

Das temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – „Großvitrine“

ABSTRACT

Die „Temperierung“ ist eine alternative Methode der Wärme-Verteilung, die seit 1982 von der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern in Zusammenarbeit mit Baubehörden in öffentlichen Bauvorhaben entwickelt wurde. Ihr Hauptmerkmal ist die kontinuierliche Beheizung der Gebäudehülle, die in der Regel durch zwei Heizrohre unter Putz an den Außenwandsockeln aller Geschosse geschieht und ohne Zusatzmaßnahmen folgende Wirkungen hervorruft: Ausschaltung von aufsteigender Feuchte, Kondensation und Schadsalzwirkung, Stabilisierung des Raumklimas, physiologisch wie konservatorisch zuträglich und energiesparende Raumbeheizung. Wegen des Fehlens von Raumluftkonvektion sind auch Großräume beherrschbar. Dank der minimalen Installations-technik eignet sich die Methode ferner für die Konservierung von Exponatgebäuden in Freilichtmuseen und behausten archäologischen Ausgrabungen.

THE TEMPERED BUILDING: RENOVATED ARCHITECTURE – COMFORTABLE ROOMS – “GIANT DISPLAY CASE”

Tempering is an alternative method of *distributing* heat that has been developed since 1982 by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service) in public building projects, in cooperation with the building authorities. Its main characteristic is the continuous heating of the building shell, which normally is done with two heating pipes installed under the inside plaster at the base of outside walls on all floors. Without additional measures, tempering stops capillary rise of moisture, condensation, and damaging salt effects while stabilizing room climate and providing physiologically and conservationally appropriate as well as energy saving room heating. It is applicable to all sorts of buildings in old or modern construction such as museums, monuments, churches, dwelling houses etc.. In its minimal form it serves for the preservation of open air museums buildings and housed excavations.

KURZFASSUNG: TEMPERIEREN STATT „HEIZEN – DÄMMEN – FEUCHTESANIEREN – KLIMATISIEREN“

Die „Temperierung“ ist eine alternative Methode der Wärme-Verteilung, die das Ziel der Raumbeheizung durch *Temperierung der Gebäudehülle* erreicht. Dazu werden *zwei Heizrohre* auf Putz (in Wandkontakt) oder unter Putz (Stärke 15 ± 5 mm) in allen Geschossen *an den Außenwandsockeln* und *je ein Rohr beidseitig der Sockel der Trennwände* montiert, die auf erd- bzw. außenluftberührten Böden stehen (Rohrdurchmesser im Regelfall 12 – 18 mm, in Großräumen 22 mm). Durch die kontinuierliche Beheizung der Rohre – in erdberührten Räumen ganzjährig, in anderen Räumen während der Heizperiode – entstehen *drei Effekte* (Abb. 1):

- *im Bauteil* im Rohrnahbereich ein Wärmestau,
- an der raumseitigen *Bauteiloberfläche* in der Rohrebene eine eng begrenzte, maximal 10 cm hohe, streifenförmige Zone mit höherer Oberflächentemperatur,
- von dort ausgehend eine starke *Wärmestrahlung* in Raumrichtung im Verein mit einem stetigen, minimalen *Warmluftauftrieb* entlang der Wandfläche.

Abbildung 1:

Die Temperierung, Wirkungsmechanismus in „historischer“ Situation: Bauteile ohne Wärmedämmung und Feuchtesperre, durch kontinuierliches Wärmeangebot trocken gehalten (s. Abb. 4)

Rote Punkte:

Heizrohrschleife (Vor- und Rücklauf, CU blank, 15 mm) im Innenputz bei max. 15 mm Überdeckung
Bei erdberührten Böden: 1. Leitung (Vorlauf) knapp über dem Fertigfußboden

Lange Pfeile:

Wärmeverteilung durch *Wärmeleitung*: radial im Material der Wandbodenecke

Rote Kreise:

Wärmestau mit zylindrischen Isothermen (Hochtemperatur nur im Rohrnahbereich, s. Abb. 9)

Rundpfeile:

Wärmeverteilung durch *Konvektion*: Warmluft-Auftrieb, an der Wandoberfläche anliegend (Coanda-Effekt)

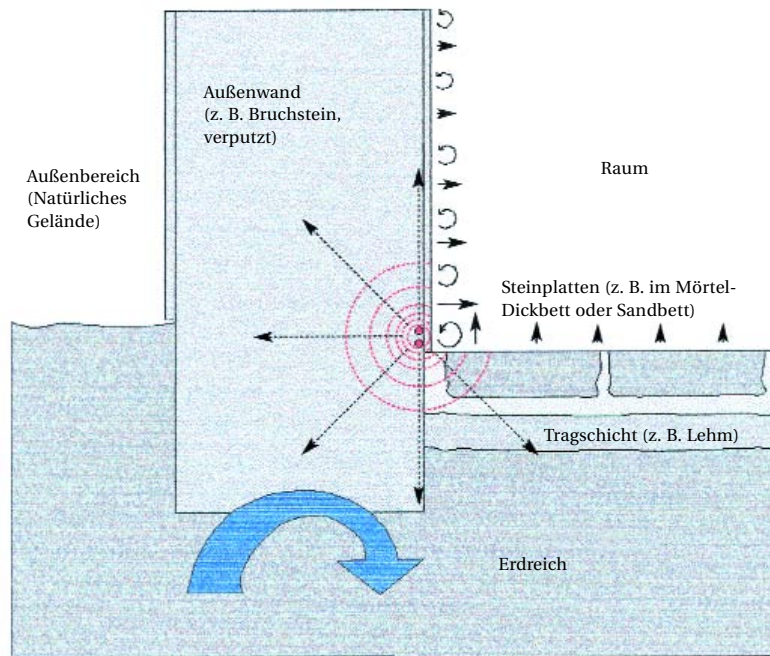
Kleine Pfeile:

Wärme*abstrahlung* der Bauteiloberfläche (Hochtemperatur nur im Rohrnahbereich, s. Abb. 9)

Blauer Pfeil:

Bodenfeuchte. Thermische Horizontalsperre durch die radiale Wärmeausbreitung

Basierend auf einer Grafik von Miha Praznik, 61-ZRMK, Ljubljana.



Nach einer ersten Betriebsphase bei maximaler Leistung der Anlage, die zur Temperierung der raumbegrenzenden Oberflächen dient und die je nach Feuchtegrad des Baukörpers einige Wochen bis zu zwei Monaten dauert, stellt sich unter fortschreitender Trocknung der Bausubstanz die gewünschte „Raumtemperatur“ ein. Im folgenden Dauerbetrieb wird der erreichte Zustand gehalten bei Wassertemperaturen im Vorlauf, die saisonal gleiten zwischen 27 und 40°C (bei rein konservatorischer Zielsetzung) bzw. 65°C (bei Raumbeheizung; durch Verdopplung der Rohrlänge kann die Maximaltemperatur des Vorlaufs auf unter 55°C beschränkt werden). Auf diesem bauphysikalisch sinnvollen Weg ergibt sich ohne Zusatzaßnahmen die Lösung aller Aufgaben und Probleme, die durch die Oberflächentemperatur der Raumhüllflächen beeinflussbar sind, bei konventionellem Konzept aber mit aufwendigen Einzelmaßnahmen behandelt werden. Bei Temperierung der Gebäudehülle treten folgende *Sekundäreffekte* ein:

- *Optimale Raumbeheizung* in Gebäuden aller Nutzungen, Konstruktionsarten und Raumhöhen (einschließlich Kirchen), da jede heizbedingte Luftbewegung und Staubverteilung in Einzelraum und Gebäude unterbleibt, abgesehen vom Auftrieb am Bauteil, der für die Temperierung der Oberflächen oberhalb der Rohre erforderlich ist, auf Grund der geringen Luftgeschwindigkeit aber keinen Staub transportiert.
- Schutz der Hüllflächen und der Ausstattung des Raumes vor *Kondensat*, Senkung von zu hoher relativer Luftfeuchte („*Luftentfeuchtung*“), kurzzeitstabiles *Raumklima* mit homogener Raumtemperatur und – bei Luftwechselkontrolle – homogener relativer Luftfeuchte, deren Höhe dank der geringen Raumlufttemperatur – je nach Höhe der gewählten „Raumtemperatur“ – ganz ohne oder mit nur geringem Bedarf an *Luftentfeuchtung* im mittleren Bereich gehalten wird.
- Ausschluß der Auskeimung von Pilzsporen bzw. des weiteren Wachstums vorhandenen *Bakterien- und Pilzbefalls* an der Gebäudehülle und an den Innenbauteilen. Bei Schwammbefall entfällt der Gifteinsatz an Bauholz und Mauerwerk, der Holzaustausch beschränkt sich auf den Befallsbereich. Im Depot nimmt ein mit höherer Feuchte eingelagerter Bestand durch die Wärmestrahlung der Raumhüllflächen bei langsamer Abgabe

- seiner überschüssigen Feuchte allmählich die Raumtemperatur an. Korrosion und Schimmelwachstum kommen kurzfristig zum Stillstand.
- *Unterbrechung des Feuchtetransports* durch aufsteigende Feuchte („thermische Horizontalsperre“), Inaktivierung der Schadsalze durch langsame Bauteiltrocknung von innen nach außen mit der Folge der Ausbildung fadenförmiger Kristalle im Porenraum der oberflächennahen Bauteilschicht und Unterbindung der zyklischen Umkristallisation (da diese Effekte unabhängig von der Salzart eintreten, sind weder Salzanalysen noch ein spezielles Mikroklima in Wandnähe erforderlich).
 - Angleichung der Oberflächentemperatur ungedämmter *erdberührter Bodenflächen* an die Raumlufttemperatur durch bloße Randbeheizung, Trocknung und thermischer Feuchteschutz dieser Flächen ohne sperrende Schichten und ohne zusätzliche Leitungen.
 - *Energieeinsparung* bei der Beheizung von Neu- und Altbauten, „*thermische Gebäudesanierung*“ von Gebäuden im Bestand in Ersatz für Wärmedämmmaßnahmen (Folge der Materialtrocknung: Senkung der Wärmeverluste durch Wärmeleitung der Gebäudehülle in Verbindung mit Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit des Baukörpers; Folge der geringen Lufttemperatur: Senkung der durch Lüftung bzw. durch Luftwechsel verursachten Wärmeverluste).

In *Museen* kann dann die mechanische *Lüftung* (abgesehen von Nachtlüftung im Hochsommer) auf die Zeiten der Anwesenheit von Personen beschränkt werden, bei Luftwechselraten von max. 1 V/h, wenn zur Vermeidung von Kühlungsbedarf besonnte Glasflächen eine *außenliegende Beschattung* erhalten und die *Anschlußleistung des Kunstlichtes* nicht höher als 15 W/m² liegt. Die Homogenität des Raumklimas tritt unabhängig von der Raumhöhe ein (das Dachgeschoß des Regensburger Salzstadels am Brücktor zeigt auf 18 Meter Höhe einen Temperaturunterschied von 1 Grad). Hierin liegt die Bedeutung der Methode für Großräume. In *Kirchen* z. B. entfallen die regelmäßigen Intervalle der Innenrenovierung, da die für alle konventionellen Kirchenheizsysteme typische Raumverschmutzung durch Kondensation und Staubumwälzung unterbleibt. Wird die *Orgel* von der Emporenschleife durchfahren (zwei freie Rohre), minimieren sich die internen Wechsel der Materialfeuchte und Kondensationszyklen scheidet aus, so daß für die Stimmung der Instrumente kaum mehr Anlaß besteht.

Da für rein konservatorische Zwecke die Installation von maximal zwei Heizrohren mit geringem Durchmesser ausreicht, erlaubt die Methode – nach der zur Klimastabilisierung erforderlichen Abdichtung der Bau- und Öffnungsfugen – nicht nur die Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung von *Baudenkmälern*, sondern auch von *Exponatgebäuden* in Freilichtmuseen. Der hierfür erforderliche Energiebedarf übersteigt nicht den von Luftfeuchtern, die bei konventionellem Konzept allein zur Senkung der rel. Luftfeuchte eingesetzt werden müssten, ohne die Schadsalzproblematik zu lösen. Es entfallen die üblichen *materialersetzenden*, den Schadensmechanismus aber nicht ausschaltenden Pflegemaßnahmen an historischer Substanz. In Exponatgebäuden genügt es in der Regel, je zwei Einrohr-Ringleitungen spiegelbildlich um die beiden Hälften der Geschosse zu führen – ihre Vorlauf-Hälfte an den Außenwänden, ihre Rücklauf-Hälfte an den entsprechenden Trennwandsockeln.

Ähnliches gilt auch für behaute *archäologische Ausgrabungen*, die durch Temperierung auf einfachste und schonende Weise konserviert werden können. Nach Umfahrung der Ränder mit einer Ringleitung oder einer Schleife (gegebenfalls ergänzt durch Leitungen an der Decke der Behausung bzw. – in hohen Schutzräumen – an Besichtigungsstegen) und Schließen der Fugen der Behausung sind die freigelegten Bauteile nämlich vor Bodenfeuchte, Schadsalzaktivität, Kondensation und Algenbefall geschützt. Ebenso können selbst große *Bergkeller* durch Materialtemperierung mit geringem Aufwand nutzbar gemacht werden, wobei sich die erste Betriebsphase entsprechend verlängert. Beide Beispiele belegen die überraschende Effizienz, die die Heizrohr-Temperierung in ihrer

Minimalform gerade im erdberührten Bereich hat. Die Diskrepanz zwischen den dort eintretenden großen Effekten und dem dafür erforderlichen geringen Installationsaufwand wird verständlich, wenn man bedenkt, daß bei Dauerbeheizung erdberührter Räume durch Akkumulation von Erd- und Heizwärme in den Außenbauteilen und dem angrenzenden Erdreich ein starker Wärmestau entsteht^[1]. Daß unter Gebäuden schon zur Herstellung, erst recht aber zur Aufrechterhaltung einer höheren Bauteil- bzw. Raumtemperatur ein minimaler Energieaufwand ausreicht, wird deutlich, wenn man auf der Kelvin-Skala die absolute Temperatur des 10°C „kalten“ Erdreichs (283 K) mit der eines 20°C „warmen“ Raumes (293 K) vergleicht (Abb. 2).

Die direkte Temperierung der Bauteile bietet also nicht nur ein großes Potential für die Erhaltung von historischer Bausubstanz, sondern sie ist auch die *ökonomisch sinnvolle Alternative* zu den üblichen „kalten“ Konservierungs- und Sanierungsverfahren und bietet einen Ausweg aus dem durch die *Energieeinsparverordnung* entstandenen Dilemma: Der Jahresheizwärmebedarf von Wohnbauten in Massivbauweise verringert sich allein durch Temperierung der Gebäudehülle und Abdichtung vorhandener Alt-Doppelfenster bzw. entsprechende Ergänzung von Einscheibenverglasungen – also ohne *gestaltverändernde* „Wärmeschutz“-Maßnahmen wie Außen- oder Innendämmung und Neufenster – auf das in der Verordnung vorgegebene Maß („7 Liter pro m³“), obwohl die Feuchtesanierung – analog der Luftentfeuchtung mit Luftentfeuchtern – durch Energieeinsatz geschieht.

Einerseits wird eben dadurch erst über die Sanierung hinaus die ganzjährige Nutzung erdberührter Räume zu Wohn-, Ausstellungs- oder Lagerzwecken ohne weiteren Apparateinsatz ermöglicht. Dies ist direkt aus dem Temperaturvergleich der Geschosse ableitbar (Abb. 3). Dabei beträgt die zu diesem Zweck erforderliche Heizleistung außerhalb der „Heizperiode“ in nicht unterkellerten Erdgeschossen zwischen 5 – 15 Watt pro laufenden Meter Wandsockel (Abschaltung während der Hochsommermonate möglich), in Kellern max. 30 W/m (bei Dauerbetrieb auch im Hochsommer). Andererseits verringert sich der Wärmebedarf in der Heizperiode durch diese „Sommertemperierung“. Durch sie wird nämlich eine nachhaltige „U-Wert-Verbesserung“ erreicht wird, so daß der Gesamtverbrauch in der Regel unter dem von konventionell und nur in der Heizperiode beheizten Massivbauten liegt. Die Energieeinsparung wird also im Wesentlichen durch Optimierung der Wärmeverteilung erzielt, so daß der Grund für die *Befreiung* von den Auflagen der EnEV vorliegt (Erreichung des Ziels „durch andere als in dieser Verordnung vorgesehene Maßnahmen“).

Generell kann die Temperierung der erdberührten Bauteile also konventionelle *Sanierungsmaßnahmen* sinnvoll *ersetzen*, die im Sommer für sich allein den Kondensatschutz dieser Flächen und die Luftentfeuchtung der Räume nicht gewährleisten können: So entfallen Maßnahmen wie Schadsalzbehandlung, Außenisolierung, Wärmedämmung, Horizontalsperren, Tränkungen usw.; Sanierstatt Normalputz reicht aus. Oberflächliche Regenabführung vorausgesetzt, ist bei verdichteter Anfüllung des Erdreichs auch die Dränage nicht erforderlich. Zur Gewährleistung der *thermischen Feuchtesperre* ist folgende *Voraussetzung* zu erfüllen: Die Innenseite des Außen-Mauerwerks muß eine homogene Oberfläche erhalten, ohne größere Poren und ohne sichtbare Fugen, z. B. durch Verputzen bzw. durch Schließen der Lücken vorhandener, noch stabiler Putzflächen oder durch sorgfältiges Nachmörteln des Fugennetzes (bei Sichtmauerwerk); alle Fugen und Risse der Estriche müssen gefüllt werden. Um auch bei stark porösem oder ohne Mörtel gefügtem Mauerwerk auf die Außenisolierung im Erdreich verzichten zu können, ist eine ganzflächige Putzschicht auf der Innenseite zwingend. Im Sandbett verlegte Bodenbeläge, z. B. Ziegel, benötigen in der Regel nach Ausfugung mit Sand keine weitere Behandlung. Diese einfachen, auf empirischem Wege gefundenen Grundsätze werden bestätigt durch *das* historische Beispiel ganzheitlicher Heiztechnik, die Hypokaustenheizung. Bei näherer Betrachtung stellt man das Fehlen der heute als unverzichtbar angesehenen

Abbildung 2:
 Vergleich der Temperaturskalen von Celsius und Kelvin
 Die Celsius-Skala bezieht sich auf die Zustandsänderung von Wasser.
 Die Absolute Temperatur in Kelvin (K) ist ein Maß für die Wärmeschwingung der Moleküle

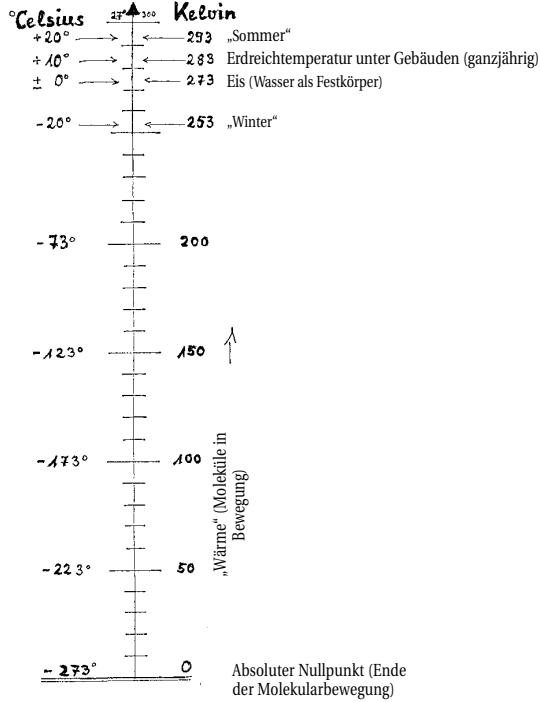


Abbildung 3:
 Sommerfeuchte im unbeheizten Gebäude
 Zeichnung Hans Stölzl, Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, München

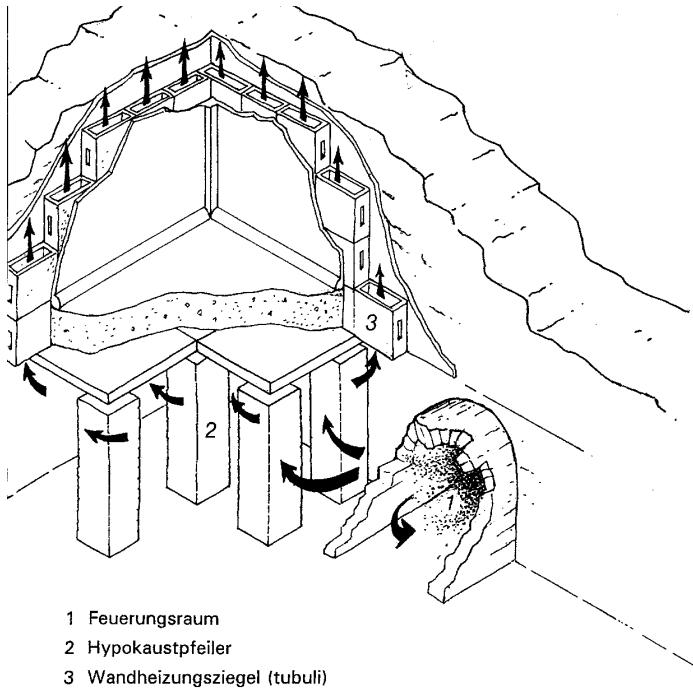
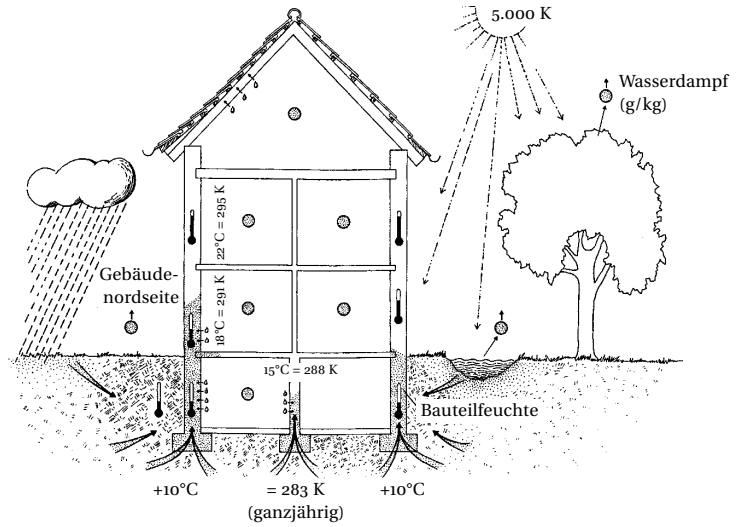


Abbildung 5:
 Hypokaustenheizung, Funktionsschema

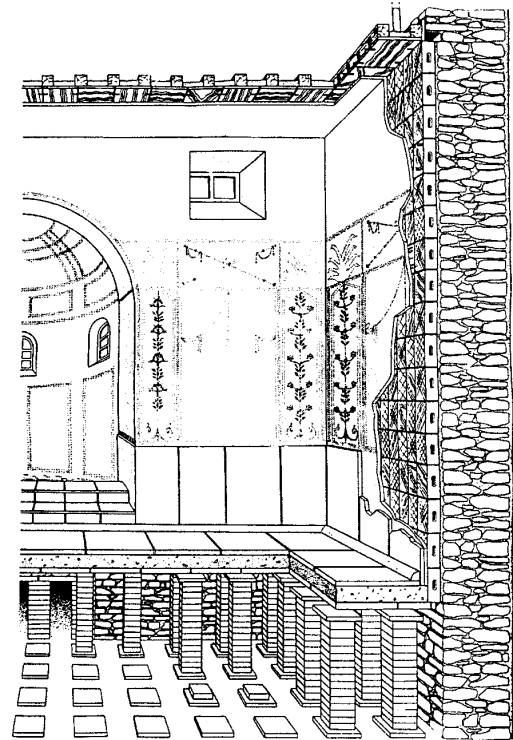


Abbildung 4:
 Weißenburger Thermen, Schnittrekonstruktion der Nordwestecke des Caldariums aus: [9]

Abbildung 4 und 5: Feuchteschutz und Raumbeheizung vor 2000 Jahren: Temperierung der Gebäudehülle durch Hypokaustenheizung – Keine Putz- und Sockelschäden durch Feuchte

Schichten fest (Wärmedämmung, Feuchtesperre), deren Funktionen schon immer durch Wärme „an der richtigen Stelle“ erfüllt wurden. Dies gilt für den erdberührten Bereich wie für das Außenmauerwerk, das auch im Winter trotz hoher Wassertemperaturen in den Thermen (~ 45°C) kondensatfrei blieb (Abb. 4 und 5).

In *Großräumen* wird je eine Heizrohrschleife in entsprechenden Höhen montiert, in Kirchen an den Sockeln der Umfassungswände, ggf. auf der Empore, bei großer Grundfläche Einrohringleitungen um die Bankpodeste, unter Einbindung der Basen von Säulen und Pfeilern); in Glasfassaden erfolgt eine freie Führung angestrichener Rohre im Halteapparat; Trennwandsockel der nicht unterkellerten Räume erhalten beidseitig je ein Rohr. Bei *Wohnraumanforderungen* kann in Gebäuden mit starkem Mauerwerk (50 cm und mehr) der Rücklauf der einzigen Schleife in Brüstungshöhe montiert werden, bei Stärken unter 50 cm mit Umweschleifen in den Leibungen. In Gebäuden mit geringeren Wandstärken wird eine zweite Schleife in Höhe der Brüstung montiert, in Fachwerkbauten längs der Brustriegel, wobei hier deren Rücklaufumweschleifen beidseitig der Fenster zwingend sind; Leichtbauten erhalten eine analoge Rohrführung in einer Aufdopplung der inneren Schalung der Außenwand.

Bei höherer Temperaturanforderung in *erdberührten Räumen* bis hin zur Wohnraumnutzung können bei mineralischen Bodenbelägen zur Temperierung des Bodens anstelle einer Fußbodenheizung mit Wärmedämmung ein bis zwei Umweschleifen der Trennwandleitung im Dickbett oder Ausgleichsestrich des Plattenbelages verlegt werden (Rohrabstand 50 bis 100 cm, Vorlauf im Dauerbetrieb ca. 30°C). Bei wechselnder Raumnutzung erlauben sie durch zeitweise Anhebung des Vorlaufs die rasche Herstellung höherer Bodentemperaturen (z. B. bei Wechsel zwischen Ausstellungsbetrieb und museumspädagogischer Nutzung). Bei Holzböden genügt die Rohrführung an den Wandsockeln (Abb. 6).

Das erste Heizrohr einer Wandschleife liegt grundsätzlich möglichst in der Wand-Boden-Ecke direkt über der Oberkante des Bodenbelags. Der *Durchmesser* der Heizrohre beträgt 12 – 18 mm in normalen Raumgrößen, bis 22 mm in Großräumen. Der Rohrabstand in einer Schleife entspricht der lichten Weite des Paßstücks des Rohrbogens oder die Oberkante des Rücklaufrohres liegt in Höhe der Fensterbankunterkante. Bei zwei Schleifen wäre dies das Höhenmaß des Vorlaufs der zweiten Schleife. Die *Montage* erfolgt in der Regel knapp unter Putz oder Steinleiste (Stärke max. 15 mm), bei hölzernen Sockelleisten direkt über diesen. Bei Holzleisten über 5 cm Höhe in nicht unterkellerten Räumen wird zusätzlich eine Ringleitung in der Raumecke montiert (vor oder hinter der Leistenunterkante), bei Erneuerung des Bodenaufbaus in der Rohbodenecke. Das beste Material ist Kupfer blank. Korrosionsprobleme in Verbindung mit Putz oder Estrich treten nicht auf, weder bei frischem Material, wenn es bei handwarmen Rohren aufgebracht wird, noch nach dem Abbinden, da ein Heizrohr bei Nicht-Betrieb Umgebungstemperatur annimmt. Die spätere Betriebstemperatur der an der Wand verlegten Rohre ist nach oben nicht begrenzt, bei Rohren im Bodenaufbau genügen max. 35°C Vorlauf. Da Risse in Putz oder Estrich nicht durch die Rohrtemperatur, sondern durch Zwängspannungen entstehen, werden zu deren Vermeidung die kalten Rohre mit entsprechender Toleranz montiert und nach Putzauftrag kurz aufgeheizt (min. 60°C), so daß an den Richtungsänderungen im noch weichen Material Hohlräume entstehen (s. Kap. 6.3.2). Bei Aufputzmontage (Rohre in Wandkontakt und angestrichen) ist die Pufferwirkung des Mauerwerks für betriebsbedingte *Leistungsschwankungen* geringer. Dies gilt umso mehr bei Rohrverlegung auf Holz, da die freie Rohroberfläche bei Unterbrechungen auf Raumtemperatur abkühlt. Als Anstrichmaterial kann hier Klarlack aufgetragen werden.

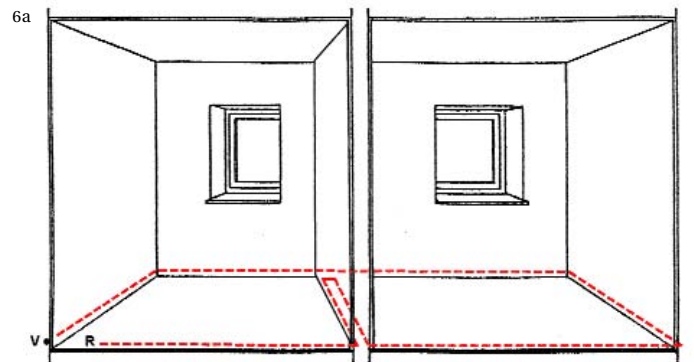
Bei Neubau wie Sanierung sollte der Einbau der Temperieranlage gegen Ende der Rohbauphase abgeschlossen sein, so daß die Inbetriebnahme so bald wie möglich, ggf. noch bei provisorischen Fenstern erfolgen kann. Dadurch wird die *Bauzeit verkürzt*, da sich die Warte- und Trocknungszeiten bei den mit neuem

Abbildung 6:
Beispiele für die Rohranordnung

V Vorlauf
R Rücklauf
AS Außenwand-Schleife
TS Trennwand-Schleife (in *Kellern*: bei höherwertiger Nutzung; in *EG-Räumen*: bei nicht unterkellerten bzw. außenluftberührten Böden, über unbeheizten Kellerräumen)
Vorlauftemperatur-Angaben: Routinebetrieb im Jahresablauf, nach Trocknungsphase mit maximaler Vorlauftemperatur
Bei Verdopplung der Rohrführung nach 6d (Sockel- und Brüstungsschleife mit Leibungsumweg des oberen Rücklaufs) geringere Vorlauftemperaturen ($< 50^{\circ}\text{C}$) und geringer Rohrdurchmesser möglich (15 mm).

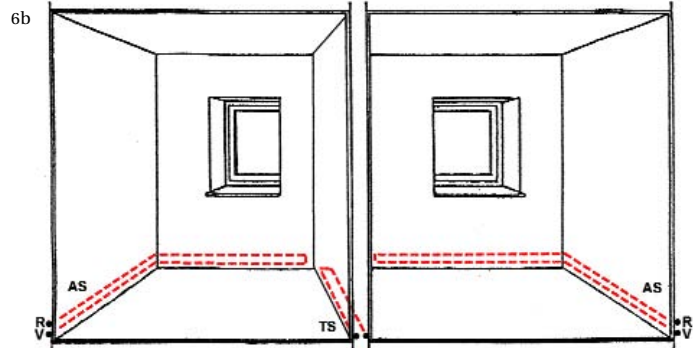
Sichtbare Montage: Rohre in Wandkontakt, gestrichen
Unsichtbare Montage: Überdeckung nur mineralisch (max. 1,5 cm Putz oder gleichstarke Stein-Stoßleiste; bei Holzstoßleiste Rohre darüber anordnen)
Rohrabstand bei Schleifen = liches Maß des Löt-Fittings (Weich-Lötung)
Rohrmaterial: Optimale Leistung bei blankem Kupfer (bei CU-Heizrohren Korrosionsschutz nicht erforderlich)

Zeichnungen Rainer Köhnlein, Landesstelle für die nicht-staatlichen Museen in Bayern, München und Michael Kotterer, Regensburg.

