

Thermisch- energetische Gebäudesimulation

Möglichkeiten zur Bestimmung des zu erwartenden Raumklimas bei der Planung und Instandsetzung von Gebäuden

Hans-Peter Leimer, Wolfenbüttel

Mit den Weiterentwicklungen in der Bautechnik und den Veränderungen der gesetzlichen Normen und Verordnungen erlangt die bauphysikalische Bewertung von Baumaßnahmen des Neubaus, aber auch insbesondere 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.

Ein der Möglichkeiten das zukünftige Verhalten von Gebäuden und Bauteilen in Hinblick auf ihre wärme - und feuchtetechnischen Veränderungen zu beschreiben ist der Einsatz von dynamischen Gebäude- und Bauteilsimulationsberechnungen.

Hierbei besteht die Möglichkeit, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Optimierung der Gebäude und Bauteile durchzuführen ohne die Gebrauchstauglichkeit der Bauteile und Baustoffe zu gefährden.

1 Grundlagen

(siehe auch [14]) Die Bauphysik befasst sich mit Energie- und Stoffströmen die von innen, bedingt durch die Gebäudenutzung, und von außen, infolge des Außenklimas, auf ein Gebäude einwirken.

Thermische und hygrische Prozesse verhalten sich zeitabhängig, d. h. instationär. Das instationäre Verhalten von Übertragungsvorgängen 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 Lösung immer mit idealisierten Anfangs- und Randbedingungen verbunden ist. 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 werdender 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 Massestrombilanzen 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 getrennt 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 planerischem 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, DS-THERM, GEBSIMU, TAS und TRNSYS (siehe auch Kap. 5) 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.

1.1 Das Simulationsmodell

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

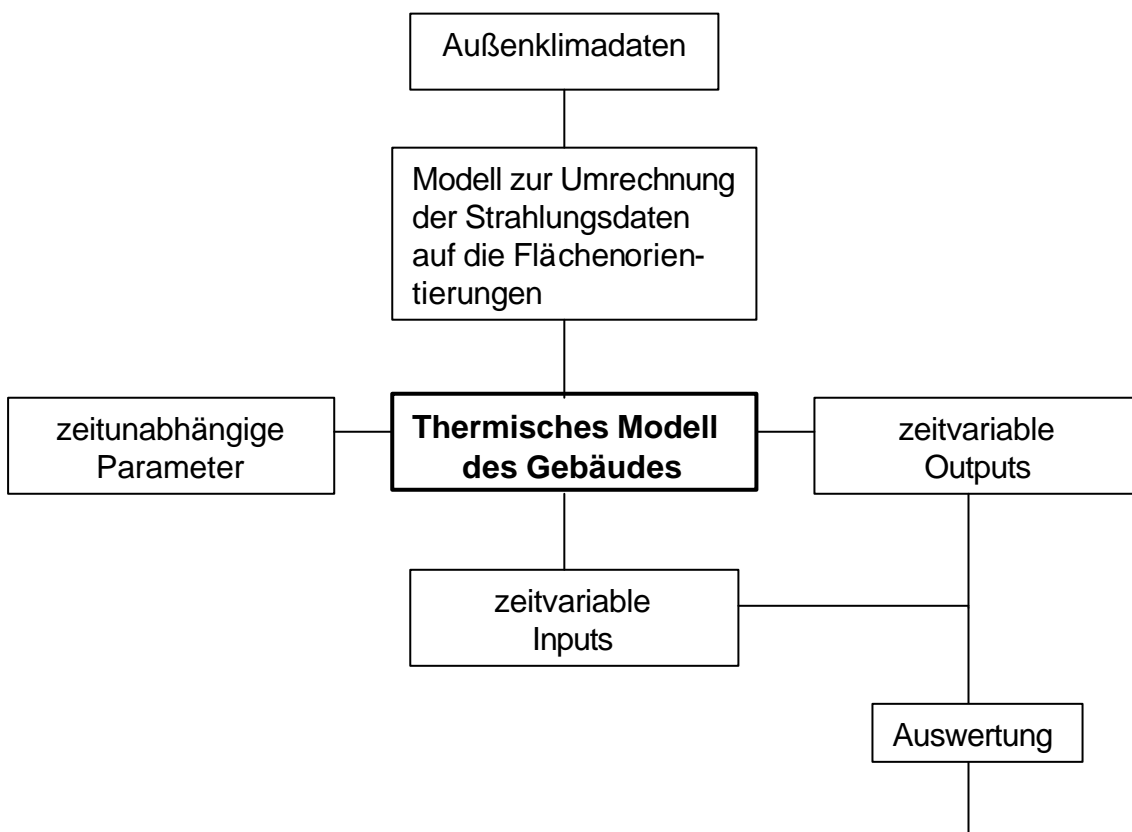


Bild 1 Informationsfluss einer Gebäudesimulation

1.1.1 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 wiedergegeben.

