendachbahn nach DIN 52128 einen μ-Wert von 10.000 bis 80000.. Das ist eine Streuung bis zum 8-Fachen! Bei Ziegelsteinen liegt dieser Wert zwischen 5 und 10, was einer Streuung von „nur“ dem 2-Fachen entspricht. Siehe hierzu auch Pkt. 1.4. Beschreibung des s_d-Wertes. Wenn die Grunddaten unsicher sind, kann man auch mit komplizierten Rechenverfahren keine präzisen Resultate erzielen.[195] Daher sind in erster Linie

[195] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin , S.224*

in der Forschung Methoden zu entwickeln, um gesicherter Grunddaten für die Eigenschaften der Baustoffe zu ermitteln.

Die früher hergestellten weich gebrannten Feldbrandsteine haben eine hohe kapillare Saugwirkung und können so schnell die Feuchte bei Schlagregen weiterleiten und trocknen aber auch sehr schnell ab. „*Dadurch besteht weniger Gefahr, daß die hölzernen Fachwerkkonstruktionen durch ständige Feuchtigkeit geschädigt werden.*“[196]

Mit den Anforderungen zum Wärmeschutz sind unter denkmalpflegerischen Ansprüchen bei Fachwerkbauten neue Ausfachungen oder zusätzliche Maßnahmen erforderlich. In diesem Zusammenhang stellte GERNER in seinem Vortrag fest: *„Der Zugewinn an Erkenntnissen liegt im Bereich der Gefahren durch sperrende Wandschichten – auch Luftschichten – aber auch in dem Faktum, daß ein größerer Teil der in die Wand eindringenden Feuchte kapillar wieder austreten muß und nur ein kleinerer Teil über den Weg des Dampfdrucks.“*[197]

SCHREPFER/GESCHEIDLE[198] beschreiben zwei Schadensfälle bei Fachwerkkonstruktionen, wo der neu Putz und Anstrich mit hohem Diffusionswiderstand zu höheren Feuchtegehalten und Pilzbefall und im zweiten Fall der Kalkzementputz das Schwind- und Quellverhalten des Holzes nicht aufnahm und abplatzte. Als Lösung wurde ein Putzaustausch durch ein diffusionsoffenes Kalkputzsystem mit abgestimmtem Anstrich und im zweiten Fall ein Kalkputz mit Leichtzuschlägen vorgeschlagen.

Bei der Verwendung von Klinker bei der Ausfachung von Fachwerk geht man vordergründig vom Regenschutz aus. Diese haben gegenüber den Feldbrandsteinen nur eine geringere Wasseraufnahme von maximal 6 %. Ein Nachteil bei den Ziegelsteinen besteht darin, dass mit dem Wassertransport auch gelöste Salze transportiert werden.

MEHLHORN zeigt ein Beispiel nach dem Glaser-Diagramm für eine Poroton-Wand und Klinkervormauerwerk mit Regenbeanspruchung. Er kommt zum Schluss, dass die Klinker deutlich

[196] Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial, 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 171, 175
[197] Manfred Gerner, Manfred; Fachwerkforschung in Theorie und Praxis Neues und Bewährtes, Vortrag auf dem Hindelanger Baukongresses 2000, 19.-21.1.2000
[198] Schrepfer, Thomas; Gescheidle, Harald; Schäden beim Bauen im Bestand, Bd. 41, 2007, Fraunhofer IRB-Verlag, S. 175

einen geringeren μ-Wert haben müssen, sonst bildet sich Kondenswasser, welches dann zu 90 % nach innen austrocknen muss. Es ist eine über Jahre zunehmende Durchfeuchtung zu befürchten.[199] Neben dem möglichen Wassertransport durch Fehlstellen und porösen Mörtelfugen ist dies für die 50 % höhere Schädigung an den Balkenköpfen der untersuchten älteren Mehrfamilienhäuser mit Klinkerfassade verantwortlich.[200] In der Abb. 3.1.6 wird ein älteres Gebäude gezeigt. Deutlich sind die schadhaften Fugen zu erkennen, durch die Feuchtigkeit in den Wandquerschnitt eindringt.

Abb. 3.1.6: Ausgewaschene Fugen an einer Fassade



Der am häufigsten verwendete Naturstein ist der Sandstein. Hier liegen überwiegend heterogene Verhältnisse vor. Damit lassen sich die Feuchtetransporte nicht immer durch die theoreti-

---

[199] *Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz 1996 Berlin Ernst & Sohn S.90*

[200] *Řimal, J.; Rauch.P.; Damages due to humidity transfer in porous materials, February 2010 Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering, This articles sis has been supported by the Grant Agency of the Czech Republic with grant No. 103/09/1149, S. 42*

schen Wasseraufnahmemechanismen klären.[201] Bei den älteren Mehrfamilienhäusern konnten nur vereinzelt im Gründungsbereich Natursteinwände vorgefunden werden. Darauf befindet sich dann die gemauerte Kappe aus Ziegelsteinen. Es besteht damit nur eine indirekte Einflussnahme auf die Feuchte der Holzkonstruktionen im Erdgeschoss.

Bei älteren Bauernhäusern besteht dagegen das Mauerwerk zum Teil auch im Erdgeschoss aus Bruchsteinen. Liegt eine äußere höhere Feuchtebelastung durch Sickerwasser vor, so erfolgt der überwiegende Feuchtetransport über die mineralischen Mörtelfugen. Für eine nachträgliche Abdichtung sind hier plastoelastische Fugenkitte geeignet.[202] Aber auch durch das große Wärmespeichervermögen besteht eine hohe Kondenswassergefährdung. Insgesamt wurden hier höhere Schädigungen an den Holzkonstruktionen festgestellt. Sind diese Wandbaustoffe mit Salzen belastet, so können diese ein Vielfaches der Wassermenge gegenüber einer nicht salzbelasteten Wand aufnehmen.

Stehen erdberührende poröse Baustoffe direkt mit dem Wasser (Grundwasser) in Kontakt, so dringt das Wasser in flüssiger Form unter hydrostatischem Druck in die Poren ein. Diese Schwerkraft wird als Sickerströmung bezeichnet. Mithilfe des Kapillarsystems, zum Beispiel in den Ziegelsteinen wird die Feuchtigkeit zur Oberfläche transportiert, wo sie verdunsten kann. Ein Ziegelmauerwerk ist in seinem Aufbau nicht homogen, da es aus den Baustoffen Ziegelstein und Mauermörtel besteht. Beide verhalten sich recht unterschiedlich und es können örtlich schwankende Wärmestromdichten und damit verschiedene Oberflächentemperaturen auftreten. Je nach Salzgehalt des Mörtels können sich hier die Eigenschaften des Mauerwerkes unterscheiden. In beiden Beispielen (Abb. 3.1.7 und 3.1.8) wird die „aufsteigende Feuchtigkeit“ bei einem Ziegelmauerwerk gezeigt.

Bei Großflächen Baustoffen, wie zum Beispiel beim Beton, sind die Eigenschaften annähernd gleich. Vorausgesetzt, es liegen keine Herstellungsfehler durch Entmischung bei der Schüttung, ungleichmäßige Verdichtung oder zu geringer Leimanteil, sodass die Zuschläge nicht vollständig umhüllt werden, vor. Aber auch bereits bei der Herstellung, zum Beispiel von Beton, kann ein Einfluss auf das Kapillarporenvolumen genommen werden. Wird der ungefähre w/z-Wert[203]

---

[201] Reul, Horst; Handbuch Bautenschutz und Bausanierung, 4. Aufl. 2000, Rudolf Müller Verlag, S. 205
[202] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 64
[203] Wasser-Zement-Wert

von 0,4 wesentlich überschritten, so können nach Umsetzung des gesamten Zements nicht vollständig alle Hohlstellen, die durch das Anmachwasser entstehen, verfüllt werden. Zurück bleiben die sogenannten Kapillarporen.[204] Tritt eine Karbonatisierung auf, so nimmt durch die Umwandlung von Kalziumhydroxid in Kalziumkarbonat das Volumen um etwa 11 Vol.-% zu. Damit verringert sich das Porenvolumen (siehe auch Punkt 5). Im Zementmörtel ist der häufigste Porenradius etwa 100 nm groß.[205]

Abb. 3.1.7: Salzbelastung des Mauerwerks am Wirtschaftsgebäude im Hof. Deutlich sind die Verdunstungszonen zu erkennen in Leipzig, Brockhausstraße.



Abb. 3.1.8: Der Unterputz hat keine ausreichende Haftung auf dem Mauerwerk. Der deckende Sanierputz ist überfordert und fällte ab. Der Putz wurde auf einer Höhe von circa 1,70 m wegen der Erneuerung entfernt in Prag, Hradčany, Uluz. Seminare.



---

[204] *Röhling, Stefan; Eifert, Helmut; Kaden, Reiner; Betonbau, Planung und Ausführung 2000, Verlag Bauwesen, S. 138*

[205] *Moewe, C.-M.; Venzmer, H.; Ausgewählte Modellrechnungen zum Feuchte- und Salztransport in kapillarporösen Baustoffen, S. 49-50 in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar*

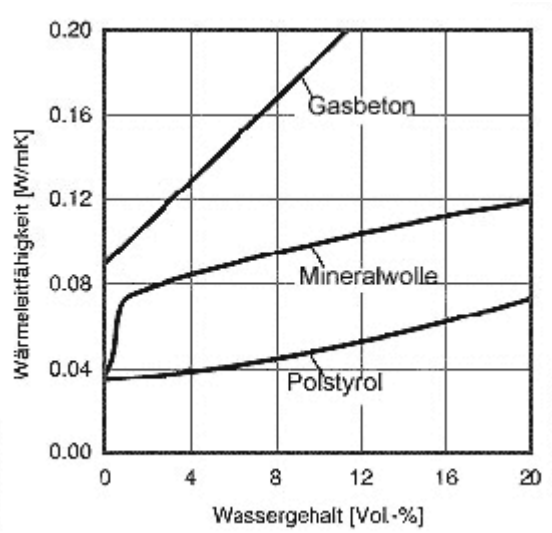
Als Ersatz für die Schlackefüllung über den gemauerten Kappen im Erdgeschoss wird Leichtbeton verwendet. Die Zuschlagstoffe sind anorganischen Ursprungs und sind so bioresistent. Ausnahme sind Polystyrol-Leichtbeton und Holzbeton. Wobei der Holzbeton nicht verwendet werden sollte. Die große Speicherfähigkeit von Feuchtigkeit des Leichtzuschlagstoffbetons wird durch die Struktur bestimmt. Allerdings ist die kapillare Wasseraufnahme gegenüber anderen Wandbaustoffen gering und liegt zum Beispiel gegenüber von Ziegel nur bei 1/10 bis 1/20. Blähtonbeton zeigt gegenüber Hüttenbimsbeton eine bessere Feuchtigkeitsabgabe (Desorption). Der Schaumbeton hat durch seine hohe kapillare Wasseraufnahme ein ungünstiges Feuchteverhalten. Er gibt wie der Hüttenbimsbeton nur langsam das Wasser wieder ab. Dies hängt damit zusammen, dass Hüttenbims und Schlacke hygroskopisch sind.[206] Der Schaumbeton wird wegen seiner Luft härtenden und fließfähigen Eigenschaften für wärmedämmende Ausgleichsschichten und für das Verfüllen verwendet.[207] Wegen seines Feuchteverhaltens ist eine Anwendung zum Ausgleich und neuem Fußbodenaufbau über einem feuchten Kappengewölbe weniger geeignet und muss bei der Planung berücksichtigt werden. Auch Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge kann wasserundurchlässig sein, wenn die Anforderungen durch die Eigenschaften des Zementsteins erfüllt werden.[208] Zum Vergleich beträgt das Aufnahmevermögen für Kapillarwasser von Leichtbeton etwa 1/10 einer Ziegelwand und beim Vermögen der Feuchteabgabe können die Unterschiede noch größer sein.[209] Auch wenn bei der Sanierung Leichtbeton bei einem feuchten Kappengewölbe zum Einsatz kommt, so sind immer gleichzeitig Maßnahmen zur Reduzierung der Feuchtigkeit im Keller erforderlich.

Die Baustoffe Ziegelsteine, Lehm und Holz haben besonders günstige physikalische Eigenschaften und sind deshalb als raumumschließende Baustoffe zu empfehlen. Ihr wesentlicher Vorteil ist, dass sie kurzzeitige Feuchtigkeitsspitzen abbauen können, wie sie zum Beispiel beim Duschen auftreten. Ein Mauerwerk aus offenporigen Ziegelsteinen ist dem aus Kalksandstein, mit seiner großen Feuchtigkeitsaufnahme, vorzuziehen. Dämmstoffe müssen vor direkter Durchfeuchtung geschützt werden, da ihre Wirkung auf viele Hohlräume mit Luft beruht. Bildet sich in diesen Hohlräumen ein Feuchtefilm, so kann bereits bei 1 bis 2 %

[206] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 27
[207] Röhling, Stefan; Eifert, Helmut; Kaden, Reiner; Betonbau, Planung und Ausführung, 2000, Verlag Bauwesen, S. 223
[208] Röhling, Stefan; Eifert, Helmut; Kaden, Reiner; Betonbau, Planung und Ausführung, 2000, Verlag Bauwesen, S. 220
[209] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 257

Feuchteanteil die Dämmwirkung bis auf fast 50 % reduziert werden. Natürliche Dämmstoffe zeigen hier günstigere Eigenschaften, siehe Abb. 3.1.8.

Abb. 3.1.8: Die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit bei Dämmstoffen bei einer Durchfeuchtung[210]



Daher sind Dämmstoffe vor Feuchtigkeit zu schützen. Bei einer Innendämmung ist eine fugendichte Dampfsperre anzubringen. Im Abschnitt Innendämmung, Punkt 3.4. wird auf diese Problematik näher eingegangen. Bei Dämmstoffen mit höherer Gleichgewichtsfeuchte, wie Kokos, Stroh, Kork oder Zellulose, kann unter Umständen auf die Dampfsperre verzichtet werden.[211] Das betrifft jedoch nur für geringe Dämmstoffstärken. Angefallenes Tauwasser kann durch diese Baustoffe sehr leicht wieder zurück an die Raumluft abgegeben werden.

Einer der gegenwärtigen Probleme, sind die immer kürzen Bauzeiten. Oft können die technisch erforderlichen Zeiten für die chemischen und physikalischen Abbindeprozesse nicht eingehalten werden. Das Mauerwerk wird viel zu schnell verputzt und mit Tapeten und Kunststoffdispersionsfarbe beschichtet.[212] Dies ist unter anderem unzureichender Planungsunterlagen einschließlich Terminplanung zu zuordnen. Die Feuchteverteilung bei einer neuen 180 mm starken Gasbetonwand zeigte nach dem 1. Winter noch eine Feuchte von circa 18 %, im 2. Winter lag

---

[210] IBP – Software – WUFI – Grundlagen (2001) Fraunhofer Institut
[211] König, Holger; Wege zum gesunden Bauen, 1991, Ökobuchverlag Staufen
[212] Köneke, Rolf; Feuchteschäden im Haus,1988, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, S. 72

diese bei circa 8 % und am Ende des Sommers war diese auf circa 3 % abgesunken.[213] Damit wird deutlich, weshalb in den neu errichteten Gebäuden noch lange eine hohe Luftfeuchte vorliegt. Eine Abtrocknung der Baufeuchte erfolgt vorwiegend über die Diffusion. Daher sind möglichst diffusionsoffene Putze und Beschichtungen zu verwenden, die den Abtrocknungsprozess nicht verzögern. Gleichzeitig ist jedoch aber auch ein ausreichender Niederschlagsschutz zu gewährleisten, damit es nicht zu einer allzu großen Durchfeuchtung von außen kommt. Für das bauphysikalische Verhalten und die Beständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen ist die Harmonisierung zwischen der Beschichtung und der Oberfläche des Untergrundes von wesentlicher Bedeutung. „*Die Wände und Decken vieler historischer Gebäude bestehen aus bauphysikalisch günstigen Baustoffen und sind zudem häufig überdimensioniert.*“[214]

Die Feuchteverteilung im Wandquerschnitt kann mit verschiedenen Stofffeuchtemessverfahren ermittelt werden. Als zuverlässig erweist sich das gravimetrische Verfahren (Differenz zwischen Nassgewicht und Trockengewicht). Das CM-Verfahren (Kalziumcarbid-Methode) kann nicht alle Fragen sicher beantworten.[215] In einer Versuchsreihe wurden die Methoden Darren, Silicagel, CM-Gerät und Leitfähigkeit an verschiedenen Baustoffen verglichen. Es kommt hierbei zu sehr unterschiedlichen Wassergehalten je Baustoff.[216] Als zerstörungsfreie Methoden sollen hier die Mikrowellenmesstechnik,[217] das Neutronenstrahlungsverfahren und die Gammadurchstrahlung[218] genannt werden. Letzte ist die am weitesten verbreitete Methode. Übersichten und Beschreibung der Funktionen, Vor- und Nachteile sowie Grenzen der

---

[213] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 96, Grafik nach Künzel, H.: Gasbeton -, Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten, Wiesbaden, Berlin Bauverlag GmbH 1971

[214] Schönburg, Kurt; Historische Beschichtungstechniken, 2. Aufl. 2006, Huss-Medien GmbH, S. 74

[215] Goretzki, Lothar; Was bedeutet“feucht“? bs 2/97, S. 42

[216] Klopfer, Helmut; Messungen von Wassergehalten vor Ort –Ergebnisse von Versuchen mit verschiedenen Messgeräten, Proc.4.- In Int. Kongreß Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, TA Esslingen, 12/1996, Vol. I., S. 235-241

217 Leschnik, W.; Hauenschild, C.; Tiefenaufgelöste Feuchtemessung an Mauerwerk, 4. Intern. Kolloquium Werkstoffwissenschaft und Bauinstandsetzungen 17.-18.12.1996, 1996 Bd. II. Fraunhofer IRB Verlag, S. 996-997

[218] Mehlhorn, L.; Kober, A.; Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung, Teil 2: Erprobung der Messvorrichtungen und Ergebnisse, Bauphysik 16 (1994), H.3, S. 81-85

[219] Kupfer, Klaus; Feuchtemessung an Zuschlagstoffen für die Betonherstellung und Verwendung der Mikrowellentechnik, Diss, 1991 Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar

[220] Kupfer, Klaus; Materialfeuchtemeßverfahren, Beitrag: Krus, Martin; Messungen von Feuchteverteilungen mit dem Kernresonanzverfahren, 1995 Expert-Verlag

[221] Berliner, Mark A.; Feuchtemessung, 1980, Verlag Technik Berlin

Anwendung der Verfahren werden in der Literatur[219, 220, 221, 222, 223] ausführlich beschrieben.

Das Problem der Messverfahren ist, dass sie die momentane Feuchtigkeit messen. Daraus lassen sich bedingt nur zeitnahe Urteile ableiten. Ein Gebäude steht aber über viele Jahrzehnte. Eine Messung über einen längeren Zeitraum unter realen Bedingungen ist in der Praxis so gut wie nicht möglich. Die Eigentümer müssten das Objekt zur Verfügung stellen und nach bestimmten Zeitabläufen sind die Konstruktionen auf mögliche Veränderungen zu prüfen. Aus diesem Grund erfolgen Untersuchungen an Modellhäuschen, Prüfkörper im Labor oder an einzelnen Versuchshäusern. Das Problem besteht darin, dass ein reales Nutzungsverhalten nicht ausreichend simuliert werden kann. Das Wohngebäude muss auch in ungünstigen Fällen die volle Funktionsfähigkeit erfüllen. Es darf nicht zu einer Durchfeuchtung der porösen Baustoffe oder höheren Anreicherung von Schadstoffen in der Raumluft kommen, wenn der Nutzer aus beruflichen Gründen nur zeitweise anwesend ist und lüften kann. Weiterhin wurden die bereits erwähnten Rechenmodelle entwickelt, die eine langzeitliche Abschätzung der Feuchtetransportprozesse der Konstruktionen ermöglichen sollen.

Bei der Sanierung aber auch beim Neubau wird die Feuchtigkeitsbeständigkeit der Baustoffe in vielen Fällen nicht beachtet. So werden Gipsputze auf Feuchte gefährdetem Mauerwerk im Keller oder auf feuchtem salzbelasteten Mauerwerk im Erdgeschoss aufgetragen. Ebenso falsch ist die Verwendung von Lehmwerkstoffen. Diese Baustoffe erhärten nur durch Trocknung und nicht durch chemische Abbindeprozesse. Die guten feuchteregulierenden Eigenschaften beziehen sich nur auf kurzzeitige Feuchtespitzen der Raumluft.

Bei dem Beispiel in der Abb. 3.1.9 wurde bei einem Neubau im Kellerraum unter einer Terrasse ein Gipsputz auf ein feuchtes Mauerwerk aufgetragen. Bevor die neue Terrasse abgedeckt wurde, konnte Regen eindringen, sodass mehrere Zentimeter Wasser auf den Fußboden stand. Deutlich sind die Schäden an diesem neuen Gipsputz zu erkennen, die durch

---

[222] Krus, Martin; Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe, theoretische Grundlagen und neue Messtechnik 1995, Diss, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen Universität Stuttgart S. 34-39

[223] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-38f

Auskristallisierung der gelösten Bestandteile (Kristallisationsdruck) zu einer allmählichen Gefügezerstörung führt.[224, 225]

Abb. 3.1.9: Dieser Gipsputz in einem neuen Keller unter einer Terrasse wurde auf ein feuchtes Mauerwerk aufgetragen.



Langzeitlich kann die Auswahl ungeeigneter Ziegelsteine bei einem Außenmauerwerk zur Schädigung führen (Abb. 3.1.10). Ein Teil der Steinoberflächen wurde sehr stark geschädigt. Diese Qualitätsunterschiede der Steine sind auch an anderen Wandabschnitten dieser Außenwand feststellbar. Dieses „Muster" ist sicherlich darauf zurückzuführen, dass hier Mauersteine eines anderen Herstellers verarbeitet wurden. Das Abplatzen der Brenn- und Presskante erfolgt bei hoher Feuchtebelastung durch Gefrieren im saugesatten Zustand. Dies betrifft besonders Ziegel mit geringer Scherbenfestigkeit, geringem Porenvolumen und ungünstiger Porengrößenverteilung.

Bei allen Wandkonstruktionen ist immer auf eine einwandfreie Winddichtheit zu achten. Kann Raumluft unkontrolliert durch die Konstruktion entweichen, wie es vielfach bei den wärmegedämmten Dachkonstruktionen vorkommt, so taut diese auf dem Weg nach außen aus und es kommt zu einer Durchfeuchtung. Dies kann auftreten, wenn die Mörtelfugen im

---

[224] Härtig, Siegfried; Klausen, Dietmar; Hoscheid, Rudolf; Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis 14.Aul. 2003, C.F. Müller Verlag, S. 86
[225] Hiese, Wolfram; Scholz Baustoffkenntnisse 13.Auf. 1995, Werner Verlag, S. 140

Mauerwerk oder der Einbau der Fenster nicht fugendicht ausgeführt werden. Dies kann aber auch auftreten, wenn das Schwinden und Quellen der Hölzer zum Beispiel bei den Blockhäusern nicht beachtet wird.

Abb. 3.1.10: Verwendung von saugfähigen Ziegeln mit geringer Scherbenfestigkeit



Die Quantifizierung des Feuchtehaushaltes von Umfassungskonstruktionen hat bisher noch keinen befriedigenden Stand erreicht. Der Nachweis der inneren Kondensatbildung zum Beispiel erfolgt immer noch nach dem Glaserschen Diffusionsschema (Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen gemäß DIN 4108-3:2001-07), das aber weder die hygroskopische Auf- und Entladung noch die kapillare Entspannung des Tauwassers berücksichtigt. [226, 227] Probleme bei der diffusionstechnischen Berechnung ergeben sich dann, wenn es sich bei praktischen Gegebenheiten nicht ausschließlich um Diffusionsprozesse handelt. Kapillare Wassertransporte, die bei mehrschichtigem Wandaufbau bei bestimmten Baustoffen auftreten, entziehen sich einer Berechnung.

In der Bewertung verschiedene Modellansätze zur Feuchtetransportberechnung stellte KÜNZEL fest, dass am häufigsten „*die Temperatur, der Wassergehalt, der Dampfdruck und die*

---

[226] *Haupt, P.; Bauphysik 5/94, Stand Deut. Bücherei (ZB 75 909) 24-5*
[227] *Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-18*

Saugspannung (kapillarer Unterdruck) als Feuchtetransportpotential verwendet“ werden. Nach seiner Ansicht lassen sich einfachere und physikalisch plausible Transportkoeffizienten, wie der Dampfdruck und die relative Feuchte, für Feuchteberechnungsverfahren einsetzen.

In dem Berechnungsverfahren WUFIZ werden thermische und hygrische Stoffkennwerte, wie z. B. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchteabhängige sowie eventuell richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und die Feuchtespeicherfunktion, für den Saugvorgang und die Weiterleitung einbezogen. Für die Klimaparameter stehen die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Es können auch kurzwellige Strahlung und die Niederschlagsbelastung der Oberfläche berücksichtigt werden. Das Berechnungsverfahren für Feuchtetransporte dient als kostengünstige Alternative oder Ergänzung von messtechnischen Untersuchungen sowie zur Bewertung von neuen Baustoffen bezüglich ihres Langzeitverhaltens.[228] VÖLKNER[229] verweist darauf, dass feuchtetechnisch exaktere Berechnungen als mit dem Glaserverfahren mithilfe der finiten Elemente erzielt werden. Es werden experimentell ermittelte Materialkennwerte benötigt, sodass dieses Verfahren aufwendig ist.

Die im Punkt 2.5 und 2.6 genannten äußeren Klimafaktoren, wie die Wärmekonvektion und Wärmestrahlung bleiben bei den Modellansätzen unberücksichtigt. Für eine biologische Schädigung der Baukonstruktion spielt die Temperatur sowie die Zeitdauer einer Feuchtebelastung eine Rolle. Ebenso wichtig sind die Grenzschichten zwischen Baustoffen, die Feuchtetransportprozesse behindern[230] können und so zu einem Feuchteanstieg im Wandquerschnitt führen. Gerade die Feuchteerhöhung im Wandquerschnitt im Sommer[231] begünstigt die Fraßaktivitäten von Holz zerstörenden Insekten und im ungünstigen Fall auch das Wachstum von Pilzmycel von Holz zerstörenden Pilzen, da Feuchte und Wärme gemeinsam vorliegen. Bereits geringe Feuchteerhöhungen haben langzeitliche Auswirkungen auf einen möglichen Schädigungsgrad der Balkenköpfe. Es ist einzuschätzen, dass die ein- oder zwei dimensionale Rechenmodelle

---

[228] Künzel, Hartwig M.; Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Diss 1994 , Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, S. 59-60, 71, 89

[229] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 1-2

[230] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 70

[231] Bossert, Paul; Nagel; Energieverbrauchsanalysen von Hochbauten, Deutsche Bauzeitung 9/1982, S.58-62

zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport gerade dieses Problem nicht ausreichend bewerten können. Diese Modellansätze sind für andere Bewertungskriterien vorgesehen, wobei die Berechnungsverfahren der Normen Vereinfachungen enthalten, *„die es nicht erlauben, eine realistische Einschätzung der Feuchtebilanz von Bauteilen vorzunehmen. Die Ergebnisse können nur mit modellkonformen Kriterien eingeschätzt werden."… „Die Auswertung der Berechnungsergebnisse von DIN EN ISO 13788:2001-11 und den Simulationsrechnungen zeigen, dass bei monolithischen und zweischaligen Wänden eine Bewertung ohne Erweiterung des Berechnungsverfahrens zur Berücksichtigung der Kapillarleitung nicht sinnvoll ist."*[232]

Offenporige Ziegelsteine mit dem geringsten Gehalt an Dauerfeuchte aller Baustoffe von etwa 1 bis 1,5 Vol.-%,[233] stellen den günstigsten Baustoff für ein Mauerwerk mit einer Deckenkonstruktion aus Holzbalken dar. Andere Baustoffe benötigen längere Zeit beim Abtrocknen oder haben eine große Feuchtigkeitsaufnahme. Für die Minimierung möglicher Schäden an den Balkenköpfen sind sowohl eine gute Feuchteregulierung und eine schnelle Abtrocknung von entscheidender Bedeutung. Sind Sanierungsarbeiten am Außenmauerwerk am Auflagebereich der Deckenbalken erforderlich, so sind Ziegelsteine bevorzugt zu verwenden.

Im nachfolgenden Beispiel wird ein saniertes Lehmhaus gezeigt. Während der Sanierung hat man eine Vielzahl von Baufehler begangen, die zum Einsturz der Lehmwand nach einem Feuchteschaden führten. Ungünstig wirkte die veränderte Deckenlast im ausgebauten Dachboden. Es wurde die veränderte Lastverteilung über dem neuen Fenster (fehlende oder zu kurze Fensterstürze) nicht beachtet. Sicherlich erfolgte eine Vergrößerung der Fensternischen. Der neue dichte Außenputz lässt keine Feuchteregulierung zu. Wird eine Lehmwand feucht, so verliert dieser Baustoff seine Tragfähigkeit.

---

[232] Hauser: Forschungsvorhaben „Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 „Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren" auf Konstruktion und Holzschutz von Außenbauteilen in Holzbauart", Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Wärme, Energie, Feuchte, Schall, Tageslicht, Baunatal, Zusammenfassung, Aktenz.: IBH 457/02, 31.01.2003

[233] Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial, 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175

Abb. 3.1.11: Zusammengebrochen Außenwand aus Stampflehm nach einer falschen Sanierung in Leipzig



Abb. 3.1.12: Detailansicht der zusammengebrochenen Außenwand aus Stampflehm



3.2. Die Tauwasserbildung und die Durchfeuchtung massiver Bauteile

Der Feuchteschutz nach DIN 4108-07 ist darauf gerichtet, Schäden an Bauteilen zu vermeiden sowie einer Beeinträchtigung des Wärmeschutzes entgegenzuwirken. Dazu sind

- die Tauwassermenge im Bauteilinneren zu begrenzt,

- eine kritische Oberflächenfeuchte und
- das Eindringen von Schlagregen zu vermeiden.

Wenn ein Wasser-Dampf-Gemisch (Luft) auf eine weniger warme Bauteiloberfläche auftrifft und die Taupunkttemperatur der Luft unterschritten wird, erfolgt eine Tauwasserbildung. Da sich während der Standzeit der Gebäude die Nutzung ändert, sollten die Innenscheiben der Fenster als kühlste Fläche erhalten werden.[234] Hier kann sich sichtbar Kondenswasser ansammeln, ohne größere Schäden zu verursachen. Gerade dieser wichtige Gesichtspunkt wird bei der Sanierung der älteren Gebäude nicht beachtet. Durch den Austausch der Kastenfenster durch Isolierverglasung mit einem U-Wert 1,3 W/m²K und besser verlagert sich die kühlste Oberfläche in die Innenecken und über den Fußboden der Außenwände aber auch an Innenwände, wenn die Nachbarräume eine sehr niedrige Raumtemperatur haben.

Die Tauwasserfreiheit auf der Innenoberfläche einer Außenwand wird erfüllt, wenn der Wärmedurchlasswiderstand als Mindestwert erfüllt wird. Hier gilt die Berechnung nach:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\vartheta_{Li} - \vartheta_{Le}}{\vartheta_{Li} - \vartheta_S} - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e}\right) \quad m^2\,K/W \tag{3.2}$$

$$R_{erf} = R_i \frac{\vartheta_{Li} - \vartheta_{Le}}{\vartheta_{Li} - \vartheta_S} - (R_i + R_e) \quad m^2\,K/W \tag{3.3}$$

ϑ_S = Taupunkttemperatur der Raumluft in [°C]
ϑ_{Li} = Innentemperatur in [°C]
ϑ_{Le} = Außentemperatur mit -15ºC
Ri = Wärmedurchlasswiderstand mit 0,17 m² K/W

Die zulässige innere Oberflächentemperatur ϑ_{Oi} muss größer als die Taupunkttemperatur ϑ_S [235] (Werte in der DIN 4108) der Raumluft sein. [236, 237] Praktische Messungen zeigen, dass die Oberflächentemperaturen an der Außenwand über dem Fußboden circa 3 K niedriger als 1 m

---

[234] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz, 1996 Berlin Ernst & Sohn, S. 85
[235] Werte in Tab. C2: Künzel, Helmut; Teil C Feuchteschutz in: Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl., 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 213 oder in DIN 4108
[236] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für das Bauwesen Berlin, S. 133f
[237] Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag für das Bauwesen Berlin, , S. 138f

über dem Fußboden sind. Für eine Vermeidung von Tauwasser muss die Temperatur im Wandwinkel und an der Außenwand über den Fußboden bestimmt werden, da dies die kritischsten Bereiche sind.

Gerade im Erdgeschoss im unteren Außenwandabschnitt können länger anhaltende Tauwasserniederschläge auftreten. Diese treten aber auch im Sommer im Bereich Fußboden/Außenwand auf, da die Temperatur der Luft im Keller zum Teil weit unter der Außenluft liegt. Diese ständigen Feuchtebelastungen können zu Feuchteschäden führen, die einmal zur Herauslösung gebundener Salze (siehe Punkt 5) in den Baustoffen führen, aber auch eine Schimmelpilzbildung verursachen[238] und günstige Wachstumsbedingungen für Holz zerstörende Pilze und Insekten bieten. Besonders betroffen sind hier Lagerhölzer und die Dielung über einer gemauerten Kappe im Erdgeschoss, die Balkenköpfe im Außenmauerwerk und Fachwerkkonstruktionen. Wobei für eine biologische Schädigung langfristig bereits niedrige Feuchten im Mauerwerk ausreichen.

Es tritt aber auch Tauwasser an Baustoffen mit außerordentlich großem Wärmespeichervermögen auf, wie zum Beispiel bei Schwerbeton. Das liegt in diesem Fall nicht an der fehlenden Eigenschaft der Wärmedämmung, sondern an einem großen Wärmeeindringkoeffizienten b und die geglättete Betonoberfläche nimmt keine Feuchtigkeit auf. In diesem Fall ist eine diffusionsoffene Beschichtung anzubringen, zum Beispiel eine Raufasertapete oder Korkbeschichtung. Diffusionsdichte Beschichtungen eignen sich nicht, wie zum Beispiel Styroporplatten als Deckenelemente, da zwischen den Fugen der Platten an der Betonoberfläche ein Feuchtefilm entsteht.

Die Wasserdampfdiffusion ist der gasförmige Transport von Wasser durch ein poröses Bauteil,[239] der Speichermechanismus ist die Adsorption. Ist die mittlere Länge eines Wassermoleküls kleiner als der Porendurchmesser, so wird dies als Diffusion und im umgekehrten Fall als Effusion bezeichnet.[240] Die Richtung der Diffusion wird von dem Konzentrationsgefälle der absoluten Luftfeuchte bestimmt. Sie ist nicht abhängig von der Richtung des Wärmestroms, sie kann dieser entgegengesetzt gerichtet sein. Der Wärmestrom

---

[238] Wendehorst, Reinhard; Bautechnische Zahlentafeln, 26. Aufl. 1994, BG. Teubner Stuttgart Beuth Verlag Berlin und Köln , S. 147

[239] Zimmermann, Günter; Sander, Martin, Schloenbach, Renate; Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein 1995, IRB-Verlag, S. 55

[240] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Dissertation 2004, Universität Bochum, S. 2-15

folgt dem Temperaturgefälle und der Dampfdruck dem Dampfdruckgefälle. Im Winter ist die absolute Feuchtigkeit der kalten Außenluft geringer, daher sind der Wärme- und der Dampfstrom nach außen gerichtet. [241, 242] „*In Baustoffen mit freiem Wasser in den Poren kann dabei der Wasserdampfdiffusionsstrom ins Freie erheblich größer sein als die pro Zeiteinheit an der Innenwandoberfläche absorbierten Wassermengen.*“ Der Wasserdampfdiffusionsprozess entzieht so den Schimmelpilzen das für das Wachstum erforderliche freie Wasser. „*Die publizierten Ergebnisse der Laboruntersuchungen widerlegen nicht die Annahme, dass Schimmelpilzbildung auf der raumseitigen Oberfläche der Außenbauteile von Wohnungen in erster Linie von Tauwasserniederschäden herrührt. Ob Wasser aus einem Sorptionsvorgang für das Wachstum von Schimmelpilzen auf Bauteiloberflächen verantwortlich sein kann, ist ungeklärt.*“ Es gibt bisher keine Angaben, ob sich die Laborergebnisse auf die realen Verhältnisse in Wohnungen übertragen lassen.[243] Auch wenn der Hersteller dies verneint, so behindern Dispersionsfarbe auf der Tapete den Wassertransport. Dies liegt unter Umständen auch daran, dass die Farbe mit einer zu großen Schichtdicke aufgetragen wird. Ebenso werden diesen Farben Fungizide zugegeben, damit sie nicht im feuchten Zustand schimmeln. Weiterhin bietet die Raufasertapete mit dem Zellleim eine hervorragende Nahrungsgrundlage für Schimmelpilze.

Durch das Glaserverfahren[244] (Diffusionsdiagramm) werden die Verläufe des Dampfdruckes und des Sättigungsdampfdrucks sowie die rechnerische Prüfung der möglichen Tauwassergefährdung der Konstruktionen beschrieben. Der Wasserdampfdurchgang erfolgt nach der Transportgleichung: [245]

$$g = \Delta * (p_{Li} - p_{Le}) \qquad (3.4)$$

g = Wasserdampfdiffusionsstromdichte in [kg/m²h]
Δ = Wasserdampfdurchlasskoeffizient in [kg/m² h Pa]
p_{Li}/p_{Le} = Wasserdampfteildrücke Innen- und Außenluft in [Pa]

---

[241] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 92-102
[242] Arendt, Claus; Seele, Jörg; Feuchte und Salze in Gebäude, Verlagsanstalt Alexander Koch; 2000, S. 12-16, 51
[243] Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Tauwasserschäden 2. Aufl. 2001, Fraunhofer IRB-Verlag, S. 26-27
[244] Künzel, Helmut; Teil C Feuchteschutz in: Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 221
[245] Künzel, Helmut; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 220

Der Wasserdampfdurchgang hängt von der Größe des Wasserdampfdurchlasskoeffizienten und der Druckdifferenz ab. Das Glaserverfahren dient zur Beurteilung, ob sich in der Konstruktion Tauwasser bildet. Es wird der Temperaturverlauf, der Wasserdampfteildruck und der Wasserdampfsättigungsdruck bestimmt und in einem Diagramm aufgetragen. Überschneiden sich die beiden Drücke nicht, so gilt die Konstruktion als tauwasserfrei. [246, 247]

Die DIN 4108-5 (1981) lies im Punkt 11.2.4. als Alternative zum Glaserverfahren das Berechnungsverfahren mit Monatsmittelwerten nach JEHNISCH zu. Dieses Verfahren wurde weiterentwickelt und ist in der DIN EN ISO 13788 (2001) aufgenommen und gilt als teilweiser Ersatz für die DIN 4108-3 (2001). Es gelten die gleichen Gesetzmäßigkeiten der Dampfdiffusion. In diesem Verfahren wird mit Monatsmittelwerten gerechnet und eine Feuchtebilanz für einen Jahreszyklus aufgestellt. Mit dieser Berechnung treten innerhalb mehrschichtiger Außenwandkonstruktionen beheizter Gebäude geringere Tauwassermengen auf. [248] Diese günstigeren bauphysikalischen Werte in Bezug der rechnerischen Tauwasserbildung und der Verdunstungsmenge resultieren aus dem gegenwärtig veröffentlichten etwas höheren Jahrestemperaturverlauf. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Gebäude nicht nur 20 Jahre steht, sondern mehrere Jahrhunderte alt werden kann. Vergleicht man nur die letzten 150 Jahre, so werden größere Differenzen der durchschnittlichen Jahrestemperatur deutlich.[249] Nach Abklingen der höheren Sonnenaktivitäten [250, 251, 252, 253, 254] können durchaus in den nächsten Jahren wieder niedrigere Jahrestemperaturen vorliegen. Konstruktionen, die auf Basis der durchschnittlichen Jahrestemperaturen tauwasserfrei berechnet werden, können in Zukunft versagen. Eine Berechnung und bauseitige Umset-

---

[246] Wetzell, Otto W.; Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, 26. Aufl. 1994 , BG. Teubner Stuttgart Beuth Verlag Berlin und Köln , S. 148-149

[247] Schneider, Klaus-Jürgen; Bautabellen, 9. Aufl. 1990, Werner Verlag, S. 10.24

[248] Weise, Manfred; „Bauphysik und Klimawandel;" Änderungen im Holzschutz, S. 6-9, Vortrag auf der 14. Quedlinburger Holzbautagung 27.-28.3.2008

[249] Artur B. Robinson; Noha E. Robinson, Willie, Soon; Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide, Journal of American Physicians and Surgeons (2007)12, 79-90

[250] Heiss, Klaus. P.; Kein Grund zur Hysterie, Zahlreiche Fakten und Überlegungen sprechen gegen die weit verbreitete Theorie von der globalen Erwärmung, Wiener Zeitung 7. 9.2007

[251] Geb, M. & K. Labitzke (1995) Klimatrends in der Atmosphäre.- Forschung an der Freien Universität Berlin. http://strat-www.met.fu-berlin.de/labitzke/klimatrend/klimatrend.html

[252] Chabibullo Abdussamatow; Mars gibt Hinweise auf künftige Kaltzeit auf der Erde, Russische Informations- und Nachrichtenagentur RIA NOVOSTI 10. Oktober 2007 http://de.rian.ru/science/20071010/83356266.html

[253] Usoskin, Ilya G. , S. K. Solanki, M. Schüssler, K. Mursula, K. Alanko (2003) A Millenium Scale Sunspot Reconstruction: Evidence For an Unusually Active Sun Since the 1940's.- Phys.Rev.Lett. 91 (2003) 211101

[254] Lassen, K. Solar Activity and Climate - Long-term Variations in Solar Activity and their Apparent Effect on the Earth's Climate.- Danish Meteorological Institute, Solar-Terrestrial Physics Division, Lyngbyvej,100, DK-2100 Copenhagen (2), Denmark.

zung auf der Grundlage der in den letzten Jahren ermittelten höheren Jahresdurchschnittstemperaturen ist als sehr bedenklich zu werten. Theoretisch berechnete wasserfreie Konstruktionen müssen daher nicht über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes gelten.

