

Klimatechnik

1. Rüstzeug: das hx-Diagramm nach Mollier

Auf dem hx-Diagramm lassen sich die folgenden Werte ablesen:

1. *Die Raumtemperatur:* ablesbar auf der y-Achse in °C
2. *Die absolute Feuchtigkeit in der Luft:* ablesbar auf der x-Achse in Gramm Feuchtigkeit pro Kilogramm Luft (g/kg)
3. *Der Sättigungsgrad der Luft:* Aus der Raumtemperatur und der Feuchtigkeit der Luft ergibt sich ein Punkt, an dem die Luft im Raum mit Feuchtigkeit gesättigt ist und es zur Kondensation und damit zur Schimmelbildung kommt. Beispiele:
 - Bei 20 °C liegt der Sättigungspunkt bei 14,5 Gramm Feuchtigkeit pro Kilogramm Luft.
 - Bei 25 °C liegt der Sättigungspunkt bei 20 g/kg Luft
 - Bei 15 °C liegt der Sättigungspunkt bei 10,5 g/kg LuftWas lernen wir daraus? Wärmere Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen.
4. *Die relative Luftfeuchtigkeit:* also die Feuchtigkeit in Prozent, die ja von der Temperatur und der Feuchtigkeit in der Luft abhängt. Diese Prozentzahlen kann man auf den Kurven, die parallel zur Kurve der Sättigungspunkte verlaufen, ablesen (logisch: der Sättigungspunkt bedeutet ja immer 100 % relative Luftfeuchtigkeit bei dieser Temperatur). Beispiele:
 1. Bei 10 g/kg Luft und 20 °C habe ich eine relative Luftfeuchtigkeit von 70%
 2. Bei 10 g/kg Luft und 25 °C habe ich eine relative Luftfeuchtigkeit von 50%
 3. Bei 10 g/kg Luft und 10 °C sollte ich schleunigst etwas unternehmen, dann liegt die relative Luftfeuchte nämlich weit über 100%
5. Dann gibt es noch diese ominösen quer verlaufenden Linien, aber die kriegen wir später, die spielen bei der konkreten Messung eine Rolle...

Halten wir die wichtigsten Erkenntnisse fest:

- Wärmere Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen als kalte Luft
- Bei kalten Temperaturen ist der Sättigungsgrad sehr schnell erreicht
- Die gleiche Feuchtigkeitsmenge führt bei unterschiedlichen Temperaturen zu unterschiedlicher relativer Feuchte
- Bei geringeren Temperaturen habe ich schon bei geringen Feuchtigkeitsänderungen enorme Schwankungen in der relativen Feuchte, außerdem ist der Sättigungsgrad sehr schnell erreicht.
- Schnelle Temperaturänderungen führen zu schneller Änderung der relativen Feuchte und können zu Schäden an den Exponaten führen (Risse im Holz, gewellte Leinwand,...)

Alles logisch? Schon, oder?

2. Der Mensch als Störfaktor in Museen

1. Der Mensch als Mief, Feuchtigkeits- und Temperaturproduzent

Der Mensch gibt pro Stunde 20 Liter CO₂ ab. Schon Pettenkofer hatte 1860/65 festgestellt, dass einem schon bei einer Konzentration von 2,15 Volumenprozent CO₂ schlecht wird. Der CO₂-Gehalt sollte 0,12 Volumenprozent nicht übersteigen. Außerdem gibt jeder Mensch mit diesem CO₂ eine Vielzahl charakteristische Öle und Fette (flüchtige Stoffe) ab, die sogenannten Riech- und Ekelstoffe.

Daraus ergibt sich, dass jeder Mensch pro Stunde 15,6 m³ Außenluft benötigt (sog. Pettenkofer-Zahl), wenn er sich wohl fühlen soll. Durch die Verschlechterung der Außenluft durch die Umweltverschmutzung ergibt sich heute eine Zahl von 20 m³ Außenluft pro Mensch und Stunde.

