

Klimastabilität in Museen

Untersuchung zum Temperatur- und Feuchteverhalten im außenwandnahen Bereich von museal genutzten Räumen

Research of temperature and moisture reaction in areas close to outer walls, consequences regarding the building and the exhibits.

H.-P. Leimer and J. Bode

University of Applied Sciences and Arts Hildesheim

BBS INSTITUT - Building Construction, Building Physics, Building Restauration

38302 Wolfenbüttel, Germany

Zusammenfassung

Im Rahmen der Modernisierung und Instandsetzung des Herzog-Anton-Ulrich-Museums in Braunschweig wurde untersucht, inwieweit das Klima im außenwandnahen Bereich vom mittleren Raumklima abweicht. Hierbei wurden auch das Feuchteschadensrisiko an der Bausubstanz und das konservatorische Schadensrisiko am Exponat bei außenwandseitiger Hängung von Gemälden bewertet.

Bei der mathematischen Beschreibung der Wärmeübertragungs- und Strömungsverhältnisse im außenwandnahen Bereich ist die Bestimmung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an den Begrenzungsflächen von Wand und Bild zum Luftspalt nicht eindeutig lösbar. Üblicherweise kann für die freie Konvektion auf die Ähnlichkeitstheorie zurückgegriffen werden. Im vorliegenden Fall kommt es aber neben der thermisch bedingten Abtriebsströmung an der kalten Wand auch zu einer von der Lüftung und Beheizung herrührenden erzwungenen Konvektion. Für diesen Anwendungsfall, insbesondere auch unter Berücksichtigung von Luftgeschwindigkeit und Spaltgeometrie, sind keine zuverlässigen Ähnlichkeitsmodelle bekannt, so dass auf rechnerischem Weg nur eine näherungsweise Bestimmung der Wärmeübertragungsvorgänge möglich ist.

Um die Wärme- und Stoffströme im Bereich eines vor der Außenwand befindlichen Gemäldes im Rahmen einer Numerischen Simulation berechnen und so das konservatorische und bauphysikalische Schadensrisiko für konkrete Fälle einer Gemäldegalerie besser abschätzen zu können, wurden zu den theoretischen Untersuchungen auch Temperatur- und Feuchtemessungen am Objekt durchgeführt [1].

1 Einleitung

Die Festlegung des Raumklimas in museal genutzten Räumen ist in erster Linie konservatorisch motiviert. Speziell in Gemäldegalerien lassen die konservatorischen Klimaanforderungen nur sehr enge Bandbreiten für Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte zu. Insbesondere die Schwankungsbreite und Schwankungshäufigkeit der relativen Raumluftfeuchte haben großen Einfluss auf das Schwind- und Quellverhalten, somit den Alterungsprozess eines Museums exponates, und können zu Schäden am Ausstellungsobjekt führen.

Die allgemeine Betrachtungsweise in der Planerpraxis geht in der Regel von *einer* Raumlufttemperatur und einer relativen Raumluftfeuchte im Raum aus. Dabei handelt es sich um Feuchten, die im Bereich des Abluftvolumenstroms oder (irgendwo) im Raum gemessen werden. Konservatorische Diskomfortzonen, wie sie z. B. durch den Einfluss von Außenbauteilen oder Lüftungsanlagen auftreten können, werden häufig außer Acht gelassen, so dass es nicht selten, trotz vermeintlich akzeptabler Raumklimaverhältnisse, zu Schadensfällen kommt.

Neben der Fragestellung, inwieweit das Klima im außenwandnahen Bereich vom mittleren Raumklima abweicht, ist auch die Frage zu beantworten, inwieweit sich das Feuchteschadensrisiko an der Bausubstanz und das konservatorische Schadensrisiko am Exponat vergrößert. In Restauratorenkreisen werden alle damit einhergehenden Vorgänge und Erscheinungen auch unter dem Begriff des so genannten „Kalte-Wand-Problems“ zusammengefasst [8].

2. Berechnungen des Temperaturverhaltens von Außenwänden mit Bildbehang

Um eine allgemeine gültige Beurteilung des Einflusses außenwandseitiger Bildbehängung auf das Wärmespeicher- und Temperaturverhalten einer Außenwand und somit auf die Materialschichten eines Bildes zu erhalten, wird es notwendig, den thermisch bedingten Luftstrom zwischen Stoffbespannung und Bildrückseite in Abhängigkeit der geometrischen und thermischen Randbedingungen genauer zu erfassen.

