

---

# Gebäudediagnostik

---

## *Physikalische und chemische Verfahren zur Ursachenermittlung von Feuchtigkeit in Gebäuden*

**Uwe Münzenberg, Jörg Thumulla, Baubiologen VDB**

**anbus analytik GmbH,  
Gesellschaft für Umweltanalytik,  
Gebäudediagnostik und Umweltkommunikation.**

**Mathildenstraße 48, 90762 Fürth**

**Tel.: 0911-7437170**

**Fax: 0911-7437176**

**eMail: [info@anbus-analytik.de](mailto:info@anbus-analytik.de)**

Schimmel entdeckt – Schimmel saniert? Nicht ohne die Ursache beseitigt zu haben! Schimmel und Feuchtigkeit gehören zusammen! Will man den Schimmel endgültig beseitigen, muss man nach der Ursache suchen: Feuchtigkeit. Die einfache Frage „Wo ist was wie feucht?“ stellt sich bei genauer Recherche in der Praxis häufig als komplexe Aufgabe heraus, zumindest wenn sich der Gebäudediagnostiker nicht auf Mutmaßungen beschränken möchte, sondern sichere Aussagen treffen will.

Wir möchten hier daher einen kurzen Überblick über eingesetzte Methoden zur Feuchtebestimmung in Gebäuden geben.

## **Herkunft von Feuchtigkeit in Gebäuden**

---

Baumaterialien stehen unterschiedliche Möglichkeiten der (Kontakt-)Aufnahme von Feuchtigkeit zur Verfügung:

- Wasseraufnahme durch Kondensation (Abscheiden flüssigen Wassers durch Unterschreiten der „Taupunkttemperatur“)
- Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft unterhalb der Kondensation. Die Salzkonzentration und der Wassergehalt der Luft sind hier die entscheidenden Parameter. Baumaterialien haben das Bestreben, ein für den jeweiligen Baustoff typisches Feuchtegleichgewicht mit der umgebenden Luft herzustellen (das ist der Wassergehalt, der sich einstellt, wenn sich ein Baustoff hinreichend lange, bis zum Gleichgewichtszustand, an die Umgebungsbedingungen angepasst hat).
- Kapillarer Wassertransport (Saugvermögen der Baustoffe über das Porengefüge) z.B. als „aufsteigende Feuchte“ oder Eindringen von Wasser durch eine defekte Gebäudehülle. Dies hat auf den Salzgehalt der Baumaterialien einen bedeutenden Einfluss.
- Drückende Feuchtigkeit: Undichte Installationen, fehlerhafte Abdichtungen in der Gebäudehülle (Regen, drückendes Wasser im Erdreich)

## Übersicht über die Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte

### Elektrische Messgeräte zur Bestimmung der Baufeuchte

Die klassische Feuchtemessung besteht nach wie vor in einer zerstörenden Probenentnahme vor Ort und einer anschließenden Analyse im Labor. Die Nachteile liegen auf der Hand: Aufwand, Beschädigung und Zeitverlust. Die direktanzeigenden Messverfahren auf Grundlage des elektrischen Widerstandes (Widerstandsmessung oder kapazitive Messung) heben diesen Nachteil auf, beinhalten jedoch andere Nachteile:

Der elektrische Widerstand eines spezifischen Baumaterials ist neben dem Feuchtigkeitsgehalt auch vom Salzgehalt des Baumaterials abhängig. Mit zunehmenden Salzgehalt steigt die Leitfähigkeit des Materials an. Ist der Salzgehalt niedrig (frisch verlegter Estrich, unbehandeltes Holz), kann anhand von materialspezifischen Funktionen (beispielsweise beim Holz abhängig von Holzart) über die einfache elektrische Widerstandsmessung der Feuchtegehalt bestimmt werden.

Anders als bei neuen Estrichen (Fragestellung: Sind sie ausreichend trocken, um Fußbodenbeläge zu verlegen?) oder beim Bauholz (Ist es zum Einbau ausreichend trocken?) sind jedoch bei der Suche von Feuchtigkeitsursachen im Altbau die zur Umrechnung notwendigen baustoffspezifischen Daten kaum bekannt. Zudem haben gelöste Salze gravierenden Einfluss auf die „Leitfähigkeit“ der Baustoffe, welche den Einfluss der Feuchte überlagert. Eine Bestimmung des absoluten Feuchtegehaltes ist also nur bei Kenntnis des Materials und des Salzgehaltes möglich, was baupraktisch nicht gegeben ist. So ist bereits bei Messungen von Holz in Dachstühlen zu bedenken, dass möglicherweise salzhaltige Holzschutzmittel verwendet wurden oder Salze aus Baumaterialien über eindringendes Wasser angereichert wurde.

Ein weiteres Problem sind die stoffspezifischen Kenndaten. Anders als bei Holz, bei dem die Kenntnis der Holzart ausreicht, weisen Baustoffe wie Estrich, Beton oder Mauersteine – hier insbesondere Ziegel – herstellungsbedingte individuelle Unterschiede auf. So kann ein Ziegel in einer Wand über eine deutlich höhere Wasseraufnahmefähigkeit verfügen als der danebenliegende, obwohl beide gleich aussehen, zur selben Zeit verbaut wurden und vom selben Lieferanten stammen. Deshalb helfen Tabellenwerte zur Feuchtebestimmung von Baumaterialien anhand der elektrischen Leitfähigkeit nur eingeschränkt weiter. Sinnvoll sind jedoch orientierende und vergleichende Messungen über den Verlauf oder die Ausbreitung der Feuchtigkeit im Bauteil in Kenntnis der Fehlermöglichkeit der Methode. Nachfolgend ein Beispiel aus der Praxis:

#### **Kartierung der Feuchtigkeit mittels orientierender Feuchtigkeitsmessungen.**

Die Ergebnisse der orientierenden Messmethode werden direkt auf den betroffenen Wänden festgehalten. Nach Möglichkeit werden Punkte gleicher Feuchtigkeit zu isohygommetrischen Linien verbunden, wodurch aufsteigende Feuchtigkeit und versalzte Zonen erkennbar werden.

Hinter dem Bücherregal (Abbildung 1) befindet sich ein deutlich sichtbarer Feuchtigkeitsschaden. Die dargestellte Kartierung der orientierenden Feuchtigkeitsuntersuchungen mittels eines elektrischen Baufeuchtemessgerätes zeigt, dass Feuchtigkeit weit über den sichtbaren Schadensbereich in der Wand aufsteigt.

Der dargestellte Verlauf von 70% in der Höhe von 60 cm, 80% in der Höhe von 70 cm, ein Bereich von 90% zwischen 90 cm und 1,30 m, ein Absinken bei 1,45 m auf 80%, 70% bei 1,53 m und schließlich ein schnelles Absinken auf 30% bei 1,57 m sind typisch für aufsteigende Feuchte in Zusammenhang mit einer Versalzung des Mauerwerkes.

Das Aufsteigen der Linien nach links (im linken Teil der Abbildung) ist durch eine Regalrückwand (im Bild entfernt) herbeigeführt worden. Diese Rückwand bremsst das Verdampfen des Wassers, so dass die Feuchtigkeit hier insgesamt höher steigt.