Erschwerend kommt hinzu, dass der Mensch eine Heizleistung von 110 Watt hat. Das bedeutet, dass jeder Mensch die Raumtemperatur erhöht. Das bedeutet aber auch, dass eigentlich eine Außenluftzufuhr von 50-60 m³ pro Person und Stunde notwendig ist, um die Raumtemperatur konstant zu halten. Halten wir zugute, dass über die Wände ein Luftaustausch stattfindet, so müssen wir dennoch von einer notwendigen Außenluftzufuhr von 40 m³ pro Person und Stunde ausgehen.

Als wäre das alles nicht schon schlimm genug, gibt der Mensch auch noch 50 Gramm Wasser pro Stunde ab, das entspricht etwa 2,5 g/m³. Das führt dazu, dass sich diese Feuchtigkeit an kälteren Flächen niederschlägt (z.B. Fenster, aber auch Gemälden an der Außenwand).

2. Behaglichkeit

Theoretisch können Exponate ideal gelagert werden, z.B. Leder bei 55-65 % rel. Feuchte und 16 °C, Keramik bei 40-50 % und 16 °C, Holz bei 50-55 % und 16 °C. Dummerweise gibt es da noch die Besucher:

Menschen haben nur einen schmalen Bereich, den sie als behaglich empfinden (auf dem hx-Diagramm als Behaglichkeitsfeld eingezeichnet). Das ist zwischen 40 und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit bei einer Temperatur zwischen 18-22 °C. Es ist übrigens auch festgestellt worden, dass die Konzentrationsfähigkeit des Menschen bei unter 20 °C Raumtemperatur am besten ist (Empfehlung: 15 °C für Hörsäle, je nach Dozent).

Warum ist uns eine hohe Luftfeuchtigkeit so unangenehm? Ganz einfach: Der Körper will ja 50 g/h Feuchtigkeit abgeben. Bei über 60% Luftfeuchtigkeit wächst aber der Widerstand der Luft diese Feuchtigkeit aufzunehmen, sprich: wir werden unsere Feuchtigkeit nicht mehr los und schwitzen. Bei unter 40% Luftfeuchtigkeit entzieht uns dagegen die Außenluft die Feuchtigkeit, was auch nicht angenehm ist.