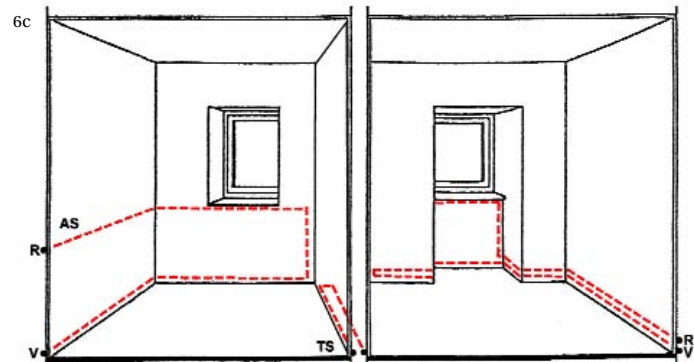


- Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung (Baudenkmäler, Exponatgebäude in Freilichtmuseen, behauste Ausgrabungen; Vorlauf $\sim 30^{\circ}\text{C}$)
- Feuchtesanierung und Beheizung von Kellern (Vorlauf $30 - 40^{\circ}\text{C}$)

Dargestellte Ringführung ausreichend für den halben Kellergrundriß eines Einfamilienhauses

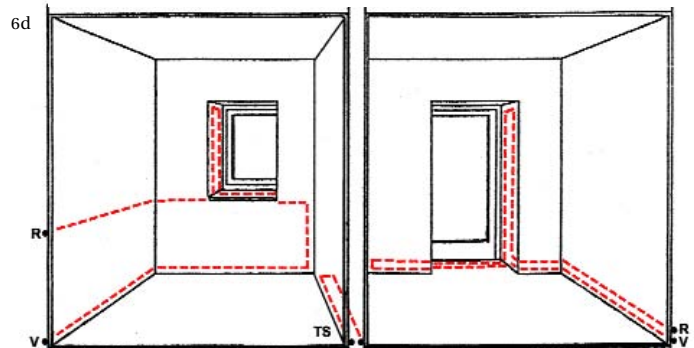


- Museum, Kirche (Vorlauf $30 - 60^{\circ}\text{C}$)
- Wohngebäude (Wandstärke ab 60 cm; Vorlauf $30 - 65^{\circ}\text{C}$)



- Museen mit höherem Temperaturanspruch (Vorlauf $30 - 55^{\circ}\text{C}$)
- Wohngebäude (Wandstärken zwischen 30 und 60 cm; Vorlauf $30 - 65^{\circ}\text{C}$)

Brüstungsrohr in Berührung mit Fensterbankunterkante



- Gebäude aller Art bei Nutzung von Solarkollektoren, Wärmepumpe etc.
- Wohngebäude (Leichtbau: porierte Wandbaustoffe, Fachwerk, Glasfassaden; Vorlauf $30 - 65^{\circ}\text{C}$)

Feuchteintrag verbundenen Ausbaumaßnahmen verringern. Die erste unregelmäßige Betriebsphase zur Trocknung der oberflächennahen Bauteilschichten, die die Voraussetzung für eine sinnvolle Einregulierung ist, endet dann mit der Bauzeit.

Die aus der Temperierung der Gebäudehülle folgende Raumklimaqualität wird auch durch *Wandheizung und Betonkernaktivierung* erreicht. Bei Temperierung ist der Aufwand jedoch wesentlich geringer: Die Rohrlänge pro laufendem Wandmeter ist wesentlich geringer und weder an den Rückseiten der Rohre, noch an den Bauteilen selbst wird eine Wärmedämmung benötigt, da sich deren Funktion aus der Materialtrocknung und der Optimierung des Wärmespeichervermögens ergibt. Durch Wärmeflußmessung wurde ein theoretisch angenommener erhöhter Wärmedurchgang im Rohrbereich im Vergleich zur übrigen Wandfläche nicht bestätigt; stattdessen wurde an einer baugleichen und gleich exponierten Wand bei Heizkörperheizung ein höherer Wärmedurchgang im Vergleich zur temperierten Wand festgestellt[2].

EINLEITUNG: DER BEDARF AN ALTERNATIVER WÄRMEVERTEILUNG IST EVIDENT

Das Verfahren der Temperierung wurde seit 1982 in öffentlichen Bauvorhaben entwickelt von der LANDESSTELLE FÜR DIE NICHTSTAATLICHEN MUSEEN IN BAYERN (von 1978 bis 1990 beim Bayerischen Nationalmuseum, seitdem beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege) in Zusammenarbeit mit Baubehörden und freiberuflichen Fachleuten. Ausgangsbasis waren die im Pilotprojekt Stadtmuseum Sarnberg beobachteten bauphysikalischen Effekte von kontinuierlich beheizten Außenwand-Vorsatzschalen und Sockelheizleisten: Der tatsächliche Wärmebedarf war deutlich geringer als der nach DIN berechnete; ohne Zusatzmaßnahmen ergab sich die Ausschaltung von aufsteigender Feuchte, Schadsalzaktivität und Kondensation; Wärmeschutzmaßnahmen konnten auf die Dämmung des Daches beschränkt werden. Nach Abdichten der außergewöhnlich vielen Baufugen trat schließlich auch die Klimastabilisierung ein, wobei der Luftbefeuchtungsbedarf bei Frost minimal war, während der *Entfeuchtungsbedarf* dank der Raumtemperierung ganz entfiel. Eine derartige Diskrepanz zwischen dem nach konventionellem Planungsansatz „erforderlichen“, allgemein anerkannten Aufwand und dem bei Temperierung der Gebäudehülle tatsächlich nötigen zeigte sich in späteren Projekten regelmäßig. Bald stellte sich heraus, daß diese Gesamtwirkung mit viel geringerem Aufwand erreichbar ist.

Die Quintessenz dieser Entwicklung, die vor 20 Jahren im Museumswesen begann, findet im allgemeinen Bauwesen zunehmend Beachtung: Warme und trockene Räume und ein zugleich konservatorisch und physiologisch günstiges Raumklima lassen sich durch „Temperierung“ der Gebäudehülle (d.h. durch Beheizung von Gebäuden mittels Sockelheizrohren) viel besser und einfacher herstellen, als – wie allgemein üblich – durch direkten Eingriff in den Raumluftzustand mit Hilfe von Heizkörpern und Raumlufttechnik. Zunehmend wird erkannt, daß die Nachteile konventioneller Verfahren zur Raumbeheizung und Klimatisierung direkt daraus folgen, daß sie ihre Ziele durch Einwirkung auf die freie Luft im Raum verfolgen: Durch Aufheizung der Raumluftmasse in den schachtartigen Hohlräumen der Heizkörper und Verteilung der Wärme im Raum durch „Selbst-Umwälzung“ der „Heizluft“ oder durch ständige Konditionierung der Raumluft in der Zentrale einer Klimaanlage und mechanische Umwälzung dieser „teuren“ Luft mit Hilfe von Ventilatoren und Kanälen im Gebäude. Dabei werden nicht nur einfachste physikalische Fakten mißachtet („warme Luft steigt nach oben“), sondern die Luft, das wichtigste „Lebensmittel“ des Menschen (s. 1.2.3.1), wird als technisches Medium mißbraucht. Daß diese Erkenntnis nicht durch die haustechnische Fachwelt herbeigeführt wurde, sondern durch den Museumssektor, könnte auf der Tatsache beruhen, daß die Forderung nach Klimastabilität den *kontinuierlichen* Betrieb von Heizanlagen voraussetzt, also ohne Temperaturabsenkungen wie bei Nacht-, Montags- oder Wochenendabsenkung. Dabei zeigen sich folgende Effekte:

- die energetische Relevanz des zuliefernden Rohrnetzes, dessen Wärmeabgabe deutlich wird,
- der große Einfluß, den kleine, kontinuierlich angebotene Energiemengen auf speicherfähige Bauteile ausüben,
- die höhere Nutzung der täglichen solaren Zustrahlung dank trockener Bauteile mit höherem Anfangs-Wärmeinhalt am Morgen.

Die konservatorische, bauphysikalische, physiologische und energetische Relevanz der Methode der „Temperierung“ wird im folgenden mit besonderem Blick auf die Problematik im Museum näher erläutert, da man hier allgemein davon ausgeht, daß sich physiologisch angenehme Raumverhältnisse und konservatorisch erforderliche Klimaqualität gegenseitig ausschließen. Dieses Dilemma entsteht aber nur bei konventionellem Konzept, also bei direktem Eingriff in den Raumluftzustand. Eine andere Facette zeigt das Museumsdepot, dessen Hauptaufgabe die Langzeit-Konservierung der nicht ausgestellten Sammlung ist. Neben seiner konservatorischen Bedeutung hat es bei großen Stückzahlen und Großobjekten auch eine wirtschaftliche: Der „angetroffene Zustand“ der Objekte einschließlich der Beschaffenheit aller ihrer Oberflächen soll möglichst ohne Arbeitsaufwand und ohne Konservierungsstoffe beibehalten werden können. Die bloße Einlagerung eines unkonservierten Objektes in ein Depot soll dazu führen, daß weder Lichtschäden, noch Malschichtlockerungen oder Korrosion weiter fortschreiten, daß ohne Einsatz biozider Mittel die Aktivität vorhandener pflanzlicher Schädlinge und Mikroorganismen beendet und ein Neubefall unmöglich ist und daß die Lebensbedingungen für Insekten verschlechtert werden, dies alles mit möglichst geringem Energieaufwand.

Die Problematik verschärft sich noch um die bauphysikalische Komponente, wenn man, stellvertretend für historische Bausubstanz mit originaler Oberfläche, ein Exponatgebäude im Freilichtmuseum mit ganzteiltransferierten Originalbauteilen betrachtet: Das Gebäude muß nicht nur Schutzhülle für das Inventar sein, sondern der Baukörper selbst, insbesondere die aufwendig konservierte äußere Oberfläche der Gebäudehülle, sollten nach dem Wiederaufbau im Museum ohne ständige Reparaturmaßnahmen erhalten werden können. Dies gilt erst recht für Baudenkmäler, die zu Wohnzwecken genutzt werden, da hier die äußeren und inneren Oberflächen ohne gestaltverändernde „Verbesserung“ durch Wärmedämmung und Dampfsperren auskommen sollten, bei möglichst geringem Energiebedarf und ohne Durchfeuchtung der Außenbauteile. Dazu gesellt sich das Problem der aufsteigenden Feuchte, das möglichst ohne Eingriff in die Bausubstanz oder gar Austausch der Mauersockel zu lösen ist. Gleichzeitig soll die Methode auch für Neubauten vorteilhaft sein, und zwar für alle Nutzungsarten wie für alle Bauweisen.

Wie kann man nun all diese aus konventioneller Sicht hochgesteckten Ziele nicht nur überhaupt, sondern auch noch mit minimalem finanziellen Aufwand erreichen? Wie kann man ferner generell die Kosten in relevantem Maße senken, die heute als Standard angesehen werden für das Bauen und Sanieren, das Heizen und Klimatisieren, den Feuchte- und Wärmeschutz?

1. LANGZEITERFAHRUNG MIT WANDSOCKELBEHEIZUNG

In diesem Jahr blickt die Landesstelle zurück auf mehr als 20 Jahre Erfahrung mit alternativer Raumheiztechnik, deren physikalische „Nebeneffekte“ wie Heizenergieeinsparung, Bauteiltrocknung, Luftentfeuchtung und Klimastabilisierung sowie Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung zu deutlichen Kosteneinsparungen bei den meisten Bauaufgaben führen. Sie sind daher gleichermaßen relevant für Neu- wie Altbauten, für Baudenkmäler, Kirchen, Exponatgebäude in Freilichtmuseen, Bergkeller wie behauste archäologische Ausgrabungen. Von Anfang an wurden die Ziele nicht, wie sonst üblich, mit Klimageräten, raumluftechnischen Anlagen, speziellen Baumaterialien oder Konservierungsstoffen verfolgt, sondern mit Wandheiztechniken in Verbindung mit einfachsten Maßnahmen zur Luftwechselkontrolle. Trotz der zunehmenden Zahl an

Objekten, die die umfassende Wirkung bei immer geringerem Aufwand sichtbar machten, schien die Entwicklung zunächst nur auf einem „Langen Marsch der Empirie gegen die Theorie der Fachwelt“ durchsetzbar zu sein, obwohl gegen Ende der 1980er Jahre nachgewiesen wurde, daß die Effekte durch Sockelheizrohre allein erreichbar sind, also ohne die bis dahin von den Fachleuten als notwendig erachteten Wand- und Bodenschalen mit integrierten „Heizkörpern“ wie Heizleisten oder Kleinkonvektoren.

Derartige Widerstände, die gerade in dieser Phase zunächst regelmäßig auftraten, deckten bald das „Gürtel-Hosenträger-Phänomen“ auf: Der empirischen Beobachtung, daß Sockelheizrohre sanieren und heizen („Gürtel hält Hose“), steht auch heute noch allzu oft die theoretische Überlegung entgegen, daß die Heizleistung wegen zu geringer Raumluftkonvektion (!) nicht ausreichen kann und Heizkörper bzw. Klimaanlage sowie Maßnahmen zur Trockenlegung, Bodenisolierung, Wärmedämmung etc. („Hosenträger“) zusätzlich erforderlich sind. Auch heute noch gleicht die amtliche Beratung, die die Vorteile der Methode und ihr großes Einsparpotential zu allgemeiner Nutzung bereit stellt, oft einem „Hindernissenrennen“ gegen die meist unglückliche Handhabung der Honorarordnung durch öffentliche Auftraggeber (Honorarhöhe nicht nach Einsparungsleistung entsprechend § 29,2 HOAI, sondern nach Höhe der Bausumme), gegen kommerzielle Interessen von Firmenvertretern oder gegen die DIN-Normkeule schwingende Planer, beide unabsichtlich „unterstützt“ durch die allgemeine DIN-Gläubigkeit, die in allen Ebenen anzutreffen ist, obwohl die Normen nicht verbindlich sind (s. Kap. 8), ihre Einhaltung jedoch zu einer Summe aufwendiger Einzelmaßnahmen mit sich überlappenden Effekten führt. Erschwerend wirkt die Argumentation namhafter Gutachter, deren Vermutungen (!) oft mehr Gewicht haben als die inzwischen nach Hunderten zählenden Beispiele. Es gilt also weiterhin, die bei „musealem“, d.h. kontinuierlichen Heizbetrieb beobachteten, inzwischen ausreichend erforschten großen Wirkungen kleiner, stetig an die Gebäudehülle abgegebener Energiemengen nicht nur für den Laien, sondern gerade für die Fachwelt verständlicher zu beschreiben, deren Ausbildung bis heute nicht auf die ganzheitliche Wahrnehmung kleiner Wirkungsquanten und die vernetzte Betrachtung von Feuchte- und Wärmephänomenen an Bauteilen ausgerichtet ist.

Die durch die reine Rohrlösung gelungene starke Vereinfachung der Heiz- und Klimatisierungstechnik sowie der Feuchtesanierung führte zu einer zunehmenden Anwendung der Temperiermethode in Bauwerken aller Konstruktions- und Nutzungsarten. Der Grad der Vereinfachung wird an einem Großbeispiel, dem Alf Lechner Museum in Ingolstadt, gezeigt (Kap. 7). Zuvor jedoch werden die drei wichtigsten Erkenntnisse dargestellt, die sich aus der Langzeiterfahrung mit einfachster Wandheiztechnik ergaben:

- Wandsockelbeheizung senkt Kosten für Feuchtesanierung, Heizung und Klimastabilisierung.
- Wandsockelbeheizung schafft durch „Strahlungsklima“ zugleich konservatorisch und physiologisch günstige Raumverhältnisse.
- Wandsockelbeheizung und Luftwechselkontrolle schaffen ein „Universal-Klima“.

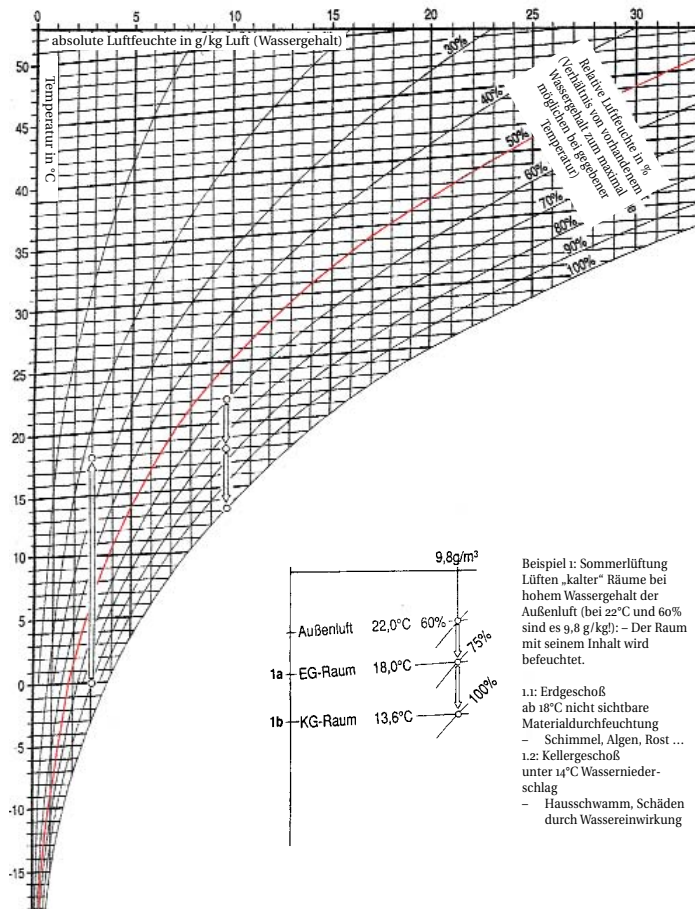
Dann werden die daraus ableitbaren Anforderungen an ein alltagsgerechtes Raumklima formuliert. Schließlich wird der technische Mindestaufwand erläutert, mit dem man die integrierte Aufgabenstellung „Heizen – Dämmen – Feuchtesanieren – Klimatisieren“ noch sicher lösen kann, anstatt zahlreiche teure Einzelmaßnahmen durchzuführen.

1.1 WANDSOCKELBEHEIZUNG SENKT KOSTEN FÜR FEUCHTESANIERUNG UND KLIMASTABILISIERUNG

Die erste Erkenntnis ist von ökonomischer, im Fall eines Baudenkmals auch von denkmalpflegerischer Bedeutung: Mit minimaler technischer Ausstattung können Bauwerke in allen ihren Ebenen bauphysikalisch saniert, auf nutzerfreundliche Weise konservatorisch optimiert und zugleich selbst konserviert werden

(Mindestfall: zwei Sockelheizrohre an den Innenseiten aller Außenwände, je ein Rohr beidseitig der Trennwandsockel des Kellers bzw. nicht unterkellerten Erdgeschosses, Abdichtung der Bau- und Öffnungsfugen, evtl. ein Abluftventilator). Gebäude, deren Hülle über eine Mindestmasse und deren Glasflächen über eine Außenbeschattung verfügen, erreichen diese Ziele mit geringem Energieeinsatz und ohne sommerlichen Kühlaufwand. Bei entsprechender Auslegung (z. B. durch Installation einer zweiten Heizrohrschleife in der Brüstungsebene der Außenwände mit Rücklaufumweg in den Laibungen) sind auch bei geringen Wandstärken ohne Wärmedämmung Wohnraumtemperaturen zu erzielen.

Zur universellen Nutzung und zum Feuchteschutz von Räumen mit erdbehörten Bauteilen, die keine solare Zustrahlung erfahren, ist aber generell auch im Sommer ein minimaler Heizbetrieb erforderlich (Leistungen zwischen 5 und 15 W pro m Wandsockel, in Kellern bis zu 30 W/m), da die Räume nach Abstellen der Heizung für Wohnzwecke zu kalt und für die Lagerung vieler Materialien zu feucht werden (Abb. 2, 3 und 7). Dies gilt oft auch für Neubauten trotz Drainage



Beispiel 1: Sommerlüftung
Lüften „kalter“ Räume bei hohem Wassergehalt der Außenluft (bei 22°C und 60% sind es 9,8 g/kg): - Der Raum mit seinem Inhalt wird befeuchtet.

1.1: Erdgeschoß ab 18°C nicht sichtbare Materialdurchfeuchtung
- Schimmel, Algen, Rost ...

1.2: Kellergeschoß unter 14°C Wasserniederschlag
- Hausschwamm, Schäden durch Wassereinwirkung

Beispiel 2: Winterlüftung
Lüften beheizter Räume bei geringem Wassergehalt der Außenluft (bei 0°C und 80% sind es nur 3 g/kg): Der beim Lüften austretende Wasserdampf wird trotz hoher relativer Außenluftfeuchte nicht ersetzt.

Abbildung 7:
Mollier-h,x-Diagramm
Abhängigkeit des örtlichen Wertes der relativen Raumluftfeuchte vom Wassergehalt der Außenluft sowie von der Raumlufttemperatur bzw. von der Bauteil-Oberflächentemperatur

Zeichnung Erich Hackl, München

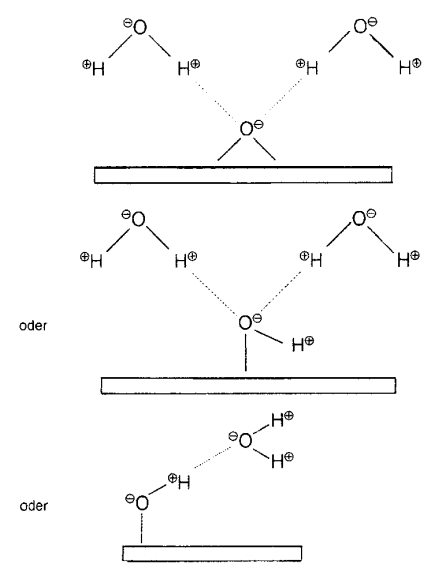


Abbildung 8:
Wasserstoffbrücken an hydrophilen Oberflächen
Die Balken repräsentieren zwei Beispiele der „inneren Oberfläche“ (Kapillarwand) poröser mineralischer Stoffe (Mauerwerk, Putz etc.) mit möglichen Formen der Adsorption des Wassermoleküls durch Bildung einer Wasserstoffbrücke.

Durch geringfügige Temperaturerhöhung, d. h. durch geringe Verstärkung der Wärmeschwingung der Moleküle des Materials einschl. der Bindungspartner an der Kapillarwand kann diese schwache Bindung gebrochen werden (Beginn der Materialtrocknung durch langsame Verdrängung von Wassermolekülen im Wärmegefälle) bzw. kann ihre Neubildung verhindert werden (Ausschaltung von aufsteigender und Niederschlagsfeuchte).

Zeichnung aus: Torraca, G.: Poröse Baustoffe. Wien 1986, S. 13f

und Außendämmung. Da aber bei Temperierung solcher Räume zum Zweck der Luftentfeuchtung die Trockenlegung und Schadsalz-Inaktivierung, der Kondensatschutz und die energetische Verbesserung der Außenbauteile physikalische Nebeneffekte sind, kann auf die konventionellen Maßnahmen ohne Einbuße verzichtet werden.

Dies erfordert an der Raumseite das Vorhandensein oder die Herstellung einer Schicht, die keine Fugen und Großporen, sondern nur noch Kapillaren hat, da in einer solchen Schicht die Bewegung von *flüssigem* Wasser nicht mehr möglich ist, sondern nur noch die von Einzelmolekülen („Wasserdampf“) durch Bildung von Wasserstoffbrücken (Abb. 8). Diese Bewegung kann durch die geringe Wärmeabgabe des *Warmluftauftriebs* oberhalb einer Rohrstrecke unterbunden werden, da nur eine geringfügige Erhöhung der Temperatur der raumnahen Bauteilschicht erreicht werden muß. Die daraus folgende leichte Erhöhung der Wärmeschwingung der Moleküle der Materialschicht läßt keine Neubildung von Wasserstoffbrücken mehr zu. Bei zunehmender Oberflächentemperatur kommt es dann auch zu einer langsamen Verdrängung von Wassermolekülen nach außen (s. auch Kap. 4.1). Natursteine ohne Mörtelfugen oder poröse Steine müssen also verputzt werden, während bei normal gebrannten Ziegeln und Steinen mit Kapillaren nach sorgfältiger Nachbesserung des Fugennetzes ein Zustand in Sichtmauerwerk bestehen bleiben kann. Die Trockenlegung der *Sockel* von Kellerwänden bzw. nicht unterkellerten Erdgeschoßwänden erfolgt durch die „*thermische Horizontalsperre*“, die sich bei kontinuierlicher Sockelbeheizung dadurch ergibt, daß sich – ausgehend vom faustgroßen Wärmestau in der unmittelbaren Rohrumgebung – geringe Wärmemengen *radial*, also gleichzeitig nach allen Seiten, in der Sockelzone ausbreiten und zylindrische Isothermen herstellen (Abb. 1).

Bei Temperierung ist auch aus energetischer Sicht der Verzicht auf die aufwändigen konventionellen Feuchte- und Wärmeschutzmaßnahmen sinnvoll. Nach Ablauf der ersten Heizperiode, in der die Trocknung der gesamten Gebäudehülle bei erhöhtem Energieeinsatz forciert werden sollte (Vorlauftemperatur so lange wie nötig mindestens 60°C), beginnt der Wärmebedarf zu sinken (auch in den erdberührten Bereichen), so daß je nach Masse des Baukörpers und Feuchtegrad der Bausubstanz nach einem oder wenigen Jahren der Jahresheizenergiebedarf trotz der „Sommertemperierung“ geringer wird als bei konventioneller Klimatisierung zur Luftentfeuchtung bzw. bei üblicher Beheizung nur während der Heizperiode.

Während der späteren Heizperioden ist der Wärmebedarf im Vergleich zu „Luft“-Heizung aber nicht nur durch Trocknung des Mauerwerks und Optimierung seines Speicherverhaltens geringer, sondern, unabhängig vom Nutzerverhalten, auch dadurch, daß die *Raumluft* eine „geringe“ Temperatur hat, d. h. eine Temperatur, die nicht über der Wandoberflächentemperatur (z. B. 20°C) liegt. Daher gibt es bei Temperierung nicht das Entweichen von Warmluft zur Zimmerdecke und in das Treppenhaus wie bei „luftheizenden“ Verfahren, und die an Fugen und Öffnungen heizbedingt aus dem Gebäude austretenden Luftmengen sind klein – „es zieht nicht“ beim Lüften. Im Vergleich dazu vagabundieren bei Heizkörperheizung große Warmluftmengen im Gebäude umher und ständig treten heizbedingt große Luftmengen mit hohem Energieinhalt aus. Einen 60 Grad heißen Heizkörper verläßt die Luft mit 58°C – nicht mit „Raumtemperatur“. Die stets zu hörende „Fach“-Aussage, bei Strahlungsheizung sei die *Raumluft*-temperatur geringfügig niedriger als bei Heizkörperheizung, ist daher grotesk. Am unteren Ende eines nicht geschlossenen Kippfensters kommt nicht einfach warme Luft, sondern das Heizmedium an!

Die genannten Effekte stellen sich bereits bei Fachwerk-Wandstärken ein. Ausbesserungen der Gefache sollten grundsätzlich mit schwerem Material ausgeführt werden. Bei Leichtbauten wie Scheunen mit Brettschalung oder Glasbauten wäre schon im Hinblick auf die Klimastabilisierung – unabhängig von der heiz- und climatechnischen Ausstattung – zunächst die bauliche Voraussetzung zu

schaffen: Die Fähigkeit der Gebäudehülle, die Wirkung von Sonneneinstrahlung und Außentemperaturschwankung zu dämpfen, müßte verbessert werden: bei Leichtbauten z. B. durch Erhöhung der Masse der opaken Bereiche (Dämpfung der Temperaturspitzen durch Vorratsbildung!), bei Glasbauten durch äußere Beschattung der transparenten Flächen (Dämpfung durch Reflexion). Dann kann auch hier durch einfache Rohrführung das Klima stabilisiert werden, z. B. durch offene Verlegung angestrichener Heizrohre auf den Füllungen oder Vormauerungen bzw. im Halteapparat von Glasfassaden (thermisch vom Metall getrennt, Abb. 25).

1.2 WANDSOCKELBEHEIZUNG SCHAFFT DURCH „STRAHLUNGSKLIMA“ ZUGLEICH KONSERVATORISCH UND PHYSIOLOGISCH GÜNSTIGE RAUMVERHÄLTNISSE

Die zweite Erkenntnis, die sich aus dem musealen Sektor allmählich auf den allgemeinen Bausektor überträgt, ist, daß im Zusammenspiel derart einfacher Mittel sowohl in konservatorischer als auch in physiologischer Hinsicht eine hohe Klima-Qualität eintritt, ein „Strahlungsklima“, das nicht durch Manipulation der Raumluft, sondern durch die gleichförmige Wärmeabstrahlung der Raumhüllflächen erzeugt wird. Dem steht die noch immer weit verbreitete Annahme gegenüber, daß eine hohe Klima-Qualität nur mit teuren Klimaanlage erreichbar sei. Diese Annahme resultiert aus zwei falschen, weltweit bisher kaum hinterfragten Anschauungen:

1. „Das konservatorische Ziel des optimalen und besucherfreundlichen Klimatisierens ist nur erreichbar, wenn die Raumluft ganzjährig auf bestimmte, in allen Regionen gleiche Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte hin konditioniert wird, und zwar auf Werte, die vom Material der jeweiligen Objekte verlangt werden“.
2. „Der einzige Weg zu einer entsprechenden Einwirkung auf die Raumluft ist, sie fortwährend durch einen Apparat zu schleusen und im Gebäude umzuwälzen, im Idealfall mittels Klimaanlage mit möglichst weit verzweigtem Kanalsystem“.

Diesem Konzept, das noch heute den meisten Großprojekten zu Grunde liegt, entziehen bereits zwei einfache Tatsachen die Basis:

Zu 1.: Im Normalfall besteht ein Objekt aus verschiedenen Materialien (ein Gemälde z. B. aus einem Textil oder einer Holztafel und verschiedenen Arten von Malschichten).

Zu 2.: Ein Bild an einer *kalten* Wand (z. B. einer Außenwand bei konventioneller Heizung) nimmt mehr Feuchte aus der Raumluft auf als ein Bild an einer *warmen* Wand (z. B. der Innenwand desselben Raums).

1.2.1 „LUFTHEIZUNG“ SCHAFFT KONSERVATORISCH ABSURDE RAUMVERHÄLTNISSE

Gerade die spezifische Wirkungsweise von Klimaanlage aber (die Raumluft wird dauernd bewegt, apparativ behandelt und in metallischen Kanälen geführt; der Einfluß auf Außenbauteile ist ungenügend, durch Möblierung bzw. Nutzung der Wand als Hängefläche wird er z. T. ganz ausgeschaltet) bedingt gewisse Mängel, die, bis auf den Kostenaspekt, auch für die Heizkörperheizung gelten: Die Kosten von „guten“ Klimaanlage sind allein deswegen so hoch, weil sie ein äußerst aufwendiges Kanalsystem benötigen. Denn während die Führung unbehandelte Luft relativ einfach ist, wie ein frei aufgestellter Ventilator zeigt, erschwert eine physikalische Grundtatsache es, den Weg erwärmter oder gekühlter bzw. be- oder entfeuchteter Luft außerhalb der Kanäle, d.h. im freien Raum, zu bestimmen. Nicht nur wärmere Luft steigt nämlich auf, da sie leichter als kältere ist, sondern auch feuchtere Luft ist leichter als trockenere und steigt daher ebenfalls, so wie nicht nur kältere, sondern auch trockenere Luft absinkt.

Luftbefeuchten heißt nämlich, daß schwerere Luftmoleküle wie das Sauerstoff- und das Stickstoff-Atompaar sowie die Dreiergruppe Kohlendioxid durch die entsprechende Zahl leichter Wasserdampf-Moleküle (ein schweres Sauerstoffatom im Verbund mit zwei „federleichten“ Wasserstoffatomen) aus dem Raum

verdrängt werden, daß also bei gleich bleibender Molekülzahl der Anteil leichter Moleküle ansteigt. So „verschlägt es einem den Atem“, wenn man einen „vollklimatisierten“ Großraum im Winter, also bei beheizter und befeuchteter Raumluft, „von oben“ betritt, über eine Galerie oder eine hinunter führende Rampe. Luftentfeuchten bedeutet das Gegenteil: Der örtliche Entzug von leichten Wasserdampf-Molekülen erlaubt schwereren Molekülen, aus der Umgebung in die Raumluft hinein zu diffundieren.