Die Wärmeübertragung zwischen Bildrück- und Wandvorderseite erfolgt über Transmission, Konvektion und Wärmestrahlung. Folgendes Wärmebilanzmodell kann aufgestellt werden:

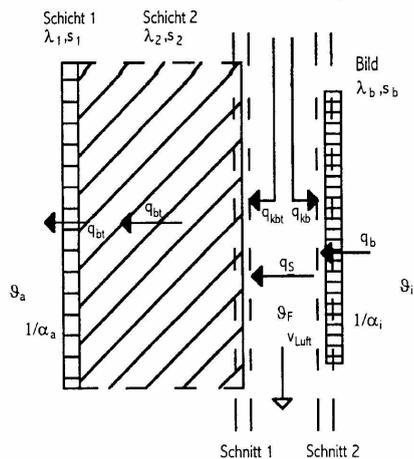


Bild 1 Wärmeströme im System Wand – Luftspalt – Gemälde

Führt man die o. g. komplexen Wärmeübertragungsvorgänge zu einer Energiebilanz zusammen, so erhält man ein nichtlineares Gleichungssystem 9. Ordnung. Die Lösung der Energiebilanzen für das System Gemälde – Luftschicht – kalte Außenwand führt zu folgenden komplexen Wärmeübertragungsverhältnissen:

- Wärmeabstrahlung von Gemälderückseite an die kalte Wand. Die Intensität der Wärmestrahlung nimmt mit kälter werdender Außenwand- Innenoberfläche zu
- Konvektive Wärmeabgabe von der Gemälderückseite an den Luftzwischenraum und konvektive Weiterleitung an die Außenwand. Die Intensität der Wärmekonvektion nimmt mit kälter werdender Außenwand- Innenoberfläche und mit stärker werdender Luftströmung im Luftspalt zu. Die Luftströmung wie derum nimmt ebenfalls mit kälter werdender Außenwand-Innenoberflächentemperatur zu. Die freie, rein thermisch bedingte, Konvektion wird zusätzlich von einer erzwungenen, von der Lüftungs- oder Luftheizungsanlage herrührenden, Konvektion überlagert.
- Bei beiden Wärmeübertragungsvorgängen kommt es zu einer Abkühlung der Gemälderückseite und zu einer Erwärmung der Außenwandvorderseite, wobei der letztgenannte Effekt wegen der hohen Wärmespeicherefähigkeit der Wand eher marginal ist.

In der Reihenschaltung von Gemädevorderseite über Luftspalt bis Außenwand-Außenseite kann ferner nicht von einer konstanten Wärmestromdichte q ausgegangen werden, da im Spalt ein konvektiver Wärmeaustausch zwischen dem oben beschriebenen System und der Umgebung stattfindet.

Die Schwierigkeit liegt in der Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_{cv} . Dieser Koeffizient, der den Wärmeübergang zwischen Bauteil- oder Gemäldeoberfläche und dem Luftspalt beschreibt, hängt von einer Vielzahl veränderlicher Faktoren, insbesondere von Temperatur, Geschwindigkeit, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Strömungsform der Luftströmung im Spalt sowie von Geometrie, Temperatur und Rauheit der Festkörperoberfläche, ab. Wärmeübergangskoeffizienten müssen so experimentell bestimmt und können mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie verallgemeinert werden.

Um die Bandbreite des thermischen Verhaltens in diesem Bereich abschätzen zu können, wurde iterativ unter der Verwendung der im HAU durchgeführten Versuche (Kap.3), die Temperaturen über den Bauteilquerschnitt mit unterschiedlichen Annahmen berechnet und mit den Messungen verglichen.

Als Eingangsparameter dienen folgende, berechnete bzw. gemessene Werte:

- Die Außenlufttemperaturen ϑ_a werden im Bereich von -15 °C bis 10 °C in 5 K-Schritten verändert.
- Die Einhaltung eines Innentemperaturbereiches von 18 °C bis 20 °C wird gefordert [2]. Gleichzeitig werden Berechnungen für den Fall eines Versagens der Klimatisierung im Winter durchgeführt ($\vartheta_i = 13\text{ °C}$).
- Die Temperatur im Spalt zwischen Wand und Gemälde liegt im Mittel 1 K unter der Raumtemperatur (Versuchsergebnis).
- Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_k wurde nach Analyse der Messdaten und Lösung des Gleichungssystems der Wert $a = \alpha_k = 2.26$ ermittelt. Um der Streuung der Werte Rechnung zu tragen, wurden zusätzlich die Fälle $a = \alpha_k = \alpha_k [2.26] + 3$ und $a = \alpha_k = \alpha_k [2.26] - 3$ untersucht.

Zusätzlich zu Wandtemperatur ϑ_w und Oberflächentemperatur des Rückseitenschutzes ϑ_o werden noch die vorder- und rückseitige Oberflächentemperatur ϑ_{bv} und ϑ_{br} der Gemäldeschicht berechnet. Zum Vergleich wird der Fall „stehende Luftschicht“ betrachtet. Den Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen der Berechnung zeigen die Bilder 2 und 3.