3. Abbildungen

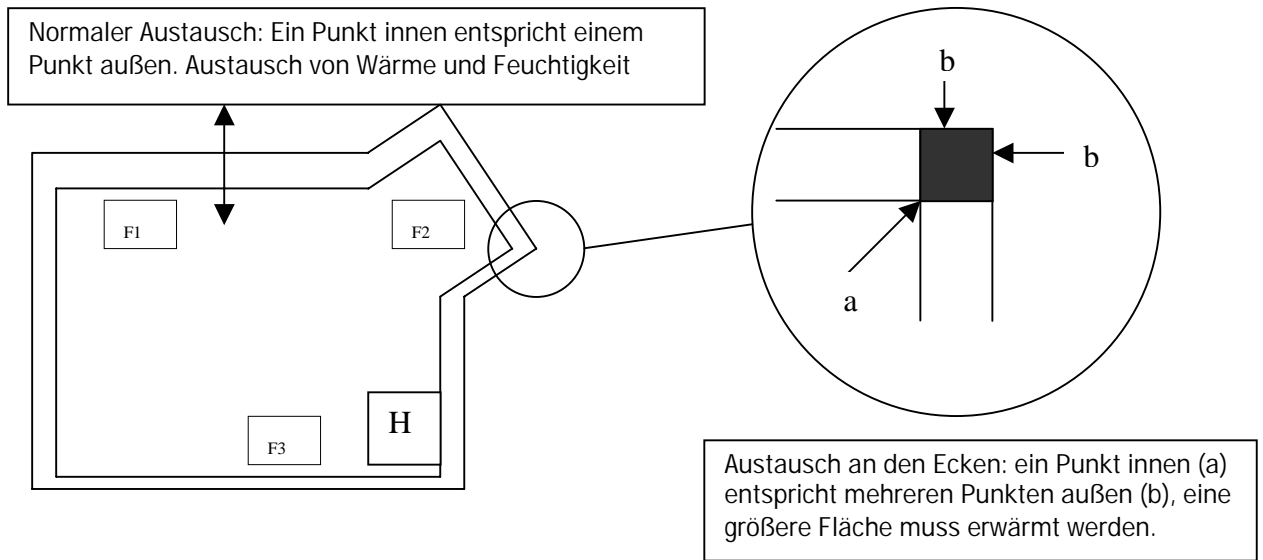


Abb.1: Gebäude mit Erker

Außentemperatur: - 15 °C

Innentemperatur: +20 °C

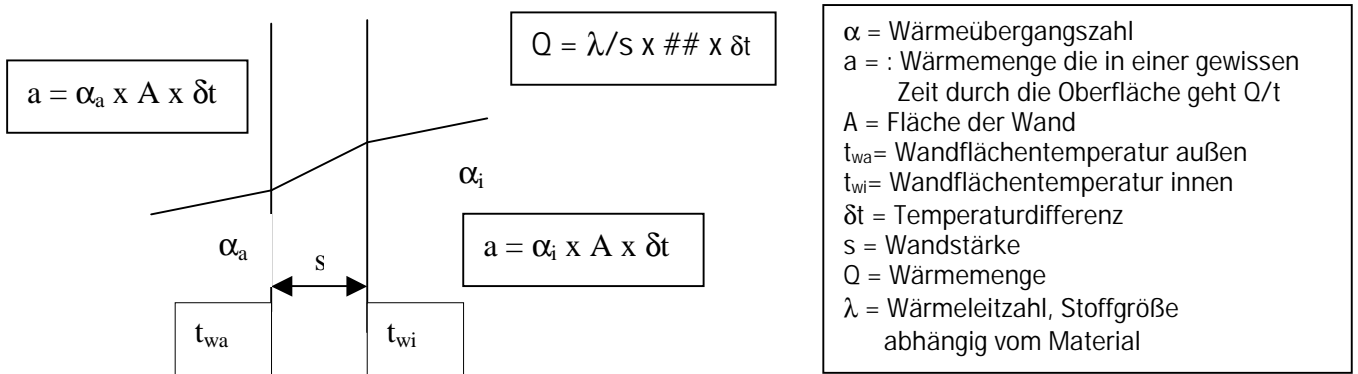


Abb.2: Die Außenwand – normaler Verlauf des Austausches

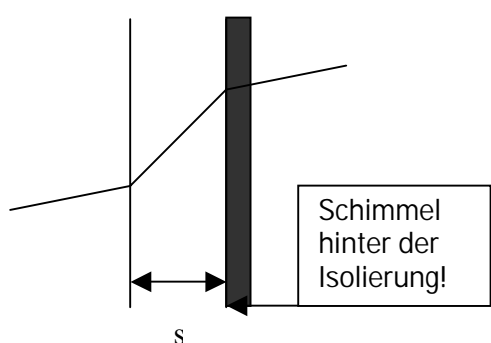


Abb.3: Wandisolierung innen:
Problem: Schimmel

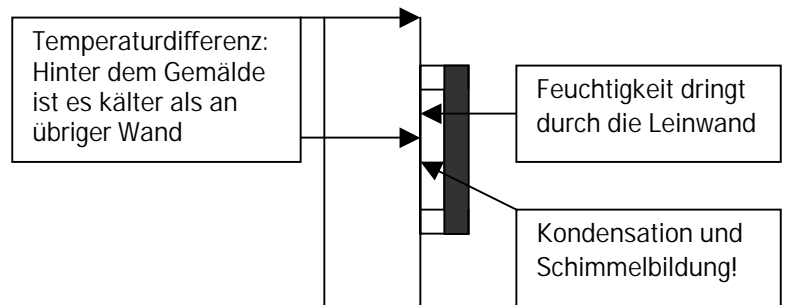


Abb.4: Gemälde auf Außenwand

4. Bauphysik und Museen

Grundsätzliche Erkenntnisse:

