

HAWK - HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFT UND KUNST

*Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer*

Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen in Hildesheim

**Vorlesungsskripte zur Bauphysik  
Masterstudium**

Thermisch – Energetische  
Gebäudesimulation

## Thermisch- energetische Simulationsberechnungen für Gebäude

Mit den Weiterentwicklungen in der Bautechnik und den Veränderungen der gesetzlichen Normen und Verordnungen erlangt die bauphysikalische Bewertung von Baumaßnahmen des Neubaus, aber auch der bestehenden, zumeist historischen Bausubstanz, eine zunehmende Gewichtung.

Hierbei gilt es, die Fragen auf den Gebieten des Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutzes zu beantworten, ohne die enge Verknüpfung dieser einzelnen Bereiche außer Acht zu lassen.

Eine der Möglichkeiten das zukünftige Verhalten von Gebäuden und Bauteilen in Hinblick auf ihr wärme- und feuchtetechnisches Verhalten zu beschreiben ist der Einsatz von dynamischen Gebäude- und Bauteilsimulationsberechnungen. Hierbei besteht die Möglichkeit, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, eine Optimierung der Gebäude und Bauteile durchzuführen und die Gebrauchstauglichkeit der Baustoffe nicht zu gefährden.

### Grundlagen

Die thermische Bauphysik befasst sich mit Energie- und Stoffströmen die von innen, bedingt durch die Gebäudenutzung, und von außen, infolge des Außenklimas, auf ein Gebäude einwirken.

Diese thermischen und auch hygrischen Prozesse verhalten sich zeitabhängig, d. h. instationär. Das instationäre Verhalten von Wärmeübertragungsvorgängen kann auf den stationären Sonderfall reduziert werden, wenn es sich um bauphysikalische Nachweisberechnungen, insbesondere für den Winterfall, handelt. Werden jedoch zeitliche Verläufe von Temperatur und Feuchte benötigt, so muss das instationäre Verhalten von Wärme- und Feuchtestrom berücksichtigt werden.

Die mathematische Modellierung instationärer Vorgänge erfolgt mit Differentialgleichungen, deren analytische Lösungen immer mit idealisierten Anfangs- und Randbedingungen verbunden sind. Die Ergebnisse analytischer Betrachtungen instationärer Wärmeübertragungsvorgänge sind zwar in der Regel geeignet um den physikalischen Sachverhalt hinreichend genau zu beschreiben, den modernen Planungsanforderungen sind diese zum Teil zeitaufwändigen Methoden indes oftmals nicht mehr gewachsen. Sensitivitätsanalysen, Variantenrechnungen, realitätsgetreue Nachbildung aller Einflussfaktoren, insbesondere der Außenklimakomponenten, und eine auch für den Laien verständliche grafische Präsentation der Berechnungsergebnisse sind mit analytischen Rechenverfahren wenn überhaupt nur begrenzt zu realisieren.

Um das thermische Verhalten von Gebäuden rechnerisch nachzuvollziehen, werden heutzutage vermehrt numerische Lösungsmodelle verwendet, die im Zuge immer leistungsfähiger werdende Computertechnik auch auf dem PC-Sektor bereits weite Verbreitung gefunden haben. Für diese Art der bauphysikalischen Berechnungen hat sich der Begriff *thermisch-energetische Gebäudesimulation* durchgesetzt, wobei neben thermischen Vorgängen auch hygrische, fotometrische und in Ansätzen auch aerodynamische Vorgänge sowie beliebige Massstrombilanzen mit einbezogen werden können.

Ferner beschränken sich die Berechnungsmodelle nicht nur auf das thermische Verhalten des Gebäudes. Auch die Energie- und Stoffströme der im Gebäude befindlichen Anlagentechnik können entweder separat oder im Zusammenspiel mit dem Baukörper realitätsnah nachvollzogen werden. Mit der *thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagensimulation* eröffnen sich somit Möglichkeiten das Betriebsverhalten gebäudetechnischer Anlagen, insbesondere auch unter dem Aspekt der Regelungstechnik, einem planerischen Optimierungsprozess zu unterziehen.

Die Verfügbarkeit geeigneter Simulationsprogramme ist sehr groß. Dementsprechend groß sind auch die Vielfalt der verwendeten Berechnungsmodelle und die Streuung der Simulationsergebnisse bei identischen Aufgabenstellungen. Bis zum heutigen Tag hat dieser Umstand die Akzeptanz der thermischen Gebäudesimulation bei potenziellen Auftraggebern geschmälert. Lange Zeit galt das an der Universität Lund entwickelte Programm JULOTTA als Referenzprogramm und Eichnormal für andere Simulationsprogramme. Da es aber keine verbindlichen Vereinbarungen über die Art und Weise der Verifikation gab, hat sich hieraus auch kein einheitlicher Qualitätsstandard entwickeln können.

Der Forderung nach einer Qualitätssicherung der im Planungsprozess immer häufiger praktizierten und inzwischen zu einem eigenständigen Leistungsbild herangereiften Gebäudesimulation wird in Deutschland erstmals in der VDI-Richtlinie 6020 (Ausgabe Mai 2001) nachgekommen. In dieser Richtlinie werden die Mindestanforderungen an die Rechenverfahren formuliert sowie die Randbedingungen und Bewertungskriterien für eine Gebäudesimulation entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall vereinheitlicht. Ferner werden Testbeispiele angegeben, mit denen beliebige Simulationsprogramme verifiziert und parametrisiert werden können. Im Rahmen der in der VDI-Richtlinie angegebenen Testbeispiele wurden die Simulationsprogramme DOE-2, DSTHERM, GEBSIMU, TAS und TRNSYS verwendet. Bei diesen Programmen handelt es sich um repräsentative Vertreter unterschiedlicher Berechnungsmodelle mit denen der Qualitätsstandard im Sinne der VDI 6020 gewährleistet werden kann.

Noch detailliertere Angaben bezüglich standardisierter Randbedingungen und Validierungsverfahren für Simulationsprogramme sind in E DIN 4108-20 (Entwurf Juli 1995) und E DIN EN ISO 13792 (Entwurf Oktober 1997) zu finden. Diese beziehen sich insbesondere auf das thermische Verhalten von Gebäuden ohne Anlagentechnik während der Sommerperiode.

Das Simulationsmodell

Das Informationsflussschema

Der Informationsfluss einer üblichen Gebäudesimulation lässt sich stark vereinfacht wie folgt darstellen:

Ablaufdiagramm Gebäudesimulationsberechnung

Außenklimadaten

Die Außenklimadaten sind in der Regel als externe Datensätze bereitzustellen, wobei alle erforderlichen meteorologischen Daten mindestens als Stundenwerte vorliegen sollten. Für eine thermisch-energetische Gebäudesimulation werden mindestens folgende Klimakomponenten benötigt:

Außenlufttemperatur

Außenluftfeuchte

Sonnenstrahlung (horizontal oder normal)

evtl. Windgeschwindigkeit

Für die Simulation von Jahresverläufen haben sich so genannte Testreferenzjahre bewährt. Diese Testreferenzjahre (TRY) sind die Sammlung stündlicher Daten aller meteorologischen Parameter über ein gesamtes Jahr. Da sich ein TRY aus 29 charakteristischen Witterungsperioden eines Jahres und einer Region zusammensetzt, werden die typischen jahreszeitlichen Witterungserscheinungen der jeweiligen Region wie

dergegeben.

Bezüglich der Monatsmittel sind die TRY statistisch abgesichert. Sie enthalten jedoch keine Maximalwerte oder Häufigkeiten, wie diese im Verlauf extremer Klimajahre auftreten können. Deswegen sind die TRY in erster Linie auch nur für energetische Betrachtungen oder Klimabetrachtungen, bei denen eine statistische Auswertung für den *Normalfall* im Vordergrund steht, geeignet. Zur Überprüfung von Maximalbelastungen bei extremen klimatologischen Verhältnissen oder Lastverläufen für eine anlagentechnische Bewertung, sollte auf andere Außenklimadaten (z. B. VDI 2078) zurückgegriffen werden

Der Deutsche Wetterdienst vertreibt Testreferenzjahre für 12 Klimaregionen, die sich jedoch vorläufig noch auf die alten Bundesländer Deutschlands beschränken. Für ausgewählte europäische Länder stehen ferner so genannte Short Reference Years (SRY) zur Verfügung, die von der Kommission der EU, Generaldirektorat XII für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung entwickelt wurden und über die EU-Büros zu beziehen sind.

Modell zur Umrechnung der Strahlungsdaten auf die Flächenorientierungen

Im Rahmen der Strahlungsumrechnung müssen zunächst die astronomischen Randbedingungen bezüglich Deklination und Ekliptik der Erdkreisbahn berücksichtigt werden. Als Berechnungsgrundlage der Simulation wird üblicherweise die wahre Ortszeit (WOZ) verwendet. Sofern die Strahlungsdaten in Zonenzeit (z. B. mitteleuropäischer Zeit) vorliegen, wie es in der Regel bei kommerziellen Datensätzen (TRY, SRY) der Fall ist, muss eine Umrechnung über die Längengradbezogene Zeitdifferenz und die Zeitgleichung, die sich aus der Exzentrizität der Erdumlaufbahn ergibt, vorgenommen werden. In diesem Fall muss der Längengrad des Gebäudestandortes bekannt sein. Für die Berechnung des Sonnenstandes wird weiterhin der Breitengrad des Standortes benötigt. Die Strahlungsdaten in den zu verwendenden Klimadatensätze liegen in der Regel getrennt in Direkt- und Diffusanteil für horizontale Flächen vor (z. B. TRY, SRY). Für diesen Anwendungsfall ist in der VDI-Richtlinie 6020 ein Verfahren für die Umrechnung auf die jeweiligen Flächenneigungen und Himmelsorientierungen der Gebäudeaußenflächen angegeben. Dieses Modell ist in allen gängigen Simulationsprogrammen implementiert. Strahlungsdaten, die für die Normalrichtung zur Sonne vorliegen, können auch in den meisten Programmen verarbeitet werden. In besonderen Fällen kann es auch vorkommen, dass nur Messwerte der Gesamtstrahlung ohne Unterteilung in Direkt- und Diffusanteil vorgegeben sind. In diesem Fall kann eine näherungsweise Bestimmung dieser Strahlungsanteile über unterschiedliche Korrelationsmodelle vorgenommen werden.

Bauliche Verschattungssituationen, wie sie z. B. durch Vorsprünge oder Nachbargebäude hervorgerufen werden, müssen vor allem dann Berücksichtigung finden, wenn es sich bei der Empfängerfläche um ein transparentes Außenbauteil handelt. Hierzu wird ein Besonnungsfaktor  $f_s$ , der das Verhältnis von direkt besonnener Fläche zur entsprechenden Gesamtfläche ausdrückt, ermittelt. Die Berechnung von  $f_s$  ist u. a. in E DIN EN ISO 13792 definiert.

Das thermische Modell des Gebäudes

Das thermische Gebäudemodell setzt sich im Wesentlichen aus den beiden Teilmodellen

für Konvektion und Strahlung im Raum und

für Wärmedurchgang durch Wände und Fenster

zusammen.

Die Bilanzierung der Wärmeströme von Konvektion und Strahlung erfolgt innerhalb so genannter Zonen, wobei diese Zonen einen Raum, eine Raumgruppe oder auch ein Gebäude darstellen können. Die Festlegung der Zonen für eine Gebäudesimulation richtet sich nach der jeweiligen Aufgabenstellung und muss vom Programmanwender definiert werden.

Für die Lösung des Wärmebilanzsystems innerhalb einer Zone gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Modellansätze:

Komplexe Netzwerkmodelle die die physikalischen Zusammenhänge sehr exakt nachbilden, indem sie z. B. die räumlichen Einstrahlverhältnisse der Wärmestrahlung im Raum berücksichtigen. Diese Netzwerkmodelle setzen vom Anwender die Eingabe eines geometrischen Raummodells voraus.

Vereinfachte Stern- oder Temperaturknotenmodelle. Bei diesen Wärmebilanzmodellen wird der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Wänden und die konvektive Wärmeübertragung von den Wänden an die Raumluft jeweils durch fiktive Temperaturknoten repräsentiert (Zweisternmodell). Eine weitere Vereinfachung besteht darin, die beiden Temperaturknoten zu einem kombinierten Temperaturknoten für Strahlung und Konvektion zusammenzuführen (Einsternmodell). Die thermodynamische Ankopplung der Bauteiloberflächen an den Temperaturknoten sowie die Umrechnung der Knotentemperatur in die Raumlufttemperatur erfolgt über approximierte Zusammenhänge. Diese Modellvereinfachung benötigt keine Raumgeometrie, so dass sich der Bearbeitungsaufwand und die Rechenzeiten gegenüber den ausführlichen Netzwerkmodellen deutlich verringern. Dafür müssen jedoch zum Teil Einbußen bei der Ergebnisgenauigkeit in Kauf genommen werden.

Der Wärmedurchgang durch die Bauteilkonstruktionen wird mit der Fourierschen Differentialgleichung beschrieben. Im Rahmen einer Gebäudesimulation ist es in der Regel ausreichend das dreidimensionale Wärmeleitungsproblem auf einen eindimensionalen Wärmeleitvorgang zu reduzieren und Wärmebrücken gegebenenfalls extra zu erfassen. Für die numerische Lösung der Wärmeleitgleichung haben sich drei unterschiedliche Methoden bewährt:

Finite-Differenzen-Verfahren. Dieses Verfahren ist im Bereich der Wärmetechnik weit verbreitet. Hierbei werden die Differentialquotienten nach Ort und Zeit durch Differenzenquotienten ersetzt und zeitschrittweise aufgelöst. Je kleiner die Maschenweite der Ortsdiskretisierung und je enger die Konvergenzgrenzen gesetzt werden, desto genauere Ergebnisse werden erzielt, wobei die Rechenzeit zunimmt. Ein Vorteil des Differenzenverfahrens besteht darin, dass auch innerhalb des Bauteiles ein Temperaturverlauf nachgebildet wird, so dass z. B. auch Temperaturen im Bauteilinnern ermittelt werden können.

Gewichtsfaktorenmethode. Diese Methode beruht auf dem Modellansatz, dass das Bauteil (z. B. die Wand) als proportionales Übertragungsglied mit einer Verzögerung 1. Ordnung (PT1-Glied) abgebildet wird. Das dynamische Verhalten des Bauteiles wird durch eine Übertragungsfunktion  $G(p)$  beschrieben, welche nach Multiplikation mit einer beliebigen dynamischen Eingangsfunktion  $E(p)$  eine Laplace-transformierte Ausgangsfunktion  $A(p)$  ergibt. Transformiert man dieses Problem aus dem Laplace- in den Zeitbereich, so lässt sich die Systemantwort  $a(t)$  aus einem Faltungsintegral herleiten, wobei die Übertragungsfunktion  $G(p)$  zur Gewichtsfunktion  $g(t)$  wird. Um das Faltungsintegral einer numerischen Lösung zuführen zu können, muss es durch eine Summe approximiert werden. Die darin enthaltenen Funktionswerte  $g(\Delta t)$  werden als Gewichtsfaktoren (Übertragungsfaktoren) bezeichnet. Die Gewichtsfaktoren beinhalten die wärmetechnisch dynamischen Eigenschaften des Bauteiles für jeden Zeitschritt (in der Regel ist  $\Delta t = 1 \text{ h}$ ) bis zum eingeschwungenen Zustand. Das dynamische Verhalten des Bauteiles wird dann durch das zeitschrittweise Auflösen der approximierten Summenformel  $a(\Delta t) = f(e[\Delta t], g[\Delta t])$  nachgebildet, wobei  $e(\Delta t)$  eine beliebige

Eingangsfunktion, z. B. eine Temperaturwelle, sein kann. Aufgrund der Approximationen sind die Gewichtungsfaktoren nur für einen bestimmten Wertebereich gültig, was die Universalität des Modells und damit des Simulationsprogramms u. U. einschränken kann. Da keine Iterationen erforderlich sind, ergeben sich dafür sehr geringe Rechenzeiten und keinerlei Konvergenzprobleme. Temperaturverläufe im Inneren des Bauteiles können aufgrund der „Black-Box“-Betrachtungsweise nicht ermittelt werden.