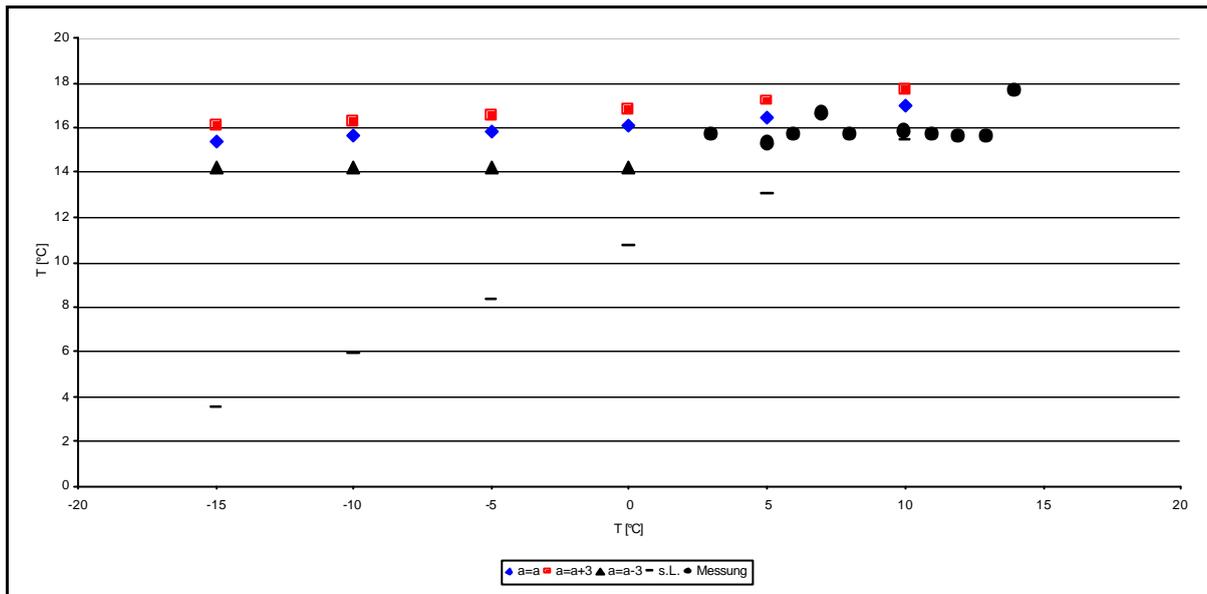


Bild 2 Temperaturen der Wandoberfläche ϑ_w bei einer Innentemperatur ϑ_i von 20°C

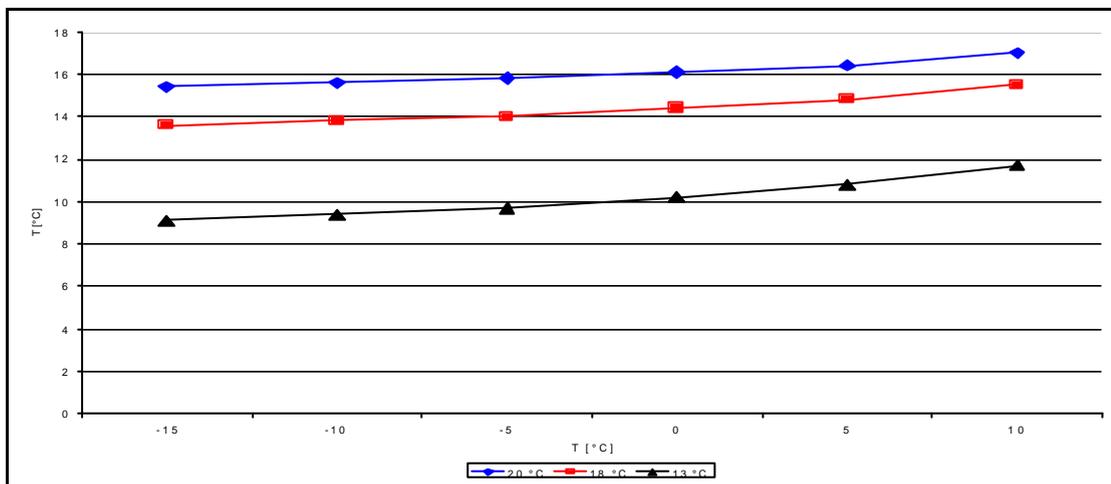


Bild 3 Temperaturen der Wandoberfläche ϑ_w bei verschiedenen Innentemperaturen ϑ_i

3. Messungen der Grenzschichttemperaturen eines an der Außenwand hängenden Gemäldes

Die Messungen wurden am Gemälde „Nymphen und Satyrn“ von Louis de Silvestre (1675-1760) (Bild 4) im sogenannten „Franzosenaal“, einem nördlichen Seitenkabinett im 1. Obergeschoss des Herzog-Anton-Ulrich-Museums in Braunschweig, durchgeführt.

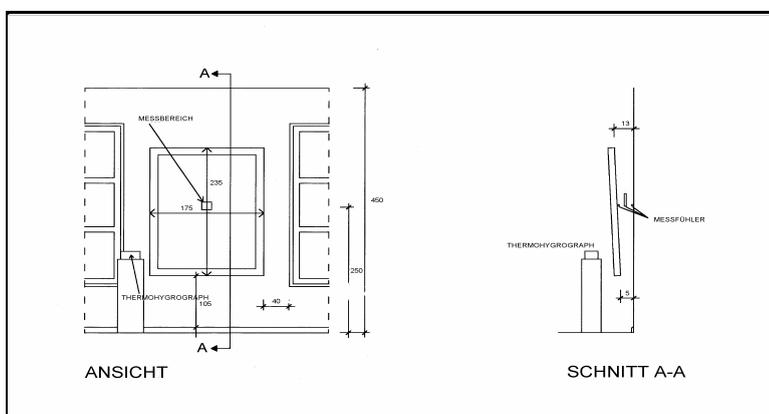


Bild 4 Aufbau der Messapparatur im Bildbereich-Franzosenaal

Das vor der Außenwand hängende Gemälde ist folgendermaßen aufgebaut (rückseitig beginnend):