- Es gibt einen Austausch von Wärme und Feuchtigkeit zwischen Innen und Außen durch die Wände. Die Temperatur fällt innen vor der Außenwand leicht ab, senkt sich beim Durchgang durch die Wand stärker, aber linear ab und kühlt an der Außenluft nochmals leichter ab, bis die Außentemperatur erreicht ist. Außenwände sind Wärmebedarfsflächen!
- Der „Drang“ der Innenluft sich mit der Außenluft auszugleichen und damit die Geschwindigkeit des Austausches hängt von den Druckunterschieden zwischen Innen und Außen ab. Je geringer die Temperatur, desto geringer der Dampfdruck, je größer die Differenz zwischen Innenraum (z.B. 20 °C) und Außenluft (z.B. -15 °C), desto stärker der Austausch.
- Wände sind – je nach Baustoff mehr oder weniger – Wärmespeicher. Sie sorgen dafür, dass die Temperatur beim Austausch zwischen Innen und Außen linear, d.h. gleichmäßig, abfällt oder ansteigt. Sie verhindern schlagartige Temperaturänderungen.
- Der Abfall der Temperatur an den Außenwänden kann zum Niederschlag der überschüssigen Flüssigkeit an den Wänden und damit zu Schimmel führen.

Phänomene und deren bauphysikalischen Erklärungen:

1. Gebäude trocknen im Winter aus. Warum?

Im Winter ist die Luft in Räumen trockener als im Sommer. Kling abwegig, ist aber so: Die Außenluft kann wegen den niedrigen Temperaturen nicht so viel Wasser aufnehmen. Wenn diese Luft nun in den Raum kommt, wird sie erwärmt. Die Luft könnte also viel mehr Feuchtigkeit aufnehmen, hat diese aber zunächst nicht zur Verfügung, deshalb sinkt die relative Feuchte ab. Jeder Stoff ist aber bestrebt, seine Grenzwerte auszuschöpfen. Woher also die Feuchtigkeit nehmen? Logischerweise aus dem Gebäude, das noch Feuchtigkeit gespeichert hat, was dazu führt, dass das Gebäude austrocknet.

Folgen: Dielen trocknen aus, Spalten bilden sich, Risse entstehen.

Fachmannsgelaber: Es besteht eine Differenz zwischen maximaler Bindungsfähigkeit und Wirklichkeit, die je nach Größe der Differenz beim Ausgleich zu Schäden führt.

2. Wenn ein Gebäude anfängt zu schimmeln, dann immer unten in den Ecken. Warum?

Jedem Punkt außen an einer Außenwand entspricht ein Punkt innen an der selben Wand. Trivial! Was bedeutet das? Dieser Punkt wird im Winter von innen geheizt und heizt damit den äußeren Punkt mit, Austausch von Luft findet statt. Wie ist es aber bei Ecken? Da entspricht dem Punkt innen eine große Fläche außen (Abb. 1). Da diese Flächen von außen Kälte bringen ist dieser Punkt immer kälter als die anderen Wände. Folglich kann hier die Wand weniger Feuchtigkeit aufnehmen, es kommt schneller zur Kondensation, da der Sättigungspunkt erreicht ist. Die Feuchtigkeit ist der ideale Nährboden für Schimmel! Deshalb sind an vielen alten Gebäuden (schon bei den ollen Römern!) außen an den Ecken besonders reiche Verzierungen: Sie vergrößern die Wandstärke, der Temperaturabfall erfolgt langsamer und es kann sich nicht so leicht Schimmel bilden.