Ersatzmodelle. Diese sind in thermische und elektrische Ersatzmodelle zu unterscheiden, wobei das Modell von *Beuken* (Beuken-Modell) das älteste und bekannteste ist. Hierbei handelt es sich um ein elektrisches Analogiemodell, welches auf der Tatsache beruht, dass die Wärmeleitung in einem festen Körper und die Vorgänge in einem idealisierten elektrischen Kabel mit dem gleichen Typ Differentialgleichung beschrieben werden können. Auf diese Weise kann jedes beliebige Bauteil (z. B. Wand) durch ein elektrisches Ersatzschaltbild dargestellt werden, wobei die Spannung das Analogon zur Temperatur und der elektrische Strom das Analogon zum Wärmestrom sind. Der Wärmedurchlasswiderstand wird durch einen ohmschen Widerstand und die thermische Speicherfähigkeit des Bauteiles schließlich durch eine elektrische Kapazität abgebildet. Wird die Wand in beliebig viele Scheiben zerteilt, entsteht ein System von Matrizen, deren Auflösung sehr viel Rechnerleistung benötigt. Hinzu kommt, dass die Überführung wärmetechnischer Aufgabenstellungen in das Beuken-Modell sehr aufwendig und für häufig wiederkehrende Problemstellungen nur bedingt geeignet ist. Der wesentliche Vorteil besteht jedoch darin, dass das Beuken-Modell bei einer Aufteilung in beliebig viele Wandscheiben eine beliebig hohe Rechengenauigkeit aufweist. Im Rahmen der VDI-Richtlinie 6020 wurde daher auch das Simulationsprogramm PSPICE, welches auf dem Beuken-Modell beruht, als Prüfinstrument für die Testbeispiele verwendet.

#### Zeitunabhängige Parameter

Zeitunabhängige Parameter sind Eingangsgrößen, die im Verlauf der Simulation konstant bleiben oder deren Abhängigkeiten von der Zeit oder den Temperatur- und Geschwindigkeitsverhältnissen so gering sind, dass der hieraus resultierende Fehler auf das Simulationsergebnis vertretbar klein gehalten wird.

Zu den zeitunabhängigen Parametern zählen in erster Linie:

Geometrische Daten des Gebäudes und der Bauteilaufbauten. Diese sind den bereitgestellten Planungsunterlagen zu entnehmen.

Stoffkennwerte der Baustoffe wie Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität. Hierzu können die Rechenwerte der DIN V 4108-4 verwendet werden.

Alle bauphysikalisch relevanten Parameter der transparenten Bauteile. Hierzu gehören beispielsweise Wärmedurchgangskoeffizient von Verglasung und Rahmen, Rahmenanteil, Gesamtenergiedurchlassgrad und Transmissionsgrad der Verglasung sowie wärmetechnisch relevante Angaben über Sonnenschutzvorrichtungen. Für diese Parameter ist die Heranziehung von Herstellerangaben günstig. Sofern diese nicht vorliegen, kann auch auf Rechenwerte aus DIN 4108-2 und DIN V 4108-4 zurückgegriffen werden.

Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung. Hierzu können die in E DIN EN ISO 13792 angegebenen Werte verwendet werden.

- Absorptionskoeffizienten für Sonnenstrahlung. Gemäß E DIN EN ISO 13792 wird eine Zuordnung der Absorptionskoeffizienten zu den Flächenhelligkeiten hell, mittel und dunkel als ausreichend genau angesehen.

#### Zeitvariable Inputs

Neben den Außenklimadaten, müssen vom Programmanwender noch weitere zeitabhängige, d. h.

dynamische Eingabewerte vorgegeben werden. Insbesondere handelt es sich hierbei um Zeitprofile, die mit der Gebäude-, bzw. Raumnutzung in Verbindung stehen, wie z. B. Belegungsdichte, Außenluftwechsel, Sonnenschutzaktivierung und zusätzliche innere Lasten.

Im Allgemeinen werden die nutzungsbedingten Vorgänge im Gebäude in Form von periodisch wiederkehrenden Tages- und Wochengängen definiert, wobei als Grundlage entweder die Arbeitszeiten des Personales, die Öffnungszeit des Gebäudes oder sonstige verifizierbare Nutzungszeiten heranzuziehen sind. Die Definition weiterer Zeitprofile innerhalb dieser Nutzungszeiten ist in der Regel nicht sinnvoll, da sie mehr oder weniger willkürlich gewählt werden müssen und dadurch die Verifizierbarkeit der Simulationsergebnisse erschweren.

Oftmals ist die Angabe von über den Nutzungszeitraum gemittelten Werten, die der Fachliteratur oder einschlägigen Normen zu entnehmen sind, ausreichend, wie z. B. mittlere Belegungsdichte, flächenbezogene Wärmegewinne in Büros und Wohnungen oder zeitlich gemittelter Außenluftwechsel usw..

Oftmals sollen für den Sommerfall die thermischen und energetischen Auswirkungen von extremen Stoßbelastungen berechnet werden. In diesem Fall sollten dann Extremwerte sowohl die inneren nutzungsbedingten Lastprofile, als auch die Außenklimadaten (z. B. VDI 2078) betreffend, verwendet werden, wobei die Berechnung gemäß VDI 6020 für nur fünf Tage durchzuführen ist.

Zeitvariable Inputs können auch erforderlich werden, wenn es darum geht eine Zeitplansteuerung der Anlagentechnik oder des baulichen Sonnenschutzes nachzubilden. Eine Verknüpfung mit zeitvariablen Outputs wie z. B. Temperatur, Feuchte, Wärmestrom oder Luftvolumenstrom ermöglicht ferner die Nachbildung von Grenzwertsteuerungen oder ganzen Regelszenarios entsprechender Anlagenkomponenten.

#### Typische Aufgabenstellungen für eine Gebäudesimulation

Das Anwendungsspektrum der thermisch-energetischen Gebäudesimulation im Rahmen einer bauphysikalischen Beratungstätigkeit ist breit gefächert. Nachfolgend sollen einige häufig wiederkehrende Aufgabenstellungen vorgestellt werden:

##### Klimasimulation für den Sommerfall

Thermische Gebäudesimulationen für den Sommerfall dienen dazu, den thermischen Komfort im Gebäude zu überprüfen und eine Überdimensionierung etwaiger Anlagentechnik zur Raumkühlung zu vermeiden. Im Rahmen einer Behaglichkeitsstudie ist es möglich, Planungssicherheit insbesondere in den nachfolgenden Punkten zu erlangen:

##### *Im Falle natürlich belüfteter Räume ohne Klimatisierung:*

Ob eine natürliche Belüftung von Räumen möglich ist oder ob der Einbau einer Belüftungsanlage (mit oder ohne Kühlung) notwendig wird.

Welche Belüftungsarten (Luftwechselzahlen) in natürlich belüfteten Räumen erforderlich werden und wie diese erreicht werden können, d. h. Auslegung der Lüftungsöffnungen.

Mit welchen Innenraumtemperaturen zeitweise gerechnet werden muss, wenn das Konzept einer natürlichen Raumlüftung verfolgt wird, ob und zu welcher Zeit kritische Innenklimaverhältnisse auftreten können.

In welchem Maße durch Zusatzmaßnahmen, z. B. Sonnenschutzverglasung, Sonnenschutzvorrichtungen, Verringerung der Verglasungsflächen, Optimierung der Wärmespeichermassen im Raum usw., eine Verbesserung der klimatischen Situation erreicht werden kann.

### *Im Falle klimatisierter Räume*

Wie sich verschiedene Sonnenschutzmaßnahmen bzw. bestimmte Gebäudeparameter auf den jährlichen Heiz- und Kühlenergiebedarf eines Raumes auswirken, wobei die gegensätzliche Wirkung von Sonnenschutzmaßnahmen auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf quantifiziert werden kann.

Mit welchen Innenklimaverhältnissen gerechnet werden muss, wenn die Kühlleistung nicht ausreichend ist, um die Wärmelast zu jedem Zeitpunkt sofort abführen zu können und wie durch Sonnenschutzmaßnahmen die Situation verbessert werden kann.

### Energiediagnosen

Im Rahmen einer Energiediagnose bei der der Energiehaushalt eines Gebäudes überprüft wird, können z. B. folgende Planungsschwerpunkte bearbeitet werden:

Berechnung des Energiebedarfes für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten

Energetische Optimierung von Bauteilkonstruktionen, Verglasungen, Gebäudeorientierung usw.

Aufdecken von Energieeinsparpotenzialen (z. B. Betriebsweise von haustechnischen Anlagen)

Dynamische Heiz- und Kühllastberechnungen als Auslegungshilfe klimatisierender Anlagen und Sonnenschutzvorrichtungen. Die dynamische Lastsimulation ersetzt nicht die Wärmebedarfsberechnung nach DIN 4701 oder die Kühllastberechnung nach VDI 2078.

Ermittlung von Wärmebedarfskennlinien für die Auslegung von Blockheizkraftwerken.

### Weitere Anwendungsfälle

Neben den oben genannten häufig anzutreffenden Planungsaufgaben können mit einer thermischen Gebäudesimulation noch eine Reihe weiterer Aufgabenstellungen gelöst werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien nachfolgend noch einige Beispiele genannt:

Überprüfung von Oberflächenkondensation bei bestimmten Klimazuständen in Verbindung mit entsprechenden Raumnutzungsprofilen

Energetische und regelungstechnische Überprüfung unterschiedlicher Klimatisierungskonzepte, z. B. wenn es darum geht den Klimatisierungsaufwand gering zu halten (Beispiel: Luftentfeuchtung mit Sommerheizung)

Untersuchungen zur hygienischen Behaglichkeit in Räumen, z. B. wenn es darum geht den hygienisch erforderlichen Außenluftwechsel über autarke Lüftung zu realisieren. Anhand einer Massestrombilanzierung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes kann der zeitliche Verlauf der Raumluftqualität in Abhängigkeit der Raumnutzung und der durch thermischen Auftrieb hervorgerufenen Fensterlüftung nachvollzogen werden.

Berechnung der zu erwartenden Temperaturschwankungen von Stahlprofilen um die daraus resultierenden Temperaturdehnungen zu ermitteln.

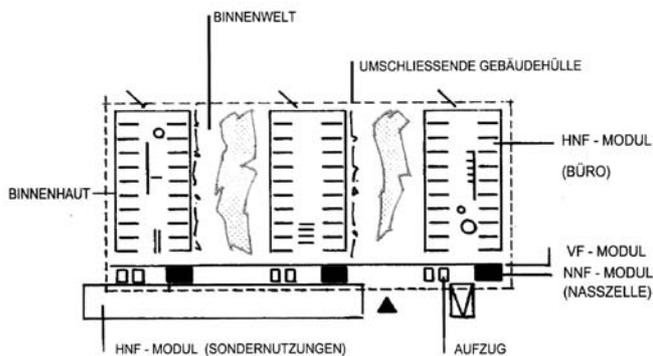
### Schlussbemerkung

Trotz der mathematischen Präzision der den Simulationsmodellen zugrunde liegenden Formeln, können auch thermisch-energetische Gebäudesimulationen nur Näherungsergebnisse hervorbringen. Vor allem sind die Ergebnisse immer in Verbindung mit den vereinbarten Annahmen und Randbedingungen zu sehen. Die größte Unwägbarkeit stellt dabei wohl das Nutzerverhalten dar. Im Simulationsmodell kann das Nutzerverhalten, wenn auch zeitlich veränderlich, nur starr periodisch und oftmals willkürlich definiert werden. In der Realität passt sich das Nutzerverhalten nach den unterschiedlichsten Gesichtspunkten den Umweltbedingungen an. Auch aus diesem Grund sind nicht die einzelnen Zahlenwerte der Ergebnisse, sondern vielmehr die zu erkennenden Tendenzen und Größenordnungen unterschiedlicher Variantenrechnungen das eigentliche Ergebnis einer Gebäudesimulation.

Voraussetzung ist jedoch immer, dass der Programmanwender die bauphysikalischen Grundkenntnisse besitzt und mit der Handhabung des entsprechenden Programms in Verbindung mit der VDI-Richtlinie 6020 vertraut ist.

### Fallbeispiel - Bauphysikalische Beurteilung eines Solargebäudes von Morgen

Es werden immer häufiger Bürogebäude gefordert, die definierte klimatische Verhältnisse garantieren, jedoch im Gegensatz zum Bürohausbestand auf technologisch andersartigen Konzepten beruhen. Neben repräsentativen Funktionen stellen sich diese Gebäude die Aufgabe, den Gesamtenergiebedarf und den CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber vollklimatisierten Gebäuden zu reduzieren und dem Nutzer das Empfinden einer "natürlichen Belüftung" zu ermöglichen.



### Company Typ, gehobener Standard

Dieser Gebäudetypus soll innerhalb einer umschließenden Gebäudehülle eine Binnenwelt erzeugen, die höchsten Ansprüchen an Komfort und Sicherheit genügt. Durch diese Bauweise können Standorte erschlossen werden, die schwierigen städtebaulichen Situationen (z. B. aufgrund von Schallimmissionen) gerecht werden.

Ein Gebäudetyp der neuen Generation ist der Neubau der LandesBauSparkasse in Hannover, der zur EXPO 2000 die Innovation der Gebäudetypologie unter dem Grundgedanken der EXPO 'Mensch, Natur, Technik' darstellen soll.

Der Neubau der LBS in Hannover-Bemerode umfasst vier 4-geschossige Verwaltungseinheiten als Kuben, die in ihrer Reihung durch Wintergärten voneinander getrennt sind. Die Kuben verfügen über ein Atrium, um das offene Kombibüros angeordnet sind. Die gesamten Nutzungsbereiche, die Erschließungsflächen sowie die Atrien und Wintergärten sind von einer Stahlgaskonstruktion überdeckt.

Hinsichtlich der großen Verglasungsflächen der Klimahülle werfen sich somit Fragen zur sommerlichen Temperaturentwicklung ('sommerlicher Wärmeschutz') auf. Für eine klimatische Betrachtung ist die Kenntnis der vorliegenden Wärmeströme von Bedeutung. Hierbei sind die Wärmeverluste (i. d. R. aus Transmission -TV- und aus Lüftung -V-) sowie die Wärmegewinne (i. d. R. aus Solaren Gewinnen -SG- und aus sog. Innenwärmekomponenten, d.h. Personen und Geräte -IG-) zu berücksichtigen.

Das Raumklima wird im Wesentlichen von den vier Komponenten, Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchte, Raumluftgeschwindigkeit, Raumumschließungsflächentemperatur bestimmt.

Die sommerliche Temperaturentwicklung stellt sich aus den Wärmeströmen unter Hinzuziehung, z. B. der Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe, dar. Eine der entscheidenden Faktoren für die Temperaturentwicklung sind die solaren Energiegewinne, speziell verursacht durch den Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  der Verglasung.

Entscheidend für die Behaglichkeit eines Menschen in einem Raum sind im Weiteren zusätzliche Parameter wie Aktivitätsgrad, Bekleidung, Aufenthaltsdauer, aber auch Bepflanzung und das Tageslicht.

#### Gebäudemodell

Bei den Berechnungen wurde das Gebäude in Hinblick auf seinen Standort in Hannover-Bemerode, Lage zur Flächennormale und Azimut, unter Berücksichtigung seiner Geometrie, der Bauteile und Baustoffe, der Nutzung und des Außenklimas als Modell für eine rechen-technische Klimasimulation abgebildet.

Auf der Grundlage der Planunterlagen konnte das Gebäude, für die rechen-technische Betrachtung, sinnföällig vereinfachend dargestellt werden. Zur Unterscheidung sind die Räume zu Raumzonen wie folgt zusammengefasst worden (s. auch Anhang A):

#### Zeichnerische Darstellung der Raumzonen

HOF	_x	-	Grünhöfe
BUES	_x	-	Büros Süd
BUEN	_x	-	Büros Nord
BUEW	_x	-	Büros West
KOMBI	_x	-	Kombizonen
ATR	_x	-	Atrien
ERSCH	_x	-	Erschließungszone
HDACH		-	Dachraum über den Büros (zu den Grünhöfen)
DACH		-	Dachraum über den Büros (zu den Atrien)

mit \_x = Ebene 0 bis 3

#### Baustoffe und Bauteile

Grundlage für die Ausbildung der Bauteile ist der Wärmeschutz-Nachweis des Büros PSP vom 06. November 1998.