Verstärkt wird das Problem, wenn räumliche Bedingungen für „Kamineffekte“ wie ein Treppenhaus oder eine Galerie in den klimatisierten Bereich integriert sind. Umso schwieriger wird es, einen örtlich vom Fühler festgestellten Bedarf über den Luftweg zu decken. Der ständige Regelungsbedarf, der aus dieser Schwierigkeit folgt, läßt eine Kurzzeit-Stabilität des Klimas gar nicht zu. Die gleiche physikalische Ursache bedingt die Durchfeuchtung des Bildes an der Außenwand, das dem befeuchteten Heizmedium, das bereits durch die Änderung des spezifischen Gewichts irregeleitet ist, den Weg zur Wandfläche hinter sich weiter erschwert. Ebenso wird weder die Wand, an der eine Vitrine steht, noch der Vitrineninhalt vom Heizmedium erreicht, so daß sie auskühlen. Der Wasserdampf dagegen findet durch Diffusion stets die kälteren Stellen eines Raumes.

1.2.2 STRAHLUNGSKLIMA: KONSERVATORISCHE VORTEILE

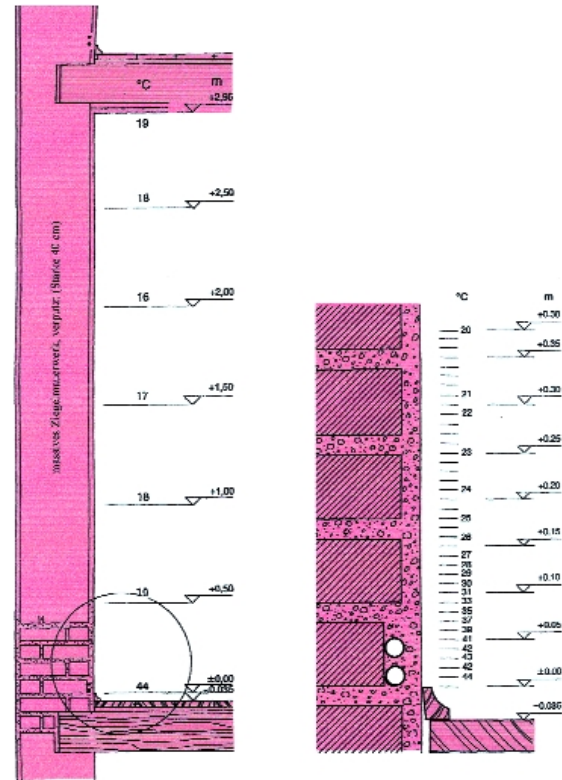
Im Gegensatz dazu entsteht durch direkt beheizte Wandflächen ein „Strahlungsklima“, ein schwankungsarmes, weil thermostabiles Raumklima, das – ohne Bewegung und Behandlung der Raumluftmasse – durch die Abgabe der in den Bauteilen gespeicherten Wärme ausschließlich durch Wärmestrahlung geschaffen wird. Dennoch ist nicht jede *Wandheiztechnik* für das Museum geeignet. Handelsübliche Wandheizregister z. B. sind stark strahlende Wandteillflächen, die wie ein frei stehender Kachelofen mit erhöhter Oberflächentemperatur eine Fernwirkung erzielen sollen und daher bei der Raumeinrichtung frei gelassen werden müssen, das Raumkonzept also einschränken. Die Sockelleistenheizung wiederum – ein Kleinkonvektor hinter einer schachtbildenden Blende – hat bereits allein wegen ihrer wandlangen Ausbildung einen positiven Einfluß auf die Wand, da schon bei Schwachbetrieb nicht nur der Wandsockel trocken und warm wird, sondern bereits dann schon von ihm ein schwacher Auftrieb ausgeht. Steigt jedoch die Wassertemperatur durch die Regelung auf 40°C oder höher, z. B. weil der Thermostat öffnet, so nimmt die Heizleistung plötzlich stark zu, da die feinen Konvektorschächte jetzt aktiviert werden. Da der Wärmebedarf des Raumes wegen des vorgenannten Effektes aber geringer als das neue Wärmeangebot ist, steigt die Temperatur der Wandoberfläche und deren Wärmeabstrahlung rasch an und der Thermostat verringert wieder den Wasserfluß. Wegen der weiterlaufenden Konvektion kühlt der Kleinkonvektor nun kurzfristig auf die Temperatur der im unteren Raumteil kühleren Luft ab und reduziert seine Leistung. Seine unmittelbare Umgebung hält durch Speichereffekte die Grundversorgung aber aufrecht. Aus diesem Wirkungsablauf erklären sich die beiden bei Sockelleistenheizung zu beobachtenden Mängel, die (konservatorisch nur bei Wandgestaltung relevante) Verstaubung der Sockelzone und die leichten, durch die Längenänderung verursachten Knackgeräusche.

Die Methode der *Temperierung* dagegen vermeidet all diese Mängel, da sie aus der Analyse der Nachteile der vorhandenen Heizsysteme entwickelt wurde. Diese Vorgehensweise führte nach einiger Zeit zu der Minimalform, die bei stetiger Betriebsweise, dank der Nebeneffekte, noch ausreichend leistungsfähig ist. Übrig blieb nicht ein käufliches „Produkt“, sondern ein „Konzept“, das den am Bau Beteiligten (Bauherr, Architekt, Projektant, Heizungsbauer, Maurer/Putzer, Bodenleger) ermöglicht, durch Abstimmung ihrer Vorstellungen und Leistungen unter Verwendung einfachster Bauteile ein auf den jeweiligen Baukörper abgestimmtes ideales Ergebnis zu erreichen. Bei kontinuierlichem Betrieb von zwei Sockelheizrohren wird auf ganzer Länge der Außenwände eines Raumes von dem durch sie erhitzten ca. 10 cm hohen Putzstreifen ein ständiger Warmluftauf-

Abbildung 9:
Temperaturen an der Innenoberfläche einer Außenwand bei Temperierung

- Meßanalyse mittels Infrarot-Thermometer
 Außentemperatur -10°C (Baum in 1,8 m Höhe), Raumtemperatur $20,5^{\circ}\text{C}$ (Tischplatte in Raummitte),
 Massivmauerwerk ($\sim 1800\text{ kg/m}^3$, 40 cm Stärke), Rohre unter Putz von $\sim 20\text{ mm}$ Stärke, mittlere Heizwasser-Temperatur 60°C (am Stockwerksverteiler $63/57^{\circ}\text{C}$)
- Die Oberflächentemperaturen über der Sockelzone (linke Zeichnung) sind Ergebnis des kontinuierlichen Warmluftauftriebes, dessen Stärke von der Temperatur der Rohrabdeckung abhängt.
 - Die Oberflächentemperatur des Putzstreifen vor den Rohren (rechte Zeichnung) ist auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Materials (typisch für trockene mineralische Stoffe!) bei nur 2 cm Stärke trotz Dauerbetrieb bereits $\sim 20\text{ K}$ geringer als die mittlere Wassertemperatur. Daher: „Putzstärke max. 15 mm!“
 - Thermografien der Außenseite von Wänden mit Heizrohren auf der Raumseite zeigen trotz hoher Heizwasser-Temperatur nicht den Rohrverlauf. Sie bestätigen die hohe Wärmedämmfähigkeit von trockenem mineralischen Material (s. Abb. 15 – 20).

Zeichnung Rudolf Werner, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, München



trieb hervorgerufen, so wie es an einer sonnenbeschiedenen Wand nur zeitweise geschieht. Dort ist dieses „Flimmern“ der aufsteigenden Luftschicht noch lange nach dem Ende der Einstrahlung sichtbar. Der nur vom Sockel ausgehende Auftrieb ist zwar viel geringer als der an der bestrahlten Wand oder der aus einem Heizkörper kommende. Da er aber stetig wirksam ist (24 Stunden lang) und die gesamte Außenwandinnenseite ununterbrochen „bestreicht“, kann seine Heizleistung, sein Wärmehalt „geringfügig“ sein – im Vergleich zur Heizluftmenge des Heizkörpers. Abgesehen von der Wärmestrahlung der unmittelbaren Rohrumsgebung (Putzoberflächentemperatur vor den Rohren ca. 40°C bei 20 mm Putzüberdeckung und 60°C mittlerer Wassertemperatur) geht von der darüber befindlichen Wandfläche zwar lediglich eine geringe Strahlung aus, als Folge der Wärmeübertragung des Auftriebes, der sich von ca. 30°C im Sockelbereich auf seinem Weg zur Decke auf unter 20°C abkühlt (Abb. 9; Kap. 6.3.1). Dies ist für „den Raum“ aber ausreichend, da es auf die gesamte über der Sockelzone liegende Restfläche seiner Außenwände zutrifft. Die (auf beliebige Weise *erzeugte*) Wärme wird also ausschließlich an den Innenflächen der Gebäudehülle verteilt, von dieser gespeichert und zum größten Teil als Strahlungswärme in die Räume abgegeben. Die übrigen Raumhüllflächen und das Inventar nehmen sie auf und speichern sie ebenfalls. Die homogene Raumtemperatur entsteht durch unendliche Reflexion zwischen den Außenwänden („Heizkörper“) und den übrigen Festkörpern, den Trennwänden und dem Mobiliar.

Damit sind die wichtigsten konservatorischen wie physiologischen Kriterien für ein *Optimalklima* erfüllt: Die in Strahlungsaustausch mit den Außenwänden stehenden übrigen Raumhüllflächen und im Raum befindlichen Gegenstände, insbesondere die in Außenwandnähe, können im Winter nicht abkühlen – wie im Sommer in kalten Nächten, wenn die „unbeheizte“ Außenwand durch Abstrahlung eines Teils der tagsüber gespeicherten Sonnenwärme den Raum warm hält. In der kalten Sommernacht bleibt der Raum, auch der, in dem Schränke bzw. Vitrinen vor den Außenwänden (= „vor der Heizung“) stehen, warm, weil er „nicht abkühlen kann“, nicht aber, weil von irgendeiner Stelle im

Raum eine starke Strahlung „in den Raum hinein“ wirkt oder weil seine Raumluftmasse aufgeheizt wäre. Für die „Raumtemperatur“ ist also der vom Sockel hervorgerufene Auftrieb wichtiger, als die von ihm ausgehende Wärmestrahlung, weil nur der Auftrieb den Wärmebedarf der über der Sockelzone befindlichen „Hauptfläche“ der Wand decken kann. Die Möblierung muß zur Wandoberfläche einen geringen Abstand einhalten (ca. 2 cm), damit der für ihre Versorgung erforderliche Auftrieb nicht unterbrochen wird. Die Außenwand-Oberflächen können so auch nicht kälter als die Raumluft werden. Dadurch ist nicht nur der gesamte Baukörper vor Kondensation geschützt, sondern auch die Feuchteaufnahme außenwandnaher Objekte ausgeschlossen (zur Bedeutung dieser Tatsache für den Wärmebedarf s. Kap. 4.2). Die Raumluftmasse selbst bleibt „kühl“, der (lufttemperaturabhängige!) Fugenluftwechsel ist daher klein, so daß sich im geschlossenen Raum keine Kurzzeit-Schwankungen des Raumklimas ergeben. Dies gilt auch für den genutzten Raum, wenn der Luftwechsel des Gebäudes reduziert bzw. durch Lüftereinsatz kontrolliert ist. Aus der Entstehungsart des Klimas folgt seine „Homogenität“, d.h. es herrschen in allen Raumteilen annähernd die gleichen Werte, so daß weder die Möblierung, noch die Exponathängung eingeschränkt sind.

Da bei Temperierung im Gegensatz zur Sockelleistenheizung die Menge der an der Wand aufsteigenden Warmluft und die Geschwindigkeit des Auftriebs sehr gering sind, unterbleibt jede *Verstaubung* des Wandsockels, wie auch bei plötzlich ansteigender Vorlauftemperatur eine rasche Erhöhung der Raumtemperatur unmöglich ist. Während nämlich ein stärkerer Vorlauftemperaturanstieg beim Kleinkonvektor eine deutliche Steigerung von Temperatur und Geschwindigkeit der Auftriebsluft hervorruft, da seine Schächte fast so heiß wie das Heizwasser werden, kann beides bei einem gleichen Anstieg der Wassertemperatur einer eingeputzten Temperierschleife nur geringfügig gesteigert werden: Die Oberfläche des abdeckenden Putzes bildet lediglich eine flache Ebene; diese ist wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des mineralischen Materials um bis zu 20 Grad kühler als das Heizwasser. Auch bei *auf Putz* verlegten Heizrohren, deren Oberfläche so heiß wie die der Sockelkonvektoren wird, ist die Fähigkeit, Luft aufzuheizen, viel geringer, da die freie Oberfläche nur einen Bruchteil der Konvektorfläche ausmacht und keine Schächte vorhanden sind. Wenn auf Putz verlegte Rohre mit stark wechselnden Temperaturen gefahren werden, so ist eine leichte Verstaubung im Nahbereich der Rohre, im Gegensatz zur Unterputz-Verlegung, nicht auszuschließen. Da aber bei Sockeltemperierung generell, im Gegensatz zur Heizkörper-Heizung eine durch die Wärmeverteilung verursachte Luftbewegung im Raum fehlt, bleiben auch deren Folgen aus, die Verstaubung von Raumschale und Raumausstattung und die Zugserscheinungen, die ein höheres Wärmebedürfnis hervorrufen.

1.2.3. STRAHLUNGSKLIMA: PHYSIOLOGISCHE VORTEILE

Hier zeichnet es sich bereits ab, daß das allseits beklagte Dilemma „Erfüllung der konservatorischen Anforderungen oder Besucherfreundlichkeit“ nur beim „modernen“ unganzzheitlichen Technikkonzept (Manipulation der Raumluft) entsteht, während das Strahlungsklima den Gegensatz durch Vermeidung der physiologischen Beeinträchtigungen gar nicht erst entstehen läßt.

1.2.3.1 PHYSIOLOGISCHE RELEVANZ DER RAUMLUFTTEMPERATUR

Die Lunge und das damit verbundene Blutgefäßsystem dienen nicht nur der Sauerstoffversorgung des Körpers („Lebensmittel Luft“) bei gleichzeitiger Abfuhr des Kohlendioxides, das beim Stoffwechsel entsteht, sondern auch der Abfuhr der dabei ebenfalls entstehenden Wärme. Dank einer Lungenfläche von ca. 100 m³ und dem Tatbestand, daß wir fortwährend ein- und ausatmen, ist die Wärmetauschkfunktion der Lunge sehr groß. Da aber die Körperkerntemperatur zur optimalen Funktion des Stoffwechsels annähernd konstant bei 37°C liegen sollte, mit einer Schwankungstoleranz von einem halben Grad, ist es von großer

Bedeutung, welche Temperatur die Raumluft, also die Luft, die wir einatmen, hat. Denn nur wenn die Raumluft deutlich kälter als die Körperkerntemperatur ist (wenn sie z. B. 20°C hat), ist die Kühlfunktion der Lunge gegeben; ist sie aber wesentlich wärmer als 20°C, kehrt die Lunge ihre Funktion ins Gegenteil und wird zum ebenso effizienten „Heizgerät“. Welchen entscheidenden Anteil an der Wärmeregulation des Körpers die Wärme-Abgabe über die Lunge hat, zeigt sich daran, daß beim Anstieg der Lufttemperatur die Wasserdampf-abgabe des Körpers zur Erzeugung von „Verdunstungskälte“ sprunghaft zunimmt: Sind es bei 10°C (Straße) 30 Gramm pro Stunde, und bei 15°C (Hausflur) 31 g/h, so müssen bei 20°C (strahlungsgeheizter Raum) bereits 39 g/h abgegeben werden, bei 25°C (Raumluft bei Fußbodenheizung) sind es schon 65 g/h und bei 30°C (Heizkörper-heizungsluft in Nasenhöhe; s. 1.2.4) gar 100 g/h.

1.2.4 „LUFTHEIZUNG“ SCHAFFT PHYSIOLOGISCH ABSURDE RAUMVERHÄLTNISSE

Bei „Luftheizung“ hat die Luft im oberen Raumdrittel eine wesentlich höhere Temperatur (z. B. 40°C) als im übrigen Raum, da sie gerade den Heizkörper (bei einer Wassertemperatur von z. B. 60°C) mit ca. 58°C verlassen hat. In diesem Teil des Heizluftkreislaufes aber befindet sich die Nase, so daß dank der Lungenfläche mit dem nach geschalteten Blutgefäßsystem und der Atemfrequenz die Wärmeaufnahme über die Atmung intensiv ist (wir atmen das Heizmedium ein!). Es wird also nicht nur die physiologisch ideale Abgabe von Stoffwechselwärme an die riesige Lungenfläche verhindert, sondern die als „Kühlaggregat“ konzipierte und während der Jahrtausende mit reiner Strahlungsheizung auch als solches funktionierende Lunge wird zum „Heizregister“, so daß die Körperkerntemperatur rasch anzusteigen droht. Wegen der geringen Toleranz von 0,5 Grad muß der „Zu-warm“-Fühler des Körpers sofort reagieren durch Ausschalten der über die gesamte Hautoberfläche verteilten Kältefühler. Nur dann kann der Durchmesser der Hautgefäße erweitert werden, damit wir – in Verbindung mit verstärkter Herztätigkeit – an der Haut eine wesentlich größere Wärmemenge abgeben können, als es „früher“, d. h. zu Zeiten der Strahlungsheizung, erforderlich war.

Seit es den Heizkörper gibt, müssen wir im Winter nämlich nicht nur die gesamte Stoffwechselwärme, sondern auch die eingeatmete Heizwärme an der (bekleideten!) Körperoberfläche abgeben. Nach Abschaltung der Kältefühler ist aber die Abstrahlung von Körperwärme nach allen Seiten gleich stark, also auch zu Wandflächen hin, die – wegen der schlechten Wärmeverteilung bei „Luftheizung“ – kalt bleiben, dem Körper also zu wenig Wärme zustrahlen. Die trockene Haut aber ist zur Körperwärmeabgabe viel weniger geeignet als die Lunge, da ihre Fläche mit 2,5 m² ca. 40-mal kleiner als die Lungenfläche ist und die Kleidung eine deutliche Steigerung der Wärmeabstrahlung gar nicht erlaubt. Daher muß die heiztechnikbedingte Kreislaufschwerarbeit unterstützt werden durch die Aktivierung der Schweißdrüsen, damit die Hautkühlung verstärkt wird durch Abgabe von Verdunstungswärme. Während dies aber bei der stets feuchten Lunge in unvergleichbar größerem Maße und „nebenbei“ geschieht, wodurch ihre große Kühlfähigkeit mitbegründet ist, stellt es bei der Haut eine aufwendige Sonderleistung dar, die „früher“ (s. o.), wie die erhöhte Kreislaufleistung, nur bei „schweißtreibender“ Tätigkeit erforderlich wurde. Heute aber prägen beide Ausnahmephänomene die Befindlichkeit des Körpers fast den ganzen Tag über, da fast alle Räume und Verkehrsmittel „luftgeheizt“ sind.

Dies alles ist physiologisch absurd, da der sitzende oder im Raum gehende Mensch nur dann Behaglichkeit empfindet, wenn die Haut trocken ist und der Wärmedurchgang durch die Haut genau dem Teil der beim Stoffwechsel produzierten Wärmemenge entspricht, der gerade über Wärmeleitung und Blutfluß zur Körperoberfläche strömt. Unter optimalen Raumverhältnissen, z. B. in einem Raum mit 20°C im Sommer oder in einem strahlungsgeheizten Raum mit gleicher Temperatur im Winter, würde die übrige Stoffwechselwärmemenge durch Wärmeleitung und durch das venöse, auf seinem Weg zur Lunge aufgewärmte

Blut zur durch das Atmen ständig neu gekühlten Lunge strömen und dort unmerklich abgegeben.

Durch „luftheizende“ Verfahren wird aber die Behaglichkeit nicht nur unmittelbar beeinträchtigt, sondern es entstehen noch andere Mängel, die allgemein als unvermeidbare Begleiterscheinungen der Raumbeheizung im Winter bzw. der Raumklimatisierung hingenommen werden. Die Qualität der Raumluft wird generell gemindert: durch den in der Schwebe gehaltenen, die Schleimhäute in ihrer Luftreinigungsaufgabe überfordernden Feinstaub, durch Deionisierung der Luft in metallischen Schächten von Konvektoren oder in Lüftungskanälen, bei schlechter Wartung auch durch Keimbelastung, die bei Heizkörperheizung auch durch die zwingend erforderlichen Luftbefeuchter hervorgerufen werden kann (s. Beitrag Ranacher), durch wesentliche Unterkühlung der Luft, während die Kühllursache (z. B. Einwirkung von starkem Kunstlicht oder von Sonnenstrahlung durch unbeschattete Glasflächen auf die Körperoberfläche) weiter besteht, wodurch beim Atmen die Schleimhäute in ihrer Staubbinde- und -transportfunktion beeinträchtigt werden. Tatsächlich geschieht dies alles ja mit dem wichtigsten Lebensmittel des Menschen im Raum, in dem er sich bewegt, und nicht mit einem technischen Medium in einem geschlossenen Apparat. Die Verwendung von Luft als technischem Medium im freien Raum ist daher generell fragwürdig.

1.2.5 STRAHLUNGSKLIMA SCHAFFT PHYSIOLOGISCH SINNVOLLE RAUMVERHÄLTNISSE

Bei „Wandheizung“, insbesondere in ihrer universellen Form der Temperierung, wird das oben angesprochene Dilemma aufgehoben: Im Sommer wird in erdberührten Räumen die Luftentfeuchtung von den warmen Wänden geleistet, nicht von lärmenden Apparaten, die die Wände kalt lassen. Im Winter fehlen nicht nur die Zegerscheinungen und die Staubaufnahme über die Atemwege. Auch die Wärmeregulation des Körpers bleibt ungestört, da bei „kühler“ Luft und bei mittlerer relativer Luftfeuchte die Kühlfunktion der Lunge optimal ist. Die Stoffwechselwärme kann weitgehend an der Lungenoberfläche abgegeben werden, die Haut trägt zu dieser Aufgabe ihren natürlichen Teil bei. Zusätzliche Wärme wird nicht aufgenommen. Daher spricht der „Zu-warm“-Fühler nicht an, die Kältefühler bleiben, wie im Sommer bei unbeheizter Luft, aktiv und passen den Durchmesser der Hautgefäße ständig an die Wärmeabstrahlung der Wände an (kühlere Wandfläche = engere Gefäßstellung = geringere Wärmeabstrahlung des Körpers, wärmere Fläche = weitere Gefäßstellung = stärkere Abstrahlung), die Schweißdrüsen sind nicht in Tätigkeit, die Kreislauf-Mehrbelastung fehlt, da die Hautgefäße nicht ständig „auf weit“ gestellt sind und die Pumpleistung des Herzens somit nicht erhöht werden muß.

Durch das Zusammenspiel von ruhender, den Körper isolierender Luft und „selbstbestimmter“ Wärmeabgabe an der Körperoberfläche werden nicht nur geringere Raumtemperaturen als bei luftbewegenden Heiztechniken als behaglich empfunden, sondern auch wesentlich geringere Raumlufttemperaturen. Dadurch wiederum sinkt der Aufwand für die künstliche Luftbefeuchtung erheblich, bei Klimaanlage auch der für die Frischluft-Nacherwärmung. Die Kältefühler der Haut können bei reinem Strahlungsklima auf Temperaturunterschiede sofort reagieren, z. B. durch Verengung der Hautgefäße auf dem Weg von wärmeren Räumen in aus konservatorischen (oder ökonomischen) Gründen geringere temperierte. In Großräumen wie Kirchen ist es nicht erforderlich, das gesamte Raumluftvolumen zu beheizen, wie das bei der „anerkannten“ Luftheizung wegen der Thermik unvermeidlich ist. Es muß lediglich im Aufenthaltsbereich des Menschen eine „warme Wanne“ entstehen, durch die Zustrahlung von den unteren Wandbereichen, ggf. auch von den Rändern der Bankinseln. Die daraus resultierende, das Wärmebedürfnis verringernde „Inversionslage“ (kühleres Raumluftvolumen über wärmerer Bodenzonen) ist gerade deswegen möglich, weil in diesem wärmeren Raumteil nicht die Luft wärmer ist, sondern die Flächenränder stärker strahlen (Wärmestrahlung kann Luft ja nicht „heizen“) und weil zur

Verteilung der Wärme neben dem Warmluftauftrieb an der Wandoberfläche keinerlei Luftbewegung im Raum hervorgerufen wird.

Es unterbleibt der Kühleffekt, der bei der Dauerkonvektion von Luft-, Heizkörper- und Bankheizung ständig wirksam ist. Dieser Kühleffekt tritt auch bei der Fußbodenheizung auf, die meist als reine Strahlungsheizung mißverstanden wird. Dabei wird übersehen, daß sie zwangsläufig Konvektion erzeugt, da ihre große, den gesamten Boden einnehmende Heizfläche unter der Raumluftmasse angeordnet ist: Alle paar Minuten ruft diese Anordnung eine nicht kontinuierliche „Stoßkonvektion“ hervor, da sich die unterste Luftschicht durch Wärmeleitung soweit aufheizt, daß sie die Raumluftmasse zusammen mit dem Bodestaub von der Raummitte aus umwälzen kann. Nur dieser unerwünschte Vorgang führt der frostberührten Außenwand – ebenso unkontinuierlich – Wärme zu, da die erwünschte Strahlungswärme ja nur der dem Strahler parallelen Fläche zu gute kommt, also der Decke (die wiederum nur den Schultern und der Schädeldecke parallel ist, während die übrige Körperfläche zu den Wandflächen gerichtet ist). Diese Tatsachen machen deutlich, daß besucherfreundliche Raumverhältnisse in Museen und Kirchen ohne Kompromisse im konservatorischen Bereich nur durch „Strahlungsheizung“ herstellbar sind, also nur wenn der Stand (!) der Technik verlassen wird.

1.3 WANDSOCKELBEHEIZUNG UND LUFTWECHSELKONTROLLE SCHAFFEN EIN „UNIVERSAL-KLIMA“

Eine dritte Erkenntnis findet in Fachkreisen zunehmend Anklang: Bei kontinuierlich wirkender „Wandheizung“ in Verbindung mit der Kontrolle von Luftwechsel und Tages-/Kunstlichtwärme entsteht ein „Universal-Klima“, das für fast alle in musealen Sammlungen vorkommenden Materialien geeignet ist, da es auf eine für alle Materialarten gleichermaßen wichtige Größe dämpfend einwirkt: Auf die Geschwindigkeit, mit der sich die Klimawerte ändern. Es wird nicht nur der konservatorischen Grundforderung gerecht. Vielmehr läßt sich auf dieser Basis auch der wissenschaftliche Anspruch befriedigen, die Aussagekraft eines Ausstellungskonzeptes durch unbegrenzte Materialkombination in einem Raum zu optimieren. Es entfällt also der Anlaß zur Ausbildung unterschiedlicher Klimazonen, die nicht nur das museale Konzept einschränken, sondern auch kosten-trächtige Baumaßnahmen und eine aufwendige Klimatisierungskonzeption verursachen. Dies gilt gleichermaßen für die Räume der Schausammlung, wie für das Depot. Damit entfällt aber nicht nur der entsprechende Aufwand, sondern ein Schadenspotential, das durch drei Faktoren verschärft wird: Durch den Mangel der Raumlufttechnik an Funktionssicherheit, durch die Gebäudestruktur (Treppenhäuser, Galerien etc.) und durch das unkalkulierbare „Lüftungsverhalten“ von Besuchern und Personal. Ein solches Universal-Klima hat wegen seines bereits angesprochenen Hauptkriteriums, der Freiheit von Kurzzeit-Schwankungen, Gültigkeit für alle Materialarten mit Ausnahme von fotografischem Material, das zumindest im Depot nur bei geringer Temperatur und Luftfeuchte, z. B. im Kühlschrank, aufbewahrt werden sollte. So ist selbst die Glaskorrosion weniger von der Höhe der relativen Luftfeuchte bestimmt, als von deren Kurzzeit-Schwankung. Ähnliches gilt auch für Bodenfunde mit ihren starken Bodensalzeinlagerungen.

2. „ICOM-RICHTLINIEN“

Bereits 1983 im Pilotprojekt Stadtmuseum Starnberg waren die Beobachtungen des Klimas in temperierten Räumen für die Landesstelle Anlaß, die Anforderungen an das Raumklima in Abweichung von der allgemeinen Anschauung neu zu definieren, insbesondere abweichend von den sog. ICOM-Richtlinien. Tatsächlich entpuppen sich diese bei näherem Hinsehen als Phantom, wie Holmberg 1995, in seiner weltweit angelegten Literaturstudie zur relativen Luftfeuchte, herausfand[3]. Der Internationale Museumsrat (ICOM) veröffentlichte 1960 eine Liste von Klimawerten, die sich aus der Befragung von Archiven, Bibliotheken,

Museen und einzelnen Fachleuten, insgesamt 37 Stellen, ergab. Bei der Auseinandersetzung mit dieser Quelle stellte Holmberg fest:

- Die Angaben beruhen *nicht* auf ausreichender *Forschung*.
- Aus der Liste geht nicht hervor, ob die Werte in den Institutionen *eingehalten* oder nur als *wünschenswert* angesehen wurden.
- Mehr als die Hälfte der Befragten empfahlen erhebliche *saisonale Schwankungsbreiten* (von bis zu 14 Grad und 20%).

Trotzdem bildete sich in der Folgezeit in Museumskreisen weltweit die Meinung, daß die Werte „18°C konstant und 50% +/- 5%“ – die lediglich die Mittelwerte der Liste darstellen – eine Empfehlung von ICOM seien. Bis in die 90er Jahre galt dieser enge Rahmen als ideale Vorgabe für die Planung von Klimaanlage, trotz der daraus direkt folgenden hohen Investitionskosten und unbesehen der Region und der Gebäudekonstruktion (s. Kap. 3.1).

Wie in Kapitel 1.1 schon ausgeführt, sind dagegen die aus der Empirie abgeleiteten Kriterien für die Klimaplanung nicht nur konservatorisch und physiologisch, sondern auch ökonomisch vorteilhaft, da ihre Beachtung erhebliche Einsparungen in der Beheizung bzw. Klimatisierung und der Sanierung von Gebäuden ermöglicht. Gerade in Zeiten knapper Haushaltsmittel haben sie daher nicht nur für die Bestandssanierung und die Baudenkmalpflege, sondern auch für den musealen Sektor besonderes Gewicht. So finden sich Hinweise darauf seit den späten 1980er Jahren nicht nur zunehmend in der Fachliteratur, sondern, 35 Jahre nach der ICOM-Befragung, auch in Holmbergs Studie. Sie bildete den ersten schwedischen Beitrag zum PREVENT-Projekt, das neben den Vorteilen der „Natürlichen Lüftung“ und den Mängeln der Verfahren zur Klimamessung die Wirkungsweise der Temperierung zum Gegenstand hatte.

3. ALLTAGSTAUGLICHE KLIMA-KRITERIEN

Durch das PREVENT-Projekt bestätigte sich die Erfahrung der Landesstelle, daß folgende Klima-Kriterien relevant sind:

- Die *Gebäudehülle* hat eine *Basisfunktion*.
- Das „*gleitende Raumklima*“ muß Planungsvorgabe für die Heiz- und Klimatechnik sein.
- Die sog. „*internationalen Standardklimawerte*“ können *nicht allgemeingültig sein*, da sie weder die regionalen und saisonalen Besonderheiten des Standorts, noch die Gebäudekonstruktion und die Art der Beheizung bzw. Klimatisierung berücksichtigen.

Da jeder Ausstellungsraum außerhalb der Öffnungszeiten Depotfunktion hat, wird in der folgenden Erörterung der Kriterien zunächst nicht zwischen Sammlungs- und Depotraum unterschieden.

3.1 BASISFUNKTION DER GEBÄUDEHÜLLE

Weltweit wurden in den letzten 20 Jahren Objekt- und Bauschäden durch spektakuläre Klimaeinbrüche und Kondensation beobachtet, insbesondere wenn, unter Inkaufnahme hoher Jahresenergiekosten, die engen Grenzen der „ICOM-Richtlinien“ angestrebt wurden, die bei Betrachtung der saisonalen Unterschiede des Außenklimas unsinnig erscheinen müssen. Dies gilt nicht nur für Altbauten mit schwerem Mauerwerk, die eine Klimaanlage erhielten (Beispiele: Sempgalerie Dresden, wo sich die Schäden nach der Eröffnung zeigten oder Alte Pinakothek München, wo die Taupunktsicherheit der Nordwand der Obergeschoß-Kabinette nicht durch die Klimaanlage, sondern durch „Sockeltemperierung“ durch ein vor der Eröffnung noch im Sockelputz installiertes elektrisches Heizkabel gewährleistet wird).