3. Eine reine Innenisolierung ist ungünstig (Abb.3). Warum?
Eine Isolierung (min. 6 cm), die auf der Innenwand angebracht wird, lässt die Wärmespeicherungsfähigkeit der Wand auf Null sinken. Was bedeutet das? Da keine Wärme zugeführt wird, friert die Wand ein. Wenn die Isolierung jetzt nicht 100% feuchtigkeitsundurchlässig ist, kann Feuchtigkeit (auch nur der kleinste Dampfpartikel) hinter die Isolierung dringen. Dort wird die Feuchtigkeit auf der eiskalten Wand gefrieren. Wenn die Außentemperaturen sich erhöhen schmilzt das Eis und befindet sich nun als Flüssigkeit hinter der Isolierung, wo sie wunderbar für Schimmel sorgt. Wichtig: Es gibt keine Dampfdiffusionsisolierungen, die 100% sicher sind. Und: Jedes Gemälde auf einer Außenwand ist eine Isolierung! (Abb.4) Deshalb müssen Gemälde mindestens 12-15 cm Abstand von der Wand haben.

5. Luftfeuchtigkeit regeln und messen

1. Wichtige Punkte bei der Messung und Regulierung der Luftfeuchtigkeit

- Die Luftfeuchtigkeit kann in einem Raum stark variieren. Wie in Abbildung 1 zu sehen, kommt es darauf an, wo gemessen wird: Der Feuchtigkeitsmesser F3 wird die geringste Luftfeuchtigkeit anzeigen, da er an der Wand mit der Heizung (H) steht. In Richtung der anderen Wand wird es zu einer kontinuierlichen Wärmeabnahme und Feuchtigkeitszunahme kommen, die Unterschiede können bis zu 30% betragen. F1 wird schon eine deutlich höhere Feuchte zeigen als F3, die höchste wird von F2 angezeigt werden, der im Erker mit nur unzureichender Wärmezufuhr steht.
- Eine Klimaanlage kann zwar die Bewahrungsbedingungen verbessern, aber keine 100%ige Bewahrung des Kulturgutes sicherstellen. In der Anlage kann man zwar die Luftfeuchtigkeit genau regulieren, im Raum ist die Luftführung aber nicht mehr kontrollierbar. Wenn wir die Klimaanlage auf 45-55 % rel. Feuchte einstellen, so wird sich das Gerät bei unter 45 % einschalten und bei 55 % abschalten. Woher bezieht das Gerät jedoch seine Informationen? Hygrometer F3 wird sehr schnell melden: „unter 45%“, da er nahe am Heizkörper steht, F1 würde aber vielleicht zur gleichen Zeit melden, dass im Erker eine zu hohe Luftfeuchtigkeit herrscht.
- Eine Klimaanlage muss auf einen guten Mittelwert eingestellt werden, der einen unteren und oberen Grenzwert hat. Hier beginnt das Problem: Welche Grenzwerte sollen genommen werden? Die für den optimalen Exponatschutz oder die Behaglichkeitsgrenzen des Menschen?
- Die Luftfeuchtigkeit kann nur sinnvoll auf Höhe des Exponats gemessen werden.
- Der wichtigste Schritt zum Schutz des Exponats ist das konstant halten der Luftfeuchtigkeit. Die Luftfeuchte in einem Ausstellungsraum mit Besuchern kann nicht konstant gehalten werden.
Gründe:
 - Jeder Mensch sondert (siehe 2.) 50 g/h Feuchtigkeit ab, die die Luftfeuchtigkeit erhöht. Da gleichzeitig die Menschen auch den Raum erwärmen, wird diese Feuchtigkeit zwar aufgenommen, wenn der Raum sich jedoch nach Schließung wieder abkühlt, schlägt sie sich zusammen mit den menschlichen Ölen und Fetten auf den Exponaten nieder.

- Die Beleuchtung eines Bildes erhöht die Temperatur im Umfeld des Bildes schlagartig und kühlt sie ebenso schlagartig wieder ab, wenn das Licht ausgeschaltet wird.

Lösung:

Besucher und Exponate strikt trennen. Abgeschlossene Vitrinen für die Exponatgruppen, Kaltlichtbeleuchtung, Glaswände zwischen Besuchern und Exponaten.