In der nachfolgenden Tabelle sind die signifikanten Bauteilaufbauten angegeben. Für diese Darstellung wurden die Aufbauten vereinfacht gewählt.

**VARIANTE 6**

BAUTEIL	Beschreibung	
VERGLASUNG - Fassaden, - Dach, - Fenster West	Sonnenschutz- Verglasung (Floatglas extra weiß)	$k_V = 1.3$ ; $k_F = 1.4$ ; $g = 0.41$ $\tau = 0.67$ hier: Planisol/Planilux (Produktdatenblatt im Anhang)
SONNENSCHUTZ - Büro West	Sonnenschutz außen	$b = 0.2$ bzw. $z = 0.3$
FENSTER - Büro/Hof	Isolier- Verglasung	$k_V = 2.8$ ; $k_F = 2.5$ ; $g = \text{ca. } 0.76$ $\tau = \text{ca. } 0.81$
DECKE ü. Büros, Kombizone	6 <sup>5</sup> cm Estrich 14 cm DÄ (WLG040) 25 cm Stahlbeton	
GRUNDFLÄCHE zur Tiefgarage	Hohlraumboden 25 cm Stahlbeton 12 <sup>5</sup> cm Tektalan	
AUSSENWAND - Büro/Hof	2 <sup>5</sup> cm Gipsbauplatte 8 cm DÄ (WLG035) 1 <sup>9</sup> cm Holzverkleidung	
AUSSENWAND - Büro/außen	2 <sup>5</sup> cm Gipsbauplatte 8 cm DÄ (WLG035) 1 <sup>9</sup> cm Holzverkleidung	

## Allgemeine Bauteilbeschreibung / Vereinfacht

Bei den Berechnungen werden die Baustoffe hinsichtlich

- ihrer Absorption (bei außenliegenden Bauteilen)
- ihrer Wärmeleitfähigkeit
- ihrer Wärmespeicherfähigkeit
- ihrer Absorption, Reflexion und Transmission (bei Verglasungen) berücksichtigt.

Eine Verschattung der Verglasungen durch Dachüberstände, aber auch von angrenzenden Gebäudeteilen, z. B. Treppenhäusern, ist berücksichtigt worden!

Eine außenliegende Verschattung für die West-Büros wird ab einer Grenzstrahlung von  $I_G \geq 200 \text{ W/m}^2$  angesetzt.

Behaglichkeit / Grenztemperatur, kritische Stunden

Es wurde für die Beurteilung der Behaglichkeit in den Raumzonen der PMV-Wert nach DIN EN ISO 7730 ermittelt. Der PMV-Wert errechnet sich aus den begleitenden Parametern wie Aktivitätsgrad, Bekleidung und Klima.

Es ergibt sich für den PMV-Wert folgende Bandbreite:

+3	- zu warm	'Behaglich' ist der Bereich zwischen +0.5 und -0.5
+2	- warm	
+1	- etwas warm	
0	- neutral	
-1	- etwas kühl	
-2	- kühl	
-3	- kalt	

Für die Betrachtung der Varianten-Rechnung wurde für einen Behaglichkeitswert von +0.5 die maximal zulässige Raumtemperatur berechnet. Als weitere Grenztemperatur wurde die Temperatur für '+1.0 = etwas warm' ermittelt.

Als Randparameter wurden hierfür angesetzt:

		Zone BUE, ATR, KOMBI HOF
Stoffwechselrate	W/m <sup>2</sup>	70 Sitzende Tätigkeit bzw. entspanntes Stehen
Isolationswert der Bekleidung	m <sup>2</sup> K/W	0.10 Sommerbekleidung
Rel. Luftgeschwindigkeit	m/s	0.10
Rel. Luftfeuchte	%	ca. 50

Es ergeben sich somit **mittlere Grenztemperaturen ...**

... für 'behaglich': 27 °C

... für 'etwa warm': 29 °C

Nach Arbeitsstättenrichtlinie wird gefordert, dass die Raumtemperatur 26 °C nicht überschreiten soll. Diese Temperaturen sollten nicht bzw. nur kurz während einer Hitzeperiode überschritten werden, da ein Wohlbefinden ansonsten kaum möglich ist. In dem Maß der kritischen Stunden, d.h. die Anzahl der Stunden, in denen die Raumtemperatur oberhalb der Grenztemperatur liegt, wird dieser Wert erfasst. Dieser soll selbstverständlich so gering wie möglich sein.

### Gebäudenutzung

Durch die Nutzung eines Gebäudes treten teils erhebliche Einflüsse auf das klimatische Verhalten der Raumzonen auf. Hierbei sind vor allem innenliegende Wärmequellen sowie der Eintrag von Lüftungsluft und/oder Heiz- bzw. Kühlleistung maßgebend. Diese Einflüsse können sich je nach Jahreszeit positiv oder negativ auswirken.

Es wurden die Parameter

GAINS (Personen, Geräte und Beleuchtung)

HEATING (Heizung)

COOLING (Kühlung)

INFILTRATION (Fugen-, natürliche Lüftung)

VENTILATION (Erzwungene Lüftung)

in den einzelnen Raumzonen berücksichtigt.

Die im Weiteren erwähnten Ganglinien sind zusammenfassend im Anhang B dargestellt.

In den folgenden Tabellen sind für die einzelnen Parameter die Maximalwerte dargestellt. Der tageszeitliche Verlauf ist in sog. Ganglinien dargestellt. Hierbei kennzeichnet '1' den maximalen Ansatz (= 100%). Die tatsächliche Belastung wird erhalten, indem der Maximalwert der nachfolgenden Tabelle mit dem stündlichen Wert der Ganglinie multipliziert wird (z. B. 10 Pers. x 0.5 = 5 Pers.).

Personen, Beleuchtung und Geräte

Nutzer, Beleuchtung und Geräte erwärmen eine Zone zusätzlich. Dieses kann starken Einfluss nehmen, wenn es sich z. B. um eine Gruppe von Menschen handelt oder wenn sich Geräte mit großer Wärmeabgabe (z. B. Computer, Kopierer) im Raum befinden.

In Abstimmung mit den Beteiligten wurde die Personenbelegung abgeschätzt. In Bezug auf Beleuchtungs- und Gerätwärme wurde die Wärmelast nach üblichen Werten (VDI 2078, etc.) angegeben. Die Werte wurden jeweils mit den zuständigen Fachplanern abgestimmt.

#### Personen:

Es wurde nach VDI 2078, Aktivitätsgrad I/II eine Wärmeabgabe von 120 W/Pers. angesetzt.

In den Bürogeschossen wurde nach QT, Herr Lindlahr eine Belegung von insgesamt 32 Personen angenommen.

#### Geräte:

Hierbei werden die Wärmeabgaben von PC, Drucker, Kopierer, Teeküche etc. dargestellt.

Für den PC-Arbeitsplatz wurden 150 W angesetzt. Bei einer 2-achsigen Bürozeile ( $4.30\text{m} \times 2.50\text{m} = 10.75\text{m}^2$ ) ergibt sich somit ein Wert von  $14\text{ W/m}^2$ .

Durch die Berücksichtigung von Geräte-Schlafmodi wurde ein ungünstiger Reduktionsfaktor von 75 % angenommen. Der daraus resultierende Wert von  $10.5\text{ W/m}^2$  ist im Weiteren auf die reine Nutzfläche, d. h. z. B. keine Verkehrsflächen (!), zu beziehen.

Für die Kombiflächen wurden die identischen Werte angesetzt. Eine überschlägige Berechnung mit Einzelgeräten wie Kopierer etc. hat eine gute Übereinstimmung mit diesem Ansatz ergeben.

Der Tagesgang wurde in Annäherung zu den Personen-Ganglinien erstellt. Es wurde jedoch in gewissem Maße dem Umstand Rechnung getragen, dass die Nutzer beim Verlassen des Raumes nicht automatisch die Geräte ausstellen.

#### Beleuchtung:

Die Beleuchtung wurde entsprechend der angestrebten Beleuchtungsstärke angepasst. Für die Beleuchtung

wurde eine Dimm- Strategie betrachtet. Hierbei wurde die Beleuchtung über eine tageslichtorientierte Steuerung angesetzt. Das Kunstlicht wurde dabei je nach Beleuchtungsstärke aus Tageslicht auf eine Soll-Beleuchtungsstärke von 300 lux während der Arbeitszeiten zugeschaltet. Maximaler Ansatz der Innenwärmegewinne aus Kunstlicht ist **14 W/m<sup>2</sup>**.

#### Feuchteeintrag Pflanzen:

Der Feuchteeintrag durch die Pflanzen im Grünhof wurde bei der dynamischen Gebäudesimulation nicht berücksichtigt. Dieser Einfluss ist stationär gesondert zu betrachten.

Raumzone	Bereich	Personen [-]	Ganglinie Bez.	Geräte [W/m <sup>2</sup> ] (Fläche [m <sup>2</sup> ])	Ganglinie Bez.	Beleuchtung [W/m <sup>2</sup> ] (Fläche [m <sup>2</sup> ])	Ganglinie Bez.
HOF 0	Grünhof	10	PerHOF	---	---	5 (410.36)	
							BelWOCH
	Büros	3	PerBUE	10.5 (32.25)	GerBUE	14 (32.25)	
	Erschl.			---	---	10 (101.39)	
HOF 1-3	Grünhof	---	---	---	---	5 (410.36)	
							BelWOCH
	Büros	3	PerBUE	10.5 (32.25)	GerBUE	14 (32.25)	
	Erschl.			---	---	10 (101.39)	
BUES 0-3	Büros	8	PerBUE	10.5 (102.13)	GerBUE	max. 14 gedimmt	während d. Arbeitszeit
BUEN 0-3	Büros	7	PerBUE	10.5 (96.75)	GerBUE	max. 14 gedimmt	während d. Arbeitszeit
BUEW 0-3	Büros	7	PerBUE	10.5 (96.75)	GerBUE	max. 14 gedimmt	während d. Arbeitszeit
KOMBI 0-3	Kombizone	7	PerBUE	10.5 (189.54)	GerBUE	14 (189.54)	BelWOCH
ATR 0-3	Kombizone	3	PerBUE	10.5 (127.02)	GerBUE	14 (127.02)	BelWOCH

Luftraum	---	---	---	---	5 (100.74)	
ERSCH 0-3	1	PerBUE	---	---	10 (104.96)	BelWOCH
HDACH, DACH	---	---	---	---	---	---

Übersicht der Gebäudenutzung / GAINS

### Heizung / Kühlung

In den einzelnen Raumzonen wurden die folgenden Mindesttemperaturen für die Beheizung zugrunde gelegt. Die maximale Heizleistung beträgt 40 W/m<sup>2</sup>, in den West-Büros 45 W/m<sup>2</sup>.

Die Büros erhalten jeweils eine Kühldecke. Es wird von einer Kühlleistung von 70 W/m<sup>2</sup> bei Erreichen der Kühlgrenztemperatur ausgegangen.

Als Heiz- und Kühlfläche wird eine Fläche von 50 % der Deckenfläche angesetzt, in den Westbüros 100 % der Fläche.

Raumzone	Heizgrenztemperatur [C°]	Kühlgrenztemperatur [C°]
BUE	22 (nachts: 19 °C)	25
ATR / KOMBI	22 (nachts: 19 °C)	---
ERSCH	15	---
HOF	6	---

### Übersicht der Heizung, Kühlung / HEATING und COOLING

### Lüftung / Lüftungstemperatur

Durch Undichtigkeiten der Fensterfugen, einer bewussten Fensteröffnung sowie bei der Verwendung von Permanentlüftern tritt ein Luftwechsel mit dem Außen- bzw. Hofklima auf.

(Eine Luftwechselrate von 1.0 h<sup>-1</sup> bedeutet, dass das Raumvolumen innerhalb einer Stunde 1-mal ausgetauscht wird.)

In der Simulationsberechnung wurde das nachfolgend beschriebene Lüftungskonzept in Ansatz gebracht, das nur Extremsituationen erfasst (das gesamte Lüftungskonzept ist im Anhang dargestellt):

Zuluft der Büros, Atrien und Kombizonen über mechanische Zuluftanlage durch Versorgungsstellen der Büros. Westbüros erhalten Zuluft über Außenluft (Fensterlüftung).

Es wird hier von einem erforderlichen Luftstrom von 60 m<sup>3</sup>/h je Bürozone bzw. Pers. nach DIN 1946 T2 ausgegangen.

Fortluft der Büros in den Hof.

Eine Nachtentwärmung wird bei Überschreiten der Raumtemperatur im Büro "SÜD/Ebene3" von 20 °C eingesetzt.

In diesem Fall werden die Klappen der vertikalen Grünhoffassaden, die Bürofenster zum Hof sowie die RWA-Klappen im Bereich der Atrien geöffnet. Die RWA-Öffnungen im Bereich des Hofes bleiben geschlossen, um

eine Luftbewegung durch die Büros zu erzwingen.

GRÜNHOF			
	Zuluft über Lüftungsklappen	Temp. Zuluft	Bedingung
Tag (7-18 Uhr)	0.2 h <sup>-1</sup>	Außenluft	---
Nacht (18-7 Uhr)	ca. 1.5 h <sup>-1</sup>	Außenluft	$\vartheta_{\text{BUE,S3}} > 20 \text{ °C}$
BÜRO Nord/Süd (an Grünhof)			
	Zuluft	Temp. Zuluft	Bedingung
Tag (7-18 Uhr)	60 m <sup>3</sup> /h je Büroraum	Lufttemp. Büro	---
Nacht (18-7 Uhr)	ca. 140 m <sup>3</sup> /h	Lufttemp. Grünhof	$\vartheta_{\text{BUE,S3}} > 20 \text{ °C}$
BÜRO West (an Außenluft)			
	Zuluft	Temp. Zuluft	Bedingung
Tag (7-18 Uhr)	60 m <sup>3</sup> /h je Büroraum	Außenluft	---
Nacht (18-7 Uhr)	Annahme Nord/Süd ca.140 m <sup>3</sup> /h	wie Außenluft	$\vartheta_{\text{BUE,W3}} > 20 \text{ °C}$

Übersicht der Gebäudelüftung für Extremfall Simulation / INFILTRATION und VENTILATION

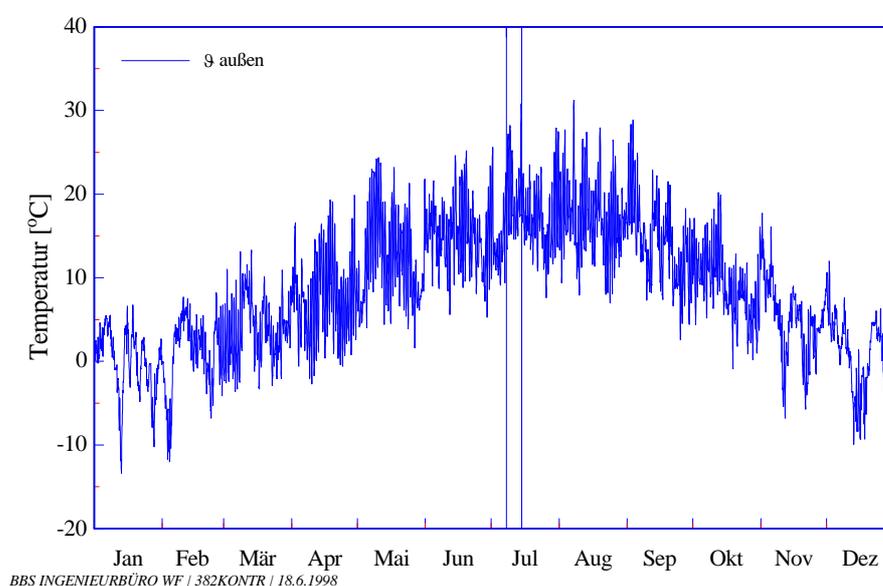
## Simulationsrechnungen für den Sommerfall

Wie zuvor dargestellt, basieren die Berechnungen auf den außenklimatischen Angaben des Test-Referenz-Jahres. Die ermittelten Temperaturen berücksichtigen somit einen repräsentativen Sommer-Zustand. Höhere Temperaturen, die z. B. im August 1997 zu verzeichnen waren oder eben geringere bei einem 'verregneten Sommer' sind natürlich in der Praxis möglich.