Für eine tauwasserfreie Konstruktion muss die angefallene Tauwassermenge W_T kleiner als die Verdunstungsmenge V_V sein. [255]

$$W_T < V_V \qquad (3.5)$$

$$t_T(i_{i,T} - i_{e,T}) < t_V(i_{i,V} - i_{e,V}) \quad [\text{kg/m}^2\text{a}]$$

W_T = Tauwassermenge in [kg/m²a]
V_V = Verdunstungsmenge in [kg/m²a]
t_T = Tauwasserperiode (1440 h)
t_V = Verdunstungsperiode (2160 h)
$i_{i,T/V}$ = Wasserdampf – Diffusionsstromdichte vom Nutzraum in das Bauteil hinein in [kg/m²h]
$i_{e,T/V}$ = Wasserdampf – Diffusionsstromdichte vom Bauteil nach außen in [kg/m²h]

Jede Feuchteerhöhung und sogar eine Tauwasserbildung sind für Konstruktionen aus Holz von großer Bedeutung. Nach DIN 4108 ist eine Tauwasserbildung in Bauteilen unschädlich, wenn zum Beispiel folgende Bedingungen erfüllt sind:

- „*Die Baustoffe, die mit dem Tauwasser in Berührung kommen, dürfen nicht geschädigt werden (z. B. durch Korrosion, Pilzbefall).*
- *Bei Holz ist eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes um mehr als 5 %, bei Holzwerkstoffen um mehr als 3 % unzulässig*."[256, 257]

Eine Auswertung bei älteren Mehrfamilienhäusern zeigt einen durchschnittlichen Schädigungsgrad an den Balkenköpfen von 23,9 % durch Holz zerstörende Insekten und Pilze.[258] Dabei wurden sehr unterschiedliche Schädigungsgrade festgestellt, die im Zusammenhang mit der Höhe der Feuchte im Wandquerschnitt zu sehen ist. Interpretiert man den ersten Punkt des Auszu-

---

[255] *Arndt, Horst; Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, 1996, Verlag für das Bauwesen,, S. 135-137*
[256] *DIN 4108 Teil 3, Pkt. 3.2. Tauwasserbildung im Innern von Bauteilen (Aug. 1981)*
[257] *Wendehorst, Reinhard; Bautechnische Zahlentafeln, 28. Aufl. Stuttgart: Teubner; Berlin Köln: Beuth 1994, S. 150*
[258] *Řimal, J.; Rauch. P.; Damages due to humidity transfer in porous materials, February 2010, Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering, This articles sis has been supported by the Grant Agency of the Czech Republic with grant No. 103/09/1149, S. 36f*

ges aus der DIN, so kann zwar kurzzeitig Tauwasser anfallen, aber es muss sehr schnell wieder durch Verdunstung entweichen können. Daher sollten die Holzkonstruktionen von Luft „umspült“ sein. Die Gefahr einer Schädigung an den Balkenköpfen als Folge einer höheren Feuchtigkeit kann im Wesentlichen nur durch einen diffusionsoffenen Schichtaufbau der Außenwand erreicht werden.

Der zweite Punkt lässt eine gewisse Feuchteerhöhung bei Holz bis 5 % zu. Die Larven der Holz zerstörenden Insekten, zum Beispiel Gewöhnlichen Nagekäfer (Anobium punctatum), hat noch Fraßaktivitäten bei einer Holzfeuchte von 8 bis 10 %. Ebenso sind die Aktivitäten an die Temperatur gekoppelt, das heißt, im Winter sind diese gering und im Sommer größer. Bei Tauwasseranfall liegen so im Sommer und Herbst die günstigsten Lebensbedingungen für Holz zerstörende Insekten aber auch für Pilze vor. Bereits eine geringe Erhöhung der Holzfeuchte von 1,4 % auf 11,1 % erhöht die langfristige durchschnittliche Schädigung an den Balkenköpfen um 4 %.[259] Eine zulässige Feuchteerhöhung im Wandquerschnitt, wie sie in der DIN als Bedingung genannt wird, ist für ein älteres Mehrfamilienhaus mit Holzbalkendecken nicht tolerierbar und widerspricht den Regeln der Baukunst.
Der Schädigungsgrad an den Köpfen der Holzdeckenbalken im Außenmauerwerk hängt stark von der Feuchte im Wandquerschnitt ab. Daher gilt bei diesen Konstruktionen:

$$W_T << V_V \qquad (3.6)$$

Die Normen gehen von der Annahme konstanter Stoffeigenschaften, einer abgetrockneten Einbaufeuchte sowie von einer Feuchtigkeitseinwirkung über das Innen- und Außenklima aus. „*Rechenwerte der Wärmeleitzahl in DIN 1048 Teil 4 berücksichtigen durchschnittliche Ausgleichfeuchten.*“[260] Starke Feuchteerhöhungen über 1 bis 2 Wochen führen bereits zu einem Befall durch Schimmelpilze. Wie groß der Zeitabschnitt für einen Befall durch Holz zerstörende Pilze ist, kann nicht zweifelsfrei genannt werden. Es ist anzunehmen, dass circa 1 Monat ausreicht. Das Wachstum wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Laborwerte lassen sich nicht

---

[259] Řimal, J.; Rauch. P.; Damages due to humidity transfer in porous materials, February 2010, Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering, This articles sis has been supported by the Grant Agency of the Czech Republic with grant No. 103/09/1149, S. 42
[260] Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz, 1996 Berlin Ernst & Sohn, S. 57

ohne Weiteres in die Praxis übertragen, da hier zum Teil ganz andere klimatische Bedingungen vorliegen.

Thermische und hygrische Simulationsrechnungen zur Ermittlung der Feuchteverteilung in Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen auf der Grundlage des Glaserverfahrens sind kritisch zu bewerten. HAUSER schreibt in einem Untersuchungsbericht: *„Der in Ansatz gebrachte Wassertransport in den Bauteilen berücksichtigt allein die Wasserbewegung infolge von Diffusion. Andere Transportphänomene, die wie die Kapillarleitung den Feuchtetransport dominieren können, bleiben unberücksichtigt. Auch die von den Materialeigenschaften abhängige Wasserspeicherfähigkeit wird nicht in Ansatz gebracht. Deshalb ist es mit dem Nachweisverfahren nicht möglich, Rückschlüsse auf die sich in Bauteilen ansammelnde Wassermenge zu ziehen und realistische Wassergehalte zu ermitteln.“*[261]

Eine ähnliche Auffassung brachte auch WEISE zur DIN EN ISO 13788 (2001) zum Ausdruck. Gleichzeitig verwies WEISE darauf, dass die statischen Verfahren zur Berechnung der Diffusion nicht alle Probleme lösen und daher die dynamischen Verfahren künftig an Bedeutung gewinnen werden. [262] EICHLER/ARNDT schreiben hierzu: *„Enthält die berechnete Konstruktion Schichten aus Ziegeln, Gips, Mörtelputz, Leichtbeton, Holzbeton, Holz oder andere feuchteleitfähigen Stoffen, so können kapillare Wassertransporte eine negative Feuchtebilanz in das Gegenteil verkehren, unter ungünstigen Radbedingungen aber auch noch kritischer machen. … Wasserbewegungen entziehen sich jedoch einer Berechnung, man kann nur ihre Tendenz zu erkennen suchen und ihre Auswirkung abschätzen.“*[263]

Mit den Berechnungsverfahren für Wärme- und Feuchtetransportprozesse können gegenwärtig keine ausreichenden Rückschlüsse auf realistische Wassergehalte im Wandquerschnitt gezogen werden, die Schlussfolgerungen auf eine höhere Gefährdung der Balkenköpfe durch Holz zer-

---

261 Hauser, Gerd: Forschungsvorhaben „Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 „Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren“ auf Konstruktion und Holzschutz von Außenbauteilen in Holzbauart“, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Wärme, Energie, Feuchte, Schall, Tageslicht, Baunatal, Zusammenfassung, Aktenz.: IBH 457/02, 31.01.2003

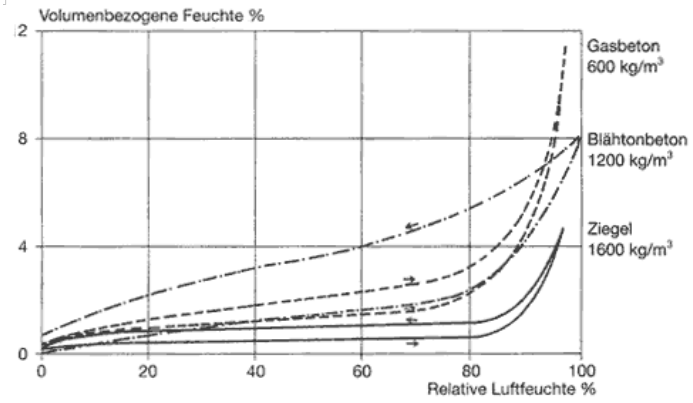
262 Weise, Manfred; „Bauphysik und Klimawandel;“ Änderungen im Holzschutz, S. 9, Vortrag auf der 14. Quedlinburger Holzbautagung 27.-28.3.2008 des Fachverbandes für Holzschutz und Holzbau Sachsen-Anhalt e.V.

263 Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 223

störende Insekten zu lässt. Wie bereits genannt, reicht bereits eine geringe Feuchtezunahme für eine Erhöhung der Schäden an Holz aus.

Für eine langsame aber kontinuierliche Durchfeuchtung der Wandoberfläche reicht es bereits oft aus, wenn an bestimmten Bauteilen über eine längere Zeit eine höhere relative Luftfeuchte vorliegt, wie es an den unteren Wandabschnitten der Räume mit der niedrigen Oberflächentemperatur zu beobachten ist. Dabei ist die relative Luftfeuchte für die Schimmelpilzbildung von Bedeutung. Alle Baustoffe sowie die Einrichtungsgegenstände stehen in einem Feuchtegleichgewicht zur relativen Luftfeuchte,[264] das heißt, erhöht sich kurzzeitig die Luftfeuchte, so nimmt der Wandbaustoff und die Einrichtungsgegenstände diese „Feuchtespitze" auf. Bei diesem Adsorptionsprozess werden Wassermoleküle in ein- oder mehrlagigen Schichten angelagert. „*Bei kapillar-porösen Stoffen ist dies auch an den inneren Oberflächen möglich*." [265] Sinkt die Luftfeuchte wieder, zum Beispiel durch das Lüften oder das Heizen, so wird Feuchtigkeit wieder an die Raumluft (Luft-Dampf-Gemisch) abgegeben. Während dieses Prozesses ändert sich die Enthalpie des Luftwasserdampfgemisches, es wird ständig Wärme durch die Tauwasserbildung und Verdunstung freigesetzt oder aufgenommen. Um eine lokale Durchfeuchtung zu vermeiden, sollten möglichst alle innen liegenden Bauteile eine annähernd gleiche Oberflächentemperatur aufweisen.

Abb. 3.2.1: Darstellung der Sorptionsisotherme verschiedener Baustoffe.[266]



---

[264] *Relative Feuchte ist das Verhältnis des im Gemisch vorliegenden Dampfteildruckes zu dem nach der Dampfspannungskurve höchstmöglichen Druck. $\varphi = p_D/p_s$ (p_D = vorhandener Dampfteildruck; p_s= Sättigungsdruck des Dampfes)*

[265] *Künzel, Helmut; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl., 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 216*

[266] *Arendt, Claus; Seele, Jörg; Feuchte und Salze in Gebäude, 2000, Verlagsanstalt Alexander Koch, S. 12*

In der Sorptionstherme, Abb. 3.2.1, fällt bei Blähtonbeton der Verlauf der Desorption auf. Die Abtrocknung des Baustoffs erfolgt auf einem höheren Feuchteniveau von ca. 2 Vol.-%. Dagegen verläuft die Absorptions- und Desorptionskurve von Ziegelstein aber auch von Gasbeton bei einem annähernd gleichen Niveau.

Der Leichtbeton mit Blähtonzuschlag verhält sich in Bezug auf seine Feuchteeigenschaften, speziell der höheren Desorptionsisotherme bei dem Einsatz zum Niveauausgleich und gleichzeitiger Wärmedämmung über ein feuchtes Kappengewölbe etwas ungünstig aus. Wobei Hüttenbims und Schaumbeton schlechter abschneiden. Gerade bei Kellergewölbe mit einer hohen Feuchtebelastung könnten dann Feuchte sperrende Fußbodenbeläge (Bodenfliesen oder Kunststoffbeläge) Probleme bereiten, die langfristig zur Erhöhung der Materialfeuchte führen und sich nachteilig auf die Eigenschaften der Wärmedämmung auswirken.

Für eine gute Feuchtigkeitsregulierung in den Gebäuden sind zwei wesentliche Voraussetzungen erforderlich.

- Je größer die zur Verfügung stehende Fläche ist, umso geringer ist auch der Anteil an aufzunehmenden Wasserdampf pro Quadratmeter Oberfläche. Bei zu kleinen Räumen, die z. B. als Schlafzimmer genutzt werden, sind die zur Verfügung stehenden sorptionsoffenen Flächen zu klein und es kommt lokal, meist an den kühleren unteren Wandabschnitten zu Tauwasserausfall.
- Für die Wandoberfläche sind Stoffe geeignet, die eine hohe Ausgleichsfeuchte haben, wie zum Beispiele Holz und Naturfasern. Dagegen sind Metalle (Metalltapeten), Glas, Schaumkunststoffe und andere anorganische Stoffe so gut wie nicht sorptionsfähig.

Die Grenze zwischen den Stoffen, die hygroskopisch und nicht hygroskopisch sind, wird bei einer Sorptionsfeuchte von 0,5 Mass.-% bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % gesetzt.[267]
Die Baustoffe Gips und Ziegel haben relativ große Poren, die für das kapillare Saugen wirksam werden, jedoch weniger Einfluss auf die Sorption haben. Hingegen nehmen die weniger kapillaraktiven Baustoffe Beton und Kalksandstein mit ihren feineren Poren mehr Feuchte durch Sorption auf. „*Hieraus wird die unterschiedliche Wirkung der Porengröße und –verteilung auf*

---

[267] *Künzel, Helmut; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 216*

das Verhalten gegenüber dampfförmigem und flüssigem Wasser deutlich."[268] Betrachtet man die Sorptionsisothermen von KLOPFER, [269] so ähnelt der Gipswerkstoff in seinem Feuchteverhalten trotz anderem Feuchtetransport eher dem Beton als dem Ziegel. KÖNECKE beurteilt, es werden heute „… *Gipsputze verwendet, die in sich so dicht sind, dass sie der Dampfdiffusion negativ entgegenwirken*."[270] Dies kann daran liegen, dass gerade bei Gipsputzen zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften Additive zugemischt werden.

Es gibt zu den feuchtetechnischen Eigenschaften des gleichen Baustoffs unterschiedliche Auffassungen. Eine Entscheidung zum Einsatz der jeweiligen Baustoffe darf nicht allein auf der Grundlage ihrer Feuchtetransporteigenschaften erfolgen. Neben dem Feuchteverhalten ist aber auch die Feuchtebeständigkeit ausschlaggebend. So haben zum Beispiel die Baustoffe Ziegel und Gips ein großes Wasseraufnahme- und Feuchteabgabevermögen,[271] aber ihre Beständigkeit gegenüber Feuchte ist sehr unterschiedlich, was in einem einfachen Beispiel in der Abb. 3.1.9 dargestellt wird. Der Gipsputz auf einem neuen Mauerwerk im Keller wurde bereits nach kurzer Zeit durch die Auskristallisierung der gelösten Bestandteile (Kristallisationsdruck) vollständig zerstört. Ursache war die große Restfeuchte des Mauerwerkes, wo dieses verputzt wurde. Gipswerkstoffe können trotz ihrer guten Feuchtigkeitsregulierung nur in trockenen Räumen, oder auch im Bad einer Wohnung unter normaler Nutzung verwendet werden.

Es muss eine schnelle Abtrocknung garantiert sein. Dagegen ist der Einsatz in gewerblichen Küchen oder Bädern nicht möglich. [272, 273] Gerade in der Altbausanierung kommt es oft zur Fehleinschätzung der Eignung der Gipswerkstoffe. So erfolgt oft die Verwendung von Gipsputz oder Trockenputz (Gipskartonbauplatten) auf Salz und Feuchte belastetem Mauerwerk im Erdgeschoss. In dem Hohlraum zwischen altem salzbelasteten Kalkputz und der Gipskartonbauplatte liegt eine hohe Feuchte vor, die zur Zersetzung des mit Stärkederivat verleimten Kartons

---

[268] Künzel, Helmut; In Gösel, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 216
[269] Klopfer, H.; Anstrichschäden, 1976, Bauverlag Wiesbaden Berlin
[270] Köneke, Rolf; Feuchteschäden im Haus, 1988, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, , S. 72
[271] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 92-102
[272] Härtig, Siegfried; Klausen, Dietmar; Hoscheid, Rudolf; Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis 14. Aufl. 2003, C.F. Müller Verlag, S. 86
[273] Hiese, Wolfram; Scholz Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner Verlag, S. 140

durch Schimmelpilze führt. Im Beispiele, Abb. 3.2.2, wurde in einem Kellerraum, der vormals ein Pferdestall genutzt wurde, eine Innenverkleidung aus Gipskartonbauplatten angebracht.

Abb. 3.2.2: Verschimmelte Gipskartonplatten (Trockenputz) am feuchten Kellermauerwerk



Bei den Wasserdampf-Sorptionsvorgängen müssen aber auch die Wirkungen der Mauersalze und von außen eindringende Feuchte berücksichtigt werden, wie sie zum Beispiel im Keller vorkommen können. Die Diffusion kann trotz starker Abkühlung auf der anderen Seite der Wand herausdiffundieren, ohne seinen Aggregatzustand zu wechseln. Es erfolgt damit keine Tauwasserbildung an der Oberfläche oder im Wandquerschnitt. Dies ändert sich jedoch, wenn sich auf der kalten Seite eine dichte Schicht befindet und sich so ein Staubereich bildet, wo ein Dampfsättigungsdruck aufgebaut wird. Dann kann eine Kondensation ausgelöst werden.[274] Dies kann zum Beispiel bei einem Kellermauerwerk auftreten, wo nachträglich außen eine Vertikal-dichtung angebracht wird und die Feuchtigkeit aus der Raumluft und nicht von außen stammt.

Befindet sich im Wandquerschnitt noch zusätzlich Wasser, zum Beispiel durch Tauwasseranfall oder äußere Durchfeuchtungen, so versucht auch dieses aus der Wand herauszukommen. Damit

---

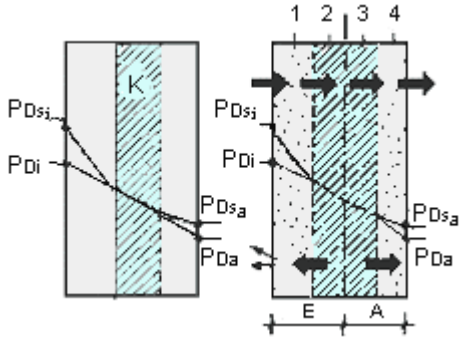
[274] Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 92-102

ergibt sich ein Verflechtungsprozess mit gleich gerichtet oder entgegengesetzt verlaufender Bewegungen (Abb. 3.2.3).

Überlagert sich der Dampfteildruck p_{Di} mit dem temperaturabhängigen Dampfsättigungsdruck p_{Ds}, so verlagert sich der Schwerpunkt der Feuchtezone in Abhängigkeit der Baustoffart und Feuchtigkeitsmenge nach innen. Das ist eine Situation, die zur Herabsetzung der Oberflächentemperatur und somit einer höheren Tauwassergefährdung führt.

Abb. 3.2.3: Folgen der Wasserdampfdiffusion nach EICHLER/ARNDT [275]

K = Kondensationszone, E =Einströmzone, A = Ausströmzone
a) Aufbau einer Kondensationszone nach diffusionstechnischen Kriterien.
b) Die K-Zone verbreitert sich durch Kapillarsog zu einer Feuchtezone, die Feuchte im Einströmbereich zieht sich nach innen, die im Ausströmbereich nach außen hin
1 ist trocken,
2 Diffusionsstrom ist nach außen gerichtet, wird jedoch überlagert,
3 Dampf- und Wärmestrom in gleiche Richtung,
4 trocken, Befeuchtung und Trocknung erfolgen zur gleichen Zeit.



Unter dem Speichermechanismus Adsorption versteht man physikalische und chemische Materialeigenschaften, Wasserdampf an die Wände der Zellen, Poren und Kapillaren zu binden. Sie ist Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte. Liegt die Wandtemperatur unter der Taupunkttemperatur des wandnahen Luft-Dampf-Gemisches, so taut ein Teil des Wassers aus,[276] welches als Flüssigkeits-Dampf-Gemisches vom Baustoff aufgenommen wird. Analoge Vorgänge erfolgen auch, wenn über eine längere Zeit eine hohe relative Luftfeuchte an der Wandoberfläche vorliegt. Hierunter fällt auch der Speichermechanismus die Kapillarkondensation, wo sich Gelporen < 10^{-7}m mit Wasser füllen.[277] Es wird so in den

---

[275] *Eichler, Friedrich ; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 100*
[276] *Schäffler, Hermann; Bruy, Erhard; Schelling, Günter; Baustoffkunde, 7. Aufl. 1996, Vogel Buchverlag Würzbuch, S. 22*
[277] *Zimmermann, Günter; Sauder, Martin; Schloenbach, Renate; Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein, 1995 IBR-Verlag, S. 55*

Baustoffen nicht nur Wasserdampf, sondern auch flüssiges Wasser an den Wänden der Zellen und Poren angelagert. Beim Übergang von Wasserdampf in den flüssigen Aggregatzustand wird Wärme freigesetzt, die sowohl an die Raumluft aber auch an das Bauteil abgegeben wird. Das Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von c_F = 4,182 kJ/kgK (20 °C).[278] Damit hat ein feuchter poröser Wandbaustoff, der einen Anteil an flüssigem Wasser aufgenommen hat, auch einen höheren Anteil an Energie gegenüber seinem trocknen Zustand bei gleicher Temperatur. Zum Beispiel hat feuchter Sand die spezifische Wärmekapazität von c = 2,1 kJ/kgK gegenüber trockenem Sand mit c = 0,8 kJ/kgK.[279]

Der Feuchtegehalt beeinflusst die Wärmedämmeigenschaft der Bauteile durch das größere Wärmespeichervermögen und die höhere Wärmeleitfähigkeit. Je mehr Wärme ein Stoff speichern kann, umso träger reagiert er bei der Aufheizung und Abkühlung. Die Rechenmodelle für die gekoppelten Wärme- und Feuchtetransporte berücksichtigen diese Zusammenhänge. Für die praktische Anwendung ist es sehr kompliziert, praxisnahe Größen für langzeitliche Situationen und für den oft nicht genau bestimmbaren Baustoff festzulegen. Bei eigenen Beobachtungen bei der Errichtung eines neuen Bürogebäudes wurden zum Beispiel 7 verschiedene Baustoffe auf 1 m² Wandfläche verwendet. Das sind zwar Ausnahmen, aber bereits bei 2 oder 3 verschiedenen Baustoffen führt eine Modellbetrachtung zu einem Ergebnis mit großem Streubereich.

Damit bei einer feuchten Konstruktion sich kein Tauwasser bildet und zu einer weiteren Feuchteerhöhung führt, muss die Oberflächentemperatur angehoben werden. Die dafür erforderliche Wärmemenge ist größer als vergleichsweise bei einer trockenen Wand. Da einmal ein größeres Wärmespeichervermögen durch die Feuchte vorliegt und da der Wechsel des Aggregatzustandes von Wasser zu Wasserdampf Wärme benötigt. Eine Absenkung der Oberflächentemperatur erfolgt zum Beispiel durch die Nachtabsenkung. Je nach Konstruktion kann hier Wärme eingespart werden. Dies darf aber nicht zulasten einer langsamen Durchfeuchtung der Wandkonstruktion führen, was gerade bei Altbauten mit Holzbalkendecken zu Schäden führen kann.

---

[278] Meyer, Günter; Schiffner, Erich; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, Tafelwerte, S. 350 ff

[279] Meyer, Günter; Schiffner, Erich; Technische Thermodynamik, 2. Aufl., 1983, Fachbuchverlag Leipzig, Tafelwerte, S. 350 ff

Die Aufnahme der Feuchte aus der Luft sollte durch möglichst große diffusionsoffene Wandflächen erfolgen. Wandfliesen oder Platten bzw. Paneele aus Kunststoff reduzieren den Anteil der Feuchte regulierenden Wandoberfläche. Auch hierauf wird in der Altbausanierung wenig Wert geachtet. Besonders bei den „Luxussanierungen“ werden die Wände der Bäder bis zur Decke mit Keramikfliesen beschichtet. Es gibt dann nur noch eine sorptionsoffene Decke, welche die Feuchtigkeit in der Raumluft reguliert.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ drückt aus, wie viel Wasserdampf im Verhältnis zur Luft in einem Baustoff diffundiert. Es ist keine Größe, die die Diffusionsfähigkeit von Wasser beschreibt. Das Wasser hat nach Wasserstoff, Helium, Methan und Ammoniak eine relativ kleine Molekülmasse und findet so einen Weg durch mineralische Stoffe.[280] Das Wasserdampfmolekül mit einem Radius von 0,14 - 0,16 nm ist wesentlich kleiner als ein Luftmolekül mit 0,2 - 0,28 nm. Daher sind luftdichte Baustoffschichten nicht auch gleichzeitig dampfdicht.[281] Das Wassermolekül mit 0,28 nm[282] ist aber wiederum relativ so groß, dass zum Beispiel der Zementputz eine sperrende Wirkung hat, obwohl der Wasserdampf bei μ = 20 relativ gut durchgeht. Ähnlich ist es auch bei Kunststoff-Zement-Putzen oder Dispersionsfarben.[283]

Die μ-Werte werden durch genormte Messverfahren im Labor ermittelt[284] und werden in der DIN 4108-3 zur Berechnung des Tauwassernachweises nach dem Glaserverfahren eingesetzt. Die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl berechnet sich aus:

$$\mu = \frac{\delta Luft}{\delta} \qquad (3.7)$$

δ = Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des Baustoffes in [kg/m s Pa]
δ_{Luft} = Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft in [kg/m s Pa]

Dieses Verfahren geht davon aus, dass im Winter die Feuchtigkeit aus der Raumluft auf der Innenseite der Wände kondensiert (Kondensationsperiode) und im folgenden Sommer wieder aus-

---

[280] Oberrauch, Bernhard; Bauphysikalische Daten über Lehm, Wohnung + Gesundheit 9/92 –Nr. 64, S. 48
[281] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 30
[282] Zürcher, Christoph, Frank Thomas; Bauphysik Bau und Energie, 2. Aufl. 2004, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S. 53
[283] Oberrauch, Bernhard; Bauphysikalische Daten über Lehm, Wohnung + Gesundheit 9/92 –Nr. 64, S. 48
[284] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002,Verlag Bauwesen Berlin, S. 37

trocknet (Austrocknungsperiode). Aus den experimentellen Untersuchungen von HALLER, [285] aus den Jahren 1953 bis 1958, geht eindeutig hervor, dass Außenwände im Sommer generell nass sind und in den Wintermonaten austrocknen. Weitere wissenschaftliche Untersuchungen mit gleichen oder ähnlichen Feststellungen konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

Das Glaserverfahren berücksichtigt aber nicht die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl, da bei höheren Baustofffeuchten auch Kapillartransporte stattfinden. So hat zum Beispiel Zementmörtel bei einer relativen Luftfeuchte von 40 % einen μ-Wert von 50 und bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % einen μ-Wert von 10.[286] Bei Normalbeton (2290 kg/m³) im Trockenbereich bis zu einer relativen Luftfeuchte von 50 % liegt der μ-Wert bei 225 und im Feuchtbereich bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 50 bis 100 % bei einem μ-Wert 84. Bei Bimsbeton (1085 kg/m³) beträgt der Unterschied des μ-Wertes nur 15 zu 10. [287]

Werden die gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportprozesse durch Sperrschichten oder besonders ausgeprägte Grenzschichten behindert, so kann die eingedrungene Feuchte aus dem Wandquerschnitt nicht ausreichend abgeführt oder auch aufgenommen werden.

Untersuchungen der Transportvorgänge zeigen, dass der kapillare Feuchtetransport über die Schichtgrenze, Putz und Mauerwerk, behindert wird. KRUS, KÜNZEL, KIEßL vermuten, "*dass die Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze durch Kristallbildung von Salzen aus dem Putz ‚verstopfen'.*"[288] Dabei handelt es sich um eine Widerstandsschicht von 1 mm, welche abhängig von der Materialkombination ist. Diese verringert den Flüssigtransportkoeffizienten um einen Faktor von 200 bis 2000. Werden bei einer Altbausanierung die bisherigen Innenputze aus Kalk durch andere Baustoffe ausgetauscht, die zum Teil auch noch durch Haftbrücken oder Aufbrennsperren zum Zweck der besseren Verarbeitung ergänzt werden.

---

[285] ETH-Prof. und EMPA-Chef Paul Haller, Untersuchungsbeschreibung in Bossert, Paul; Nagel; Energieverbrauchsanalysen von Hochbauten, Deutsche Bauzeitung 9/1982, S. 58-62
[286] Völkner, Stefan; Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Außenwänden, Diss 2004 Universität Bochum, S. 2-18
[287] Künzel, Helmut: Teil C Feuchteschutz in Gösele, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 226
[288] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk -Messung und Berechnung, 1996, IRB Verlag, S. 70

Haftbrücken dringen in die Putzoberfläche und verfestigen die Oberfläche dagegen erhalten Steinoberflächen durch Aufbrennsperren ein gleichmäßiges Saugvermögen, das heißt, das Wasser von dem neuen Putz wird nicht so schnell in den Mauerquerschnitt gesaugt. In beiden Fällen wird die Oberflächenstruktur des mineralischen Baustoffs verändert und der Flüssigtransportkoeffizient erhöht sich. Auch nur ein geringer Einfluss kann langfristig zur Feuchteerhöhung im Wandquerschnitt führen.

Für die Außenbeschichtung ist möglichst ein kleiner Diffusionswiderstand anzustreben. Bei Niederschlag wird die Oberfläche feucht, trocknet aber sehr rasch ab.[289] Bei zu dichten Beschichtungen kann eingedrungene Feuchtigkeit (Risse, Anschlussstellen usw.) nur langsam trocknen, was unter Umständen zu einer Feuchtigkeitsanreicherung führt. Da der Diffusionswiderstand der Baustoffe im trocken Zustand höher ist, empfiehlt es sich bei der Bewertung der Baustoffe den höheren s_d-Wert im Trockenbereich auszuwählen. Damit werden allzu dichte Beschichtungen ausgegrenzt.[290]

Nachfolgend werden aus der Literatur zwei Schadensfälle durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans [Wulf.: Fr.] Schroet*.) an den Deckenbalken als Folge zu dichter Wandbeschichtungen beschrieben. So wurde im ersten Fall mit der Sanierung ein äußerer dampfdiffusionssperrender Spachtelputz im Sockelbereich aufgebracht. Die Feuchte aus dem Keller konnte nicht mehr so gut, wie bisher nach außen entweichen. Es kam zum Feuchtestau am Balkenauflager zwischen der Dielung und dem Laminat mit Dampfbremse (siehe Abb. 3.2.4).[291]

---

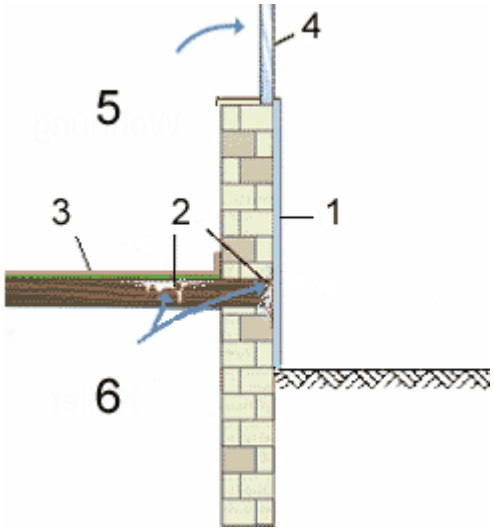
[289] Künzel, Hartwig, M.; Krus, M.; Kießl, K.; Feuchteverhalten bewitterter Fassadenbauteile, IBP-Mitteilung, Nr. 274, 22 (1995)

[290] Künzel, Helmut; Teil C Feuchteschutz in Gösele, Karl; Schüle, Walter; Künzel, Helmut; Schall, Wärme, Feuchte Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau, 10. Aufl. 1997, Bauverlag Wiesbaden/Berlin, S. 226

[291] Flohr, Ekkehard; Flint, Eckart; Die Zeichen sehen, deuten und handeln , Echter Hausschwamm – oft unterschätzt, zu spät erkannt, Bauen im Bestand, Bautenschutz+Bausanierung 2/08, S. 34f

Abb. 3.2.4: Beispiel für die Entstehung eines Hausschwammbefalls durch nachträgliche Sperrschichten,

1 = Spachtelputz mit großem µ-Wert
2 = Feuchtestau durch Sperrschicht
3 = dichter Fußbodenbelag (Kunststoff)
4 = Isolierverglasung mit Fugenabdichtung
5 = Wohnraum
6 = Feuchte aus dem Keller



In der Abb. 3.2.5 (das Originalbild wurde um die Details ergänzt) werden die Folgen der Entstehung des Echten Hausschwamms durch eine undichte Balkonanbindung beschrieben.[292] In der Zeichnung sind im Anschluss auch noch zwei Wärmebrücken erkennbar. Das ist die einkragende Stahlbetonplatte und die fehlende Dämmung bis in die horizontale Balkonfläche. Die äußere Fassadenschicht, die Schichtgrenze zwischen massiver Wand und Wärmedämmverbundsystem (Styroporplatten) sowie die an der Wand hochgezogene Feuchtesperre stellen Sperrschichten auf der Außenseite dar und behindern so den nach außen gerichteten Feuchtetransport. Es kommt zwangsläufig zum Feuchtestau auf der Außenseite der Konstruktion mit entsprechender Rückkopplung nach innen. Die Abtrocknung kann nur noch nach innen und damit entgegen dem Wärmestrom erfolgen. Aber auch hier wurde eine Sperrschicht aus Bodenfliesen auf die Holzbalkendecke und einer Fliesenkante zur Außenwand aufgebaut. Damit wurde der ursprüngliche konstruktive Luftaustausch zwischen Deckenkonstruktion und dem Raum beseitigt. Damit war auch eine Abtrocknung nach innen nicht möglich. (Das Originalbild wurde um

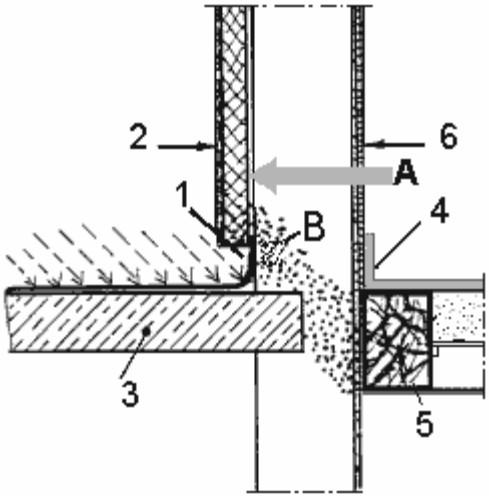
[292] *Silz, Christof; Schwammsanierung im Schadensfall bs 2/97, S. 46f*

die Details ergänzt.) Unabhängig, ob die Balkonabdichtung in Ordnung ist oder nicht, durch die einkragende Betonplatte (Wärmebrücke) bildet sich an dieser Stelle intensiv Tauwasser.

Damit es zu keinen Feuchtigkeitsschäden kommt, darf bei einer Thermohaut (4 bis 8 cm Kunststoffplatten) der Wert $\mu \cdot d = 2{,}5$ nur wenig überschreiten. Dies gilt für Putz und Farbbeschichtung. Besser sind mineralische Putze mit Leichtzuschlag, wie Perlite.[293] Damit sich zwischen Dämmung und Außenputz kein Tauwasser bildet, darf der Putz keinen zu großen Diffusionswiderstand aufweisen. Bei hinterlüfteten Fassaden, wo der Luftraum mindestens 2 cm beträgt, kann der durch die Wand diffundierende Wasserdampf an die Außenluft abgegeben werden.[294]

Abb. 3.2.5: Die Durchfeuchtung (B) im Bereich der Balkonplatte (3) führte zu einem Befall des Holzbalkens (5) durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans*).

1 = ungünstige Fugenanbindung
2 = Wärmedämmverbundsystem
3 = Betonplatte Wärmebrücke
4 = Bodenfliesen (Keramik)
5 = Deckenbalken
6 = Gipskartonplatte (Trockenputz)
A = Wärme- und Feuchtestrom von innen nach außen
B = Feuchtigkeitsstau



ARNDT spricht sich für die Vorteile zum Einsatz eines Wärmedämmverbundsystems aus. „*Eine anhaltende Tauwasserbildung innerhalb der Ziegelwand ist so gut wie ausgeschlossen.*

[293] *Mehlhorn, Gerhard; Der Ingenieurbau, Grundwissen, Bauphysik Brandschutz, 1996, Berlin Ernst & Sohn, S. 91*
[294] *Fischer, Heinz-Martin; Jenisch, Richard; Stohrer, Martin; Homann Martin; Freymuth, Hanes; Richter Ekkehard, Häupl, Peter; Lehrbuch der Bauphysik, 6. Aufl. 2008, Vieweg & Teubner, S. 151*

Ein weiterer Vorteil der Außendämmung zeigt sich darin, dass die bei Altbauten typischen Wärmebrückenzonen im Auflagebereich der Decken beseitigt werden können.“[295] An einer anderen Stelle äußert er sich: „*Unverputzte Außenwände aus frostbeständigen Ziegeln können ihre Dauerhaftigkeit verlieren, wenn ein nachträglicher dichter Außenanstrich aufgetragen wird. Dadurch wird der vorher gesunde Feuchtegehalt der Wand gestört. Die Ziegel werden dann durch einen dauernden höheren Feuchtegehalt belastet*…“[296] Damit unterstreicht ARNDT, dass sperrende Schichten zur Feuchteerhöhung führen. Diese Einschränkung fehlt allerdings bei seiner Vorteilsbeschreibung für den Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen auf Ziegelmauerwerken.