Gerade in Gebäuden, in denen die „moderne“ Bauweise und die Klimatisierung mittels reiner Raumlufttechnik zusammentrafen, traten die Mängel häufig wider Erwarten auf (Beispiele: Alter „Neubau“ des Germanischen Nationalmuseums Nürnberg oder Kunstbau des Lenbachhauses München, beide mit winterlichem Dauerkondensat an den Glaswänden, oder Neubau des Kunsthauses

Bern, wo im Winter an den Leichtbau-Außenwänden Kondensat und maximale Luftfeuchten an Bildern auftraten, während im Sommer, wie in Leichtbauten zwangsläufig, hohe Energiekosten für Kühlung anfielen. Letzteres ist grundsätzlich in den Obergeschossen moderner Museumsbauten zu beobachten, soweit die Glasflächen in den Dachkonstruktionen nur innere Beschattungsvorrichtungen aufweisen). Als Folge dieser Erfahrungen setzt sich in der Museumswelt allmählich die Erkenntnis durch, daß dem Gebäude, insbesondere seiner Hülle, d.h. seinen Außenbauteilen, bei der Klimatisierung eine Basisfunktion zukommt.

Damit nämlich eine sinnvolle Klimatechnik mit volkswirtschaftlich vertretbaren Investitions- und Jahresenergiekosten konzipiert werden kann, müssen zunächst die Änderungen von Außenklima und Energiefluß der Solarstrahlung gedämpft werden, was durch eine „fugendichte“ Gebäudehülle mit schwererer Außenwandkonstruktion und Außenbeschattung der Glasflächen in Verbindung mit kontrolliertem Luftwechsel immer schon geleistet wurde. Zugleich muß die – meist als Teil der „inneren Kühllast“ hingenommene – Heizwirkung des Kunstlichtes durch Auswahl und Montageart der Lichtquellen verringert und verzögert werden.

Wird z. B. jegliche feste Verbindung von Leuchten mit Bauteilen vermieden, so bleibt die Pufferwirkung der inneren Speichermassen erhalten, da ihre unnötige Aufheizung – durch die Wärmeabgabe der Leuchten selbst in Form von Wärmeleitung im Leuchtensockel und Kurzdistanz-Wärmeabstrahlung der Leuchtenrückseite – entfällt. Hierbei spielt auch die Entfernung der Installationsebene der Beleuchtung von der Objektebene eine bedeutende Rolle: Sie sollte nicht nur von ästhetisch/architektonischen Gesichtspunkten bestimmt werden, sondern vom simplen physikalischen Sachverhalt, daß die am Objekt wirksame Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung der Lichtquelle abnimmt. Bei hohen Räumen ist daher die Montage der Beleuchtung in der Deckenebene gleichbedeutend mit dem Bedarf an hoher Leistung der Leuchtmittel, woraus neben vermeidbarem Energiebedarf eine viel höhere Heizleistung des Kunstlichts folgt. Die Hauptaufgabe der Klimatechnik sollte aber in der Aufbereitung der Frischluft bei Anwesenheit von Personen liegen, nicht aber, wie dies in der Regel der Fall ist, darin, die mangelnde Pufferwirkung von Gebäudehülle und Innenbauteilen für äußere und innere Energieflüsse zu kompensieren. Die Technik soll vielmehr die Einwirkung der Energieflüsse auf das Raumklima weiter verringern, nachdem deren Wirkung bereits ohne Energieeinsatz durch die Bausubstanz gedämpft bzw. durch sinnvolle Lichttechnik begrenzt ist.

3.2 GLEITENDES RAUMKLIMA ALS PLANUNGSZIEL

Wie die Erfahrung zeigt, erwächst die konservatorische Qualität eines erzeugten Raumklimas, entgegen der in Kapitel 2. geschilderten allgemeinen Anschauung, gerade nicht aus dem starren Einhalten von Klimawerten im Raum gegen die sich ständig ändernden natürlichen und nutzungsbedingten Einflüsse, mittels leistungsfähiger Geräte, deren Leistung durch Regelung ebenfalls ständig wechselt. Die Qualität entsteht vielmehr aus dem Gleiten der Werte entsprechend der durch Gebäudemasse und bewußt unterdimensionierte Klimatechnik gedämpften Änderungen der äußeren und inneren Energieflüsse.

3.2.1 KONSERVATORISCHES ZIEL: GLEITENDE ÄNDERUNG DER GLEICHGEWICHTSFEUCHTE

Direkte Folge eines solchen alternativen Klimakonzeptes ist ein langsam mit den äußeren jahres- und tageszeitlichen Mittelwerten gleitendes Raumklima. Der wesentliche konservatorische Vorteil dieses „dynamischen Raumklimas“ liegt darin, daß im Jahresverlauf, insbesondere im Winter und Hochsommer, sowohl das Temperatur-, als auch das Dampfdruckgefälle zwischen Raum und Außenbereich geringer sind als beim konventionellen Konzept mit dem „statischen Raumklima“ als Ziel. Dies hat entscheidenden Einfluß auf eine konservatorische Schlüsselgröße, die für fast alle Materialien von Bedeutung ist, die „Gleichgewichtsfeuchte“, d.h. die Poren- bzw. Faserfeuchte des Materials, die von der

relativen Luftfeuchte abhängig ist und sich mit dieser ständig ändert („im Gleichgewicht steht“). Beim dynamischen Konzept kann sie sich diesem unvermeidbaren, aber verlangsamtsten Vorgang so anpassen, daß keine Materialspannungen entstehen. Im Gegensatz dazu werden beim statischen Konzept, durch Ausfall oder Regelfehler der Einrichtung zur Luftfeuchteregulierung, solche Spannungen immer wieder hervorgerufen, so daß langfristig irreversible Materialdeformation eintritt. Bei gleitendem Raumklima dagegen ist es über weite Strecken des Jahres gänzlich unnötig, durch Luftbe- oder -entfeuchtung in diesen natürlichen Vorgang einzugreifen, wodurch sich die Abhängigkeit des Raumklimas von Apparaten und deren Wartung drastisch verringert. Neben den Investitionskosten sinken daher der Energiebedarf und das konservatorisch/bauphysikalische Risiko sowie die Gefahr von Regelungsfehlern und von Kondensation. Schließlich entfällt auch die physiologische Beeinträchtigung durch Zugerscheinungen und ständige Manipulation der Atmungsluft.

3.2.1.1 GLEICHGEWICHTSFEUCHTE UND MATERIALTEMPERATUR

Die Gleichgewichtsfeuchte ist aber auch von der *Materialtemperatur* abhängig, da die hygroskopische Feuchteaufnahme im wesentlichen über den Wasserstoffbrückeneffekt (s. Kap. 4.3.1) abläuft. Dieser kann durch leichte Materialtemperaturerhöhung ausgeschaltet werden, wie es bei Wandtemperierung (Strahlungsheizung) schonend geschieht. Die Erfahrung zeigt, daß dieser Zusammenhang auch für salzbelastete Bauteile gilt, da deren besondere Neigung zur Feuchteaufnahme auf demselben Phänomen beruht. Allgemein wird jedoch angenommen, daß „die Temperatur“ keinen Einfluß auf die Hygroskopizität von Salzen habe.

3.2.2 KONSERVATORISCH SINNVOLLE SCHWANKUNGSBREITE DES RAUMKLIMAS

Das wichtigste konservatorische Ziel ist also nicht die Vermeidung, sondern die Verlangsamung der Änderung der Gleichgewichtsfeuchte. Um dies ohne größeren Aufwand zu erreichen, müssen die großen saisonalen Unterschiede des Wasserdampfgehaltes der Außenluft, der absoluten Außenfeuchte (Abb. 7) der Planung zu Grunde gelegt werden. Diese entstehen dadurch, daß die absolute Feuchte direkt von der mittleren Außentemperatur abhängig ist. Im Jahresablauf sollten daher nicht nur aus ökonomischen, sondern gerade auch aus konservatorischen Gründen größere Änderungen von Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte gleitend zugelassen werden. In Häusern ohne höherwertige klimatechnische Ausstattung und ohne technisches Personal können ohne konservatorische Nachteile bei der Temperatur z. B. mehr als 15 Grad, bei der relativen Feuchte bis zu 30 % als Jahresschwankung zugelassen werden, wenn sichergestellt ist, daß die Änderungen nur gleitend erfolgen können:

- Raumtemperaturen zwischen z. B. 10 – 12°C bei extremem Frost und 26°C bei extremer Sonneneinstrahlung,
- Werte der rel. Luftfeuchte zwischen 38% bei Frost (wenn bei Raumtemperaturen über 12°C der Befeuchtungsaufwand minimiert werden soll) und 65% bei Sommerhitze in erdberührten Räumen, in Gebäuden mit Schwerstbauhülle oder in Exponatgebäuden von Freilichtmuseen (wenn die Entfeuchtung nicht durch Geräte, sondern durch minimale Raumtemperierung erfolgt).

Wegen der periodischen Einwirkung von Tages- und Kunstlicht sollten auch im Tagesablauf gleitende Änderungen zugelassen werden, jedoch in wesentlich kleinerem Maßstab als im Jahresverlauf (z. B. 4 Grad und 8%), wobei ihre Größenordnung in besonderem Maße von der Basisfunktion des Gebäudes bestimmt wird. Nur so sind technisch bedingte Kurzzeitschwankungen vermeidbar, die inzwischen als wesentliche Schadensursache im Museum erkannt sind – neben völlig inakzeptablen Großschwankungen, die auch in vollklimatisierten Räumen immer wieder auftreten, und zwar durch Ausfall von Aggregaten oder Fehlreaktion von Regelkomponenten. Im Hinblick auf die Problematik der Gleichgewichtsfeuchte dürfen Änderungen des Raumklimas nur gleitend erfolgen, wobei

die Werte möglichst selten um mehr als 0,5 Grad und 2% pro Stunde schwanken sollten. Gerade diese Vorgabe engster stündlicher Schwankungsgrenzen, die konservatorisch entscheidend ist, konnte in Projekten mit Wandschalenheizung eingehalten werden, die mit einfachsten Mitteln optimiert wurden, während die Fachwelt annimmt, daß dies nur mit raumluftechnischen Anlagen möglich ist.

3.2.3 GLEITENDES RAUMKLIMA ALS PLANUNGSZIEL

Diese konservatorisch, bauphysikalisch, energetisch und physiologisch gleichermaßen günstige Gesamtwirkung kann nur erreicht werden, wenn die gleitende Veränderung des Raumklimas als Planungsziel festgeschrieben wird und somit die entscheidende Vorgabe für die baulichen, licht- und klimatechnischen Planungen wird. Auf Klimaanlage bezogen bedeutet dies, daß die zu bewegenden Luftmengen erheblich geringer sind, wenn nicht nur die Aufgaben der Raumheizung und Raumkühlung entfallen (Wand- statt Luftheizung im Winter, bauliche und kunstlichttechnische Begrenzung des Temperaturanstiegs im Sommer), sondern die Anlage nur noch die Frischluftmenge aufzubereiten hat, die zur Lüftererneuerung bei Personenbelegung zu fördern ist. Da bei derart verbesserten Raumbedingungen die Stoffwechselwärmeabgabe weitgehend über die Atmung erfolgt (die eingeatmete Luft ist ja deutlich kälter als die Lunge), entfällt neben der Verstärkung der Hautdurchblutung meist auch der Einsatz der Schweißdrüsen zur Hautkühlung, beides bei beheizter Luft unverzichtbar, um nicht nur die Stoffwechselwärme, sondern auch die über die Atmung aufgenommene Wärme an der Haut abgeben zu können. Unter diesen Bedingungen kann die Frischluftmenge verringert werden (Basis 1 bis max. 5 m³ pro Person und Stunde, wozu meist eine Luftwechselrate von max. 1 Raumvolumen pro Stunde genügt). Die Folge ist, daß wesentlich geringere Kapazitäten an Luftbe- und -entfeuchtung, Kühlung und Lufterneuerung ausreichen.

Im alternativen Konzept folgt die Lösung dieser Aufgabe bei gegebener baulicher und lichttechnischer Optimierung direkt aus dem gleitenden Betrieb der Sockelheizrohre und einer von der Belegung abhängigen Raumbelüftung, z. B. durch den Einsatz von Kleinlüftern bzw. von Teilklimaanlagen kleiner Leistung (s. Kap. 6.2.1: Luftbe- und -entfeuchtung).

4. KEINE INTERNATIONAL GÜLTIGEN STANDARD-KLIMAWERTE MÖGLICH

Die einfache Anschauung sagt bereits, daß es keine international gültigen Klimawerte geben kann: Zum Einen sind bereits in den verschiedenen Regionen eines Landes die Unterschiede des Außenklimas erheblich, da sich nicht nur die saisonalen Mittelwerte, sondern auch die Extremwerte und die Änderungsgeschwindigkeit der regionalen Außentemperatur und der davon wesentlich abhängigen absoluten Außenluftfeuchte stark unterscheiden. Diese Unterschiede werden weiter verstärkt von anderen Faktoren wie Breitengrad, Größe der Wasserflächen, Grad der Bewaldung. Im Folgenden soll nun der große Einfluß auf Raumklima und Bauphysik genauer dargestellt werden, der ausgeht von den grundlegenden physikalischen Unterschieden der beiden Arten der *Wärmeverteilung* – der Verteilung „auf dem Weg über die Raumlufthülle im freien Raum“ („Luft“-Heizung wie Heizkörperheizung, Luftheizung und Klimaanlage, aber auch Fußbodenheizung) gegenüber der Verteilung „an der Außenwandoberfläche über Auftrieb mit der Folge großflächiger Abstrahlung geringer Wärmemengen“ (Strahlungsheizung wie Sockelleistenheizung, Temperierung; nicht Wandheizung mit Registerflächen).

4.1 BAUTEILFEUCHTE UND ART DER WÄRMEVERTEILUNG

Während sich die Museums-Fachwelt bis heute auf *Thomson* beruft mit ihrer Forderung nach ganzjähriger Einhaltung einer relativen Luftfeuchte von mindestens 50%, warnte dieser bereits 1986 – angesichts von Bau-, Ausstattungs- und Exponatschäden in Gebäuden mit neuen raumluftechnischen Anlagen – davor, im Winter in kälteren Regionen derartig hohe rel. Raumlufthüllen anzustreben,

weil bei tiefen Außentemperaturen Kondensationsgefahr entsteht an Außenwänden, Dachkonstruktionen und Gegenständen, die sich in deren Nähe befinden[4]. Es fehlt bei ihm jedoch noch jeder Hinweis darauf, daß die eigentliche Schadensursache die mangelhafte Wärmeverteilung der konventionellen Heiz- und Lüftungstechnik ist, die im Winter zu einem Temperaturdefizit der inneren Oberfläche der Gebäudehülle (d. h. der Innenseiten der Außenbauteile) gegenüber der Raumluft führt. Die konservatorische wie ökonomische Relevanz dieser Abhängigkeit wird deutlich, wenn man realisiert, daß die Kondensation bei alternativer Beheizung (Temperierung der Hüllflächen) aus physikalischen Gründen ausgeschlossen ist, während sie bei konventioneller Klimatisierung geradezu provoziert wird. Dies gilt generell für „Luft“-Heizung mit Befeuchtung, wie Heizkörperheizung mit Luftbefeuchtern, Voll-Klimaanlage und für Kirchen empfohlene Luftheizung mit Befeuchtung.

Ursache für die Kondensatgefahr ist, daß konventionelle Heizsysteme und raumluftechnische Anlagen primär auf die Erhöhung der Raumlufttemperatur abzielen und nur eine sekundäre, eher zufällige thermische Wirkung an den raumseitigen Flächen der Gebäudehülle erreichen. Sie stellen nämlich nicht wie Sockelheizrohre oder Sockelheizleisten einen Warmluftauftrieb an den Wandsockeln bereit, der dank der Thermik ausschließlich die Bauteiloberfläche bestreicht und deren gesamte Fläche versorgt. Vielmehr ist die Arbeitsluft (!) bei Heizkörperheizung wie bei Klimaanlage nach dem Passieren der Austrittsöffnungen fortan ungeführt und unterliegt somit der freien Raum- bzw. gar der Gebäudethermik. Sie erreicht daher die Oberflächen der Außenbauteile nur zufällig, vor allem deren oberen Bereich, weniger die mittleren und unteren Wandteile und die Raumaußenecken. Wegen des Kaltluftabfalls am Fenster werden auch die Fensterleibungen und Stürze nur ungenügend versorgt.

Im Folgenden wird erläutert, warum das Kondensationsproblem in der Heizperiode in Regionen mit kalten Wintern noch verschärft wird, wenn zur Forderung „min. 50% rF“ bei gleicher Heiztechnik der Wunsch nach höherer Mindest-Raumtemperatur (z. B. 18°C) bei tiefster Außentemperatur kommt.

4.2 RELATIVE LUFTFEUCHTE UND ART DER WÄRMEVERTEILUNG

Es ist kaum bekannt ist, daß „Luft“-Heizung einen zusätzlichen Befeuchtungsbedarf im Vergleich zur Strahlungsheizung hervorruft. Bereits im *geschlossenen Raum* mit dichten Fugen, also bei gleich bleibender absoluter Feuchte, wird in der Heizperiode allein dadurch, daß die Raumluft erwärmt wird, um die Auskühlung der Außenbauteile zu verhindern, ein Abfall der rF hervorgerufen (den man mit geringerer Aufheizung mildern könnte!). Dabei ist die Raumlufttemperatur (zumindest in der oberen Raumhälfte) wesentlich höher als „im Sommer“, im unbeheizten Raum. Im *genutzten* Gebäude – mit Baufugen und ständig benutzten Öffnungen – ist daher unter gleichen Bedingungen auch der Luftwechsel wesentlich höher als im Sommer. Da an den Fugen und Öffnungen aber nicht nur eine ständige Wasserdampfverdrängung durch Austritt von Warmluft mit dem darin enthaltenen Wasserdampf stattfindet, sondern die Wasserdampfmenge in der nachströmenden Außenluft saisonbedingt gering ist, fällt die Absenkung der rF wesentlich höher aus als bei gleicher Heiztechnik im ungenutzten, fugendichten Raum bzw. bei der ohne Luftaufheizung wirksamen Strahlungsheizung. Bei fallender Außentemperatur wird die Wasserdampfverdrängung durch „Luft“-Heizung immer stärker, da die Heizleistung und damit die Lufttemperatur weiter ansteigen muß, während die absolute Außenluftfeuchte immer geringer wird.

Bei „Luft“-Heizung ist der Bedarf an künstlich erzeugtem Wasserdampf also wesentlich höher als bei Strahlungsheizung, wenn eine gewählte rel. Luftfeuchte aufrechterhalten werden soll. Bei entsprechender Luftbefeuchtung wird der Luftwechsel aber weiter erhöht, da das Dampfdruckgefälle nach außen ansteigt. Welche Bedeutung die Höhe der geforderten Raumtemperatur für den Befeuch-

tungsbedarf hat, wird deutlich beim Vergleich der absoluten Feuchten: So entspricht dem Wertepaar 18°C und 55% rel. Luftfeuchte 7,1 g Wasser pro kg Luft, während es bei 18°C und 40% nur 5,2 g sind. Würden während der kurzen Phasen mit tiefster Außentemperatur 16°C zugelassen, so wären es bei 40% nur 4,5 g. Geht man von 0,8 g äußerer Absolutfeuchte aus (entsprechend z. B. -15°C und 90%), müßten durch Luftbefeuchtung im ersteren Fall 6,3 g, im zweiten 4,4 g, im letzteren jedoch nur 3,7 g künstlich erzeugter Wasserdampf pro kg Luft bereitgestellt werden. Bei Strahlungsheizung wäre nun nicht nur bei gegebener Raumtemperatur der Befeuchtungsbedarf geringer als bei „Luft“-Heizung, sondern eine Raumtemperatur von 16°C bei tiefster Außentemperatur wäre für den Besucher durchaus akzeptabel, da die „empfundene“ Temperatur höher läge.

4.3 U-WERT (K-WERT) UND BAUTEILFEUCHTE

Sieht man von Gebäuden ab, deren Außenwände in sog. Passivbauweise erstellt sind (z. B. 40 cm Dämmstoff zwischen zwei Schalungen), so folgt aus Kap. 4.1, daß „Luft“-Heizungen generell für Bauwerke in Mauerwerks-, Fachwerk- und Metall-Glaskonstruktion ungeeignet sind, somit also nicht nur für Bestand und Baudenkmal, sondern auch für Neubauten dieser Art: Diese Heizungsart kann eine ausreichende Temperierung der Gebäudehülle nur dann gewährleisten, wenn sie große Luftmengen kontinuierlich bewegt und diese frei im Raum zirkulierende Heizluft eine deutlich höhere Temperatur als die angestrebte Bauteil-Oberflächentemperatur hat. Entsprechend groß sind bereits die konservatorischen und physiologischen Belastungen. In der Regel aber verhindert die nur sporadische, oft ästhetisch bedingte Heizkörperanordnung jede Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung, so daß die Temperatur der Hüllflächen in der Heizperiode an vielen Stellen über längere Zeit unter der mittleren Raumlufttemperatur liegt. Das gilt nicht nur für die Bauteiloberfläche selbst, sondern für die ihr nahen Ausstattungsschichten und Objekte. Die Konsequenz für diese Stellen ist Feuchtaufnahme aus der Raumluft, obwohl der in Raummitte oder an der Innenwand gemessene Wert der rF nicht hoch ist. Dies ist nicht nur konservatorisch nachteilig, sondern bedingt auch einen höheren Heizwärmebedarf, da der von der Porenfeuchte abhängige U-Wert verschlechtert wird.

4.3.1 KAPILLARKONDENSAT UND WASSERSTOFFBRÜCKE

Warum die bei „Luft“-Heizung unzureichend erwärmten Stellen (an denen sich Raumluft abkühlt) bereits bei normalfeuchtem Raumklima Feuchte aus der Raumluft aufnehmen, liegt an der *Kapillarkondensation* [5], [6], die bereits bei nur geringem Temperaturdefizit der Außenbauteil-Oberfläche gegenüber der Raumlufttemperatur beginnt. Schimmelbildung ist ein untrügliches Zeichen davon (s. Ranacher zum „Kalte-Wand-Problem“). Dieser unsichtbare ständige Niederschlag in feinen Fugen und Materialporen (Poren-Durchmesser im Nanometer-Bereich, d. h. im Milliardstel-Meter-Bereich) beruht auf der starken *Adhäsionsneigung* der Wassermoleküle (Durchmesser 0,3 nm) in sehr feinen Hohlräumen auf Grund der dipol-artigen Molekülform (die auch die Ursache der starken *Kohäsion* in der Flüssigkeitsphase ist): Während die symmetrisch gebauten Moleküle der anderen Gase, die zusammen mit Wasserdampf das Gasgemisch „Luft“ bilden, nur minimale Anziehungskräfte ausüben (Van-der-Waals-Kräfte), bilden die unsymmetrischen „polaren“ Wassergasmoleküle („Wasserdampf“) die wesentlich stärkeren *Wasserstoffbrücken* aus (Abb. 8), z. B. zu OH-Gruppen der Cellulose (Leinwand, Holz) oder zu Sauerstoffatomen bzw. OH-Gruppen an der „inneren Oberfläche“ mineralischer Stoffe (an den Kapillarwänden von Mauerwerk und Putz). Darauf beruht auch das Hysteresephänomen (s. Kotterer), das Messung wie Regulierung der rel. Luftfeuchte problematisch macht, da Feuchtaufnahme- und -abgabevorgänge bei hygroskopischem Material nicht analog ablaufen können. Bei einem Feuchteanstieg der Umgebungsluft wird mehr

Feuchte aufgenommen, als bei einem Feuchteabfall gleichen Ausmaßes abgegeben wird.

4.3.2 SCHADSALZINAKTIVIERUNG

In diesem Zusammenhang muß man auch die verstärkte Feuchteaufnahme von Bauteilen neu betrachten, in deren Porenraum lösliche Salze vorkommen. Im Normalfall ist dies in Kellern und nichtunterkellerten Erdgeschossen mit unisolierter, historischer Bausubstanz der Fall. In solchen Räumen liegen in der warmen Jahreszeit mit ihrer hohen absoluten Außenluftfeuchte zu geringe Oberflächentemperaturen an den Raumseiten der Wände vor, die – wie auch das Vorkommen der Schadsalze in den Poren – durch die direkte Erdberührung verursacht sind. Aus Abb. 7 kann man dieses Temperaturdefizit der Raumhüllflächen als ausreichende Ursache für die während dieser Zeit stets hohe rel. Luftfeuchte solcher Räume erkennen, ohne daß man eine Feuchteverdunstung aus dem Porenraum annehmen muß. In herkömmlichen Sanierungskonzepten werden die Faktoren dieses komplexen Sachverhalts einzeln betrachtet, so daß gewöhnlich keine dauerhaften, geschweige denn preisgünstigen Lösungen des Problemkreises erreicht werden.

Allein aus der bisherigen Darlegung der physikalischen Hintergründe (4.1ff) ist aber bereits ableitbar, daß der kleinste gemeinsame Nenner der Einzelphänomene die Herstellung einer saisonal sinnvollen Oberflächentemperatur der Raumhüllflächen ist. Eine molekular-physikalische Feinbetrachtung, bei der die Temperatur als Maß der Wärmeschwingung der Moleküle gesehen wird (Abb. 2), läßt folgende Schlüsse zu:

- Die temperierte Wandoberfläche erlaubt keine Kapillarkondensation mehr. Weder an den Porenwänden, noch an den Salzionen werden durch Wassermoleküle aus der Raumluft neue Wasserstoffbrücken gebildet.
- Von der gesamten Wandinnenseite geht ein geringes kontinuierliches Wärmegefälle nach außen aus. Dadurch kommt es zu einer allmählichen nach außen gerichteten Verdrängung von Porenwasser.
- Hinter dem zurückweichenden Porenwasser können sich nur fadenförmige Salzmoleküle in den Porenraum hinein bilden (Verarmungs-Kristallisation). Eine Belastung der Phasengrenze zur Raumluft (z. B. der Oberfläche einer Wandmalerei) ist nicht möglich.
- Es ist nicht erforderlich, eine hohe rel. Luftfeuchte *in Wandnähe* aufrechtzuerhalten, um die Salzionen in Lösung zu halten. Es ist fraglich, wie dieser häufig gegebene Ratschlag bezahlbar und technisch sicher realisiert werden soll, ohne im gesamten Raum den gleichen Wert zuzulassen. Damit wäre die Raumnutzung jedoch unnötig eingeschränkt.

Selbst ein Raum mit Wandmalerei auf salzbelastetem Mauerwerk kann bei „thermischer Sanierung“ durch Temperierung also eine physiologisch zuträgliche Temperatur und eine mittlere rF haben. In Verbindung mit einer Minimallüftung bei Anwesenheit von Personen ist er daher auch für Veranstaltungen nutzbar. Dies zeigt die Erfahrung, nach der in solchen Räumen nach Temperierung und Ersatz des losen Putzes durch Normalputz, auf beiden Wandseiten eine weitere Schadensbildung durch die im Porenraum „unverändert“ vorliegenden Salze ausgeschaltet war. Die bei „Luft“-Heizung oder plötzlicher Absenkung der rF (z. B. durch einen Luftentfeuchter) auftretende oberflächliche Salzkristallisation mit der Folge der Farbablätterung kann also nicht als Beweis gelten für die so oft von Experten geäußerte Annahme, daß bei salzbelastetem Mauerwerk jede Raumbeheizung schädlich sei. In *beiden* Fällen wird die Verdunstung von Porenfeuchte in die Raumluft angeregt, da die Raumluft entfeuchtet wird (zur „Luft“-Heizung s. 4.2). Die Annahme belegt also lediglich, daß es neben der geschilderten praktischen Erfahrung keine Forschung zum Verhalten von löslichen Salzen im Wärmegefälle eines belasteten Bauteils gibt.

4.3.3 KAPILLARTAUPUNKT UND MOLLIER-H,X-DIAGRAMM

Kapillaren mit einem Durchmesser um 5 nm füllen sich bereits ab einer rF von 75% durch Kapillarkondensation mit Wasser. Dieser Vorgang würde bei einem Raumklima von 20°C und 55% rF bereits bei einer Oberflächentemperatur einer Außenwand von 15,5°C einsetzen. Mithilfe des Mollier-h, x-Diagramms (Abb. 7) läßt sich dies voraussagen. Man bestimmt durch Aufsuchen des Schnittpunkts der Raumklimawerte die momentane Wasserdampfmenge der Raumluft (absolute Feuchte, ablesbar auf der oberen Waagerechten in Gramm pro kg trockene Luft). Von hier aus fährt man auf der entsprechenden Linie der Absolutfeuchte zur 75%-Kurve und liest von dem neuen Schnittpunkt aus links die Temperatur ab. Dieser eigentlich für Werkstoffe mit hohem Anteil an Feinkapillaren geltende „Kapillartaupunkt“ scheint für den Alltag vorteilhaft, obwohl Stoffe mit hohem Anteil an größeren Poren bei gleichem Temperaturdefizit zur Raumlufttemperatur weniger Wassermoleküle aus der Raumluft aufnehmen. So beträgt der „praktische Feuchtegehalt“, der unter normalen Wohnbedingungen in der Heizperiode (bei Luftheizung) eintretende volumenbezogene Feuchtegehalt, bei Ziegel und Kalkputz z. B. 1,5%, bei Kalkzementputz 3%, bei Gasbeton 3,5% und bei Beton 5%. Das Verbesserungspotential ist erheblich, wenn man bedenkt, daß die Leitfähigkeit um 7 – 10% pro Volumenprozent Bauteilfeuchte steigt. Dies gilt besonders für Baustoffe mit sehr hohem Feinporengehalt wie Beton, da sie eine wesentlich höhere Gleichgewichtsfeuchte haben als Stoffe mit überwiegend größeren Poren, z. B. Ziegel. So kann aus Beton das gesamte sorptiv gebundene Porenwasser durch Dauerbeheizung eines Bauteils im Winter vertrieben werden, wodurch nicht 5 Volumenprozent, sondern bis zu 10 Gewichtsprozent an Wasser entfernt werden könnten. Diese Annahme wird durch die Betrachtung von Thermografien der Außenseiten temperierter Betonwände gestützt (s. 6.3.7.2). Da das Verhalten des Wasserdampfmoleküls in Feinstrukturen und Kapillaren so stark abweicht von dem im freien Raum, spricht man auch vom *Nanoklima*, das letztlich die Bauteilfeuchte bestimmt, im Gegensatz zum üblichen Ausgangspunkt der Betrachtung, dem Raumklima.

Sichtbare Kondensation entsteht erst, wenn die Temperatur der Bauteiloberfläche wesentlich unter der Lufttemperatur liegt. In o. a. Beispiel läge der „Taupunkt“ bei 10,5°C. Bei Klimamessungen ist also nicht die Ermittlung der Taupunkttemperatur (der Temperatur, bei der 100% rF erreicht werden), sondern des Kapillartaupunktes wichtig, da dieser angibt, welche Temperatur der Wand und des wandnahen Materials nicht unterschritten werden darf, damit in Feinstrukturen keine unsichtbare Feuchteaufnahme stattfindet. Näherungsweise sucht man dazu in Abb. 7, wie oben beschrieben, die Temperatur auf, bei der bei gegebener absoluter Raumluftfeuchte 75% rF eintreten.

4.3.4 FEHLEINSCHÄTZUNG DER ÖRTLICHEN GLEICHGEWICHTSFEUCHTE IM WINTER

Wenn diese Zusammenhänge bereits im nicht-klimatisierten Raum mit stärkerer Personennutzung (Büro, Wohnung) gelten, muß dies im „konventionell“ klimatisierten Museum noch stärker der Fall sein. Da jedoch bei der bauphysikalischen Bewertung eines Raumklimas in der Regel nur der Taupunkt betrachtet wird, nicht aber der Kapillartaupunkt, wird das Schadenspotential für die Bausubstanz wird nur selten richtig eingeschätzt. So werden feuchtebedingte Schadensfälle wie Schimmelbildung in Fensterleibungen und Außenwandecken, Schwammausbildung an Balkenköpfen in Mauerlöchern, Rahmenschäden an Fenstern usw. häufig auf äußere Einflüsse („Wetter“) zurückgeführt statt auf das winterliche Dauer-Kapillarkondensat, das bei „Luft“-Heizung an den Raumseiten der betroffenen Bauteile möglich ist. An diesen Stellen entspricht die tatsächliche Materialfeuchte eben nicht der Gleichgewichtsfeuchte, die sich bei der in Raummitte gemessenen rel. Luftfeuchte ergeben würde, sondern der, die sich aus der höheren örtlichen Luftfeuchte ergibt, die aus dem Temperaturdefizit des Bauteils gegenüber der Raumluft resultiert.