Unter Beachtung der oben beschriebenen Grenzwerte bezüglich einer erträglichen Nutzung des Gebäudes wurde die Innentemperatur-Entwicklung in den einzelnen Raumzonen ohne Einfluss einer Windbelastung auf das Gebäude ermittelt.

### Klimatisches Verhalten in den Raumzonen

Für die einzelnen Zonen wurde das sommerliche Temperaturverhalten berechnet. Zur besseren Lesbarkeit der Ergebnisse wurde für die Darstellungen repräsentative heiße Tage (s. Bild unten) ausgewählt.



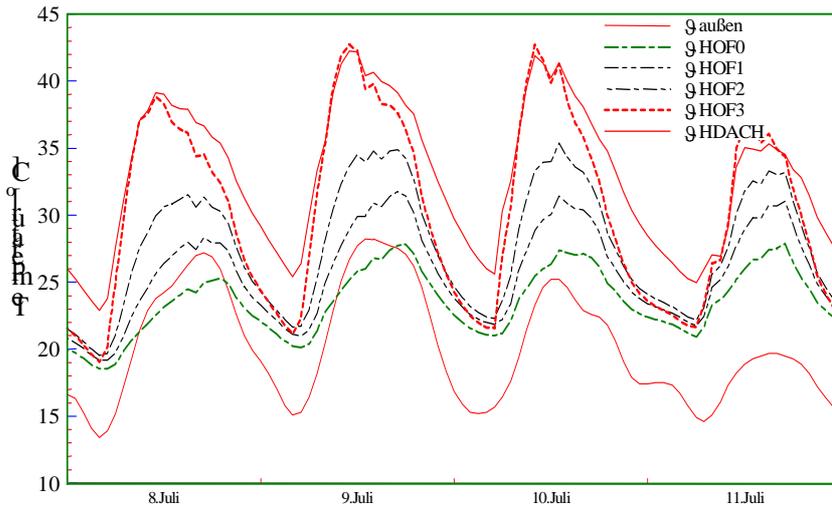
### Außentemperaturverlauf (Auswahl der dargestellten Tage)

Zu beurteilende Größe ist hier die Raumtemperatur bzw. bei den Bürozone(n) (BUE\_\_) die empfundene Raumtemperatur (Mittelwert aus Luft- und Strahlungstemperatur).

Hierbei wird die maximale Raumtemperatur als absoluter Wert, sowie die Zeit oberhalb der Grenzttemperaturen ermittelt. Beide Werte geben eine gute Aussage über die raumklimatischen Zustände sowie, bei Überschreitung der Grenzttemperaturen, ein Maß für die (Un-)Zumutbarkeit dieses Zustandes.

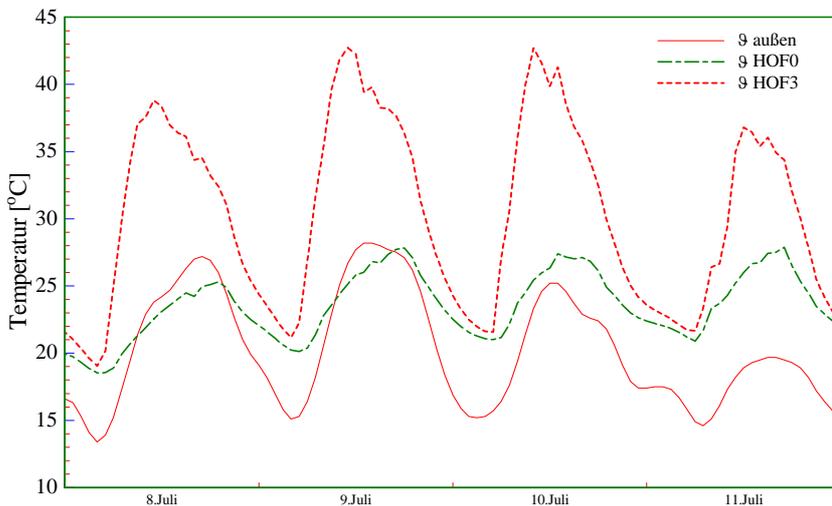
### Zonen HOF

Die Temperaturentwicklung in den Grünhöfen für die unterschiedlichen Ebenen ist in den nachfolgenden Bildern dargestellt.



BBS INGENIEURBÜRO WF | 382H-V61

Temperaturverlauf HOF 0-3 und HDACH



BBS INGENIEURBÜRO WF | 382H-V61

Temperaturverlauf HOF 0, HOF 3

Die folgenden Ergebnisse konnten daraufhin ermittelt werden:

(Hier stellt die Überschreitungszeit der Grenztemperaturen nur eine tendenzielle Größe dar. Eine Behaglichkeitsgröße, abgesehen von der Ebene 0, ist hier im Grünhof nur sekundär zu sehen.)

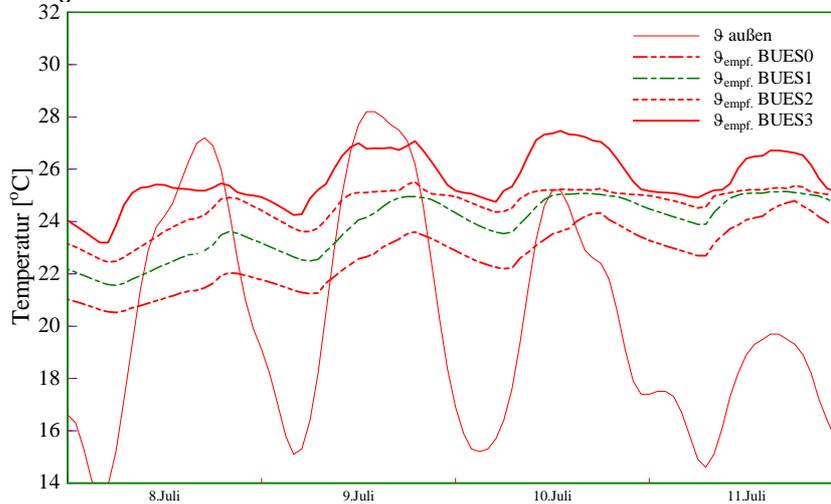
Zone	$\vartheta_{max}$ [°C]	Std. > 26 °C [h]	Std. > 27 °C [h]	Std. > 29 °C [h]
HOF 0	27.7	65	13	0
HOF 1	31.6	375	229	69
HOF 2	34.8	728	554	285
HOF 3	42.7	1119	940	671
HDACH	42.0	1346	1114	772

### Zonen Büro (BUE\_)

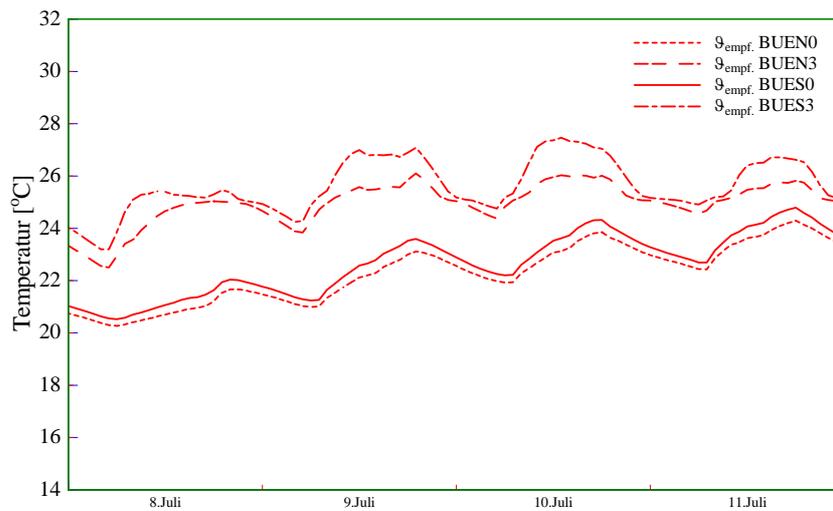
Die Bürozonen SÜD und NORD werden durch die direkte Lage an den Grünhof von dessen Temperaturverhalten durch Transmission und solare Wärmegewinne mit beeinflusst.

Augenmerk auf die Temperaturentwicklung zu richten.

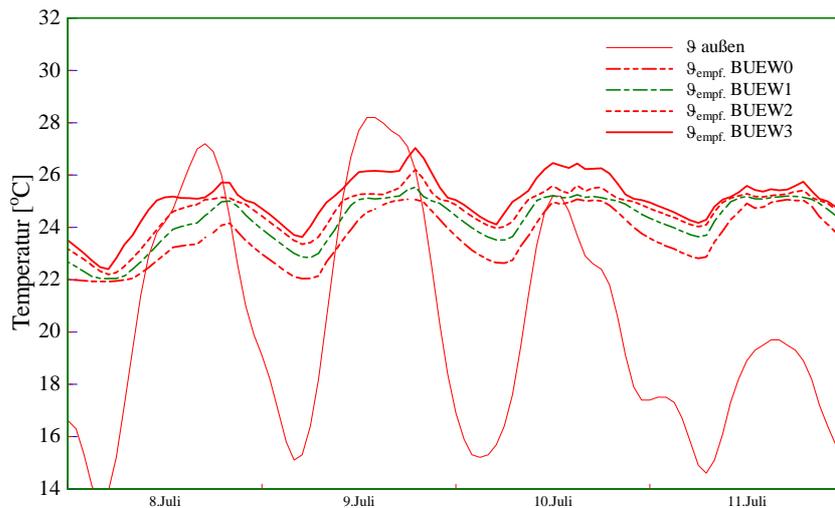
Der Vergleich der verschiedenen Büros ist in den Bildern 7 bis 9 zu sehen.



### Temperaturverlauf Büro Süd / Vergleich der Ebenen



### Temperaturverlauf Büro / Vergleich der Büros SÜD, NORD



Temperaturverlauf Büro WEST / Vergleich der Ebenen

In der Tabelle sind die Maximaltemperaturen sowie die Überschreitungsdauer der Raumtemperatur der verschiedenen Bürozonen über den Grenztemperaturen beschrieben.

Zone	$\vartheta_{\max}$ [°C]	Std. > 26 °C [h]	Std. > 27 °C [h]	Std. > 29 °C [h]
BUE S0	24.6	0	0	0
BUE S1	25.0	0	0	0
BUE S2	25.4	0	0	0
BUE S3	27.4	103	8	0

Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE S\_

Zone	$\vartheta_{\max}$ [°C]	Std. > 26 °C [h]	Std. > 27 °C [h]	Std. > 29 °C [h]
BUE N0	24.2	0	0	0
BUE N1	25.0	0	0	0
BUE N2	25.2	0	0	0
BUE N3	25.9	0	0	0

Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE N\_

Zone	$\vartheta_{\max}$ [°C]	Std. > 26 °C [h]	Std. > 27 °C [h]	Std. > 29 °C [h]
BUE W0	24.9	0	0	0
BUE W1	25.0	0	0	0
BUE W2	25.9	0	0	0
BUE W3	26.6	5	0	0

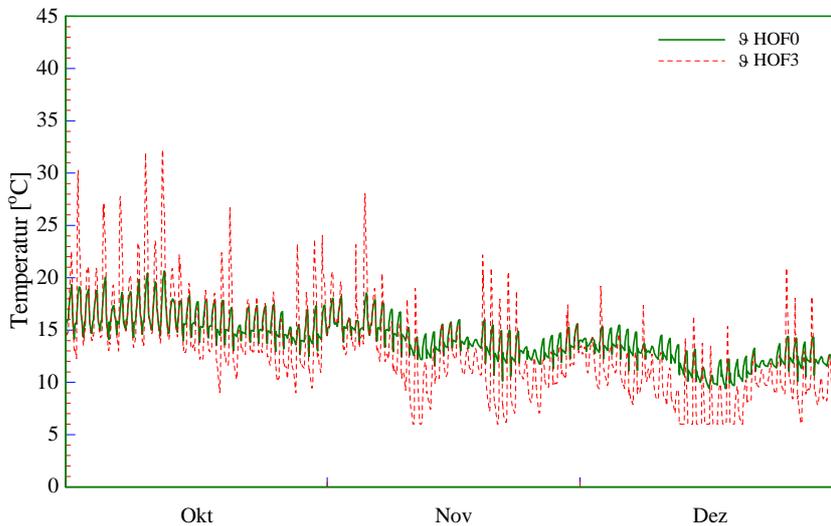
Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE W\_

Es ist zu erkennen, dass die Kühlgrenztemperaturen in den Büros teilweise geringfügig überschritten wird.

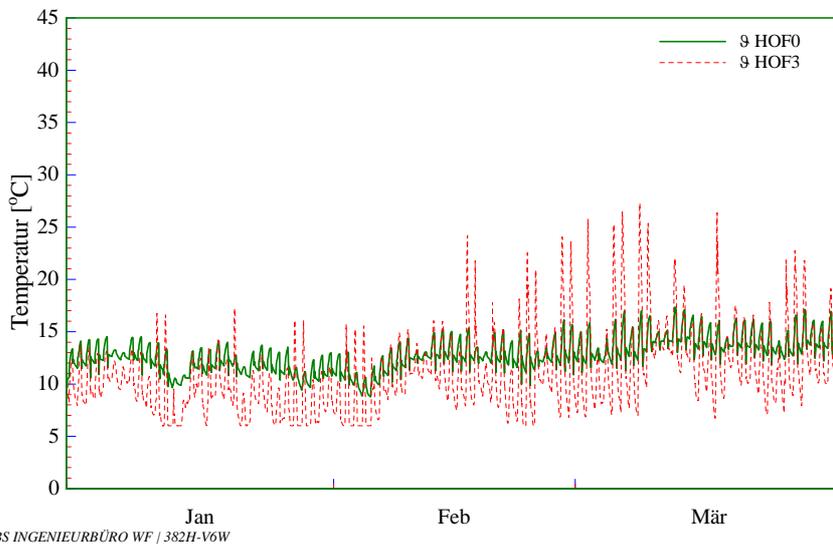
## Simulationsrechnungen für das gesamte Jahr

## Temperaturverlauf HOF

In einer *Jahresberechnung* wurde insbesondere der Winter- und Übergangsfall untersucht. Hierbei wurde die Temperaturentwicklung im HOF betrachtet.

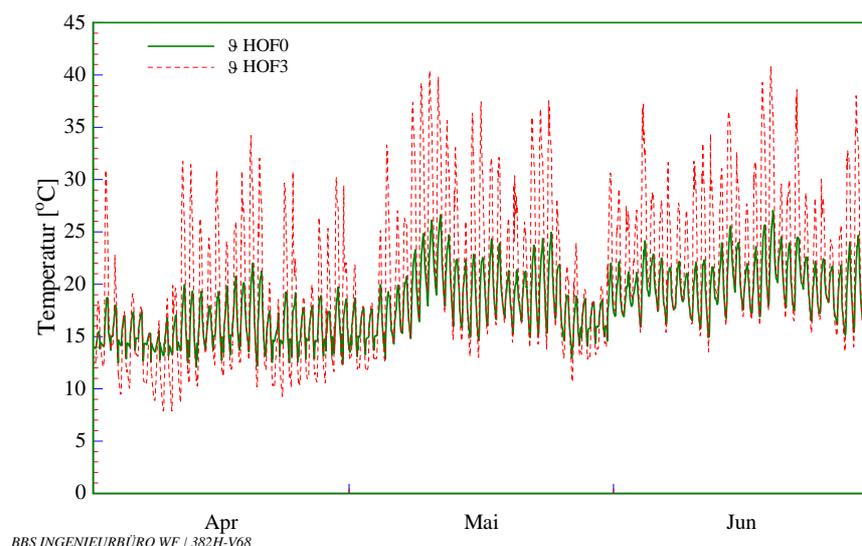


## Temperaturverlauf HOF Okt - Dez



## Temperaturverlauf HOF Jan – März

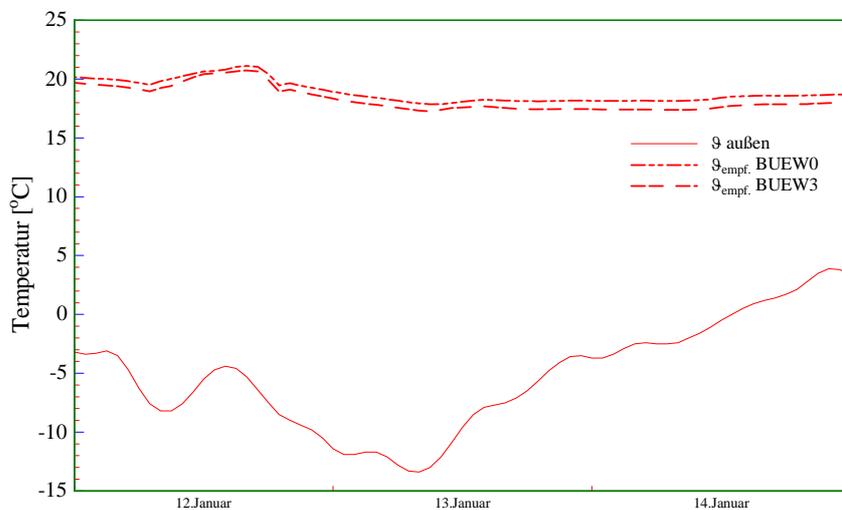
Die Berechnungen zeigen, dass in der unteren Hofzone im Winter eine mittlere Temperatur von 12°C erreicht wird.