Auf der gegenüberliegenden Seite der Wand sind die gleichen isohygomtrischen Linien darstellbar, was die Sicherheit des Ergebnisses erhöht.

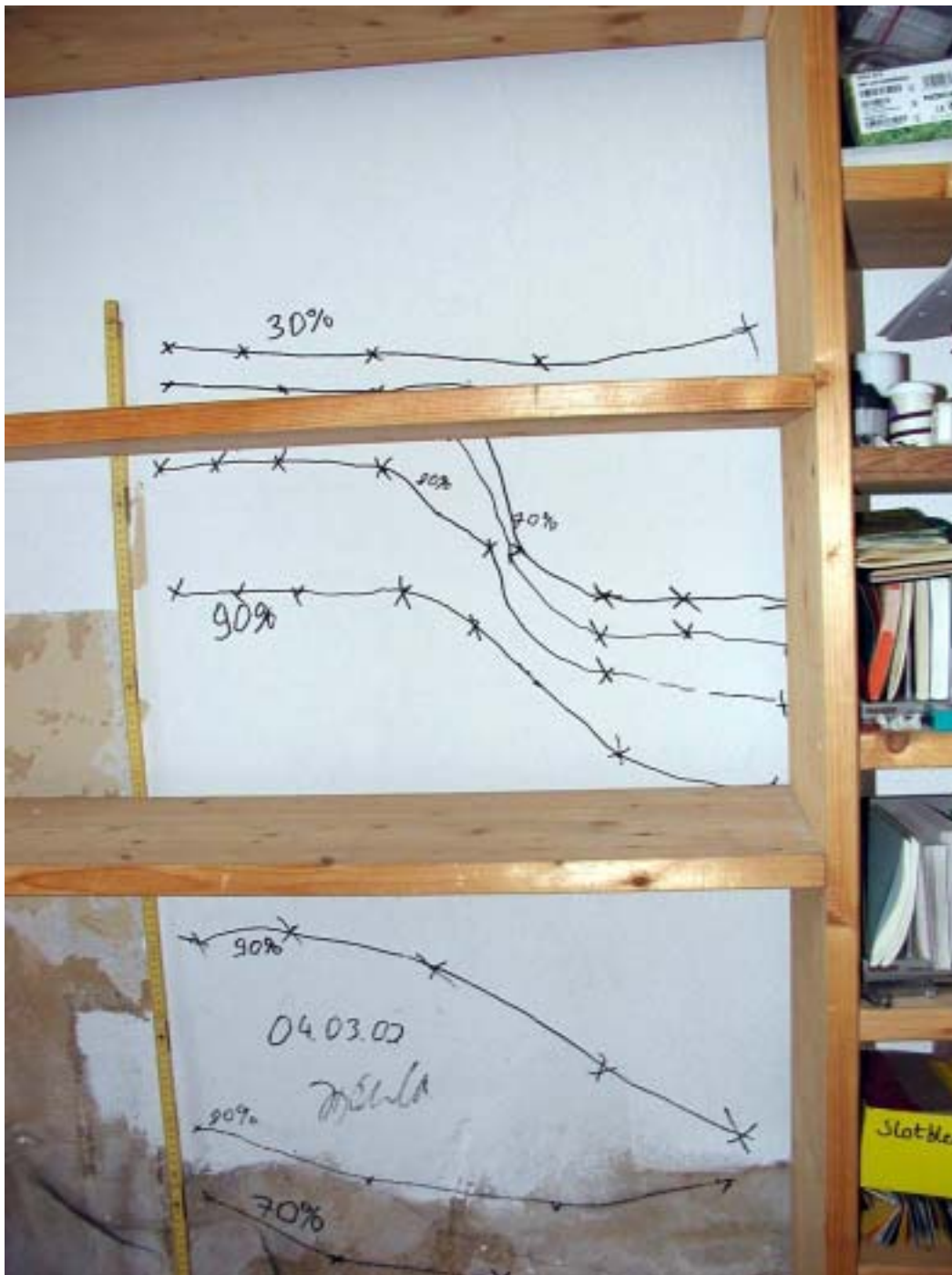


Abbildung 1: Die Messwerte werden durch isohygomtrischen Linien verbunden

## Überblick über einfache elektrische Baufeuchtemessgeräte

---

### Geräte nach dem Prinzip der Widerstandsmessung

Mit Einschlagelektroden sind elektrische Baufeuchtemessgeräte gut geeignet für Holz, da oft holzspezifische Kalibrierungen im Gerät abgespeichert oder als Skala/Tabelle vorhanden sind. Bei mit salzhaltigen Holzschutzmitteln behandeltem Holz oder Einlagerung von Salzen durch Feuchtetransportvorgänge kommt es zu Messfehlern.

Bei mineralischen Baustoffen ist dieses Verfahren zur Bestimmung der absoluten Baufeuchte aufgrund der unterschiedlichen Baustoffeigenschaften nur sehr eingeschränkt geeignet. Zudem besteht eine starke Abhängigkeit vom Salzgehalt, die nicht nur durch den Fremdsalzeinfluss gegeben ist, sondern beispielsweise bei Ziegelsteinen auch durch den Eigensalzgehalt der Baustoffe selbst. Unterschiedliche Messwerte beispielsweise in zwei verschiedenen Ziegelsteinen deuten daher nicht unbedingt auf einen unterschiedlichen Feuchtegehalt hin. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse können jedoch vergleichende relative Messungen wertvolle Erkenntnisse zur Aufklärung von Feuchtigkeitsursachen liefern.

### Geräte mit kapazitivem Wirkprinzip

Dieser Gerätetyp wird gerne zur Lokalisierung von Feuchtigkeit in Bauteilen verwendet. Gebräuchliche Messgeräte arbeiten mit einer Arbeitsfrequenz im Bereich von 1 MHz. Bei einer durch Salze bedingten Erhöhung der elektrolytischen Leitfähigkeit findet immer noch eine deutliche Beeinflussung des Messwertes statt, da praktisch weiterhin der elektrische Widerstand ausgewertet wird. Messfehler entstehen auch durch Metalle im zu untersuchendem Bauteil.

Geräte mit stark streuendem elektrischen Feld, z.B. bei Elektrodengeometrie Kugel-Gehäuse, sind auch bei relativ unebenen Oberflächen einsetzbar. Die Tiefenwirkung bleibt aber auch hier auf wenige Millimeter beschränkt.

### Thermogravimetrisches Standardverfahren (Trockenschrank)

Die gravimetrischen Methoden stellen die klassischen Verfahren zur Materialfeuchtebestimmung dar. Dem zu untersuchenden Bauteil wird eine Bohrprobe entnommen (Bohrkern oder Bohrmehl), die im Labor gewogen, getrocknet und wieder gewogen wird. Die festgestellte Gewichtsänderung stellt den Wassergehalt der Probe dar.