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.

1.1.2 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.

1.1.3 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 Wärmebilanzsystemes innerhalb einer Zone gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Modellansätze:

1. 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 Raummodelles voraus.
2. 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 approximierten 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:

1. 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 Bauteilinneren ermittelt werden können.
2. 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 Gewichtsfaktoren nur für einen bestimmten Wertebereich gültig, was die Universalität des Modelles und damit des Simulationsprogrammes 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.
3. 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 aufwändig 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.

1.1.4 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.

1.1.5 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 gemittelte Außenluftwechselraten 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 Grenzwertregelungen oder ganzen Regelszenarios entsprechender Anlagenkomponenten.

1.2 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:

1.2.1 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:

1. 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.
2. 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.

1.2.2 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.

1.2.3 Weitere Anwendungsfälle

Neben den oben genannten häufig anzutreffenden Planungsaufgaben können mit einer thermischen Gebäudesimulation noch eine Reihe weitere 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 CO₂-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.

1.3 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 Programmes in Verbindung mit der VDI-Richtlinie 6020 vertraut ist.

2 Fallbeispiel 1 - Bauphysikalische Beurteilung eines Bürogebäudes

Es werden immer häufiger Bürogebäude gefordert, die definierte klimatische Verhältnisse gewährleisten, jedoch im Gegensatz zum Bürohausbestand auf technologisch andersartigen Konzepten beruhen. Neben repräsentativen Funktionen stellen sich diese Gebäude der Aufgabe, den Gesamtenergiebedarf und den CO₂-Ausstoß gegenüber vollklimatisierten Gebäuden zu reduzieren und dem Nutzer das Empfinden einer "natürlichen Belüftung" zu ermöglichen.

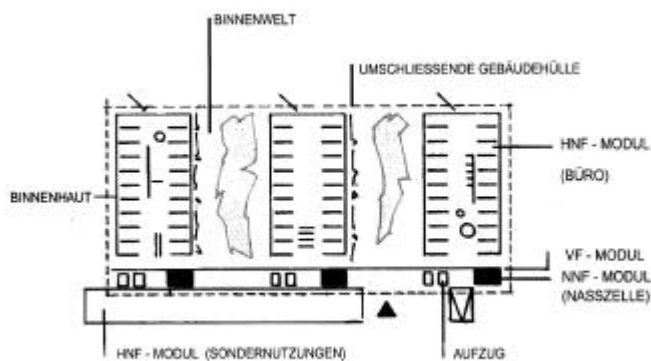


Bild 2 Company Typ, gehobener Standard

Zur Erläuterung der in den Grafiken/Bildern dargestellten Zonen:

Büros/HNF Süd	-	BUES	_x
Büros/HNF Nord	-	BUEN	_x
Büros/HNF West	-	BUEW	_x
Grünhöfe/Binnenwelten	-	HOF	_x
Dachraum über Büros/HNF-Modul, unter dem Glasdach	-	DACH	

mit _x = Ebene 0 bis 3

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 z.B. 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 Stahlglasskonstruktion 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 und aus Lüftung) sowie die Wärmegewinne (i.d.R. aus Solaren Gewinnen und aus sog. Innenwärmekomponenten, d.h. Personen und Geräte) 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.

2.1 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.

2.2 Baustoffe und Bauteile

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, sind zu berücksichtigen.

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

2.3 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
+2	warm
+1	etwas warm
0	neutral 'Behaglich' gilt der Bereich zwischen +0.5 und -0.5
-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.

Es ergeben sich somit mittlere Grenztemperaturen ...