Sperrende Außenbeschichtungen führen zwangsläufig zur durchschnittlichen Feuchteerhöhung in der Konstruktion aus porösen Baustoffen.
GROSSER führt bei der Altbausanierung die Feuchteerhöhung „*auf fehlende, unzureichende oder falsch angeordnete Wärmedämmungen, Dampfsperren oder Dampfbremsen, die zur Bildung von Tauwasser führen, das nicht verdunsten kann und in Verbindung mit Wärme ein günstiges Klima für die Entwicklung holzzerstörender Pilze schafft“* [297] zurück.

Weniger kritisch ist die Kondenswasserbildung auf der Außenfassade. Eine anorganische Ablagerung auf der Fassade führt zu einer Besiedlung von Bakterien und Schimmelpilze sowie Algen. Dies hängt von den Feuchtigkeitsverhältnissen ab. Gelegentlich treten auch Flechtenlager auf Naturstein und Horizontalflächen auf. Vorausgesetzt, dass keine Aussalzung im fortgeschrittenen Grad besteht.[298]

Durch nächtliche Abstrahlung bei klarem Himmel unterkühlt sich die Wandfläche und kann einige Grad niedriger sein, als die der umgebenden Luft, siehe Punkt. 2.6. Die Abkühlung der Oberflächen erfolgt sowohl im Sommer als auch im Winter, wobei im Sommer durch die

---

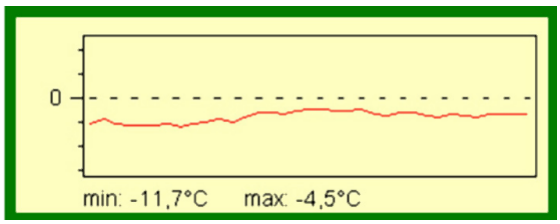
[295] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis,, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 284
[296] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 62
[297] Grosser, D.; E. Flohr, E.; M. Grinda, M.; I. Müller, I.; Praxisorientierte Untersuchungen zur Bekämpfung des Echten Hausschwamms (Serpula lacrymans) nach DIN-Vorschrift und alternativen thermischen Verfahren, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt E-1998/14, Technische Universität München, 2008, Fraunhofer IRB Verlag, S. 48
[298] Riedl, Harald, Hubacek, Hugo; Bauwerkszerstörung und Sanierung durch Mikroorganismen, Forschungsbericht Institut für angewandte Forschung und Produktmarketing Wien, 3/1988, S. 5 (Standort Deut. Bücherei 1988B7863)

höhere Tagestemperatur schnell ein Ausgleich erfolgt. GROCHAL[299] untersuchte hierzu wärmegedämmte Fassaden. Die Aufnahme einer wärmegedämmten Fensterfassade in der Abb. 3.2.6 wurde gegen 8 Uhr (kurz vor der Bestrahlung durch die Sonne) bei einer Außentemperatur von circa –3 bis –4 °C aufgenommen. Die Isotherme LIO1 in der Abb. 3.2.7 zeigt eine Oberflächentemperatur von –12 °C auf der Dämmung und –4 °C auf der äußeren Fensterfläche. Die Oberflächen haben natürlich einen unterschiedlichen Absorptions- und Reflexionsgrad, sodass diese Werte nicht als absolut betrachtet werden dürfen. Korrekte Werte für die Oberflächentemperatur hält man dagegen mit einem Kontaktthermometer. Durch die Temperaturdifferenz zwischen der höheren Lufttemperatur und der niedrigeren Oberflächentemperatur kommt es bei entsprechender Luftfeuchte an der Fassadenoberfläche zur Tauwasserbildung.

Abb. 3.2.6: Oberflächentemperatur einer wärmegedämmten Fassaden. Bei einer Lufttemperatur von circa –4 °C, 8 Uhr



Abb. 3.2.7: Isotherme LIO1 zum Bild 2.1.3.10., die Oberflächentemperatur liegt zwischen –4 bis –12 °C



[299] *Grochal, P.; Algen und Pilze an wärmegedämmten Fassaden, 3. Dahlberg – Kolloquium, Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung, 2001, Verlag Bauwesen* Berlin, S. 113

Diese Abkühlung und Kondensatbildung kommt auch an der Holzschalung, Faserzementschindel, verputzte Außendämmung und auch an der Glasfassade vor. Sehr deutlich ist dies am Morgen bei den Autos zu sehen.

Auf der Südseite treten bei Sonnenschein große Temperaturschwankungen auf. Ist der Sonnenschein beendet, so sinkt die Temperatur sehr schnell wieder ab, da die dünne Außenschicht nur wenig Wärme speichert. Demgegenüber wird der Wärmeeintrag durch die Sonne in einer massiven Konstruktion noch über viele Stunden gespeichert. Was weniger bekannt ist, auch an einer massiven Konstruktion kann die Oberflächentemperatur unterhalb der Lufttemperatur sinken. Dies kann mit einem Infrarotthermometer überprüft werden.

Massive Bauteiloberflächen, wie z. B. Beton oder Sandstein müssen daher eine Mindestdicke haben, damit die am Tag eingespeicherte Wärmeenergie bis zum nächsten Tag ausreicht, ohne dass sich am Morgen an der Oberfläche Tauwasser bildet. Unabhängig davon sind die Bauteile konstruktiv so zu gestalten, dass sich nirgendwo Feuchte ansammelt und diese auch schnell abtrocknen können. Dies ist besonders für Stahlbetonbauteile wichtig, um den Karbonatisierungsprozess an der Oberfläche auf ein Minimum zu halten. Kommen hier noch ungeeignete dicht schließende Beschichtungssysteme zur Anwendung, so kann es im ungünstigen Fall zu einem Feuchtigkeitsstau und zur Korrosion des Bewährungseisens kommen, wenn ein Feuchtetransport von innen nach außen erfolgt, wie es zum Beispiel bei einem Kühlturm auftritt.[300] Wird dies nicht ausreichend beachtet, so bieten neben der langzeitlichen Materialzerstörung diese Oberflächen einen günstigen Lebensraum für die Besiedlung von Mikroorganismen.

Untersuchungen und die Auswertung zeigen, dass bei der Erhöhung der Dämmstoffstärken (Ziel: kleinerer U-Wert) bei gleicher Konstruktion sich die Kondensationsperiode und damit das Bewuchsrisiko erhöht. Ebenso wurde bei einem Massivmauerwerk mit einem U-Wert von 0,38 W/m²K in der Zeit von 20.11.91 bis 29.04.1992 eine Unterkühlung der Oberfläche mit 546 Stunden und bei einer Massivmauer mit Wärmedämmung und gleichem U-Wert mit 1586 Stunden ermittelt. Der Unterschied kommt durch die wenig Wärme speichernde verputzte äußere

---

[300] *Gertis; Schäden an Zementbeton, Vortrag zur Bauwerksabdichtung an der HTWK (Hochschule für Technik Wirtschaft und Kultur) Leipzig am 6.3.2008 von Deitermann maxit Group*

Wärmedämmung gegenüber der massiven Wand zustande.[301] Die gleiche Aussage vertritt auch KÜNZEL.[302]

Die Folgen sind eine Erhöhung der Konzentration von Mikroorganismen unmittelbar an der wärmegedämmten Fassade. Algen benötigen eine Umgebungsfeuchte von ca. 92 %, Pilze wachsen hingegen ab einer relativen Luftfeuchte von 80 %. Liegt also ein Algenbewuchs an einer Fassade vor bzw. werden diese Grenzbereiche erreicht, so ist zwangsläufig auch mit einer höheren Pilzkonzentration in der unmittelbaren Nähe des Gebäudes zu rechnen, die zwangsläufig auch beim Lüften in das Gebäude gelangen. Algen benötigen als Nahrungsgrundlage das Kohlendioxid der Luft, Pilze brauchen dagegen immer organische Kohlenstoffe, wie Holz, Staub, Anstriche usw. kleine Mengen an Substraten sind meist in den Oberflächenverschmutzungen vorhanden. So setzen sich Schimmelpilzsporen auch an Fassaden fest und warten bis optimale Lebensbedingungen vorliegen.

3.3. Feuchteschäden im Erdgeschoss und in Kellerräumen

Meistens wird die Feuchtigkeit im Außenmauerwerk der Erdgeschosswohnung oder in Kellerräume vorwiegend einer defekte Feuchtesperre zugeordnet. Diese trifft bei älteren Wohngebäuden zum Teil zu. Einmal hat die Horizontaldichtung ihre Funktionsfähigkeit teilweise eingebüßt und in vielen Fällen wurde keine Vertikaldichtung angelegt. Über viele Jahrzehnte konnte so von außen Feuchte in das Mauerwerk eindringen. Dabei wurden Salze aus dem Mauerwerk herausgelöst oder Salze von außen eingetragen. Durch die hygroskopischen Eigenschaften der Salze ist ein stark belastetes Mauerwerk nur unter großem Aufwand dauerhaft zu trocknen. Aber neben der Feuchte von außen wird auch Feuchte von der Raumluft in das Mauerwerk eingetragen. Diese Tauwasserbildung erfolgt vorwiegend in der wärmeren Jahreszeit.

Die Bedeutung der Kondenswasserbildung gerade an den weniger warmen Bauteilen im Keller und im unteren Bereich der Erdgeschosswohnungen wird oft nicht richtig erkannt, was sich

---

[301] Raschle, Paul; St. Gallen, Schweiz, Algen und Schimmelpilze auf Fassaden, Vortrag auf der 11. Quedlinburger Holzbautagung 1.4.2005, 4/9

[302] Künzel, Hartwig, M.; Krus, Martin; Sedlbauer, K.; Algen auf Außenwänden- Bauphysik als Ursache? Bauphysik als Lösung , 3. Dahlberg – Kolloquium, Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung, Verlag Bauwesen Berlin, 2001, S. 75ff

dann auf die Auswahl der zum Teil erfolglosen Sanierungsvariante auswirkt. In den folgenden Schemata, Abb. 3.3.1 und 3.3.2 werden stark vereinfacht die Feuchtigkeitsquellen am unteren Bauwerk dargestellt.

Abb. 3.3.1: Temperaturzustand im Keller und Erdgeschoss zur kühleren Jahreszeit (Winter)

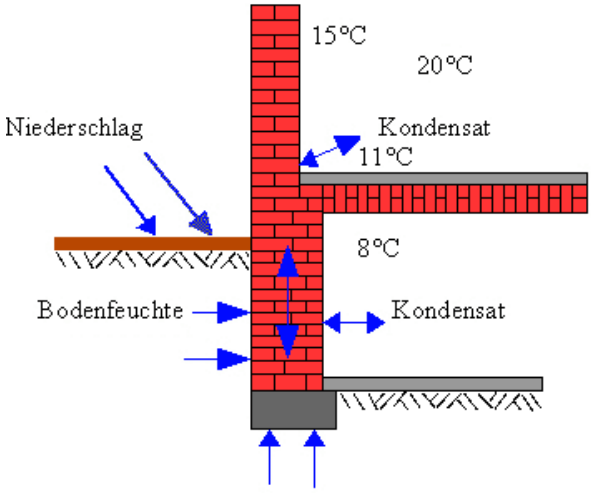
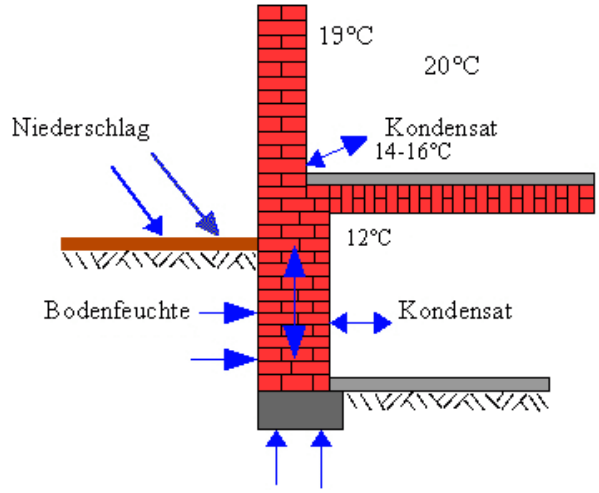


Abb. 3.3.2: Temperaturzustand im Keller und Erdgeschoss zur wärmeren Jahreszeit (Sommer)



Von außen wirken einmal der Niederschlag mit seinem Oberflächenwasser und die Bodenfeuchtigkeit. Wie weit diese zur Durchfeuchtung des Mauerwerkes beitragen, hängt einmal vom Vorhandensein und der Ausführung der vertikalen und horizontalen Feuchtigkeitssperre ab. Aber es trägt zur Durchfeuchtung auch die Kondensatbildung und die hygroskopische Wirkung der Salze im Mauerwerk (Punkt 5.) bei. In dem Beispiel werden die gemessenen Oberflä-

chentemperaturen im Keller und in der Erdgeschosswohnung in der kühleren und wärmeren Jahreszeit angegeben**.** Natürlich treten in der Praxis auch viel größere Schwankungen auf. Es werden hier nur die kritischen Wandabschnitte hervorgehoben, die überwiegend die niedrigsten Oberflächentemperaturen aufweisen und so tauwassergefährdet sind. Das ist das untere Mauerwerk (Keller) und die Kellerdecke neben der Außenwand.

Ein weiteres Problem tritt auf, wenn die unterschiedlichen Luftfeuchten innerhalb des Gebäudes durch einen „Schacht" vermischt werden. Durch die hohe Luftwalze wird zusätzlich Feuchtigkeit in die unteren meist kühleren Räume eingebracht, da hier die relative Luftfeuchte zusätzlich erhöht wird. Gerade dies erfolgt bei vielen neuen Ein- oder Zweifamilienhäusern durch die Treppenhäuser, die vom Keller bis zum Dachgeschoss reichen. Bei älteren Gebäuden hatten die Treppen zum Keller eine Tür. Teilweise wurden aber auch die Etagen in den Treppenhäusern durch eine Tür getrennt. Damit wird der Luftaustausch über mehrere Etagen verhindert. Bei dichten Gebäuden steigt die warme Luft über das Treppenhaus nach oben und sinkt an einer anderen Stelle wieder nach unten, ohne dass ein vollständiger Feuchteaustausch erfolgt. Am Kellereingang angekommen, hat die Luft immer noch einen hohen absoluten Feuchteanteil, welcher dann an der angrenzenden kühleren Wandoberfläche austaut. Das ist meist an der Decke zum Kellereingang. An dieser Stelle bildet sich zum Teil auch etwas Schimmel oder es wird schmutzig grau. Dies ist vor allem in der wärmeren Jahreszeit zu beobachten, da die relative Luftfeuchte höher ist. Aufgrund der Temperaturdifferenz im Winter von innen nach außen von 20 bis 30 K bildet sich eine Druckdifferenz aus.[303] Ist das Gebäude weniger dicht, so entweicht ein Teil der warmen Luft über Fugen im Dachgeschoss und taut dann oft in der Dämmung des Spitzbodens aus und kann so zu Feuchteschäden in der Konstruktion führen.[304] Eine der wichtigsten Schwachpunkte ist die Einschubtreppe zum Spitzboden im Treppenhaus.

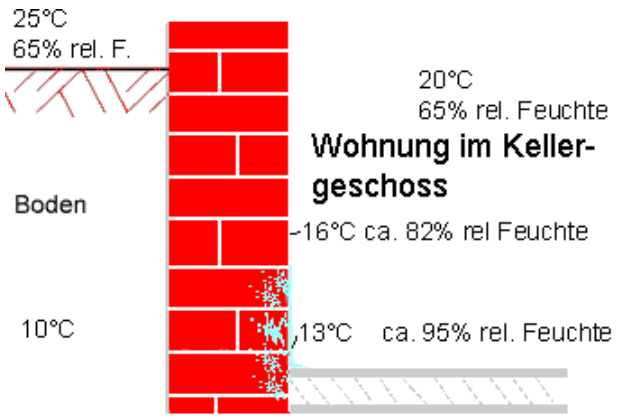
Bei Wohnungen im Keller tritt gerade im erdberührenden Wandabschnitt (Abb. 3.3.3) während der warmen Jahreszeit erhöhte Feuchtigkeit mit einer Schimmelpilzbildung auf. Die hohe rel. Luftfeuchte bietet eine gute Grundlage für eine hohe Konzentration an Pilzsporen in der Raumluft, welche auch die Einrichtungsgegenstände und Textilien befällt.

---

[303] Morisk, Heinz-Jörn; Szewzyk, Regine; Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen, 2002, Umweltbundesamt Berlin, S. 20
[304] Rauch, Peter; Dachgeschossausbau - Schäden vermeiden, 2004, Verlag Ingenieurbüro Peter Rauch, S.7f

Um dies zu vermeiden, müssen ständig genutzte Kellerwohnungen immer beheizt und die relative Luftfeuchte über eine gezielte Lüftung reduziert werden.[305] Die Beheizung dient weniger dazu die Raumtemperatur zu erhöhen, sondern dass die unteren Außenwandabschnitte temperiert werden.[306] Energetisch gesehen sind hier Strahlenheizungen oder Heizungen in der Sockelleiste der Außenwand sinnvoll. Zusätzlich sind aber auch diffusionsoffene Wandflächen erforderlich, die in der Lage sind, anfallendes Kondenswasser aufzunehmen. Das ist zum Beispiel ein Kalk-Sand-Putz. Aber auch Sanierputze sind Leichtputze und tragen so gleichzeitig auch zur Temperierung der Oberflächentemperatur bei. Ungeeignet sind Beschichtungen mit Kunststoffdispersionen,[307] Gipsputze oder ein Trockenputz.

Abb. 3.3.3: Temperaturmessung bei einer Kellerwohnung einer Villa in Jena im Sommer



Natürlich müssen die Kelleraußenwände auch erforderliche Dämmwerte erfüllen. Beim Neubau kann dies bereits mit einer entsprechenden monolithischen Wandkonstruktion, zum Beispiel Leichtbetonsteine beziehungsweise Leichtziegel oder in Kombination mit einer Außendämmung, wie extrudierter Polystyrol-Hartschaum oder Schaumglasplatten, berücksichtigt werden. Bei einem Altbau kann nur eine Nachrüstung mit einer Außendämmung mit gleichzeitigem Aufbau einer Vertikaldichtung erfolgen. Hierbei muss beachtet werden, dass anschließend die Restfeuchte im Mauerwerk nur noch nach innen entweichen kann. Die Trocknung kann 2-3 Jahre oder länger dauern. Je günstiger eine gezielte Lüftung und Temperierung erfolgt, um so

[305] *Köneke, Rolf; Feuchteschäden im Haus, 1988, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH,, S. 52*
[306] *Pohl, Reiner; Konstruktions- und Ausführungshinweise für energiesparende Maßnahmen bei erdberührten Bauteilen Merkblatt 71, 1989, RKW-Verlag, S. 4*
[307] *Köneke, Rolf; Feuchteschäden im Haus, 1988, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH., S. 52*

kürzer ist der Austrocknungsprozess des Wandquerschnitts. Eine nachträgliche Innendämmung birgt immer Problem, auch wenn diese diffusionsoffen ist.

Feuchtestreifen über dem Fußboden an der Außenwand mit Putzschäden oder einer Schimmelpilzbildung müssen nicht zwangsläufig von einer „Aufsteigenden Feuchtigkeit“ herrühren. Die weniger warme Fußbodenoberfläche in einer Erdgeschosswohnung entsteht durch den Wärmefluss durch die Außenwand und den kalten Fußboden über die Kappe des Kellers. Die niedrigsten Oberflächentemperaturen liegen hier im Bereich der Fußleiste am Außenmauerwerk vor (Abb. 3.3.1). Sind diese Problembereiche besonders ausgeprägt, so erkennt man diese durch die Schimmelstreifen direkt über der Fußbodenleiste (Abb. 3.3.4). Diese Durchfeuchtung kann aber auch in Verbindung mit einer äußeren Durchfeuchtung, wie Spritzwasser und aufsteigende Feuchte stehen.

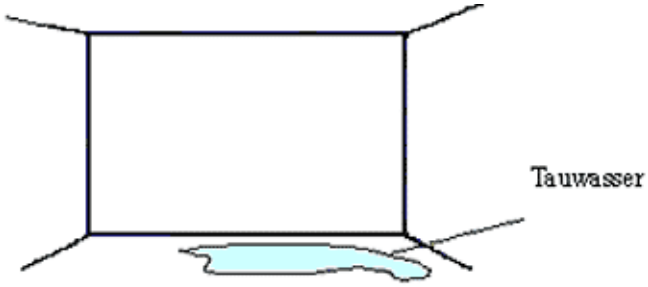
Abb. 3.3.4: Direkt über der Fußbodenleiste ist ein kleiner Streifen mit Schimmelpilzen an der Tapete erkennbar.



Im folgenden Schema (Abb. 3.3.5.) wird eine kühlere und auch feuchte Fläche am ungedämmten Fußboden im Erdgeschoss über einem Keller gezeigt. Diese Kondenswasserbildung tritt besonders im Sommer auf. Zwar ist die Oberflächentemperatur höher als im Winter aber durch die allgemein höhere Raumtemperatur und Luftfeuchte kommt es vereinzelt zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur. Die Oberflächentemperatur über dem ungedämmten Kellergewölbe (Fußboden) liegt zu Beginn der warmen Jahreszeit etwa bei 14 bis 16 °C, siehe Abb.

3.3.2. Wird warme Außenluft hereingelüftet, so kann aufgrund der höheren absoluten Luftfeuchte Wasserdampf auf der Oberfläche des Fußbodens austauen. Dieses Phänomen tritt dann auf, wenn größere Temperaturschwankungen und eine höhere relative Luftfeuchte vorliegen. Auch wenn es nicht ständig zur Tauwasserbildung kommt, so führt es zur langfristigen Durchfeuchtung des Fußbodens besonders am Außenwandbereich. In diesem Bereich zeigen gerade die Dielen und Lagerhölzer älterer Wohngebäude hohe Feuchtigkeitswerte und sind in vielen Fällen durch Holz zerstörende Insekten und Pilze geschädigt.

Abb. 3.3.5.: Feuchteschaden auf dem Fußboden zum Kellergeschoss



Es gibt noch weitere Ursachen, die einzeln oder wechselseitig wirken. Das sind zum Beispiel die Behinderung der Luftströmung und damit geringe Temperierung der Oberflächentemperatur oder eine unzureichende Lüftung. Der Fußboden hat keine oder nur eine ungenügende Wärmedämmung oder es liegt eine inhomogene Materialstruktur vor, wie zum Beispiel verschiedene Dichte des Betons oder unterschiedliche Feuchte der Ausgleichsschüttung über der Kappe. Das Problem der Durchfeuchtung des Fußbodens und des Wandanschlusses kann nur durch eine Temperierung beseitigt werden. Es wird ein neuer Fußboden mit entsprechender Wärmedämmung aufgebaut oder die Kellerdecke wird nachträglich mit einer Wärmedämmung versehen. Es bietet sich auch hier eine Verlegung einer zusätzlichen Randleistenheizung an der Außenwand über dem Fußboden an.

Die Tauwasserprobleme treten aber auch bei neu errichten Wohngebäuden auf. Im nachfolgenden Beispiel befindet sich die Fußbodenhöhe der Erdgeschosswohnung einige Zentimeter unterhalb der Geländeoberfläche. Über eine große Fenstertür kann die Terrasse von der Erdgeschosswohnung betreten werden (Abb. 3.3.6). Hier hat man zwei Wärmeflüsse nach außen, einen in das Erdreich und einen zur Außenluft. Damit besteht das gleiche Problem wie im Keller (Abb.

3.3.3), was oben bereits ausführlich beschrieben wird. Trotz der äußeren Wärmedämmung, die auch die Außenwand der darunter befindlichen Tiefgarage dämmt, kommt es zur Abkühlung.

Abb. 3.3.6: Schimmelpilzbildung an der Innenseite trotz geringer relativer Luftfeuchte und einer Außendämmung



Begünstigt wird diese noch durch die breite Sohlbank und die große Fenstertür. Im Schlafzimmer lag eine Temperatur von 17 °C mit einer relativen Luftfeuchte von 40 % vor. Die Temperaturen lagen am Fensterrahmen bei 10 °C, die der Wandfläche unterhalb der Kunststeinplatte bei 11,8 °C und die des Fußbodens bei 14,5 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur an der Außenwand ein Meter über dem Fußboden lag bei 15 °C. Bei diesen Klimadaten dürfte die relative Luftfeuchte direkt an der (verschimmelten) Wandfläche zwischen 55 bis 60 % liegen. Die gemessene Luftfeuchte direkt an der Oberfläche lag aber weit darunter. Nach diesen Bedingungen dürfte hier kein Schimmelbefall vorliegen. Es ist anzunehmen, dass an der großen Glasfläche sich an kühlen Tagen viel Kondenswasser ansammelt. Diese kann über die Kunststeinplatte laufen und so gelegentlich die Tapete befeuchten. Andererseits nimmt die raumumschließende Fläche, Dispersionsfarbe auf der Raufasertapete, nicht genügend Feuchte während der Schlafenszeit auf und wirkt sich so ungünstig auf die Feuchteregulierung aus. Aber auch das Lüften bei angeklappter Terrassentür kann zu einer Durchfeuchtung führen, da die kühlere Luft unten über der Sohlbank einströmt. Da hier im Nachhinein an der konstruktiven Ausführung keine Änderungen mehr möglich bzw. nur mit hohem technischen Aufwand verbunden sind, wurde hier

der Austausch der Fußbodenleiste an der Außenwand durch eine Randleistenheizung (Strahlenheizung) empfohlen. Dadurch wird der Wandabschnitt unter der Sohlbank ausreichend temperiert.

Funktionsfähige Mauerwerke könnten trotzdem langfristig einer vollständigen Durchfeuchtung unterliegen. Bei diesem Beispiel in der Abb. 3.3.7 hat sich hinter dem Heizkörper massiv Schimmelpilz gebildet. Unabhängig vom schlechten Lüftungsverhalten des Mieters sowie das Trocknen der Wäsche in der Erdgeschosswohnung, liegt im Mauerwerk eine sehr hohe Feuchtigkeit vor. Hinzu kommt auch noch eine hohe Salzbelastung des Mauerwerkes. In der folgenden Abb. 3.3.8 wird die Ursache gezeigt, die zu dieser starken Durchfeuchtung des unteren Mauerwerkes geführt hat.

Abb. 3.6.7: Starke Durchfeuchtung der Außenwand in der Fensternische.



Das neue Hofpflaster wurde mit einem Gefälle in Richtung Kellermauerwerk hergestellt. Das Niederschlagswasser läuft zur Hauswand und gelangt zwischen die Noppenbahn und Kellerwand. Genau in diesem Bereich zeigt das Kellermauerwerk unterhalb der oben gezeigten Küche bis in die Kappe eine ungewöhnlich hohe Feuchtigkeit und eine starke Salzausblühung.

Abb. 3.3.8: Ein negatives Gefälle leitet das Niederschlagswasser zur Außenwand und verursacht so die Durchfeuchtung des Mauerwerkes.



Aber auch durch eine nachträgliche Sanierung treten Feuchteschäden auf. In diesem Fall in einer Erdgeschosswohnung in Blockbauweise (Q 3 A oder Q 6). Die Außenwände bestehen aus Leichzuschlag-Beton-Ziegelsplitt. Nach EICHLER [308] wird für λ ~0,85 W/mK bei einer Rohdichte 1700 kg/m³ bzw. für die Außenwand mit 32 cm Wandstärke R = 0,54 m²K/W für den gemessenen Wert und R = 0,44 m²K/W nach TGL 35424/02 angegeben. Bei der energetischen Sanierung wurde ein Wärmeverbundsystem mit λ =0,04 W/mK angebracht, alle Kastenfenster wurden durch Isolierverglasung mit λ=1,6 W/mK oder kleiner ausgetauscht. Die U-Werte vor der Sanierung lagen bei der Außenwand zwischen 1,8 bis 2,3 W/m²K und die der Kastenfenster bei circa 2,6 W/m²K. Nach der Sanierung hat die Außenwand einen U-Wert von circa 0,4 W/m²K. Bisher waren die Außenwand und die Fenster die kühlsten Flächen. An der Fensterscheibe konnte bisher das Tauwasser austauen.

Durch diese nachträgliche Wärmedämmung kam es zur Durchfeuchtung (Tauwasserbildung) an der Innenwand mit einer umfangreichen Schimmelpilzbildung. Die Durchfeuchtung der Innenwand war so groß, dass man bereits nach einem Leitungswasserschaden suchte. Durch diese nachträgliche Wärmedämmung auf der Außenwand wurden die inneren Oberflächentemperaturen an den einzelnen Bauteiloberflächen verändert.

In der Abb. 3.3.9 wird der klimatische Zustand vor der Sanierung dargestellt. Bisher hatte das Fenster die niedrigste Oberflächentemperatur. Alle Wandoberflächen hatten annähern die glei-

[308] *Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, Bauverlag Berlin, S. 27 u. 223*

che Temperatur, sodass überall eine annähernd gleiche Feuchteverteilung (Adsorption und Desorption) vorlag. Nach der Wärmedämmung, siehe Abb. 3.3.10, kondensierte die Feuchte aus der Raumluft der Erdgeschosswohnung an der Innenwand zum unbeheizten Treppenhaus. Diese Wandfläche hatte nun die niedrigste Oberflächentemperatur. Oberflächentemperaturen der anderen Bauteilflächen wurden durch die nachträgliche Wärmedämmung angehoben. Damit hat sich aber auch der Oberflächenanteil verringert, wo die Feuchte durch Adsorption und Desorption reguliert wurde.

Abb. 3.3.9: Verteilung der Oberflächentemperatur in der Küche, Verbund- oder Kastenfenster

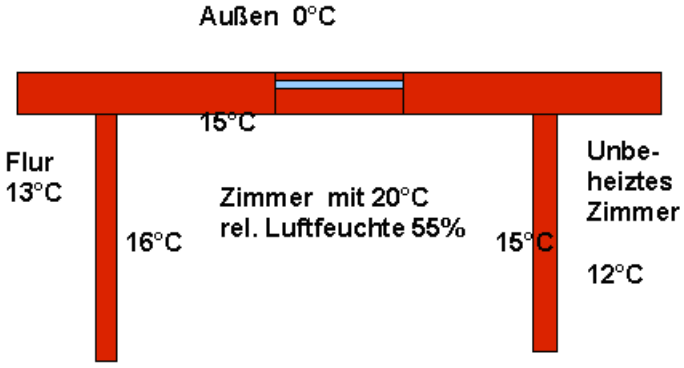
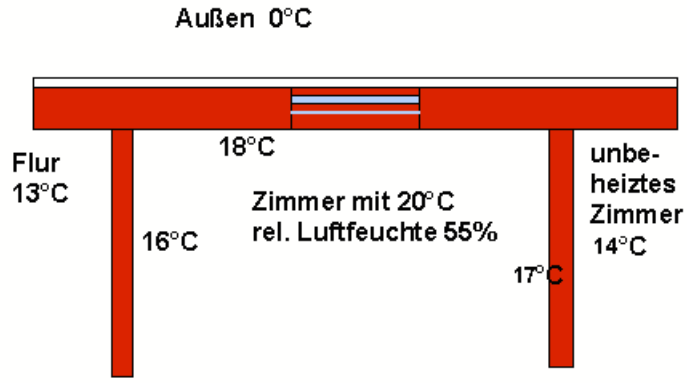


Abb. 3.3.10: Verlagerung der Oberflächentemperatur nach einer Sanierung mit Wärmedämmung und neuen Isolierfenster



Der U-Wert der Innenwand zu dem ungeheizten Treppenhaus erhöhte sich infolge der Durchfeuchtung auf etwa 4 W/m²K. Dies lässt sich aus der rasterförmigen Messung der Oberflächentemperatur eines Gutachtens ableiten. Der Sachverständige hatte zwar richtig

gemessen und gerechnet aber die im Schema dargestellten Zusammenhänge nicht richtig beurteilt. Hätte man bei der Planung der Sanierung eine Beheizung des Treppenhauses vorgesehen, wie es bei Sanierungen der gleichen Wohngebäude in Leipzig erfolgte, so währe dieser Schaden nicht aufgetreten.

Im nachfolgenden Objekt in Erfurt wurden neue Konvektionsheizkörper und eine Isolierverglasung eingebaut. Eine Außendämmung erfolgte nicht. Diese Schimmelpilzbildung (Abb. 3.3.11) erfolgt an einer Innenwand zum Treppenhaus im Erdgeschoss. Die Haustüren blieben auch im Winter längere Zeit offen, sodass es zu einer verstärkten Abkühlung der gesamten Innenwand kam. Die gemessene Temperatur im Treppenflur betrug 6 °C und die der Außenluft 3 °C. Aufgrund der schmaleren Wandstärke der Innenwand gegenüber der Außenwand hatte die Innenwand zum Treppenhaus eine niedrigere Oberflächentemperatur als die Außenwand.

Abb. 3.3.11.: Starke Schimmelbildung an der Innenwand zum kalten Treppenhaus rechts in der Zimmerecke zur Außenwand



Werden bei der Sanierung lediglich die Fenster mit Isolierverglasung ausgetauscht, ohne dass eine äußere Wärmedämmung angebraucht wird, ist die Durchfeuchtung der Außenwandflächen vorprogrammiert. Aber auch heute werden ähnliche missglückte Raumgeometrien entworfen. So bestehen zum Beispiel bei den Einraumwohnungen in einem neuen Mehrfamilienhaus in Leipzig-Leutzsch die Wände aus 50 % Außenwände. Das Wohn- und Schlafzimmer wurde als übergroßer Erker ausgebildet. Es fehlen somit ausreichen Innenwandflächen, wo die Möbel auf-

gestellt werden können. Trotz der Außendämmung traten bei verschiedenen Wohnungen in der Zimmerecke Durchfeuchtungen mit Schimmel auf.

Bei der Montage einer nachträglichen Wärmedämmung können Wärmebrücken entstehen und auf der Innenseite oberhalb des Fußbodens Feuchteschäden mit einer Schimmelpilzbildung auftreten. Nachfolgend in der Abb. 3.3.12 bis 3.3.14 werden ausgewählte Beispiele gezeigt.

Abb. 3.3.12: Wärmebrücken durch eine nachträglich fehlerhaft angebrachte Außendämmung in Leipzig-Ost





Bei dieser Ausführung in der Abb. 3.3.12 lag eine hohe Feuchtebelastung an der Außenwand über dem Fußboden vor.
Die Temperaturmessung ergab:
Raumtemperatur 13,0 °C rel. Luftfeuchte 57 %
Wandoberflächentemperatur oberhalb des Fußbodens 6,7 °C
Wandoberflächentemperatur circa 60 cm höher 10,9 ° C.

Eine Messung der Höhe des Sockelmauerwerkes ergab, dass das Wärmeverbundsystem kurz über bzw. unmittelbar in Höhe der Fußbodenoberfläche beginnt. Hier liegt an der Außenwand an der Grenze zwischen Wärmeverbundsystem und Klinkersockel eine Wärmebrücke vor. Das nachträgliche Anbinden einer Wärmedämmung von wenigstens 20 bis 30 cm von unten ist erforderlich. Die praktische Ausführung ist nicht sehr einfach, da eine korrekte Fugendichtheit hergestellt werden muss.

Diese Ausführungsfehler entstehen aber auch in anderen Ländern, wie in der Ukraine in Хуст (Abb. 3.3.13). Hier endet die Wärmedämmung in Höhe des Fußbodens des Wohnbereiches.
In der Abb. 3.3.14 entstand erst nach dem Anbringen der Außendämmung eine Feuchtebildung über dem Fußboden an der Außenwand mit einer Schimmelbildung. Hier liegt ein Wärmedurchlasswiderstand von R = 0,37m²K/W gegenüber der Wandfläche mit R = 1,87 m²K/W vor.

Abb. 3.3.13: Die falsche Ausführung der Wärmedämmung führt zu einer Wärmebrücke an der Außenwand über dem Fußboden in der Wohnung. Die Wärmedämmung muss mindestens noch 20 cm weiter nach unten reichen.

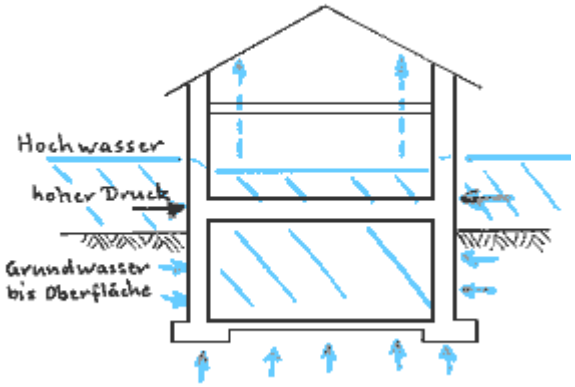


Abb. 3.3.14: Falsche Ausführung der Wärmedämmung bei diesem Wohngebäude in Велкий Бичков in der Ukraine. Hier muss noch eine Dämmung unterhalb der Bodenplatte (bis zum Erdboden) angebracht werden.



Es gibt aber auch eine Feuchtebelastung des Mauerwerkes und der übrigen Konstruktion durch Löschwasser nach einer Brandbekämpfung, durch eine Überschwemmung oder bei einem Leitungswasserschaden, siehe Abb. 3.3.15. Bei einer Überschwemmung kommen zusätzlich eine Reihe nicht kalkulierbare Ereignisse hinzu, die zu einer Schadenserweiterung führen. Dies sind zum Beispiel Ölteppiche, kontaminierter Schlamm und anderes. Ein Ölbelag an der Kellerwand oder ein organisch belasteter Schlamm bietet mit der Feuchtigkeit eine gute Nahrungsgrundlage für Mikroorganismen und Holz zerstörende Pilze. Eine möglichst schnelle Abtrocknung und Säuberung ist hier dringend erforderlich. Weniger kritisch ist eindringendes Regenwasser oder ein Leitungswasserschaden. Aber auch hier ist eine schnelle Trocknung erforderlich. Bei organischen Baustoffen, wie Holz ist sogar sehr schnell zu handeln.

Abb. 3.3.15: Schema einer Wassereinwirkung bei einem Hochwasser



Dringt Wasser in das Gebäude ein, so füllen sich innerhalb einer kurzen Zeit alle Hohl- und Zwischenräume in der Konstruktion mit Wasser. Das betrifft nicht nur die vorgesetzte Gipskartonwand mit Dämmung, sondern auch das massive Mauerwerk aus Mauersteinen mit Hohlkammern oder der Hohlraum unter der Estrichplatte mit der Fußbodendämmung. Fließt das Wasser wieder ab bzw. es wird abgepumpt, so befindet sich in diesen Hohlkammern der Steine oder in der Dämmung immer noch über eine lange Zeit flüssiges Wasser. Durch geeignete Maßnahmen muss das Wasser aus dem Baukörper abgeführt werden.

Massive Baustoffe, wie Vollziegel oder Beton, werden ebenso durchfeuchtet, aber die Poren nehmen wesentlich weniger Wasser auf, welches dann über die technische oder natürliche Trocknung entzogen werden muss. An Standorten, wo Stauwasser anliegt oder eine mögliche Gefährdung durch hohes Grundwasser oder Überschwemmung besteht, sollten im Gründungsbereich Baustoffe zu Anwendung kommen, die keine Hohlkammern und möglichst auch günstige Sorptionsisotherme haben. Die Baustoffe Bimsstein und Gasbeton können eine hohe Gleichgewichtsfeuchte annehmen und sind daher im feuchtegefährdeten Bereich nicht zu empfehlen. Dies betrifft nicht nur die Außenwände der Keller. So wurde in einem Musterhaus in Leipzig Glesin im Keller an der Außenwand Vorsatzwände mit Mineralwolle und Gipskartonbauplatten erstellt. Nach einem starken Regen stand im Keller das Regenwasser 1 m hoch. Statt einer Trocknung war ein kompletter Rückbau aller Leichtbauwände erforderlich.