Temperaturverlauf HOF Apr – Jun

### Winterfall Büro West

Den Verlauf der empfundenen Temperatur im Büro West für drei kalte Tage im Januar ist in Bild 13 dargestellt. Wie die Berechnungen zeigen liegt die Raumtemperatur an kalten Tagen unterhalb von 22°C, eine Erhöhung der Heizleistung ist erforderlich.



Temperaturverlauf Büro WEST / Winter

### Zusammenfassung

Die berechnete Variante zeigt im Vergleich zu den zuvor durchgeführten Berechnungen eine leichte Anhebung des Temperaturniveaus in den Grünhöfen. Diese resultiert aus der veränderte Lüftungs- und Regelungsstrategie.

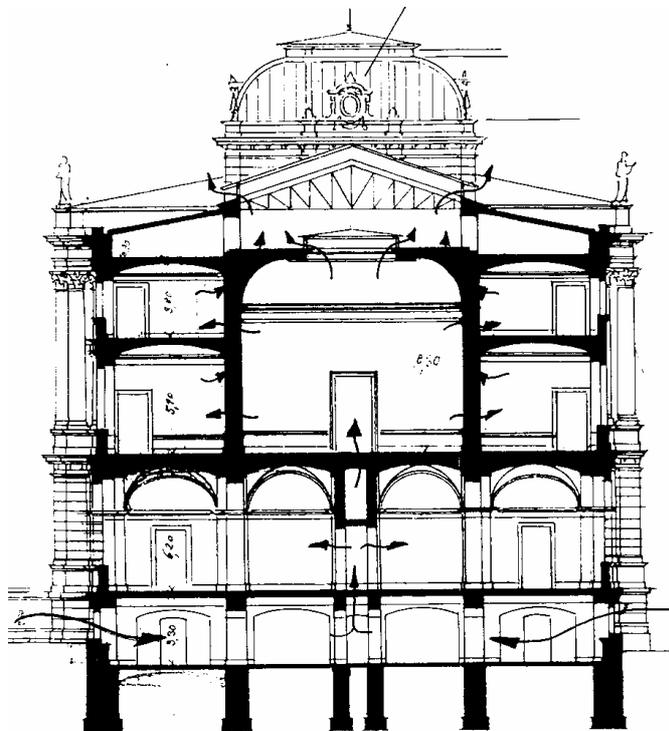
Hierbei zeigt sich, dass das hohe Temperaturniveau HDACH und HOF3 zu einer kurzzeitigen Überschreitung der Raumlufttemperatur in der Zone BÜRO/SÜD 3 führt. Eine Erhöhung der Kühlleistungen bzw. eine Verbes

serung des Sonnenschutzes für diesen Bereich ist zu diskutieren. Die Untersuchungen der Winterperiode zeigen, dass die geforderten Raumtemperaturen mit den zugrunde gelegten Heizleistungen in den BÜROS/WEST nicht immer erreicht werden können. Eine Erhöhung der Heizleistungen bzw. eine weitere wärmedämmtechnische Optimierung der Bauteile wird empfohlen.

## Fallbeispiel 2 - Untersuchungen zur Klimastabilität in historischen Museen

### Einleitung

Das Herzog-Anton-Ulrich-Museum in Braunschweig gehört wie die von Klenze erstellte Alte Pinakothek in München, Sempers Gemäldegalerie in Dresden oder auch das Weimarer Landesmuseum zu den wenigen Bauten, die Ende des 19. Jh. als reine Museumsbauten bzw. Gemäldegalerien geplant und gebaut wurden. Hierbei galt es, nicht nur Räume für die Repräsentation von Bildern oder Kunstobjekten, sondern auch klimatisch geeignete 'Behältnisse' zur Aufbewahrung zu schaffen.



### Querschnitt durch die Mitte.

#### Historisches Heizungs- und Lüftungssystem des Herzog-Anton-Ulrich-Museum

Gerade von der Tauglichkeit der Raumklimate historischer Museen wird und wurde (zu!)viel erwartet. Um dieses zu beschreiben, wird aus einem Brief des damaligen Museumsdirektors Hermann Riegel zitiert:

*„Schon während der Aufstellung der Sammlungen zeigte sich, dass die Luft im Inneren des Hauses, ... , sehr trocken war. Auf Holz gemalte Bilder bekamen Risse und andere Holzsachen litten .... Wie es aber zuging, dass in dem neuen Gebäude diese auffällige Erscheinung eintrat, weiß ich nicht. .... Ob nun etwa die Heizung, die im Übrigen ganz Vorzügliches leistet, vielleicht in Verbindung mit dem scharfen Zuge, den die Lüftungsanlage erzeugte, ehe eine gewisse Anzahl nicht verschließbar angelegter Klappen nachträglich geschlossen wurden, die*

*Schuld trägt, ist sehr gut möglich.* [Riegel, Hermann; 1889].

In der Gegenwart sind Untersuchungen zum klimatischen Verhalten des Herzog-Anton-Ulrich-Museums wie aber auch anderer Museen notwendig geworden, weil zunehmend Feuchteschäden an der Gebäudehülle und den darin untergebrachten Exponaten aufgetreten sind.

Die Mehrzahl der klimabedingten Schädigungen an Ausstellungsgegenständen in Museen lässt sich auf die folgenden Problembereiche zurückführen:

Kurzzeitige Schwankungen des Innenklimas, insbesondere der relativen Raumlufffeuchte, fördern die künstliche Alterung organischer Materialien und können zum Teil irreversible Schäden verursachen. Ursache dieses Phänomens ist die Eigenschaft aller organischen Materialien ihren hygroskopischen Wassergehalt in Abhängigkeit der relativen Umgebungsfeuchte zu verändern. Dieser Zusammenhang wird durch die Sorptionsisotherme des jeweiligen Materials beschrieben. Bei Schwankungen der relativen Umgebungsfeuchte kommt es aufgrund der Wassergehaltsveränderung zu Volumenänderungen (Quellen und Schwinden). Hierdurch werden Spannungen im Materialgefüge erzeugt, die insbesondere bei kurzzeitig sich wiederholenden Quell- und Schwindvorgängen zu Schädigungen führen. Zyklische Änderungen des Innenklimas können jedoch auch mit herkömmlichen Klimaanlageanlagen nicht verhindert werden, insbesondere dann nicht, wenn aufgrund baulicher Defizite *alle* Klimatisierungsaufgaben der Anlagen- und Regeltechnik übertragen werden.

Mängel am baulichen Wärmeschutz in Verbindung mit einer ungünstigen Anordnung der Museumsgegenstände im Raum erhöhen das Schadensrisiko am Bau und am Exponat. So genannte konservatorische Diskomfortzonen entstehen z. B. unmittelbar an „kalten“ Außenwänden oder Fenstern. So kann es aufgrund von unmittelbar an der ungedämmten Außenwand angeordneten Möbeln, Bildern, Gemälden o. ä. zu Feuchte- oder Schimmelpilzschäden an der Bauhülle kommen. Die mit Schimmelpilzsporen angereicherte Umgebungsluft fördert dann wiederum das Schadensrisiko am Exponat. Im weiteren können Temperaturschichtungen, denen z. B. ein an der „kalten“ Außenwand hängendes Gemälde ausgesetzt ist, ähnlich wie bei einem Bimetall, Spannungen im Materialverbund des Bildträgers auslösen, nicht zuletzt auch wegen der unterschiedlichen relativen Luftfeuchte an Vorder- und Rückseite.

Ein oftmals in historischen Kirchen beobachtetes Phänomen sind Verschmutzungen an Decken- und Wandgemälden. Ursache hierfür ist zumeist die so genannte Thermoeffusion. Hierbei wird Feinstaub über Luftmoleküle in Richtung des Temperaturgefälles an kalte Oberflächen (z. B. ungedämmte Außenbauteile) transportiert.

### Baukonstruktive Anforderungen an die Gebäudehülle

Die bauphysikalischen Anforderungen an die Baukonstruktion lassen sich ihrer Bestimmung nach in folgende Teilanforderungen unterteilen:

- Mindestwärmeschutz und klimabedingter Feuchteschutz
- energiesparender Wärmeschutz
- Ausbildung der Baukonstruktion nach raumklimatischen Gesichtspunkten.

Mit den Mindestanforderungen an den baulichen Wärme- und Feuchteschutz soll die Baukonstruktion dauerhaft vor klimabedingten Beanspruchungen von außen durch Witterungseinflüsse und von innen durch die Gebäudenutzung geschützt und somit vor Feuchtigkeitsschäden an den Bauteilen bewahrt werden. Feuchtigkeit in Form von Tauwasser kann sich sowohl auf den Bauteiloberflächen als auch im Inneren der Bauteilkonstruktion bilden.

Neben den Mindestanforderungen nach DIN 4108 gelten Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz nach der Wärmeschutzverordnung bzw. künftig nach der Energieeinsparverordnung. Diese Energieeinsparmaßnahmen zielen darauf hin, die zur Aufrechterhaltung eines erforderlichen Raumklimas, insbesondere in der Winterperiode notwendige Heizenergie, auf ein Mindestmaß zu reduzieren und somit eine vom Gesetzgeber vorgegebene Energiebilanz des Gebäudes sicherzustellen. Dieses Anforderungsniveau geht in weiten Teilen über das Anforderungsniveau des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108 hinaus. Eine Befreiung von den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung kann nach § 11 WSchV dann geltend gemacht werden, wenn die Wärmeschutzmaßnahmen einen nicht vertretbaren Eingriff in den Bestandsschutz des Gebäudes darstellen oder das Wirtschaftlichkeitsgebot gemäß § 5 des Energieeinspargesetzes verletzt wird.

Außer den Anforderungen zum Schutz des Gebäudes vor Bauschäden und zu hohen Heizenergieverlusten lassen sich auch baukonstruktive Anforderungen im Hinblick auf das bauklimatische Gebäudeverhalten formulieren. Diese Anforderungen sind nicht in Normen oder Verordnungen verankert und müssen entsprechend den jeweiligen Nutzungsbedingungen spezifiziert werden. Im vorliegenden Fall werden aus konservatorischen Gründen stabile, d.h. über die Zeit gesehen nahezu konstante Raumklimaverhältnisse gefordert. Insbesondere Schwankungen der relativen Raumluftfeuchte stellen eine Gefährdung der in den Ausstellungsräumen untergebrachten Kunstgegenstände dar.

Die thermische Stabilität eines Gebäudes oder eines Raumes wird im Wesentlichen von folgenden Gebäudeeigenschaften beeinflusst:

- Fensterflächenanteil an den Außenwänden und Sonnenschutz
- Intensität des Luftaustausches mit der Umgebung
- Wärmespeichervermögen der Bauteile
- Hygroskopische Eigenschaften (Feuchtespeicherverhalten) der Bauteile

Durch die Optimierung dieser Gebäudeeigenschaften soll der Anteil der freien Klimaregulierung des Gebäudes maximiert und der Anteil an anlagentechnischen Eingriffen zur Herstellung des geforderten Raumklimas reduziert werden.

Auf diese Weise können Investitions- und Betriebskosten an der Anlagentechnik eingespart und eventuelle Störfälle der Anlagentechnik besser abgefangen werden. Das konservatorische Schadensrisiko wird dadurch vermindert.

#### Anforderungen an das Raumklima

Die Raumklimaanforderungen in Museen werden in erster Linie von konservatorischen Kriterien bestimmt. Zum Zwecke eines dauerhaften Schutzes der Ausstellungsgüter sind zum einen Grenzwerte für Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte, zum anderen Grenzwerte für deren Schwankungsbreite einzuhalten.

Oftmals werden aus konservatorischer Sicht von den Museologen sehr enge Klimabereiche gefordert.

Zum Beispiel:

<b>Raumlufttemperatur</b>	$\vartheta_{RL}$	=	18	...	20	°C
<b>relative Raumluftfeuchte</b>	$\phi_{RL}$		= 50 ... 55 %			

Ein solches Anforderungsprofil führt zwangsläufig zu einem großen anlagen- und regelungstechnischen Aufwand. Da ständig ein sehr enger Klimabereich angeregt wird, wird auch das von den Konservatoren gefürchtete Zweipunktverhalten der Klimaanlage provoziert. Werden neben der konservatorischen Motivation auch wirtschaftliche und wärmephysiologische Aspekte mit berücksichtigt, so lassen sich nachfolgende,

allgemein anerkannte Klimaanforderungen formulieren [12], [13], [14], [15].

**Raumlufttemperatur**  $\vartheta_{RL} = (19) 20 \dots 24 (25\dots 28) \text{ }^\circ\text{C}$

Im Jahresverlauf wird ein Temperaturbereich von 20 bis 24 °C als optimal angesehen. In Ausnahmefällen sind auch 19 °C bzw. 25 °C noch akzeptabel. Nach [13] sind sogar Temperaturen zwischen 24 °C und 28 °C an maximal 150 Stunden im Jahr zulässig. Die jahreszeitliche Anpassung der Innentemperatur an die Außentemperatur muss allmählich (saisonal gleitend) erfolgen. Das heißt, für die Regelung der Innentemperatur sind zeitliche Mittelwerte und nicht Momentanwerte der Außentemperatur heranzuziehen. Innerhalb der o.g. Bandbreite werden als maximal zulässige Änderungsgeschwindigkeit 1 Kelvin pro Stunde angegeben.

**relative Raumluftfeuchte**  $\phi_{RL} = 45 \dots 60 \%$

Die relative Raumluftfeuchte besitzt von allen konservatorischen Anforderungen die höchste Priorität. Da jedoch jede Materialgruppe (Holz, Textil, Papier, Metall) unterschiedliche hygroskopische Eigenschaften besitzt, ist bei einem Universalmuseum, wie im vorliegenden Fall, nur eine Kompromisslösung möglich. Für Kunstmuseen wird im Allgemeinen ein Feuchtebereich von 45 % bis 60 % als optimal angesehen, wobei auch hier ein saisonales Gleiten der Innenfeuchte berücksichtigt werden sollte. Allerhöchste Priorität besitzt jedoch die Änderung der rel. Feuchte während einer Stunde. Diese Änderung sollte möglichst gering sein und die Schwankungshäufigkeit möglichst klein gehalten werden. Als oberer Grenzwert werden  $\Delta\phi_{RL} \leq 2,5 \%$  pro Stunde angegeben. Als maximale Änderung während eines Tages sind  $\Delta\phi_{RL} \leq 5 \%$  anzustreben.

Saisonale Klimaschwankungen, d.h. Schwankungen zwischen Sommer und Winter, stellen eine geringere Gefährdung der Ausstellungsgüter dar, als kurzzeitige Schwankungen im Tagesgang. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit eine Temperaturanhebung in der Sommerperiode über das oben genannte Niveau von 20 °C auf z. B. 25 °C möglich ist. Auf diese Weise könnte teure Kühlenergie eingespart und das Behaglichkeitsempfinden der Besucher verbessert werden. Gemäß den allgemein anerkannten Behaglichkeitsmaßstäben [3] sind in der Sommerperiode Raumtemperaturen (= empfundene Temperaturen) im Bereich von  $\vartheta_{empf} = 23 \dots 26 \text{ }^\circ\text{C}$  als optimal anzusehen. Des weiteren sind für den Fall, dass eine Raumtemperaturregelung mit Hilfe von RLT-Anlagen erfolgt, in der DIN 1946, Teil 2 [4] Bereiche empfohlener Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur angegeben.