- Rückseitenschutz aus Karton (d = 0.5 cm)
- Keilrahmen (d = 3.5 cm)
- doppelte Leinwand
- Grundierung
- Farbschicht
- Firnissschicht

Das Gemälde ist nicht verglast und ist rückseitig mit Abstandhaltern versehen (Abstand oben: 13 cm, unten: 5 cm).

Vergleichsmessungen in einem ungestörten Wandbereich wurden in einem als Restaurierungswerkstatt genutzten Raum im nördlichen Seitenkabinett des ersten OG durchgeführt.

Die Bilder 5 und 6 zeigen die Ergebnisse der Temperaturmessungen (Zeitraum vom 10. November bis 1. Dezember 1999) im Franzosensaal und der Restaurierungswerkstatt.

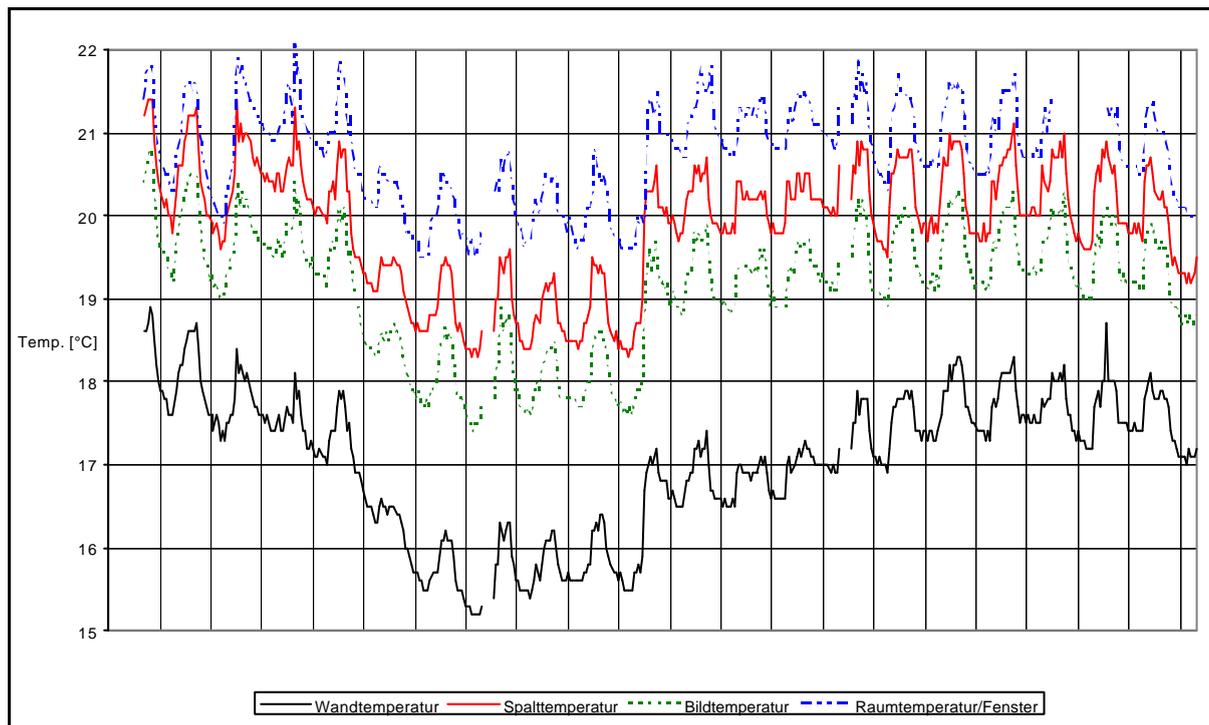


Bild 3 Temperaturverläufe im Bildbereich - Franzosensaal

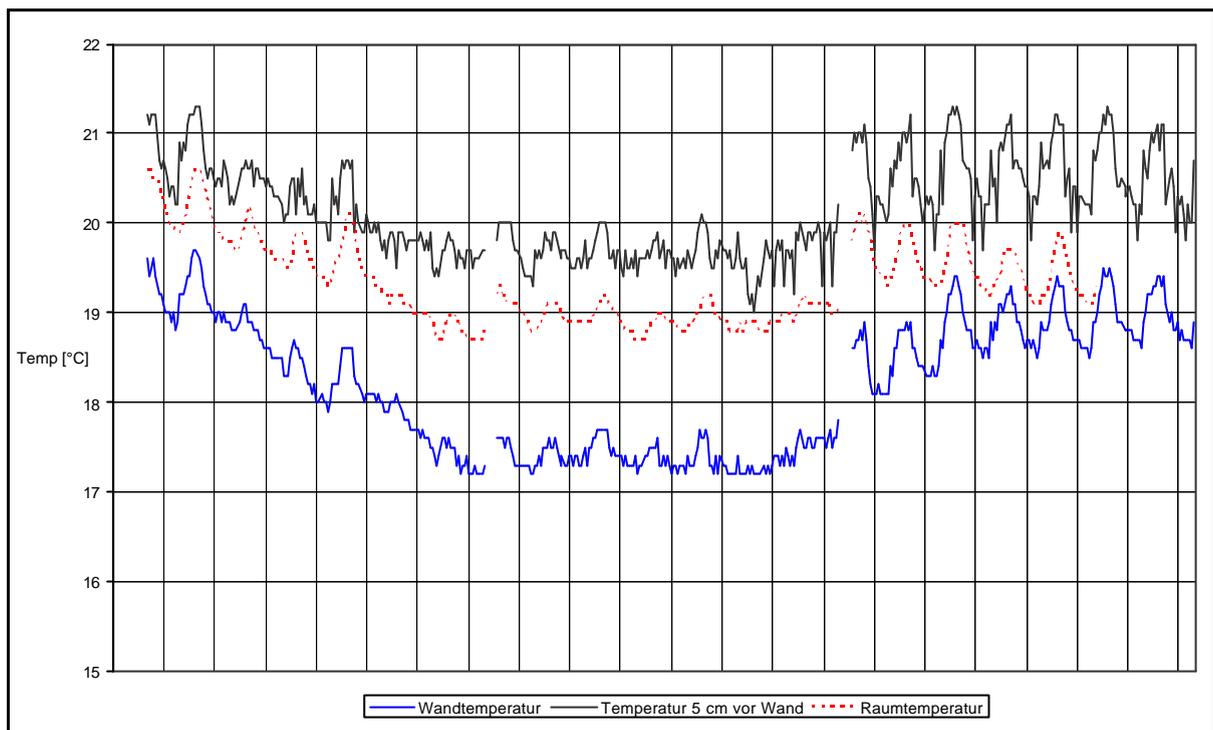


Bild 4 Temperaturverläufe im ungestörten Bereich - Restaurierungswerkstatt

Die Auswertungen der Temperaturmessungen zeigen:

1. Die für die Belastung entscheidende Differenz der Oberflächentemperatur des Bildes liegt i.M. 2 K,
2. die für die Bauteilsicherheit entscheidende Differenz der Oberflächentemperatur des Außenwand liegt i.M. 4 K,
3. die für die rel. Luftfeuchte im Luftspalt entscheidende Differenz der Oberflächentemperatur des Außenwand liegt i.M. 1 K

unterhalb der Raumlufitemperatur.

Die Auswirkungen der Temperaturdifferenzen auf die rel. Luftfeuchte, somit auf die Sorption, somit auf das Schwind und Quellverhalten der Gemälde, werden in Kap. 4 ff. geführt.

4. Messungen der rel. Luftfeuchte Herzog-Anton-Ulrich-Museum

Im Rahmen der Messtechnischen Untersuchung wurde, ergänzend zu den Temperatur-Messungen auch die rel. Luftfeuchte im Zeitraum vom 10.11.99 bis 01.12.99 aufgezeichnet. Die Umrechnung der rel. Luftfeuchte in die abs. Luftfeuchte zeigt Bild 5.