Die gravimetrische Trocknungs-Wäge-Methode, auch Darr-Wäge-Methode genannt, stellt international die standardisierte Feuchtemessmethode dar und dient anderen Messmethoden als Bezugsverfahren. Die Trocknung der Probe erfolgt meist durch Erwärmung der Bohrprobe im Trockenschrank.

Da das im Kapillarsystem der Baustoffe gebundene Wasser baustoffspezifisch sehr unterschiedlich fest physikalisch, physikalisch-chemisch und /oder chemisch gebunden ist, werden bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen voneinander abweichende Ergebnisse erzielt. Für den Feuchtegehalt ist nur der Wasseranteil zu berücksichtigen, der bei definierten Trocknungsbedingungen aus einer Probe austreibbar ist. Getrocknet wird deshalb bei einer Temperatur, bei der kein chemisch gebundenes Wasser (Hydratwasser) freigesetzt wird. Für die meisten mineralischen Baustoffe beträgt die Trockentemperatur 105°C.

Fehler bei der Feuchtebestimmung liegen in erster Linie bei der Probenahme durch Abtrocknung von Wasser beim Bohren infolge zu starker Erwärmung sowie zwischen der Probenentnahme und der ersten Wägung durch Undichtigkeit der Behältnisse.

Um diese Fehler möglichst klein zu halten, ist bei der Entnahme von Bohrproben auf eine möglichst kurze Bohrzeit zu achten, um eine zu starke Erwärmung des Bohrgutes zu vermeiden. Allgemein ist es günstiger, an Stelle von Bohrkernen mit kleinem Durchmesser, Bohrmehl mit einem Bohrhammer zu entnehmen, da sich kleine Bohrkern bei der Probenahme vergleichsweise stark erwärmen.

Für die Beurteilung des Laborwertes ist der Bezugsfeuchtegehalt (nach DIN 52620) entscheidend. Dieser ist ein an Baustoffproben ermittelter Labormesswert. Er gibt den Gleichgewichtsfeuchtegehalt an, der sich bei Wasserdampfabsorption im Gleichgewicht mit einer relativen Luftfeuchte von 80% bei 23°C Lufttemperatur einstellt. Unter einem praktischen Feuchtigkeitsgehalt versteht man nach DIN 4108 Teil 4 Anhang A den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht überschritten wird. Er entspricht in etwa der Ausgleichsfeuchte bei 85% relativer Luftfeuchtigkeit.

### Calciumcarbid-Verfahren

Chemische Methoden finden im Bauwesen häufiger Anwendung, da sie vor Ort eingesetzt werden können. Dabei wird die chemische Reaktion von Calciumcarbid auf Wasser beobachtet. Der sich durch das entstehende Azetylgas bildende Druck ist ein Maß für den Wassergehalt der Probe. Dem Baustoff wird eine kleine Materialprobe von 5 bis 20g entnommen, die sorgfältig zerkleinert werden muss. Die Probe kann nur einmal verwendet werden, für weitere Messungen, z. B. zu einem späteren Zeitpunkt, sind weitere Proben zu entnehmen.

Nachteile des Verfahrens:

- Die benötigte Probenmenge ist aufgrund des kleinen Messbereiches des Verfahrens vom Feuchtegehalt der Probe abhängig. Es bedarf einiger Erfahrung, da der Sachverständige in der Lage sein muss, den zu erwartenden Feuchtegehalt vorher abzuschätzen.
- Bei der Zerkleinerung der Probe entweicht leicht Materialfeuchte, was zu Messfehlern führt.
- Das Verfahren ist zerstörend und verursacht je Probe Kosten.

### Hygrometrische Verfahren

Jeder Baustoff nimmt aus der Luft Wasser auf, bis er sich in einem Feuchtegleichgewicht befindet. Die Menge des aus der Luft aufgenommenen Wassers hängt vom Baustoff und der relativen Feuchte der Luft ab. Sinkt die relative Feuchte der Luft, gibt der Baustoff wieder Feuchte an die Luft ab. Diese Vorgänge werden durch die Sorptionsisothermen gekennzeichnet.

Als praktische Anwendung kann z.B. in eine Mauer ein Loch gebohrt werden, in welche ein Feuchtefühler eingeführt wird. Dieser wird zur Umgebungsluft dampfdicht abgedichtet. Nach Einstellen der Ausgleichsfeuchte kann, wenn die Sorptionsisothermen eines Baustoffs bekannt sind, aus der Messung der Luftfeuchte in einem abgeschlossenen Volumen innerhalb des Bauteils auf die Materialfeuchte der Umgebung geschlossen werden.

Bedacht werden sollte jedoch, wenn genaue Angaben verlangt werden, dass die Sorptionsisothermen zum einen eine Temperatur- und Materialabhängigkeit zeigen, zum andern sehr flache oder steile Gradienten aufweisen (siehe auch Abbildung der einzelnen Materialfeuchten in Abhängigkeit von der Luftfeuchte).

Die Ausgleichsfeuchte eines Materiales entspricht der relativen Luftfeuchtigkeit der mit dem Material im Gleichgewicht stehenden Luft. Die Ausgleichsfeuchte 80% entspricht dem Feuchtigkeitsgehalt, den das betrachtete Baumaterial bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80% hätte. Materialfeuchten, welche über der materialspezifischen Ausgleichsfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte liegen, gelten laut DIN 8108 als feucht.

Ideal ist diese Methode zur Langzeitbetrachtungen z.B. zur Überwachung, ob nach einer Sanierung eine Wand auch tatsächlich trocknet.

Problematisch ist, dass bei mineralischen Baustoffen - im Gegensatz zu Holz - Trocken und Nass häufig eng beieinander liegen. Dies verdeutlicht die nachfolgende Abbildung 2: Während die Wasseraufnahme bei Holz nahezu linear mit steigender Luftfeuchtigkeit ansteigt, ist beim Extrembeispiel Gips trotz steigender Luftfeuchtigkeit die Wasseraufnahme über weite Strecken gering, um dann jedoch mit einem Mal steil anzusteigen. Außerdem veranschaulicht das Diagramm, dass Baustoffe bei gleicher Feuchte unterschiedlich viel Feuchtigkeit aufnehmen und es daher in der Baupraxis über Einzelmessungen schwierig ist, auszusagen, ob ein Baumaterial nass oder nur feucht ist.