### Aufgabenstellung

Vorrangigstes Ziel der Modernisierung ist es, die aus konservatorischer Sicht derzeit unbefriedigenden Klimaverhältnisse in den Ausstellungsräumen zu verbessern, um so optimale Bedingungen für den Erhalt der Kunstgegenstände zu schaffen.

Die Fachplanung auf dem Gebiet der thermischen Bauphysik lässt sich in zwei Aufgabenbereiche untergliedern:

#### Bauphysikalisch richtige Instandsetzung des Baukörpers

Dieser Aufgabenschwerpunkt beinhaltet alle planerischen Leistungen zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Gebäudes unter Berücksichtigung der musealen Nutzung. Hierbei geht es darum, geeignete und dem Stand der Bautechnik entsprechende Lösungen bezüglich des winterlichen und sommerlichen Wärmeschutzes sowie des baulichen Feuchteschutzes zu erarbeiten, um so den Baukörper vor klimabedingten Schäden zu schützen.

## Mitwirkung bei der Erstellung eines geeigneten Klimatisierungskonzeptes

Die raumklimatischen Anforderungen werden in erster Linie von den konservatorischen Vorgaben bestimmt. Behaglichkeitskriterien, ausgenommen hiervon ist die hygienische Behaglichkeit, sind diesem Anforderungsniveau weitestgehend unterzuordnen.

Von den Museologen wird ein stabiles, sich nur in engen Grenzen veränderndes Raumklima mit sehr geringen Änderungsgeschwindigkeiten gefordert. Um die Auswirkungen der Störgrößen von außen (Außenklima) und von innen (Nutzungsbedingungen) auf das Raumklima so gering wie möglich zu halten, ist eine funktionierende Klimaregulierung erforderlich. Eine klimaregulierende Komponente stellt der Baukörper selbst dar. Erst wenn die Leistungsgrenze der freien Klimaregulierung erreicht ist, wird der Einsatz klimaregulierender Anlagentechnik notwendig.

Aufgabe der Bauphysik ist es, geeignete baukonstruktive Maßnahmen zu entwickeln, um so den Anteil der freien Klimatisierung möglichst groß werden zu lassen und so den anlagentechnischen Aufwand auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Neben der Einsparung an Investitions- und Betriebskosten kann auf diese Weise auch das Schadensrisiko am Ausstellungsgut gesenkt werden. Ein Versagen oder gar ein Ausfall von Anlagenkomponenten kann von einem Baukörper mit großer thermischer Stabilität besser abgefangen werden, ohne dass ein kurzfristiges Klimachaos auftritt.

Die Untersuchung des thermischen und hygrischen Verhaltens des Gebäudes wird in Form einer Sensitivitätsanalyse mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse können verlässliche Aussagen über die Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf das Innenklima getroffen werden.

Mit Hilfe ergänzender bauklimatischer Untersuchungen kann eine Optimierung des Klimatisierungskonzeptes durchgeführt werden, wobei die Ausbildungen der Baukonstruktion und der Anlagentechnik aufeinander abgestimmt werden. Das Betriebsregime verschiedener Klimatisierungskomponenten ist festzulegen und das System Gebäude – Anlage – Nutzung auf seine Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

### Das Rechenmodell

Die Raumklimaberechnungen [8] werden auf der Grundlage des Testreferenzjahres TRY 2 durchgeführt (*real case*). Bezüglich der thermischen Stabilität des Gebäudes stellt der Sommerfall den kritischeren Fall dar, da die ausgeprägten Tagesgänge der Außenlufttemperatur und Sonnenstrahlung eine Destabilisierung des Innenklimas provozieren. Der Sommerfall ist nicht zuletzt auch deswegen interessant, da insbesondere die Klimatisierungsfunktionen Kühlen und Entfeuchten kostenintensive Maßnahmen darstellen und deren Reduzierung oder gar Vermeidung zu den übergeordneten Planungszielen zählt. Aus diesem Grund werden sowohl im Rahmen der Sensitivitätsanalyse als auch im Rahmen der baukonstruktiven Bemessung ergänzende Simulationsberechnungen mit extrem heißen, sonnigen und feuchten Sommertagen durchgeführt (*worst case*). Die Klimadaten dieses Julitages werden der VDI 2078 entnommen, wobei Braunschweig der Kühllastzone 3 zuzuordnen ist.

Die Umsetzung des Gebäudebestandes in das Rechenmodell erfolgt auf der Grundlage einer zuvor durchgeführten bauphysikalische Bestandsaufnahme. Eine Verifizierung des Gebäudemodells wurde anhand eines Vergleiches zwischen gemessenen und berechneten Raumklimaverläufen durchgeführt. Hier konnte eine ausreichend genaue Übereinstimmung nachgewiesen werden.

Die Simulation der Nutzungsbedingungen beinhaltet im vorliegenden Fall auch die Einbeziehung der künstlichen Beleuchtung und des Besucherverkehrs in das Rechenmodell.

### Baukonstruktive Betrachtungen

Der bauliche Wärmeschutz der bestehenden Außenwände kann wie folgt beurteilt werden:

Die Mindestanforderungen des Wärmeschutzes nach DIN 4108 sowie die empfohlenen erhöhten Mindestanforderungen für Außenwände ( $k \leq 0,85 \text{ W}/[\text{m}^2\text{K}]$ ), insbesondere für den Wärmebrückenbereich der Gebäudeaußenkanten, werden i.A. nicht erfüllt.

Die Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz nach der Wärmeschutzverordnung werden oftmals weit verfehlt.

Der nachträgliche Einbau von Wärmedämmschichten ist bei historischen Gebäuden oftmals problematisch, da aus denkmalpflegerischen Gründen eine bauphysikalisch günstige Außendämmung meistens von vornherein ausscheidet.

Eine bauphysikalisch geeignete Methode zur Verbesserung des Wärmeschutzes an den Außenwänden kann das Anbringen eines innenliegenden Wärmedämmputzsystems sein. Die Stoffeigenschaften, insbesondere das hygri-sche Verhalten von Wärmedämmputz, führen in vielen Fällen dazu, dass der Tauwasserschutz je nach Beschaffenheit der Konstruktion auch ohne zusätzliche Dampfsperre gewährleistet werden kann.

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass das Anbringen eines Wärmedämmputzsystems keine wärmeschutztechnische Erneuerung im Sinne von § 8 der Wärmeschutzverordnung darstellt. Insofern sind die Anforderungen nach Anlage 3 WSchV in diesem Fall von vornherein nicht bindend.

Der Tauwasserschutz soll eine schädliche Durchfeuchtung im Bauteilinnern verhindern. Anforderungen hierzu sind in der DIN 4108, Teil 3 [1] festgelegt. Bei dem Nachweisverfahren nach DIN 4108 (Glaser-Verfahren) handelt es sich um eine Nachweismethode mit relativ großer Planungssicherheit. Dass heißt, ein positiver Nachweis nach DIN 4108 bedeutet eine ausreichend sicher funktionierende Konstruktion. Im Gegensatz dazu bedeutet ein negativer Nachweis nach o.g. DIN nicht automatisch einen ungenügenden Tauwasserschutz des Bauteiles. Gegebenenfalls ist der Nachweis dann mit einem der Realität besser angepassten Verfahren zu führen. Hier stehen unterschiedliche Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransportes im zeitlichen Verlauf unter präzisierten Randbedingungen zur Verfügung [10]. Bei diesen Simulationen fließen neben dem Wasserdampf-Diffusionsverhalten der Baustoffe noch weitere feuchtetechnische Parameter, wie z. B. Feuchtespeicher- und Flüssigkeitstransportverhalten, ein.

Im vorliegenden Fall konnte anhand der Berechnungen allein durch wärmeschutztechnische Verbesserungsmaßnahmen im Bereich der massiven Außenbauteile eine Energieeinsparung von bis **zu 15%** nachgewiesen werden.

Der Fensterflächenanteil an den Außenwänden, die technischen Parameter der Fensterverglasung und die Luftdurchlässigkeit der Fensterfugen beeinflussen die thermische Stabilität eines Raumes oder Gebäudes relativ stark. Raumklimaschwankungen werden insbesondere durch einfallende Sonnenstrahlung aber auch durch eine unkontrollierte Fugenlüftung begünstigt.

Anhand einer Klimasimulation wird der frei schwingende Innenklimaverlauf unter periodisch schwingenden Außenklimabedingungen bei zwei unterschiedlichen Sanierungsstufen an den Außenfenstern nachvollzogen. Als Bemessungs- und Prüfbedingung wird hierzu eine extrem warme und feuchte Außenklimaperiode nach VDI 2078 herangezogen.

Diesen Simulationen ist bereits die oben erläuterte wärmeschutztechnische Nachrüstung der Außenwandkonstruktionen mit Wärmedämmputz zugrunde gelegt.

Variante 1 2 x Einfachverglasung mit innenliegenden Jalousien an den Südfenstern/unkontrollierte Fugenlüftung (Bestand)

Variante 2 2 x Einfachverglasung mit innenliegenden Jalousien an den Südfenstern/bedarfsgerechte Lüftung ( $20 \text{ m}^3/[\text{h Person}]$ )

Variante 3 Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades i.V. mit einer Sonnenschutzverglasung / bedarfsgerechte Lüftung

#### Ergebnisse der Veränderung der Raumlufftemperatur

Variante	Himmels-orientierung	Ober-geschoss	Max. Raum-lufttemperatur	max. Änderungs-geschwindigkeit der Raumluff-temperatur	max. Tages-schwankung der Raumluff-temperatur
1	Süden	1. OG	$\vartheta_{RL,max} = 27$ °C	$(d\vartheta/dt)_{max} = 3$ K/h	$\Delta\vartheta_{max} = 5$ K
2	Süden	1. OG	$\vartheta_{RL,max} = 27$ °C	$(d\vartheta/dt)_{max} = 3$ K/h	$\Delta\vartheta_{max} = 4$ K
3	Süden	1. OG	$\vartheta_{RL,max} = 25$ °C	$(d\vartheta/dt)_{max} = 3$ K/h	$\Delta\vartheta_{max} = 3$ K

#### Ergebnisse der Veränderung der relativen Raumlufffeuchte

Variante	Himmels-orientierung	Ober-geschoss	max. rel. Raumluff-feuchte	max. Ände-rungsge-schwindigkeit der rel. Raumluff-feuchte	max. Tages-schwankung der rel. Raumluff-feuchte
1	Süden	1. OG	$\phi_{RL,max} = 75$ %	$(d\phi/dt)_{max} = 5$ %/h	$\Delta\phi_{max} = 20$ %
2	Süden	1. OG	$\phi_{RL,max} = 59$ %	$(d\phi/dt)_{max} = 4$ %/h	$\Delta\phi_{max} = 10$ %
3	Süden	1. OG	$\phi_{RL,max} = 61$ %	$(d\phi/dt)_{max} = 4$ %/h	$\Delta\phi_{max} = 6$ %

Aus den oben zusammengestellten Simulationsergebnissen können folgende Aussagen abgeleitet werden: Eine Reduzierung der natürlichen Lüftung über Fensterfugen in Verbindung mit einer bedarfsgerechten Lüftung führt zu einer Stabilisierung des Temperaturverlaufes. Unter extrem sommerlichen Bedingungen kann die Tagesamplitude in den Seitenkabinetten durchschnittlich um ca. 1 Kelvin gesenkt werden. Die Auswirkungen auf die relative Raumlufffeuchte sind noch gravierender. Während im Hochsommer die Tagesschwankungen der Raumlufffeuchte bei unkontrollierter Fugenlüftung bis zu 20 % betragen können, sind bei abgedichteten Fenstern nur noch Schwankungen bis maximal 10 % möglich.

Der Einsatz einer hochwertigen Sonnenschutzverglasung in Verbindung mit einem Sonnenschutz bewirkt eine Reduzierung der Raumlufftemperatur. Auf diese Art können die Tagesmaxima der Raumlufftemperatur in den Südkabinetten um ca. 2 Kelvin und in den Nordkabinetten um ca. 1 Kelvin gesenkt werden. Unter den oben erläuterten extremen Außenklimabedingungen betragen die Maximalwerte der Raumlufftemperatur ohne Anlagenkühlung nur noch 25 °C anstatt 27 °C.

Der Einfluss von Fugenabdichtung und Sonnenschutz auf die Änderungsgeschwindigkeit der Innenklima-parameter ist marginal. Bezüglich der Raumlufftemperatur beträgt die maximale Änderungsgeschwindigkeit in den Seitenkabinetten des 1. OG 2...3 K/h (Einfluss der Veranstaltung im Oberlichtsaal) und im 2. OG

1...2 K/h, bei Sonnenschutzverglasung max. 1 K/h. Die Änderungsgeschwindigkeit der rel. Raumluftfeuchte beträgt ca. 3...5 %/h.

Die unkontrollierte Fugenlüftung über die Fenster muss durch eine kontrollierte und bedarfsgerechte mechanische Lüftung ersetzt werden. Es wird empfohlen den Außenluftvolumenstrom bis auf den hygienisch erforderlichen Außenluftwechsel zu reduzieren und bedarfsgerecht, z. B. über den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft, zu regeln. Der bauklimatische Vorteil dieses Lüftungskonzeptes besteht darin, dass der Störgrößeneinfluss des Außenklimas, insbesondere der unerwünschte Feuchteeintrag in der Übergangs- und Sommerperiode, reduziert werden kann. Positiv wirkt sich eine kontrollierte Lüftung auf niedrigem Niveau auch auf die Heizenergiekosten aus, da die Lüftungswärmeverluste zurückgehen. Die Heizenergieeinsparung beträgt alleine als Folge der abgedichteten Fenster in Verbindung mit einem bedarfsgerechten Außenluftvolumenstrom von  $V = 20 \text{ m}^3/(\text{h Person})$  (ohne Wärmerückgewinnung) bereits ca. 60 %.

Die Fensterverglasung und der Sonnenschutz müssen die Transmissionswärmeverluste im Winter reduzieren, durch die Verringerung der Sonneneinstrahlung die Strahlungsgewinne im Sommer verringern und so weit wie möglich Infrarot-Strahlung eliminieren und UV-Strahlung ausfiltern. Gleichzeitig wird eine möglichst hohe Farbneutralität angestrebt und eine gewisse Transparenz zur Außenwelt erwünscht.

Um die Anforderungen im Bereich der Fenster/Verglasungen zu erfüllen, stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

#### Außenliegende Fensterebene

Die außenliegende Fensterebene prägt im Wesentlichen das äußere Erscheinungsbild eines Gebäudes mit und unterliegt demzufolge denkmalpflegerischen Zwängen. Eine Veränderung der bestehenden Außenverglasung wird daher nicht in Erwägung gezogen.

#### Innenliegende Fensterebene

Für die innenliegende Fensterebene wird eine wärmetechnische Nachrüstung empfohlen. Hierbei sollte eine farbneutrale Sonnenschutzverglasung mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von  $g \approx 0,20 \dots 0,34$  zum Einsatz kommen. Je kleiner der g-Wert der Verglasung ist, desto größer ist die stabilisierende Wirkung auf das Raumklima und desto geringer wird die zur Aufrechterhaltung eines vorgegebenen Temperaturniveaus erforderliche Kühlleistung. Die bauklimatisch günstigen Auswirkungen einer Sonnenschutzverglasung sind auch bei den nach Norden orientierten Fenstern noch spürbar.

#### Zwischenebene

Im Zwischenraum der Kastenfenster können Jalousien zur Abschirmung angeordnet werden.

Als weitere Lösungsvarianten mit verbesserten Abschirmeigenschaften stehen zur Verfügung:

Verwendung einer metallisch reflektierenden Blendschutzfolie. Die Blendschutzfolien werden bevorzugt beweglich an den Flügelrahmen der Fenster befestigt. Unter Umständen ist ein motorischer Antrieb mit Grenzwertsteuerung nach der Strahlungsintensität geeignet.