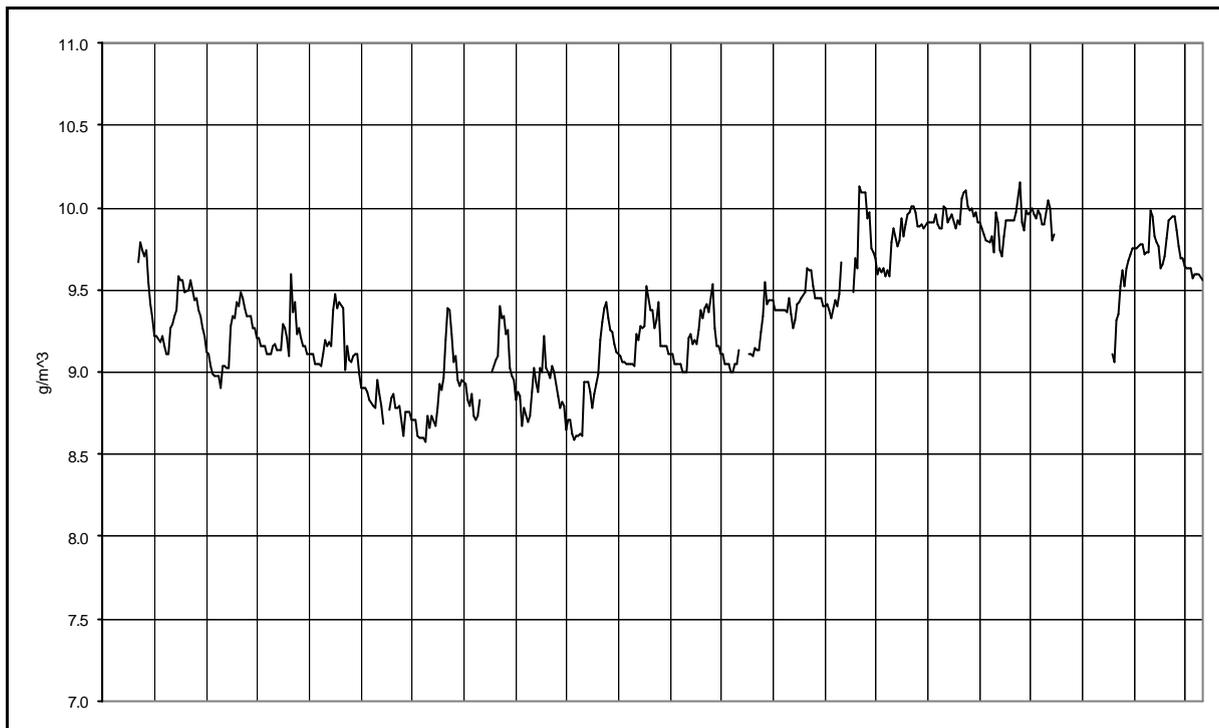


Bild 5 Verlauf der absoluten Feuchte im Franzosensaal

5. Tauwassergefährdungen der Exponate an Außenwänden

Um eine Aussage über die Tauwassergefährdung der Exponate an den Außenwänden des Herzog-Anton-Ulrich-Museum treffen zu können, müssen die Oberflächentemperaturen der Wand ϑ_{Wand} und der Gemälderückseite ϑ_{Bild} im Spalt mit den sich aus den Raumklimadaten ergebenden Taupunkttemperaturen ϑ_{Tp} verglichen werden. Ziel aller bauklimatischen Maßnahmen in Museen ist die Einhaltung der Raumlufttemperatur und -feuchte (7) in folgender Bandbreite:

- Raumlufttemperatur ϑ_i : 18-20 °C
- Raumluftfeuchte f_i : 50-55 % rel. F.

Folgende Taupunkttemperaturen werden hierbei zugrunde gelegt:

1. Regelfall ϑ_{Tp} (18 °C, 60 % rel. F.) = +10.1 °C
2. Regelfall ϑ_{Tp} (20 °C, 60 % rel. F.) = +12.0 °C
3. Versagens der Klimatisierung ϑ_{Tp} (13 °C, 80 % rel. F.) = +9.6 °C

Den Vergleich zwischen der Taupunkttemperatur und den Oberflächentemperaturen bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten zeigt Tabelle 1.

	ϑ_i [°C]	$\Delta (\vartheta_{\text{Wand}} - \vartheta_{\text{Tp}})$ [K]	bei ϑ_a [°C]	$\Delta (\vartheta_{\text{Bild}} - \vartheta_{\text{Tp}})$ [K]	bei ϑ_a [°C]
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26]	18.0	3.5	-15.0	6.1	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] + 3	18.0	4.1	-15.0	6.4	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] - 3	18.0	2.4	-15.0	5.0	0.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26]	20.0	3.4	-15.0	6.1	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] + 3	20.0	4.1	-15.0	6.4	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] - 3	20.0	2.2	-15.0	4.8	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26]	13.0	-0.5	-15.0	1.8	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] + 3	13.0	0.1	-15.0	2.0	-15.0
$\alpha_k = \alpha_k$ [2.26] - 3	13.0	-1.5	-15.0	1.2	0.0

Tabelle 1 Differenz von Oberflächen- und Taupunkttemperaturen im Regelbetrieb und im Störfall

Der Vergleich von Taupunkttemperatur und Oberflächentemperaturen zeigt, dass im Regelbetrieb ($\vartheta_i = 18 - 20$ °C) keine Gefahr der Tauwasserbildung an Wandoberfläche und Gemälderückseite besteht. Die minimalen Differenzen zwischen Oberflächen- und Taupunkttemperatur für die unterschiedlichen Annahmen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_k im Spalt liegen für die Wandoberfläche bei mindestens 2 K, für die Gemälderückseite bei mindestens 4 K.

Für den Fall des Versagens der Klimatisierung (Raumklima: 13 °C, 80 % rel. F.) kommt es zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur, somit Kondensat, an der Wandoberfläche, in keinem der berechneten Fälle jedoch zu einer Tauwasserbildung am Gemälde.

5. Betrachtung der Belastung des Bildes infolge hygrischen Schwinden und Quellen.

Die Sorptionseigenschaften der Stoffe, die Feuchtaufnahme bzw. -abgabe der Stoffe infolge der Veränderungen der rel. Luftfeuchte, führen zu einem Schwinden und Quellen der Materialien. Diese Volumenveränderungen führen letztlich zu der oftmals beschriebenen Alterung der Exponate.