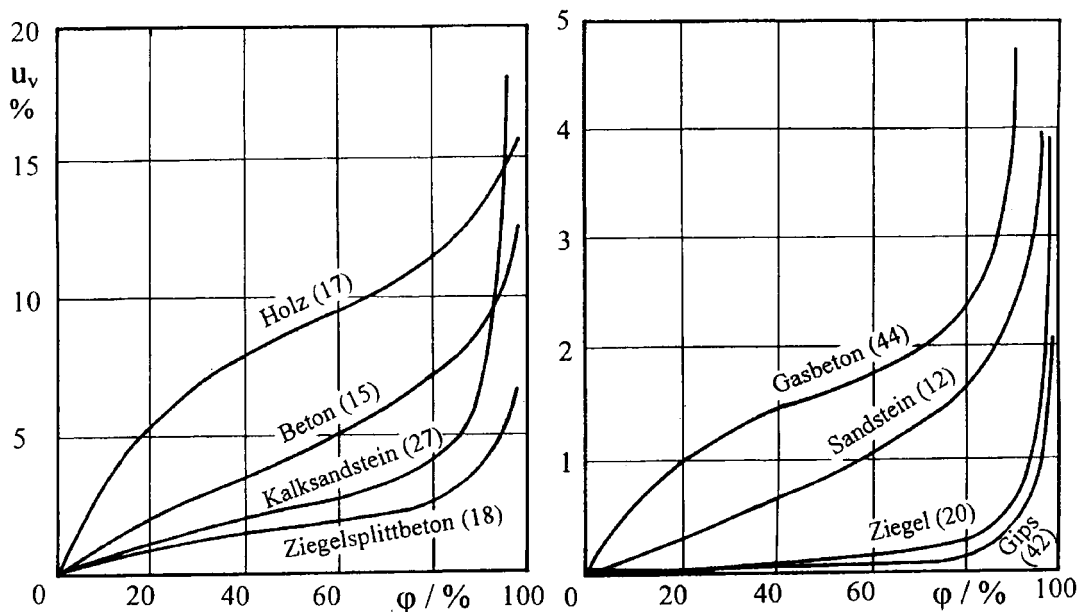


Abbildung 2: Verhältnis von absoluter Feuchte  $u_v$  zur relativen Feuchte  $\phi$  für unterschiedliche Baustoffe <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauschadenstagung des VDB e.V., Baufeuchte richtig messen und sanieren 29. und 30. September 2000 in Düren

## Weitere Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte

Die weiteren Verfahren sind theoretisch möglich, spielen aber aufgrund ihres apparativen Aufwandes, der entstehenden Kosten oder der mangelhaften Verfügbarkeit von vor Ort einsetzbaren Geräten in der Baupraxis nur in Ausnahmefällen eine Rolle.

### Mikrowellen

Messungen im Mikrowellenbereich erfordern eine aufwendige Technik zum Messen und Auswerten. Der Reiz der Methode liegt in der geringeren Störanfälligkeit gegenüber dem Salzgehalt von Baustoffen.

### Akustische Verfahren

Die akustischen Eigenschaften von Baustoffen werden im Hörbereich und im Ultraschallbereich unter anderem von der Materialfeuchte bestimmt.

### Infrarot-Verfahren

Der Feuchtegehalt hat einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit eines Material. Mit Hilfe der Infrarotthermographie ist es daher bei geeigneten Randbedingungen möglich, unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade eines Bauteils zu erkennen. Allerdings hängt die Intensität der emittierten Strahlung auch von zahlreichen weiteren Faktoren ab.

### Gamma-Strahlen

Gamma- oder Röntgenstrahlen werden beim Durchgang durch Baustoffe auch durch das enthaltene Wasser abgeschwächt, so dass eine Feuchtemessung an Baustoffen grundsätzlich möglich ist.

### Neutronenstrahlen

Schnelle Neutronen werden durch Wasserstoffatome abgebremst. Die Anzahl langsamer Neutronen pro Zeiteinheit kann als Maß für den gesamten Wassergehalt gelten.

---

## Nachweis von Salzen im Bauwerk

---

Der Nachweis von Salzen an der Oberfläche von Baumaterialien deutet auf ablaufende Transportprozesse von Feuchtigkeit hin. Salze werden am Ursprungsort gelöst und mit der wandernden Feuchtigkeit transportiert. Durch die Oberflächenverdunstung wird die transportierte Salzlösung immer konzentrierter, bis ein Salzrand zurückbleibt oder Salzkristalle als Ausblühungen entstehen. Durch diesen Prozess werden Salzbelastungen im Mauerwerk angereichert.

**Aufgrund der hygroskopischen (wasserziehenden) Eigenschaften der meisten Salze sorgen diese dafür, dass die Wand feucht bleibt, auch wenn durch bautechnische Maßnahmen der Eintrag der Feuchtigkeit von außen abgestellt wird. Daher stellt der Nachweis von Salzen eine wichtige Information dar.** Die Zusammensetzung der transportierten Salze gibt darüber hinaus auch Rückschlüsse auf die Herkunft der Feuchtigkeit.

**Für die Herkunft von Salzen in Gebäuden gibt es mehrere Möglichkeiten:**

1. Das ursprüngliche Baumaterial (Bausteine, Bindemittel, Zuschlagstoffe, Anmachwasser);
2. Eindringen von Außen (Grundwasser, Erdreich, Streusalz oder Niederschläge);
3. Neubildung im schon existierenden Baubestand (durch zirkulierende Wässer oder auch aus der Atmosphäre, z.B. durch Luftschadstoffe);
4. Einschleppen durch Reparaturmaßnahmen in vorher nur mäßig belastete Bauwerke.

Kondensierende Feuchtigkeit, wie sie durch ungenügende Lüftung auftreten kann, führt nicht zu Salzbelastungen, weil es keinen Transportprozess durch die Bausubstanz gibt, bei dem Salze aufgenommen werden können.

**Salzbelastungen aus Baumaterialien**

Viele Baustoffe haben einen natürlichen Gehalt an Salzen. Besonders in einigen Natursteinen, aber auch in keramischen Materialien und Ziegelsteinen, können erhebliche Mengen an bauschädigenden Salzen vorhanden sein. Potentielle Salzträger sind Natursteine (Sandsteine, Schiefer, Grauwacken) ebenso wie künstlich hergestellte (z.B. Ziegelsteine). Je nach Herkunftsort und Rohmaterial lassen sich gelegentlich erhebliche Belastungen feststellen. Unlösliche Salze sind relativ ungefährlich, doch können solche, die in Wasser oder wässrigen Lösungen löslich sind, zu erheblichen Bauschäden führen.

Besonders zu beachten ist dies natürlich für Bausteine, die aus löslichen Salzen bestehen, wie Kalksteine, Gips- oder Anhydritsteine. So hat Gips eine überraschend hohe Löslichkeit von ca. 2 Gramm pro Liter Wasser (bei 20°C) und kann sich somit leicht umsetzen und im Mauerwerk bewegen. Beim Zusammentreffen mit anderen Salzbestandteilen kann es zu Sekundärreaktionen kommen.

Zemente, auch solche aus der Frühzeit der Zementverwendung im 19. Jahrhundert, enthalten meist wesentlich höhere Anteile an löslichen Salzkomponenten als Brand- oder Löschkalk. Diese können leicht mobilisiert werden und Ursache für Salzschäden sein. Besonders kritisch ist das Potenzial zur Bildung von Ettringit (Zementbazillus) und Thumasit beim Zusammentreffen mit Sulfat. Dies führt zu den Erscheinungen des Ettringit-Treibens, die nachhaltige Zerstörungen bewirken können. Auch das Anmachwasser für Mörtel kann gelegentlich Quelle von Salzen sein. Auch war es in früheren Jahrhunderten in der Küstengegend üblich, den Putz- oder Mauermörtel mit Meersand herzustellen. So wurden über den salzbelasteten Zuschlag größere Mengen an Salzen eingebracht.