... für 'behaglich': 27 °C

... für 'etwas warm': 29 °C

Gemäß den allgemein anerkannten Behaglichkeitsmaßstäben können optimale Raumklimaverhältnisse erreicht werden, wenn die empfundene Temperatur während der Sommerperiode im Bereich von $\theta_{\text{empf}} = 23...26$ °C liegt. Bei moderner Bauweise mit großflächigen Außenverglasungen und leichtem Innenausbau sind diese relativ engen Grenzen jedoch oft nur mit aufwändiger Klimatechnik aufrecht zu erhalten.

2.4 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 Frischluft und / oder Heiz- bzw. Kühlleistung maßgebend. Diese Einflüsse können sich je nach Jahreszeit positiv oder negativ auswirken.

2.4.1 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 Geräteeinträge wurde die Wärmelast nach üblichen Werten (VDI 2078, etc.) angegeben.

Personen:

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

Geräte:

Hierbei werden die Wärmeabgaben von PC, Drucker, Kopierer, Teeküche etc. dargestellt. Für den PC-Arbeitsplatz wurden 150 W angesetzt. Durch die Berücksichtigung von Geräte-Schlafmodi wurde ein ungünstiger Reduktionsfaktor von 75 % angenommen.

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 beträgt 14 W/m².

Feuchteintrag Pflanzen:

Der Feuchteintrag durch die Pflanzen im Grünhof wurde bei der dynamischen Gebäudesimulation in diesem Falle nicht berücksichtigt.

2.4.2 Heizung / Kühlung

In den einzelnen Raumzonen wurden die folgenden Mindesttemperaturen für die Beheizung zu Grunde gelegt. Die maximale Heizleistung beträgt 40 W/m², in den West-Büros 45 W/m².

Die Büros erhalten jeweils eine Kühldecke. Es wird von einer Kühlleistung von 70 W/m² bei Erreichen der Kühlgrenztemperatur ausgegangen.

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

2.4.3 Lüftung / Lüftungstemperatur

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

In der Simulationsberechnung wurde das nachfolgend beschriebene Lüftungskonzept in Ansatz gebracht, das nur Extremsituationen erfasst:

- 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 m³/h je Bürozone nach DIN 1946 T2 ausgegangen.
- Fortluft der Büros in den Hof.
- Eine Nachtwärmung 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.

2.5 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. Hier empfiehlt sich eine ergänzende Betrachtung mit den Klimadaten nach VDI 2087.

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.

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

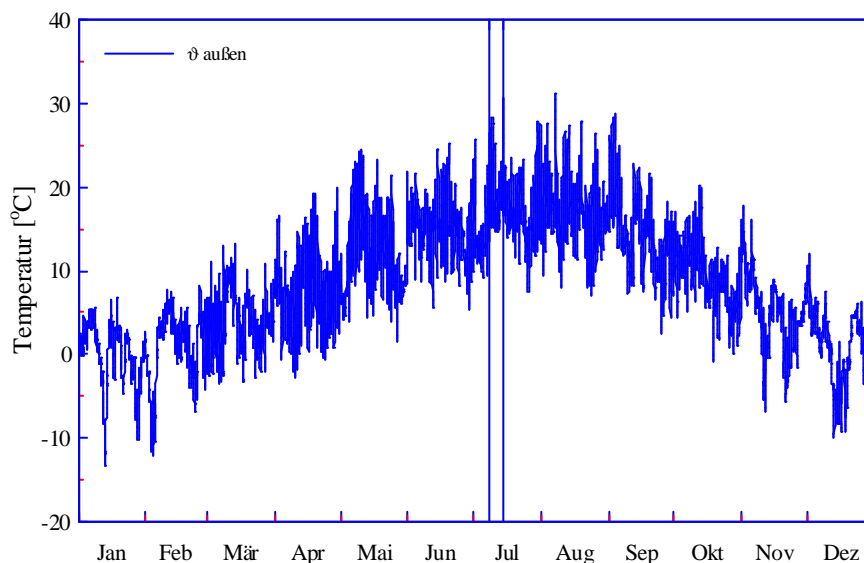


Bild 3 Außentemperaturverlauf (Auswahl der dargestellten Tage)

Zu beurteilende Größe ist hier die Raumtemperatur bzw. bei den Bürozonen (BUE__) die empfundene Raumtemperatur (Mittelwert aus Luft- und Strahlungstemperatur).