4.3.5 FEHLEINSCHÄTZUNG DES EINFLUSSES DER MATERIALFEUCHTE AUF DIE WÄRMEVERLUSTE

Auch die Erhöhung der Wärmeverluste durch höheren Wärmedurchgang in Bauteilen, die ausgerechnet in der Heizperiode feucht sind, wird kaum offen diskutiert. Stattdessen gilt für den Feuchteschutz im Hochbau der energetisch unhaltbare DIN-Lehrsatz: „Die in der Sorptionsphase (Winter) von einem Bauteil aufgenommene Wasserdampfmenge muß in der Desorptionsphase (Sommer) wieder abgegeben werden können“. Und die Schlüsselgröße der Wärmebedarfsberechnung, der U-Wert, gilt unabhängig von der Art der Wärmeverteilung als Konstante, obwohl er vom „praktischen Feuchtegehalt“ des Bauteils abhängt. Da dieser bei „passiven“ Bauteilen, d. h. solchen, die kälter als die Raumluft sind, von der relativen Feuchte der wandnahen Luft abhängt, wird er in der Heizperiode durch Luftheizung verschlechtert, durch „Wand“-Heizung dagegen verbessert – im Vergleich zu dem im Sommer, ohne Heizbedarf, hinnehmbaren Wert!

So wird die in der Physik der Wärmeabgabe der Wandheizung begründete Senkung des Wärmebedarfs gleich zweimal „weg gerechnet“: Weder der Vorteil der wesentlich geringeren Raumlufttemperatur, also die vom Nutzerverhalten unabhängige Senkung des Lüftungswärmebedarfs, noch die Senkung des Transmissionwärmebedarfs, durch Zwangstrocknung der Außenwand und Ausschluß der Wiederbefeuchtung, kommen rechnerisch zum Tragen. Im Vergleich ergeben sich bei DIN-gemäßer Berechnung der Wandheizung daher wesentlich höhere Installationskosten als bei konventionellen Systemen, nicht nur weil wesentlich mehr Rohrlänge als erforderlich errechnet wird (Register statt max. zwei Schleifen), sondern weil auf der Rohwand eine Wärmedämmschicht gefordert wird, obwohl mit Betriebsbeginn die Wandtrocknung einsetzt. Die Wandheizung scheidet daher meist schon im Vorfeld der haustechnischen Planung aus, obwohl jeder „Anwender von DIN-Normen“ vom Herausgeber, dem Deutschen Institut für Normung e.V. (s. Kap. 9), um Mitteilung gebeten wird, wenn er auf „eine Möglichkeit einer unrichtigen Auslegung stößt“, die z. B. zur Überdimensionierung einer technischen Anlage oder zu einer überflüssigen Maßnahme führt (s. Kap. 6.3.7).

Der kleinste gemeinsame Nenner der angesprochenen Mängel findet sich, wie dargelegt, in der Temperatur der Wandoberfläche: Wird dem in der Raumluft enthaltenen Wasserdampfmolekül an den äußeren (sichtbaren) und inneren (unsichtbaren) Materialoberflächen keine Energie entzogen („Wandtemperatur gleich Lufttemperatur“), ist also an einer Wandoberfläche die Wärmeschwingung der Materialmoleküle (deren Maß die Temperatur ist) ausreichend stark, so wird die Bildung von Wasserstoffbrücken verhindert, d. h. bereits das Kapillarkondensat ausgeschlossen. Dies ist im Sommer in Massivbauten gewährleistet durch die in der Gebäudehülle gespeicherte Wärme, die an der Raumseite der Außenbauteile auch nachts eine ausreichend hohe Wärmeschwingung der Moleküle aufrecht erhält. Dieser Zustand muß in der Heizperiode vom eingesetzten Heizsystem beibehalten werden. Wandheizsysteme, die die gesamte Raumseite der Außenbauteile bedienen – wie es die Hypokausten-Wandheizung (Abb. 4 und 5) bereits vor 2000 Jahren tat – leisten also allein durch ihr physikalisches Prinzip Feuchte- und Wärmeschutz zugleich. Hinzuzufügen bleibt, daß die Wasserstoffbrückenbildung auch für die aufsteigende Bodenfeuchte (in erdberührten Wandsockeln ohne Horizontalsperre) der „Motor“ ist. Daher ist auch sie durch ein geringes Wärmegefälle in den betroffenen Bauteilen durch Sockeltemperierung auf einfachste und für den Raum vorteilhafte Weise auszuschalten.

5. KLIMAVORGABEN AUS DER PRAXIS

Nach den Langzeitbeobachtungen der Landesstelle, die durch die Fachliteratur zunehmend bestätigt werden, können unter den Prämissen optimierte Gebäudehülle (mit dichten Bau- und Öffnungsfugen, außenbeschatteten Transparentflächen und temperierten Außenbauteilen) und kontrollierte Bedarfslüftung (Luftwechsel nur bei Anwesenheit von Personen und entsprechend ihrer Zahl) Vorgaben für die Klimaplanung gemacht werden, die auch in Museen ohne Fachperso-

nal dem Alltagsbetrieb standhalten. In den folgenden beiden Absätzen werden sie formuliert mit der Zielrichtung „Einhaltung der konservatorischen Anforderungen bei möglichst geringem Bedarf an Energie und minimiertem Apparateinsatz“.

5.1 RÄUME OHNE LÄNGEREN PERSONENAUFENTHALT

Als Vorgabe für Depots ohne längeren Personenaufenthalt, für die im Winter geschlossenen Exponatgebäude in Freilichtmuseen und für Museen ohne Winterbetrieb gilt, daß die Raumtemperaturen im Jahresverlauf zwischen dem Gefrierpunkt und 26°C und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 70% gleiten können. Da die örtliche relative Luftfeuchte von der örtlichen Materialtemperatur abhängig ist, kann die genannte Obergrenze jedoch nur für „wandgeheizte“ Räume gelten, in denen an keiner Stelle die (in Raummitte gemessene) Raumtemperatur unterschritten, der Feuchtwert also nirgendwo überschritten wird. Im Hinblick auf bereits vorhandenen Schimmel und Rost sollte auch in solchen Räumen die obere Feuchtegrenze möglichst selten erreicht werden und nicht über mehrere Wochen vorliegen. Während der überwiegenden Zeit mit höherer absoluter Außenfeuchte (Sommer) sollten durch leichte Temperierung 65% unterschritten werden. Durch diese Maßnahme allein wird bereits die Neubildung von Schimmel und das Wachstum vorhandenen Pilzbefalls verhindert und Rostbildung stark verlangsamt. Diese Sommertemperierung ist in der Regel nur in erdberührten Räumen und in Erdgeschossen von Bauwerken mit Scherstmauerwerk erforderlich, wo auch aus physiologischer Sicht im Sommer ein Wärmebedarf besteht. Bei Bodenfunden aus Eisen gilt die Feuchteobergrenze nur für vollentsalzte Exponate, während bei Restchlorgehalten auch bei minimalen Luftfeuchtwerten noch Korrosion beobachtet wurde.

5.2 RÄUME MIT STÄNDIGEM PERSONENAUFENTHALT

Als Vorgabe für Depots mit Arbeitsplätzen, die nicht vom Depotraum abgetrennt werden können, und für das „normale“ gering frequentierte Museum mit Winterbetrieb gilt abgesehen von der Feuchteuntergrenze von 40% rF, daß bei tiefsten Außentemperaturen aus physiologischen Gründen 15°C nur selten unterschritten werden sollten. Bei „Wandheizung“ wären derartige Raumtemperaturen für den im Raum sich bewegenden Menschen gut erträglich, da die ruhende Luft durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabgabe der Körperoberfläche verringert, ferner vom Sockel, dem „Heizkörper“, eine starke Wärmestrahlung ausgeht. Die empfundene Temperatur liegt also über der Raumtemperatur. Werden in Frostphasen Temperaturen unter 15°C zugelassen, kann die Feuchteuntergrenze mit minimalem Befeuchtereinsatz noch gehalten werden.

Bei nutzungsbedingt höherem Luftwechsel (stärker frequentiertes Museum mit höherer Temperaturuntergrenze) tritt bei Frost, wie bei jeder Art der Raumbeheizung, auch bei „Wandheizung“ ein länger andauernder Befeuchtungsbedarf ein, jedoch auf wesentlich niedrigerem Niveau als bei „Luftheizung“. Für große Häuser, die über Wartungspersonal für Luftbefeuchter oder über Klimaanlage verfügen, sollte zur Minimierung des Aufwands und zur Minderung der Energiekosten 16°C als Untergrenze zugelassen werden. Die oben erwähnten Feuchtegrenzen im Jahresverlauf gelten mit den angegebenen Einschränkungen auch hier.

Diese Vorgaben erlauben den Verzicht auf energieintensiv intensive Luftentfeuchtung und reduzieren weitestgehend den Bedarf an Luftbefeuchtung. Die im Sommer gültige obere Temperaturgrenze (26°C) sollte möglichst selten erreicht oder gar überschritten werden. Dies sollte jedoch nicht durch ebenfalls energieintensiv intensive Kühlung angestrebt werden, sondern apparateunabhängig durch Verbesserung der Pufferwirkung der Gebäudehülle einschließlich außenliegender Beschattung der Glasflächen und durch Reduzierung der Abwärme des Kunstlichts (Anschlußleistung von max. 15 Watt pro qm Grundfläche). Werden diese Vorgaben in Verbindung mit der im Folgenden näher beschriebenen minimalen

Klimatechnik umgesetzt, so kann auch die geringe Kurzzeit-Schwankungsbreite (max. $0,5^{\circ}\text{C}$ und 2% pro Stunde) unter Alltagsbedingungen eingehalten werden. Dies zeigte eindrücklich die Meßstudie im Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg, die im Rahmen des PREVENT-Projektes durchgeführt wurde. Dieses erste größere Gemäldemuseum mit Temperieranlage ist mit Außenbeschattung und gering dimensionierter Teilklimaanlage (max. einfacher Luftwechsel, nur Be-, keine Entfeuchtung, keine Kühlung) ausgestattet. Auch im Würzburger Kulturspeicher mit seinem tagsüber zusammenhängen Luftvolumen von ca. 40.000 m^3 , das ähnlich ausgestattet ist, bestätigten Messungen dieses Klimakonzept.

6. MINIMALE KLIMA- UND HEIZTECHNIK

Unter der Prämisse der zur Gebäudehülle gemachten Vorgaben (s. Kap. 3.1) in Verbindung mit Wandheiztechnik kann sich die klimatechnische Ausstattung in der Regel auf drei im Folgenden beschriebene einfache Einheiten beschränken, wobei dies nicht nur für Depoträume, sondern gleichermaßen für Museumsbauten mit geringer bis mittlerer Besucherfrequenz gilt. Die Ausführungen zum Thema Raumbeheizung beziehen sich auch auf nicht museal genutzte Gebäude, wie Wohn- oder Bürobauten.

6.1 LICHTSCHUTZ

Die Frage des Lichtschutzes soll hier nur in ihren drei Kernpunkten gestreift werden: Im Museum, besonders aber im Depot muß die größtmögliche Absenkung der Jahreslichtmenge angestrebt werden, vor allem für Objekte aus organischem Material. Mit zwei einfachen Maßnahmen kann dies erreicht werden, nämlich durch völligen Tageslichtausschluß außerhalb der Nutzungszeiten und durch Beschränkung der Beleuchtungsstärke während der Nutzungszeit auf Werte unter 300 Lux (unterhalb von 2,5 m Höhe). Dabei soll das von den Lichtquellen ausgehende Licht einen möglichst geringen Anteil an kurzwelliger Strahlung haben, insbesondere an UV-Strahlung. Bei einer vorhandenen Beleuchtung mit zu hohem UV-Anteil ist dies bereits dadurch gegeben, daß nur reflektiertes Licht in der Objektebene zugelassen wird. Schließlich sollte die Wärmeabgabe von Kunst- und Tageslicht so gering wie möglich gehalten werden. Einfache Maßnahmen dazu wurden bereits im Kapitel 3.1 angesprochen. Zu ergänzen bleibt, daß eine zu große Raumluftaufheizung durch das Kunstlicht dadurch vermieden wird, daß die Anschlußleistung 15 W/m^3 nicht überschreitet. Die zwei erwähnten größeren Gemäldemuseen zeigen, daß bei geringem Anteil an Tageslicht sogar unter dieser Obergrenze eine gute Ausleuchtung erreicht wird. Der Kulturspeicher Würzburg hat eine max. Anschlußleistung von 15 W/m^2 , das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg eine von 12 W/m^2 !

6.2 LÜFTUNG

Die Lüftung kann je nach Gebäudegröße durch einen oder mehrere Abluftventilatoren geringer Maximalleistung erfolgen, deren Aufgabe die Herstellung eines Minimalluftwechsels zwischen 0,1 und 1 Raumvolumen pro Stunde ist, montiert z. B. in Kamin, Decke zum Dach oder Fenster, in Betrieb nur „bei Bedarf“, d. h. bei Anwesenheit von Personen, reguliert durch den Nutzer mittels Drehzahlsteller unter Beobachtung der sich unter diesen Umständen nur langsam ändernden relativen Luftfeuchte. Die Nachströmung der für diesen geringen Luftwechsel erforderlichen Außenluftmenge kann durch Fugen von Fenstern und Türen erfolgen. Die Stellen für Ventilator und Nachströmung müssen sich gegenüber liegen, so daß eine „Spülung“ des gesamten Raumes bzw. einer Raumfolge möglich ist. Fenster im Nahbereich des Ventilators müssen daher abgedichtet werden. Ferner sollten die Eintrittsfugen mit Blick auf eine möglichst geringe Staub- und Luftschadstoffbelastung der Raumluft angeordnet werden. Sog. Luftbrunnen (Erdkanäle mit geschützter Lufteintrittsöffnung), die ohne jeden Energieeinsatz im Winter eine Vorwärmung und leichte Befeuchtung der Außenluft, im Sommer

eine Kühlung und Entfeuchtung bewirken, sind aus Museumsbauten des 19. Jahrhunderts bekannt (s. Beitrag Käferhaus).

Ist die Dämpfung der Außenklimaschwankungen durch die Gebäudehülle Bestandteil des Klimakonzeptes, wird die Lüftung nur zu Zeiten in Dauerbetrieb gehalten, in denen mit Hilfe der Temperierung z. B. nach Baumaßnahmen Baufeuchte abgeführt oder die zu hohe Materialfeuchte eines frisch geborgenen Bestandes normalisiert werden soll. Später kann der Einsatz der Lüftung auf den reinen personenbedingten Bedarf beschränkt werden, d. h. auf die Zeiten der Anwesenheit von Personen und auf den dann vorliegenden tatsächlichen Bedarf (bei Strahlungsklima liegt der Frischluftbedarf bei leichter Tätigkeit nicht höher als ca. 1 m^3 pro Person und Stunde, nicht wie meist vorgegeben bei $20 \text{ m}^3/\text{h}$). Bei solch geringen Frischluftmengen kann eine für geringere Personenzahlen noch ausreichende Lufterneuerung stattfinden, ohne daß plötzliche Veränderungen der relativen Raumluftfeuchte provoziert werden. Werden im Hochsommer bei höchster Außentemperatur Raumtemperaturen von bis zu 26°C akzeptiert (moderne Vorgabe für Vollklimaanlagen im nicht-musealen Bereich), kann bei optimierter Gebäudehülle auf Kühlung verzichtet werden. Die Erfahrung zeigt, daß bei Beschränkung der Luftwechselrate auf max. 1 Raumvolumen pro Stunde die Lüftung im Sommer zur natürlichen Kühlung während der Nachtstunden eingesetzt werden kann, ohne daß Kurzzeitschwankungen auftreten. Die Aussagen zu den Betriebszeiten der Lüftung gelten für alle Gebäudearten bzw. Nutzungsweisen, also auch für Bauten mit Lüftungsanlagen, wenn die Gebäudehülle entsprechend Kapitel 3.1 optimiert ist und die Heizaufgabe durch Wandheiztechnik erfüllt wird. Anlagen zur Behandlung der Frischluft, die Filterung und klimatische Konditionierung ermöglichen, sind erst in Häusern mit großer Besucherzahl erforderlich, wenn Luftwechselraten ab 2 V/h geleistet werden müssen.

6.2.1 LUFTBE- UND -ENTFEUCHTUNG

Als zweite Einheit der bei Strahlungsklima möglichen „minimalen Klimatechnik“ ist in Häusern ohne Lüftungsanlage eine geringe Kapazität zur Luftbefeuchtung bereitzustellen in Form eines bzw. weniger Luftbefeuchter. Diese sollten nach dem Verdunstungsprinzip arbeiten, weil dadurch das Gefährdungspotential geringer ist: Im Gegensatz zu anderen Verfahren droht bei Ausfall der Regelung kein Überschreiten der Feuchteobergrenze. Da der Befeuchtungsbedarf in der Heizperiode bei Wandheizung durch das Vermeiden der Luftaufheizung grundsätzlich geringer ist als bei anderen Arten der Wärmeverteilung (s. Kap. 4.2), genügen bei regelmäßiger Reinigung einfache Geräte geringer Leistung, insbesondere wenn die Wasserdampfverluste weiter verringert werden durch sorgfältiges Aufspüren und Abdichten der Baufugen. Die Geräte sollten daher deutlich unterdimensioniert beschafft oder – wenn bereits vorhanden – bei kleiner Förderleistung betrieben werden, nicht nur wegen des geringen Bedarfs, sondern damit durch lange Laufzeiten weniger Regelintervalle auftreten.

In temperierten Gebäuden wird in Zeiten hoher absoluter Außenfeuchte (Sommer) die Temperatur kritischer Gebäudeteile wie Keller oder Erdgeschoß durch die „Sommer-Temperierung“ den unkritischen Obergeschossen angeglichen, die der mittleren Außentemperatur durch Akkumulation der Solarstrahlung, also „ohne Beheizung“, folgen. Damit wird die Temperatur im Gesamtgebäude der mittleren absoluten Außenluftfeuchte angepaßt, so daß Geräte zur Luftentfeuchtung nirgendwo benötigt werden. Dies gilt unter der Prämisse, daß mit dem Tagesablauf gleitende Klimaveränderungen konservatorisch unbedenklich sind, auch für Häuser mit hoher Personenbelegung, da bereits der bedarfsabhängige Betrieb einer Minimallüftung (Basis: Bei Belegung 1 m^3 Frischluft pro Person und Stunde) die durch Wasserdampfabgabe der Menschen mögliche Überschreitung der Luftfeuchte-Obergrenze verhindern kann.

6.3 RAUMBEHEIZUNG

Die dritte Einheit der „minimalen Klimatechnik“ bildet die Raumbeheizung durch Sockeltemperierung. Die in diesem Beitrag diskutierten Minimalformen können jedoch nur dann entstehen, wenn das Gewerk Heizung konstruktiv verknüpft wird mit den Gewerken Rohbau, Putzen, Bodenlegen, Innenausbau und Fassadenbau. Gerade dies aber deckt in fast jedem Projekt anfangs Vorurteile und Mißverständnisse von Architekten, Planern und Handwerkern auf, die ständig neu hervorgerufen werden, weil in der Ausbildung wie in der Produktinformation eine ganzheitliche Vernetzung von „Wärme“, „Feuchte“ und „Material“ nicht erfolgt. So sind nicht nur die Stellungnahmen von Einzelgewerksnehmern, sondern auch die von Gutachtern oft von physikalisch unbegründetem Sicherheitsdenken geprägt, das generell eine der Hauptursachen der Kostenexplosion im Bauwesen darstellt. Leider wagen Vertreter von Baubehörden nur selten, die „Bedenkenflut“ durch Nutzung von empirisch entstandenem Alternativwissen einzudämmen, obwohl dadurch eine spürbare Entlastung der öffentlichen Haushalte im Bausektor erreicht würde.

6.3.1 ZIEL DER TEMPERIERUNG: DIE TEMPERATUR DER WANDOBERFLÄCHE, NICHT DIE DER RAUMLUFT

Zunächst muß nochmals betont werden, daß das Ziel der Temperierung die Herstellung einer günstigen Oberflächentemperatur der Außenwände ist. Im Lehrbuch dagegen wird für alle Arten von Heiztechnik als Ziel des Heizens die „Erhöhung der Raumlufttemperatur“ angegebenen, obwohl alle Nachteile konventioneller Heizverfahren daraus folgen. Für die Verfahren, die die Raumluftmasse direkt als Heizmedium einsetzen, wie die Heizkörperheizung oder die Vollklimaanlage, kaschiert die Lehrbuchaussage den Tatbestand, daß die Temperatur der Raumluft zumindest im oberen Teil des Raumes stets deutlich über derjenigen Temperatur der Wandoberfläche liegt, die durch luftheizende Verfahren überhaupt erreicht werden kann. Die Lufttemperaturerhöhung ist also nicht ein sinnvolles, gewähltes Ziel, sondern physikalische Folge eines falschen Wärmeverteilungsprinzips.

Die Erfahrung zeigt nun, daß für das alternative Ziel „Temperierung der Wandoberfläche“ keine Heizrohrregister, „Hypokausten“-Wandschalen oder Sockelkonvektoren erforderlich sind. Im Regelfall wird, meist unter Putz, an jedem Außenwandsockel je eine Heizrohrschleife befestigt, d.h. ein Vor- und ein Rücklaufrohr übereinander (Durchmesser 15 bis 22 mm, je nach Wandlänge, Abstand 25 – 40 mm, entsprechend der lichten Weite, die sich aus dem Paßstück am Schleifenende, dem Fitting, ergibt), an den Trennwandsockeln beidseitig je ein Einzelrohr, das in Außenwandnähe durch eine Bohrung auf die andere Wandseite geführt wird und daher mehrere Trennwände beidseitig abfährt (Abb. 6). Durch den Heizbetrieb werden warme Materialstreifen an den Wandsockeln erzeugt, von denen – wie von einer sonnenbeschienenen Wandoberfläche – ein wandgebundener Warmluftauftrieb (Coanda-Effekt) gebildet wird. Camuffo [7] wies nach, daß senkrechte Raumhüllflächen bereits bei einem Temperaturunterschied zur Raumluft von 0,1 – 1,0°C einen Einfluß auf die wandnahe Grenzschicht der Luft ausüben (Bildung von feinen Auf- oder Abtriebsströmungen).

Dieser thermisch aktive Streifen am Wandsockel entsteht durch den Wärmestau, den eine solche Heizrohrschleife (Höhe 7 bis 9 cm, je nach Rohrdurchmesser) im schlecht (!) wärmeleitfähigen mineralischen Material der Rohrumbgebung hervorruft. Bereits bei geringeren Vorlauftemperaturen erfolgt durch geringfügige Temperaturerhöhung im Sockelmaterial die Trockenlegung nicht-unterkellierter Wände. Die geringe Wärmeabstrahlung der Rohrebene und der minimale, dem Kaltluftabfall an der Wandfläche entgegenwirkende Auftrieb bewirken schon eine spürbare Temperierung des Raumes, die für Kirchenräume oder als Lager genutzte Keller meist schon ausreicht. Beim Ziel „Raumbeheizung“ ist die Höhe der Raumtemperatur direkt abhängig von der Stärke des Warmluftauftriebs, der von der Oberflächentemperatur der Putzschicht vor den

Rohren bestimmt wird. Ein für Raumtemperaturen über 18°C erforderlicher, stärkerer Auftrieb (der auch hinter der Möblierung wirksam ist, wenn 2 cm Wandabstand eingehalten werden) entsteht bei einer einzelnen Rohrschleife am Wandsockel mit einer höheren Vorlauftemperatur (Mauerwerk um 30 cm benötigt bei stärkerem Frost dann mittlere Rohrtemperaturen von ca. 60°C, stärkeres Mauerwerk unter 55°C) oder bei je einer Schleife an Sockel und Brüstung mit einem maximalen Vorlauf von 55°C (bei starkem Mauerwerk unter 50°C).

Die Montage der Rohre kann auf oder unter Putz erfolgen. Im Aufputzfall entsteht der auftriebserzeugende Materialstreifen durch die hohe Temperatur der wandberührend montierten, angestrichenen (!) Rohroberflächen und die geringere Temperatur des dahinter liegenden Putzstreifens, im Unterputzfall dagegen durch die fast gleichmäßig um bis zu 20 Grad unter der Rohrtemperatur liegende Temperatur des Putzstreifens, der die eingeputzten Rohre abdeckt (Abb. 9). Die wichtigsten Regeln lauten: Das endgültige Ziel einer ausreichend hohen Wärmeabstrahlung der gesamten Wandfläche tritt nur ein, wenn alle Faktoren zusammenwirken:

Unterputzmontage:

- geringstmögliche Putzüberdeckung (15 +/- 5 mm) oder Steinriemchen entsprechender Stärke (kein Holz als Abdeckung: Oberkante Holzfußleiste unter Unterkante des ersten Rohres!)
- sorgfältiges Einmörteln der Rohre zur Vermeidung von Hohlräumen.

Aufputzverlegung:

- guten Wandkontakt herstellen
- Abstrahlung durch Anstrich optimieren.

Allgemein:

- kontinuierlicher Betrieb bei einer der Außentemperatur angemessenen Vorlauftemperatur
- an erdberührten Wänden im Sommer mindestens 30°C Vorlauftemperatur (Anhebung des Sockels der Heizkurve)
- Möblierung in 2 cm Abstand zur Wandoberfläche.

Abb. 9 zeigt eine Messung der Wärmeabstrahlung der Innenseite einer Wohnraum-Außenwand bei -10°C Außentemperatur und 20,5°C Raumtemperatur (Tisch in Raummitte). Die in 50-cm-Schritten mit dem Infrarot-Thermometer gemessenen Oberflächentemperaturen sind durch den Auftrieb entstanden, der am Wandsockel durch die Übertemperatur eines ca. 10 cm hohen Putzstreifens hervorgerufen wurde. Dessen in 1-cm-Schritten gemessene Oberflächentemperatur betrug im Mittel 40°C, als Folge einer mittleren Temperatur der 2 eingeputzten Heizrohre von 60°C (Vorlauf 63°C, Rücklauf 57°C). Die Stärke der Putzüberdeckung war mit mindestens 2 cm eher hoch. Bei 15 ± 5 mm wäre der Effekt bereits bei geringerer Wassertemperatur (z.B. bei 59/53°C), bei Betrieb einer zweiten Schleife in Brüstungshöhe gar bei 50/44°C erreicht worden. Die rasche Abnahme der Oberflächentemperatur oberhalb der Rohrebene beweist die *schlechte Wärmeleitfähigkeit* trockener mineralischer Baustoffe, deren U-Wert durch Entfernung der mit „praktischer Bauteilfeuchte“ bezeichneten hygroskopischen Feuchtigkeitsmenge verbessert wurde. Unterhalb eines waagerechten Rohres oder rechts und links von einem senkrechten Rohr nimmt die Oberflächentemperatur noch schneller ab, da in diesen Fällen der Auftrieb nicht wirksam ist. Dies zeigen auch Thermografien von Außenwandinnenseiten mit eingeputzten Temperierschleifen: Die Hochtemperaturfarben Weiß, Rot und Gelb beschränken sich auf den unmittelbaren Rohrnahbereich, dann folgt beidseits ein schmaler grüner Saum und die überwiegende Wandfläche zeigt die Farbe Blau für die Umgebungstemperatur (hier = Raumtemperatur).

6.3.2 ROHRMONTAGE, EINPUTZEN DER ROHRE

Aus der nun vorliegenden Langzeiterfahrung können für die Rohrmontage die folgenden Prinzipien formuliert werden. Zur Überwindung der oben angesprochenen Verständigungsschwierigkeiten gerade in diesem Bereich soll dies ausführlich geschehen.

1. Als **Rohrmaterial** wird sowohl auf wie unter Putz blankes Kupfer verwendet, da im Vergleich zu anderen Materialien die Wärmeübertragung wesentlich besser (s. Abb. 14) und die Wandstärke geringer ist. Dabei sind die Punkte 7 und 8 zu beachten. Die Nachteile der Kunststoffummantelung (Leistungsminderung, größere Schlitztiefe bzw. Putzstärke) können also vermieden werden. In Räumen mit normaler Grundfläche wird in der Regel Stangenmaterial verarbeitet (Länge bis 5 m). In Großräumen mit langen, ungegliederten Wandstrecken (Hallen, Kirchen etc.) sind bei Unterputzverlegung weiche Kupferrohre von der Rolle vorteilhaft. Bögen bis 90° sind mittels Biegezange herstellbar, so daß nur wenige Verbindungsstellen notwendig werden. Ausdehnungsbögen sind auch bei längeren Strecken nicht erforderlich, wenn schleifenweises Hochheizen bei noch feuchtem Putz vorgenommen wird (s. 10).
2. **Rohrverbindungen** werden mit Löt fittings ausgeführt, nicht mit Preß fittings, da diese starke Wülste haben. Zur Vermeidung von Rohrversprödung wird weich gelötet, wenn möglich mit der elektrischen Lötzange. Dabei entfällt jede Gefahr von Brand oder Rauchbildung, ein Vorteil, der besonders bei Nachrüstungen in ausgestatteten Räumen von Bedeutung ist. Die Verbindungsstellen werden nicht weiter behandelt (Korrosion s. 7).
3. Die **Rohrdurchmesser** betragen in der Regel 15 mm, bei größeren Wandlängen auch 18, in Großräumen wie Kirchen 22 mm.
4. Die **Dichtigkeitsprüfung** nach Fertigstellung der Anlage erfolgt zunächst mit Luftdruck, damit ohne Wasserablassen und bei trockenen Rohren nachgebessert werden kann. Nach 24 Stunden Druckhaltung (4 bar) wird die Anlage befüllt, auf Maximalleistung gebracht (min. 70°C Vorlauf) und diese über einige Stunden gehalten.
5. Bei **Aufputz-Montage** sind Halterungen erforderlich, z.B. Rohrhaken oder Blechschellen mit 1,5 mm Wandstärke (z.B. HILTI DFB 18), die soweit wie möglich Wandkontakt erzwingen, so daß die Wärme an die Putzstreifen hinter den Rohren weitgehend durch Wärmeleitung übertragen wird. Die Rohre müssen angestrichen werden (z.B. mit der Wandfarbe, der Farbton spielt keine Rolle). Dadurch steigt die Abgabe von Strahlungswärme um mehr als das Achtfache! Dies erhöht nicht nur die Abstrahlung in Richtung Raum, sondern auch in Richtung Wand, so daß die Putzstrecken ohne Rohrkontakt besser erwärmt werden. Dadurch wird auch der für die Flächentemperierung erforderliche Warmluftauftrieb verbessert, wovon letztlich die Raumtemperatur abhängt. Bei Rohren auf naturfarbenem Holz, z.B. an Fensterelementen oder auf Dachgebälk, kann Klarlack verwendet werden.
6. In der Regel geschieht die Montage **unter Putz**, mit einer Putzüberdeckung des Rohrscheitels von 15 +/- 5 mm, entweder in einem Wandschlitz (bei Rohrpaaren von 18 mm Ø: 8 cm hoch, 20 mm tief, bezogen auf die Rohrwand) oder ohne Schlitzung auf der Rohrwand, wenn eine Gesamtputzstärke von 25 mm möglich ist (Ausgleichsputz 18 – 20 mm, Feinputz 5 mm, bzw. bei 15 mm Ø: 15 – 17 mm plus 5 mm). Rohre auf der Rohrwand am Wandsockel können unter leicht nach unten auslaufender Putzergänzung verlegt werden.
7. **Korrosion** durch frischen Putz wird sowohl für das CU-Rohr als auch für das Weichlot durch handwarmen Betrieb der Rohre beim Einputzen ausgeschlossen. Im Normalbetrieb von Temperieranlagen findet auch in Betriebspausen keine Korrosion statt: Da Heizrohre im Gegensatz zu

Kaltwasserrohren kein Frischwasser führen und somit weder Sauerstoff, noch Bodensalze erneuert werden, kommt die minimale interne Anfangskorrosion bald zum Stillstand; Heizungswasser ist dann "totes" Wasser. Außerdem können Heizrohre im Gegensatz zu Kaltwasserrohren auch außerhalb des Heizbetriebes nicht unter die Wandtemperatur abkühlen. Am Deckputz entsteht also kein Kondensat, sondern es stellt sich eine normale Porenfeuchte ein, die weder am blanken Kupferrohr, noch am Lot Korrosion hervorruft. Rohre an erdberührten Bauteilen sind auch im Sommer in leichtem Betrieb. Da es Wochen dauert, bis nach Ausbleiben der Wärmezufuhr wieder eine hohe Bauteilfeuchte eingetreten ist, sind weder Stillstandszeiten wie bei Ausfall des Wärmerezeugers, noch eine Betriebspause im Hochsommer schädlich. In diesem Fall sollte das Erreichen von höheren Werten der rel. Luftfeuchte (über 65%) Anlaß sein, die Wärmezufuhr wieder einzuschalten.