**Eindringen der Salze von außen**

Für das Eindringen bauschädigender Salze sind im Wesentlichen folgende Quellen bekannt. Die Salzstreuung in den Wintermonaten führt zu einer erhöhten Chloridbelastung des Mauerwerkes in doppelter Hinsicht: Dem Mauerwerk werden über das salzbelastete Sickerwasser oder direkt über das Spritzwasser im Sockelbereich Salze zugeführt.

Wie im Baustoff, befinden sich auch im Baugrund Salze, die durch den kapillaren Wassertransport in den Baustoff eindringen und sich dann über den gesamten Mauerwerksquerschnitt verteilen können. Die Salzwanderung aus dem Untergrund darf in ihrer Bedeutung keinesfalls unterschätzt werden, da sie über Jahrzehnte (Jahrhunderte) hinweg

zu erheblichen Salzanreicherungen vor allem in Kellerwänden führt, so dass diese allein aufgrund der hygroskopischen Wirkung dieser Salze feucht werden.

Durch die Düngung des Bodens, besonders im landwirtschaftlichen Bereich, werden erhebliche Mengen - hauptsächlich Nitratverbindungen - in den Boden und damit in den Grundwasserbereich eingebracht. Durch Leckstellen in der Kanalisation - in Straßen und/oder Hauskanälen - gelangen schadstoffbelastete Abwässer entweder direkt oder indirekt über den Baugrund in die Bausubstanz. Ein mit den undichten Kanälen vergleichbarer direkter Schadstoffeintrag ist besonders an Gebäudeecken und Hauseinfahrten durch Exkremate von Hunden und dgl. gegeben.

## **Herkunft unterschiedlicher Salze**

### ***Chloride***

Chloridhaltige Ausblühungen können auch durch den Eintrag von Streusalz, Frostschutzmittel bei der Mörtel- oder Betonzubereitung oder das Absäuern der Wandfläche mit Salzsäure entstehen. Natriumchlorid kann auch aus dem Meer über die Atmosphäre ins Mauerwerk gelangen. Seltener stammen Chloride aus dem Boden.

### ***Nitrate***

Nitrate, die auch als Salpeter bezeichnet werden, treten fast nur in Verbindung mit organischen Zersetzungstoffen (Abbau der aus Proteinen entstehenden Aminosäuren) auf. Schäden durch Nitrate sind daher häufig an Stall- und Abortmauern zu finden oder dort, wo eine oft mit Gülle gedüngte Wiese zu Bauland wurde. Oft lässt ein Schaden an anderen Mauern eine frühere landwirtschaftliche Nutzung vermuten. Es können aber auch Abortanlagen (z.B. ehemalige Sickergruben) oder Kanalsysteme mit undichten Stellen vorliegen oder ebenso anliegende Humuserde (Beispiel: Unglasierte Blumentöpfe aus Ton zeigen auch oft Salze an der Außenseite). Nitrate haben keine Quelle in Baumaterialien, so dass ihr Nachweis auf einen Eintrag von Außen oder Abwasser (Fäkalien) hinweist.

### ***Nitrite***

Nitrite entstehen insbesondere durch den mikrobiologischen Abbau von Nitraten im sauerstoffarmen Milieu und die mikrobielle Oxidation von Ammonium (Düngemittel, fäkale Abwässer). In reinem, unverschmutztem Wasser sowie in üblichen Baustoffen kommen Nitritsalze praktisch nicht vor.

### ***Sulfate***

Für Sulfat-Ausblühungen können zwei Hauptquellen verantwortlich gemacht werden:

Der Einsatz von Gips als Baumaterial, da Gips ( $\text{CaSO}_4$ ) über eine relevante Löslichkeit verfügt und sich deshalb unter Feuchtigkeitseinwirkung zersetzt („Faulen“ des Gipses). Ziegel können durch die Verwendung von ungeeigneten Rohstoffen oder nicht geeignete Produktionsabläufe lösliche Sulfate (z.B. Magnesiumsulfat) abgeben.

Darüber hinaus sind Sulfate in großen Mengen im Erdboden enthalten. In Industriegebieten kann zusätzlich durch Niederschlagswasser eine Sulfatanreicherung in Mauerwerken entstehen.

### ***Phosphate***

Phosphate sind ein Hinweis auf den Eintrag von Abwasser (Jauche, Dünger, Waschmittel). Sie sind in üblichen Baustoffen ebenfalls nicht enthalten.

### ***Borate***

Borate weisen im häuslichen Umfeld auf Waschmaschinenabwässer hin. So enthalten die meisten Vollwaschmittel etwa 10-30% Natriumperborat.

### ***Alkalisalze***

Zu den Alkali-Elementen gehören Natrium und Kalium. Da Alkalisalze, wie das NaCl (Speisesalz), sehr wasserlöslich sind, sind sie bis auf ihren Einsatz als Frostschutzmittel beispielsweise für Beton in Baustoffen nicht enthalten. Eine häufige Ursache von Versalzungen insbesondere im Straßen- und Gehwegbereich ist der Einsatz von Streusalz.

### ***Erdalkalisalze***

Zu den Erdalkali-Elementen gehören die Elemente Calcium und Magnesium. Sie sind Grundlage üblicher Baustoffe, wie Gips ( $\text{CaSO}_4$ ) oder Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ), sind aber auch im Erdboden enthalten.

---

## **Leckagenachweis durch das Blower-Door Verfahren**

---

### **Luftdichtung verhindert mikrobielle Bauschäden**

Mit der Durchströmung der Luft durch die Konstruktion von innen nach außen nimmt in der kalten Jahreszeit die Temperatur ab. Die Folge ist Ausfall von Tauwasser in der Konstruktion.

### **Folgende Problematik sollte dabei insbesondere bei Planung und Ausführung berücksichtigt werden:**

Je dichter eine Gebäudehülle gebaut wird, desto höher ist der Luftdurchsatz durch einzelne Fugen. Bisher haben die Häuser sehr viele Leckagen aufgewiesen, so dass sich die Leckrate über fast die gesamte Gebäudehülle verteilt hat. Werden diese Öffnungen nun reduziert auf einige wenige, so wird dies mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit genau an diesen Punkten zu Bauschäden führen, zumindest an der Leeseite, d.h. an der Seite, an der die feuchte Warmluft nach außen gedrückt wird. An der Luvseite, d.h. an der windangeströmten Seite des Hauses, wird Kaltluft, die im allgemeinen trockener ist als die Innenluft, einströmen. Dies führt zu "Kaltluftseen" am Fußboden und Zugscheinungen im Gebäude, was sich negativ auf das Wohlbefinden der Bewohner auswirkt.