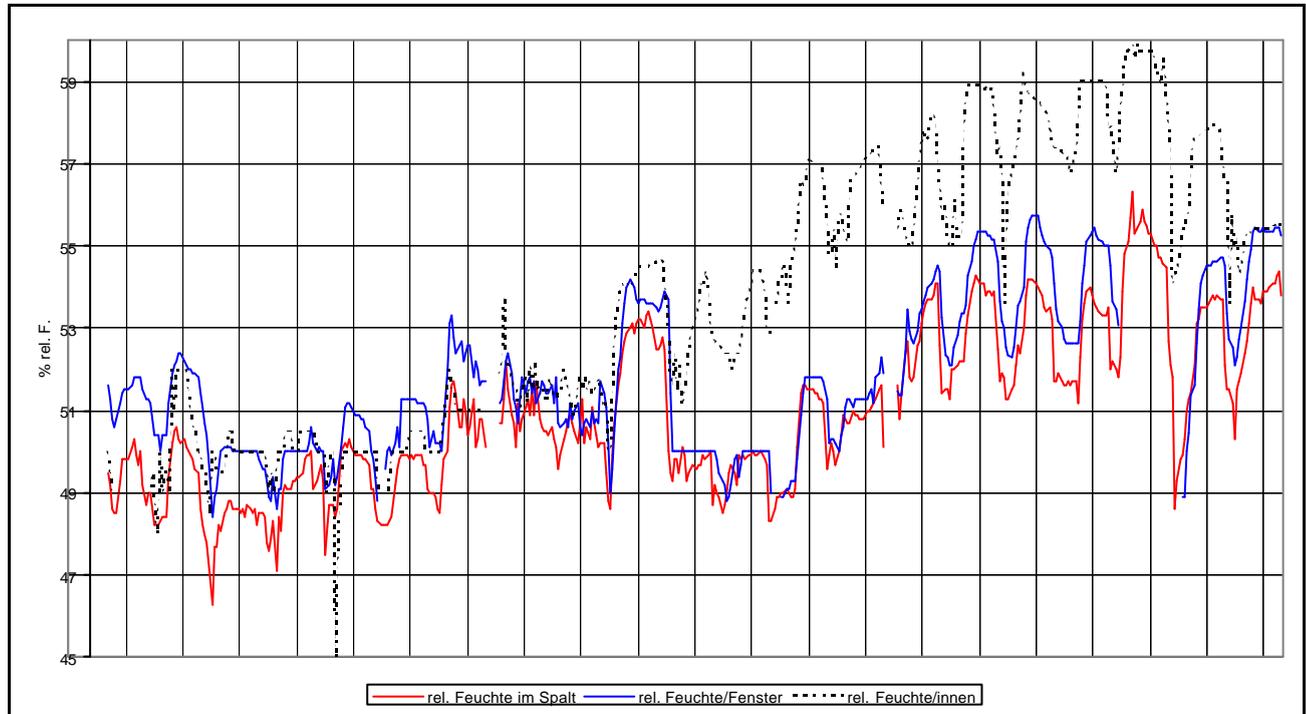


Bild 6 Messungen der rel. Feuchte im Franzosensaal vom 10.11.99 bis 01.12.99

Grundlage aller HLT Regelungen zur Klimastabilität und somit zur Sicherung der Exponate in Museen ist die Feuchte im Raum! Diese Feuchte wird entweder im Bereich des Abluftvolumenstroms oder (irgendwo) im Raum gemessen. Zur Regelung und zur Bewertung werden die rel. Luftfeuchten zu Grunde gelegt. Diese gemessenen Feuchten weichen erheblich von den Feuchten im Bereiche der vor einer Außenwand aufgehängten Gemälde ab! Es wird somit dringend empfohlen die Regelung der HLT aufgrund von Messungen der rel. Luftfeuchte im Bereich der außenwandhängenden Gemälde durchzuführen!

6. Ergebnisse

Anhand der gemessenen Luft- und Oberflächentemperaturen sowie der Luftfeuchte im Spalt und im Raum können in Verbindung mit Variantenrechnungen zunächst folgende klimabedingte Abhängigkeiten im Luftspalt ermittelt werden.

1. Die Beziehung zwischen Außenlufttemperatur und den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Luftspalt ist annähernd linear. Eine Korrelation des Wärmeüberganges mit der Innenlufttemperatur ist hingegen nicht erkennbar.
2. Der Vergleich der Oberflächentemperaturen mit der Taupunkttemperatur im Luftspalt zeigt, dass die Wandoberflächentemperatur innen im Minimum 2 Kelvin und die Oberflächentemperatur der Bildrückseite im Minimum 4 Kelvin über der Taupunkttemperatur der angrenzenden Luftschicht liegen.
3. Die absolute Luftfeuchte im Luftspalt und in der Raumluft ist in etwa gleich, so dass sich an den Begrenzungsflächen des Exponates kein Wasserdampfdiffusionsgefälle ausbilden kann. Das heißt, die Luftbewegung innerhalb des Spaltes ist ausreichend genug um die Bildung so genannter Klimataschen zu verhindern.
4. Die Lufttemperatur im Spalt zwischen Außenwand und Gemälde ist nahezu unabhängig von der Außenlufttemperatur und liegt im Mittel immer 1 Kelvin unterhalb der Raumlufttemperatur. Die Begründung hierfür liegt darin, dass zum einen die Wärmespeicherfähigkeit der massiven Außenwände eine deutliche Amplitudendämpfung der von außen eindringenden Temperaturwelle bewirkt und zum

anderen die Abkühlung der Wandinnenseite die thermisch bedingte Luftabtriebsströmung verstärkt. Dies führt wiederum zu einer verstärkten konvektiven Wärmezufuhr aus der Raumluft in den Luftspalt hinein. Das heißt, Außenlufttemperatur und Konvektion im Luftspalt kompensieren sich nahezu, so dass man auch von einer so genannten Pufferwirkung sprechen kann.