An dieser Stelle soll noch einmal betont werden, wenn Wasser in ein Gebäude eindringt, ist sofort eine professionelle Trocknung erforderlich. Es muss auch das Wasser aus den Hohlräumen entfernt werden. Je länger eine Feuchte vorliegt, so schneller können neben Schimmelpilze auch Holz zerstörende Pilze entstehen. Holz zerstörende Pilze, wie z. B. der Brauner Kellerschwamm (*Coniophora puteana [Schum.: Fr.]*) wächst auch am Holzregal und anderen Möbeln aus Holz. Das Myzel breitet sich auch über den Betonestrich aus.

Nachfolgend werden einige Fehler aus der Praxis zusammengefasst, wo es zur Feuchteerhöhung im Gebäude oder an den Wandflächen gekommen war:

- Vor der Fassadendämmung (WVS) wurden die Fensterbänke aus Beton nicht ausgebaut und die Ringbalken oder Kanalschächte an der Außenwand nicht durchgängig gedämmt. Damit entstanden Wärmebrücken.
- Unzweckmäßige Baumaterialien, zum Beispiel von Gips-, Malerspachtel, Raufasertapete mit Zellulosekleber und Dispersionsfarbe, auf feuchte belastetes Mauerwerk, wie in Treppeneingangsbereich, Keller oder Hausdurchgängen im Erdgeschoss führten zu Feuchte- und Schimmelpilzschäden.
- Als Folge der Sanierung treten ungünstige raumklimatische Veränderungen auf. Dazu gehört die unvollständige Beseitigung **aller** kühlen Oberflächen oder die Verlagerung der kühlen Oberfläche an andere Bauteile. Die Verkleinerung der sorptionsoffenen Flächen durch zimmerhohe Wandfliesen im Bad, durch Isoliertapete oder Kunststoffplatten bzw. Kunststoffpaneele.
- Bei der Sanierung im Keller werden die diffusionsoffenen Pinselputze mit einer Kalkschlämme durch eine Dispersionsfarbe ausgetauscht oder es werden andere sperrende Beschichtungen auf das Mauerwerk aufgetragen.
- Fehler bei der Erarbeitung der Nutzungskonzeption bei der Sanierung. So wurde in den Keller eines sehr alten Gebäudes mit hohem Feuchtegehalt im Gründungsmauerwerk das Bad für die Wasserbehandlung der Physiotherapie eingebaut. Die Kellerfenster wurden nachträglich zugebaut, sodass keine Fensterlüftung mehr möglich war. In der Physiotherapie waren alle Möbel und Gegenstände verschimmelt.
- Es ist oft ein ungeeignetes Nutzungsverhalten zu beobachten, wie zum Beispiel ungenügende oder falsche Lüftung, unzureichende Heizung oder zu viele Zimmerpflanzen in der Wohnung.
- Es spielen zunehmend aber auch soziale Komponenten eine Rolle. Wegen der hohen Mietkosten werden kleinere Wohnungen bezogen. Damit verringert sich das Raumvolumen pro Person und wegen der ständig steigenden Heizkosten werden die Heizungen gedrosselt oder gar abgestellt.
- Bei der Planung von Wohnungen wird das erforderliche Raumvolumen der Schlafzimmer nur ungenügend berücksichtigt. Meist sind diese Zimmer zu klein.

3.4. Tauwasserbildung hinter einer Innendämmung

Die Innendämmung dient zur Oberflächentemperierung, also zur Erhöhung der Oberflächentemperatur an der Innenwand. Die richtige Erstellung einer Innendämmung erfordert gute Fachkenntnis und hohes handwerkliches Können. Damit der Wandquerschnitt nicht durchfeuchtet wird, werden an der Innenseite fugendicht Dampf sperrende Schichten eingebaut, die zum Raum mit einem sorptionsoffenen Baustoff[309], wie Gipskartonbauplatten oder einen Kalkputz, zur Feuchteregulierung bedeckt werden.

Trotz korrekter Ausführung können bei einer Innendämmung nicht vollständig alle Probleme bei den koppelten Feuchte- und Wärmetransportprozessen im Konstruktionsquerschnitt gelöst werden. Selbst bei Silicatdämmplatten wird ein Versagen beobachtet, welche zur Temperierung kühlerer Innenwandoberflächen angebracht wurden. Dies ist vermutlich auch auf die Wirkungsweise der Schichtgrenze zurückzuführen, wenn diese mit Klebemörtel auf Zementbasis angeklebt wird. So steht lediglich die circa 2 cm starke Schicht für die Feuchteregulierung mit der Raumluft zur Verfügung. Eine 1 Quadratmeter große und 2,5 cm starke Platte kann 20 Liter Wasser aufnehmen. Diese Feuchte muss aber auch wieder durch eine ausreichende Lüftung abgeführt werden können.[310]

Hinter der Innendämmung kommt es im Außenmauerwerk zur Erhöhung der Frostgefährdung, da sich der Frostpunkt weit in den Querschnitt verlagert. [311] Durch den Wechsel der Aggregatzustände, Wasser in Eis und umgekehrt, kommt es langfristig zur Materialzerstörung.

Bei einer Innendämmung sinkt insgesamt der Verbrauch an Heizenergie. Das wird durch die höhere Oberflächentemperatur bewirkt. Damit ändert sich das Wärmeempfinden der Bewohner gegenüber der höheren Wärmestrahlung der Wandflächen und die Temperatur der Raumluft kann gesenkt werden. Mit der höheren Oberflächentemperatur sinkt auch die Luftfeuchte an der Wandoberfläche. Damit verringert sich auch eine Gefährdung durch Schimmelpilze.

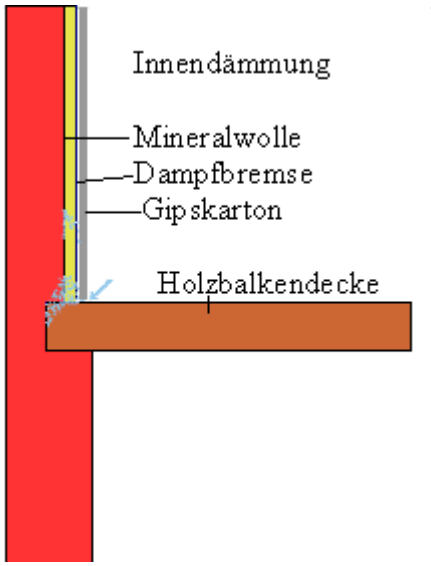
---

[309] Sorption = Fähigkeit der Baustoffe, Wasserdampf aufzunehmen und wieder abzugeben
[310] Willems, Wolfgang M.; Schild, Kai; Völkner, Stefan; Dämmstoffe im Bauwesen, S. 97 in Bauphysik Kalender 2007, Ernst & Sohn
[311] Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 283

Durch die angrenzenden Bauteile (Wände, Fußböden und Decken) kann die Innendämmung nicht durchgängig als Fläche ausgeführt werden. Die angrenzenden Wand- oder Deckenanschlüsse haben im Randbereich eine niedrigere Oberflächentemperatur, die unter Umständen lokal zur Schimmelpilzbildung führt.

In der vereinfachten Schnittansicht (Abb. 3.4.1) wird gezeigt, wie wichtig die fugendichte Ausführung der Anschlüsse der Dampfbremse bei der Verwendung diffusionsoffener mineralischer Dämmung ist. Bei diesem Schema kann die Feuchte über die nicht abgedichtete Fuge zwischen Dielung bzw. Fußbodenbelag und Dämmplatte in die Konstruktion gelangen. Die Innendämmung sollte 30 mm bei Altbauten mit Holzbalkendecken nicht überschreiten, da sonst an den Balkenköpfen Feuchteprobleme durch verstärkte Diffusionsvorgänge entstehen.[312] Gerade beim Dachausbau, beim Anschluss an die Fußpfette oder bei der Giebelwand, werden diese Dämmstoffstärken weit überschritten. Speziell mit dem Problem der Temperaturabsenkung im Wandquerschnitt befasst sich der Forschungsbericht „Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken“.[313]

Abb. 3.4.1: Vereinfachte Schnittansicht einer Innendämmung, wo Feuchtigkeit durch eine fehlerhafte Fugenanbindung am Fußboden in die Konstruktion gelangt.



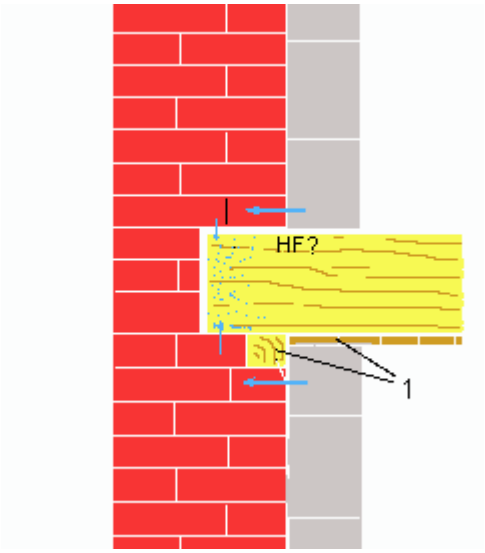
Eine nachträgliche Innendämmung, wie hier im praktischen Beispiel aus 10 cm Gasbeton, siehe Abb. 3.4.2, ist eine bessere Lösung als eine Mineraldämmung mit Dampfbremse. Allerdings lie-

---

[312] *Arndt, Horst; Wärmeschutz und Feuchteschutz in der Praxis, 2. Aufl. 2002, Verlag Bauwesen Berlin, S. 301*
[313] *Gnoth, Steffen; Hansel, Frank; Jurk, Kasten; Toepel, Torsten; Strangfeld, Peter; Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken , 2003, Fraunhofer IRB Verlag*

gen hierzu keine praktischen Langzeiterfahrungen vor. Das Problem könnte hier nur die große Maueröffnung für die Auflagefläche des Deckenbalkens sein. Wichtig ist hier, dass die Lagerhölzer ausgebaut werden müssen. In der Praxis hat sich der Austausch durch Ziegelstürze bewährt. Auch hier ist eine Luftumspülung der Balkenköpfe zu gewährleisten.

Bild: 3.4.2: Nachträgliche Innendämmung mit 10 cm Gasbetonsteinen,
1 = die Mauerlatte und die Dielung im Mauerwerk müssen vorher entfernt werden.



In den beiden nachfolgenden Abb. 3.4.3 und 3.4.4 wird eine mangelhaft ausgeführte Dampfbremse bei einer vorgesetzten Leichtbauwand mit Mineralwolle gezeigt. Hier endet die Folie an der Innenseite der Profile ohne eine fugendichte Anbindung am Tür- bzw. Fensterrahmen. In beiden Schadensfällen lagen erhebliche Holz zerstörende Schäden an den Balkenköpfen der Deckenbalken vor. Für die Schäden waren zwar vordergründig andere Ursachen verantwortlich, aber diese zusätzliche Feuchtebelastung hat die Schadensausbreitung begünstigt.

Bild 3.4.3 : Die Dampfbremse bei der Innendämmung hört am Ständerprofil auf. Eine fugendichte Anbindung an den Tür- bzw. Fensterrahmen erfolgte nicht.



3.4.4. Die Dampfbremse bei der Innendämmung hört am Ständerprofil auf. Eine fugendichte Anbindung an den Tür- bzw. Fensterrahmen erfolgte nicht.



Fensternischen stellen ein besonderes Problem dar, da hier der Wandquerschnitt geringer ist. Die Oberflächentemperatur ist gegenüber der übrigen Wandfläche geringer. Neben dem Ausmauern, was physikalisch die bessere Methode ist, werden aus Kostengründen auch Dämmplatten angeklebt oder Leichtbauvorsatzwände vorgestellt.

Im folgenden Beispiel, Abb. 3.4.5, wurde eine 1 cm starke Styroporplatte in eine Fensternische auf eine 43 cm dicken Außenwand aus Stampflehm fugendicht geklebt. Alle Anschlüsse und Fugen wurden sorgfältig mit Acryl verschlossen. Darüber wurde eine Tapete geklebt. Da es im Zimmer ab und zu muffig roch, wurde diese ca. 1 m² große Fläche geöffnet.

Abb. 3.4.5: In die Fensternische wurde eine 2 cm starke Styroporplatte fugendicht eingesetzt.



Die Tapete war vollständig frei von Schimmelpilzen aber zwischen der Dämmplatte und dem Wandputz hat sich eine starke Schimmelpilzschicht gebildet (Abb. 3.4.6.). Bei dieser Außenwand im Erdgeschoss liegt eine geringe Feuchte vor, die durch die Dämmplatte nicht mehr an die Innenraumluft abgegeben werden konnte. Ohne Dämmung liegt keine Schädigung vor.

Abb.3.4.6: Nach der Abnahme der Innendämmplatte zeigte sich dahinter der starke Schimmelbefall an der Putzoberfläche.



Nicht nur Deckenbalken, sondern auch Fachwerkwände sind durch Feuchtigkeit als Folge einer falschen Innendämmung gefährdet. Anforderungen des Denkmalschutzes lassen in vielen Fällen nur eine Innendämmung zu, da das Ausfachmaterial, wie Wärmedämmlehm auf Basis von Kork, Kieselgur, Ton und Stroh, aufgrund des geringen Wandquerschnitts die Anforderungen

der deutschen Energieeinsparverordnung nicht erfüllen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die energetische Ertüchtigung vorzunehmen. Der Einsatz von Wärmedämmlehm als innere Wärmedämmung von Fachwerkaußenwänden ohne Dampfsperre, ist bis zu einer dicke von 5 - 6 cm möglich. Das Einbringen erfolgt mithilfe einer Schalung, wo der Wärmedämmlehm eingestampft und verdichtet wird oder er wird wie ein Maschinenputz mit einer Putzmaschine einlagig aufgespritzt.[314] Eine weitere Gefachfüllung sowie für die innere Wandbegradigung und gleichzeitige Innendämmung wird Gasbeton verwendet.[315, 316] Die Gefache werden aber auch mit mineralischen Leichttonmörtel LTM 81 neu verfüllt.[317, 318] Ein großes Problem stellen die Fugen zwischen der Holzkonstruktion und dem Ausfachmaterial wegen der zu gewünschten Winddichtigkeit dar. Hier haben sich die aufgeschraubten oder genagelten mindestens 1,5 cm starke Dreikantleisten oder Trapezleisten von 2,0 x 2,5 cm am besten bewährt.[319]

„Der Zugewinn an Erkenntnissen liegt im Bereich der Gefahren durch sperrende Wandschichten – auch Luftschichten – aber auch in dem Faktum, daß ein größerer Teil der in die Wand eindringenden Feuchte kapillar wieder austreten muss und nur ein kleinerer Teil über den Weg des Dampfdrucks.“[320]

DORRMANN schätzt ein, dass zwischen der Ausmauerung und der Innendämmung vermehrt Wasser anfallen kann. Die innen liegende Dämmschicht hat keine Möglichkeit das Wasser aufzunehmen und wieder abzugeben. Es kommt zu einer Durchfeuchtung. Das Wasser kommt sowohl durch Schlagregen und durch Wasserdampf in diesen Zwischenraum. Auch eine Dampfbremse kann bei ordnungsgemäßer Ausführung keine Garantie abgeben. Eine Anbindung gerade im Bereich der Holzbalkendecke ist sehr kompliziert und eine korrekte Fugenanbindung ist kaum erfüllbar.

---

[314] Gänßmantel, Jürgen; Instandsetzen historischer Fachwerkhäuser mit Wärmedämmlehm, bauzeitung Sep./2001, S. 52f
[315] Homann, Martin; Instandsetzung von Außenwänden mit Porenbeton Teil 2, bauzeitung 52(1998)11, S. 52
[316] Hertyn, Johann W.; Wärmeschutz und Feuchteverhalten von Fachwerkwänden mit Innendämmungen - Versuch unter zeitgerafften Klimabedingungen , wksb 35/1995, S.17f
[317] Glock, Günter; Fachwerkrestaurierung und Fassadensanierung bauzeitung 51(1997)6, S. 44
[318] Bayosan Fachwerksanierung Fachwerk-Information für Spezialisten Firmenschrift 24/96
[319] Prof. Manfred Gerner, Vortrag 3, Fachwerkforschung in Theorie und Praxis, Neues und Bewährtes Hindelanger, Baufachkongreß 2000International
[320] Prof. Manfred Gerner, Vortrag 3, Fachwerkforschung in Theorie und Praxis, Neues und Bewährtes Hindelanger, Baufachkongreß 2000International

Besser als die Leichtbauvorsatzwände ist die Verwendung von Silikatplatte (Klimaplatte). Wobei auch hier eine Dampfwanderung möglich ist. Was zwischen der dicht anliegenden Platte und der Holzkonstruktion stattfindet, ist nicht vollständig geklärt. Als eine bessere Möglichkeit für eine nachträgliche Innendämmung hat sich die Holzwolleleichtbau-Platte bewährt. Nach der Einschätzung von DOORMANN hat sich der Dämmmörtel nicht bewährt.[321]

Der bauliche Holzschutz beruht darauf, dass das Holz ungehindert möglichst nach allen Seiten abtrocknen kann und sich keine „Feuchtenester“ bilden. Unter diesen Gesichtspunkten erfolgten die Bauweisen der Holzkonstruktion der historischen Gebäude.[322] Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Kontrollierbarkeit der Konstruktion. Das Holz kann bereits bei einer Holzfeuchte von circa 10 % durch Holz zerstörende Insekten geschädigt werden. Ist die tragende Holzkonstruktion verdeckt, so kann sie nicht kontrolliert werden. Kleine Schäden werden nicht erkannt. Tritt dann noch eine Staunässe auf, die nicht erkannt wird, so können sehr schnell größere Schäden durch Holz zerstörende Pilze auftreten. ZIMMERMANN beschreibt einen Feuchteschaden, der durch eine nachträgliche Innenverkleidung entstand. Zwischen Gefache und Holzbalken bildete sich eine 2 mm breite Fuge und über diese wetterbeanspruchte Fassade konnte Feuchte eindringen. Die innen angebrachten Gipskartonverbundplatten behinderten einen Feuchteausgleich nach innen. Die Holzkonstruktion wurde in der betreffenden Giebelfassade innerhalb von 4 Jahren nach der Sanierung sehr stark durch den Braunen Kellerschwamm (Coniophora puteana) geschädigt.[323]

1994 wurde noch unter den alten Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 95 folgende Einschätzung getroffen. "*Moderne Ausfachungsmaterialien, wie zum Beispiel Leichtbeton und Dämmputz oder eine Kombination aus Mauersteinen und Dämmstoff, können die hier begründeten wärme- und feuchtetechnischen Anforderungen an eine sanierte Fachwerkaußenwand ohne Innendämmung erfüllt werden.*"[324] Bei einer Versuchsdurchführung zum Feuchteverhalten von Fachwerkwänden mit Innendämmungen wurde Folgendes zusammengefasst. "*Bei einer Innendämmung kann eine Außenwand durch Tauwasserbildung im Wandquerschnitt gefährdet*

---

[321] Doormann; J.; Fachwerksanierung im Innstadtbereich am Beispiel der Hamelner Altstadt, Vortrag 3. Quedlinburger Holzbautagung vom 12.4.1996, S. 10
[322] Clausnitzer, Klaus Dieter; Historischer Holzschutz im Hochbau, Diss. 1989 Hannover, Deutsche Bücherei Leipzig, DI 1989 A 12023
[323] Zimmermann, Günter; Schäden an freigelegten Holzfachwerkfassaden, Arconis 1/96 S. 6f
[324] Künzel, H.M.; Feuchtetechnische Anforderungen an Wärmeschutzmaßnahmen bei Fachwerkaußenwänden, SD aus Forum Bauwerks Erhaltung e.V. FBE anlässlich des 2. Intern. Kongress zur Bauwerkserhaltung während der BAUTEC Berlin, 9.-11.2.1994, S. 211

werden. Neben Feuchteänderungen durch Sorption infolge Wasserdampfdiffusion können bei einer Anforderung von Innendämmungen Feuchteänderungen durch Tauwasserbildung mit anschließender kapillarer Auffeuchtung entstehen." Die höchsten Feuchteänderungen wurden bei der Verwendung von Leichtlehm festgestellt. Hier wurden auch auffällige Feuchteänderungen in Hölzern gemessen. In einigen Holzzonen lag eine Feuchte im Bereich der Fasersättigung vor.[325] Damit sind längerfristig Schäden an der Holzkonstruktion durch Holz zerstörend Insekten und Pilze zu erwarten. Zu beachten ist, dass der Echte Hausschwamm ab einer bestimmten Größe auch noch bei Holzfeuchten von circa 12 % wächst.[326] Historisch dienten breite Dachüberstände an Ortgängen und Traufen, Fachwerkgiebelwände mit stockwerkweisen Rücksprüngen als Schutz vor Regenbelastungen. Lagen besonders hohe Schlagregenbeanspruchungen vor, so waren diese Außenwände immer durch eine Bekleidung aus Holzschindeln oder Schieferplatten geschützt. Bereits beim Auftreten auch von kleinsten Schäden sind sofort entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten, sonst können schnell schwere Folgeschäden entstehen.[327] In dem nachfolgenden Beispiel aus Dänemark wird eine geeignete konstruktive Ausführung gezeigt (Abb. 3.4.7), wo der Feuchteeintrag von außen auf ein Minimum reduziert wird.

Abb. 3.4.7: Nykobing in Dänemark. Bei diesem Fachwerkgebäude liegt ein guter Regenschutz durch den Dachüberhang vor. Oberflächenwasser wird durch das Gefälle des Pflasters vom Haus in die Rinne weggeführt. (Bild von Dr. G. Preuße)



[325] Hertyn, Johann W.; Wärmeschutz und Feuchteverhalten von Fachwerkwänden mit Innendämmungen - Versuch unter zeitgerafften Klimabedingungen , wksb 35/1995 S.17f
[326] Rauch, Peter; Zerstörerisches Geflecht - Der Echte Hausschwamm - Serpula lacrimans (Wulf.: Fr.) Schroet. deutsche bauzeitung 7/04, S. 67 ff.
[327] Ansorge, Dieter; Schäden an Fachwerkfassaden, arconis 2/01, S. 22f

Die Energieeinsparverordnung fordert einen sehr niedrigen U-Wert, der auch mit einem gut wärmedämmenden Baustoff für die Ausfachung nur ungenügend erreicht werden kann. Auf feuchtebelastete Fachwerkaußenwände ist aus den oben genannten Untersuchungen und Erfahrungen auf eine Innendämmung zu verzichten. Die Sanierung der möglichen Schäden infolge von Tauwasserschäden im Wandquerschnitt an historischen Holzkonstruktionen ist sehr kostenaufwendig und steht in keinem wirtschaftlichen Verhältnis zur möglichen Energieeinsparung, die durch eine ungeeignete Innendämmung verursacht werden kann.

Bei einer fehlerhaften Innendämmung werden nicht nur Holzwerkstoffe gefährdet. Es können sich im Schichtaufbau massiv Schimmelpilze als Folge einer Tauwasserbildung bilden. Diese Feuchte bleibt gerade Hohlräume für lange Zeit unbemerkt und gefährden damit die Gesundheit der Bewohner.

Bei Trockenbauwänden kann bei den Gipskartonbauplatten auf der Rückseite das Papier feucht werden, was zur Schimmelpilzbildung führt. Dieser Feuchteschaden ist visuell nicht erkennbar und ist unter Umständen die Ursache für eine höhere Sporenbelastung im Raum. Eine Infrarotaufnahme von einer Leichtbauwand zum Balkon im Dachgeschoss (Abb. 3.4.8) zeigt verschiedene Oberflächentemperaturen. In diesem Fall kann eine Fuge in der Dämmung oder eine Durchfeuchtung der Dämmung vorliegen. Auf dieser Grundlage können mögliche Ausführungsfehler lokalisiert werden. Der genaue Sachverhalt kann allerdings erst durch das Öffnen der betreffenden Bauteile geklärt werden.

Abb. 3.4.8: Infrarotaufnahme einer mangelhaften Innendämmung (Dachschräge) deutlich sind die verschiedenen Oberflächentemperaturen erkennbar, was auf eine Konvektion und Durchfeuchtung hindeutet.

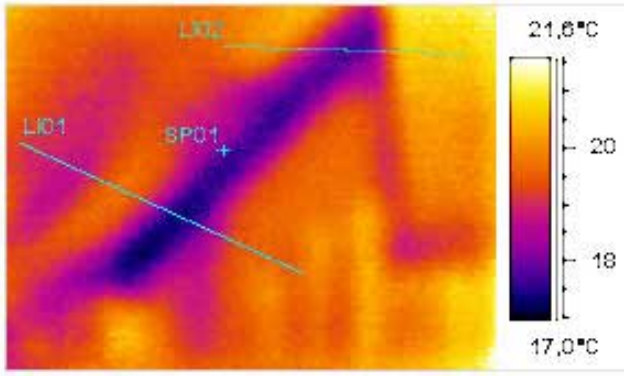


Abb. 3.4.9: Schädigung der Dampfbremse durch den Steckdoseneinsatz



Neben einer undichten Fugenanbindung verursachen auch nachträglich zerstörte Dampfbremsen eine Durchfeuchtung der mineralischen Innendämmung. Beim Beispiel in der Abb. 3.4.9 wurde nachträglich durch den Elektriker die Dampfbremse beim Einsetzen des Doseneinsatzes für die Steckdose zerstört. Wird stattdessen das Elektrokabel zwischen der Gipskartonbauplatte und Dampfbremse verlegt, so wird die Dampfbremse nicht beschädigt.

In der nachfolgenden Abb. 3.4.10 wurde in diesem Zimmer im Erdgeschoss eine Sockelverkleidung aus Holz mit Mineralwolle gebaut. Nach dem Rückbau ist eine vollständig verschimmelte Putzoberfläche erkennbar. Im gesamten Raum und auch in der Wohnung lag eine sehr hohe Schimmelbelastung vor.

Bild 3.4.10: Schimmelbildung hinter einer Holzverkleidung an einer Außenwandecke



Wegen ihrer schnellen und einfachen Verarbeitung werden Gipsbaustoffe und Gipskartonbauplatten auch an ungeeignete feuchte Wände im Erdgeschoss oder im Keller angebracht. In der folgenden Abb. 3.4.11 wird der Trockenputz (Gipskartonbauplatte) an einer feuchten Außen-

wand im Kellergeschoss gezeigt. Die Papierschicht auf der Oberseite ist vollständig durchfeuchtet und verschimmelt. Der Raum wurde früher als Pferdestall verwendet, sodass hier zusätzlich auch eine hohe Salzbelastung vorliegt.

Abb. 3.4.11: Verschimmelte Gipsplatten in einem Keller, der für Wohnzwecke ausgebaut wurde.



Obwohl eine hohe Durchfeuchtung des Mauerwerkes erkennbar ist, findet der Trockenputz verbreitet bei der Altbausanierung Anwendung. In vielen Fällen ist eine Schimmelpilzbildung optisch nicht erkennbar, dafür findet diese in dem Hohlraum zwischen Gipskartonplatte und Mauerwerk statt. Hier helfen auch keine imprägnierten Feuchtraumplatten und Lüftungslöcher, wie es in der Abb. 3.4.12 in einer kleinen Abstellkammer im Erdgeschoss (ehemals AWC's) erkennbar ist. Sowohl die Wandoberfläche als auch die abgestellten Gegenstände waren mit Schimmelpilzen überzogen.

Abb. 3.4.12: In dieser kleinen Abstellkammer (ehemals Außentoilette) im Erdgeschoss wurden imprägnierte Gipsplatten mit Lüftungslöscher an die feuchte Wand geklebt. Deutlich ist der Feuchteeintrag über die Ziegelsteinwand und die Schimmelpilzbildung erkennbar.



Im letzten Beispiel (Abb. 3.4.13) wird ein Kellerraum als Freizeitraum genutzt. An die Wände wurde eine Holzverkleidung angebracht. An der Außenwand konnte in diesem Hohlraum ungestört der Kellerschwamm (*Coniophora puteana* (Schum.: Fr.) Karst.) wachsen. Es handelt sich hierbei um einen Holz zerstörenden Pilz, der eine hohe Feuchte benötigt. Auch in diesem Fall darf an die Kelleraußenwand keine Verkleidung angebracht werden, da die hinter der Verkleidung befindliche Feuchte aus dem Mauerwerk nicht ausreichend an die Raumluft abgegeben wird. Ebenso liegt ein Temperaturgefälle an der Oberfläche vor, da Holz einen anderen Wärmeeindringkoeffizienten, als der Putzmörtel hat. Hinter dieser Verkleidung kann sich so zusätzlich auch Kondenswasser bilden.

Bei feuchtegefährdeten Wänden im Gründungsbereich, wo neben dem Tauwasser auch noch aufsteigende Feuchte vorliegen kann, darf nur ein mineralischer Putz (zum Beispiel hydraulischer Kalkputz) zum Einsatz kommen. Sperrende Schichten führen zum Feuchtestau und zur Verlagerung der Verdunstungsflächen. Bei dauerhafter hoher Feuchte können alle organischen Bestandteile durch Pilze oder Mikroorganismen befallen werden.

Abb. 3.4.13.: Hinter der Holzverkleidung der Außenwand im Keller konnte sich Feuchtigkeit bilden und so das Wachstum des Braunen Kellerschwamms begünstigen.



4. Trocknung von feuchten Bauteilen

4.1. Probleme beim feuchten Mauerwerk

Lange anhaltende Feuchtigkeit im Kellergeschoss sowie im Erdgeschoss bieten günstige Wachstumsbedingungen oder sind Ausgangspunkt eines Befalls durch Mikroorganismen oder Holz zerstörende Pilze und Insekten, wie z. B. den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans),* den Kellerschwamm ***(Coniophora puteana)*** oder den Bunten Nagekäfer (*Anobium punctatum)*. Es werden aber auch günstige Lebensbedingungen für die Besiedlung durch die Schwarze Rossameise *Camponotus herculeanus* L.[328] oder Silberfischchen *(Lepisma saccharina*) geboten. Ameisen können durch Risse in die Gebäude eindringen und sich in Holzbauteilen, Deckenschüttung und Styroporplatten aufhalten. Bevorzugt wird das Erdgeschoss aber auch feuchte Deckenbalken. Silberfischen kommen unter alter Tapete an alten feuchten und losen Kalkputz sowie in feuchten Räumen, wo alte Papierwaren, Mehl, Zucker oder andere Kohlenhydrate gelagert werden, vor.[329] Bei sehr feuchten Mauerwerksoberflächen wachen auch Moose. Stellvertretend für viele ähnliche Schäden am Kellermauerwerk steht das Beispiel in der Abb. 4.1.1. Durch Feuchteeintrag von außen konnte sich dieses Myzel vom Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans)* großflächig ausbreiten. Bereits nach 6 Monaten waren dann zwei Kellerräume be-

---

[328] *Langendorf, Günter; Holzschutzhandbuch für Fachleute 1988, S. 110*

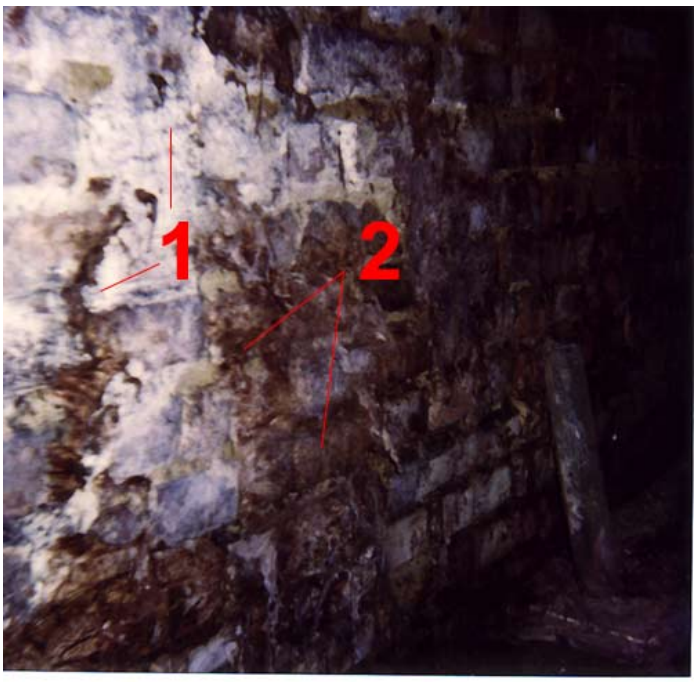
[329] *Günter, Kurt u. a.; Urania Tierreich, Insekten, Aufl. 2./3., 1974, Urania-Verlag Leipzig-Jena-Berlin, S.33-36, 342*

fallen. Das bedeutete einen umfangreichen Sanierungsaufwand des Mauerwerkes entsprechend den Forderungen der DIN 68800, Teil 4. Die Menge des Eintrages an Schwammbekämpfungsmittel hätte bei rechtzeitiger Handlung wesentlich reduziert bzw. vermieden werden können.

Abb. 4.1.1: Myzelbewuchs durch den Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans)*,

1 = frisches Myzel

2 = älteres Myzel mit Hemmungsflecken



Die wichtigste Maßnahme für eine dauerhafte Vermeidung von biologischen Schäden in Gebäude ist die Beseitigung bzw. Reduzierung der Feuchtigkeit in der Konstruktion und in der Raumluft. Hierzu gehören die Unterbrechung der äußeren Feuchtigkeitszufuhr und die Klimatisierung der Räume. Mehrheitlich wurden bei den Gebäuden um 1900 lediglich horizontale Sperrschichten in das Mauerwerk eingelegt. Natursteinwände im Kellergeschoss verfügen über keine Sperrschichten, vereinzelt befinden sich diese in der ersten Lage der beginnenden Ziegelsteinschicht direkt unter der Kappe. Vertikaldichtungen am Außenmauerwerk wurden in der Regel nicht angelegt.

Für die Anforderungen der Bauwerksabdichtung beim Neubau gilt die DIN 18195. Diese sind jedoch für eine nachträgliche Bauwerksabdichtung beim Altbau nicht anwendbar. Hier bietet

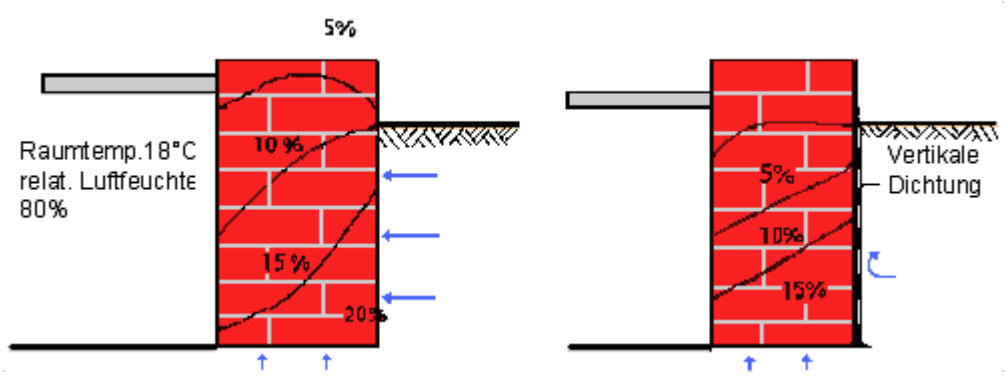
das WAT-Merkblatt „Nachträgliche Abdichtung erdberührter Bauteile“ 4-6-05-D konkrete Hilfestellungen zur Schadensfindung und verschiedene Abdichtungskonzepte.

Zur Unterbrechung des bisherigen ungehinderten Transportes von Wasser bzw. elektrolytischen Lösung ist der Einbau von horizontalen und vertikalen Dichtungsschichten im Bereich des Gründungsmauerwerks erforderlich. Oft erfolgen diese Abdichtungen mit anderen flankierenden Maßnahmen. Dabei kommt der vertikalen Dichtungsschicht einer größeren Bedeutung als der horizontalen zu, da die senkrechte Berührungsfläche zwischen Mauerwerk und Erdreich sehr viel größer ist, als die horizontale Kontaktfläche. Eine sorgfältige Vertikalabdichtung eventuell in Verbindung mit einer neuen Drainage und einer guten Abtrocknung im optimal belüfteten Keller reichen oft schon aus, wenn keine erhöhten Ansprüche gestellt werden. In der Abb. 4.1.2 wird die Veränderung des Feuchteverlaufes mit und ohne Vertikalabdichtung im Gründungsmauerwerk schematisch dargestellt. Allerdings muss bei einer wirkungsvollen Trockenlegung die Komplexität der verschiedenen Feuchttransportphänomene berücksichtigen werden, hierzu gehören die Kapillarität, Druckwasser, Elektrokinetik, Diffusion, Hygrothermik, Verdunstung, Osmose und Gravitation. Zu beachten ist auch, dass der gegenseitige Wirkungsmechanismus der Feuchte- und Salztransportvorgänge noch zu wenig und unsystematisch analysiert ist.[330] Zwar helfen theoretische und im Labor gewonnene Erkenntnisse die Zusammenhänge besser zu verstehen, aber in der Praxis treten vielfältige Varianten auf. Ein nachträgliches Trockenlegungsverfahren, welches sichtbar bei einem Gebäude gut funktioniert, kann bereits beim Nachbargebäude vollständig versagen. Einen hohen Erfolg versprechen die konventionellen Verfahren zur horizontalen und vertikalen Unterbrechung des Wassertransportes. Diese sind aber aus verschiedenen Gründen nicht immer überall anwendbar, Gefügestruktur des Gründungsmauerwerkers oder Schachtmöglichkeiten.

---

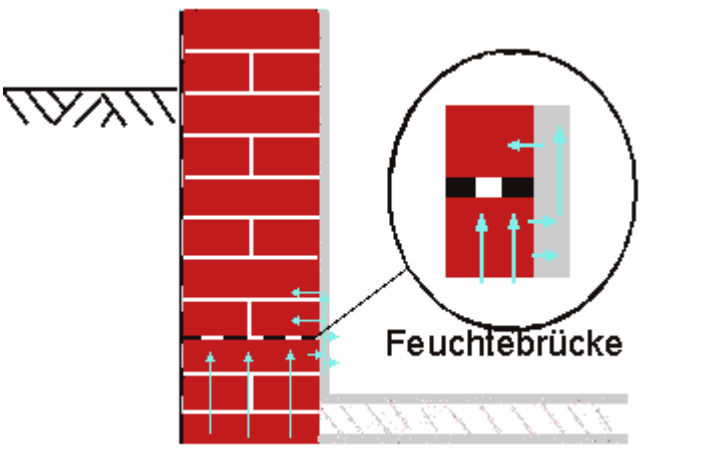
[330] *Venzmer, H.; Ein Überblick zu den Problemen der Entfeuchtung und Entsalzung von Bauwerken und Bauwerksteilen unter besonderer Berücksichtigung elektroosmotischer Verfahren S. 10 ff in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar*

Abb. 4.1.2: Die Veränderung des Feuchtigkeitsverlaufes im Kellermauerwerk bei einer nachträglich angebrachten Vertikaldichtung (rechts).



Bei älteren Gebäuden befindet sich in der 2. oder 3. Steinlage über den Fußboden die Horizontalabdichtung. Analog wird auch eine nachträglich eingebrachte horizontale Dichtung (Injektage oder Sperrschicht) in dieser Höhe angelegt. Aufsteigende Feuchtigkeit durchfeuchtet den unteren Mauerabschnitt bis zur Sperre. Befindet sich auf der Innenseite ein normaler hydraulischer Kalkputz, so kann die Feuchtigkeit mithilfe der Putzschicht über die Sperrschicht nach oben in das Mauerwerk gelangen. Es entsteht somit eine Feuchtebrücke über die Putzschicht (Abb. 4.1.3). Es erweckt den Anschein, dass die horizontale Sperrschicht nicht funktioniert.