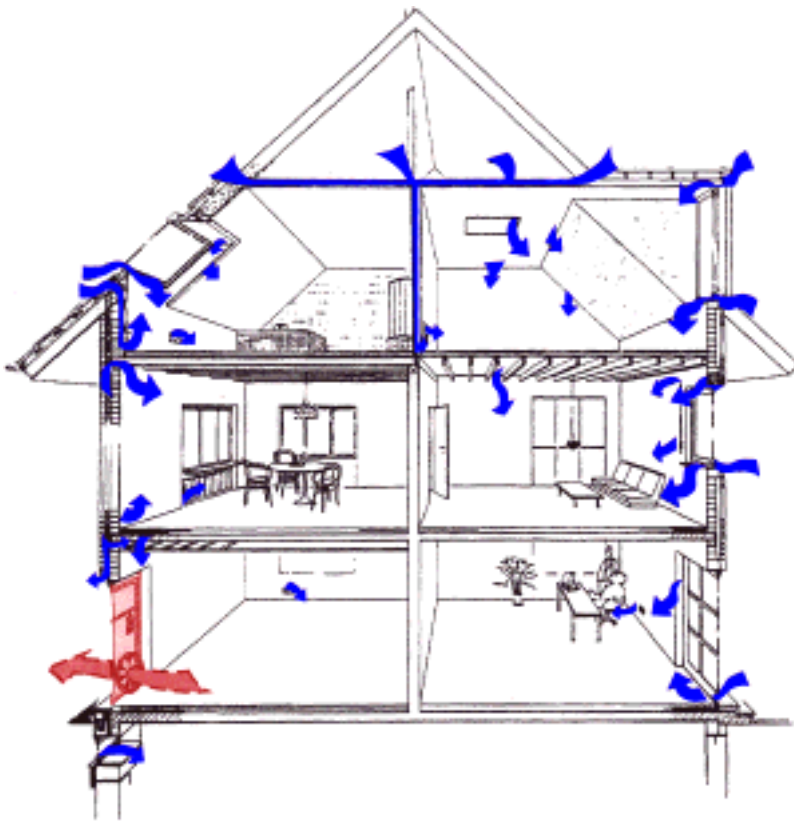


Abbildung 3: typische Leckagen in einem Gebäude

Das besondere Augenmerk ist aufgrund der Fehlermöglichkeiten insbesondere auf Leichtbauteile, wie das Dachgeschoss und alle anderen Holzbauteile zu richten, sowie auf alle Anschlussfugen, z.B. bei Fenstern und Türen. Probleme gibt es jedoch auch beim Massivbau: Mauerwerke sind nicht luftdicht, sondern werden dies erst durch den Putz (innen und außen), der die Luft- bzw. Winddichtigkeitsschicht herstellt.

### Prüfverfahren der Luftdichte

Die DIN ISO regelt das „Blower-Door“-Verfahren als zulässiges Überprüfungsinstrument der Gebäudedichtheit.

Hierbei handelt es sich um eine Luftdurchlässigkeitsmessung der Gebäudehülle durch einen Drucktest bei stationärem Differenzdruck. Für diese Messung wird eine „Blower-Door“ in eine Außentür - z.B. eine Balkontür - eingebaut oder auch in ein Fenster. Mit dem Gebläse wird nun eine Druckdifferenz zwischen dem Gebäude und der Außenluft erzeugt. Es kann wahlweise Unter- wie auch ein Überdruck hergestellt werden. Am Gebläse wird der Volumenstrom gemessen in Abhängigkeit vom Differenzdruck. Hat sich der Messwert auf den vorgesehenen Prüfdruck von 50 Pascal eingestellt, so erhält man den Luftdurchlässigkeitswert  $n_{50}$ .

## Die DIN 4108 Teil 7 schreibt die Dichtigkeit für Gebäude vor

Die Dichtigkeit eines Gebäudes muss für Wohngebäude ohne mechanische Lüftung innerhalb der Luftdurchlässigkeitsrate (volumenbezogen)  $n_{50} \leq 3$  betragen; für Häuser mit mechanischen Lüftungsanlagen  $n_{50} \leq 1,5$ .

Leckagen spürt man mit Hilfe eines Thermoanemometers (Luftströmungsmessgerät) und/oder eines Nebelgenerators auf. Bei entsprechend großen Temperaturunterschieden zwischen innen und außen kann zusätzlich auch eine Thermographiekamera eingesetzt werden.



Abbildung 4: Leckageortung mittels Luftströmungsmessgerät

## Leckagenachweis durch Infrarot-Thermografie

Mit Hilfe der Infrarot-Thermografie lässt sich bei einem Unterdruck von 50 Pa die einströmende Luft durch Bauteile nachweisen, insbesondere wenn diese eine deutliche Temperaturdifferenz zur Innenluft aufweist. Die Kaltluft kühlt die Bauteile im Vorbeiströmen aus, was durch die Thermokamera in einem Falschfarbenbild dargestellt wird.

Die Kamera hat den Vorteil, auch sehr langsame Strömungen noch nachweisen zu können und Messungen von Leckagen an ansonsten unerreichbaren Stellen (z.B. in sehr großer Höhe) vorzunehmen. Der Dokumentationswert der IR-Bilder ist hoch. Da ein IR-Bild einem optischen Bild im allgemeinen sehr ähnelt, lassen sich undichte Stellen gut lokalisieren.

Das Verfahren hat jedoch den Nachteil, das es nur in der kalten Jahreszeit eingesetzt werden kann.

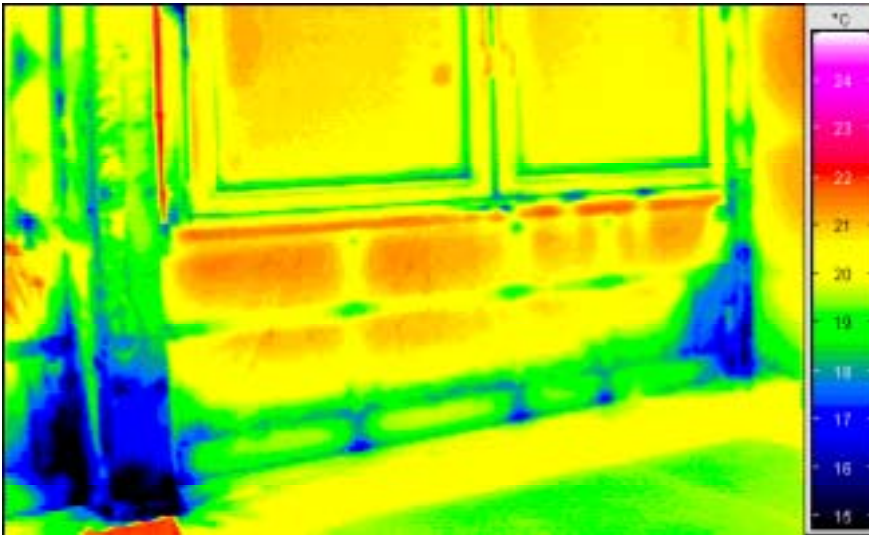


Abbildung 5: Infrarot-Thermografie zeigt Abkühlung von luftdurchströmten Bauteilen bei Unterdruck

## **Leckagenachweis durch Theaternebel**

---

Eine jahreszeitenunabhängige und zudem kostengünstigere Möglichkeit Leckagen nachzuweisen, bietet der Einsatz eines Nebelgenerators. Der zu untersuchende Gebäudeteil wird dabei von innen mit Theaternebel geflutet. Anschließend wird mit dem Blower-Door Überdruck erzeugt.