5. Die Temperaturdifferenz zwischen Bildvorder- und Bildrückseite beträgt maximal 0,3 Kelvin. Im Klimabereich $\theta_i \approx 20 \text{ °C} / f_i \approx 50 \text{ % r. F.}$ entspricht dies einer Feuchtedifferenz von $\Delta f_i \approx 1 \text{ % r. F.}$
6. Zeitliche Schwankungen der Temperatur und damit der relativen Feuchte können hingegen nur durch eine Störung der Raumklimatisierung, nicht jedoch durch den Außenklimateinfluss ausgelöst werden.
7. Grundlage aller HLT Regelungen zur Klimastabilität und somit zur Sicherung der Exponate in Museen ist die Feuchte im Raum! Diese Feuchte wird entweder im Bereich des Abluftvolumenstroms oder (irgendwo) im Raum gemessen. Zur Regelung und zur Bewertung werden die rel. Luftfeuchten zu Grunde gelegt. Diese gemessenen Feuchten können zum Teil erheblich von den Feuchten im Bereiche der vor einer Außenwand aufgehängten Gemälde abweichen! Es wird somit dringend empfohlen die Regelung der HLT aufgrund von Messungen der rel. Luftfeuchte im Bereich der Außenwand hängenden Gemälde durchzuführen!

Entscheidend für die dauerhafte Schadensfreiheit von Außenwandkonstruktion und Ausstellungsgut ist somit eine hygro-thermische Entkopplung. Diese wird erreicht, wenn durch thermischen Abtrieb eine ausreichend große Luft zirkulation im dazwischen liegenden Spalt stattfinden kann. Diese Luft zirkulation ist umso besser, je größer der Abstand zwischen Außenwand und Bild ist. Für eine planerische Abschätzung wird in [6] ein Mindestabstand $x_L \geq 0,02 \cdot H^{2/3}$ (x_L ...Spaltbreite, H ...Bildhöhe) empfohlen. Dieser Zusammenhang konnte im vorliegenden Fall bestätigt werden. Als zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung des konservatorischen Komforts dienen z.B. das Anbringen eines wärmedämmenden Rückseitenschutzes am Exponat und /oder Anhebung der raumseitigen Wandoberflächentemperatur passiv mit Wärmedämmung oder aktiv mit einer Wandtemperierung.

7 Literatur

- [1] Lampe, J.; Untersuchung zum Temperatur- und Feuchteverhalten im außenwandnahen Bereich museal genutzter Räume und deren Auswirkungen auf Bauwerk und Exponate, Diplomarbeit TU Braunschweig, 13.03.2000
- [2] Climate stability of historical museums I: Building physics calculations of the Herzog-Anton-Ulrich Museum of Brunswick; BBS INSTITUT: Bauphysikalisches Konzept zur Instandsetzung des Baukörpers und baukonstruktive Maßnahmen zur Klimastabilisierung, Gutachten 99407-2 vom 16.06.1999
- [3] BBS INSTITUT: Wärmeschutznachweis nach DIN 4108 und nach der Wärmeschutzverordnung vom 16.08.1994, Gutachten 99407-6 vom 29.11.2001
- [4] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.-R.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, (70. Auflage) Oldenbourg Industrieverlag, München 2001
- [5] Petzold, K.: Raumlufttemperatur (2. Auflage), Bauverlag GmbH Wiesbaden 1983
- [6] Petzold, K.: Wärmelast (2. Auflage), Verlag Technik Berlin, 1980
- [7] Schaible, V.: Neue Überlegungen zur Feuchtigkeit am Leinwandbild, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 1987, S. 75-94
- [8] Ranacher, M.: Oberflächentemperaturmessungen an Wänden und Bildern als Neuanatz für konservatorisch richtige Klimatisierung in Gemäldegalerien, Restauratorenblätter 15, S. 147-163, Wien 1995
- [9] Klein, P.; Schwab, E.: Zum Verständnis des Quell- und Schwindverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen, Restauratorenblätter 10, S. 15-28, Wien 1989
- [10] Nicolaus, K.: Handbuch der Gemälderestaurierung (1. Auflage), Könemann Verlag, Köln 1998
- [11] Berger, G. A.; Russell, William H.: Untersuchung zum Einfluss der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden, Restauo 1989, H. 3, S. 191-203
- [12] du Pont Cornelius, F.: Movement of Wood and Canvas for Paintings in Response to high and low RH Cycles, Studies in Conservation 1967, H. 2, S. 76-80
- [13] VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln); Ausgabe 10/1994