Einsatz eines thermotropen Beschichtungssystems. Hierbei handelt es sich um einen thermooptischen variablen Polymerwerkstoff (TOP) der bevorzugt auf eine Kunststoffverglasung aufgebracht wird. Die TOP-Beschichtung bewirkt eine temperaturabhängige Strahlungstransmission in der Art, dass sich die beschichtete Scheibe bei ansteigender Oberflächentemperatur eintrübt (ähnlich wie Milchglas) und einen größer werdenden Anteil der Strahlung reflektiert. Insbesondere die kurzwellige UV-Strahlung kann auf diese Weise effektiv zurückgehalten werden. Die infolge der Eintrübung reduzierte Lichteinstrahlung führt zu einer homogenen, diffusen Ausleuchtung des Raumes ohne Schlagschatten oder ähnlichem. An Tagen mit geringerer Strahlungsintensität lässt die Eintrübung nach und die Transparenz nach außen nimmt zu.

Der Temperaturbereich bei dem der Selbstregulierungseffekt einsetzt ist einstellbar. Darüber hinaus kann die

TOP-Beschichtung auch regelbar ausgeführt werden. Eine variable Installation einer mit thermotroper Beschichtung versehenen Glasscheibe kann in den Zwischenraum der Kastenfenster eingesetzt werden.

Betrachtungen unterschiedlicher Klimakonzepte

Aufgrund der Tatsache, dass zur Klimastabilisierung in den klimatisch sensiblen Ausstellungsräumen ein hohes Dichtheitsniveau an den Außenfenstern gefordert wird, ist zur Deckung des hygienisch erforderliche Außenluftaustausches eine mechanisch betriebene Lüftung (RLT-Anlage) erforderlich. Dieser mechanisch erzwungene Außenluftvolumenstrom kann bedarfsgerecht geregelt und kontrolliert den Ausstellungsräumen zugeführt werden. Es ist naheliegend, der ohnehin vorhandenen Lüftungsanlage weitere Klimatisierungsfunktionen wie Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten schrittweise zuzuordnen, sofern diese erforderlich werden.

Allen Berechnungen wird bereits der bauliche Zustand nach einer Gebäudeinstandsetzung, wie zuvor erläutert, zugrunde gelegt.

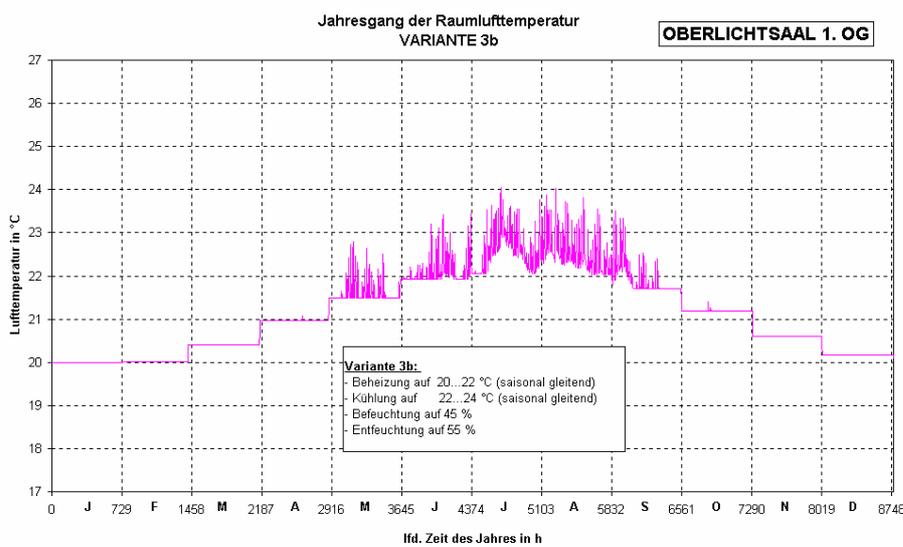
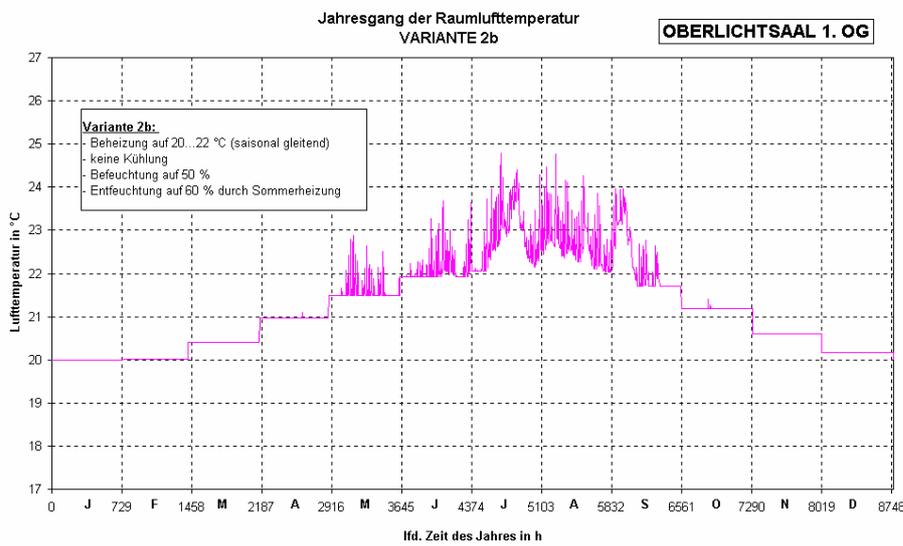
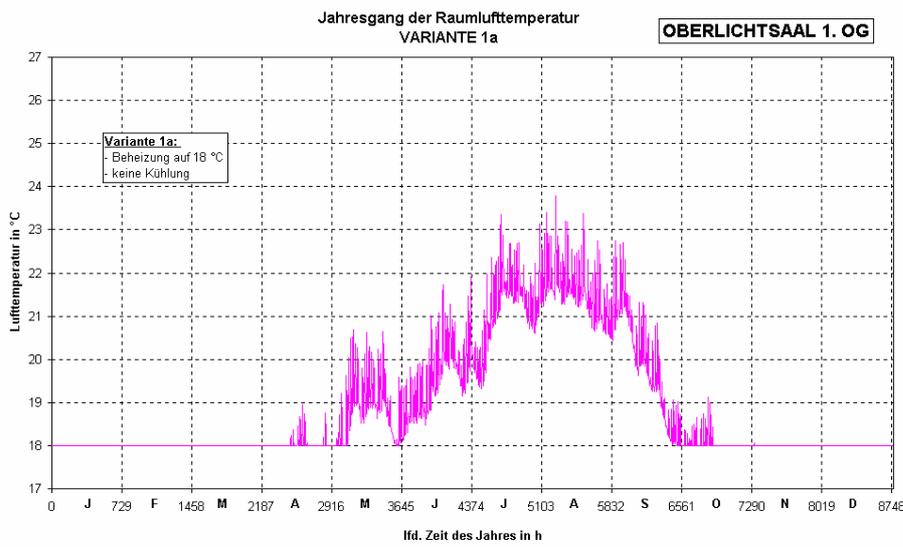
Diese gewählten Klimatisierungskonzepte unterscheiden sich durch

die Auswahl der thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen (Luftheizung, -befeuchtung, -kühlung, -entfeuchtung) und

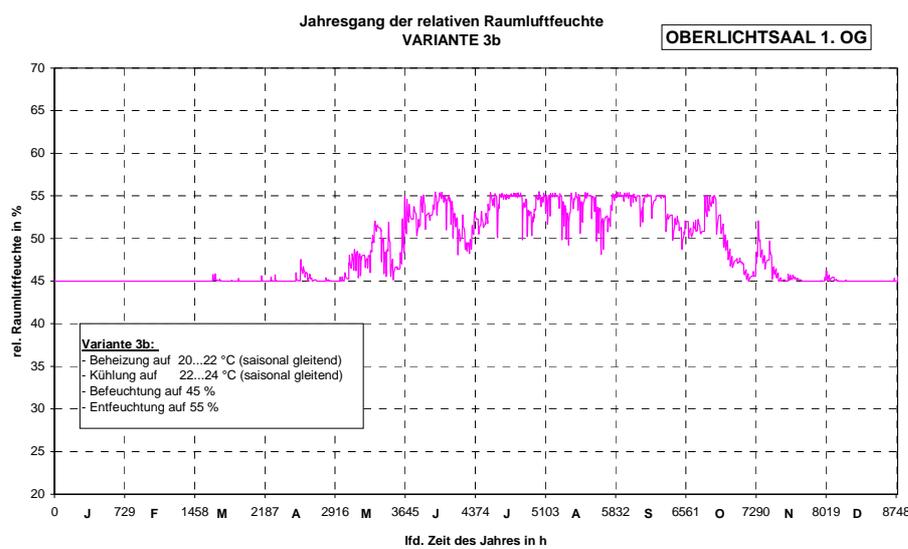
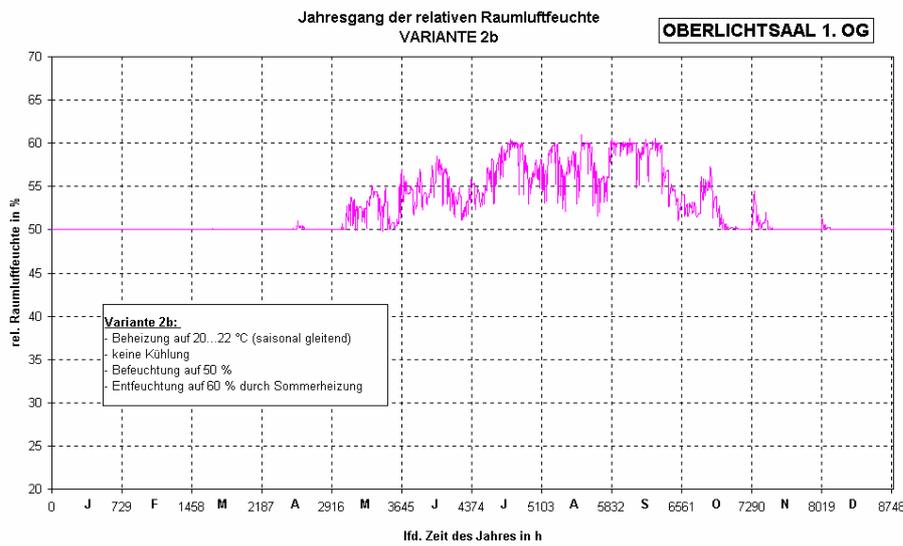
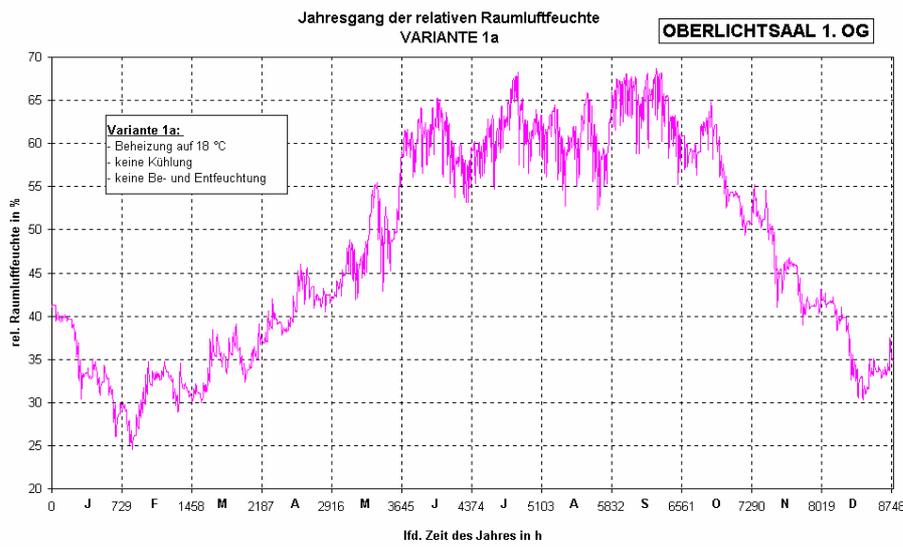
die Festsetzung der konservatorischen Anforderungen an das Raumklima

Zusammenstellung der Berechnungsvarianten

Variante	Thermodynamische Luftbehandlung	Sollwertbereich des Raumklimas
1a	Heizen	$\vartheta_{RL} \geq 18 \text{ °C}$ (Vorgaben lt. Museum)
2a	Heizen Befeuchten	$\vartheta_{RL} \geq 18 \text{ °C}$ (Vorgaben lt. Museum) $\phi_{RL} = 50 \% \dots 55 \%$ (Vorgaben lt. Museum)
2b		$\vartheta_{RL} \geq 20 \text{ °C} \dots 22 \text{ °C}$ (saisonal gleitend) $\phi_{RL} = 50 \% \dots 60 \%$
3a	Heizen Befeuchten	$\vartheta_{RL} = 19 \text{ °C} \pm 1 \text{ K}$ (Vorgaben lt. Museum) $\phi_{RL} = 50 \% \dots 55 \%$ (Vorgaben lt. Museum)
3b	Kühlen Entfeuchten	$\vartheta_{RL} = 21 \text{ °C} \pm 1 \text{ K} \dots 23 \text{ °C} \pm 1 \text{ K}$ (saisonal gleitend) $\phi_{RL} = 45 \% \dots 55 \%$
$\vartheta_{RL}$	...	Raumlufttemperatur
$\phi_{RL} \dots$	relative Raumluftfeuchte	



Verläufe Raumlufttemperatur im Jahresgang



Verläufe Raumlufffeuchte im Jahresgang

Berechnungsergebnisse Jahresenergieverbrauch je m<sup>2</sup> Ausstellungsfläche in kWh/(m<sup>2</sup> a).

Variante	Heizen	Kühlen	Befeuchten	Entfeuchten
1a	70	-	-	-
2a	90	-	5	-
2b	98	-	7	-
3a	71	4	5	2
3b	97	0,6	5	0,7

Bei den im Rahmen der Gebäudesimulation ermittelten Energiemengen handelt es sich ausschließlich um die für Heizung, Befeuchtung, Kühlung und Entfeuchtung erforderlichen Wärme bzw. Kälte. Nicht enthalten ist die elektrische Energie zum Antrieb von Ventilatoren.

#### Diskussion der Berechnungsergebnisse

##### Variante 1a

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die so genannte Basis- oder Minimalvariante. Das Klimatisierungskonzept dieser Variante beinhaltet lediglich die thermodynamische Luftbehandlungsfunktion Heizen. Heizen ist die Grundvoraussetzung um das Gebäude für den Zeitraum eines gesamten Jahres nutzbar zu machen.

Während der Heizperiode wird die Raumlufthtemperatur auf + 18 °C angehoben. Im Zeitraum von Mai bis September beginnt die Raumlufthtemperatur frei zu schwingen. Hierbei wird die vom Museum vorgegebene Obergrenze von + 20 °C überschritten. Die maximale Raumlufthtemperatur in der Sommerperiode liegt im Bereich von + 23 °C ... + 24 °C. In den Seitenkabinetten wird die 24 °C – Grenze an wenigen Tagen kurzzeitig überschritten. Die erweiterten Anforderungen an die Raumlufthtemperatur werden jedoch eingehalten.

Bezüglich der relativen Raumlufffeuchte kann anhand der Simulationsergebnisse festgestellt werden, dass, bis auf kurzzeitige Ausnahmen in der Übergangsperiode, die geforderten Kennwerte nicht eingehalten werden können. Auch die erweiterte Bandbreite, wonach sich die rel. Feuchte im Bereich von 45 % ... 60 % bewegen darf, wird zum überwiegenden Teil unter- bzw. überschritten.

##### Bewertung der Variante:

Die vom Museum vorgegebenen strengen Randparameter für Raumlufthtemperatur und relative Raumlufffeuchte können durch das alleinige Beheizen der Ausstellungsräume in großen Zeiträumen nicht eingehalten werden. Der Temperaturverlauf ist jedoch dann akzeptabel, wenn die abgeänderten Klimaanforderungen mit erweiterter Bandbreite zugrunde gelegt werden.

Die Berechnungsergebnisse zeigen deutlich, dass auf Maßnahmen zur Be- und Entfeuchtung der Raumluff auf keinen Fall verzichtet werden kann.