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

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

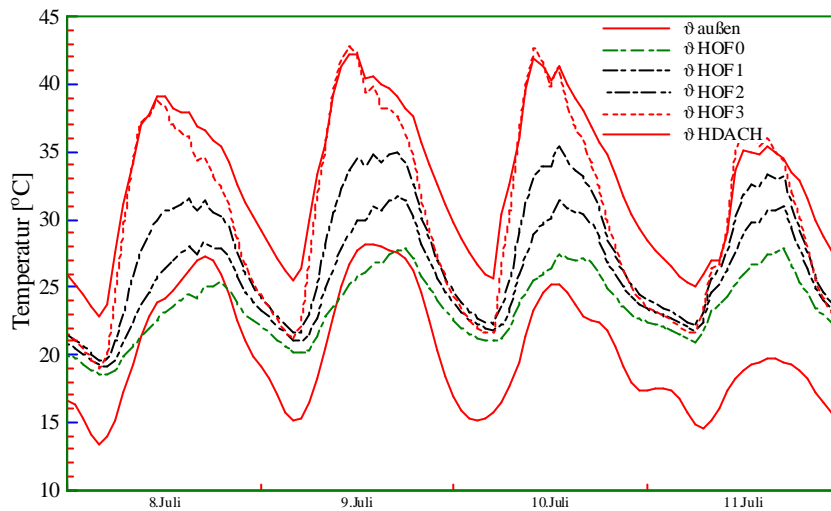


Bild 4 Temperaturverlauf HOF 0-3 und HDACH

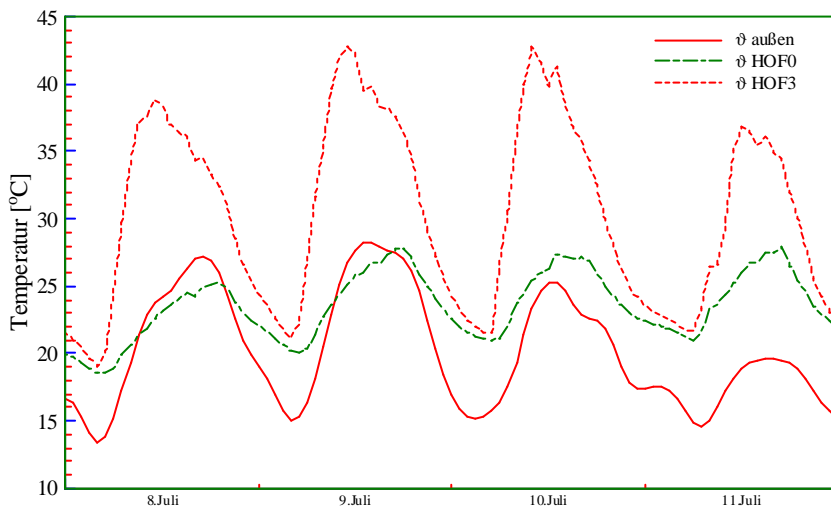


Bild 5 Temperaturverlauf HOF 0, HOF 3

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	ϑ_{\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

Tabelle I. Zonen Büro (BUE_)

Die Bürozone SÜD und NORD werden durch die direkte Lage zum Grünhof von dessen Temperaturverhalten durch Transmission und solare Wärmegewinne mit beeinflusst.

Der Vergleich der Temperaturentwicklung in den verschiedenen Büros ist in den Bildern 6 bis 8 zu sehen.