Abb. 4.1.3: Feuchtigkeitsbrücke durch den Innenputz



Als Lösung wird hier vorgeschlagen, den alten Putz bis über die Horizontalsperre abzuschlagen. Auf das freigelegte Mauerwerk wird eine mineralische Dichtschlämme, die kunststoffvergütet ist, aufgetragen. Als Putz wird ein kunststoffvergüteter Zementputz der Wasser abweisend (hydrophob) eingestellt ist verwendet. Dieser Putz leitet das Wasser nicht mehr kapillar nach oben. Als Anstrich sollte wegen des guten Austrocknungsverhaltens Silikatfarbe verwendet werden. Da sich an diesen unteren Wandabschnitt sehr leicht Kondenswasser niederschlägt, ist für eine gute Lüftung bei gleichzeitiger Temperierung zu sorgen.

Zur Vermeidung einer solchen Feuchtebrücke auf dem Außenputz wird zum Beispiel in Prag der Außenputz nicht bis zur Höhe der Fahrbahn bzw. Gehweg ausgeführt, sondern unten eine etwa 2 cm breite Fuge angelegt (Abb. 4.1.4 und 4.1.5).

Abb. 4.1.4: Prag, Hradčany, neben Prazsky brad, Putzfuge zur Vermeidung des Feuchtetransportes



Abb. 4.1.5: Prag, Snėmovni, Putzfuge zur Vermeidung des Feuchtetransportes



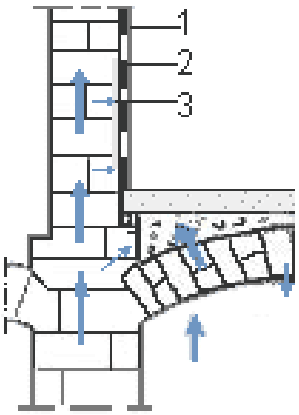
4.2. Vertikale Verfahren zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes

Wenn bei alten Gebäuden sowohl die senkrechten als auch die waagerechten Abdichtungsschichten fehlen bzw. schadhaft sind, ist zunächst der Einbau der senkrechten (vertikalen) Dichtungsschicht auf der Außenseite der Wand zu bevorzugen, wobei hier auch unterschiedliche Erfahrungen vorliegen. Das Verfahren kann nicht bedenkenlos überall angewendet werden. Es ist zu bedenken, dass bei einer äußeren Sperrschicht die über viele Jahre eingedrungene Feuchtigkeit einschließlich der Salze dann nur noch nach innen entweichen kann. Diese Feuchte muss durch eine optimierte Lüftung abgeführt werden.

Innen angebrachte Dichtungen sind billiger aber völlig wertlos, im Gegenteil sie führen langfristig zur Zerstörung des Gebäudes, da die Feuchtigkeit im Mauerwerk verbleibt und die Verdunstungsfläche nach oben verschoben wird. In einigen untersuchten Wohnungen im Erdgeschoss, wo auf der Innenseite unter dem Putz zum Schutz vor Feuchtigkeit eine bituminöse Sperrschicht angebracht wurde, wuchs Myzel vom Echten Hausschwamm (*Serpula lacrimans)*.

Die Feuchtigkeit im Mauerwerk konnte nicht an die Raumluft abgegeben werden und es kam so zu einem Feuchtestau zwischen Ziegelsteinen und der bituminösen Sperrschicht (Abb. 4.2.1).

Abb. 4.2.1: Zum Schutz vor aufsteigende Feuchtigkeit wurde auf der Innenseite im Erdgeschoss eine bituminöse Sperrschicht (2) unter den Innenputz (1) angelegt. Zwischen Ziegelstein und Sperrschicht konnte sich der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrimans*) (3) ausbreiten.



Vor der Auswahl des Verfahrens muss geklärt werden, ob es sich um Erdfeuchte, nicht drückendes oder drückendes Wasser handelt.

Ebenso ist zu prüfen, ob nicht die Feuchtebelastung durch Kondenswasser oder durch hygroskopische Salze verursacht wird. Es ist zu beachten, dass eine Wechselbeziehung zwischen abnehmender Feuchte und zunehmendem Salzgehalt besteht. Die oberflächennahe Salzverteilung beeinflusst naturgemäß den Feuchtigkeitshaushalt des Mauerwerkes, weil sich die hygroskopische Feuchtigkeit bzw. Sorptionsisotherme ebenso verändert wie auch das Verdunstungsverhalten. In der Abb. 4.2.2 werden zwei Schadensfälle gezeigt, wo sowohl eine Salzbelastung, ein Feuchtetransport von außen und eine Kondenswasserbildung vorliegen. Die Komplexität von Feuchte- und Salztransport ist bisher noch nicht vollständig geklärt. Damit lässt sich auch erklären, dass ein Teil der Verfahren zur Unterbrechung des bislang ungehinderten Transportes von Wasser oder von elektrolytischen Lösungen in der Vergangenheit nicht ihre vorgegebene Zielsetzung erfüllen.

Abb. 4.2.2: Salzbelastetes Mauerwerk im Erdgeschoss (Bild oben) und im Keller (Bild unten) mit starker Schimmelpilzbildung



Zum Beispiel bei alten Natursteinwänden in Burgen, alte Gebäude usw. kann man nicht bedenkenlos die Verfahren, Dichtungsschlämme, Bitumenbeschichtung, Sperrputz oder Sperrbahnen übernehmen. Da hilft in vielen Fällen eine sinnvolle Oberflächenerwärmung, um die Oberflächenfeuchte zu reduzieren. Dazu ist eine gezielte Lüftung für die Abführung der höheren Luftfeuchtigkeit erforderlich. Große Gebäude mit Gewölbe waren nie vollständig dicht. So konnte z. B. die feuchte warme Luft auch über die Öffnungen für die Ketten der Kerzenleuchter entweichen..

Unabhängig von den Forderungen der EnEV ist bei einer Nutzung des Kellers als Wohnraum außen eine geeignete Dämmung anzubringen (Abb. 4.2.3), um gerade im Sommer eine mögliche Tauwasserbildung an der kühleren Wandoberfläche zu reduzieren.

Die innen liegenden Wandoberflächen unterhalb der Geländehöhe haben gerade im Sommer je nach Mauerwerk eine relativ niedrige Temperatur. Da die angrenzenden tieferen Bodenschichten eine niedrigere Temperatur als die Außenluft haben. Die Temperaturdifferenz an der Innenwandoberfläche von Fußbodenhöhe bis zur Wandmitte können einige Grad betragen. Im Som-

mer, wo eine höhere relative Luftfeuchte vorliegt, kann diese Situation das Schimmelpilzwachstum im unteren Wandabschnitt begünstigen. Zum Beispiel im Sommer beträgt die Lufttemperatur im Raum 22 ºC. Diese hat eine relative Luftfeuchte von 65 bis 70 %. Dies ergibt an den unteren Wandabschnitt mit einer Temperatur von 18 ºC eine relative Luftfeuchte von circa 80 %. Bei dieser Feuchtigkeit kommt es bereits zur Schimmelbildung.

Abb. 4.2.3: Aufbau einer Horizontalabdichtung mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtung [331]



Dieses Problem (Abb. 4.2.4) trat zum Beispiel bei einer älteren Villa in Jena auf, wo ein Teil des Kellers als Wohnraum ausgebaut wurde. Durch die hohe Schimmelbelastung in allen Wohnräumen waren auch Teile der Möbel und Textilien befallen. Eine ausreichende Lüftung konnte das Problem nicht beseitigen. Um das Gebäude stehen große Laubbäume, sodass durch das Mikroklima eine höhere Luftfeuchte im Außenbereich vorliegt. Das nachträgliche Anbringen einer Außendämmung löst in diesem Fall das Problem nicht vollständig. Gleichzeitig ist eine Temperierung des unteren Wandabschnittes auch im Sommer, zum Beispiel mit einer in der Fußleiste integrierten Heizleitung erforderlich. Wichtig ist hierbei, dass die Oberflächentemperatur des Außenmauerwerkes unterhalb der Geländeoberfläche nicht wesentlich unter der Temperatur der Raumluft liegt.

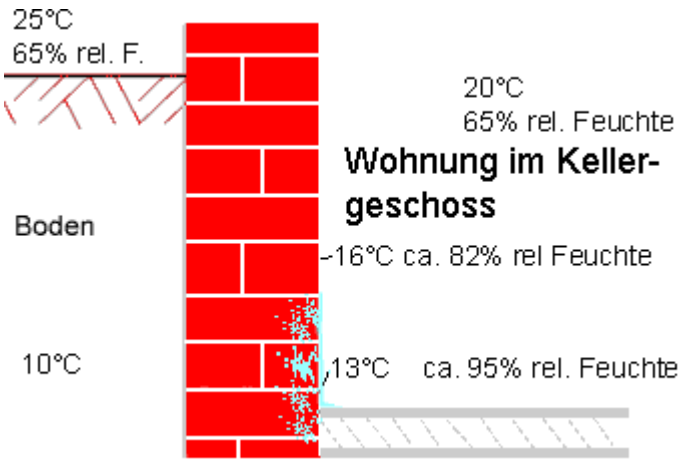
Der genannte Sachverhalt ist auch eine Ursache, warum das Kellermauerwerk aber auch Eingangsbereiche zum Keller gerade während der warmen Jahreszeit im Sommer feucht sind. Wird dieser physikalische Sachverhalt nicht beachtet, so kommt es über viele Jahre zur Durchfeuch-

---

[331] Firmenschrift von PCI für Bau-Profis PCI Augsburg GmbH, Piccardstraße 11, 86159 Augsburg, 1410/0698/30 Ho S.5 u. 1310/0298/30 Ho S. 6

tung des Mauerwerkes und es wird fälschlich ausschließlich eine aufsteigende Feuchtigkeit vermutet.

Abb. 4.2.4: Schematische Darstellung einer Kondenswasserbildung in einer Kellerwohnung in Jena mit der Folge einer Schimmelpilzbildung.



4.3. Übersicht zu horizontalen Verfahren zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes

4.3.1. Übersicht zu mechanischen Verfahren

Die mechanischen Verfahren benötigt zum Einschlagen der Bleche eine durchgehende Lagerfuge. Es treten Erschütterungen auf, die besonders bei älteren Gebäuden zu Rissen führen können.

Ist das über der Abdichtungsebene befindliche Mauerwerk auch versalzen, so wirkt weiterhin eine verstärkte hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme und damit können nicht die erwünschten Erfolge erzielt werden. Unter erhöhten Salzbelastungen sind diese Verfahren nicht mehr zu empfehlen, auch wenn mit dem Verfahren eine vollflächige Abdichtung in horizontaler Ebene erreicht wird, daher sind vor der Anwendung Entsalzungsverfahren zum Einsatz zu bringen.[332]

4.3.1.1. Abschnittsweises Aufstemmen per Hand

Insbesondere bei Schalenmauerwerk ist das Verfahren nicht geeignet. Eine Rissbildung als Fol-

---

[332] *Venzmer, H.; Ein Überblick zu den Problemen der Entfeuchtung und Entsalzung von Bauwerken und Bauwerksteilen unter besonderer Berücksichtigung elektroosmotischer Verfahren S. 10 ff in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar*

ge einer Setzung ist nicht auszuschließen. Die Schlitzabschnitte (ca. 50 bis 100 cm) sind durch Stemmen ca. 20 bis 30 cm hoch herzustellen. Die Bitumenbahn wird ca. 10 cm breiter als der Wandquerschnitt mit einer Überlappung von > 10 cm eingelegt, durch Sperrmörtel ausgeglichen und anschließend wieder vermauert. Diese Methode erfolgt abschnittsweise.

Kosten: ca. 485 bis 535 Euro/m^2

Lebensdauer: 40-50 Jahre

4.3.1.2. Abschnittsweises Aufsägen

Eignung und Rissbildung wie bei 4.3.1.1. Der Gewölbeschub ist zu beachten. Es wird ein Schlitz mit 1 bis 2 cm durch den gesamten Wandquerschnitt gesägt. Nach der Säuberung der Schlitze wird eine Dichtungsbahn (Kunststoff, bitumenkaschierte Aluminiumfolie oder korrosionsbeständiger Edelstahl), siehe Abb. 4.3.1, in ausreichender Breite und Länge eingelegt. Der verbleibende Hohlraum wird mit Zementmörtel ausgefüllt. Dies kann mit Zementsuspension unter Quellmittelzugabe, mit Vergussmörtel oder geeigneten Harzen erfolgen. Bei Zementsuspensionen muss das verwendete Dichtungsmaterial alkalibeständig sein.

Kosten: ca. 295 bis 385 Euro/m^2

Lebensdauer: 40-50 Jahre

Abb. 4.3.1: Der Wandquerschnitt des Kellers wird aufgeschnitten und eine Dichtungsbahn aus Kunststoff eingelegt.



4.3.1.3. Mauertrennung durch schrägen Trennschnitt, maschinell

Bei Schalenmauerwerk ist das Verfahren nicht geeignet. (Rissbildung wie bei 4.3.1.1.) Die Mauertrennung kann hier in der Länge der Wand ohne Unterbrechung erfolgen. Die andere Hälfte der Wand bleibt statisch wirksam. Der Schlitz wird mit Sperrmörtel vergossen. Dies kann mit Zementsuspension unter Quellmittelzugabe, mit Vergussmörtel oder geeigneten Harzen erfolgen. Nach der Aushärtung wird die andere Wandseite, kreuzend mit der Ersten aufgetrennt. Ist diese vergossen, so ist eine durchgehende Abdichtung gegenüber aufsteigende Mauerfeuchtigkeit erreicht.

4.3.1.4. Das maschinelle Einschlagen von Edelstahlblech

Diese Methode ist nur bei horizontalen und durchgehenden Mauerwerksfugen sowie mäßiger Wanddicke geeignet. Die gewellten Edelstahlbleche werden seitlich überlappend in das Mauerwerk eingeschlagen. Sind die Fugen nicht gleichmäßig horizontal, so kann sich das Blech verkannten. Die Gefahr der Rissbildung durch starke Erschütterungen beim Einrammen der Bleche ist möglich. Handelt es sich um ein chlorhaltiges Mauerwerk (Mauersalze), so sind nicht Chromstahl WG (Werkstoffgruppe) 4016 oder Chromnickelstahl WG 4301, sondern Chromnickelmolybdänstähle WG 4401 einzusetzen.[333]

Kosten: 325 bis 400 Euro/m²
Lebensdauer: 20 bis 50 Jahre abhängig vom Versalzungsgrad

4.3.1.5. Die Unterfangungsverfahren

Rasterweise werden die Fundamente eines Bauwerkes freigelegt und mit wasserundurchlässigem Beton hinterpresst. Danach wird die Vertikalabdichtung neu hergestellt. Dies führt in der Regel zur vollständigen Trockenlegung des Objektes. Dabei müssen die Folgen der Salzkristallisation bedacht werden, siehe Punkt 5.

Bei nachträglichen Anbauten, wie ein Windfang vor der Haustür, kleine Wintergärten, Schup-

[333] *Arendt, Claus; Trockenlegung, 1983, Deutsch. Verlags-Anstalt, S. 85*

pen aber auch bei Garagen wurde vielfach die Horizontaldichtung im Mauerwerk vergessen oder unterhalb des Spritzwasserbereichs ausgeführt. Die Folge ist, dass bei den unteren Steinlagen der Putz abfällt und auch eine Salzausblühung vorliegt, siehe Abb. 4.3.2. Vielfach wurde die Dachpappe in Höhe von ca. 30 cm in die Fuge eingelegt (oberhalb des Spritzbereichs) aber vergessen, dass die unteren Steine auch nass werden und dann die unschönen Feuchtestreifen über dem Fußboden entstehen. Beim Neubau muss ein entsprechender Aufbau eingehalten werden.

Abb. 4.3.2: Durch die zu niedrige Anordnung der horizontalen Dichtung kommt es auch zur Durchfeuchtung des darüber befindlichen Mauerwerkes durch Spritzwasser.



4.3.2. Querschnittsabdichtung durch drucklose und druckbehaftete Injektionsverfahren

Das kostengünstige chemische Verfahren ist nicht geeignet bei Mauerwerk mit größeren Hohlräumen, Schalenmauerwerk, Mauerwerk aus dichtem Naturstein.

Das Verfahren hat zum Ziel, entweder den kapillaren Durchmesser zu vermindern oder die Oberflächenspannung in den Kapillaren drastisch zu erhöhen, das heißt, einen Wasser abweisenden Effekt zu erzielen. Das Wirkprinzip beruht auf:

- Kapillar verstopfend,
- Kapillar verengend,
- hydrophobierend oder
- Kapillar verengend und hydrophobierend.[334]

[334] *Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188*

In den Injektionsmitteln befinden sich die Wirkstoffe Acrylate, Epoxidharze, Paraffine, Polyurethanharze, Silane, Silikate, Silikomikroemulsionen oder Siloxane.

Die Anwendungsgrenze liegt bei einer Durchfeuchtung von maximal 60 %, da bei einem Durchfeuchtungsgrad >50 % das Eindringen des Injektionsmittels in die Kapillaren immer unvollständiger wird. Ist das Mauerwerk sehr feucht, so muss es vor dem Anlegen der Injektage getrocknet werden. Silicomikroemulsionskonzentrate haben auch bei hoher Durchfeuchtung eine gute Verteilung im Mauerwerk.[335]

Da bei den meisten Injektionsmitteln die Wirkungsweise auf dem Hydrophobieprinzip beruht, ist es erforderlich, dass im Mauerwerk diese Hydrophobie aufgebaut werden kann. Je höher der Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerkes ist, umso schwerer erfolgt der Aufbau der Sperrschichten. Es sind Mehrstufeninjektionen erforderlich. Bei extrem hohen Luftfeuchtigkeiten über 90 % wird die Trocknung des Stoffes sehr stark erschwert, wenn nicht sogar unmöglich gemacht. Der Wirkungsmechanismus der Hydrophobie kann nicht aufgebaut werden. Das erfolgt nur bei einer niedrigeren Luftfeuchtigkeit bis circa 60 %. Dies wird erreicht, wenn vor der Anwendung des Injektageverfahrens ein Kondensattrockner aufgestellt wird.

Die Bohrlöcher werden möglichst in 2 Reihen gegeneinander versetzt in einem Abstand von ca. 15 cm unter 25 - 30° in die Wand getrieben. Bei einer Reihe erfolgt die Bohrung in einem Abstand von 8 bis 12 cm mit einem Bohrlochdurchmesser ca. 2,5 cm sowie einer Tiefe von (Wandstärke minus 5 cm) betragen. Wichtig ist, dass durch das Bohrloch wenigstens eine Lagerfuge gekreuzt wird. Nach Ausblasen der Bohrlöcher erfolgt die Tränkung drucklos.

Unter langsames über mehre Tage sich erstreckendes eindiffundieren durch Tränkung, bis das Mauerwerk keine Flüssigkeit mehr aufnimmt, ist es wirksamer als eine Drucktränkung. (Die Sauggeschwindigkeit der Kapillare wird durch Druck nicht beschleunigt.) Hat das Mauerwerk eine hohe Durchfeuchtung, Kapillare und Poren haben einen großen Wassergehalt, so stehen keine freien Kapillaren und Poren für das Injektionsmittel zur Verfügung. Eine Verdrängung des Wassers durch Injektionsmittel ist nicht möglich.

---

[335] *Ettel, Wolf-Peter u.a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992, Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 85-91*

Daneben gibt es Injektage mit Hochdruck und das Impulsverfahren. Beim Ersteren soll zusätzlich das in den Kapillaren befindliche salzhaltige Wasser verdrängt werden. Eine günstigere Wirksamkeit wird jedoch erreicht, wenn eine Vortrocknung des Mauerwerks mittels Heizpacker mit Druckluftanschluss erfolgt. Einzelne Injektionsmaterialien benötigen eine gewisse Reaktionszeit, wo statt einer permanenten Hinzufügung eine stoßweise sinnvoller ist.
Die Ausführung des Verfahrens hat keinen Einfluss auf die Standsicherheit und der Abdichtungsgrad liegt bei ca. 70 bis 80%. Nachfolgend wird die Wirkung ausgewählter Injektionsmittel beschrieben.

Alkalisilikate wirken kapillar verengend. Das Wasserglas benötigt CO_2 zur Erhärtung. Dabei entsteht Pottasche beziehungsweise Soda, was durch Ausblühungen auf dem Mauerwerk gekennzeichnet wird. Dabei können eine Kristallisation und eine hygroskopische Feuchte auftreten. Alkalisilikat wird im feuchten Mauerwerk verdünnt.

Das Verfüllen mit Alkalisilikat (Natrium- oder Kaliumsilikat) ohne weitere Zusätze hat den Nachteil, dass nach dem Verdunsten des überschüssigen Wassers in den verfüllten Kapillaren und der vollständigen Austrocknung des gebildeten Kieselgels sogenannte Sekundärkapillaren mit geringerem Durchmesser entstehen und das Mauerwerk erneut durchfeuchtet wird.[336]

Alkalisilikat-Silikonat-Kombination wirken wie das Alkalimethylsilikonat hydrophobierend. Diese Eigenschaften kommen erst durch CO_2 zum Tragen und es entsteht Pottasche mit dem negativen Effekt der Salzablagerung. Die Anwendung ist für eine Durchfeuchtung von < 50 % und Mauerwerk < 50 cm (wegen CO_2) vorgesehen. Kaliumpropylsilikonat benötigt kein CO_2 und kann für stärkere Mauerwerksdicken verwendet werden. Ausschlaggeben für die Wirksamkeit ist der Wasseranteil und die gelösten Salzionen. Auf diese Kombination basiert ein Großteil der auf dem Markt angebotenen Bohrlochinjektionsmittel.

Silicomikroemulsionskonzentrate erreichen auch bei hoher Durchfeuchtung eine gute Verteilung im Mauerwerk.

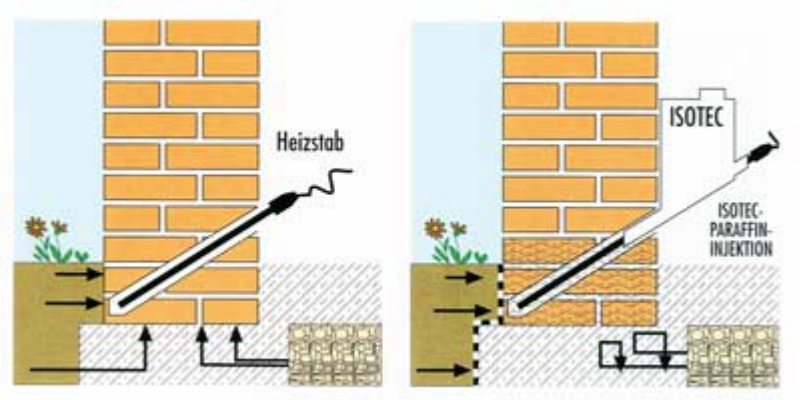
Silikonharze funktionieren bei wassergesättigtem Mauerwerk nicht, da die Wasser abweisenden

[336] *Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz und Bausanierung, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188*

Substanzen nicht in die betreffenden Kapillaren gelangen.

Paraffine wirken kapillar verengend. Zunächst werden Löcher für Heizstäbe im Abstand von 10 cm gebohrt. Sie trocknen bei einer Temperatur von mehr als 100 Grad Celsius das Mauerwerk vollständig aus. Anschließend wird in die Löcher heißes Paraffin gefüllt. So entsteht eine circa 30 cm hohe, kapillar dichte Horizontalsperrung über die gesamte Wanddicke.

Abb. 4.3.3: Horizontalabdichtung mit Paraffin [337]



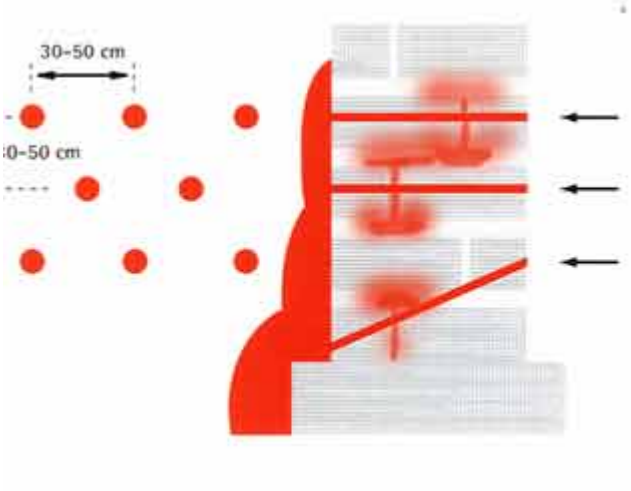
Kunstharzlösungen auf Basis von Epoxidharz, Polyurethan- und Polyesterharzen funktionieren basiert auf Kapillarverengung. Sie werden mit Druck eingepresst. Feuchteempfindliche Harze verteilen sich nicht sehr gut im Mauerwerk, es kann zu Reaktionsstörungen beziehungsweise Abbindestörungen kommen. Einzelne Harze können aufgrund ihrer Molekülgröße selten in die Kapillaren eindringen. [338, 339]

Vertikaldichtung durch Injektion

Zum Beispiel das 3-Komponenten-Polyacrylat-Gel von WEBAC lässt sich zur nachträglichen rückwärtigen Flächenabdichtung (Schleierinjektion) einsetzen, siehe Abb. 4.3.4. Da das Material auch in Fugen eindringt, wird so zusätzlich eine Horizontalsperre im Mauerwerk gebildet. Es haftet gut auf trockenen und nassen mineralischen Untergründen. Bei wechselnder Feuchtigkeit schrumpft (Trockenheit) und quillt (Feuchtigkeit) das Gel. [340]

[337] *Firmenschrift ISOTEC, PaffraTher Str. 80, 51465 Bergisch Glatbach, NWFK. 7/97, www.isotec.de*
[338] *Ettel, Wolf-Peter u. a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992, Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 85-91*
[339] *Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz und Bausanierung, Rudolf Müller Verlag, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188*
[340] *Technische Information WEBAC Chemie GmbH, Fahrenberg 22, 22885 Barsbüttel, WEBAC 240, Polyacrylat-Gel*

Abb. 4.3.4: Schematische Darstellung einer Schleierinjektion, das Gel wird durch die Bohrlöcher zur Rückseite des Mauerwerkes gepresst und bildet dort einen abdichtenden Gelschleier aus. Zusätzlich dringt es in Fugen ein und bildet so zusätzlich eine Horizontalsperre.



Weitere spezielle Injektionsharze dienen zum Verpressen von Rissen, Hohlräume nach Setzungen oder Undichtigkeiten im Bereich der Arbeitsfugen. Hier finden Injektionsschläuche oder Injektionspacker ihre Anwendung.

In einer Wirksamkeitsuntersuchung von RAUPACH und WOLFF wird in den nachfolgenden Abb. 4.3.5 die Verteilung eines Injektionsstoffes auf Epoxidharzbasis über die Ziegelquerschnittsfläche dargestellt. Der Bereich der injizierten Fläche umfasst etwa nur 50 % der gesamten Querschnittsfläche. Eine wirksame Horizontalabdichtung kann in diesem Fall nicht erreicht werden. Im Ergebnis dieser Untersuchung soll hier die Zusammenfassung genannt werden. "*Chemische Bohrlochinjektionsmaßnahmen sind geeignet, unter bestimmten Randbedingungen wirksame Horizontalabdichtungen zu erzeugen. Dabei sind vor allem Injektionsstoffe mit einem hohen Wirkstoffgehalt vorteilhaft, um auch nach einer Vermischung des Injektionsgutes mit dem in den Kapillarporen enthaltenen Wasser eine effektive Abdichtung zu gewährleisten. Weiterhin sind auf einen maximalen Bohrlochabstand von je nach Randbedingungen etwa 10 bis 12 cm sowie auf ausreichende Injektionsmengen zu achten. Eine Injektionsmenge in der Größenordnung des Kapillarporenvolumens des Substrates ist in der Regel nicht ausreichend, da durch seitlich austretendes Injektionsgut sowie Hohlräume und die bereits angesprochene Vermischung ein Teil des lnjektionsgutes keine Wirksamkeit entfalten kann. Die durchgeführten*

Untersuchungen zeigen, dass etwa die zwei- bis vierfache Injektionsmenge bezogen auf das Kapillarporenvolumen anzustreben ist."[341]

4.3.5: Verteilung eines Injektionsstoffes auf Epoxidharzbasis in einem Ziegel



Detaillierte Prüfungsanforderungen für die eingesetzten Wirkstoffe zur Ausbildung der chemischen Horizontalsperren können dem WTA - Merkblatt 4-4-04 entnommen werden. Da es keine anderen anerkannten Prüfungsanforderungen gibt, werden diese künftig als Qualitätsmaßstab zugrunde gelegt.

Kosten: 205 bis 290 Euro/m^2
Lebensdauer: 10 bis 25 Jahre

Eine Zementschlämme hat keine ausreichende Wirkung.

Bei niedrigen Höhen der Kellerräume erfolgt oft im Rahmen einer Sanierung eine Absenkung der Oberkante der Kellersohle. Vorher muss jedoch die ausreichende Gründung der Streifen- bzw. Einzelfundamente in Abstimmung mit dem Tragwerksplaner und Bodengutachter geprüft werden. Ist dann die Einbindetiefe des Fundamentes zu klein, so kommt es zwangsläufig zur Setzung.[342]

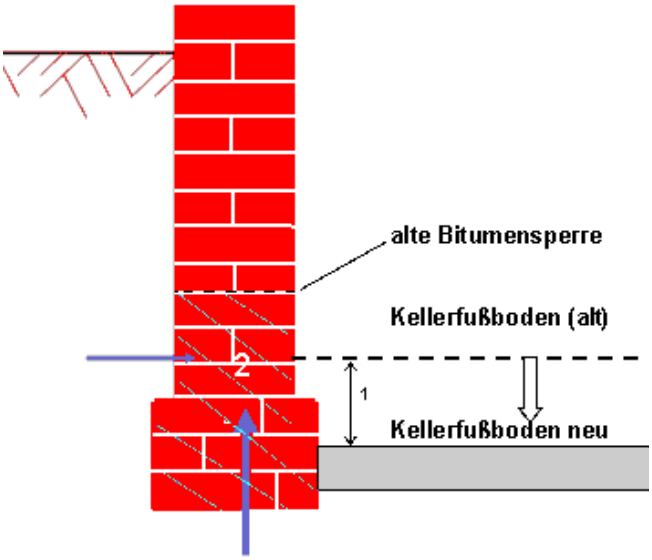
Bei diesem praktischen Beispiel wurde der Kellerfußboden um circa 30 cm abgesenkt (Abb. 4.3.6). Damit wurde das stark durchfeuchtete und mit Salze belastete Mauerwerk freigelegt, welches sich vorher unterhalb des Kellerfußbodens befand. Durch das Planungsbüro wurde eine

---

[341] Raupach, Michael und Wolff, Lars; Chemische Bohrlochinjektionsverfahren für die nachträgliche Abdichtung von Mauerwerk, bauzeitung 5/02 S. 67-70
[342] Schrepfer, Thomas; Gescheidle, Harald; Schäden beim Bauen im Bestand, 2007, Bd. 41, Fraunhofer IRB Verlag, S. 61-63

Horizontalsperre mithilfe einer Bohrlochinjektage in Höhe des neuen Fußbodens vorgesehen. Dieses ausgewählte Verfahren musste bei der hohen Salzbelastung und dem hohen Durchfeuchtungsgrad versagen.

Abb. 4.3.6: Eine Absenkung (1) des Kellerfußbodens um Raumhöhe zu gewinnen, führt zur Freilegung von feuchtem und salzbelastetem Mauerwerk. (2)



Bei einer richtigen Ausführung muss als 1. das freigelegte Mauerwerk vollständig getrocknet werden. Der salzbelastete Mörtel in den Fugen muss ausgekratzt und eventuell stark salzbelastete Mausersteine ausgetauscht werden. Im trockenen Mauerwerk kann dann ein o. g. Injektionsverfahren zur Anwendung kommen. Entweder bleibt das freigelegte Mauerwerk unverputzt und es werden lediglich die Fugen mit einem salzbeständigen Mörtel verstrichen oder es wird ein Sanierputz aufgetragen, der nach einigen Jahren je Salzbelastung ausgetauscht werden muss. Ein Kalkputz hat an diesem Wandabschnitt nur eine äußerst kurze Haltbarkeit, dient aber als Opferputz.

4.3.3. Elektrophysikalische bzw. elektrokinetische Verfahren zur Mauertrocknung und Entsalzung

4.3.3.1. Prinzip der elektrochemischen Entsalzung und Reduzierung des kapillaren Wassertransportes (aktive Verfahren)

Diese Verfahren zur Mauertrockenlegung sind bis heute äußerst umstritten. Obwohl das theoretische Prinzip bekannt ist, steht der Verwirklichung häufig die praktische Durchführbarkeit entgegen. Das passive Verfahren wird auf dem Markt oft als Problemlöser angeboten.

Zum Beispiel in der ÖNORM B3355-2 wird die aktive Elektroosmose genormt. Diese Norm ist anzuwenden für Maßnahmen an bestehendem Mauerwerk, die der Verhinderung oder Begrenzung des kapillaren Aufsteigens von Feuchtigkeit dienen. Es werden ausschließlich Verfahrensgruppen berücksichtigt, deren Wirkungsweise wissenschaftlich allgemein anerkannt und deren praktische Tauglichkeit erwiesen ist. Geräte, die sich auf Magnetokinese, Radiowellen u. a. beziehen, werden in dieser ÖNORM nicht behandelt.

Bewegt sich Wasser durch eine Kapillare, wird an der Kapillarwand eine diffuse elektrische Doppelschicht aufgebaut. Durch den Wassertransport wird ein Teil der Ladungen mitgerissen. Dabei bildet sich ein Potenzial aus, das als Strömungspotenzial bezeichnet wird.[343] Bei einer gemauerten Wand ist das Potenzial an der Wandoberfläche, genauer in der oberflächennahen Schicht, am größten und im Wandinneren schwächer. Das Potenzial wird vom Versalzungsgrad weitgehend mitbestimmt. Es handelt sich also um elektrochemische Potenziale. Es finden elektrolytische Vorgänge in der Wand statt, die deshalb für die Dissoziierung (Spaltung in Anion und Kation) eine Spannung benötigen. Richtig benannt ist es eine Elektrolyse, in der Praxis spricht man von einer Osmose.[344] Es kann bisher nicht zweifelsfrei ausgeschlossen werden, ob durch die angeregte Ionenwanderung nicht auch Ca- und Si-Ionen zur Elektrode wandern und es so langfristig zu einer Verdürrung des Mauermörtels kommt.[345]

---

[343] Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, Rudolf Müller Verlag, 4. Aufl. 2001, S. 182-188
[344] Arendt, Claus; Leitfaden zur Erhaltung u. Modernisierung alter Häuser, Stuttgart: 1993, Deut. Verlags-Anstalt, S.110 ff
[345] Arendt, Claus; Leitfaden zur Erhaltung u. Modernisierung alter Häuser, Stuttgart: 1993, Deut. Verlags-Anstalt S.110 ff

"*Bei günstigen Verhältnissen von Porenradius zur Dicke der Doppelschicht wird der Wassertransport erheblich vergrößert, doch auch nur in feinporigen Systemen. Die übliche Doppelschichtdicke liegt bei einigen 10^{-9}m, die üblichen Porengrößen liegen bei 6-10^{-6} m. Überschreitet die elektrische Doppelschichtdicke einen kritischen Wert x, dann überlappen sich die Doppelschichten und der Wasser-Transport behindert sich gegenseitig.*
Der häufigste Porenradius im Zementmörtel liegt bei etwa 100 nm. Daran ist zu erkennen, dass eine rein elektrokinetische Trocknung sich nur auf einen kleinen Teil des Porensystems beschränken kann. Die Porosität von Ziegel schwankt in noch viel größeren Bereichen. Daher ist es durchaus erklärlich, dass eine entsprechende Trocknungsanlage bei einem Objekt funktioniert und bei einem anderen (aus anderem Mauerwerksbaustoff) versagt."[346]

Es sind mindestens 4 verschiedene Mechanismen des Ionen- und Wassertransportes in porösen Systemen wirksam, die mehr oder weniger verstärken oder auch ausschließen.

Während beim Transport die Richtung der Ionen und Elektronen durch die Ladung bestimmt wird, treten beim Wassertransport Probleme auf, da nicht alle Mechanismen gleichzeitig wirken müssen. Der Wassertransport infolge der unterschiedlichen Hydrationszahlen erfolgt meistens in Richtung Kathode, da Kationen stärker hydratisiert sind als Anionen. Größere Salzionen zum Beispiel $Ca(OH)_2$ schieben auf ihrem Weg zur Elektrode (Anode) das in den feien Poren befindliche Wasser vor sich her (Bulldozereffekt). Dies ist abhängig vom Durchfeuchtungsgrad und der Porenradienverteilung, wobei der Effekt in großen Poren nicht mehr wirkt. Weiterhin hängt die Richtung des Wassertransportes von der Polarität der Doppelschicht und dem damit verbundenen Vorzeichen des Zetapotenzials ab.[347]

Unter Laborbedingungen an einer überschaubaren Probe kann der Prozess der Elektromigration nachgewiesen werden. Das heißt, Wasserbewegungen können durch von außen aufgeprägte elektrische Felder initiiert werden, wenn die erforderlichen Bedingungen eingehalten werden. Allerdings können unter diesen Bedingungen gewonnene Erkenntnisse der Elektrophysik bzw.

---

[346] Moewe, C.-M.; Venzmer, H.; Ausgewählte Modellrechnungen zum Feuchte- und Salztransport in kapillarporösen Baustoffen, S. 49-50 in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar
[347] Moewe, C.-M.; Venzmer, H.; Ausgewählte Modellrechnungen zum Feuchte- und Salztransport in kapillarporösen Baustoffen, S. 49-50 in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar

der Elektrochemie nicht ohne Weiteres auf die Bedingungen eines Bauwerkes übertragen werden.[348]

Bei Untersuchungen zur elektroosmotischen Permeabilität von Mauerwerksbaustoffen wurden darüber hinaus Versuche an Ziegel/Mörtel-Verbundkörpern durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass "*die elektroosmotische Permeabilität von Kalkmörteln im Gegensatz zu Ziegelbaustoffen ein negatives Vorzeichen besitzt, das heißt, der Flüssigkeitsstrom in entgegengesetzter Richtung verläuft. Diese Tatsache könnte sich unter Umständen als ein Hindernis für den erfolgreichen Einsatz elektrophysikalischer Verfahren herausstellen.*"[349]

Elektroosmotische Vorgänge im Mauerwerk sind kaum überschaubar, um gerichtete Feuchtetransporte zu bewirken. Insofern sind elektroosmotische Verfahren (Wassertransport in porösem Substrat) kein taugliches Prinzip zur Entfeuchtung von Mauerwerk.[350] Ein wesentliches Problem bei der praktischen Durchführbarkeit ist die mangelnde Resistenz der Elektroden wegen der Mauersalze, was unter anderem auch die Effizienz und Dauerhaftigkeit der Funktionsfähigkeit beeinflusst. Die Wirksamkeit einer solchen elektrophysikalischen Anlage kann im Laufe der Zeit durch die Änderungen der oben genannten Einflussfaktoren beeinträchtigt werden. Daher ist die Wirkung bei diesen Anlagen ständig durch Messung der Feuchtigkeit und der Zustand der Elektroden zu kontrollieren.

Wie bereits genannt, lässt sich nicht jedes Mauerwerk mit diesem Verfahren trocknen. Daher sind gründliche Voruntersuchungen erforderlich. Der Grad der Abtrocknung ist weitestgehend vom Stromfluss abhängig. Ist dieser kleiner als etwa 10 mA je Quadratmeter Mauerwerkquerschnitt, so ist mit keiner erfolgreichen Trocknung zu rechnen. Auch bei wesentlich höherer Stromdichte kann ein feuchtes Mauerwerk mit 10 % (Massenfeuchte) nicht auf Werte von 2-3 % (Massefeuchte) getrocknet werden. Es verbleibt eine Restfeuchte, die oft für die übliche Nutzungskonzeption zu hoch ist.[351]

---

[348] Venzmer, H.; Ein Überblick zu den Problemen der Entfeuchtung und Entsalzung von Bauwerken und Bauwerksteilen unter besonderer Berücksichtigung elektroosmotischer Verfahren S. 10 ff in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar

[349] A. Dettmann, O. Bakhramov, H. Venzmer; Untersuchungen der elektroosmotischen Permeabilität von Mauerwerksbaustoffen,Feuchtetag 99 Umwelt · Meßverfahren · Anwendungen 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin

[350] Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188

[351] Prof. Dr. Hoffmann; HTWK, Holzschutzpraxis , Vortrag in Leipzig bei der Firma quick mix 1994

4.3.3.2. Beschreibung der Funktion der passiven Verfahren

Bei den passiven Anlagen ist das Wirkungsprinzip ähnlich wie bei aktiven Verfahren. Es wird nur ein sehr kleines Potenzial aufgebaut, zu klein, um einen ständigen Ionentransport aufrecht zu halten.