8. Die **Rohrbefestigung** unter Putz erfolgt weitgehend ohne Rohhalter, da bei Beachtung von 9. und 10. keine Spannungen in den Rohrstrecken auftreten und der sich anformende Putz dann die Rohralterung optimal, auf ganzer Rohrlänge, übernimmt. Zur Montage werden die Heizrohre nur provisorisch fixiert mit schräg in Mauerfugen eingeschlagenen Stahlnägeln, die nach der Betriebsprobe (s. 4.) durch Putzbatzen ersetzt werden (s. Nr. 10). An einzelnen Stellen kann es notwendig sein, das Rohr an die Wandfläche zu ziehen. Bei Kupferrohren genügen dazu die Blechschellen (s. 5.). Eine Polsterung unterbleibt: a) bei sorgfältigem Einputzen unter Vermeidung von Hohlräumen entfällt die Schallbildung; b) da das Einputzen bei handwarmem Rohr geschieht, entfällt auch die bei Berührung verschiedener Metalle in feuchter Umgebung mögliche Kontaktkorrosion; c) auch die Beschädigung der Rohrwand durch Reibung beim Heizbetrieb entfällt, da wegen des Masseverbunds nur gleitende Temperaturänderungen erfolgen und die Längenänderungen erst an den Rohrbögen wirksam werden (s. 12.).
9. Auch an den **Rohrbögen** erfolgt keine Abpolsterung. Daher müssen die Angaben unter Punkt 10 eingehalten werden. Da die Montage bei kaltem Rohrzustand geschieht, müssen die Rohrbögen Abstand zu Bauteilen wie Raumecken, Fensterstürzen etc. haben, damit sie sich beim Heizbetrieb verlängern können ohne anzustoßen (bei gerader Rohrlänge bis 5 m genügt 1 cm, bis 20 m 2 cm Abstand, s. 12.).
10. Zum Ersatz der Nägel durch **Putzbatzen** läßt man die Leitungen auf „Handwärme“ abkühlen (Vorlauf unter 30°C). Dann wird neben jeden Nagel und an jedem Bogen ein Putzbatzen auf die Leitung gesetzt und auf dem Rohrscheitel abgezogen. Sofort danach, also wenn der Putz noch weich ist, wird jede Schleife einzeln durch Öffnen ihres Thermostatventils (s. 15.) kurzzeitig wieder hochgeheizt (auf min. 60°C), und zwar solange, bis ihr Rücklauf mit min. 45°C zurückkommt. Dadurch nimmt die Schleife annähernd ihre maximale Länge ein und drückt mit allen Bögen in den noch weichen Putz Hohlräume, in die die Rohrbögen beim späteren Heizbetrieb hinein gleiten. Nach dem Hochheizen wird wieder auf Minimalbetrieb geschaltet, um die Putzbatzen trocknen zu lassen. Danach werden die Nägel entfernt.
11. Das **Einputzen** der Rohre kann sofort danach geschehen, aber auch beliebig später. Putzrisse können nicht mehr auftreten, weder durch Längenänderung der Rohre (Hohlräume an den Rohrbögen), noch durch Temperaturänderungen (nur gleitende Änderungen möglich). Der Einsatz von Putzträgern unterbleibt daher. Das Einputzen geschieht wieder bei „Handwärme“ (unter 30°C). Wenn ein Raum fertig ist, kann man zur Sicherheit die Schleife(n) wieder hochfahren, muß sie jedoch nach spätestens 20 Minuten wieder auf unter 30°C abkühlen lassen. Während des Putztrocknens empfiehlt es sich, die Anlage im Minimalbetrieb

Abbildung 10 – 13:

Optimale Rohranordnung für geringere Wandstärken bzw. für Vorlauftemperaturen $<50^{\circ}\text{C}$ (vergleiche Abb. 6d). Bei dieser Anordnung genügt für Wohnräume ein Rohrdurchmesser von 15 mm, so daß bei Verwendung von Löt-Fittings die Wand nicht geschlitzt werden muß, sondern für die auf der Rohrwand verlegten Rohre eine Putzstärke von 20 mm ausreicht (s. Kap. 6.3.3). Zeichnungen Heiko Folkerts, Bernried

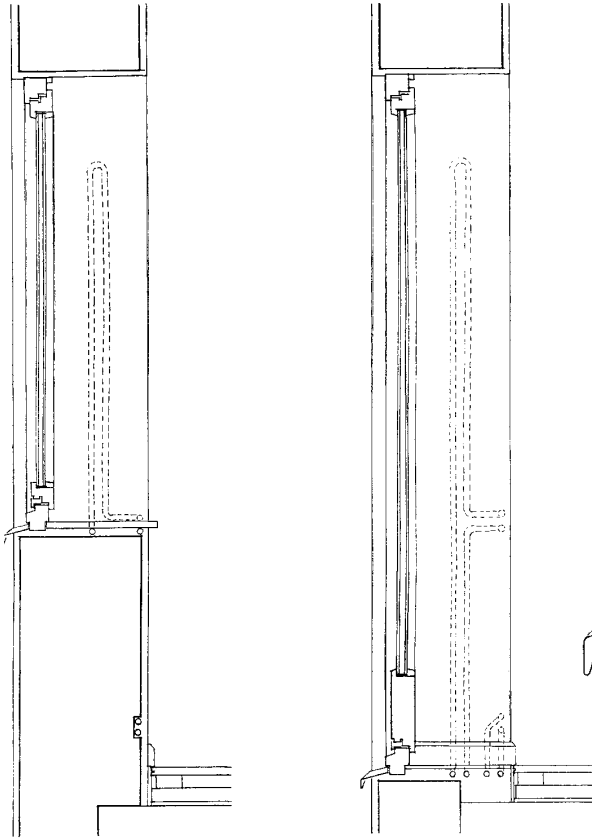


Abbildung 10:
Fenster- und Türachse (Schnitt) mit Sockel- und Brüstungsschleife unter Putz. M 1:20

Abbildung 11:
Fensterbank (Schnitt) mit Brüstungsschleife (Rücklaufumweg im Leibungsputz). M 1:5

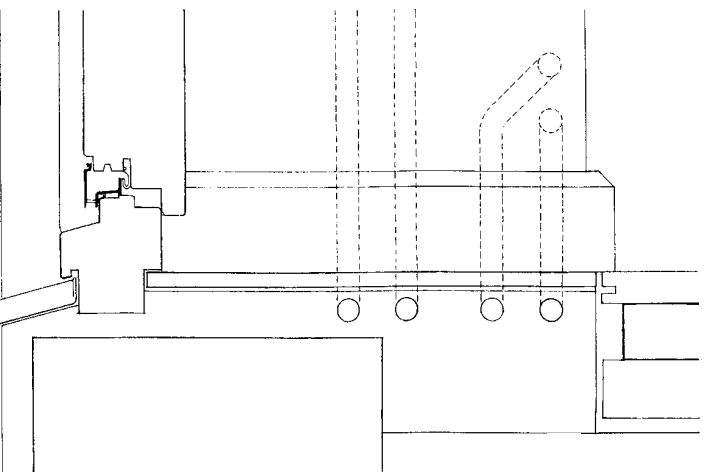
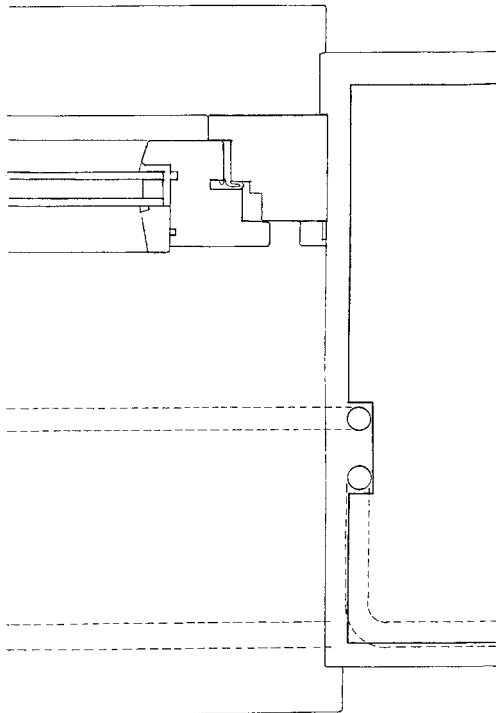
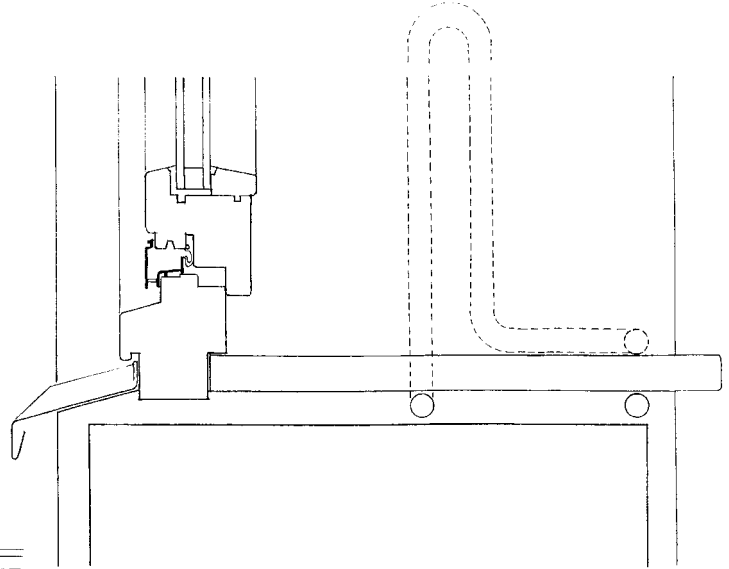


Abbildung 13:
Türschwelle (Schnitt) mit den Umwegen von Sockel- und Brüstungsschleife im Leibungsputz. Die Schleifen kreuzen die Schwelle unter Fliesenabdeckung. Wandstärke 40 cm, Stein-Fensterbank 25 mm stark; Dielenboden auf Kreuzlager. M 1:5

Abbildung 12:
Fensterbank (Draufsicht), darunter Brüstungsschleife in Materialkontakt (Rücklaufumweg im Leibungsputz geschnitten). M 1:5

- laufen zu lassen. Bei Sumpfkalk siehe Punkt 12. Alle **Angaben gelten auch für Rohre in Estrichen!** Auch hier treten dank der kurzen Aufheizzeiten und der wenigen Heizrohre pro Flächeneinheit keine Schäden auf.
12. Zum Einputzen kann jedes **Putzmaterial** verwendet werden, wenn Punkt 7 und 11 beachtet werden. Bei Sumpfkalk ist zur Karbonatisierung Feuchte im Putz erforderlich. Nach Schaffung der Hohlräume in den Putzbatzen (Normalputz) durch Hochheizen geschieht das Einputzen daher zwar bei Handwärme. Danach werden die Schleifen jedoch abgestellt. Putzrisse durch Rohrdehnung sind ausgeschlossen: Wegen des geringen Ausdehnungskoeffizienten (0,017 mm pro m und Grad) bleibt die Dickenänderung, wegen der geschaffenen Hohlräume auch die Längenänderung ohne Wirkung. Ferner laufen wegen des Massekontakts regelungsbedingte Temperaturänderungen durch den Speichereffekt nur langsam und im Bereich von weniger als 10 Grad ab. Aus diesen Gründen und wegen des Korrosionsschutzes durch die Rohrwärme ist zum Einputzen ein Spezialputz nicht erforderlich.
 13. Bezogen auf ein Einfamilienhaus ist die Anordnung von min. 2 **Steigsträngen** sinnvoll, die sich im Grundriß gegenüberliegen. Sie werden ohne Wärmedämmung (s. 14.) in den Wandschlitz einer Trennwand gelegt, dort wo diese in die Außenwand übergeht. Bei dünner Überputzung entstehen in diesen Raumecken angenehme Kachelofen-Effekte. Vom Heizungskeller aus werden die Zuleitungen entlang der beiden Seiten von Trennwandsockeln im angrenzenden Estrich ungedämmt verlegt. Dadurch sind diese Wandsöckel bereits trockengelegt. Ferner erlaubt diese Anordnung der Steigstränge kurze L-förmige Heizschleifen, so daß annähernd alle Räume einzeln versorgt werden können.
 14. Eine **Wärmedämmung** von Zuleitungen aus Kupfer ist (im Gegensatz zu Leitungen aus Eisen) nicht erforderlich, da der Dämm-Effekt auf physikalischem Weg eintritt: Im Estrich bzw. unter Putz, wo ungedämmte Eisenrohre in Betriebspausen nicht korrosionssicher wären, entsteht ein Wärmestau als Folge der geringen Leitfähigkeit mineralischen Materials. Bei freier Führung eines Kupferrohres in Luft (ohne Materialkontakt) tritt der Dämm-Effekt durch die geringe Wärmeabstrahlung des blanken Kupfers ein, während ein ungeschütztes Eisenrohr im Gegensatz zum Kupferrohr in Betriebspausen korrodieren und zunehmend mehr Wärme abstrahlen würde.
 15. Um die **Einzelraum-Regelung** zu ermöglichen, erhält jede Schleife ein Thermostat-Ventil. In die Schleifen von erdberührten Wänden werden Rücklauftemperaturbegrenzer eingebaut, stets am Ende der Schleife (im Raum, kurz vor dem Eintritt des Rücklaufs in die Steigleitung). Sie messen die Wassertemperatur des Rücklaufs. Damit ist das Energieangebot von der Wandtemperatur und nicht von der Raumtemperatur abhängig. Schleifen von außenluftberührten Wänden können auch mit einem Heizkörper-Thermostat („Raum-Fühler“) geregelt werden, der an beliebiger Stelle der Schleife gesetzt wird. In beiden Fällen werden Ventilunterteile in „Durchgangsform“ im Rohrverlauf montiert und mit eingeputzt. Die Kunststoffkappe bleibt bis zum Aushärten des Putzes auf dem Gewinde, auf dem später der Thermostatkopf aufgeschraubt wird. Dazu muß ein wenig Putz darum herum weg gestochen werden. Wenn die Dichtigkeitsprüfung sorgfältig – wie oben beschrieben – durchgeführt worden war, ist das Risiko, daß eine eingeputzte Schraubverbindung geöffnet werden muß, sehr gering.
 16. Um **Luft** in Heizschleifen während des Anlagenbetriebs zu verhindern, wird hinter der Therme ein Absorptions-Luftabscheider in den Hauptvorlauf gesetzt. Ferner erhalten die Steigleitungen an ihren oberen Enden je einen Handentlüfter. Da die Schleifen durch ihre Thermostaten einzeln absperrbar sind, benötigen sie keinen eigenen Entlüfter, auch

wenn im Rohrverlauf senkrechte Umwege wie Leibungsschleifen an Fenstern auftreten (s. 17. und 18.).

17. Um beim **Befüllen** die Luft aus den Schleifen zu entfernen, wird jede Schleife einzeln befüllt. Dazu werden die Ventile der anderen Schleifen geschlossen.
18. Tritt beim **späteren Betrieb** Luft in einer Schleife auf, werden zur Entlüftung die Nachbarventile geschlossen und die Luft mit der Vorlaufpumpe (bei Anlagen mit Verteilern mit einer Hilfspumpe am Verteiler) heraus gedrückt. Das Spülen mit Frischwasser ist abzulehnen, da dem „toten“ Anlagenwasser neue Luft und neue Salze zugeführt werden.

6.3.3 ROHRPOSITIONEN

In Abb. 6 sind die wichtigsten Varianten der Rohrführung abgebildet. Im Gegensatz zu handelsüblichen Wandheizungen, bei denen örtlich Rohrregister auf ganzer Wandhöhe ausgebildet werden, beschränken sich Installationen von Temperieranlagen dank der konsequenten Einbeziehung des Warmluftauftriebes in das Wärmeverteilungs-Konzept auf wenige Bereiche der Außenwandfläche: Im Minimalfall (kein Temperaturanspruch oder – bei stärkerem unporosierten Wandquerschnitt – auch im Wohnfall an den Wänden ohne Fenster) sind es die Wandsockel. Im Maximalfall (hoher Temperaturanspruch bzw. bei geringer Wandstärke) werden die Brüstungsebenen und evtl. auch die Öffnungskanten (Fenster- und Außentürleibungen) zusätzlich belegt. Auf diese Weise treten keine Leitungen in den für Montagen oder für die Bildhängung vorgesehenen Wandflächen auf. Wird die in Abb. 6 dargestellte Leitungsgeometrie verdoppelt (z. B. 1. Schleife am Sockel, 2. Schleife in Höhe der Unterkante der Fensterbank), können entweder bei gleicher Vorlauftemperatur höhere Raumtemperaturen auch bei sehr tiefen Außentemperaturen gehalten werden, oder Raumtemperaturen, die bei Strahlungsheizung physiologisch ausreichend sind, bei geringeren Vorlauftemperaturen. Diese Rohranordnung zeigt Abb. 10. Die maßstäblichen Details sind aus Abb. 11 – 13 zu entnehmen. Dargestellt sind Rohre mit einem Durchmesser von 15 mm.

In Räumen ohne Temperaturanspruch (Trockenlegung, Luftentfeuchtung, Klimastabilisierung) kann die Montage der Heizrohre auch zwischen Rohwand und Seitenkante des Bodenbelags (wo Randfuge und Wandputz zusammentreffen) erfolgen oder unter mineralischem Belag (neben dem Lot der Wandoberfläche!), wenn dieser nicht stärker als 3 cm ist, und zwar in Kontakt mit der Belagsunterseite, direkt im Verlegemörtel. Dies gilt für beliebige Raumhöhen und unabhängig von der Außenwandstärke. Dabei können Außenwandschleifen sehr lang sein: Eine Schleife kann alle Räume einer Gebäudeseite versorgen.

Bei höherem Temperaturanspruch müssen die Heizrohre oberhalb des Bodenbelags bzw. – bei hölzerner Sockelleiste – über dieser montiert und die Schleifenlänge auf die Länge der Außenwände von max. 3 Räumen beschränkt werden. Meist wird durch Anordnung von 2 bis 3 Steigsträngen eine Einzelraumversorgung angestrebt. Außerdem ist dann zumindest das Ausfahren der Fensterische mit dem Rücklauf erforderlich, wobei dieser in Kontakt mit der Unterkante der Fensterbank verlegt wird. In den Leibungen können mit dem Rücklauf Umwegschleifen ausgebildet werden. Bei Wandstärken unter 36 cm sollten für Wohnanforderungen gleich zwei Schleifen montiert werden, eine am Sockel, die zweite in Brüstungshöhe, deren unteres Rohr in Höhe der Fensterbankunterkante liegt. Leibungsschleifen werden dann erst ab Fachwerkstärke nötig.

Bei höheren hölzernen Sockelleisten (ab 6 cm) sollte zur sicheren Gewährleistung der Trockenlegung unabhängig von den über der Sockelleiste zur Raumbeheizung montierten Rohren in die Ecke von Rohwand und Rohboden eine eigene Leitung gelegt werden, entweder als den Einzelraum umfahrende Ringleitung oder als eine mehrere Außenwandsockel als „Vorlauf“ abfahrende Leitung, die als „Rücklauf“ über die zugehörigen Trennwände zurückkehrt.

Wenn raumhohe Vertäfelungen einen Abstand von min. 15 mm zur Wand haben, so daß hinter ihnen Luft aufsteigen kann, genügt es, eine Heizrohrschleife in Anstrich hinter dem Sockelprofil am Rohwandsockel zu befestigen, da der geschützte Warmluftauftrieb im Hohlraum die gesamte Schale temperiert und die strahlungsdämpfende Wirkung des Holzes am Sockel kompensiert. Bei nur brüstungshohen Lamperien empfiehlt es sich, das Rücklaufrohr auf der oberen Deckleiste zu verlegen oder neben ihr, zwischen Holz und Wand, einzulegen, damit von diesem zweiten Wärmestaubereich ein weiterer Teilauftrieb ausgehen kann, der die Restfläche der Wand bedient. Bei höherem Temperaturanspruch in Gebäuden mit geringeren Wandstärken empfiehlt es sich auch hier, wenn der Befund es zuläßt, zwei Schleifen zu verlegen, eine am Rohwandsockel, die zweite im Bereich der Deckleiste, am besten darüber. Um den Eingriff in die Bausubstanz zu minimieren, wäre die Verlegung des Rücklaufrohres unter der Deckleiste und des Vorlaufes über ihr möglich, wobei auch dieses Rohr nicht eingeschlitzt, sondern wie die anderen drei nur angestrichen werden müßte. Bei dieser Montage ist ein geringes Strömungsgeräusch hörbar, wenn eine sich völlig ruhig verhaltende Person im Raum allein ist.

In Räumen mit nur durch Pfeiler gegliederten Fensterreihen (Schulräume etc.) sollten zur besseren Fensterversorgung hölzerne Fensterbänke um 6 bis 10 cm schmaler geschnitten werden. Die zweite Schleife kann dann ohne Leibungsumwege in den entstehenden Kanal gelegt, der ausgemörtelt wird, abgedeckt evtl. mit einem mit der Fensterbankoberkante bündigen Fliesenstreifen von max. 15 mm Stärke auf Klebemörtel.

Auf den Rückseiten von neu zu montierenden Vertäfelungen oder von wandnah stehenden Vitrinen und Schränken können, insbesondere bei auf Putz verlegten Rohren, in Höhe des Rohrverlaufs 6 cm hohe Streifen von Heizkörper-Reflexionsfolie angebracht werden, so daß die bei Frost deutlich über der Auftriebstemperatur liegende Oberflächentemperatur der Rohre bzw. der Putzabdeckung keine Trocknungsschäden durch Wärmestrahlung hervorrufen kann. Dies gilt besonders für großformatige Bilder, die über eine in Brüstungshöhe verlegte Leitung herabreichen. Dank seines geringen Gewichts kann der Folienstreifen in Rohrhöhe einfach auf der Keilrahmenrückseite befestigt werden.

6.3.4 ZUSATZHEIZKÖRPER?

Grundsätzlich können an Sockelheizschleifen Heizkörper angeschlossen werden, z. B. zur raschen Temperaturerhöhung bei sporadischer Raumnutzung. Da jedoch bereits bei schwachem Dauerbetrieb der Rohre der Grundwärmebedarf des Raumes gedeckt ist, bleibt nur ein geringer Zusatz-Wärmebedarf übrig, der durch Zuschaltung reiner Strahlplatten (einlagige Plattenheizkörper ohne Konvektorbleche), bei gleichzeitiger Erhöhung der Vorlauftemperatur, gedeckt werden kann, ohne daß die Qualität des „zugfreien“ Strahlungsklimas verloren ginge. Dabei muß die Heizschleife unabhängig von der Stellung des Heizkörperventils in Funktion bleiben. Diese Aufgabe kann aber ebenso gut durch die zweite Schleife erfüllt werden, wenn diese durch Öffnen ihres Thermostatventils bei Bedarf hinzu geschaltet wird.

Diese „Minimalheizung“ (ungedämmte, die Gesamtlänge der Außenwandsockel abfahrende Heizrohre in gleitendem Dauerbetrieb mit daran angeschlossenen zuschaltbaren Strahlplatten) reicht nicht nur aus, um z. B. im Büro auf einfachste Weise während der Arbeitsstunden ausreichende Temperaturen für sitzende Tätigkeiten zu erreichen, sondern auch für Wohnzwecke. Eine zusätzliche Schleife für die Versorgung der Strahlplatten ist bei Dauerbetrieb der Sockelschleife nicht erforderlich, da bereits kurze Zeit nach der Erst-Inbetriebnahme die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks im Nahbereich der Rohre durch Materialtrocknung deutlich sinkt. Durch den Wärmestau verringert sich daher die „Spreizung“ (der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf) so erheblich, daß noch genügend Reserve für hinzu geschaltete Strahlplatten bleibt. Bei Schleifenlängen von bis zu 30 m stellt sich im Dauerbetrieb beispielsweise eine

Spreizung von weniger als 10 Grad ein. Selbst wenn also die Heizrohre zur Klimatisierung eines Raumes bei z. B. 38/30°C laufen würden, würde die Strahlplatte kurze Zeit nach Einschaltung eine „mittlere Strahlungstemperatur“ von ca. 34°C erreichen, so daß im bereits „temperierten“ Raum die Empfindungstemperatur rasch ansteigen würde. Bei einer solchen bauphysikalisch sinnvollen kontinuierlichen Deckung des Grundwärmebedarfs aber kann ein ganzer Kreis bei Frost durch Steigerung der Vorlauftemperatur kurzfristig auch deutlich mehr Leistung abgeben, so daß bald Behaglichkeit herrschen würde, da eine Erhöhung der Wassertemperatur dank des vorhandenen Wärmestaus am Sockel sowohl dort, wie am Heizkörper rasch eine erhöhte Oberflächentemperatur hervorrufen würde. Dies gilt natürlich auch für eine zweite Heizschleife, die anstatt eines Radiators – als wandlanger „Zusatz-Heizkörper“ – am Sockel oder in Höhe der Fensterbank-Unterkante montiert ist.

6.3.5 TRÄGHEIT DER TEMPERIERUNG?

Diese Beobachtung widerspricht der allgemeinen Annahme, daß die Methode der Temperierung – im Gegensatz zu den anerkannten Heizverfahren – keine rasche Leistungssteigerung zulassen würde. Dieser Annahme liegen zwei „Denkfehler“ zu Grunde: Zum einen wird nicht erkannt, daß die Methode nicht „die Wände aufheizen“, sondern nur die Auskühlung ihrer Oberflächen verhindern muß. Zum anderen beruht die rasch spürbare Wirkung der üblichen Verfahren eben nicht darauf, daß die „Raumtemperatur“ schnell gesteigert würde, sondern vielmehr darauf, daß nur die Luft-Temperatur hochschnellt. Dadurch tritt aber eine physiologisch widersinnige Gesamtwirkung ein, die bei Erhöhung der Strahlungsleistung einer „Wandheizung“ gar nicht möglich ist. Sie wurde in Kap. 1.2.4 bereits ausführlich dargestellt. Wegen ihrer physiologischen Bedeutung sei sie hier noch einmal verkürzt wiederholt: Der Körper wird über Lunge und Blutkreislauf von innen beheizt. Er muß daher zusätzlich zur über die Atmung aufgenommenen Heizwärme wegen des Wegfalls der „Lungenkühlung“ die gesamte, dauernd gebildete Stoffwechselwärme an der Hautoberfläche abgeben, während sich die Luft bewegt, die dort abgegebene Wärme also zügig abführt. Gleichzeitig strahlt er zu den Wänden mehr Wärme ab, da die Hautgefäße auf weit gestellt sind und der falsche Raumlufkreislauf die Oberflächentemperatur der Wände nicht ausreichend anheben kann. Zu diesen Zegerscheinungen an der Körperoberfläche wirkt sich die verstärkte Staubbelastung der Raumluf auf die Atemwege aus.

Bei einer Steigerung der Wärmeabstrahlung der Wände dagegen bleibt die Raumlufmasse weiterhin in Ruhe und im Vergleich zur Lufgentemperatur kühl, so daß weder ihre isolierende Wirkung an der Körperoberfläche verloren geht, noch die Abgabe der Stoffwechselwärme über die Lunge behindert wird. Die rasche Steigerung der Behaglichkeit durch Leistungssteigerung der „Minimal-Wandheizung“ beruht also darauf, daß sie weder Zegerscheinungen, noch verstärkte Wärmeabstrahlung der Körperoberfläche hervorrufft, und daß aus strahlungsphysikalischen Gründen bereits eine geringe Erhöhung der (mittleren) Wandoberflächentemperatur intensiv empfunden wird.

6.3.6 REGELUNG

Ist aus physikalischen Gründen schon die Heiztechnik selbst denkbar einfach, so gilt dies auch für die Regelungstechnik. Baut man in den Rücklauf jeder Schleife, z. B. im Verteilerkasten oder an einer für den Nutzer zugänglichen Stelle am Ende des Rücklaufs, einen Rücklauftemperaturbegrenzer ein, kommt es bei Kosten von ca. 30 EUR pro Schleife zur Selbstregelung des „Systems Wand/Heizrohr“ auf dem eingestellten Temperaturniveau. Da das Heizwasser weniger stark entwärmt wird, wenn das Bauteil „Fremdwärme“ aufnimmt, vermindert der Thermostat den Wasserdurchfluß entsprechend. Da sich der Wärmefluß im Bauteil beim Auftreten von Fremdwärme sofort verringert, kommt es rasch zum Wärmestau in der Heizrohrumgebung und somit, entgegen landläufiger Anschauung, zu kurz-

fristiger Reaktion des Reglers. Dies gilt entsprechend umgekehrt für den Fall, wenn die Außentemperatur plötzlich abfällt. Die allgemein angenommene Tragfähigkeit der Wärmestromdichte der Wandheizung beschränkt sich also auf die Fälle, wo auf Energieeinsparung zielender instationärer Betrieb, z. B. zeitweises Abstellen oder Nacht- und Wochenendaussenkung den Vorteil von Speichergewinnen aufhebt.

mittlere Temperatur (°C)	Leistung (W/m²)	Speichergewinn (kWh/m²)	Verhältnis
30	190	902	1 : 9,0
40	220	1026	1 : 4,6
50	360	1168	1 : 3,2

6.3.6.1 ABSENKBETRIEB IM MASSIVBAU

Daß der Absenkbetrieb bei Massivbauten energetisch nicht sinnvoll ist, zeigte sich wieder in dem von Dampfheizung auf Temperierung (Heizrohre an Sockel, Brüstung und Leibung) umgerüsteten Gymnasium Waldstraße in Hattingen von 1880, dessen Gebäudehülle aus 50 cm starken Vollziegeln besteht (Kap. 6.3.7.2). In den Jahren 1996/1997 verglich die Stadt den in Schulen üblichen Absenkbetrieb (Nacht-, Wochenend- und Ferienabsenkung) mit dem empfohlenen gleitenden Dauerbetrieb und stellte keine Energieeinsparung durch zeitweise Absenkung der Vorlauftemperatur fest. Man behielt daher lediglich die Ferienabsenkung bei. Generell ist eine Nachtabsenkung dann nicht sinnvoll, wenn die Gebäudehülle wärmespeicherfähig ist, da der Energiespeicher in der zustrahlungsfreien Zeit verstärkt an Speicherwärme verliert: Zum Verlust durch verringerte Versorgung kommt der erhöhte Wärmebedarf, verursacht durch das Fehlen der Zustrahlung und die Feuchteaufnahme über Kapillarkondensat. Dagegen kann eine Tagabsenkung durch aus sinnvoll sein, da der Wärmebedarf mit Beginn der diffusen Zustrahlung sinkt.

In diesem Zusammenhang muß auf die generell schlechte Erfahrung mit heute zum Standard gewordenen kostenintensiven elektronischen Regeltechniken („Schaltschrank“) hingewiesen werden. Einerseits ist die optimale Funktion der Heizrohrtechnik bei geringstem Energieeinsatz nur dann gegeben, wenn Speichergewinne aus Leistungsüberschüssen gebildet werden können, was durch ständiges Regeln verhindert wird. Andererseits führen die angesprochenen Selbstregelleffekte, in Verbindung mit einer gleitenden Kesselregelung durch einen unter (!) dem Außenputz der Nordwand liegenden Außentemperaturfühler, dazu, daß die Schwankungen der Raumtemperatur sich nur gleitend ergeben, und zwar im Tagesverlauf im Bereich von max. 2 Grad. Sie sind daher sowohl konservatorisch, als auch physiologisch irrelevant. Erst diese Betriebsweise aber führt durch Nutzung der physikalischen Effekte zu einem Energiebedarf, der in der Regel unter dem konventioneller Heizverfahren liegt und durch aufwendige Regelverfahren nicht weiter reduziert werden kann. Es ist daher für Massivbauten ab Fachwerkstärke absurd, das Regelprogramm von Heizkesseln ständig stärker zu differenzieren, so daß eine Änderung der Einstellung nur noch durch den Kundendienst erfolgen kann. Eine Verbesserung der Nutzung äußerer und innerer Wärmeangebote durch optimiertes Speicherverhalten kann dadurch nicht erreicht werden.