Die Stellen, an denen der Nebel dann auf der Außenseite des Gebäudes sichtbar wird, geben Aufschluss darüber, wo die Luftströmung durch die eigentlichen Leckagen der Gebäudehülle hindurchtritt. Mittels Videokamera oder Foto ist die Messung gut zu dokumentieren. Bei der Prüfung anwesende Personen sind von der Aussagekraft der Messung im allgemeinen schnell überzeugt.

## Raumklimaaufzeichnungen

---

Probleme mit Feuchtigkeit in Altbauten nach Teilsanierungen nehmen immer mehr zu - die Streitigkeiten über den oder die Verursacher auch.

Zur Diagnose der Ursache von Feuchtigkeits- und den damit verbundenen Schimmelpilzproblemen ist eine zielorientierte Analytik notwendig, welche sich von der Einzelbetrachtung eines Bauteils löst und die Gesamtheit eines Gebäudes wie auch das individuellen Wohnverhalten der Bewohner erfasst. Raumklimaaufzeichnungen bieten dazu das geeignete baubiologische Analysewerkzeug. Je nach Frage- und Aufgabenstellung können Aufzeichnungen über Feuchte- und Temperaturverlauf zielorientiert eingesetzt werden. Die Kombination aus Messungen von Raumluft- und Wandoberflächen-Parametern sowie der Kohlendioxid-Konzentration mit anschließender Computerauswertung ergibt eine entscheidende Datengrundlage für eine problemorientierte Bewertung der Situation.

Aufzeichnungen über mehrere Wochen sind durch die Bewohner schwer manipulierbar, und die Erfahrung zeigt, dass so die individuellen Wohngewohnheiten tatsächlich wiedergeben werden können.

Folgende Informationen können mit der Durchführung von Raumklimaaufzeichnungen gewonnen werden:

- Lüftungszyklus der Bewohner,
- Art der Durchführung der Lüftung, wie Querlüftung, Stoßlüftung und Kipplüftung,
- Heizgewohnheiten, sowie allgemeine Nutzungsgewohnheiten (Nachtabschaltung, Wachgewohnheiten, etc.),
- Feuchteauffälligkeiten der Bausubstanz (Neubaufeuchte, Undichtigkeiten und aufsteigende Feuchte),
- Visualisierung der Taupunktprobleme (Raumluft- vs. Wandoberflächentemperatur),
- Nachweis der für mikrobielles Wachstum verfügbaren Feuchtigkeit (Berechnung der Wasseraktivität),
- Hinweise auf den natürlichen Luftwechsel (Infiltration),
- Berechnung des Luftwechsels über CO<sub>2</sub> - Aufzeichnungen,
- Datengrundlage für die Berechnung des notwendigen individuellen Luftwechsels, je nach Gebäudenutzung,
- Wärmeeigenschaften der Gebäudehülle,
- Datengrundlage zur Entscheidung über sinnvolle Sanierungsmaßnahmen (Erhöhung von Raumtemperatur, Wandtemperatur, Dämmstandard der Hülle, Luftwechsel, Fensterlüftung, Druckunterschiede oder Kombinationen einzelner Maßnahmen).

Die Grafik in Abbildung 6 zeigt ein typisches Beispiel einer Raumklimaauzeichnung, in der das Lüftungsverhalten der Bewohner deutlich erkennbar ist.

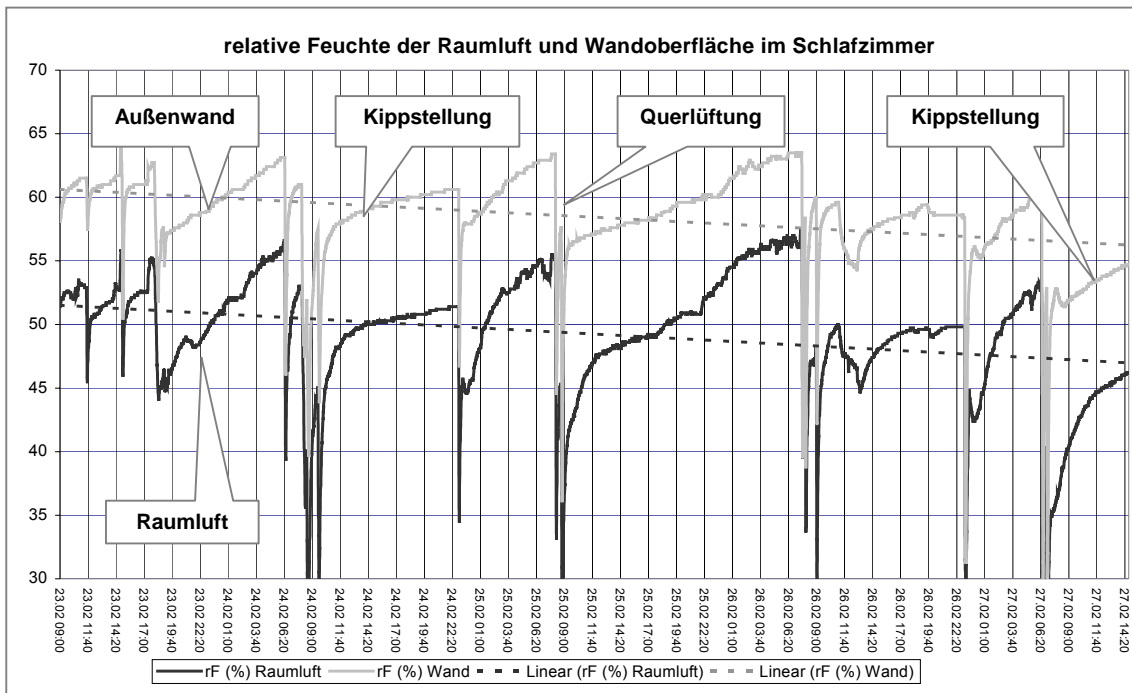


Abbildung 6: Grafische Auswertung einer gleichzeitigen Raumklimaauzeichnung von Raumluft und Außenwand

## Bauphysikalische Messverfahren - Übersicht über Nachweismethoden von Feuchtigkeit in Gebäuden

Problem	Verfahren	Methode	Aussagekraft
<b>Luftfeuchtigkeit und Temperatur</b>	Datenlogger für Luftfeuchtigkeit und Temperatur	Elektrophysikalische Messung	Erfassung der Raumtemperatur und -feuchte. (Kurzzeitmessungen sind wenig aussagekräftig, daher empfiehlt sich die Verwendung von Datenloggern)
<b>Feuchtigkeit in Hohlräumen</b>	Datenlogger für Luftfeuchtigkeit und Temperatur	Elektrophysikalische Messung	Erfassung von versteckten Feuchtigkeitsquellen
	Endoskop	Optische Betrachtung von verdeckten Schäden in Hohlräumen (Fehlböden, Gipskartonverkleidungen, Installationschächte)	Erkennung von Myzelbildung (Erfahrung in der makroskopischen Erkennung von mikrobiellen Befall ist notwendig). Feuchtigkeit ist häufig optisch nicht erkennbar.