Die im Wasser gelösten Salze werden vermehrt zur Oberfläche transportiert und fallen dort aus, und zerstören den Werkstoff.[352] Hier werden zwei Elektroden ohne Fremdspannung eingesetzt, die jenes Potenzial "kurzschließen" soll, dass durch das Strömen des Wassers infolge der Kapillarität entsteht.[353, 354] Die passiven Verfahren sind auf Dauer wirkungslos bzw. ihr Einsatz zeigt keine nennenswerte Verbesserung. Zu beachten ist, dass bei einer Trockenlegung meist verschiedene Maßnahmen gleichzeitig ausgeführt werden. Verbesserungen können dann den passiven Verfahren nicht allein zugeschrieben werden.

Erdungsverfahren:

Durch Erdung durch miteinander verbundene eingemörtelte Elektroden sollen in Bauwerksteilen die sich durch den kapillaren Wassertransport aufbauenden elektrischen Potenziale im Mauerwerk kurzgeschlossen werden. Problem ist die Korrosion der Metalle, vor allem wenn Chloride vorhanden sind.

Ladungskompensationsverfahren (LKV passiv):

Durch den Einbau von Dipolen soll das mauereigene elektrische Feld ausgeschaltet werden. Damit wird der elektroosmotische Wassertransport reduziert.

Galvanische Verfahren (passiv):

Durch den Einbau zweier Elektrodenebenen im Abstand von drei Ziegelsteinen aus unterschiedlichen metallischen Elektroden (zum Beispiel Fe/Al) wird im feuchtegeschädigten Mauerwerk ein galvanisches Element erzeugt. Das so entstehende elektrische Potenzial soll dem kapillaren Wassertransport entgegenwirken. Problem ist die Korrosion der Metalle, vor allem wenn Chlo-

---

[352] Becker, G.; Vom AET zum ETB, Ein altes Prinzip - neue Technologie, in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar,
[353] Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188
[354] Rufert, Günter; Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung DBZ 12/94, S.108

ride von über 0,02 % vorhanden sind.

4.3.3.3. Beschreibung der Funktion der aktiven Verfahren

Das aktive Verfahren funktioniert durch das Anlegen einer elektrischen Fremdspannung an ein spezielles Elektrodensystem im Mauerwerk. Es werden zielgerichtet elektrische Potenziale geschaffen, die dem kapillaren Flüssigkeitstransport elektroosmotisch entgegen wirken.[355, 356] Ihr Nachteil liegt vor allem darin, dass durch die höhere Spannung die Korrosion an der Kathode (negative geladene Elektrode unterliegt der Wasserstoffkorrosion) und Anode (positive geladene Elektrode unterliegt einem anodischen Abbau) anwächst. Bereits nach wenigen Monaten werden Zerstörungen der Elektroden sichtbar. Daher werden verbesserte Materialien eingesetzt. Die Standzeit sollte wenigsten 30 bis 50 Jahre betragen. Untersuchungen durch das Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung zeigten eine Einwirkung auf Wassergehalt und Durchfeuchtungsverlauf. [357]

Aus den Untersuchungen von DETTMANN, BAKHRAMOW und VENZMER zur praktischen Anwendung elektrokinetischer Methoden wurden folgende Schlussfolgerungen abgeleitet:

- "*Es ist in jedem Fall eine bestimmte elektrische Mindestfeldstärke oberhalb der kritischen Feldstärke einzuhalten, das heißt, mindestens 50 - 100 V/m bezogen auf den Abstand zwischen Anode und Kathode.*
- *Bevor eine nennenswerte Bewegung von Wasser innerhalb eines Mauerwerks zustande kommt, findet zunächst ein Salztransport statt. Trockenes Mauerwerk lässt sich ohnehin nicht entsalzen. Zur Entsalzung ist ein hoher Feuchtegehalt notwendig.*
- *Eine Entfeuchtung von Mauerwerk kann allein auf Basis der Elektroosmose nicht bis zur vollständigen Trocknung, sondern nur bis zu einem Durchfeuchtungsgrad von ca. 50 Prozent durchgeführt werden. Danach führen der erhöhte elektrische Widerstand des Mauerwerkes und die verschlechterte Kontaktierung zu einem Abbruch des Wassertransports.*" [358]

---

[355] Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, 4. Aufl. 2001, Rudolf Müller Verlag, S. 182-188
[356] Ettel, Wolf-Peter u.a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992, Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 85-91
[357] Arendt, Claus; Leitfaden zur Erhaltung u. Modernisierung alter Häuser, 1993, Stuttgart: Deut. Verlags-Anstalt, S.110 ff
[358] Dettmann, A.; Bakhramov, O. u. Venzmer, H.; Neue Möglichkeiten zur... 2. Dahlberger - Kolloquium, Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Wismar 2000, S. 78

In einer anderen Untersuchung an Sandstein und Ziegelstein in Wien wurde zusammenfassend festgestellt: "*Die gemessenen Feuchtetransporteffekte liegen in unbedeutenden Größenordnungen. Sie können bei Trockenlegungsmaßnahmen kaum als Unterstützung dienen. Es können bestenfalls geringfügige und in der Praxis kaum merkbare Effekte in der Umgebung der maximalen kapillaren Steighöhe erzielt werden.*" [359]

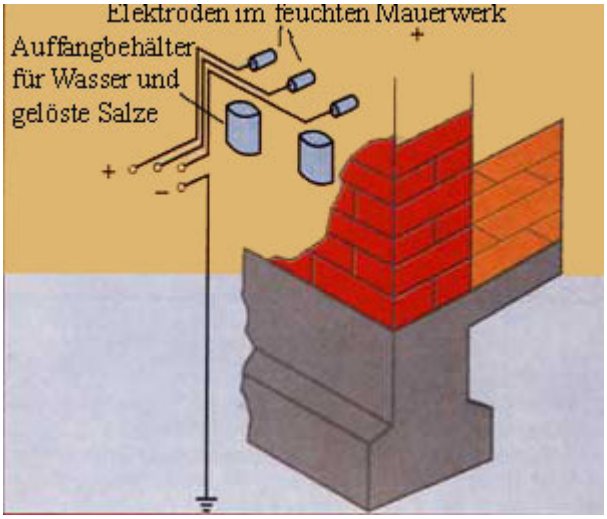
Bei dem ETB-Verfahren[360] kommen korrosionsstabile Anoden zur Anwendung (Abb. 4.3.7 und 4.3.8, es ist eine Weiterentwicklung des AET-Verfahrens.[361] Diese neue Technologie (Mehrebenensperre) wird den Anforderungen der Praxis besser gerecht. Diese Anoden sind einzelverdrahtet und werden über eine Stromquelle (Gleichstrom) den Erfordernissen entsprechend automatisch geregelt. Damit wird der Inhomogenität des Mauerwerkes mit seiner unterschiedlichen Leitfähigkeit entgegengewirkt. Anionen, wie Chloride, Nitrate und Sulfate wandern zur Anode. Durch die Ionen umgebende Hydrathülle erfolgt damit gleichzeitig ein Wassertransport zu den Elektroden, wobei die Kationen (Natrium, Kalium usw.) eine wesentlich größere Hydrathülle besitzen und demzufolge auch mehr Wasser zur Kathode transportieren. Nitrat- und Sulfationen können nicht entladen werden. Sie reichern sich in der Nähe der Anode an.[362] Das elektrophysikalische AET-Verfahren gehört zu den reduzierenden Entsalzungsverfahren.

Abb. 4.3.7: Vorbereitetes nasses Mauerwerk mit Einsetzen der Anode



[359] Scherpke, G.; Schneider, U.; Elektroosmose – ein Vergleich theoretischer Ergebnisse mit experimentellen Resultaten, DGZfP-Berichtsband BB 69-CD Feuchtetag 99 Umwelt · Meßverfahren · Anwendungen 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin
[360] Entsalzung + Trocknung = Bausanierung
[361] Aktives Entsalzen und Trocknen
[362] Firmenschrift Bausanierung Ulrich Becker Zeitz, Entsalzung + Trocknung = Bausanierung durch das ETB-Verfahren

Abb. 4.3.8: Schematische Darstellung des ETB-Verfahrens



Zu den elektrophysikalischen Entsalzungsverfahren gehören:

- AET-Verfahren mit stabförmigen Elektroden
- Elektro-Kompressenentsalzung mit Flächenelektroden
- ETB-Verfahren mit stab- oder flächenförmigen Elektroden und
- Kerasan-Verfahren mit stabförmigen Ionenaustauschelektroden.

Bei der Entsalzung ist die flächenmäßige Anordnung der Elektroden sinnvoller.[363] Hinzu kommt eine regelmäßige Wartung und Pflege dieser Anlagen.

Für eine erfolgreiche Salzsanierung im Mauerwerk ist die Unterbrechung der Zufuhr an Wasser und (eventuell) damit gelösten Salzen erforderlich. Danach erfolgt eine Trocknung des Mauerwerkes bis zur Gleichgewichtsfeuchtigkeit mit der umgebenden Luft. Auf der äußeren Wandschichtung werden die Salze deponiert und können dort über hygroskopische Wasseraufnahme schädlich wirken. Die Salze sind daher zu entfernen oder wenigsten in einem Kalk- oder Sanierputz zu deponieren, damit das Mauerwerk durch den Hydrationsdruck nicht geschädigt wird. Der Einsatz einer elektrophysikalischen Anlage kann die eingedrungenen Salze bis zu einen gewissen Grad reduzieren und die Trockenzeit bis zur Erreichung der Gleichgewichtsfeuchte vermindern. Wird der äußere Zustrom an Wasser nicht unterbrochen, so kann durch die kleinen Transportleistungen der Anlage das aufgenommene Wasser nicht ausreichend abgeführt wer-

---

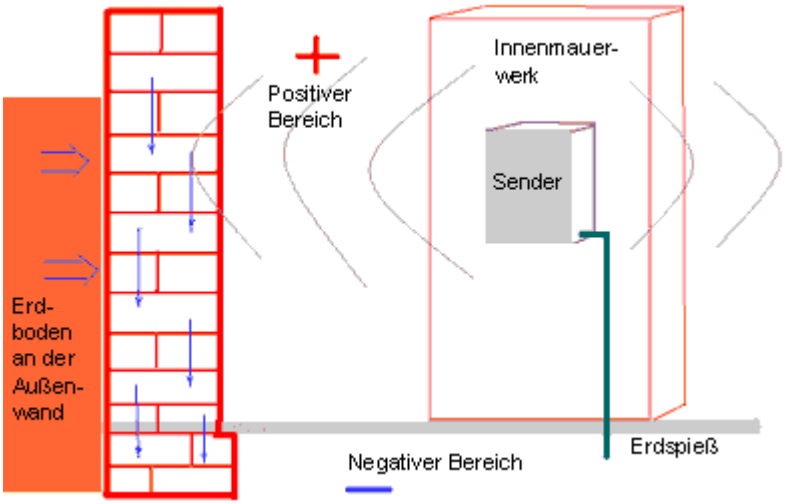
[363] *Venzmer, H.; Ein Überblick zu den Problemen der Entfeuchtung und Entsalzung von Bauwerken und Bauwerksteilen unter besonderer Berücksichtigung elektroosmotischer Verfahren S. 10 ff in Tagungsband Venzmer, H.; Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke, Möglichkeiten und Grenzen elektroosmotischer Verfahren der Bauwerkstrocknung, 2. Dahlberg - Kolloquium 14.-15.9.2000 in Wismar*

den.[364] Daher sind bei einer Trockenlegungsmaßnahme Sanierung mehrere sich ergänzende Maßnahmen erforderlich.

4.3.3.4. Beschreibung der elektrodenlosen Elektroosmose

Auf dem Markt gibt es verschiedene Anbieter. Einige Firmen fallen besonders mit einer großen Anzahl von Referenzobjekten auf. In der nachfolgenden Abb. 4.3.9 wird das Verfahren vom Anbieter als aktive Elektroosmose ausgewiesen und findet zur elektronisch-physikalischen Entsalzung und Mauertrockenlegung Anwendung. Statt der Elektroden werden ein Erdspieß (Potenzialausgleich) und eine ausgesendete Frequenz im unteren langwelligen Bereich verwendet.[365]

Abb. 4.3.9: Elektrodenlose Elektroosmose, Funktionsschema



Die Überschrift des Beitrages lautet: "Mauerentfeuchtung ohne Chemie". Elektrolytische Vorgänge sind elektro**chemische** Reaktionen. Damit wird vom Verfasser die Funktionsfähigkeit seines eigenen Verfahrens angezweifelt.

In einer anderen Firmenbeschreibung zum gleichen Verfahren heißt es: " *In den winzigen Kapillaren, die das Mauerwerk durchziehen, befinden sich Wassermoleküle und gelöste Salze. Das*

---

[364] *Horst, Reul; Handbuch Bautenschutz u. Bausanierung, Rudolf Müller Verlag, 4. Aufl. 2001, S. 182-188*
[365] *Mauerentfeuchtung ohne Chemie von Hamatrol, Mauertrockenlegungssysteme, Das Bauzentrum Baukultur 10/2003, S. 50*

schwache elektrische Feld wirkt auf diese in Kapillaren abgelagerten und gelösten Salze in Form von elektrokinetischen Vorgängen ein und ermöglicht somit wieder die natürliche Diffusion der Feuchtigkeit nach außen." [366] Sinkt zum Beispiel die relative Luftfeuchte, so kristallisiert das Mauersalz sowohl an der Wandoberfläche als auch in den Poren aus.

In weiteren Firmenschriften anderer Anbieter heißt es:"*Der Schutz gegen das Eindringen der aufsteigenden Bodenfeuchtigkeit beziehungsweise des* ***Hangwassers*** *wird mit Hilfe des LE-Systems realisiert.*" [367] An einer anderen Stelle im Text werden die konventionellen Verfahren auf ihre Wirksamkeit angezweifelt." *In extremen Fällen wurden Mauern abgeschnitten und eine neue Isolierung eingebraucht, aus unterschiedlichsten Materialien. Alle diese Bauarbeiten sind teuer und schädigen meistens die Bausubstanz. Falls es wirklich gelungen ist, einen Teil der Kapillaren zu verstopfen oder zu unterbrechen, hält das nur für einige Zeit und die Nässe steigt nach kurzer Zeit wieder hoch...*"[368] Eine Horizontalsperre aus Bitumenpappe, Edelstahl oder PE hält 40 Jahre und meist viel länger.

Die Feuchttransportphänomene im Mauerwerk können mit unterschiedlicher Intensität vorliegen und sich aufheben oder verstärken. Es lassen sich nachfolgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die Transportleistung der Elektroosmose mit Elektroden ist in vielen Fällen nicht ausreichend und bedarf noch andere geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Unterbrechung der vertikalen und horizontalen Transporte. Es sind geringfügige und in der Praxis kaum merkbare Effekte in der Umgebung der maximalen kapillaren Steighöhe feststellbar. Das zeigen die o. g. Untersuchungsergebnisse.
2. Der energetische Leistungseintrag über elektromagnetische Felder ist noch geringer als über die Elektroden der passiven Verfahren.
3. Die elektroosmotische Permeabilität von Kalkmörteln besitzt im Gegensatz zu Ziegelbaustoffen ein negatives Vorzeichen, das heißt, der Flüssigkeitsstrom verläuft in entgegengesetzte Richtung. Das Verfahren verspricht die Umkehr des Transportes der Wassermoleküle in das Erdreich beziehungsweise in die unteren Mauerbereiche, also über alle Schichten.

---

[366] *Kundeninformation BHS, Schreiter & Kroll GmbH, Waldheim, Ausgabe 3/99, S. 6*
[367] *Firmenschrift Aqua-stop-Gebäudeentfeuchtung, Leipzig*
[368] *Firmenschrift Aquastop Umweltfreundliche Mauertrockenlegung ohne Chemie ohne Bauarbeiten, Mauerentfeuchtungsanlagen, Großenhain*

Unter optimalen Umständen heben sich die oben genannten Feuchttransportphänomene auf. Unter diesem Gesichtspunkt geht man von einer Wirkung analog der elektrodenlosen Elektroosmose aus. Bis auf 3 kleine Löcher, 2 für die Dübel zum Befestigen des Kastens und eins für den Erdspieß, erfolgt am Gebäude kein weiterer Schaden. Wenn das Verfahren nicht funktioniert, kann man ja immer noch eine richtige geeignete Maßnahme zur Reduzierung der Unterbrechung der vertikalen und horizontalen Transporte durchführen.

Bisher konnte ich nur 3 dieser Anlagen während des Einsatzes besichtigen. Unter dem Gesichtspunkt, dass der vorherige Feuchtzustand sowie alle anderen Maßnahmen nicht bekannt waren, kann Folgendes zusammengefasst werden:

- Die erste Anlage wurde mit einer sensorgesteuerten Lüftung gekoppelt. Letzteres ist ohnehin eine wirkungsvolle Trocknungsmaßnahme, um das Mauerwerk zu entfeuchten.
- Im Vergleich zu anderen ähnlichen Kellern konnte bei der 2. Anlage keine wesentliche Verbesserung festgestellt werden. Nach längerem Betrieb war noch zusätzlich eine Vertikalabdichtung geplant.
- Die dritte Anlage brachte gar nichts. Das Mauerwerk des Kellers bis in das Erdgeschoss war trotz zweijährigen Betriebs immer noch vollständig nass.

Durch Herrn Prof. Dr. Venzmer des neutralen unabhängigen Dahlberg-Instituts Wismar wurde wiederholt erklärt, dass die Bereitschaft zur wissenschaftlichen Überprüfung der Wirkungsweise von elektroosmotischen Entfeuchtungsgeräten an geeigneten Objekten vorliegt, um zu einer neuen Auffassung über diese Geräte zu gelangen, wenn die Untersuchungen dies ergeben.[369]

Das "Zauberkästchen"

Dieses Verfahren soll über ein geoenergetisches Kraftfeld gravomagnetischer Natur wirken. Das Gerät funktioniert mit einer Spiralantenne. Bei jeder Spirale entsteht bei Stromfluss ein sekundäres Magnetfeld, ähnelt einem Elektromagneten mit verschieden starken Magnetpolen. Die Wasserdipole der Wand sind asymmetrisch aufgebaut, und zwar elektrisch und magnetisch. Sie wandern immer zu einer negativen Ladung, mit dem positiven Pol voran. Zur Funktionsfähigkeit muss die richtige Resonanzgröße vorliegen, um eine Lenkung und Verstärkung der Wasser-

[369] *16. Hanseatische Sanierungstage, Nov. 2005; B+B Bautenschutz+Bausanierung, 29.J. Feb. 2006 Nr.1, S.10-11*

schwingungen zu ermöglichen. Für die Funktionsfähigkeit wird ein magnetischer oder gar vibrativen Biefeld-Brown-Effekt angenommen. Für den Betrieb sollen minimalste spontane Stromflüsse ausreichen, wie zum Beispiel der Empfang von Umweltschwingungen. Bei einer Trockenlegung geht es nur um die Dämpfung aufsteigender Wirbelformen.[370]
In diesem Zusammenhang soll auf zwei Beiträge verwiesen werden. Von Dr. Axel Stoll gibt es eine wissenschaftliche Einschätzung des Aquapolverfahrens 11/03[371], und ein Kontra im Vortrag, Wismar 2000 von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Müller.[372]

Auch die aktiven elektrophysikalischen Verfahren ermöglichen keiner vollständige Trocknung der porösen Baustoffe. Es verbleibt eine Restfeuchte, die nicht den Anforderungen eines Wohnraums und Ähnlichen genügen. In vielen Fällen liegt auch eine Kondenswasserbildung vor. In diesem Fall sind alle Maßnahmen zur Unterbrechung des kapillaren Wassertransportes erfolglos.

4.4. Übersicht von Verfahren zur Vermeidung von Kondenswasser an der Wandoberfläche

Die niedrigste innere Oberflächentemperatur liegt im Winter bei einer Außenwand direkt im Wandwinkel und über dem Fußboden vor. Im Winterhalbjahr können hier Temperaturdifferenzen von 6 bis 7 K gegenüber der Raumluft auftreten (siehe Tabelle 1). An dieser Oberfläche liegt damit auch die höchste relative Luftfeuchte vor. Durch das Feuchtegleichgewicht zur Wand kommt es hier zu einer langzeitlichen Durchfeuchtung des Baustoffs und in vielen Fällen auch zur Schimmelpilzbildung, wie es in den Abbildungen 4.4.1 gezeigt wird. Das Bild in der Mitte stammt von der Wohnung 3 und das Bild rechts von der Wohnung 2 aus der Tabelle 4.1.

---

[370] Müller, Gabi; Wirbelwelten, Teil 3 Lebensformen und Technikanwendungen raum&zeit 148/2007 S.87
[371] Stoll, Axel; Wissenschaftliche Einschätzung des Aquapol-Verfahrens, Beitrag abgespeichert unter www.ib-rauch.de/bautens/feucht/aquapol.htm
[372] M. Müller ; FH Magdeburg FB Bauingenieurwesen 2. Dahlberger - Kolloquium Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke ... Wismar 2000

Abb. 4.4.1: Schimmelstreifen über dem Fußboden in Erdgeschosswohnungen, links ohne Außendämmung und rechts mit Außendämmung



Tabelle 4.1: Ergebnisse von Temperaturmessungen an einer Außenwand, wo Schimmelpilzbefall vorliegt.

	Wohnung 1 EG, Altbau		Wohnung 2 EG, Neubau + Vollwärme-dämmung		Wohnung 3 II. OG, Altbau		Wohnung 4 EG altes Bauernhaus + hinterlüftete Fassade[2)]	Wohnung 5 EG, MfH, Vollwärmedämmung[1)]
Datum/Uhrzeit	16.3.2006 8.30 Uhr		6.4.2006 8.30 Uhr		6.1.2006 10 Uhr		27.3.2003 11 Uhr	29.1.1998 17 Uhr
Außentemperatur	-0,5 bis 1 ºC		3 ºC		- 1ºC		16-18 ºC	keine Daten
	Raum 1	Raum 2	Raum 1	Raum 2	Raum 1	Raum 2	Wohnzimmer	Schlafzimmer
Raumtemperatur	17 ºC	19 ºC	17,5 ºC	18 ºC	17,5 ºC	17 ºC	20 ºC	13 ºC
Temp. Wandoberfläche 1 m hoch	14 ºC	15,6 ºC	15 ºC	15 ºC	15,5 ºC	14,5 ºC	14,5 ºC	(0,6 m) 10,9ºC
Wandoberfläche über Fußbodenleiste	11 ºC	13 ºC	12 ºC	12 ºC	12,3 ºC	10,5 ºC	11,5 ºC	6,7 ºC
rel. Luftfeuchte im Raum	ca. 50 %	ca. 50 %	40 %	40 %	53 %	51 %	67 %	57 %

(WE = Wohneinheiten, DG = ausgebautes Dachgeschoss, EG= Erdgeschoss)

1) *Die Außendämmung beginnt etwa 10 cm oberhalb der Fußbodenhöhe der Erdgeschosswohnung.*
2) *Bei der hinterlüfteten Fassade wurde der Luftspalt zwischen massiver Wand und Dämmung angelegt, was falsch ist, siehe Abb. 3.3.12.*

Zur Vermeidung der Durchfeuchtung des unteren Mauerabschnittes werden zurzeit verschiedene Verfahren angeboten, die sich auf die Reduzierung der Luftfeuchtigkeit und damit auch auf die Minderung der Oberflächenfeuchte der Wandbaustoffe orientieren. Sie beseitigen nicht die Ursache, sondern mindern lediglich die Folgen. Sie können zum Teil selbstständig oder aber auch in Kombination mit anderen Verfahren zur Reduzierung des Feuchteeintrages zum Einsatz kommen. Nachfolgend werden ausgewählte Verfahren kurz beschrieben.

1. Beispiel: gesteuertes Belüftungssystem

Das Belüftungssystem (Abb. 4.4.2) verhindert durch gezielte Belüftung den Tauwasserniederschlag an gefährdeten Stellen im Wohnraum, zum Beispiel in Zimmerecken und hinter Möbel an der Außenwand. Mittels Sensoren werden ständig die drei für die Taupunktbestimmung ausschlaggebenden Parameter Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und Wandoberflächentemperatur gemessen.
Droht Kondenswasserniederschlag in dem gefährdeten Bereich der Wohnung, wird ein kleiner Lüfter aktiviert, der für eine Luftbewegung an diesen Stellen sorgt. [373] Damit wird die fehlende oder unterbrochene Luftzirkulation von kritischen Raumabschnitten ersetzt.

Abb. 4.4.2: Wird eine höhere Luftfeuchte gemessen, so wird die Raumluft in den Kanal gesaugt und über die kleinen Öffnungen an der Oberseite strömt diese dann aus.



[373] *Firmenschrift: ALPHATHERM Wolfgang Ludwig, D-08064 Zwickau, Bahnhofchaussee 1*

Hier sind aber auch zwei Nachteile zusehen.
1. Es wird die kühlere Raumluft über dem Fußboden zum Luftaustausch herangeführt. Diese hat ohnehin bereits eine höhere relative Luftfeuchte.
2. Mit der Luftbewegung direkt an der Wand erhöht sich der Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion. Der Wärmeübergang hängt maßgeblich von der Strömungsform der Grenzschicht ab, siehe Punkt. 2.5.

2. Beispiel: optisches Warnsystem für die manuelle Lüftung

Die gegenwärtig angebotenen „Schimmelwarnsysteme" ermitteln die Oberflächenfeuchte lediglich indirekt über die Oberflächentemperatur und die absolute Raumluftfeuchte, also auf rechnerischem Wege. Die Eigenfeuchte der Wandbeschichtung und Baustoffe wird nicht in die „Schimmelprävention" einbezogen, zusätzlich führen die unvermeidbaren Messungenauigkeiten der Temperatur- und Feuchtesensoren zu Fehlern. Diese Geräte arbeiten daher nicht zuverlässig.

Eine ausreichende Lüftung zur Reduzierung der Luftfeuchtigkeit auf der Grundlage einer Raumluftfeuchtigkeitsmessungen mit einem Hygrometer reichen nicht in jedem Fall aus, um eine Schimmelpilzbildung an einer unzureichend temperierten Wandoberfläche zu vermeiden. Dies liegt darin begründet, dass Wandbeläge und Baustoffe aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaften Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen und speichern. Mit einer kurzen Lüftungszeit wird die Luftfeuchtigkeit reduziert und durch das Hygrometer bereits nach wenigen Minuten angezeigt. In dieser kurzen Zeit wird nur ein kleiner Teil der gespeicherten Materialfeuchte abgegeben. Das Risiko einer Schimmelpilzbildung besteht weiterhin, da neben der Feuchte in der Raumluft auch die Feuchte an der Wandoberfläche entscheidend ist.
Das Messgerät (Abb. 4.4.3) erfasst mit einem Oberflächenfühler die Raumluftfeuchtigkeit direkt am Wirkort und die momentane Baustofffeuchte wird durch 4 farbige Leuchtdioden laufend angezeigt. Dieses Gerät unterstützt den Bewohner, ein an die momentane Feuchtesituation und Wandtemperatur angepasstes Lüftungsverhalten zu entwickeln.[374]

---

[374] *Firmenschrift: ADVISAN DR. MISSEL GmbH, Schaufelder Str. 9, D-30167 Hannover*

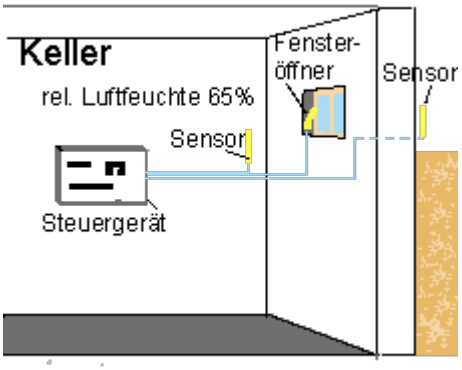
Abb. 4.4.3: Ansicht des Schimmelwächters. Leuchtet die rote Lampe, so ist eine Schimmelpilzbildung möglich und es sollte gelüftet werden.



3. Beispiel: sensorgesteuerte Raumlüftung für Raumtrocknung

Die energiesparende, sensorgesteuerte Zwangslüftung mit Lüftungssteuerung und Fensteröffnungssystem ist für die Trocknung von feuchten Kellern aber auch für die Klimatisierung von Archiven und ähnlichen Räumen entwickelt worden.

Abb. 4.4.4: Mithilfe von zwei Messpunkten wird die absolute Luftfeuchte der Innen- und Außenluft bestimmt und so eine sinnvolle Lüftung geregelt.



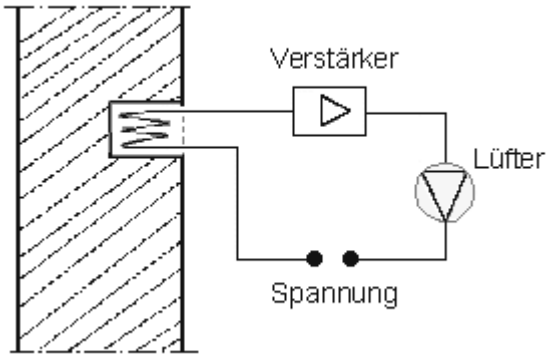
Die absolute Luftfeuchtigkeit lässt sich messtechnisch nicht mit einem Sensor erfassen. Aber dies geht mit der Messung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Aus diesen bei-

den Messergebnissen lässt sich die absolute Luftfeuchte berechnen. Werden nun zwei Messpunkte eingerichtet, einmal im zu belüftenden Raum und außerhalb des Gebäudes, so kann genau die Differenz zwischen den jeweiligen absoluten Luftfeuchtigkeiten bestimmt werden. Ist die Luftfeuchtigkeit außen kleiner, so wird über eine computergesteuerte Regeleinrichtung ein Fenster geöffnet oder ein kleiner Ventilator ist so lange eingeschaltet, bis die absolute Luftfeuchtigkeit im Raum annähern so niedrig ist, wie bei der Außenluft ist.
Es wird nur so lange gelüftet, wie notwendig und damit wird das Hinauslüften von warmer Luft auf ein Minimum reduziert.[375] Das Prinzip der Lüftungsanlage wird in der Skizze in der Abb. 4.4.4 dargestellt.

4. Beispiel: Betauungssensor zur Lüftungssteuerung

In einer ausgewählten Stelle des Außenmauerwerkes wird eine künstliche Wärmebrücke eingebaut (Abb. 4.4.5). Der Messfühler wird so eingestellt, dass dieser bei einer möglichen Schimmelpilzgefährdung an einem kritischen Wandabschnitt ein Signal abgibt.
Es wird dann an ein Lüftungsgerät angesteuert und die Raumluft so lange ausgetauscht, bis die kritische Situation an der Außenwand wieder unterschritten ist.[376]

Abb. 4.4.5: Schematischer Aufbau eines Betauungssensors zur Lüftungssteuerung



Neben der Kontrolle der Luftfeuchte ist die Temperierung der Wandoberfläche eine geeignete Maßnahme zur Vermeidung von Tauwasseranfall.

---

[375] Firmenschrift: DRYTEC Entwicklung und Vertrieb e. K., Werner Hein, Schulze Delitzsch Str. 37, D-04315 Leipzig
[376] Krus, Martin; Sedlebauer, Klaus; Neue Untersuchungen zur Schimmelpilzproblematik im Innenraum und an der Fassade, Bauphysik-Kalender 2007, Ernst & Sohn Berlin, S.652

Beispiel 5: Temperierung der unteren Wandoberfläche

Die einfachste Möglichkeit zur Vermeidung von Tauwasseranfall oder einer Durchfeuchtung des unteren Außenmauerwerkes ist die Temperierung mit einer Strahlungsheizung in Form einer Randleistenheizung. Mit einer Strahlungsheizung wird die Temperatur der unteren kühleren Luftschicht angehoben und die relative Luftfeuchte sinkt. Zwischen Luft und Mauerwerk besteht ein Feuchtegleichgewicht und es kommt zur Entfeuchtung des Mauerwerkes. Die Gefährdung einer Schimmelpilzbildung sinkt.

In der Tabelle 4.2 wurden Temperaturmessungen an massiven Außenwänden bei verschiedenen Wohnungen protokolliert. Bei den Wohnungen 6, 7 und 8 erfolgte eine Temperierung der unteren Wandabschnitte durch die Warmwasserleitungen für die Heizkörper. Bei diesen Räumen konnten gegenüber den Wohnungen in der Tabelle 4.1 deutliche höhere Temperaturen an der Innenseite der Außenwand festgestellt werden. Die Oberflächentemperatur entsprach der Raumtemperatur bzw. war etwas höher. Damit erfolgt an dieser Bauteiloberfläche keine Durchfeuchtung. In diesen Räumen in der Tabelle 4.2 lagen keine Tauwassergefährdungen und auch kein Schimmel vor.

Tabelle 4.2: Oberflächentemperaturen an Außenwand mit Heizungsrohre

Objekt	Wohnung 6 2Fam. Haus, I. OG 36,5 Ziegel	Wohnung 7 MfH, II. OG WVS 8 cm Styropor	Wohnung 8 Bauernhaus Lehmwand EG
Datum/Uhrzeit	30.12.2007 18.00 Uhr	26.12.2007 16.00 Uhr	02.12.2007 11.00 Uhr
Außentemperatur	3 °C	-2 °C	4 °C
Raum	Wohnzimmer	Küche	Wohnzimmer
Raumtemperatur	19 °C	16 °C	19 °C
Temperatur Wandoberfläche, 1 m hoch	Keine Werte	13,8 °C	18 °C
Wandoberfläche über Fußboden	25 °C	14,6 °C	22 °C
Relative Luftfeuchte im Raum	Keine Werte	Keine Werte	50 %

Nachfolgend werden verschiedene praktische Lösungen als Schema in den Abb. 4.4.6 bis 4.4.8 gezeigt. Diese Heizleitungen führen warmes Wasser zu den Heizkörpern. Durch ihre Verlegung über den Fußboden an der Außenwand tragen sie gleichzeitig zur Temperierung der kritischen Wandabschnitte bei.

Abb. 4.4.6: Heizleitungen unter Putz, in Tabelle 4.2. Wohnung 8

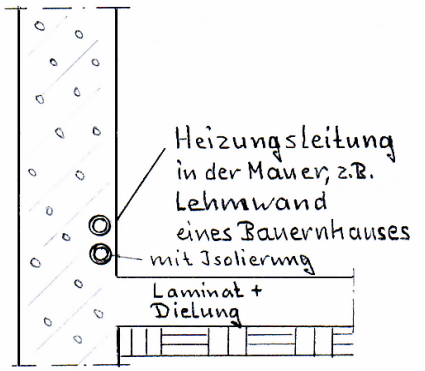


Abb. 4.4.7: Heizleitung über Putz und mit Sockelleiste verdeckt, Tabelle 4.2. in Wohnung 7

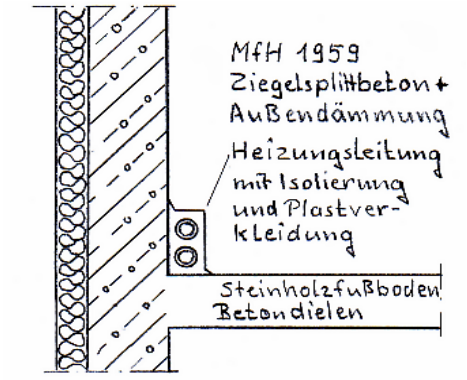
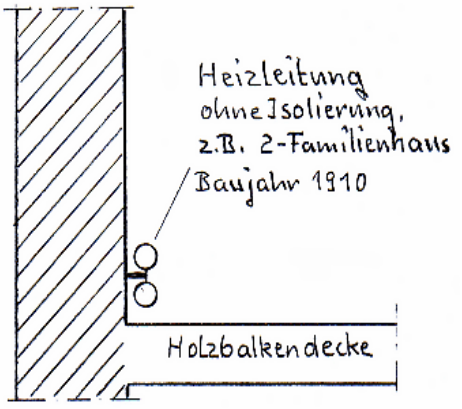


Abb. 4.4.8: Verlegung der Heizleitung in einer Sockelleiste, Tabelle 4.2. in Wohnung 6



Von der praktischen Ausführung kann die Strahlenheizung unverdeckt Abb. 4.4.9 oder wie in der Abb. 4.4.10 in einer Sockelleiste[377] verlegt werden. Durch entsprechende Metallleisten bzw. Lamellen auf den Rohren wird die Fläche der Strahlenheizung vergrößert und man kann dann auch den gesamten Raum beheizen. Ist eine Verlegung an der Außenwand nicht möglich, wie im denkmalgeschützten Bereich, so kann auch eine verdeckte Verlegung im Fußboden neben der Außenwand erfolgen. Hier besteht jedoch die Gefahr, wenn die Leitung nicht dicht ist, so ist diese mögliche Leckage erst spät feststellbar. Zum Beispiel bei Holzbalkendecken kann eine länger kontinuierliche Befeuchtung zu erheblichen Schäden an der Holzkonstruktion führen.

Abb. 4.4.9: Frei verlegte Heizleitungen im Sockel (Bild von Konrad Fischer)

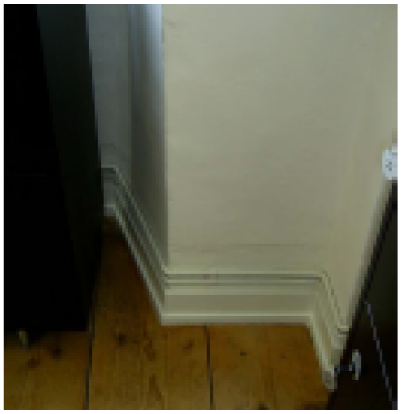


Abb. 4.4.10: Die Heizleitung befindet sich hinter der Holzverkleidung (Bild von Konrad Fischer)



Durch GNOTH[378] wird eine heizrohrgestützte Innendämmung untersucht. Bei diesen praktischen Versuchsdurchführungen erfolgte eine Temperierung der unteren Wandabschnitte. Durch

[377] Fischer, Konrad; Skript zum Vortrag, Konservatorische Temperierung Grundlagen, Planung, Ausführung, Arbeitsgemeinschaft Deutscher Schlösserverwaltungen Jahrestagung in Bayreuth vom 02.04.-04.04.2006

[378] Gnoth, Steffen; Hansel, Frank; Jurk, Kasten; Toepel, Torsten; Strangfeld, Peter; Hygrothermische Untersuchung der Balkenköpfe von Einschubdecken bei innengedämmten Außenwänden unter Einbeziehung der Heizungstechnik, Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken, Fraunhofer IRB Verlag 2003

die annähernd gleichen Temperaturen auf der Unter- und Oberseite der Holzbalkendecken (Abb. 4.4.11) kommt es zu einer ausgeglichen Temperierung auch im Wandquerschnitt des Auflagebereiches. In der Abb. 4.4.12 wurde die Heizleitung vor einigen Jahren sowohl über die Balkenköpfe als auch entlang des Streichbalkens verlegt. Damit wird der Auflagebereich temperiert.

Abb. 4.4.11: Durch die Randleistenheizung wird auch die Oberseite des Deckenbalkens temperiert und somit die Holzfeuchte auf der kritischen Oberseite (1) gesenkt.