6.3.7 PLANUNG VON TEMPERIERANLAGEN

6.3.7.1 STRAHLUNGSHEIZUNG: WÄRMEABGABE

Die reale Leistung einer Wandheizfläche erschließt sich bei folgender Überlegung: Die Leistung eines beheizten Putzstreifens kann aus den Leistungsangaben im Diagramm „Wärmeabgabe verschiedener, direkt unter dem Innenputz verlegter Rohre an den Raum“ von Engelbrecht (Abb. 14) entnommen werden [8], das aus einer Berechnung ohne Berücksichtigung der Bauteiltrocknung hervorging, also eher geringere Leistungen angibt!

- Für ein blankes Kupferrohr (Ø 18 mm) „knapp“ unter Putz wird bei t_m 60°C eine in den Raum abgegebene Leistung von 56 W/m angegeben, abgerundet: 50 W/m.
- Zwei am Sockel derartig eingeputzte Heizrohre mit t_m 60°C führen an der Putzoberfläche zu einer Leistungsabgabe von 100 W/m, z. T. in Form von Wärmestrahlung, z. T. als Warmluftauftrieb.

- Zwei mit Doppelschelle unter Putz von max. 20 mm Stärke montierte Rohre führen auf der Putzoberfläche auf ca. 10 cm Höhe zu einer Oberflächentemperatur von ca. 40°C (Abb. 9).
- 10 m eines solchen Sockelputzstreifens, d. h. 1 m² Wandputz mit 40°C Oberflächentemperatur, leisten über 1 kW.

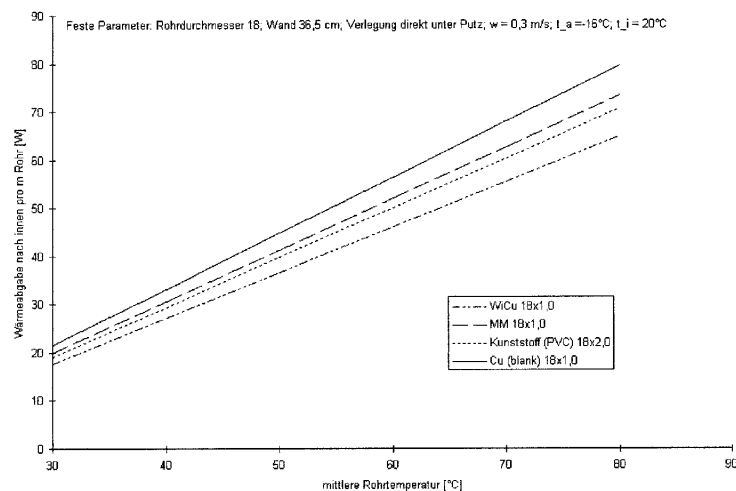
Vergleicht man diese Leistung (1 kW/m² bei 40°C) mit der entsprechenden Angabe im Lehrbuch [9] zur „Wärmeabgabe von Wandheizflächen durch Strahlung und Konvektion“ (220 W/m² bei 40°C), so findet man ein Verhältnis von 4 zu 1 und erkennt, daß die Lehre bei der Wandheizung von wesentlich geringeren Werten als physikalisch gegeben ausgeht. Bezieht man nun die Tatsache ein, daß von einer senkrechten glatten Heizfläche immer ein Auftrieb als Folge der erhöhten Wärmeschwingung ihrer Oberflächenmoleküle ausgeht, der an die darüber befindliche kältere Fläche Wärme überträgt, so wird verständlich, daß zur Beheizung einer Wandfläche keineswegs Rohrregister erforderlich sind. Vielmehr reichen ein bis zwei waagrecht am Sockel und in Brüstungshöhe angeordnete heiße Putzstreifen dazu aus. Da aber nur die Wandoberfläche warm sein muß, kann die Konvektionsleistung sehr gering sein. Ihr Ziel ist ja – im Gegensatz zum Heizkörper – eben nicht die Erhöhung der Raumluft-Temperatur. Diese paßt sich vielmehr an die mittlere Wandoberflächen-Temperatur an.

Wegen des geringen Wärmehalts sowohl der „Heizluft“ (Auftrieb) wie der Raumluft kann im Wohnbereich das Lüften händisch (durch Fenster öffnen) und nach Bedarf (nicht als „Stoßlüftung“) geschehen, da ja nur kleine Mengen des „Heizmediums“ gegen Außenluft ausgetauscht werden, deren Temperatur (im Falle einer beheizten Fensterbank) um bis zu 30°C geringer ist als die Temperatur der Luft, die einen Heizkörper verläßt. Bedenkt man nun, daß ein Raum nicht auskühlen kann, wenn seine Wärmeverlustflächen nicht abkühlen, so sieht man, daß bei einer die gesamte Gebäudehülle versorgenden „Wandheizung“ weder die Strahlung (der Rohrbereiche) noch die Konvektion (des Warmluftauftriebs) in den Raum hinein wirken müssen. Voraussetzung für die Gesamtwirkung der Temperierung, d. h. der auf empirischem Wege auf das physikalisch notwendige Maß reduzierten Wandheizung, ist, daß der von den streifenförmigen Heizflä-

Abbildung 14:

Wärmeabgabe verschiedener, direkt unter dem Innenputz verlegter Heizrohre an den Raum. Aus [6]

- Blankes Kupfer zeigt die beste Wärmeübertragung bei geringstem Außendurchmesser.
- Nach den auf unverändertem Wandfeuchtegehalt beruhenden Berechnungen leistet das CU-Rohr (Ø 18 mm) bei t_m 60°C 56 W/m.
- Dank der höheren Wärmedämmung der trockenen Wand sind die Leistungen höher als errechnet, so daß bei geringerem Rohrquerschnitt eine ähnliche Leistung erreicht wird (Annahme: CU-blank (15 mm) bei t_m 60°C min. 50 W/m).



chen ausgehende Auftrieb nicht behindert wird (Möbel auf 2 cm Abstand von der Wandfläche aufstellen).

Realisiert man schließlich, daß durch jede Art der Wandheizung durch Bauteiltrocknung und Optimierung der Aufnahme der Solarstrahlung (s. nächsten Absatz) der Transmissionswärmeverlust ebenso verringert wird, wie es beim Lüftungswärmeverlust durch das Nichtbeheizen der Raumluftmasse der Fall ist, so erkennt man, daß generell der Wärmebedarf bei Wandheizung aus physikalischen Gründen deutlich unter dem bei konventioneller Heizung liegt, wo ja zwangsläufig eine hohe Lufttemperatur herrscht, zugleich aber wegen der schlechten Verteilung der Wärme größere Außenwandflächen zu kühl bleiben und daher über das Kapillarkondensat aus der Raumluft während der Heizperiode feucht und damit leitfähiger gehalten werden. Feuchtemessungen an temperierten Außenwänden (Vollziegel), u.a. mit Hochfrequenztechnik, ergaben über den gesamten Bauteilquerschnitt einen Feuchtegehalt von 2 – 3 Masseprozent (Quelle: Käferhaus 4/2002). Ein Gehalt von 5% gilt als „trocken“.

6.3.7.2 THERMOGRAFIEN

Im o. a. Lehrbuch findet sich zur Berechnung der Deckentemperatur bei Deckenheizungen unter Flachdach der für die übliche Wärmebedarfsberechnung auf der U-Wert-Basis erstaunliche Satz: „In Anbetracht der verhältnismäßig geringen Anzahl der sehr kalten Tage und der Speicherfähigkeit von *Betondecken* genügt es, der Berechnung eine (tiefste) Außenlufttemperatur von -5°C zugrunde zu legen“. Dazu passen die Beobachtungen, die man auf Thermografien von Außenwand-Außenseiten eines temperierten Wohnhauses in Lengdorf, Lkr.Erding, machen konnte, die am 5.03.2002 bei $-4,5^{\circ}\text{C}$ Außentemperatur von 5:45 bis 6:30 entstanden (Abb.15–20). Bei nur 26 cm starken ungedämmten Betonwänden, die mit zwei Heizrohrschleifen mit 60°C Vorlauf vom Vorabend an beheizt worden waren, konnte man mit der Infrarotkamera auf der Außenseite zwar eine starke Abstrahlung, nicht aber die heißen Rohrtrassen auf der Innenseite nachweisen.

Der Verdacht, daß vor Tagesanbruch aufgenommene Thermografien monolithischer Außenbauteile mit Heizrohren auf der Innenseite nicht die Transmission zeigen, sondern die Abstrahlung der am Vortage eingespeicherten Sonneneinstrahlung, erhärtet sich, wenn dieselbe Wandkonstruktion, als Hofwand weiterlaufend, auf derselben Thermografie bei Frost gelb statt blau oder schwarz erscheint (Abb. 17: Westwand des Hofes, weiterlaufend als Westwand des Ateliers,

Thermografien der Außenseite von Außenwänden mit Heizrohren auf der Innenseite, aufgenommen vor Tagesanbruch bei Frost, zeigen nicht den Verlauf der Rohre, wie man es nach den hohen U-Werten von Mauerwerk oder Beton erwarten müßte. Bereits der Vergleich von Heizwassertemperatur und Oberflächentemperatur der Putzabdeckung auf der Raumseite (s. Abb. 9 rechts) zeigt, daß dies unmöglich ist (20 K weniger Temperatur auf der Oberfläche einer 20 mm starken Putzabdeckung). Statt der Heizwärmeverluste der Räume ist die Abstrahlung der am Vortage aufgenommenen Solarwärme zu sehen, die entsprechend dem Rohgewicht der (im beheizten Fall trockenen) Bauteile und ihrer mittleren Temperatur (beheizt/unbeheizt) unterschiedliche Intensität hat. Dies wird durch Wärmeflußmessungen bestätigt (s. Käferhaus): a) In der Rohrebene kein höherer Wärmedurchgang feststellbar als 30 cm darüber. b) Der Solarwärmegewinn der direkt beheizten Außenwand war höher als der einer gleichartigen und gleich exponierten Außenwand eines mit Heizkörpern beheizten Raumes!

Fotos Autor; Zeichnungen Heiko Folkerts, Bernried; Thermografien Thomas Böttler, Miesbach.

Abbildung 15:

Wohnhaus in Lengdorf, Lkr. Erding, mit Hof und Nebengebäude (Atelier und Garage) von Westen
Hof-, Atelier- und Garagenwand in 26 cm starkem Beton; Atelierwand mit 2 Rohrschleifen ohne Wärmedämmung.



Abbildung 18:

Wohnhaus in Lengdorf, Lkr. Erding, von Norden
Hof- und EG-Dielenwand in Beton (26 cm stark); Dielenwand mit 4 Einzelrohren ohne Wärmedämmung



Abbildung 16:
Schema des Heizrohrverlaufs auf der Innenseite der Westwand des Ateliers
(angestrichene Rohre in Kunststoffclips in 1 cm Abstand vor der angestrichenen Betonwand)

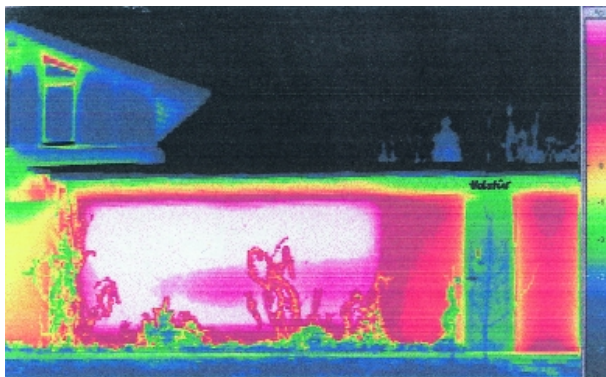
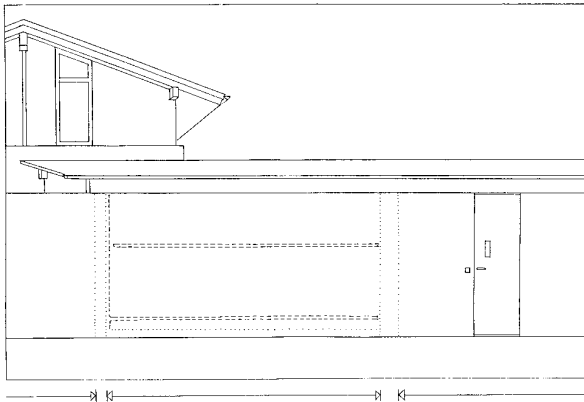


Abbildung 17:
Thermografie der Westwand-Außenseite von Hof, Atelier und Garage
(5.03.2002, 5:55, -4,42°C; klare Nacht nach sonnigem Tag, Heizrohre seit 18:00 am Vortag mit t_m 60°C betrieben).
Die Atelier-Wand zeigt dank längerer Einstrahlung fast homogenes Weiß. In den beiden Rohrebenen sind keine helleren Streifen feststellbar. Die Farben der übrigen Bauteile entsprechen ihren Rohgewichten: So zeigen die von Frost umgebene Hofwand Gelb, die Wand der unbeheizten Garage Rot, die Leichtbauwand (ab Brüstung OG) Dunkelblau, die Porenziegel-Brüstung Hellblau, deren verputzte Mauerkrone Grün (größere Speichermasse durch Mörtelfüllung der Hochloch-Enden). Die Brüstungsschleife liegt 20 cm unter der Fensterbank im Putz.

Abbildung 19:
Schema des Heizrohrverlaufs auf der Innenseite der Nordwand der EG-Diele
(angestrichene Rohre in Kunststoffclips in 1 cm Abstand vor der rohen Betonwand hinter Garderobenschrank)

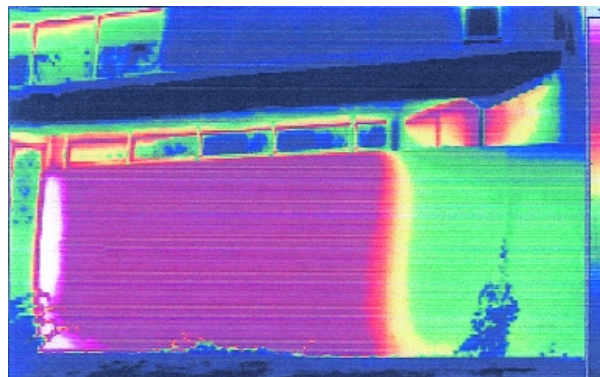
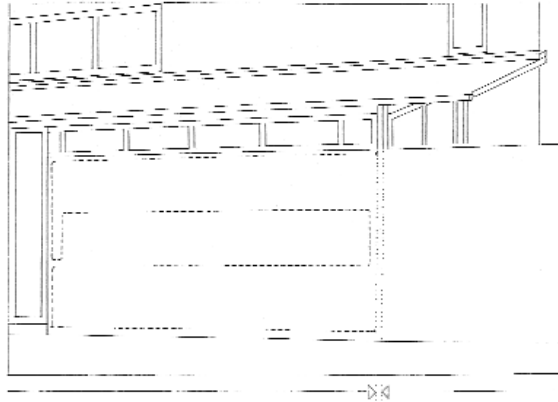


Abbildung 20:
Thermografie der Nordwand-Außenseite von Hof und EG-Diele (5.03.2002, 6:30, -4,3°C; Sonnenaufgang nach klarer Nacht und sonnigem Vortag, Heizrohre seit 18:00 am Vortag mit t_m 60°C betrieben).

In der Rohrebene der EG-Wand sind keine helleren Streifen feststellbar. Die trockene Betonwand der Diele zeigt homogenes Rot. Die Hofwand (im Frost) ist grün, die Leichtbauwand im OG ist dunkelblau analog der Westseite.

vor Sonnenaufgang). Auch die in der Thermografie darüber liegende, auf gleiche Weise beheizte blau erscheinende Porenziegelwand wies keine hellen Streifen im Rohrbereich auf; dafür war aber das Fugennetz von den Blockflächen zu unterscheiden: Der Putz auf dem Lagerfugenmörtel und den massiveren senkrechten Kanten der Steine strahlte heller als der auf den poröseren Ziegelflächen. Die Erscheinungen waren in abgeschwächter Form auch auf der Nordseite zu sehen (Abb. 20). Solche Farbunterschiede, die auf Thermografien temperierter Gebäude regelmäßig auftreten, lassen sich nur erklären aus der Tatsache, daß mineralische Baustoffe mit hohem Rohgewicht (also schlechtem U-Wert!), deren Porenfeuchte durch Temperierung unter ihrem „praktischen Feuchtegehalt“ gehalten wird, wesentlich mehr Energie aus der Sonneneinstrahlung aufnehmen und sie nach Ende der Einstrahlung wesentlich langsamer abgeben, als leichtere Stoffe. Historische Bau- und Heiztechnik (hohes Rohgewicht mit Hypokausten-Wandheizung

oder Kachelofen) ergab stets direkte Sonnenenergienutzung. Das Gesagte gilt ebenfalls für Vollholz-Konstruktionen.

6.3.7.3 EMISSIONSZAHLEN

Um die Funktionsicherheit von Temperieranlagen herzustellen, in denen auch offen verlegte Heizrohre vorkommen (z. B. auf Dachgebälk), und zur Klärung der Frage, ob die Wärmedämmung von ebenso verlegten Zuleitungen erforderlich ist, ist es hilfreich, die Emissionszahlen verschiedener Materialien zu vergleichen, mit denen die unterschiedliche Stärke ihrer Wärmeabstrahlung angegeben wird. Bei gleicher Oberflächentemperatur ergeben sich deutliche Unterschiede in der Stärke der Wärmeabstrahlung. Unter den Stoffen mit kristallinem Gefüge sind die Nichteisenmetalle in poliertem Zustand „schlechte“ Strahler, da sie ein wenig ausgeprägtes Oberflächenrelief haben. Mineralien und Stoffe mit amorphem Gefüge dagegen strahlen stärker, da ihr Oberflächenrelief unzählige Teilflächen ausbildet. Im Folgenden werden die Emissionszahlen von drei für das Thema „Strahlungsheizung“ wichtigen Materialien mit dem Schwarzen Körper verglichen, wodurch der erhebliche Unterschied in der Wärmeabstrahlung sichtbar wird:

- Schwarzer Körper1,0
- CU blank (je nach Grad der Verschmutzung)0,05 – 0,15
- Putz, Farbe oder Klarlack auf demselben Rohr0,93 – 0,96

Die große praktische Bedeutung dieser Zahlen für den „Heizalltag“ wird erst sichtbar bei Messungen mit dem bereits für ca. 130 EUR erhältlichen „passiven“ Infrarot-Thermometer. Im Gegensatz zu den mehrfach teureren professionellen Geräten mißt es nicht mit einem Meßstrahl die Oberflächentemperatur eines Gegenstandes, sondern empfängt dessen Wärmeabstrahlung entsprechend dem Emissionsgrad des Materials an seiner Oberfläche und zeigt sie in °C an. Das Gerät erlaubt daher zwei grundlegend wichtige Aussagen: Bei Fernmessung zeigt es die Gesamteinwirkung der verschiedenen Strahlungswärmequellen auf einen Punkt im Raum (auf die z. B. einen Arbeitsplatz repräsentierende Position des Meßgeräts), wobei durch genaue Ausrichtung mit dem Laserpointer die Einzelquellen gut unterscheidbar sind (Putzstreifen vor Rohr bzw. Rohranstrich, Wandfläche darüber, Fenster, Lampe etc.). Bei Nahmessung wird die tatsächliche Wärmeabstrahlung der Einzeloberfläche in Abhängigkeit vom Oberflächenmaterial angezeigt. Dabei stellt man fest:

- Bei gleicher Oberflächentemperatur ist ein blankes Kupferrohr „gedämmt“, während die nichtmetallische Oberfläche „heizt“!
- Die Abstrahlung einer Rohrdämmung mit Kunststoffmantel oder gestrichenem Blechmantel entspricht der des ungedämmten blanken Rohres!

Während Edelstahl wie Kupfer zu den „schlechten“ Strahlern gehört (volle Leistung erst bei Anstrich oder unter Putz), nimmt die Abstrahlung von Schwarzstahl („Eisen“) in den ersten Wochen nach der Montage durch Patinabildung zu. Daraus folgt, daß schon die Zuleitungen ab Wärmeezeuger, nicht erst die Heizleitungen, in CU blank ausgeführt werden sollten. Ihr Mehrpreis wird durch den Verzicht auf die Rohrdämmung wettgemacht, während die üblichen Schwarzstahlrohre gedämmt werden müssen.

6.3.7.4 TRANSMISSIONSWÄRMEBEDARF

Bei Strahlungsheizung kann der Wärmeverlust durch Wärmeleitung der Gebäudehülle mit einer einfachen Formel abgeschätzt werden, die früher zur Auslegung von Kachelöfen Anwendung fand und den Bedarf pro m² Außenwand angab. Man beachte, daß die Wandstärke „unter dem Bruch steht“, der Wärmebedarf sinkt also bei Strahlungsheizung (= bei trockener gleichmäßig erwärmter Wandoberfläche) mit steigender Wandstärke – oder: eine Wand aus unporosiertem Material hat einen geringeren Wärmebedarf als eine gleich starke aus porosiertem. Die Formel lautet: $Q_T = (\lambda_{\text{trocken}} / \text{Wandstärke in m}) \times \text{maximale Temperaturdifferenz zwischen innen und außen}$. Ergänzt man diese Formel

durch den zusätzlichen Multiplikator „Raumhöhe“ (in m), so erhält man den Bedarf des lfm der Wand. Der Vergleich des Ergebnisses mit der Leistungsangabe einer Heizschleife in W/m nach Abb. 14 erlaubt die Beantwortung der Frage, wie viel Heizleistung pro Laufmeter Außenwand bereitzustellen ist bzw. wie viele Schleifen bei welcher Vorlauftemperatur erforderlich sind. Das Ergebnis ist ausreichend genau für Mauerwerk mit höherem Rohgewicht (ab 1400 kg/m³). Die Abschätzung der Leistung des Wärmeerzeugers ergibt sich aus der Gesamtlänge der Rohrmeter (Rohrlänge pro lfm Wand x innerem Geschoßumfang x Geschoßzahl), multipliziert mit der pro lfm erforderlichen Leistung. Im Wohnhaus wird das Ergebnis soweit aufgerundet, daß für Kombithermen eine genügende Kapazität für die rasche Aufheizung des Brauchwasserspeichers entsteht.

Als Beispiel sei hier der Wärmebedarf eines Laufmeters Außenwand eines für die Zeit um 1900 typischen Miethauses ermittelt, mit 50 cm starken Außenwänden (0,5 m) aus verputzten Vollziegeln (2.000 kg/m³), abgedichteten Kastenfenstern von bis zu 1,20 m Breite und einer Raumhöhe von 3 m. Die Temperaturdifferenz sei 35 K (außen -15°C, Raum +20°C); als λ trocken der direkt beheizten Ziegelwand wird 0,4 W/mK angenommen. Es ergibt sich folgendes:

$$Q_T = (0,4 : 0,5) \times 35 \times 3 = 84 \text{ W/m (für den lfm Wand!).}$$

Wie die Erfahrung zeigt, ist dieser Wärmebedarf durch eine Schleife bzw. 100 W/m Sockelputz zu decken. Bei einer derartigen Minimalausführung empfiehlt es sich, den Rücklauf in der Fensterbrüstung zur Unterkante der Fensterbank zu führen oder gleich in dieser Höhe zu verlegen (s. Abb. 6c). Die zugrunde liegende max. Vorlauftemperatur von ca. 65°C wird unterschritten, wenn der Rücklauf Umweschleifen in den Laibungen erhält (s. Abb. 6d). Wird je eine Schleife am Sockel und eine in Brüstungshöhe (mit Rücklaufumweg in den Laibungen) verlegt, werden 50°C kaum noch erreicht.

Bei Direktbeheizung von Außenbauteilen mit höherem Rohgewicht ist eine genauere Differenzierung zwischen *porenhaltigen* Massivbaustoffen wie Ziegeln und *porenfreien* wie Granit nicht erforderlich, da eine ähnlich große Senkung des Wärmebedarfs erfolgt, im ersten Fall durch Porenwasserverdrängung und Feuchteschutz, im zweiten Fall durch die Erhöhung des „thermischen Wechselstromwiderstands“ dank der durch Dauertemperierung höheren mittleren Wandtemperatur.

6.3.7.5 LÜFTUNGSWÄRMEBEDARF

Die Lehrbuch-Definition des Lüftungswärmebedarfs lautet, unabhängig von der Art der Wärmeverteilung: „Der LWB entspricht der zur Aufheizung der eindringenden Kaltluft aufzuwendenden Energie“. Diese unzulässige Verkürzung verschleiern einerseits den tatsächlichen Lüftungswärme-Gesamtverlust bei „Luft“-Heizung und verschweigt andererseits die Tatsache, daß der LWB bei Strahlungsheizung aus physiologischen und physikalischen Gründen gering ist. Bei Strahlungsheizung gilt grundsätzlich:

- Es besteht ein geringerer Bedarf an Lüftung: Die Qualität der Raumluft ist höher, da sie nicht beheizt und nicht verstaubt wird. Luftbewegung (Luftzug) durch das Heizen entfällt. Die „inneren“ Wärmeverluste durch Luftaufheizung (Wärmestau unter der Decke, Kamineffekt des Treppenhauses) entfallen, da bei konsequenter Umfahrung der Geschosse keine Thermik in Raum und Gebäude entsteht. Die „äußeren“ Verluste durch Warmluftaustritt aus Fugen und Öffnungen sind wesentlich geringer, da die Raumlufttemperatur im Fensterbereich um bis zu 30 K unter der einer „Luft“-Heizungs-Situation liegt.

Entsprechend zeigt die Erfahrung, daß in unserem Beispiel durch den Überschuß von 16 K pro lfm Heizschleife auch der Lüftungswärmebedarf Q_L wie

der Bedarf der Fensterfläche Q_F gedeckt ist (bei dichten Verbund- bzw. Kastenfenstern)!

6.3.7.6 FAZIT FÜR ROHRANORDNUNG UND BETRIEBSWEISE

Bei mittelstarkem und starkem Massivmauerwerk mit dichten Kasten- oder Verbundfenstern mit bis zu 1,20 m Breite genügt für Wohnraum-Temperaturen bereits der Dauerbetrieb von je einem dünn überputzten Heizrohrpaar pro Außenwandsockel (Rücklauf in Höhe Fensterbankunterkante, evtl. mit Umwegschleifen in den Leibungen). Heizkörper sind nicht erforderlich. Bei Wandstärken von weniger als 50 cm sind zur Absenkung der Obergrenze der Vorlauftemperatur zwei Schleifen erforderlich, wenn möglich je eine an Sockel und Brüstung. Generell gilt dies bei gleich starkem, aber porosierten oder bei schwächerem massiven Mauerwerk und bei breiteren Fenstern. Ebenfalls durch zwei Schleifen wird eine sichere Beherrschung von Fachwerk erreicht, wenn der Rücklauf der oberen Schleife auf beiden Seiten der Fenster eine Umwegschleife erhält.

Bei auf Putz montierten, angestrichenen Heizrohren ist der Wandkontakt durch Ausspachteln zu optimieren. Bei Unterputzmontage erfolgt eine gute Wärmespeicherung in der nahen Rohrumbgebung, wodurch eine nicht-kontinuierliche Wärmelieferung (z. B. bei Brauchwasser-Vorrangschaltung) in der Regel abgepuffert wird. Bei Aufputzmontage dagegen ist die Aufladung des dahinter liegenden Mauerwerks gering. Betriebsunterbrechungen sollten daher nur kurz sein. Dies gilt um so mehr bei Rohrverlegung auf Leichtbauschalungen und Dachbalken oder bei freier Rohrverlegung im Dachgebälk, da die Strahlungs- und Auftriebsleistung der Temperieranlage hier – mangels Speichereffekten – ganz von der momentanen Rohrtemperatur abhängt. In diesen Fällen muß die Heizwärmelieferung kontinuierlich sein bzw. sie darf während einer Zeitspanne von 2 – 3 Stunden nicht länger als 15 Minuten unterbrochen sein. Dies wird z. B. durch einen Heizungs-Pufferspeicher erreicht oder durch Beschränkung der Ladezeiten des Brauchwasserspeichers auf zwei bis drei Intervalle pro Tag.

6.3.7.7 JAHRESHEIZWÄRMEBEDARF kWh/m³·a

Welch große Bedeutung die Vermeidung der Aufheizung der Raumluft zum Zweck der Wärmeverteilung gerade in öffentlichen Gebäuden hat, zeigt ein in

	1. Heizperiode 9/96-9/97	1997 – 2000 (4-Jahresdurchschnitt)	2001
Heizkörper-Heizung kWh/m ³ ·a	35,97	24,61	20,58
Temperierung kWh/m ³ ·a	21,39	18,21	18,05
Gradtagzahlen	4.093	3.296	3.410

Quelle: Stadtbauamt Hattingen 3/2003

speicherfähiger Bauweise (50 cm Vollziegel) errichtetes Schulgebäude von 1880 mit 11.500 m³ umbauten Raum (Gymnasium Waldstraße, Hattingen/Ruhr), in dem seit 1996 2/3 des Volumens (die Unterrichtsräume) mit der Temperierung beheizt sind, während das restliche Drittel (Treppenhaus, Aula, Sonderräume) Heizkörperheizung erhielt. Wegen uneinheitlicher Nutzung des Kellergeschosses (Teilbeheizung) und unterschiedlich in den freien Dachraum ragenden Obergeschoßräumen ist von einem mittleren A/V-Verhältnis auszugehen. Die originalen Kastenfenster wurden nicht saniert, so daß zahlreiche Oberlichter nicht ganz zu schließen sind. Die Heizung wird wie folgt betrieben: Mindestraumtemperatur 20°C, keine Nacht- und Wochenend-, sondern nur Ferienabsenkung, kein Betrieb in den Monaten Juni, Juli und August. Der Energiebedarf der beiden Kreise ab Heizraum wird durch Wärmemengenzähler getrennt erfaßt.

Die Zahlen widerlegen die Lehrmeinung, nach der der Jahres-Energiebedarf eines Gebäudes eine reine Gebäudeeigenschaft sei und das Heizsystems darauf

keinen Einfluß habe: Bei großem Fugenanteil der Außenwände (unbehandelte Altfenster) und bei unkalkulierbarem Nutzerverhalten (Schüler) sind bei „Luft“-Heizung die Lüftungswärme-Verluste zwangsläufig erheblich höher als bei „Wand“-Heizung. Es ist daher physikalisch unhaltbar, für alle Heizsysteme in der Wärmebedarfsberechnung für den Raumluftwechsel in der Heizperiode einen *festen* Wert von *geringer* Höhe (0,6 Raumvolumen pro Stunde) anzusetzen, wie auch die Senkung des Energiebedarfs durch Direktbeheizung der Gebäudehülle zu leugnen, indem den Wandbaustoffen ein heizsystem-unabhängiger U-Wert zugeordnet wird. Beides geschieht auch in der neuen EnEV.

Selbst wenn man die Werte des Temperierkreises um 15% verschlechtert, um sich dem Primärenergiebedarf entsprechend der Energie-Einsparverordnung anzunähern, bewegen sie sich nach der 1. Heizperiode im Bereich der für mittlere A/V-Verhältnisse angegebenen Werte. Damit ist der Tatbestand des § 16 Abs. 2 gegeben: Es entfällt der Zwang zur Änderung der U-Werte (der rechnerischen Wärmedurchgangskoeffizienten) der Außenbauteile durch Montage von Wärmedämmung und Wärmeschutzfenstern, da „die Ziele dieser Verordnung durch andere Maßnahmen in gleichem Umfang erreicht werden“. Dieser Zusammenhang ist von höchster Bedeutung für die kostengünstige Sanierung von Gebäuden des Bestands und von Baudenkmälern, wobei hier die Möglichkeit des Erhalts der Authentizität besonders zu Buche schlägt.

7. GROSSBEISPIEL FÜR MINIMALANLAGE

Alf Lechner Museum, 85049 Ingolstadt, Esplanade 9

- Sanierung und Umbau eines Industriegebäudes als Low-budget-Projekt mit Minimalmaßnahmen zum Feuchte- und Wärmeschutz und minimal-invasiver Haustechnik (Eröffnung 2/2000).