Problem	Verfahren	Methode	Aussagekraft
<b>Wärmebrücken</b>	Infrarotthermometer	Lokale optische Messung der Infrarotwärmestrahlung von Bauteilen	Erfassung von Temperaturdifferenzen. In der Regel praxisorientierter als die Thermographie. Mit Hilfe von Tabellenwerken kann die Wasseraktivität von Wandoberflächen bestimmt werden (einfach einsetzbares Verfahren; eine ausreichende Messgenauigkeit ist nur bei nicht reflektierenden Oberflächen in der Heizperiode gegeben)
	Thermographie	Großflächige optische Messung der Infrarotwärmestrahlung eines Gebäudes	Erfassung von Wärmebrücken aufgrund unterschiedlicher Abstrahlung von Wärme von einem Gebäude (Verfahren kann nur in der Heizperiode durchgeführt werden)
<b>Luft- und Windundichtigkeiten</b>	Blower-Door	Messung bzw. Beobachtung von Luftströmen bei vorhandenem Unter- bzw. Überdruck im Gebäude u.a. mit Hilfe von Strömungsmessgeräten bzw. Kunstnebel	Nachweis von Luftströmungen durch die Baukonstruktion
<b>Aufsteigende Feuchte</b>	Salzbestimmung	Chemische Konzentrationsbestimmung spezifischer Anionen und Kationen im Baumaterial und im Erdreich	Die Salzart gibt Hinweise auf die Herkunft der Feuchtigkeit und hygroskopische Einflüsse durch die Salzbelastung. Rückschlüsse über die Durchfeuchtung oder den Feuchtegehalt sind nicht möglich. Die Beurteilung setzt in der Regel die Untersuchung von Vergleichsproben aus dem selben Objekt voraus.
	Elektrische Baufeuchtemessgeräte	Messung des elektrischen Widerstandes bzw. der Kapazität	Erfassung von unterschiedlicher Feuchte im Material. Die Messung hat orientierenden Charakter, da die Ergebnisse vom Salzgehalt abhängig ist. Häufige Fehlerquelle: Es können nur Materialien gleicher Zusammensetzung miteinander verglichen werden. In der Praxis kann jedoch nicht sichergestellt werden, ob z.B. ein Ziegelstein mit dem anderen Ziegelstein vergleichbar ist.

Problem	Verfahren	Methode	Aussagekraft
<b>Bau- feuchte</b>	Elektrische Baufeuchte- messgeräte	Messung des elek- trischen Widerstan- des bzw. der Kapa- zität	Zeigen elektrische Verfahren zur Bestimmung von Baufeuchte „tro- cken“ an, sind keine weiteren Analy- sen notwendig. Zeigen die Geräte „feucht“ oder „nass“ an, muss das Ergebnis zur Bestimmung des abso- luten Feuchtigkeitsgehaltes durch weitere Verfahren abgesichert wer- den. Das Verfahren ist vor allem zur Messung der Holzfeuchte anwend- bar; bei mineralischen Baustoffen hat es jedoch nur orientierenden Charakter.
	Gravimetri- sche Materi- al-Feuchte- gehaltsbe- stimmung	Gravimetrische Tro- ckenmassebestim- mung (Wärme- schrank)	Ermittlung des Material-Feuchte- gehaltes mittels gravimetrischer Be- stimmung der Trockenmasse (Refe- renzverfahren)
<b>Nutzer- verhalten</b>	Datenlogger für Luftfeuch- tigkeit und Temperatur	Elektrophysikalische Messung	Beurteilung des Lüftungszyklus der Nutzer, der Art der Durchführung der Lüftung (z. B. Querlüftung, Stoßlüf- tung und Kipplüftung), der Heiz- so- wie allgemeinen Nutzungsgewohn- heiten (z. B. Nachtabschaltung, Wasch- und Kochgewohnheiten).
<b>Luft- wechsel</b>	Tracergas	Messung der Ab- baurates eines Tra- cergases	Ermittlung der Luftwechselrate unter normalen Nutzungsbedingungen (Ergebnisse sind von den Witte- rungsverhältnissen zum Untersu- chungszeitpunkt abhängig)
<b>Undichtig- keiten</b>	Elektrische Baufeuchte- messgeräte	Messung des elek- trischen Widerstan- des bzw. der Kapa- zität	Erfasst werden kann die Ausbreitung des eindringenden Wassers in den Bauteilen durch Vergleichsmessun- gen. Innerhalb der gerätespezifi- schen Grenzen gute Nachweismög- lichkeit
<b>Leitungs- wasser- schäden</b>	Elektrische Baufeuchte- messgeräte	Messung des elek- trischen Widerstan- des bzw. der Kapa- zität	Messung der unterschiedlichen Ma- terialfeuchte. Innerhalb der geräte- spezifischen Grenzen gute Nach- weismöglichkeit
	Thermogra- phie	Großflächige opti- sche Messung der Infrarotwärmestra- hlung eines Gebäu- des	Erfassung der Änderung der Wär- meleitfähigkeit auf Grund des Ein- dringens von Wasser in Baumateria- lien (nur unterstützendes Verfahren in Heizperiode)

---

## Schlussbetrachtung

---

Feuchtigkeitsschäden und Schimmelpilzbildung in Gebäuden sind ein Anlass für kontroverse Meinungen. Ist die Ursache in baulichen Mängeln oder in falschem Verhalten der Bewohner zu suchen? Zu viele Prozesse werden geführt, Streitigkeiten unter den Parteien werden ausgetragen, obwohl in den meisten Fällen eine klare Zuordnung der Ursachen möglich ist. Der Fehler liegt häufig darin, dass Feuchtprobleme durch Kondensationseffekte immer noch massiv unterschätzt werden.

Nach unserer Erfahrung sind Feuchtigkeitsphänomene in denen die Betroffenen keine Zuordnung machen können häufig durch Anreicherungseffekte von Luftfeuchtigkeit verursacht. Ein Paradebeispiel ist das Einbringen häufig unnötiger Horizontalsperren gegen vermeintliche aufsteigende Feuchtigkeit bei Kellersanierungen bei älteren feuchten Kellerwänden. Häufige Ursachen sind jedoch über die Jahrzehnte (Jahrhunderte) aufgebaute hygroskopischen Salzablagerungen, welche zu einer vermehrten Wasseraufnahme aus der Luft führen. Dieser Effekt wird verstärkt sich, durch die abnehmende Dämmwirkung der feuchten Wand gegenüber dem Erdreich, wodurch letztendlich im Sommer der Taupunkt der in den Keller strömende warme Sommerluft unterschreiten wird, so dass „flüssige Wasser“ an der Kellerwand ausfällt.

Um auch bei der Bestimmung der Ursache von Baufeuchte eine nachvollziehbare Wirkungsbeziehung herzustellen, ist – wie bei der Schimmelpilzanalytik – eine Kombination der Methoden der oft goldene Weg.