### Varianten 2a und 2b

In einem nächsten Schritt erfolgt neben dem Beheizen eine Befeuchtung der Luft. Die notwendige Entfeuchtung der Raumluft während der Sommerperiode wird mittels Aufheizen der Luft realisiert. Auf diese Weise kann die kostenintensive Luftbehandlungsfunktion ‚Entfeuchten‘ umgangen werden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Frage, auf welche Temperatur im Sommer geheizt werden muss, um die geforderte Obergrenze der relativen Raumluftfeuchte nicht zu überschreiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die vom Museum gewünschte Obergrenze von + 20 °C erwartungsgemäß von Mai bis September überschritten wird. Die Maximalwerte der Raumlufttemperatur bewegen sich im Bereich von 25 °C ... 26 °C. An wenigen Tagen im Jahr wird auch die 26 °C–Grenze überschritten. Die Sommerheizung bewirkt also eine um ca. 2 Kelvin höhere Raumlufttemperatur im Vergleich zu Variante 1. Die Raumlufttemperatur von 24 °C wird an ca. 500 Stunden im Jahr überschritten. Aus konservatorischer Sicht sind die sommerlichen Temperaturen in dieser Häufung nicht akzeptabel.

Um das, infolge der Sommerheizung, relativ hohe Temperaturniveau zu senken, wird in Variante 2b die zulässige Obergrenze der relativen Raumluftfeuchte von 55 % auf 60 % angehoben. Gleichzeitig erfolgt in Variante 2b eine Abänderung des Sollwertbereiches für die Raumlufttemperatur in der Art, dass eine allmähliche Anpassung der Innen- an die Außentemperatur erfolgt (saisonales Gleiten). Hierdurch wird u.a. auch dem Behaglichkeitsbedürfnis der Besucher Rechnung getragen.

Wie die Ergebnisse zeigen, kann mit der Aufweitung des zulässigen Feuchtebereiches um 5 % rel.F. das sommerliche Temperaturniveau um ca. 1 Kelvin gesenkt werden. Die Anzahl der Stunden im Jahr, an denen eine Raumlufttemperatur von 24 °C überschritten wird, liegt in allen Ausstellungsbereichen unterhalb der in [13] angegebenen 150-Stunden-Grenze.

Dies würde bedeuten, dass es sich bei Variante 2b um eine Lösung handelt, bei der mit moderatem technischem Aufwand befriedigende Raumklimaverhältnisse erzeugt werden können.

### Bewertung der Varianten 2a und 2b:

Die vom Museum vorgegebene Bandbreite für die relative Raumluftfeuchte kann mit den Varianten 2a und 2b eingehalten werden, die Bandbreite der Raumlufttemperatur jedoch nicht.

Um auf einigermaßen befriedigende Raumlufttemperaturen zu gelangen, muss der Anforderungsrahmen der relativen Raumluftfeuchte von 50 %...55 % auf 50 %...60 % aufgeweitet werden (Variante 2b). Dieser Bereich wird aus konservatorischer Sicht im Allgemeinen akzeptiert.

Die sich infolge der notwendigen Sommerheizung einstellenden Maximal-Temperaturen liegen im Regelfall (durchschnittlicher Sommer) im Bereich von + 24 °C ... + 25 °C. Auch dieser Temperaturbereich kann konservatorisch durchaus toleriert werden, sofern keine extreme Häufung derartiger Klimazustände auftritt. Im vorliegenden Fall erfolgt die Überschreitung der 24 °C–Grenze im Regelfall an weniger als 150 Stunden im Jahr. Auch bei extremen Außenklimabedingungen und erhöhten inneren thermischen Belastungen beträgt die maximale Raumlufttemperatur am fünften Tag einer heißen und feuchten Sommerperiode  $\vartheta_{RL} = + 28 \text{ °C}$  und liegt somit noch innerhalb des geforderten Klimabereiches nach [13]. Aus planerischer Sicht liefert die hier untersuchte Extremsituation ausreichende Sicherheit, da es z. B. sehr unwahrscheinlich ist, dass an fünf aufeinanderfolgenden extrem hochsommerlichen Tagen gleichzeitig ein über die gesamte Öffnungszeit außergewöhnlich großer Besucherandrang vorherrscht.

Die jahreszeitliche Anpassung der Innentemperatur an die Außentemperatur bewirkt eine Stabilisierung des Temperaturverlaufes im Tagesgang, insbesondere in der Übergangsperiode.

### Varianten 3a, 3b

Die Varianten 3a und 3b beinhalten Klimakonzepte, bei denen neben den Luftbehandlungsfunktionen Heizen und Befeuchten auch die Zustandsänderungen Kühlen und Entfeuchten enthalten sind.

Auf diese Weise wird es möglich jeden gewünschten Raumklimazustand anzusteuern. Von technischen Grenzen auf dem Gebiet der Regelung abgesehen, können also mit einer derart komplexen Luftaufbereitung prinzipiell alle Klimaanforderungen befriedigt werden.

Eine Kausalität besteht zwischen dem Anforderungsprofil an das Raumklima und dem sich daraus ergebenden anlagen- und regelungstechnischen Aufwand und dem Energieverbrauch bzw. den Betriebskosten der Anlage. Die Fragestellung lautet also: Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Klimaanforderungen auf die Last- und Energiegrößen und damit auf die Investitions- und Betriebskosten? Hierzu werden zunächst die Auswirkungen der vom Museum vorgegebenen Klimaanforderungen nach (Variante 3a) mit den Auswirkungen des abgeänderten Anforderungsprofils (Variante 3b) verglichen.

Der Vergleich der Heiz- und Kühllasten zeigt zunächst, dass die Lastspitzen in etwa gleich groß sind. Während die maximale Heizlast bei beiden Varianten etwa  $30 \text{ W/m}^2$  beträgt, lässt sich für die maximale Kühllast jeweils ein Wert von ca.  $8 \text{ W/m}^2$  ermitteln. Das heißt die Auswirkungen beider Varianten auf die Anlagendimensionierung sind relativ gering. Die Ursache, weshalb sich die Kühllast bei einer Kühlung auf  $+24 \text{ °C}$  (Variante 3b) gegenüber der Kühllast bei einer Kühlung auf  $+20 \text{ °C}$  (Variante 3a) nur unwesentlich reduziert, liegt darin begründet, dass der Kühllastanteil infolge Transmission relativ gering ist. Es überwiegen die innere Kühllast und die Strahlungslast durch die Fenster, also Lastanteile, die auf das bestehende Temperaturniveau im Raum auf-satteln.

Deutliche Unterschiede lassen sich jedoch bei den jährlichen Energieverbräuchen erkennen. Variante 3b weist gegenüber Variante 3a einen Mehrverbrauch an Heizenergie von  $\Delta \approx 26 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$

auf. Ursache dafür ist die Anhebung des Temperaturniveaus während der Heizperiode von  $+18 \text{ °C}$  (Variante 3a) auf  $+20 \text{ °C}$  in Verbindung mit einer jahreszeitbedingten Erhöhung der Innentemperatur (Variante 3b). Diese Abänderung wird aus bauklimatischer Sicht als sinnvoll angesehen. Die Vorteile sind:

Erhöhung des thermischen Komforts für Mitarbeiter und Besucher

Stabilisierung des Temperaturverlaufes und indirekt auch des Verlaufes der rel. Feuchte, da das freie Schwingen der Raumlufttemperatur während der Übergangs- und Sommerperiode gedämpft wird.

Im Gegenzug Einsparung an Kühlenergie, da im Sommer nur noch auf  $+24 \text{ °C}$  anstatt auf  $+20 \text{ °C}$  heruntergekühlt werden muss.

Den Berechnungen zufolge kann bei einer Aufweitung des Temperaturbereiches im Sommer auf  $+24 \text{ °C}$  eine Einsparung an Kühlenergie von  $\Delta \approx 3,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$

erzielt werden. Außerdem wird deutlich, dass es sich bei der Luftkühlung nach Variante 3b nur um ein zeitlich gesehen punktuell Abdecken von Lastspitzen und keine Dauerkühlung handelt.

Während der erforderliche Energiebedarf zum Luftbefeuchten in etwa gleich groß bleibt, lässt sich bei Variante 3b gegenüber Variante 3a eine Energieeinsparung zur Luftentfeuchtung von  $\Delta \approx 1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  ermitteln.

Auch unter Berücksichtigung, dass die Energiekosten der Luftbehandlungsfunktionen Kühlen und Entfeuchten um ca. 3- bis 4-mal höher liegen als bei einer Luftbeheizung, ergibt sich für Variante 3b gegenüber Variante 3a eine etwas ungünstigere Betriebskostenbilanz. Der Grund hierfür liegt in erster Linie an dem um 2 Kelvin höheren Temperaturniveau in der Heizperiode. Mit Rücksicht auf die sich in den Ausstellungsräumen aufhaltenden Mitarbeiter, wird jedoch eine Mindesttemperatur von  $\vartheta_{\text{RL}} = +20 \text{ °C}$  empfohlen (siehe auch [15]).

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Außenwände der Ausstellungsräume bei bestehenden Museen bedürfen i.A. einer wärmeschutztechnischen Nachrüstung. Eine bauphysikalisch sichere Variante ist das Aufbringen eines innenliegenden Wärmedämmputzsystemes. Auf diese Weise wird das Schadensrisiko bezüglich Oberflächenfeuchte und Schimmelbelagbildung deutlich vermindert. Gleichzeitig werden Bau- und Nutzungskosten, die Heizungsanlage betreffend, eingespart.

Die Außenfenster schwächen die thermische Stabilität der Ausstellungsräume. Maßnahmen zur Verringerung der Fugendurchlässigkeit und zur Verbesserung des Sonnenschutzes wirken sich auch an Nordfenstern sehr günstig auf den Innenklima- sowie Wärmelastverlauf aus.

Zusätzliche Sonnenschutzvorkehrungen an Oberlicht- und Dachverglasungen sind aus raumklimatischer Sicht nicht sehr effektiv. Mit Hilfe eines noch zu präzisierenden Lüftungskonzeptes im Dachraum über vorhandene Oberlichter kann überschüssige Wärme an die Umgebung abgeführt werden.

Der Einfluss des Besucherverkehrs auf den Innenklimaverlauf ist relativ gering, wenn sich der Besucherstrom zeitlich und örtlich gleichmäßig verteilt. Auch der störende Einfluss von Besuchergruppen hält sich in vertretbaren Grenzen. Lediglich Großveranstaltungen führen zu einer drastischen Verschlechterung der raumklimatischen Situation. In diesem Zusammenhang ist die Frage zu beantworten, ob für kurzzeitige Veranstaltungen eine anlagentechnische Aufrüstung wirtschaftlich und konservatorisch zu rechtfertigen ist.

Es wurden unterschiedliche Klimatisierungskonzepte sowohl raumklimatisch als auch energetisch näher untersucht. Diese Klimatisierungskonzepte unterscheiden sich durch die Auswahl der thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen (Luftheizung, -befeuchtung, -kühlung, -entfeuchtung) und die Festsetzung der konservatorischen Anforderungen an das Raumklima.

Bei der Variation der technischen und klimatischen Rahmenbedingungen zeigt sich, dass bei Zulässigkeit des Raumklimas innerhalb tolerierbarer Grenzen, hier saisonal gleitend, wirtschaftliche Möglichkeiten, gerade auch bei Reduzierung der Anlagentechnik, zu erzielen sind.

Die vorliegende Veröffentlichung stellt das Ergebnis einer baukonstruktiven und bauklimatischen Untersuchung dar, bei der es zunächst darum ging, eine Entscheidungsvorlage für ein in allen Belangen sinnvolles Klimakonzept zu liefern.

Weitere Aufgabenstellungen sind aus bauphysikalischer Sicht zu bearbeiten:

- Berechnung der Raumluftrömung in einem Oberlichtsaal (stationäre Strömungssimulation) zur Überprüfung von Temperaturschichtungen und Luftgeschwindigkeiten.
- Tageslichtstudie mit Simulation der Tageslichtausbreitung in den Ausstellungsräumen.
- Überprüfung von Einsatzmöglichkeiten der Flächenheizung und Flächenkühlung im Wand- und Fußbodenbereich.

Hierzu zählt auch eine bauphysikalische Stellungnahme zur so genannten „Wandtemperierung“.

Detailuntersuchung zum Temperatur- und Feuchteverhalten im wandnahen Bereich und deren Auswirkungen auf die Gemälde. (abgeschlossenes Forschungsvorhaben des BBS INGENIEURBÜRO)

### Zusammenfassung

Neben der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit der Bauteilkonstruktionen muss in museal genutzten Räumen auch die Klimastabilität des Baukörpers erhöht werden. Am Beispiel des Herzog-Anton-Ulrich-Museums Braunschweig wurden für die im Rahmen einer Gebäudemodernisierung erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen bauphysikalische Berechnungen unter instationären Randbedingungen (Simulationen) durchgeführt. Mit Hilfe dieser Berechnungen ist es zum einen möglich, bauliche Grundanforderungen für eine bauphysikalisch richtige Instandsetzung zu entwickeln und die Planungssicherheit zu erhöhen. Zum anderen ermöglicht die Si-

mulation des ganzjährigen Wärme-, Feuchte- und Energieverhaltens der Ausstellungsräume eine Optimierung des Klimatisierungskonzeptes in Abhängigkeit des anlagentechnischen Aufwandes und verschiedener Anforderungsprofile an das Raumklima. Hierzu werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten diskutiert.

## Literatur

E DIN 4108-20: Wärmeschutz im Hochbau, Teil 20: Thermisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Berechnungsalgorithmen (Vorschlag für eine Europäische Norm), Juli 1995

E DIN EN ISO 13792: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien für vereinfachte Berechnungsverfahren, Oktober 1997

VDI-Richtlinie 6020: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, Blatt 1: Gebäudesimulation, Mai 2001

DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Teile 2 und 3 (Ausgabe 08/81) und Teil 4 (Ausgabe 11/91)

E-DIN 4108-20 "Wärmeschutz im Hochbau", Teil 20: Thermisches Verhalten von Gebäuden – sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik (Vorschlag für eine Europäische Norm); Ausgabe 07/95

DIN EN ISO 7730 "Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit", Ausgabe 09/95

DIN 1946 "Raumluftechnik", Teil 2: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln); Ausgabe 01/94

DIN EN ISO 10211-1 "Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen", Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (Ausgabe 11/95)

VDI-Richtlinie 2078 "Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)", Ausgabe 10/94

Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung WSchV) vom 16.08.1994 mit Anlagen

Testreferenzjahre; Deutscher Wetterdienst Offenbach – Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung; Datum der Erstellung: 11/84

Vorlesungsskripte zur Baukonstruktion und Bauphysik; Leimer u.a., FH-Hildesheim WS 2001

TRNSYS, Version 14.2

A Transient System Simulation Program; Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, Madison WI 53706 U.S.A.; 04/97

WUFI, Version 2.0

PC-Programm zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes; Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen; 1997

Feist, W.: Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden – ein Methodenvergleich, Bauphysik 16 (1994), H. 2, S. 42 ff.

Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation – Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze (1. Auflage), Verlag C. F. Müller GmbH Heidelberg, 1994

Glück, B.: Testreferenzjahr – ein Vorschlag zur Neudefinition und Ergänzung, Gesundheits-Ingenieur 116 (1995), H. 5, S. 258 ff.

Rouvel, L.; Zimmermann, F.: Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens, Teil 1: HLH 48 (1997), H. 10, S. 66 ff., Teil 2: HLH 48 (1997), H. 12, S. 24 ff.

Leimer, H.-P.: Beitrag zur Bestimmung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen bei der Sanierung historischer Fachwerkgebäude, Dissertation Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar; 1991  
Hinweise zur Planung und Ausführung von Raumluftechnischen Anlagen für öffentliche Gebäude (RLT-

Anlagen-Bau-93); Aufgestellt und herausgegeben vom Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV); Bonn 1993

Raumklima in Museen; Eine Informationsschrift des Fachinstitutes Gebäude-Klima e.V.; Bietigheim-Bissingen 1999

Huber, A.: Klimaschwankungen und ihre Auswirkungen auf Kunst- und Kulturgut in öffentlichen Sammlungen. Aus: Linzer Werkstattgespräche (3. Auflage) 1992

Hilbert, G.S.: Sammlungsgut in Sicherheit; Teil 2: Lichtschutz – Klimatisierung; Gebr. Mann Verlag Berlin 1987