Die ehemalige Automobil-Fertigungshalle ist ein zweigeschossiger, nur zu einem Drittel unterkellertes Industriebau der 1950er Jahre in Betonskelettbauweise mit 24 cm starker Porenbeton-Ausfachung, Einscheiben-Stahlrahmen-Verglasung im EG (3/4 Raumhöhe), Porenbeton-Sheddächern im OG mit Einscheibenverglasung. Dank der bauphysikalischen Effekte der Bauteilheizung konnten die Wärme- und Feuchteschutzmaßnahmen minimiert werden: An den erdberührten Flächen (2/3 des EG-Bodens und Hüllflächen des KG, Normalbeton ohne Feuchtesperre und Wärmedämmung) wurde ganz darauf verzichtet. Als Wärmedämmung erhielten die Außenwände auf Wunsch des Architekten an den Geschoßgrenzen je einen 1 m hohen Streifen von 10 cm Stärke, die Seiten der Sheds 2 cm, die opaken Dachflächen und die erhaltene EG-Verglasung 10 cm. Die Fensteröffnungen der Galerie wurden mit Lochziegeln (1200 kg/m³) zugesetzt. Die Erneuerung der Shedverglasung geschah durch Wärmeschutzverglasung ($k = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$), die auch bei der Vorbau-Verglasung Verwendung fand (Abb. 21 bis 23).

Das Museum mit einem beheizten Gesamtvolumen von 13.600 m³ umfaßt neben der zweigeschossigen Galerie (12.560 m³) einen Mehrzweckbereich im OG (875 m³) mit 2 Büros, Bad und großem Arbeitsraum sowie Funktionsräume im KG (1.280 m³): Werkstatt, WC-Anlage, Technikraum (10 m³) und Nebenräume. Das zweigeschossige Galerievolumen entstand, indem die Nordwestwände von EG und OG durch einen Stahl-Glas-Vorbau in Pfosten-Riegel-Konstruktion ersetzt wurden (Abb. 24). Bei einem Gesamtaufwand von 1.02 Mio. □ waren die teuersten Einzelmaßnahmen der Vorbau und die hinterlüftete Metallverkleidung der 3 verbliebenen Außenwände zur Unterdrückung der Fensterachsen und Regenfallrohre (Abstand zur Wand 25 cm).

Die Lüftung (2.556 □) besteht aus 2 Abluftventilatoren mit Jalousieklappen in der Shedverglasung am südlichen Ende der OG-Halle (max. Luftmenge 2 x 3.000 m³) und 2 Zuluft-Jalousieklappen in der südlichen EG-Außenwand (Luftführung durch beide Geschosse über den Vorbau).

Die Heizeinrichtung (netto 36.046 □) besteht aus einem Fernwärmeanschluß (7.055 □), einer Unterstation mit Regelung (9.561 □) und einer Temperier-

Abbildung 21:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, (Nordwestseite)
Der Glasvorbau mit dem Eingang verbindet das Luftvolumen von Erd- und Obergeschoß (12.590 m³).



Abbildung 22:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (Südwestseite)
Die hinterlüftete Verkleidung hat 25 cm Abstand zur Außenwand.

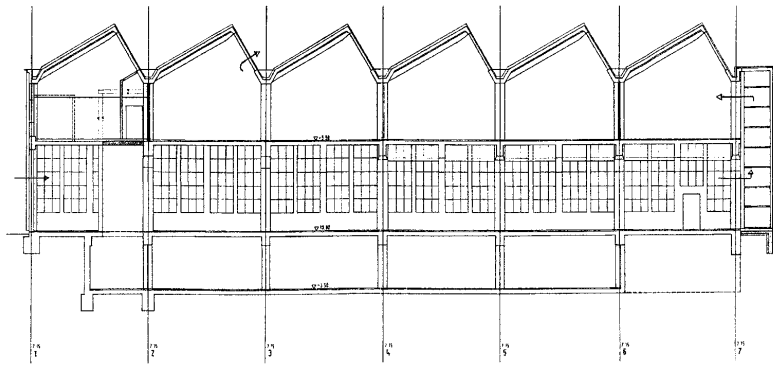


Abbildung 23:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (Schnitt)
Der Keller (1/3 der Grundfläche) liegt nordöstl. der EG-Mittelstützen.
Zeichnung Florian Fischer, München



Abbildung 24:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Innenansicht des
Glasvorbaus nach Südwest
Ein „Schacht“ von 10 m Höhe ohne Thermik in der
Heizperiode.

Fotos Nr. 21, 22, 24 und 28 Michael Heinrich, München, die übrigen vom Autor.

anlage (19.429 m²), deren Heizrohre (CU blank, (Ø 18 und 22 mm) eine Gesamtlänge incl. Verteilungen von 1.124 m haben. An den massiven Außenbauteilen sind die Rohrschleifen in Materialkontakt montiert – *unter Putz*: an den Außenwandsockeln (EG: Rücklaufumweg in den Nischen mit Fensterbank-Kontakt; Abb. 25), *auf Putz* (in Anstrich): im OG beidseitig der Wandpfeiler und Sheddachträger (Abb. 26 und 27), im EG (Einzelrohr) beidseitig der 6 Pfeiler und unter dem Unterzug (Abb. 28), thermisch getrennt: im Glasvorbau in Höhe der Geschosse in je 2 U-Profilen der Glasfassade (Abb. 29). Die maximale Heizleistung der Rohre beträgt bei einer mittleren Rohrtemperatur von 70°C ca. 65 W/m. Das bedeutet 73 kW oder 5,4 W/m³ umbautem Raum.

Mit dieser geringen maximalen Leistung wird seit November 2000 in der Heizperiode eine Mindest-Raumtemperatur von 19°C gehalten – bei außerge-



Abbildung 29:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Nordostecke des Glasvorbaus von innen
Im Eckständer Zuleitungen zu den beiden Rohrschleifen der Fassade
(Ø 18 mm) in Höhe der Geschosse (EG: 3. und 4., OG.: 6. und 7. Querprofil
des Glashalteapparates). Alle Leitungen angestrichen und in Kunststoff-
clips gehalten. Links Vorlauf (im unteren) und Rücklauf (im oberen
U-Profil) der EG-Schleife.

Abbildung 25:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Erdgeschoß
Südwestwand mit Sockel- und Brüstungsheizrohren (Ø 18 mm) vor dem
Aufputzen der Brüstungen und dem Anbetonieren des Sockelprofils.



wöhnlich geringem Energiebedarf. Damit ist das Projekt mit seinem beheizten Gesamtvolumen von 13.600 m³, davon 12.590 m³ über zwei Geschosse zusammenhängend, ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie weit bei Realisierung aller physikalischen Effekte der Heizrohr-Temperiermethode und konsequenter Planung des Rohrverlaufs sowohl der heiz- wie der sanierungstechnische Aufwand reduziert werden kann. Wie hier würde auch bei Neubauten die Dämmung der erdbeberührten Wände und der Böden incl. der schwimmenden Estriche entfallen. Bei mindestens 19°C lag der Jahres-Heizenergieverbrauch pro m umbauten Raum im 2. Betriebsjahr mit 3.956 Gradtagzahlen (GTZ) bei 20,4 kWh/m³·a, im 3. Jahr (3.723 GTZ) bei 18,2 kWh/m³·a und zeigt damit die energetische Bedeutung einer physikalisch sinnvollen Wärmeverteilung. Das Projekt Kulturspeicher Würzburg mit 50.000 m³ beheiztem Volumen, davon ca. 40.000 m³ tagsüber ebenfalls über zwei Geschosse zusammenhängend (Mindesttemperatur 18°C) ist ein weiteres über diesen Winter bereits erprobtes Beispiel. Auch hier war eine minimale Temperieranlage (je 2 Heizrohre an allen Wandsockeln) ausreichend und die Bodendämmung des Untergeschosses entfiel.

8. VERGLEICH TEMPERIERUNG / VOLLKLIMAAANLAGE

Quellen: Hochbauamt Ingolstadt bis 04/2003, Nürnberger Nachrichten vom 11.04.2000

Der in der Tabelle durchgeführte Zahlenvergleich erscheint zunächst als ein Vergleich von „Äpfeln und Birnen“. Betrachtet man ihn aber vor dem Ziel, das die climatechnischen Anlagen der beiden Museen erreichen sollen, der Erzeugung eines konservatorisch zuträglichen Klimas ohne Kurzzeitschwankungen, so

Abbildung 28:

Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Erdgeschoß

Teil des Mittelpfeilerkreises (\varnothing 18 mm): Der Vorlauf (angestrichen) liegt in Materialkontakt auf der Unterseite des Unterzuges und den Nord- und Südseiten der Pfeiler, jeweils am Pfeilerfuß im Estrich auf die Rückseite wechselnd. Der Rücklauf (blank) wurde in den Hohlraum des Unterzuges eingeschoben.



Abbildung 27:

Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Obergeschoß

Wandpfeiler mit Muster für Shedträger-Heizschleife; am Sockel 2 Heizrohrschleifen vor dem Anbetonieren des Sockelprofils: unten die Sockelschleife (\varnothing 18 mm), darüber die Versorgungsleitungen (\varnothing 22 mm) für die Shedträgerschleifen.

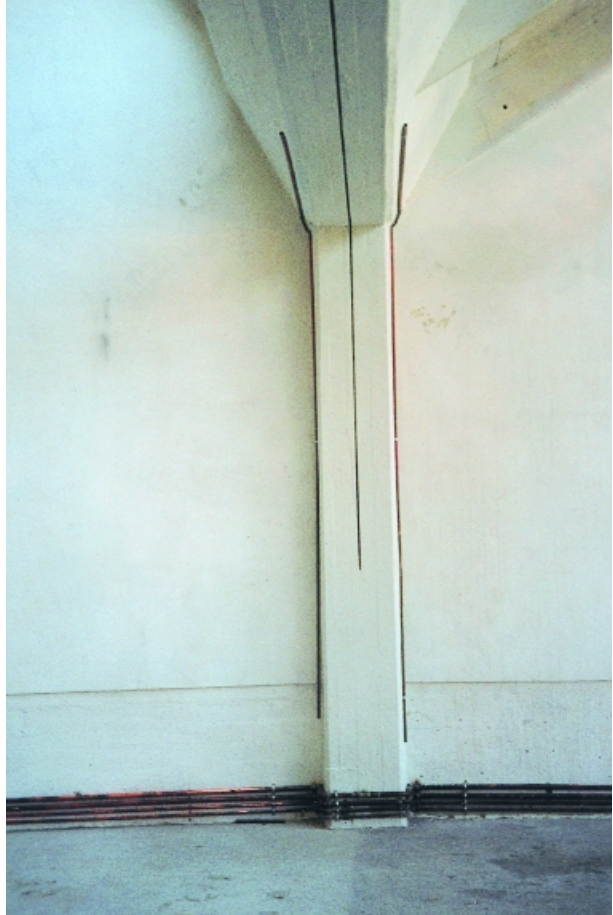


Abbildung 26:

Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Obergeschoß
Blick nach Westen. Teil eines der beiden Shedträgerkreise (\varnothing 18 mm, in Materialkontakt, angestrichen): Oberhalb der Unterkante der Betonträger die Heizrohre, die an den Mittelpfeilern auf die andere Trägerseite wechseln.



Objekt	Ingolstadt: Alf Lechner Museum (Kap. 7)	Nürnberg: Neues Museum			
1. Gebäude	Ehemaliges Industriegebäude (EG 5 m hoch, OG mit Sheds bis 6 m hoch, verbunden durch Glasvorbau), alle Glasflächen nach NW; zu 2/3 nicht unterkellert, keine Feuchte- und Wärmeisolierung der erdberührten Flächen (s. 3.2!)	Neubau mit Glasfassade (1.500m ²) nach Osten			
1.1 Umbauter Raum (u. R.)	13.600 m ³ beheizt, davon zusammenhängend 12.900 m ³ (zweigeschossig)	81.000 m ³			
1.2 Verhältniszahlen des u. R.	1	5,5			
2. Klimatechnik	1.124 m Hüllflächen-Heizrohre, 2 Abluftventilatoren (max. 6.000 m ³ /h), keine Kühlung und Außenbeschattung (nur textile Einlage in Shedverglasung)	Vollklimaanlage (Förderleistung bis 200.000 m ³ /h), innen liegende Beschattung			
2.1 Raumtemperatur min./max.	EG min. 19°C/max. 26°C OG min. 17°C/max. 28°C (an 1 Tag kurzzeitig max. 31°C aufgetreten)	19°C – 26°C			
2.2 Kosten Klimatechnik	44.480 □	15,34 Mio. □			
2.3 Verhältniszahlen der Technik-Kosten	1	344			
2.4 Spezifische Klimatechnik-Kosten)	3,27 □ /m ³ u. R.	189,18 □ /m ³ u. R.			
2.4 Verhältniszahlen Klimatechnik-Kosten	1	57,8			
3. Jährlicher Heiz-Energiebedarf	Jahr MWh	2000 190	2001 278	2002 247	?
3.1 Gradtagzahlen (BRD-Mittel: 3500)		3.647	3.956	3.723	
3.2 Spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/m ³ u. R.-a	14,0	20,4	18,2	max. Wärmeeintrag der Glasfassade 700 kW (Kühlleistung rechnerisch 467 W pro m ² unbeschattete Glasfläche)
3.3 Betriebsweise		Dauerbetrieb ohne Nachtabsenkung 2000: bis 15.11. min. 15°C seit 15.11.2000 min. 19°C			

zeigen Stichproben aus der kontinuierlichen Klimaaufzeichnung des Stadtbauamtes Ingolstadt, daß dieses Ziel mit dem in dieser Schrift dargestellten Gesamtkonzept „Optimierte Gebäudehülle, Wandsockelbeheizung (Temperierung), kontrollierter Luftwechsel“ mit wesentlich geringerem Investitions- und Energieaufwand erreicht wurde, als gemeinhin für große Gebäude als Standard angenommen. Die Temperaturspitzen im OG des Alf Lechner Museums im Hochsommer wären auch noch vermieden worden, wenn der Empfehlung der Landesstelle, die Sheds außen zu beschatten, nachgekommen worden wäre.

Nach Auskunft des Hochbauamtes der Stadt Ingolstadt stellte es sich heraus, daß das Lechner-Museum mit seiner minimalen Haustechnik bezüglich Behaglichkeit und Energieeinsatz eine ideale Versammlungsstätte ist. Seit Mitte des Jahres 2000 werden Veranstaltungen mit 800 bis 1000 Besuchern abgehalten. Der mittlere Jahresheizwärmebedarf von 2001 und 2002, bezogen auf die mittlere Gradtagzahl von 3.500 incl. 15 % Zuschlag (fiktiver Anlagenverlust und „Warmwasseranteil“) entspricht 20,23 kWh/m³·a bzw., bezogen auf Raumhöhen von 2,6 m, 63,12 kWh/m³·a. Dies wären 1,9 l Öl/m³·a oder 6 l/m³·a (bei 2,6 m Raumhöhe) für Wohnhausbedingungen. Dieser Verbrauch entspricht der Parole des Bauministeriums, ausgegeben für Wohnbauten zum Inkrafttreten der neuen Energieeinsparverordnung: „max. 7 l/m³·a“, trotz über 11 m zusammenhängendem Großvolumen, ungünstigem A/V-Verhältnis und minimalem Dämmstandard. Der geringe Energiebedarf ist im Wesentlichen also die physikalische Folge des Heizens ohne Einsatz der Raumluft als Heizmedium, woraus auch die konservatorische und die physiologische Qualität des Raumklimas folgen.

9. DIN-NORMEN/REGELN DER TECHNIK/STAND DER TECHNIK/VEREINBARUNGEN IM BAU-VERTRAG

Zitate in Anführungszeichen, Anmerkungen in Klammern

9.1 GÜLTIGKEIT VON DIN-NORMEN IN DER RECHTSPRECHUNG

„Meersburger Urteil“, Az. 4/C33-35/83, Bundesverwaltungsgericht Meersburg 22.05.1987:

„Die Normenausschüsse des Deutschen Instituts für Normung sind so zusammengesetzt, daß ihnen der für ihre Aufgabe benötigte Sachverstand zu Gebote steht. Daneben gehören ihnen aber auch Vertreter bestimmter Branchen und Unternehmen an, die deren Interessenstandpunkte einbringen. Die Ergebnisse ihrer Beratungen dürfen daher im Streitfall nicht unkritisch als `geronnener Sachverstand´ oder als reine Forschungsergebnisse verstanden werden.

Zwar kann den DIN-Normen einerseits Sachverstand und Verantwortlichkeit für das allgemeine Wohl nicht abgesprochen werden. Andererseits darf aber nicht verkannt werden, daß es sich dabei zumindest auch um Vereinbarungen interessierter Kreise handelt, die eine bestimmte Einflußnahme auf das Marktgeschehen bezwecken. Den Anforderungen, die etwa an die Neutralität und Unvoreingenommenheit gerichtlicher Sachverständiger zu stellen sind, genügen sie deswegen nicht. Besondere Zurückhaltung ist gegenüber technischen Normen dort geboten, wo ihre Aussagen Bewertungen entgegengesetzter Interessen einschließen, die an sich einer demokratisch legitimierten politischen Entscheidung in der Form einer Rechtsetzung bedürften. Als Ersatz für derartige rechtliche Regelungen sind sie ungeeignet“.

9.2 HINWEISE FÜR DEN ANWENDER VON DIN-NORMEN

Regel-Vorspann der DIN-Taschenbücher. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

„Die Normen des Deutschen Normenwerkes stehen jedermann zur Anwendung frei. Festlegungen in Normen sind aufgrund ihres Zustandekommens nach hierfür geltenden Grundsätzen und Regeln fachgerecht. Sie sollen sich als anerkannte Regeln der Technik einführen. Bei sicherheitstechnischen Festlegungen in DIN-Normen besteht überdies eine tatsächliche Vermutung dafür, daß sie anerkannte Regeln der Technik sind. DIN-Normen sind nicht die einzige, sondern eine Erkenntnisquelle für technisch ordnungsgemäßes Verhalten im Regelfall. Es ist auch zu berücksichtigen, daß DIN-Normen nur den zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe herrschenden Stand der Technik berücksichtigen können.

Durch das Anwenden von Normen entzieht sich niemand der Verantwortlichkeit für eigenes Handeln. Jeder handelt insoweit auf eigene Gefahr. Jeder, der beim Anwenden einer DIN-Norm auf eine Unrichtigkeit oder eine Möglichkeit einer unrichtigen Auslegung stößt, wird gebeten, dies dem DIN unverzüglich mitzuteilen, damit etwaige Mängel beseitigt werden können“. (Beispiel: Strahlungsheizanlagen werden bei DIN-gemäßer Leistungs- und Wärmebedarfsberechnung überdimensioniert, so daß der aus dem Wirkungsprinzip folgende Kostenvorteil zunichte gemacht wird).

9.3 ALLGEMEIN ANERKANNTE REGELN DER TECHNIK/STAND DER TECHNIK

Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. Kommentar. Pott und Dahlhoff, 1990.

„Die Einführung des Begriffs der allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) ist von weit reichender haftungsrechtlicher Bedeutung. Er ist vom bloßen `Stand der Technik´ abzugrenzen. Letzterer zeigt lediglich, was technisch machbar ist, setzt aber keine Bewährung in der Praxis voraus. Damit fehlt dem Stand der Technik eine wesentliche Voraussetzung für die allgemeine Anerkennung als technische Regel.

Die Verwendung von (nur) behördlich/amtlich zugelassenen Baustoffen, Bauteilen oder technischen Systemen genügt weder den Anforderungen der 1.

Grundleistung, noch denen des § 4 Nr. 2 Abs. 1 VOB/B. Denn derartige Zulassungen werden regelmäßig für neue, noch nicht abschließend erprobte Materialien etc. beantragt und erteilt, die zwar dem `derzeitigen Stand der technischen Erkenntnisse´ entsprechen, für die aber die praktische Bewährung und damit eine unverzichtbare Voraussetzung für die Anerkennung als technische Regel noch aussteht (s. Hinweis in der Zulassungsurkunde). Durch die Berufung auf eine `bloße´ behördliche Zulassung bei noch ausstehender Anerkennung als a.a.R.d.T. ist daher bei Funktionsmängeln keine Freistellung von der Haftung gerechtfertigt“. (Dies gilt z.B. für die sog. Betonkernaktivierung als angeblich ideale Wandheizung mit Kühlfähigkeit, deren Herstellungskosten im Vergleich zur Temperierung honorarfreundlich hoch sind und deren Regelung physikalisch bedingt aufwendig ist).

9.4 BAUVERTRAG: ABWEICHUNG VON DEN A.A.R.D.T UND NORMEN

VOB für Architekten und Ingenieure. Aktuelles Praxishandbuch. Von Motzke, Gross, Kromik et alii, 1999.

„Das Werkvertragsrecht fordert als Leistung den Erfolg und nicht die Handlung (z. B. die Durchführung einer Maßnahme nach DIN). Es kann daher ein anderer Technikstandard als der in den a.a.R.d.T. oder den DIN-Normen niedergelegte vereinbart werden, wenn dadurch ein mangelfreies zweckgerechtes Werk zu gewährleisten ist. Die dem zu Grunde liegenden Regeln können auf Praxis beruhen, müssen also weder durch Regelwerksetzer wie z. B. DIN, VDI, VDE erarbeitet worden, noch in den a.a.R.d.T. enthalten sein. Diese geben nämlich die wissenschaftlichen, technischen und handwerklichen Erfahrungen im Bauwesen wieder, die sich ändern können. Juristisch maßgeblich sind daher die im Bauvertrag getroffenen Vereinbarungen“. (Es ist also formaljuristisch korrekt, wenn z. B. zur Herstellung einer Temperieranlage als alleinige Vertragsbasis diese Schrift und die in ihr enthaltenen Regeln vereinbart werden. Es zeigt sich immer wieder, daß nur unter Anerkennung der hier zusammen gefaßten Langzeiterfahrung einer Fachbehörde zugleich die Herstellungs-Mehrkosten, die bei DIN-Betrachtung anfallen, vermieden und die physikalischen Nebeneffekte, die aufwendige anerkannte Sanierungsmaßnahmen ersetzen, erreicht werden können).

10. ZUSAMMENFASSUNG

Als Fazit langjähriger Erfahrung mit einfachsten Formen von Wandheizung und kontrollierter Lüftung konnten die baulichen und haustechnischen Voraussetzungen für ein konservatorisch ideales Gebäude mit physiologisch günstigen Raumklimabedingungen und geringem Energiebedarf bezeichnet werden. Die aufgeführten Planungsvorgaben sind im Prinzip für alle Konstruktions- und Nutzungsarten von Gebäuden einschließlich Wohnbauten gültig.

Ein *Museumsgebäude* mit Sockeltemperierung bei begrenzter Rohrheizleistung und mit optimierter Dämpfungsfähigkeit der Gebäudehülle (durch Fugenabdichtung, außenliegenden Sonnenschutz, geringe kontrollierte Lüftung bei Belegung) fungiert durch seine thermisch sanierte Architektur als „Großvitrine“: Die Oberflächentemperatur seiner Raumschale ist homogenisiert und gleitet langsam im Tagesgang und Jahresverlauf. Dabei folgt sie der langsamen Änderung der mittleren Außentemperatur, von der die saisonale *mittlere* absolute Außenluftfeuchte bestimmt wird, also mit dieser ebenfalls langsam gleitet. Die Folge des Zusammenspiels von Raumtemperierung und kontrollierter Minimallüftung ist eine im gesamten Raum homogene, *kurzzeitstabile* relative Luftfeuchte, die ohne größeren Regelungsaufwand im Jahresverlauf zwischen konservatorisch sinnvollen saisonalen Grenzwerten gleitet: > 40% im Winter, wenn Luftbefeuchtung bei noch besucherfreundlichen Temperaturen vermieden werden soll; < 65% im Sommer in erdberührten Räumen, wenn hier Luftentfeuchtung und Trockenhaltung der Bausubstanz durch leichtes Temperieren geschieht. Saisonal sinnvolle Raumtemperaturen im Hochsommer von über 20°C, die in dieser Zeit

in Obergeschossen auch in schwerer Bausubstanz ohne Beheizung vorliegen, müssen in erdberührten Räumen durch Wärmezufuhr erst hergestellt werden. Bei Temperierung stellen sich erfahrungsgemäß Werte von unter 60% ein. Dadurch ist die Gleichgewichtsfeuchte des Materials von Raumschale und Ausstattung normalisiert und ihre Änderung bleibt unschädlich, da sie sich, selbst bei Betriebsstörungen, wegen der Speichereffekte nur gleitend ändern kann. Pflanzlicher bzw. mikrobieller Befall kann nicht neu entstehen, vorhandener Befall nicht weiter aktiv sein. Technik zur Luftentfeuchtung entfällt, der Luftbefeuchtungsbedarf minimiert sich.

In *Großräumen* wie Kirchen erlaubt die beim Temperieren ruhende Raumluft die Ausbildung einer „warmen Wanne“ im Aufenthaltsbereich des Menschen. Bei Temperierung der Orgel durch eine frei vor dem Wandsockel durch das Gehäuse geführte angestrichene Rohrschleife entfallen Korrosion, Schimmelbildung und regelmäßiger Stimmungsanfall. Bei *Stahl-Glassassaden* werden Heizrohre thermisch getrennt (mit Plastikhaltern) in den Halteapparat integriert. Bei *Wohn- und Büronutzung* bzw. in Gebäuden ohne Anspruch an Klimakonstanz entfällt die Leistungsbegrenzung der Heizrohre und die Fensterlüftung ist energetisch unproblematisch.

Der hohe Aufwand konventioneller Verfahren bei Feuchte- und Schadsalzproblematik ist darin begründet, daß kein Bezug hergestellt wird zwischen der Bauteil-Oberflächentemperatur und dem wichtigsten Bewegungsmechanismus der Wassermoleküle in Kapillaren – der *Wasserstoffbrückenbildung*. Es ist daher kaum bekannt, daß bereits eine geringfügige Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperatur eines Bauteils sowohl die – den U-Wert verschlechternde – Feuchteaufnahme aus der Raumluft durch Kapillarkondensat verhindert (durch die erhöhte Molekularschwingung an der „inneren“ Oberfläche des Materials, den Kapillarwänden), als auch die Feuchte- und Schadsalzwanderung zum Stillstand bringt (durch das daraus folgende, nach außen gerichtete geringe Wärmegefälle im Bauteil). Verbesserung der Fugensituation (Öffnungs-, Bau- und Mauerwerksfugen) und Minimaltemperierung stellen also die wirksamste und kostengünstigste Art der Konservierung von Architektur und Raumaustattung dar. Der dazu erforderliche geringe Energiebedarf erlaubt den Einsatz der Methode zum Feuchteschutz von Baudenkmälern, Exponatgebäuden in Freilichtmuseen und behausten Ausgrabungen, anstelle der üblichen materialersetzenden „Erhaltungsmaßnahmen“. Entsprechend besteht bei Sanierung von Altbau und Baudenkmal ein wesentliches Einsparpotential: Historisches Mauerwerk bleibt nach Ausfugung trotz Salzbelastung erhalten, Putze werden ausgebessert, nicht durch „Sanier“-Putz ersetzt, für „Opfer“-Putz besteht kein Anlaß, da sich die Funktionen von Feuchtesperre, Salzbehandlung und Sanierputz wie auch die Funktion der Wärmedämmung aus der Art der Wärmeverteilung ergeben. Dies gilt auch für den Feuchteschutz der Dachflächen in genutzten Dachräumen, wo stärkere Holzschalungen (z. B. 9 cm) als Wärmedämmung ausreichen. Es genügt die Reparatur und Abdichtung vorhandener Kasten- oder Verbundfenster.

Dank des bei Temperierung wirksamen Zusammenhangs von Trocknung der Gebäudehülle, Verbesserung der Solar- und Erdwärmeakkumulation und geringer Raumlufttemperatur eröffnet sich für die *Bestands- und Baudenkmalpflege* ein Ausweg aus dem „Wärmeschutz-Dilemma“. Die Energieeinsparung in ungedämmten temperierten Massivbauten beweist, dass die seit den 1960er Jahren festgestellten erhöhten Heizwärmeverluste, deren Verringerung seit dem Energieschock 1972 durch Außendämmung unter Beibehaltung der „Luft“-Heizung versucht wird, eben nicht durch das hohe Rohgewicht des Baumaterials verursacht werden, das unter natürlichen Bedingungen (bei dem stets „instationären“ Tag-Nacht-Geschehen und der nur zeitweise vorhandenen Solareinstrahlung) wegen seines hohen thermischen Wechselstromwiderstandes zum Vorteil wird, sondern durch die fehlerhafte Wärmeverteilung der „neuen“ luftheizenden Verfahren (Heizkörper, Klimaanlage). Seit deren flächendeckender Einführung (1960er Jahre!), die in Altbauten meist unter Ersatz vorhandener, die Luft nicht

aufheizender Kachelofenheizung erfolgte, treten Wärmeverluste auf dem *Luftweg* auf, deren Größenordnung zu Zeiten der Strahlungsheizung unbekannt war. Weltweit ist seitdem nämlich die in den Gebäuden von den Heizeinrichtungen erzeugte Wärme in einer großen Warmluftmenge enthalten, die z. T. ungenutzt zur Decke strömt bzw. im Gebäude umher vagabundiert, z. T. das Gebäude über Fugen und Öffnungen ohne Speichereffekt verläßt. Zugleich ist im Winter die Materialfeuchte derjenigen Außenbauteile, deren Versorgung wegen des falschen Weges der Warmluft zu gering ist, durch Kapillarkondensat höher als im Sommer.

Das Phänomen, daß sich bei kontinuierlichem Heizbetrieb die Oberflächentemperatur ungedämmter, nicht unterkellerner Böden an die Raumlufttemperatur angleicht, ist bereits bei Konvektionsheizung zu beobachten, und zwar auch in Großräumen wie Industriehallen mit Luftheizung. Es beruht auf der durch die Erdwärme unterstützten Wärmeakkumulation im trocknenden Bodenaufbau [1]. Während bei „Luftheizung“ die Angleichung erst nach einem Dreivierteljahr eintritt und die Oberflächentemperatur in Außenwandnähe abfällt, verstärken sich bei Temperierung alle Effekte: Durch die Randbeheizung wird der Abfluß der Erdwärme in die unterkühlte Außenzone behindert, so daß die Oberflächentemperatur ab 10 cm Näherung zur Außenwand *ansteigt* und sich die Zeitspanne der Angleichung auf bis zu 3 Monate verkürzt. In diesem Zusammenspiel von langsamem Steigern der Materialtemperatur und dadurch verbesserter Erdwärmeakkumulation ist auch begründet, daß behaute archäologische Ausgrabungen durch Temperierung auf einfachste und schonende Weise konserviert werden können.

Aus dem gleichen Grund ist auch der Energiebedarf, der nach den ersten Wochen des Trockenheizens außerhalb der Heizperiode zum Trockenlegen und Temperieren und zur Luftentfeuchtung von Kellern durch Sockelheizrohre anfällt, so gering, daß neben der auf konventionellem Wege gar nicht erreichbaren ganzheitlichen Gesamtwirkung auch der ökonomische Vergleich für die Temperierung als Sanierungsmaßnahme spricht: Im Keller des oben dargestellten ehemaligen Fabrikgebäudes wurden die Ziele bei einem Raumvolumen von 1.280 m³ (340 m³) im Juli 2001 bei 20°C Raumtemperatur mit einer Dauerleistung von 2,1 kW erreicht (1,6 W/m³). Ein Luftentfeuchter mit gleicher Leistung würde salzbedingte Putzschäden verstärken, die Raumlufttemperatur stärker anheben und Lärm machen.

LITERATURANGABEN

- [1] Klopfer, H.: Müssen Industriefußböden wärmegeklämt werden? In: Beton (1995), Heft 6, S. 426f.
- [2] Käferhaus, J.: Wärmeflußanalyse. s. CD
- [3] Holmberg, J.: Relative Humidity in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms, a Literature Study. 1. schwedischer Beitrag zum Forschungsprojekt EUREKA 1383 PREVENT. Hrsg. Technische Universität Wien. Wien 1996.
- [4] Thomson, G.: The Museum Environment. London 1986.
- [5] Weber, H.: Fassadenschutz und Bausanierung. Ehningen bei Böblingen 1988, S. 5f.
- [6] Torraca, G.: Poröse Baustoffe. Wien 1986, S. 12ff, S. 21ff.
- [7] Engelbrecht, M.: Die Temperierung – ein alternatives Heizsystem. Diplomarbeit. München 1996, S.92.
- [8] Camuffo, D.: Wall Temperature and the Soiling of Murals. In: Museum Management and Curatorship (1991) 10, S. 373ff. Winkelmann, U.: Staub im Museum. MUSEUM AKTUELL (2003) Nr. 97, S. 4183 und 4184.
- [9] Recknagel, Sprenger, Hönnmann: Heizung + Klimatechnik. München 1992, S. 798.
- [10] Führer zu archäologischen Denkmälern in Bayern, Franken 1, Stuttgart 1984, S. 71.