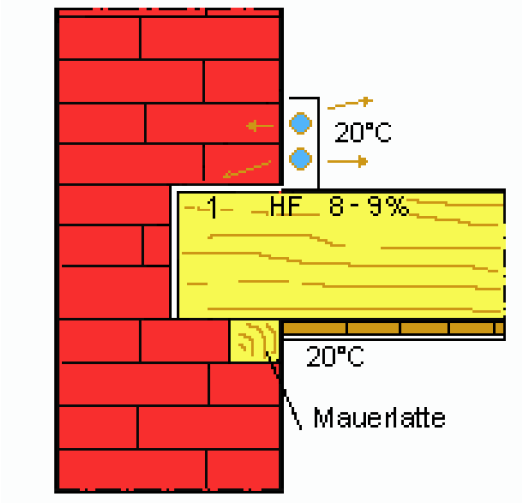
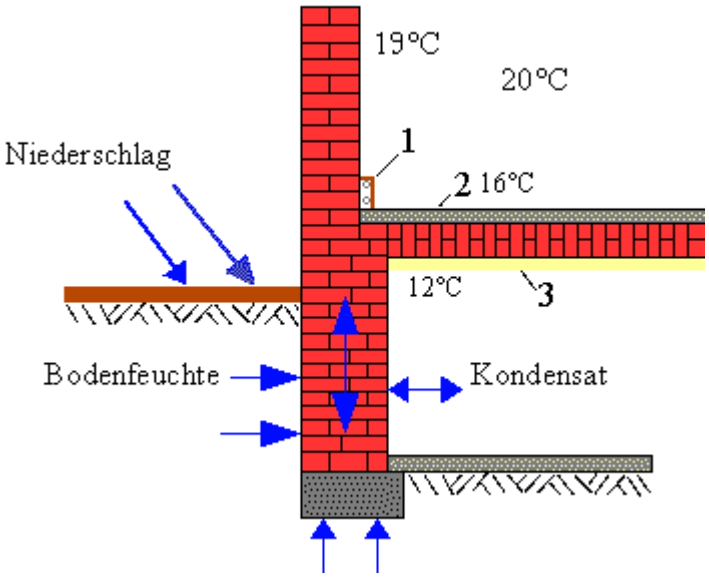


Abb. 4.4.12: Beispiel zur Verlegung der Heizleitung oberhalb der Balkenköpfe



Das Problem der Durchfeuchtung des Fußbodens am Wandanschluss in der Erdgeschosswohnung lässt sich am besten durch eine Temperierung beseitigen. Durch die zusätzliche Randleistenheizung an der Außenwand wird die Oberflächentemperatur erhöht (Abb. 4.4.13).

Abb. 4.4.13: Temperierung des kritischen Wandabschnittes in der Erdgeschosswohnung mit einer Dämmung an der Decke des Kellers (3) und einer zusätzlichen Leistenheizung (1) und einem diffusionsoffenen Fußbodenaufbau (2)



Damit lässt sich jedoch nicht die gesamte Fußbodenfläche am Randbereich zur Außenwand temperieren. Eine Verbesserung der Eigenschaften der Wärmedämmung des Fußbodenaufbaus über der Kappe ist zu empfehlen. Kann diese nicht auf der Oberseite der Deckenkonstruktion erfolgen, so ist eine nachträgliche Dämmung an der Unterseite anzubringen. Zu beachten ist dabei, dass die Feuchte nicht durch diffusionsdichte Schichten eingeschossen wird. Da heute auf den Fußboden dichte Fußbodenbeläge oder Bodenfliesen verlegt werden, ist wenigstens der Schichtaufbau nach unten diffusionsoffen auszuführen. Ist der Kellerraum sehr feucht, ist es sehr kompliziert, da dann Feuchte durch diese Konstruktion aufgenommen wird. An der Oberseite unter der Sperrschicht kommt es zum Feuchtestau. Zwar erfolgt ein Feuchtetransport von oben in Richtung Keller durch den Temperaturunterschied, aber nur, wenn auch eine Differenz zwischen der Enthalpie vorliegt. Die Höhe der absoluten Feuchte und Temperatur bestimmt die Größe der Enthalpie. Aus feuchtetechnischer Sicht ist der Keller so trocken wie möglich zu halten. Dazu ist auch eine ausreichende Temperierung erforderlich. Die Isolierung der Heizrohre

im Keller ist aus feuchtetechnischer Sicht Unsinn, da durch die Temperierung die Feuchte im in den Kellerräumen verringert wird.

Mit der Leistenheizung können in einer Kellergeschosswohnung ebenso die kühlen Wandflächen über dem Fußboden temperiert werden. Hier bietet sich auch eine Kopplung mit einer Solarheizung an, da während der wärmeren Jahreszeit die Heizung in der Regel abgeschaltet wird. Die gelieferte Wärme durch die Solarplatten ist ausreichend, um auch im Sommer die kritischen unteren Wandabschnitte zu temperieren. Es kann aber auch die weiter unten beschriebene Heizfolie zur Anwendung kommen. Die Bodenplatte und die Außenseite der Kellerwand sind entsprechend zu dämmen.

Eine ähnliche indirekte Temperierung der unteren Außenwandabschnitte dürfte auch durch eine Fußbodenheizung erfolgen. Wie gut eine Reduzierung der Feuchte der Wandauflager der Balkenköpfe erfolgt, ist nicht bekannt und müsst in der Praxis untersucht werden. Nach bisherigen Erfahrungen sollte sich dies auf jedem Fall positiv auswirken. So wurde zum Beispiel in einem älteren Bauernhaus der Fußboden im Erdgeschoss vollständig erneuert und mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Die Wände im Erdgeschoss bestehen aus Bruchsteinen, es sind keine Feuchtesperren vorhanden und zusätzlich liegt einer Salzbelastung durch den seit vielen Jahren gelagerten Misthaufen an der Rückseite des Hauses vor. 2 Jahre nach der Sanierung sank die Luftfeuchte im Raum auf unter 40 %. Die Wände waren alle trocken.

Es gibt verschiedene Ausführungsvarianten einer Fußbodenheizung. Genannt werden soll hier ein sehr dünnes Metallträgerprofil (10 bzw. 20 mm), in den die dünnen Heizschläuche eingelegt und mit einem 5 mm dicken Kunststoffestrich versiegelt werden. Dieses System kann auch auf einen alten Dielenbelag im Altbau verlegt werden.[379] Analog lässt sich dies auch mit einer elektrischen Infrarotheizfolien realisieren. Diese Heizfolien lassen sich auch als Tapetenheizung verwenden.

---

[379] Firmenschrift, max[4] therm, Super flaches Fußboden-Heizsystem für Altbausanierung und Neubau, Lindner Armaturen GmbH, Kurze Str. 10, D-09117 Chemnitz, www.max4therm.de 10.2004

Beispiel 6: Einsatz einer elektrischen Infrarotheizfolie zur Oberflächentemperierung und Trocknung kritischer Bauteile speziell im Fußbodenbereich

Nicht überall steht eine Warmwasserheizung zur Verfügung, bzw. eine nachträgliche Installation der Leistenheizung ist nicht möglich. Das nachfolgende Beispiel zeigt eine Anwendungsmöglichkeit, wo eine Infrarotheizung mit Elektroenergie betrieben wird. (Auf die Frage der energiewirtschaftlichen Nutzung von Strom zum Zweck der Heizung soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.) Diese hauchdünne Heizfolie (Abb. 4.4.14) wird direkt auf die Wand aufgeklebt und kann anschließend mit einer Tapete überklebt werden. Diese Strahlungsheizung ist für die Beheizung von Räumen entwickelt worden. Ihr Einsatz ist aber auch als zusätzliche Heizung für die Temperierung kühler Wandflächen möglich.

Abb. 4.4.14: An einer Innenwand angeklebte Heizfolie (Bild oben) und mit Tapete überklebt (Bild unten).



Diese Folie gibt es auch in einer Breite von 20 cm. Die Heiztemperatur bleibt unter 30 °C, sodass sich diese Heizfolie neben der äußerst geringen optischen Beeinträchtigung überall an feuchtegefährdeten Wandabschnitten verlegen lässt. Dieser Streifen Heizfolie kann auch auf der

Außenwand hinter einem Schrank, einer großen Sitzecke oder in einer Nische verlegt werden. Ebenso ist auch eine Anwendung in der Kellerwohnung im unteren Abschnitt der Außenwand möglich.

Diese Infrarotheizung mit der Wellenlänge von 8 bis 10 µm gibt nicht nur eine Wärmestrahlung in den Raum ab, sondern auch an die angrenzende massive Wand, sodass diese erwärmt wird und so auch eine bedingte Wärmespeicherung erfolgt. Je nach Baustoff und eingebrachter Wärme kann die Wandoberfläche auch nach Abschaltung der Energiezufuhr noch lange Zeit Wärme in den Raum strahlen. Durch dieses System verlagert sich die Feuchteverteilung von der kritischen Wandfläche auf andere meist größere Wandoberflächen. Damit verbessert sich die Wirksamkeit die Adsorption und Desorption der Raum umschließende Wandoberfläche. Der Betrieb dieser Infrarotheizung ist nur so lange erforderlich, wie eine niedrige Oberflächentemperatur am kritischen Wandabschnitt vorliegt.

4.5. Trocknungsverfahren

4.5.1. Trocknungsgeräte

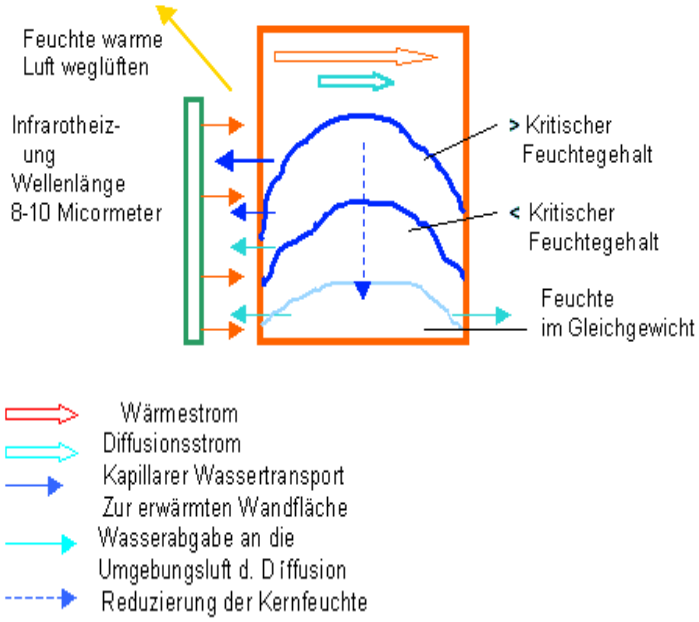
Trocknungsgeräte werden meist dann benötigt, wenn Wasserleitungsschäden auftreten oder noch eine Baufeuchte vorliegt. Der Kondensattrockner kühlt die eingesaugte Luft um 10 K ab und die Feuchtigkeit in der Luft taut aus und wird in einem Behälter aufgefangen. Die trockene Luft (absolute Luftfeuchte ist geringer) wird wieder zurück in den Raum geführt. Diese kann so wieder Feuchtigkeit von den feuchten Bauteilen aufnehmen. Diese erfolgt solange, bis sich zwischen der Raumluft und den Bauteilen ein Feuchtegleichgewicht einstellt.. Meistens erfolgt diese Trocknung auch in Kombination mit einem Umluftgebläse. Mit dieser Technologie lassen sich zum Beispiel auch durchnässte Holzbalkendecken trocknen, in dem in die Balkenfelder über entsprechende Bohröffnungen mit Schläuchen Luft in die Fehlböden eingeblasen wird.

4.5.2. Infrarotstrahlung

Das Prinzip der Abtrocknung durch die Infrarotstrahlung beruht auf eine Jahrtausende alte Erfahrungstatsache, dass eine direkte Sonnenstrahlung eine effektive und materialschonende Trocknungsmethode ist. Zu erst wird die Kernfeuchte über den Kapillarsog und später durch

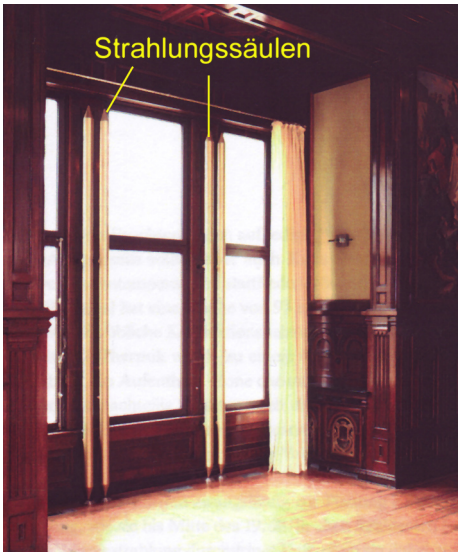
die Diffusion reduziert, bis sich ein Feuchtegleichgewicht zwischen Mauerwerk und Umgebungsluft einstellt, siehe Abb. 4.5.1.

Abb. 4.5.1: Schematische Darstellung der Trocknung feuchter Mauerwerke mit einem Infrarotstrahler



Für den ständigen Betrieb zur Vermeidung von Kondenswasser an der Wandoberfläche und gleichzeitig als Heizung kommen verschiedene Strahlungsheizungen zur Anwendung. Wie zum Beispiel Wandheizungen, Sockelheizungen, Strahlplatten und andere Konstruktionen. (Siehe hier Beispiele im Pkt. 4.4.). Damit wird eine Hüllflächentemperierung erreicht. In der Abb. 4.5.2 wird eine besonders interessante Lösung gezeigt. Der Saale des Schlosses wurden früher mit einer Strahlenheizung beheizt. In den 60-iger Jahren wurden diese durch eine Konvektionsheizung ersetzt. Als Folge wurden die massiven Ziegelsteinwände immer feuchter und es entstanden viele Feuchteschäden. Durch die Strahlungssäulen wird die Kondenswasserbildung an den dicken massiven Wänden vermieden.

Abb. 4.5.2: In diesem Schlosssaal kam es selbst an den Innenwänden durch Kondenswasserbildung zu Feuchteschäden. Durch die Strahlenheizung (Säulen) wurde eine gleichmäßige Temperierung erzielt und die Raumfeuchte reduziert. [380]



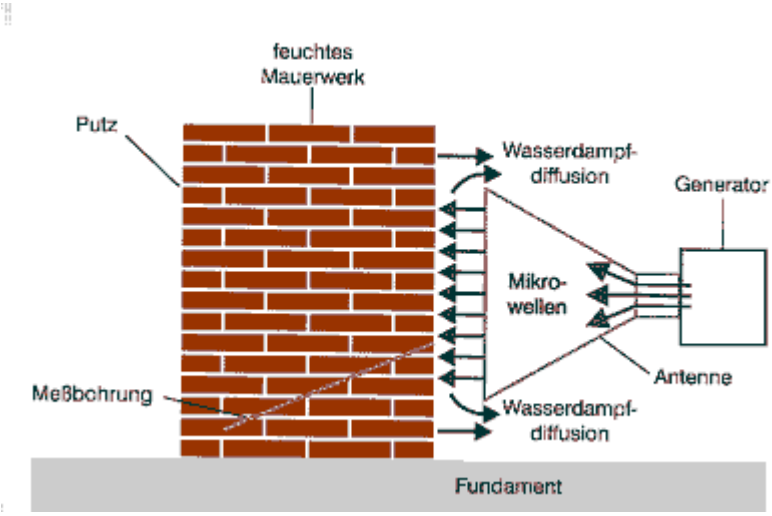
4.5.3. Mikrowellentrocknungsverfahren

Das Mikrowellentrocknungsverfahren (Abb. 4.5.3) ist auf eine kleinere Fläche ausgerichtet und muss durch entsprechend fachlich geschultes Personal bedient und beaufsichtigt werden. Die Wassermoleküle im betreffenden feuchten Bauteil reagieren aufgrund ihres Dipols [1)] und erwärmen sich durch Molekülreibung. Infolge dessen findet eine erhöhte Wasserdampfdiffusion statt. Die Trocknung erfolgt nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Kernbereich des Bauteils. Dabei spielt die Mauerstärke und die Geometrie des Baukörpers keine Rolle.

[1)] Im Wassermolekül benutzt der Sauerstoff seine beiden einfach besetzten p_y- und p_z -Orbitale zur Bindung. Da diese aufeinander senkrecht stehen, sollte der Winkel im H-O-H-Molekül 90º betragen. Durch die abstoßende Wirkung der beiden Wasserstoffatome wird er jedoch verzerrt und beträgt 104º.

[380] *Schmidt, Joachim; Wärme wie vom Sonnenschein, gas 3 2007, S. 26*

Abb.4.5.3: Funktionsprinzip der Mikrowellentrocknung[381]



Laut der o. g. Aussage erfolgt die Abtrocknung über die Diffusion. Zu der weit günstigeren anfänglichen Trocknung über den kapillaren Wassertransport erfolgt keine Aussage.

Durch die lokale Wärme geht das Wasser in einen gasförmigen Zustand über. Der damit auftretende Druck weicht von den normal vorliegenden Wasserdampfdrücken in einer Wand ab. Es könnten lokale Schädigungen in der Materialstruktur auftreten. An den angrenzenden kühleren Bauteilabschnitten kondensiert das Wasser wieder. Das Kernkondensat wird so verlagert. Für lokale und schlecht zugängliche Bereiche sowie starkes Mauerwerk sicherlich ein geeignetes Verfahren. Bei geschlossenzelligen Strukturen mit wenigen Kapillaren zwischen den Zellen (Gasbeton) und Baustoffen mit kleinen Poren und Kapillaren, wie zum Beispiel Schwerbeton, dürfte eine zufriedenstellende Entfeuchtung im Kernbereich erreicht werden. Weitere Anwendungsgebiete sind die thermische Bekämpfung von Holzschädlingen. Gegenwärtig erfolgt eine Entwicklung von Messfühlern zur Kontrolle der Temperaturabläufe in den Baukörpern.

4.5.4. Temperaturgeregelte Heizstabtechnologie

Der Einsatz der temperaturgeregelten Heizstabtechnologie kommt zur Austrocknung des Mauerwerkes im Rahmen von Bohrlochinjektionen speziell im Parafinheißverfahren zum Einsatz. Damit kann eine großflächige technische Trocknung des Mauerwerks ausgeführt werden.

---

[381] *Firmenschrift MTB Microwellen Trocknungsgeräte GmbH, Am Kanal. Geb. 25 D-15749 Mittenwalde*

In das Mauerwerk werden Bohrungen angelegt, in diese werden die Spezialheizstäbe eingebracht und mit Temperaturregelgeräten und spezieller Temperaturmessfühlern gesteuert.
Diese Technologie fand Anwendung zur Mauerwerkstrocknung (Löschwasser) nach dem Brand der Herzogin Anna Amalia Bibliothek in Weimar.[382]

4.6. Die Mauerfeuchtigkeit und die Funktionsweise ausgewählter Putzsysteme

4.6.1. Der Einfluss der Mauersalze auf den Feuchtetransport an Bauteiloberflächen

Bei älteren Mehrfamilienhäusern sind besonders die unteren Wandabschnitte durchfeuchtet. Das sind vorwiegende die Kellerräume bis etwa zur Höhe der Fenster im Erdgeschoss, siehe Abb. 4.6.1. In vielen Fällen ist auch eine mittlere bis höhere Salzbelastung im Ziegelmauerwerk vorhanden.

Abb. 4.6.1: Beispiele zu Feuchteschäden am unteren Mauerwerk bis zum Fenster des Erdgeschosses, in Leipzig



Gerade im Gründungsbereich liegen zwei verschiedene Feuchtigkeitsursachen vor. Das ist die Feuchtigkeit, die von außen über den Erdboden oder als Spritzwasser in die Konstruktion eindringt und das Kondenswasser von innen. Letztere tritt gerade im Sommer an schwülwarmen

[382] *Keppeler, Stephan; Schadensgeschwister: Feuer und Wasser, Bauen im Bestand B+B 7/06, S. 46f*

Tagen auf. Abhängig von den speziellen Baustoffeigenschaften, der Einwirkungszeit und Feuchtebelastung werden Salze aus dem Boden in das Mauerwerk transportiert oder auch aus den Baustoffen selbst heraus gelöst. Die höchste Salzbelastung liegt an der Verdunstungsoberfläche vor, siehe Abb. 4.6.2. Wobei die Salzkonzentration in den Mörtelfugen meistens höher ist. Im Extremfall wird der Mauermörtel vollständig zerstört.

Abb. 4.6.2: Schema der Salzablagerung an der Verdunstungsoberfläche.



Nach dem erfolgreichen Aufbau einer Vertikalabdichtung und eventuell zusätzlich noch einer Horizontalabdichtung wird von außen keine weitere Feuchtigkeit mehr "nachgeliefert". Die sich im Mauerwerk befindliche Feuchtigkeit kann jetzt nur noch nach innen entweichen. Zur besseren und schnelleren Trocknung ist die Innenwandfläche zu temperieren und ein gezielter Luftaustausch vorzunehmen.

Wichtig ist, dass im ungestörten Feuchtehaushalt einer Wand die Verdunstung jener Mechanismus ist, welcher der Wasseraufnahme entgegenwirkt. Kapillar brechende und verdunstungsoffene Wandflächen verhindern im Wesentlichen eine zu starke Durchfeuchtung. Die Oberflächenstruktur einer feuchten und salzbelasteten Wand ist entscheidend für die Funktionsfähigkeit der Verdunstungsoberfläche. Für offenporige Konstruktionen ist ein niedriger μ-Wert vorteilhaft, zum Beispiel gilt für ein Ziegelmauerwerk etwa $\mu = 8$, da die Entfeuchtung ungehindert und schnell ablaufen kann. Durch die Salzablagerung wird aber dieser Wert wesentlich erhöht und kann sich in Richtung $\mu = 100$ bewegen. Die Diffusion (Austausch von Wasserdampf- und Luftmolekülen) wird dann an dieser Grenzschicht sehr stark behindert.

Mauersalze sind sehr hygroskopisch und nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf. Es kommt im ungünstigen Fall zu einem ständigen Wechsel zwischen der gelösten Phase und der Auskristallisierung und somit zur langsamen Zerstörung des Mauerwerkes und des Putzes. Kristallisiert das Salz an der Wandoberfläche aus, so kann es trocken abgebürstet werden. Bei mittlerer oder höherer Salzbelastung ist das ein langwieriger Prozess, wobei ein Teil des Salzes die Oberfläche der Mauersteine zerstört, siehe Abb. 4.6.3. Durch einen offenporigen Putz wird die Salzablagerungszone in den Putz oder an die Putzoberfläche verlagert. Das Mauerwerk wird so langsam, zum Teil auch sehr langsam entsalzen und nicht mehr durch den Kristallisationsdruck geschädigt.

Abb. 4.6.3: Bei diesem Außenmauerwerk haben die Salze den Mauermörtel vollständig zerstört und die Fugen sind freigelegt.



Wird zum Beispiel ein Luftkalkputz aufgetragen, so lagern sich die Salze im Kalkputz ab. Es gibt auch Kompressen oder elektrophysikalische Verfahren (siehe Pkt. 4.3.3.3), die in der Entsalzung des Mauerwerkes Anwendung finden. Es soll hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass eine 100%ige Entsalzung nur durch den kompletten Austausch des geschädigten Mauerbereiches erfolgen kann.

Wurden bei den älteren Häusern im Innenbereich vorwiegend Kalkputze verwendet, so bestehen die Fassaden heute aus vorgesetzten Klinkern, Kalkzementputz bzw. hydraulische Kalke, aus Zementputz oder kunststoffmodifizierte Putze. Der Sockel wurde aus Klinker, Zementputz oder Naturstein gefertigt. Durch diese Baustoffe selbst erfolgt eine Sperrwirkung durch den höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand. Die Feuchtigkeit aus dem Wandquerschnitt kann nicht vollständig entweichen, sodass sich die Verdunstungszone nach den Seiten und nach oben verschiebt. Bei der Verdunstung lagern sich mehr oder wenig Salze an der Oberfläche ab. Dies ist an den jeweiligen Schichtablagerungen der Salze auf der Putzoberfläche gut erkennbar, siehe Abb. 4.6.1. Und 4.6.3. Zusätzlich tritt aber auch eine Schichtgrenze zwischen Putz und Mauerwerk auf. Diese behindert den kapillaren Feuchtetransport und wirkt sich so ungünstig auf die Abtrocknung feuchter Mauerwerke aus. KRUS, KÜNZEL, KIEßL[383] vermuten, „*dass die Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze durch Kristallbildung von Salzen aus dem Putz ‚verstopfen'.*“ Dabei handelt es sich um eine Widerstandsschicht von 1 mm, der abhängig von der Materialkombination ist. Diese verringert den Flüssigtransportkoeffizienten um einen Faktor von 200 bis 2000. Dieser Verschluss der Poren durch Salze an der Baustoffoberfläche beschränkt sich aber nicht nur auf die Putze, sondern auch auf Oberflächen des Mauerwerkes.

4.6.2. Wirkungsweise des Opferputzes oder Kompressenputzes

Der Feuchtigkeits- und Salztransport in einem Kalkputz (Mörtelgruppe I) ist ungehindert. Die gelösten Salze werden durch das kapillar wandernde Wasser bis an die Verdunstungsoberfläche des Putzes geführt (Abb.4.6.4). Hier kristallisieren die Salze abhängig von der angrenzenden relativen Luftfeuchte aus. Mit der Kristallisierung in der oberflächennahen Schicht wird die Diffusionsfähigkeit des Kalkputzes mit einem ursprünglichen μ-Wert von 10 bis 20 auf eine Größenordnung von circa 100 erhöht und die Dampfdiffusion ist eingeschränkt.[384] Zum Vergleich; eine 1,2 mm starke Dachpappe hat etwa den gleichen Diffusionswiderstand. Ein salzbelasteter Kalkputz trägt nicht mehr zur Entfeuchtung des Mauerwerkes bei. Durch die lockere Struktur wird dieser Putz auch sehr schnell zerstört. Je nach Belastung reicht die Standzeit wenige Monate bis einige Jahre. Der Vorteil dieser Methode ist in der preisgünstigen Ausführung und die

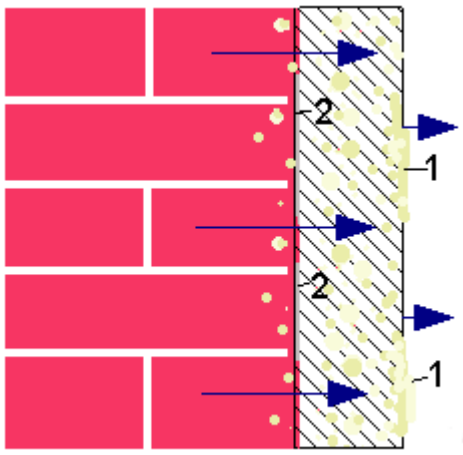
---

[383] Krus, Martin; Künzel, Hartwig M.; Kießl, Kurz; Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk –Messung und Berechnung, 1996, Fraunhofer IRB Verlag, S. 70
[384] Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff

Aufnahme der Mauersalze (daher auch als Opferputz bezeichnet) zu sehen. Im Ergebnis einer Untersuchung konnte kein merklicher Rückgang der Salzkonzentration im Mauerwerk nachgewiesen werden.[385] Als Nachteil sind die schnelle Zerstörung und die begrenzte Frostbeständigkeit zu sehen. Für die Sanierung einer Wohnung mit einer Salzbelastung des Mauerwerkes ist dieser Putz wenig geeignet. Tapeten neigen an den betreffenden Wandabschnitten schnell zur Schimmelpilzbildung. Statt Tapeten sind hier Kalkfarben zu verwenden, wenn sich hygroskopische Salze an der Wandoberfläche ablagern.

Abb. 4.6.4: Kapillare Wasserwanderung und Salzverteilung bei kapillaraktivem Kalkputz sowie Grenzschicht zwischen Mauersteinen und Putz

1 = Verdunstungs- und Salzablagerungszone an der Putzoberfläche;
2 = Grenzschicht zwischen Mauerstein und Putz



4.6.3. Zementgebundene Putze (sogenannter Sperrputz)

Diese Putze der Mörtelgruppe III finden vornehmlich als Abdichtung im erdberührenden Mauerabschnitt, als mechanisch beanspruchter Sockelputz oder auf der Kelleraußenwand Anwendung. Diese Putze haben eine geringe Dampfdurchlässigkeit und Wasseraufnahme, sodass die Feuchtigkeit nur im geringen Umfang in den Putz eindringt. Gerade hier an der Grenzschicht zwischen Mauerwerk und Putz erhöht sich der Flüssigtransportkoeffizienten sehr stark. Der Feuchtetransport gegenüber einem Kalkputz ist damit sehr viel geringer.

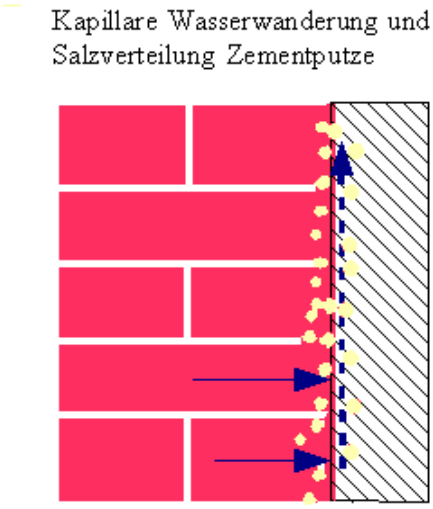
---

[385] *Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff*

Die anstehende Feuchtigkeit sucht so neue Verdunstungsflächen, die sich in der Regel nach oben oder auch zur Seite verlagern und sich außerhalb dieser Putzschicht befinden, [386] siehe Abb. 4.6.5. Aufgrund der schlechten Verdunstung kommt es gleichzeitig zur Feuchteerhöhung des unteren Außenmauerwerkes im Erdgeschoss sowie Teile der gemauerten Kappe. Die Mauersalze verbleiben in der Grenzschicht Mauerwerk und Putzschicht. Die Konzentration erhöht sich an dieser Stelle sogar durch den ständigen Transport aus dem Wandquerschnitt. Die Zerstörung des Mauerwerkes durch Kristallisationsdruck usw., geht ungemindert weiter.

Weiterhin hat Zementputz eine mehr als doppelt so große Ausdehnungszahl wie die von Ziegeln. Durch die Starre können sich Haarrisse bilden, wo kapillar Wasser angezogen wird und so zusätzlich die Wanddurchfeuchtung begünstigt. Dies führt gerade bei Fassaden im Fachwerkbau zu Feuchteschäden.

Abb. 4.6.5: Die Mauersalze lagern sich in der Grenzschicht zwischen Putz und Mauerwerk ab. Die Feuchte sucht neu Verdunstungsflächen und wandert so in anderen Wandabschnitt.



Erfolgt ein zweilagiger Putzaufbau, so ist die obere Schicht nicht fester als die darunter liegende auszuführen, weil sie dann nachgiebiger ist und das Schwinden des fetten Unterputzes, sowie die Temperaturspannung des Untergrundes ausgleicht.[387] In der Abb. 4.6.6 wird eine Putzerneuerung im Sockelbereich gezeigt. Deutlich ist die Verlagerung der Verdunstungsfläche zu sehen.

---

[386] *Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff*
[387] *Scholz, Wilhelm, Hiese, Wolfram u.a.; Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag GmbH Düsseldorf , S. 361*

Abb. 4.6.6: In diesem Sockelbereich ist die Grenze der Durchfeuchtung gut erkennbar.



4.6.4. Funktionsweise eines Sanierputzes

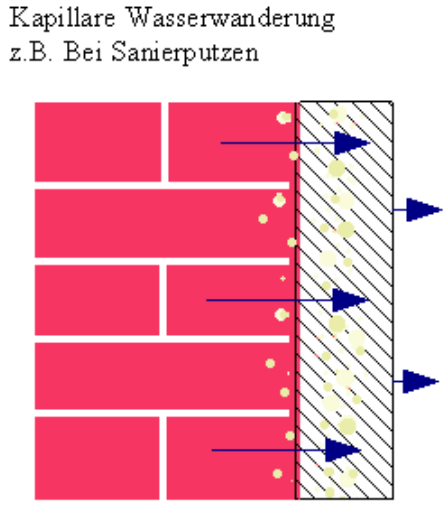
Die Wirkungsweise der ein- und zweischichtigen Sanierputze beruht darauf, dass eine gewisse kapillare Saugfähigkeit im Putzsystem erhalten bleibt, um vorhandene Salze in das Putzsystem zu transportieren aber diese nicht bis an der Oberfläche ablagert, siehe Abb. 4.6.7. Ein großes Luftporenvolumen schafft Lagerräume für die Salze. Die Struktur des Putzes (Kapillarporensystem) ist so aufgebaut, dass die Feuchtigkeitsabgabe des Mauerwerks nicht behindert wird. Die Verdunstung der Feuchtigkeit erfolgt im Putz selbst und wird nicht kapillar bis an die Oberfläche geleitet, um die Salzablagerung im Inneren des Putzes zu belassen. Damit wird die Gesamtoptik der salz- und feuchtebelasteten Wand langfristig verbessert.

Verbleiben Salze nach einer Horizontal- und oder Vertikaldichtung im Mauerwerk, so können diese erneut zu Bauschäden bzw. Durchfeuchtungen führen.[388] Mithilfe der Sanierputze wird die bauschädliche Salzwirkung reduziert. Die Sanierputzsysteme können unter extremen Bedingungen mindestens 10 Jahre und bei mittlerer Salz- und Feuchtebelastung Jahrzehnte optisch schadensfreie Mauerwerke und Fassaden ergeben.[389] Die Praxis zeigte jedoch auch wesentlich geringere Standzeiten, die in einem ausgebauten Architekturbüro in einem Kellergeschoss le-

[388] *Wolf-Peter Ettel, u.a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992, Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 91*
[389] *Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff*

diglich 2 Jahren betrug. Bei diesem Standort zeigen die Ziegelsteine in den benachbarten Kellern eine sehr hohe Salzbelastung, welche mehre Zentimeter tief durch den Kristallisationsdruck der Salze zerkrümelt waren. Der Leistungsfähigkeit dieser Putzsysteme sind auch Grenzen gesetzt.

Abb. 4.6.7: Bei Sanierputz lagert sich das Salz in der Putzschicht ab und kann so das Mauerwerk nicht mehr schädigen.



Durch die hydrophobe Ausrüstung von Sanierputz-WTA kann die anstehende Feuchtigkeit nur ca. 5 mm kapillar eindringen. Die restlichen 15 mm der 2 cm Putzstärke muss die Feuchtigkeit per Diffusion überwinden. Je länger der Diffusionsweg ist, umso größer wird der Diffusionswiderstand und die Austrocknungsleistung verringert sich. Daher wird die maximale Putzstärke auf 40 mm beschränkt. Bei 23 ºC verdunsten bei 15 mm Putzstärke etwa 140 g/m²d Wasser und bei einer Diffusionsstrecke von 35 mm nur noch 60 g/m²d.[390] Der Putz hat eine Druckfestigkeit < 6 N/mm². Das Porenvolumen des Festmörtels liegt bei über 40 Vol.-% und die Wasserdampfdiffusion bei $\mu < 12$.[391] der Putz hat aber auch die Aufgabe das Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk zu verhindern. Die Eigenschaften werden durch die Zusammensetzung des Putzes bestimmt. Die Porosität wird durch Tensidluftporen oder Leichtzuschläge erreicht. Zusätze von hydrophobierend wirkenden Additiven beeinflussen die kapillare Wasserwanderung im Ka-

[390] *Erfurth, Uwe; Was sind Wunder, was ist Wirklichkeit? Bauen im Bestand B+B 7/06, S. 26f*
[391] *Scholz, Wilhelm, Hiese, Wolfram u.a.; Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag GmbH Düsseldorf , S. 361*

pillarporensystem.[392] Weiterhin werden die Eigenschaften auch durch mineralische Bindemittel, wie zum Beispiel Mariensteiner Kalk, Portlandzement oder Trasszement, bestimmt.

In einer Untersuchung 1992/1994 im Bereich einer Schlossanlage in Oberschleißheim wurden 18 verschiedene Putze bzw. Putzsysteme einbezogen. "*Die mit Abstand besten Ergebnisse in Bezug auf den Salzeintrag erreicht man mit zementgebundenen, einschichtigen oder zweischichtigen Sanierputzsystemen nach WTA-Merkblatt 2-2-91. Diese zeigen auch unter den extremen Verhältnissen des Versuchs nach mehreren Jahren Standzeit keinen Salzdurchtritt. Im Gegenteil, der Salzeintrag erfolgt langsam und im Sinne des Wirkungsprinzips der Sanierputze. ... Die Sanierputze auf der Basis anderer hydraulischer Bindemittel zeigen eine höhere Salzbefrachtungsrate, sodass sich insgesamt mit Sicherheit eine geringere Lebensdauer ergibt*."[393] Die Untersuchung lieferte kein einwandfrei zuordnungsfähiges Ergebnis in Bezug auf eine Veränderung der Feuchtegehalte im Mauerwerk. Eine Entfeuchtung des Mauerwerkes mit allen aufgebrachten Putzsystemen, ob klassische WTA-Sanierputze, reine kalkhydratgebundene Putze und sogenannte Entfeuchtungsputze wurden nicht erreicht.[394] Allerdings kann dem Bericht nicht entnommen werden, ob mit der Versuchsdurchführung auch die Feuchtigkeitsursachen beseitigt wurden.

Speziell für feuchtes Mauerwerk entwickelte Putze beinhalten eine optimale Verteilung von verschiedenen großen Poren und eine günstig ausgeprägte Kapillarität. Das flüssige Wasser kann so beliebig weit transportiert und somit fast ungehindert durch die Putzschicht geleitet werden. Besteht der darunter befindliche Wandbaustoff aus gröberen oder unvollkommeneren Kapillaren, so wird dieser Wandbaustoff geradezu "trockengesaugt". Verantwortlich ist ein kleiner Flüssigtransportkoeffizient der Schichtgrenze zweier in hygrischem Kontakt miteinander stehenden Baustoffen mit unterschiedlicher Kapillaraktivität. Zu beachten ist aber auch die Schichtgrenze zwischen Putz und Mauerwerk, die zur Behinderung des kapillaren Feuchtetransportes führt.

Es kann aber nur so viel Feuchte kapillar weitertransportiert werden, wie das Mauerwerk auch liefert. Kapillare Transporte finden nur bei hoher Feuchte statt. Die übrige Wandfeuchte kann dann nur noch über Diffusion entweichen. Durch die niedrige Dampfdiffusionswiderstandszahl

---

[392] Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff
[393] Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff
[394] Weber, Helmut; 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz - Ein Erfahrungsbericht, ARCONIS 1/97, S. 42ff

μ dieses Putzes kann die Entfeuchtung ungehindert und schnell ablaufen. Durch die selbstregulierende Verdunstungszone kommt es zur Verteilung der Salze in den Poren aber auch unter Umständen zur Salzausblühung an der Putzoberfläche. Der Vorteil besteht darin, dass für lange Zeit keine "Sperrschicht" durch auskristallisierte Mauersalze innerhalb der Putzschicht und zum Wandbaustoff aufgebaut wird. Es kann so über einen langen Zeitraum eine gute Feuchteregulierung erfolgen und zusätzlich wird die Steighöhe der Feuchte verringert.
Im Außenbereich hat dieser Putz den Nachteil, da sich der ablaufende Regen mit der Feuchtigkeit im Untergrund verbindet. Daher muss er bei einer Anwendung im Außenbereich hydrophobiert werden.[395]

Die Sanierputze finden als flankierende aber auch als alleinige Instandsetzungsmaßnahme Anwendung. An Tauwasser gefährdenden Wandabschnitten, zum Beispiel im Erdgeschoss über der Kappe, wird die zusätzlich wirkende hygroskopische Feuchte (Mauersalze) reduziert, was sich günstig auf das Feuchtegleichgewicht zwischen der Wandoberfläche und der angrenzenden Luftschicht auswirkt. Durch die Reduzierung der Feuchte an und in der massiven Wandkonstruktion wird die mögliche biologische Schädigung reduziert. Das sind auch empfehlenswerte Maßnahmen im Rahmen einer Hausschwammsanierung bei feuchtem salzbelasteten Mauerwerk.