- Kritischer Punkt Nummer Zwei nach den Besuchern sind die Fenster. Durch sie wird die meiste Wärme abgegeben, weshalb sich Kondenswasser hier zuerst niederschlägt. Deshalb sollten Fenster eine besonders gute Isolierung haben. Die Güte eines Fensters ergibt sich aus dem K-Wert:
Basierend auf der Gleichung

$$Q = k \times A \times \delta t$$

Ergibt sich die Gleichung

$$K = \frac{1}{1/\alpha_i + s/\lambda + 1/\alpha_A}$$

Gut sind Doppelfenster, bei denen der Abstand zwischen den Scheiben 8 cm beträgt und die Außen- und Innenscheiben ein anderes Schwingungsverhalten haben. Je größer der Abstand, desto geringer die Luftzirkulation und desto besser die Isolierung gegen Wärme und Schall.

Der Dozent sagt: Historische Fenster und Exponatschutz sind unvereinbar, ein klimatisierter Raum braucht isolierte Fenster, sonst ist die Klimatisierung hinfällig.

2. Messung der Luftfeuchtigkeit

Eine grundsätzliche Bemerkung zum Thema messen: Die schlechteste Messung ist besser als gar keine.

Bei normalen Hygrometern muss man beachten, dass sie ab und zu geeicht werden müssen, d.h. man muss sie ab und zu 100% Luftfeuchte aussetzen.

Das einzige physikalisch fehlerlose Verfahren zum Messen der relativen Luftfeuchte ist jedoch das....

6. Messen mit dem Assmann-Psychrometer

Wie funktioniert's?

Das Assmann-Psychrometer besteht im wesentlichen aus zwei Thermometern. Das erste funktioniert wie jedes Raumthermometer: Es zeigt die Raumtemperatur, so wie sie an diesem Ort gerade ist, an. Okay, kein Problem!

Das zweite Thermometer ist, vereinfacht gesagt, in einen nassen Wattebausch gepackt.

Was passiert damit? Das Wasser aus dem Wattebausch wird langsam verdampfen.

Warum? Weil die Raumluft noch nicht mit Feuchtigkeit gesättigt ist. Sie entzieht dem Wattebausch Wasser und kühlt sich dabei ab. Warum kühlt sich die Raumtemperatur ab?

Weil beim Verdampfen Energie verbraucht wird (Beispiel: Wenn ich nass aus der Dusche steige, wird mir auch erst mal kalt, weil das Wasser meinem Körper Wärme entzieht, um sich in Dampf zu verwandeln, der von der Luft aufgenommen werden kann). Diesen

Vorgang nennt der Experte schein't's *adiabate Kühlung*.

Soweit so gut. Die Raumluft nimmt also das Wasser aus dem Wattebausch auf und kühlt sich dabei ab. Der Prozess hört in dem Moment auf, in dem die Raumluft mit Flüssigkeit gesättigt ist, also 100% relative Luftfeuchtigkeit erreicht hat.

Jetzt wird die Temperatur am zweiten Thermometer abgelesen. Mit diesen zwei Temperaturen kann ich nun die relative Luftfeuchtigkeit im Raum bestimmen. Dazu brauche ich wieder das hx-Diagramm:

Ich nehme die normale Raumtemperatur, die ich mit dem ersten Thermometer gemessen habe, z.B. 20 °C. Durch den zweiten Thermometer bekomme ich eine Temperatur von

z.B. 15 °C, den ich mir auf der Sättigungskurve suche. Gut! Jetzt gehe ich parallel zu den Querlinien bis zu dem Punkt, bei dem ich auf die Verlängerungslinie der 20 °C stoße.

Jetzt lese ich an den Kurven zur Luftfeuchtigkeit eine Prozentzahl ab, hier im Beispiel ca. 62 %. Voilà, das war's, weiter ist da nüscht!

Noch ein paar Beispiele:

Bei einer Raumtemperatur von 25 °C und einer Sättigungstemperatur von 18 °C habe ich eine Luftfeuchtigkeit von etwa 50%.

Bei einer Raumtemperatur von 10 °C und einer Sättigungstemperatur von 5 °C habe ich eine Luftfeuchtigkeit von 40%.