Zusammenfassend ergeben sich nachfolgende positiven Aspekte für einen Sanierputz:

- Die Putze finden als flankierende aber auch als alleinige Instandsetzungsmaßnahme Anwendung.
- Verbleiben Salze nach einer Horizontal- und oder Vertikaldichtung im Mauerwerk, so können diese erneut zu Bauschäden beziehungsweise zu einer Durchfeuchtung führen.[396] Mithilfe der Sanierputze wird die bauschädliche Salzwirkung reduziert.
- Sie führen zwar zu keiner merklichen Reduzierung der Salzkonzentration im Mauerwerk, aber der Salzeintrag erfolgt in eine Schicht, wo die geringste schädigende Wirkung auftritt (3 bis 7 mm vom Mauerwerk). Es werden die zerstörenden mechanischen Wirkungen durch Hydrations- und Kristallisationsvorgänge im Mauerwerk wesentlich reduziert.
- Die hygroskopische Wasseraufnahme wird wesentlich reduziert und damit ein günstigeres Verhältnis des Feuchtegleichgewichts zwischen der Wandoberfläche und der angrenzen-

---

[395] Erfurth, Uwe; Was sind Wunder, was ist Wirklichkeit? Bauen im Bestand B+B 7/06, S. 26f
396 Ettel, Wolf-Peter u. a.; Bautenschutztaschenbuch, 1992, Verlag für Bauwesen Berlin München, S. 91

den Luftschicht erzielt. Welches sich wiederum günstig auf das Raumklima auswirkt.

- An tauwassergefährdenden Wandabschnitten, zum Beispiel im Erdgeschoss über der Kappe, wird die zusätzlich wirkende hygroskopische Feuchte (Mauersalze) weitestgehend unterbunden. In Verbindung mit einem richtigen Heizen und Lüften wird ein durchfeuchtetes Mauerwerk schneller trocken.
- Es wird eine langzeitliche optische Verbesserung ohne Salzausblühung erzielt.

Nachteile sind:

- Höhere Kosten,
- ungünstigere Verarbeitung,
- die Oberfläche kann nur verrieben aber nicht geglättet werden und für Oberflächen sind nur diffusionsoffene Beschichtungen anwendbar.

5. Mauersalze

5.1. Mauersalze und die Durchfeuchtung des Mauerwerkes

Leicht lösliche salzartige Substanzen aus dem Baustoff über oder von außen gehen bei Feuchteeinwirkung in Lösung über. Der Transport erfolgt im flüssigen Wasser an die Bauteiloberfläche und das Salz kristallisiert bei einer Verdunstung aus. Der Wasserdampf bei der Dampfdiffusion transportiert weder Salze noch andere Stoffe.[397] Ein Salztransport erfolgt somit nur bei einer hohen Durchfeuchtung des Mauerwerkes bzw. Bauteils. Die durch Mauersalze verursachte hygroskopische Feuchtigkeit wird vielfach bei der Sanierung feuchter Wände nicht berücksichtigt. Selbst nach erfolgreicher Sanierung, also bei tatsächlich hundertprozentig wirksamer horizontaler Absperrung, wird eine salzhaltige Wand entsprechend ihrer hygroskopischen Eigenschaft stets Wasser aus der Luft aufnehmen. Es kommt aber nicht nur zu dieser Wasseraufnahme, sondern entsprechend der stets wechselnden Luftfeuchtigkeit immer wieder auch zu Feuchtigkeitsabgabe und neuer Feuchtigkeitsaufnahme. In einer salzhaltigen Wand findet trotz ihrer Trockenlegung mithilfe vertikaler oder horizontaler Sperreschicht weiterhin eine mechanische Zerstörung durch den Kristallisations- und den Hydratationsdruck statt. Bei Salz belasteten Bau-

397 *Klaas, Helmut; Schulz, Erich; Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalkstein – Vorblendmauerwerk, Schadensfreies Bauen Bd. 13, 2. Aufl. 2002, Fraunhofer IRB Verlag, S. 35*

stoffen ist vor den Trockenlegungsmaßnahmen durch Laboruntersuchungen die Höhe der Versalzung qualitativ und quantitativ zu ermitteln.[398]

Test auf Mauersalze mithilfe Indikatorstreifen zeigen Anionen oder Kationen aber keine chemischen Verbindungen und erst recht nicht die Quantität an. Die zur Selbstkontrolle durch Ausführungsfirmen erstellten Protokolle mit so und so viel Prozent Anhydrit, Gips, Hexahydrit, Kieserit, Thermonatrit und anderen Salzen mit geringerem Kristallisationsdruck sollen eine "fachliche Kompetenz" vortäuschen, um für ein ordentliches Entgelt einige teure Chemikalien in das Mauerwerk zu füllen. Besonders kritisch sind aber auch Gutachten zu werten, wenn Malerspachtel bzw. Gipshaftputze zur Salzanalyse an ein Untersuchungslabor übergeben werden und aus dem festgestellten SO_2-Anteil irgendwelche äußeren Durchfeuchtungsursachen abgeleitet werden.

In der Abb. 5.1 wird ein typisches Bild eines Feuchte und Salz belasteten Kellermauerwerkes gezeigt. Am Außenmauerwerk reicht die Feuchtebelastung oft bis in die Kappe und nimmt in Richtung Gebäudemitte nach unten ab.

Abb. 5.1: Feuchte und Salz belastetes Kellermauerwerk



398 Arendt, Claus; Trockenlegung, 1983, Deutsche Verlagsanstalt, S. 12 ff

Die richtige Sanierung eines Salz belasteten Mauerwerkes ist sehr kostenaufwendig. Vor der Sanierung ist die künftige Nutzung der Räume zu klären, die mögliche Gefährdung für das übrige Gebäude abzuschätzen und eine Kosten-Nutzen-Rechnung durchzuführen.

Nicht in jedem Fall sind Vorschläge zu nachträglich angelegten horizontalen und vertikalen Sperrschichten wirtschaftlich sinnvoll. Von den Bautenschutzfirmen werden Lösungen zur Unterbrechung des Wassertransportes angeboten und hierzu auch teilweise Untersuchungen vorgenommen. Es werden jedoch nicht alle Einflussfaktoren, wie die Kondenswasserbildung an der kühlen Wandoberfläche unterhalb der Geländeoberfläche (siehe Abb. 4.2.4) oder die künftige Nutzung der Räume geprüft. Als Beispiel sollen hier die nachträglich eingebrachten dicht schließenden Brandschutztüren im Keller genannt werden, die eine ausreichende Lüftung dieser Räume verhindern. Gerade im Altbaubereich konnten hier Luftfeuchten in Kellerräumen von 90 % gemessen werden. Kellerräume als Wasch- und Wäschetrockenraum mit unzureichender Lüftung oder die umfangreiche Lagerung von Stoffen mit hohen hygroskopischen Eigenschaften führen durch die Feuchtespeicherung ebenso zu einer Feuchteerhöhung der relativen Luftfeuchte.

Abhängig von den speziellen Baustoffeigenschaften, der Einwirkungszeit und Feuchtebelastung werden Salze aus dem Boden in das Mauerwerk transportiert. Dies hängt immer von dem Standort, der Bodenstruktur oder vom Mauerwerk ab, welches über eine lange Zeit durch eine fehlende Dachentwässerung durchnässt wurde. Eine frühere Viehhaltung auch in Wohngebäuden, die in der Nähe des Gebäudes befindlichen offenen Abwässer oder eine undichte Güllegrube belastend das Mauerwerk mit Salz. Die Salze, wie Nitrate, Chloride und Sulfate, gelangen durch den Feuchtetransport in das Mauerwerk, oder lösen sich aus dem Baustoff selbst heraus. So wurden im 19. Jahrhundert gebietsweise den Ziegeln zur Erhöhung der Druckfestigkeit und auch zur Verwendung bei Temperaturen im Frostbereich Salze zusätzlich beigemengt.

Das Rohmaterial für die Ziegel muss frei von Kalk oder anderen treibenden Einschlüssen sein. Die heutigen Normen fordern salzfreie Ziegelmaterialien, dabei dürfen die Anteile an Natrium, Kalium, Magnesium und Sulfat je 0,08 % nicht überschreiten.[399] Aufsteigende Feuchte kann man durch zunehmende Feuchtegehalte in den Mauerquerschnitt hinein und abnehmend über

399 Schrader, Mila; Mauerziegel als historisches Baumaterial, 1997, anderweit Verlag GmbH, S. 175

die Mauerwerkshöhe erkennen, siehe Abb. 2.1.3. Liegt eine Salzbelastung (hygroskopische Durchfeuchtung) vor, so nehmen die Feuchtigkeitswerte von der Oberfläche nach innen ab, analog, wie es in der Abb. 2.1.2 dargestellt wird. Die genauen Ursachen sind zu bestimmen, damit eine günstige Sanierungsvariante ausgewählt werden kann. Mithilfe eines Feuchtemessverfahrens, zum Beispiel mit dem CM-Verfahren (Kalziumcarbid-Methode), kann die quantitative Wassermenge direkt Vorort bestimmt werden. Weitere Stofffeuchtemessverfahren werden im Punkt 3.1 vorgestellt.

Mauersalze behindern das Wachstum von Mikroorganismen. Salzreiche Materialien können nur von trockenheitsliebenden (xerophilen) Pilzen befallen werden. Die osmotisch wirkenden Baustoffe entziehen die Feuchtigkeit derart, dass übliche Pilze und Algen entwässert werden würden. Anders ist es bei feuchter sich von der Wand lösender Tapete. Diese steht im Gleichgewicht mit der hohen Feuchte des Wandbaustoffs und bietet durch die Zellulose eine gute Nahrungsgrundlage für Schimmelpilze, wie es zum Beispiel in der Abb. 5.2 erfolgt.

Abb. 5.2: feuchtes Salz belastetes Mauerwerk im Erdgeschoss mit Schimmelpilzbildung an der Tapete.



Nachfolgend ein Beispiel für ein Salz belastetes Mauerwerk im Dachgeschoss (Abb. 5.3). Die Salze stammen vorwiegend aus dem Baustoff selbst. Die Annahme beruht darauf, da im Schloss an vielen anderen Mauerwerkabschnitten ähnliche Salzablagerungen zu sehen waren. Ein Teil der Ziegelsteine wurden bereits durch Hydratationsdruck zerstört. Sicherlich erfolgte eine jahrelange Durchfeuchtung durch eine defekte Dacheindeckung. Die Salz belasteten Wandabschnitte

werden immer Problembereiche bleiben. Auf keinem Fall soll hier auf der neuen Putzschicht (salzbeständige Kalke oder Sanierputze) eine Raufasertapete oder eine Dispersionsfarbe aufgebracht werden. Zweckmäßiger für die Beschichtung sind Kalk- oder Silikatfarben.

Abb. 5.3: Starke Salzausblühungen an einem Ziegelmauerwerk mit Absprengungen durch den Hydrationsdruck (Treppenabsatz im Dachgeschoss).



Nach dem erfolgreichen Aufbau einer Vertikalabdichtung und eventuell einer zusätzlichen Horizontalabdichtung wird von außen keine weitere Feuchtigkeit mehr "nachgeliefert". Die sich in der Mauer befindliche Feuchte kann jetzt nur noch nach innen entweichen und muss von hier weggelüftet werden. Durch die Salzablagerung wird die Diffusion (Austausch von Wasserdampf- und Luftmolekülen) an der Grenzschicht sehr stark behindert. Hinzu kommt, dass Mauersalze sehr hygroskopisch sind und Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen.

Es kommt im ungünstigen Fall zu einem ständigen Wechsel zwischen der gelösten Phase (Salze sind gelöst) und der Auskristallisierung und somit zur langsamen Zerstörung des Mauerwerkes. Kristallisiert das Salz an der Wandoberfläche aus, so kann es trocken abgebürstet werden. In verschiedenen Literaturquellen wird empfohlen, das Mauerwerk vorher anzunässen und anschließend abtrocknen zu lassen.[400, 401, 402, 403] Die höchste Salzkonzentration liegt im Mauer-

400 Arendt, Claus; Trockenlegung, 1983, Deutsche Verlags-Anstalt, S. 85
401 Schönburg, Kurt; Bauschäden sind vermeidbar, 2. Aufl. 1978, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, S.35, S.82
402 Hiese, Wolfgang; Scholz Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag Düsseldorf, S. 365
403 Eichler, Friedrich; Arndt, Claus; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1998, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, S. 462

mörtel, also in den Fugen und im Putz vor. Werden diese Fugen ausgekratzt und durch salzbeständigen Kalkmörtel (spezielle Kalke oder Luftkalk) ausgetauscht, so kann bereits ein guter Erfolg erzielt werden. Allerdings muss dies bei stärkerer Salzbelastung aller paar Jahre wiederholt werden. Bei mittlerer oder höherer Salzbelastung ist das ein langwieriger Prozess, wobei ein Teil des Salzes die Oberfläche der Mauersteine zerstört (siehe Abb. 5.3). Durch einen offenporigen Putz, wie zum Beispiel Luftkalkputz, wird die Salzablagerungszone in den Putz oder an die Putzoberfläche verlagert (siehe Punkt 4.6). Das Mauerwerk wird sehr langsam entsalzen und die Mauersteine werden nicht mehr geschädigt. Eine vollständige Salzsanierung ist nur durch den vollständigen Austausch des Mauerwerkes erfolgreich.[404, 405, 406] Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass hydraulische Bindemittel, wie hydraulische oder hochhydraulische Kalke und Trasszement infolge ihres Herstellungsverfahrens einen Anteil an leicht löslichen Alkalisulfaten enthalten. Bereits mit dem Anmachwasser werden Teile der Salze in die Mauersteine gesaugt. Tritt eine starke Beanspruchung durch Niederschlag auf, so gelangen größere Mengen der Bindemittelsalze in die Steine.

Eine Neutralisierung der Mauersalze durch Bildung schwer löslicher Salze mit Säuren und Basen ist kompliziert. Hierbei können Probleme für die Gesundheit des Verarbeiters und auch für die Umwelt auftreten. Es fängt schon mit der genauen Dosierung einer Essigsäure und eine stark verdünnten 36 %-ige Salzsäure an. Die Salzkonzentrationen und -arten sind jedoch im Mauerwerk nicht gleichmäßig verteilt. Eine genaue Bestimmung ist nur durch ein kostenaufwendiges Untersuchungsverfahren im Labor möglich. Die mehr oder weniger gut bestimmte Salzart und -konzentration wird durch eine geschätzte Aufbringmenge zu schwer löslichen Salzen neutralisiert. Es ist durchaus denkbar, dass dieses Mauerwerk künftig als belastet eingestuft und bei Abbrucharbeiten als Sondermüll eingestuft werden kann.

5.2. Die Karbonatisierung

Kommt der Baustoff Beton im feuchten Keller zum Einsatz, so hat dieser gegenüber dem Ziegelmauerwerk eine hohe Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit. Beim Beton erfolgt eine Salzbelastung durch die Karbonatisierung, die sowohl Vor- aber auch Nachteile hat. Kleine Risse,

---

404 Arendt, Claus; Trockenlegung, 1983, Deutsch. Verlags-Anstalt, S. 85
405 Schönburg, Kurt; Bauschäden sind vermeidbar, 2. Aufl. 1978, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, S.35, S.82
406 Hiese, Wolfgang; Scholz Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag Düsseldorf, S. 365

die das Wasser durchströmt, werden durch „… *das Quellen und Nachhydratieren des Zementsteines, die Bildung von wasserunlöslichem Kalziumkarbonat sowie Ablagerungen an den Rissflanken aus Feinstoffen des Wassers …*“[407] verschlossen. Die Umwandlung des Kalziumhydroxids in Kalziumkarbonat ist mit einer Volumenvergrößerung von etwa 11 Vol.-% verbunden, die kleine Mikroporen verschließen.[408] Bei Hydration von Zement entsteht als Nebenprodukt Kalkhydrat $Ca(OH)_2$, welches wasserlöslich ist und so an die Oberfläche transportiert werden kann. An der Oberflächenschicht oder bei schlecht verdichtetem und porösem Beton wird das in dem Porenwasser gelöste Kalkhydrat mit dem über das Porensystem eindringende Kohlendioxid der Luft zu Kalziumkarbonat $CaCO_3$ (Kalkstein) überführt.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Daneben sind aber auch Reaktionen des CO_2 mit dem C-S-H-Gel[409] und den Aluminatphasen möglich.[410] Die bimodale Porenverteilung des porösen Gels liegt bei Maxima 5 nm und bei 200 bis 400 nm.[411]

Über eine topochemische Reaktion[412] werden kristallines Kalziumkarbonat [413] und amorphe Kieselsäure [414, 415] gebildet.

$$C\text{-}S\text{-}H + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2 * H_2O$$

Die Tiefe und der Fortschritt der Karbonatisierung werden von mehreren Einflussgrößen bestimmt, das sind (Porengefüge, Zementart, Nachbehandlungsdauer, Feuchtigkeit, $C0_2$ -Konzentration und die Diffusion von Kohlendioxid und deren Reaktion mit den Zementsteinphasen.[416]

---

407 Röhling, Stefan; Eifert, Helmut; Kaden, Reiner; Betonbau, Planung und Ausführung, 2000, Verlag Bauwesen Berlin , S. 323
408 Schlüßler, Karl-Heinz; Mcedlov-Petrosjan, Ota Petrovich; Der Baustoff Beton, Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie, 1990, Verlag für das Bauwesen Berlin, S. 87
409 In der Zementchemie werden Abkürzungen für die Ausgangsstoffe verwendet, z. B. C = CaO, S =SiO_2, H = H_2O
410 Schlüßler, Karl-Heinz; Mcedlov-Petrosjan, Ota Petrovich; Der Baustoff Beton, Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie, 1990 Verlag für das Bauwesen Berlin, S. 86
411 Eitel, W.: The Physical Chemistry of the Silicates. Chicago: The tiniversity of Chicago press 1954
412 Callejam, J.: Durability. Proc. of the 7th Int. Conf. an the Chemistry of Cement, Paris 1980, Principal Report
413 Lach, V.; Saumann, Z.: The determination of CaCO3. modifications in the carbonated concrete. Rilem Int. Symposium of Carbonation of Concrete, Fulmer Grange 1976
414 Slegers, P.A.; Rouxhet, P.G.: Carbonation of the hydration products of tricalcium silicate. International Cement Research., Vol.6(1976)
415 Gaspar-Tebar, D.; Vasquez-Moreno, T.; Nunoz-Plaza, M.: Action du CO_2 sur le liment Portland Hydrate dans des conditionnes normales. RILEM Int. Symposium an Carbonation of Concrete, Fulmer Grange 1976
416 Bier, T.A.: Carbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, H. 4. 1988

Abb. 5.6: Die vertikalen Bewährungseisen wurden ohne Abstandhalter eingebaut und haben so eine Betonabdeckung zwischen 1 bis 6 cm.



Der Kalkstein ist als Aussinterung oder fest haftender, schwer entfernbarer weißer Belag (Ausblühung) an der Betonoberfläche sichtbar. Einerseits erfolgen durch diese "Karbonatisierung" die Verringerung der Porosität und eine Verfestigung des Gefüges und andererseits sinkt der pH-Wert von 12,6 auf 9,5.[417] Der passive Korrosionsschutz am Bewehrungseisen wird bereits bei einem pH-Wert unter 11,5 aufgehoben. Die Ablaufgeschwindigkeit des Karbonatisierungsprozesses ist bei einer relativen Luftfeuchte von 50 bis 70 % am größten. [418, 419] Im Kellergeschoss liegt diese Feuchte ständig vor. Der Karbonatisierungsprozess findet unter Wasser oder bei einer relativen Luftfeuchte unter 30 % nicht statt. Bei frei stehenden ungeschützten Betonteilen werden die Poren durch das Regenwasser gefüllt und so dem Eindringen von CO_2 ein Widerstand entgegengesetzt.[420] Kritisch sind die Befeuchtungs- und Abtrocknungsphasen, die so kurz wie möglich sein sollten. Eine ständige längere Feuchtebelastung führt zur vorzeitigen Zerstörung der Betonoberfläche, wie bei der Betonbrücke in der Abb. 5.9.

Zum Schutz des Bewährungseisens sind laut ÖNORM B 4200-10 bestimmte Betonmindestdeckung erforderlich. Im Innenbereich ist sie 1,5 cm und im Außenbereich 2,5 cm stark auszuführen. Bei Straßenbauten und tausalzhaltigem Sprühnebel von Verkehrsflächen 2,5 cm sowie 3,5 cm bei Flächen, die

---

417 Röhling, Stefan; Eifert, Helmut; Kaden, Reiner; Betonbau, Planung und Ausführung, 2000, Verlag Bauwesen Berlin , S. 125
418 Schmidt, Michael; Baustoffe Beton und Betonstahl, in Avak,Ralf; Goris, Alfons; Stahlbetonbau aktuell 2009, Bauwerk Verlag GmbH Berlin, S. B37
419 Hiese, Wolfgang; Scholz, Wilhelm; Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag Düsseldorf, S.321
420 Hiese, Wolfgang; Scholz, Wilhelm; Baustoffkenntnisse, 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag Düsseldorf, S.321

Frost-Tausalz-Angriffe oder chemischen Angriffe ausgesetzt sind. Die entsprechend dem Standard vorgesehenen Betonabdeckungen werden nicht immer eingehalten, siehe Abb.5.6.
In Deutschland ist die Betondeckung in der DIN 1045 Tafel 10 geregelt. Sichtflächen und bei starkem mechanischem Angriff ist die Deckung um 1 cm zu vergrößern. In der nachfolgenden Tabelle 5.1. wird die Eindringtiefe der Karbonatisierung in Abhängigkeit der Betontiefe und der Nutzungszeit dargestellt.[421] In den ersten Jahren findet eine stärkere Karbonatisierung statt, die sich anschließend nach circa 20 bis 30 Jahren verringert.

Tabelle 5.1: Eindringtiefe der Karbonatisierung[422]

Betongüte[423]	Nach 7 Jahren	Nach 30 Jahren
B 400	2 mm	3 mm
B 300	6 mm	10 mm
B 225	10 mm	17 mm
B 160	18 mm	30 mm

Die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Karbonatisierung erfolgt mit der Formel.

$$s = c * \sqrt{t} \qquad (5.1)$$

s = Karbonatisierungstiefe
c = Karbonatisierungskoeffizient
t = Zeit

Die Karbonatisierung kann durch ein entsprechendes Beschichtungssystem gebremst werden. Auf der frischen Betonoberfläche wirken diese verdunstungshemmend und bilden einen fest haftenden Film.[424]

Nachfolgend werden zwei verschiedene Beispiele gezeigt, wo der Karbonatisierungsprozess durch die Feuchteeinwirkung sehr stark vorangeschritten ist.
In der Abb. 5.7 wird eine Balkonplatte eines älteren Wohngebäudes (Baujahr um 1955-60) in Vinnitsa gezeigt. Für diese Schädigungen sind vorwiegend die fehlende bzw. schadhafte obere

421 Hubert, Gerhard; Riccolona, Christof; Baustoffkunde, 1994, Manz Verlags- und Universitätsbuchhandlung Wien, S.68-69
422 Hubert, Gerhard; Riccolona, Christof; Baustoffkunde, 1994, Manz Verlags- und Universitätsbuchhandlung Wien, S. 68-69
423 In der DIN 1045 erfolgt die Einteilung nach Festigkeitsklassen, z.B. B 15, B 25, B 45
424 Hiese, Wolfgang; Scholz, Wilhelm; Baustoffkenntnis, 13.Aufl. 1995, Werner Verlag, 1995, S. 323

Feuchtesperrschicht und die fehlende Regenentwässerung als Tropfkante oder Rinne verantwortlich. Eine wesentlich größere Schädigung tritt bei einer Überdachung aus Beton über einen Hauseingang auf, Abb. 5.8. Hier fehlen komplett die Abdichtung gegen Niederschlag und der Anschluss zur Wand.

Abb. 5.8: Die fehlende Abdichtung des Daches über dem Hauseingang führt zur Zerstörung der Putzfugen und der Betonüberdachung in Vinnitsa (Ukraine)



.

Abb. 5.7: Bei diesem Balkon ist die Betonabdeckung auf der Unterseite durch Feuchteeinwirkung mit Karbonatisierung abgefallen in Vinnitsa (Ukraine).



Im zweiten Beispiel (Abb. 5.9) kann die Feuchtigkeit auf der Unterseite des Bauteils durch die angrenzende Luft (Wind) nur ungenügend abgeführt werden. Behindert werden die Lüftströmungen durch das angrenzende Gebüsch an der Böschung und die Rohrleitung auf der Unterseite. Das Bewährungseisen auf der Unterseite ist vollständig freigelegt. Zusätzlich kommt

noch die Schädigung der Kante durch abtropfenden Niederschlag hinzu. In der Brückenmitte oder an den unteren Betonkonstruktionen, wie an den Bögen, ist das Schadensausmaß wesentlich geringer. Die ungehinderte Luftströmung bewirkt hier eine bessere Abtrocknung der Betonoberfläche und der Karbonatisierungsprozess ist geringer.

Abb. 5.9: Starke Zerstörung der Betonabdeckung an der Unterseite der Brücke durch die schlechte Abtrocknung (Mai 2009) im Bereich der Böschung mit dichtem Buschwerk in Vinnitsa (Ukraine).



Bei der Altbausanierung erfolgt in vielen Fällen ein Austausch der Hartbandsteine im Keller durch einen Betonestrich. Da kein Bewährungseisen zum Einsatz kommt, stellt eine mögliche Karbonatisierung in diesem Fall kein mittelbares Problem dar. Wird der Betonestrich im Keller beschichtet, so vermittelt das Mauerwerk einen feuchteren Eindruck als bei einem unbeschichteten Betonfußboden. Dies ist auf die Verringerung, der feuchteregulierenden Fläche zurückzuführen. Mit diesem Fußbodenaufbau verlagert sich die auf die Bodenplatte drückende Feuchte hauptsächlich auf das Fundament und das Mauerwerk. Das untere Mauerwerk gibt auch einen Teil der Bodenfeuchte an die Raumluft ab, die vorher durch die Hartbrandsteine des alten Kellerfußbodens an die Raumluft abgegeben wurde. Die Veränderungen des Feuchtetransportes in dem Keller müssen beachtet und mit den nachträglichen Maßnahmen zur Bauwerksabdichtung (Punkt 4.) abgestimmt werden.

5.3. Die Entsalzung von Mauerwerk

5.3.1. Salzarten im Mauerwerk

In den nachfolgenden Punkten erfolgt eine Zusammenstellung über die Wirkmechanismen und Verfahren zur Mauerwerksentsalzung von den Autoren ZIMMERMANN,[425] WENDEHORST, [426] ARENDT,[427, 428, 429] SCHÖNBURG, [430] SCHOLZ, [431] EICHLER[432] und BRÄNDLE.. [433]

Treten Mauersalze auf, so sind mit großem Abstand die bauschädlichen Salze, Sulfate und Chloride, vorhanden. Wesentlich weniger kommen Nitrate vor.
Entscheidend ist die gegenwärtige oder vergangene Nutzung des Gebäudes. In landwirtschaftlichen Gebäuden oder auch alten Burgen in der Stallung werden häufiger Nitrate auftreten. Neben den Fußwegen kann durch Streusalze das angrenzende Mauerwerk belastet sein. Eine gründliche Recherche kann schon im Vorfeld bestimmte Orientierungen für entsprechende Maßnahmen geben.
Auch ist nicht jedes Salz schädlich. Kalziumkarbonat (Kalk) ist ein Bindemittel und nicht schädlich, hingegen aber das Natriumkarbonat.

Für die Bestimmung des Gesamtversalzungsgrades durch bauschädliche Salze werden Proben aus dem betreffenden Mauerwerk in einer Tiefe von circa 3 cm entnommen. Diese werden luftdicht verpackt und an ein entsprechendes Untersuchungslabor übergeben. Die Bewertung erfolgt nach dem WTA-Diagnostik-Merkblatt 4-5-99/D. Maßgebend für die Bewertung ist der höchste ermittelte Gehalt an Salzionen, egal ob Chlorid-, Nitrat- oder Sulfationen. In der nachfolgenden Tabelle 5.2 werden die wichtigsten Salze im Mauerwerk aufgeführt.

425Zimmermann, Günter; Sander, Martin; Schloenbach Renate; Schadensfreies Bauen, Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein, , 1995, IBR-Verlag, S. 105-106
426Wendehorst, R.; Baustoffkunde, 24. Aufl. 1994., Vincentz Verlag Hannover, S. 338
427Arendt, Claus; Trockenlegung, Deutsch. 1983, Verlags-Anstalt, S. 85
428Arendt, Claus; Leitfaden zur Erhaltung u. Modernisierung alter Häuser, 1993, Stuttgart: Deut.-Verlag-Anstalt,
429Arendt, Claus; Selle, Jörg; Feuchte und Salze in Gebäude, 2000, Verlagsanstalt Alexander Koch
430Schönburg, Kurt; Bauschäden sind vermeidbar, 2. Aufl. 1978, VEB Verlag für Bauwesen Berlin S.35, S.82
431Scholz, Wilhelm; Baustoffkenntnisse 13. Aufl. 1995, Werner-Verlag Düsseldorf, S. 365
Lothar Goretzki; bs 2/97 S. 42
432Eichler, Friedrich; Arndt, Horst; Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 1989, VEB Verlag für Bauwesen *Berlin; S. 462*
433Brändle, Evemarie; Bauernhaussanierung, 1988, Verlagsgesellschaft München

Tabelle 5.2: Übersicht über die wichtigsten vorkommenden Salze im Mauerwerk

Formel	**Chemische Bezeichnung**	**Mineralogische Bezeichnung**
Carbonate: $Na_2C0_3\ 10H_2O$	Natriumcarbonat	Natrit, Soda
K_2C0_3	Kaliumkarbonat	Pottasche
$CaC0_3$	Kalziumkarbonat	Kalk
$Na_3H(C0_3)_2\ 2H_2O$	Natriumhydrogenkarbonat	Trona
$Na_2CO_3\ H_2O$	Natriumkarbonat	Thermonatrit
Chloride: NaCl	Natriumchlorid, Kochsalz	Halit
$CaCl_2$	Kalziumchlorid	Hydrophylit
$CaCI_2\ 6H_2O$	Kalziumchlorid-Hexahydrat	Antarcticit
$MgCl_2\ 6H_2O$	Magnesiumchlorid	Bischofit
$2\ MgCl_2\ .\ CaCl_2\ 12H_2O$		Tachhydrit
Sulfate: $CaSO_4$	Kalziumsulfat	Anhydrit
$CaSO_4\ 2H_2O$	Kalziumsulfat-Dihydrat	Gips
$MgSO_4\ 7H_2O$	Magnesiumsulfat-Heptahydrat	Epsomit, Bittersalz
$MgSO_4\ 12H_2O$		Dodekahydrat
Na_2SO_4	Natriumsulfat	Thenardit
$Na_2SQ_4.\ 10\ H_2O$	Natriumsulfatdekahydrat	Mirabilit, Glaubersalz
$K_3Na(S0_4)_2$	Kaliumnatriumsulfat	Aphtitalit, Glaserit
$3Ca0\ Al_20_3\ 3CaSQ_4\ 32H_2O$	Kalziumaluminiumsulfathydrat	Ettringit
Nitrate: $Mg(N0_3)_2\ 6\ H_2O$	Magnesiumnitrat	Nitromagnesit
$5\ Ca(N0_3)_2\ 4\ H_2\ O$	Kalziumnitrat	echter Mauersalpeter
$KN0_3$	Kaliumnitrat	Nitrokalit, Kalisalpeter

5.3.2. Die Wirkungsmechanismen von Mauersalzen

Tabelle 5.3: Schadensmechanismen von Salzen

Mechanismen	**Wirkung und Auswirkung**
Kristallisationsdruck • hydrostatischer Kristallisationsdruck oder • Hydrationsdruck • linearer Wachstumsdruck	Druckaufbau, wenn das weitere Wachstum der Kristalle durch die Porenwand oder andere Kristalle behindert wird. Hydratationsdruck bezeichnet den Druck, der durch Volumenvergrößerung beim Übergang des Salzes in wasserreichere Phasen entsteht. Der *lineare Wachstumsdruck* tritt besonders bei nadeligen oder stängeligen Kristallen auf und wird durch das Wachstum in einer kristallografisch bevorzugten Richtung bewirkt. In großen Poren ist das Wachstum von Salzen gegenüber kleinen Poren energetisch bevorzugt. Bei hohem Anteil an kleinen Poren, von denen Nachschub an Salzlösung für die Kristallisation in großen Poren kommt, sind daher hohe Sprengdrucke wahrscheinlicher. Durch zyklisches Auftreten des Kristallisationsdrucks erfolgt eine Schwächung der Korn-Korn-Bindungen und damit des Gesteinsgefüges.
Lösungsreaktion	Beeinflussung der Löslichkeit der Komponenten des Gesteins durch die Salzlösung (Eigen- und Fremdioneneffekt).Lockerung des Gefüges durch Lösung von Partikeln.
Fällungsreaktion	Ausfällung von Stoffen durch Reaktion von Komponenten der Salzlösung mit dem Gestein, meist verbunden mit Volumenausdehnung und Gefügebelastung des Gesteins.
Hygrische Dehnung	Feuchtigkeitsabhängige Volumenänderung von mit Salzen belasteten Baustoffen, damit erfolgt eine Schwächung des Gefüges.
Osmotischer Druck	Durch osmotische Bewegung von Lösungen geringerer Konzentration zu Lösungen höherer Konzentration, die voneinander durch eine semipermeable Membran getrennt sind, erfolgt in den Lösungen höherer Konzentration eine Volumenzunahme und damit ein Druckaufbau. Als semipermeable Membran können kolloide Phasen im Intergranularbereich wirken.
Dynamisch-synergetische Effekte	Beim Austrocknen von Salzlösungen bleiben poröse Filme zurück, die die Porenwandoberfläche zumindest punktuell überziehen. Durch zyklische Feuchteänderung stellt sich eine Strukturänderung der Salze ein. Die damit verbundenen Schubspannungen schwächen das Gefüge.
Chemomechanische Effekte	Änderung des Zeta-Potenzials mineralischer Baustoffe durch Salzionen. Da das Zeta-Potenzial in Korrelation mit mechanischen Eigenschaften des Materials steht, wirkt sich seine Änderung *z. B.* auf die Härte, Bruchzähigkeit oder Festigkeit aus.
Spannungskorrosion	Salze oder Salzlösungen verringern die Zug-, Biegezug- und Druckspannungen von porösen, mineralischen Baustoffen, die mechanisch belastet sind.

5.3.3. Die Verfahren zur Entsalzung von Mauerwerk

In der Praxis hat sich eine Vielzahl von Verfahren herausgebildet, die mit unterschiedlicher Wirkung die Salzbelastung eines Bauwerkes reduzieren oder auch in seltenen Fällen völlig abbauen. Diese Methoden können in drei Gruppen zusammengefasst werden:

- mechanische Salzreduzierung
- chemische Salzreduzierung
- physikalische Salzreduzierung

Nachfolgende werden ausgewählte Verfahren in der Tabelle 5.4 kurz beschrieben.

Tabelle 5.4.: Übersicht ausgewählter Verfahren zur Entsalzung

Verfahren	**Funktionsweise**	**Anwendung/Wirkung**	**Nachteil**
Entsalzung im Wasserbad	Salze wandern in das entionisierte Wasser, ein periodischer Wasseraustausch ist erforderlich.	Bewegliche Objekte oder Ausbau von Steinen.	Substanzverlust durch Lösung von Bindemittel, Quellen von Tonmineralien.
Kompressen, dauernass oder trocknend	Je nach Salzkonzentration ist mehrfacher Kompressenauftrag erforderlich. Trocknende Kompressen: Verlagerung der Verdunstungszone in feucht auftragende Kompresse. Dauernasse Kompresse: vornässen, nass auftragen der Kompresse und nass halten, die Entsalzung erfolgt durch Diffusion und Konzentrationsausgleich.	Besonders guter Wirkungsgrad bei kleinen Objekten.	Liegen Salze vor, die verschiedene Hydratstufen bilden können, besteht die Gefahr von Substanzverlust an der Oberfläche, geringere Wirkung als das Wasserbadverfahren.
Injektionskompressen Kompressenmaterial:	Zuführung von Wasser über Bohrungen, Salzverdunstung in mit Packern befestigten Kompressen.	Mauerwerk mit engem, regelmäßigem Fugensystem oder verputztes Mauerwerk.	Eingriff in Steinsubstanz durch Bohrung, wenn kein geringer Fugenabstand vorliegt.
Elektrophysikalische Verfahren	Durch Anlegen Gleichspannung wandern Anionen, z. B. Cl^-, $S0_4^{2-}$ zur Anode und Kationen wie Na^+, Mg^{2+} zur Kathode.		Eingriff in Steinsubstanz durch Bohrlöcher für Elektroden, Korrosion von Metallleitungen möglich.

Salzumwandlung Mittel: $Ba(SO)_2$, $PbSiF_6$	Umwandeln leicht löslicher Salze in schwer lösliche Verbindungen (Bei Verwendung von Salzsäure entsteht das stark hygroskopische Kalziumchlorid, das in die Fugen eindiffundieren kann. Präparate auf Basis von Phosphorsäure sind günstiger.)	Bei nachfolgendem Putzaufbau.	Hochgiftig, nicht bei Nitraten wirksam, stöchiometrisch vollständige Umsetzung nur bei genauerer Kenntnis des Salzhaushaltes einsetzbar, was in der Praxis nicht möglich ist.
Hydrophobierung	Nitrate sollen durch Hydrophobierung gehindert werden, über das Anmachwasser in den Putz zu wandern, da eine Salzumwandlung bei Nitraten nicht wirksam ist.	In Verbindung mit Putzauftrag, zur Vermeidung von Haftungsproblemen ist das Aufbringen eines Spritzbewurfs direkt anschließend an die Hydrophobierung notwendig.	Salze verbleiben im Mauerwerk, Feuchtigkeitstransport aus dem Mauerwerk erfolgt langsamer, da nur dies über Wasserdampfdiffusion erfolgt; Gefahr der Schalenbildung und Putzablösung.
Opferputz	Fugen zwischen Mauersteine tief auskratzen und Luftkalkputz auftragen, Salze lagern sich im Kalkputz ab.		Einfache und preiswerte Methode Standzeit bis 5 Jahre, dann ist eine Wiederholung erforderlich.
Lehmschlempe	Nasser Lehm wird aufgetragen und die Salze lagern sich im Lehm ab.		Mehrmalige Wiederholung erforderlich.
Sanierputz	Aufnahme von Salzen in das Porensystem des Putzes.		Durch das Einwandern der Salze wirkt der Sanierputz als sog. Opferputz, der erneuert werden muss, wenn die Aufnahmefähigkeit erschöpft ist. (Standzeit 8-10 Jahre) Gegenüber Kalkputz wesentlich teurer.
Abbürsten von Salzausblühungen		Kleine Objektteile ohne merkliche Steinschädigung	Temporär erfolgt keine Schadensbehebung.
Maueraustauschverfahren	Die salzbelasteten Mauersteine werden durch neue ersetzt. 5-10 % Salzbelastung am äußeren Mauerwerk, im Inneren wesentlich weniger.	Frei zugänglich, mit dauerhafter Wirkung.	Hoher Kostenaufwand, mögliche Rissbildung in den Wänden.

Trockenlegungsverfahren	Die Feuchtigkeitszufuhr von außen wird unterbunden.	Es werden nicht noch zusätzliche Salze in das Mauerwerk eingetragen, es kann zu einer leichten Verbesserung kommen.	Salze verbleiben im Mauerwerk bzw. es kommt zu einer stärkeren Salzausblühung an der Oberfläche. Durch Abbürsten tritt eine leichte Verbesserung ein.
Verkleidung	Salzbelastete Wandfläche wird optisch abgedeckt.	Im Zwischenraum oder Poren (vergl. Wie Sanierputz) kann sich das Salz ablagern, durch Lüftungsschlitze oder große Diffusionsfähigkeit kann die Feuchtigkeit abgeführt werden.	Salze verbleiben im Mauerwerk, unkontrollierbare Schädigung.
Sperrputz	Salzbelastete und feuchte Wandfläche wird kurzzeitig optisch abgedeckt.	In Verbindung mit Bohrlochverfahren "empfohlen".	Salze verbleiben im Mauerwerk, unkontrollierbare Schädigung, Feuchtigkeit kann nicht entweichen.