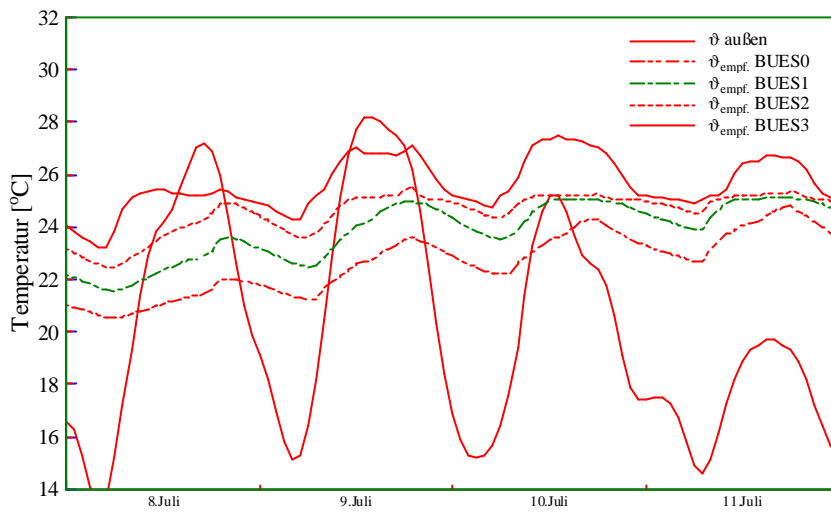


Bild 6 Temperaturverlauf Büro Süd / Vergleich der Ebenen

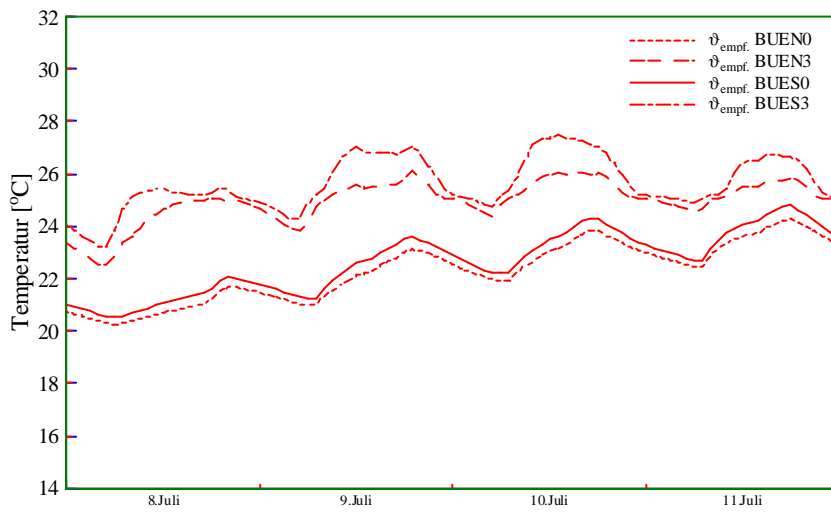


Bild 7 Temperaturverlauf Büro / Vergleich der Büros SÜD, NORD

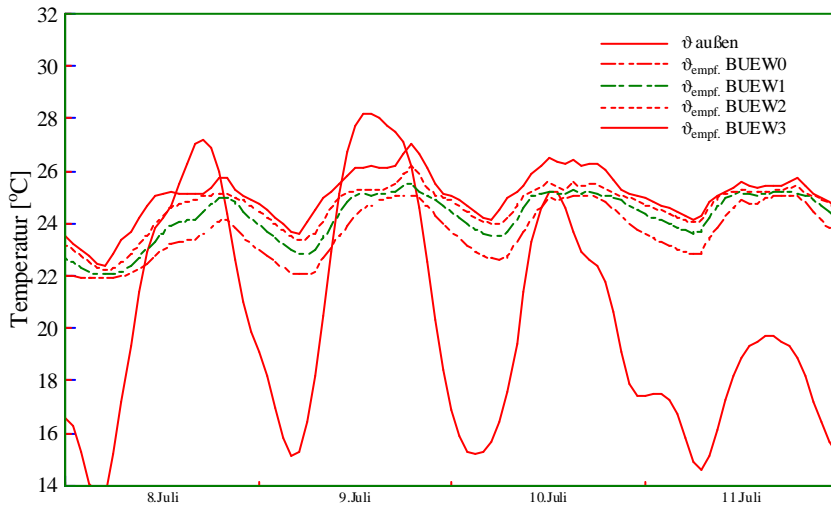


Bild 8 Temperaturverlauf Büro WEST / Vergleich der Ebenen

In den Tabellen sind die Maximaltemperaturen sowie die Überschreitungsdauer der Raumtemperatur der verschiedenen Bürozonen über den Grenztemperaturen dargestellt.

Zone	ϑ_{\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

Tabelle II. Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE S_

Zone	ϑ_{\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

Tabelle III. Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE N_

Zone	ϑ_{\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 <td 0	
BUE W3	26.6	5	0	0

Tabelle IV. Maximaltemperatur und Überschreitungsdauer Grenztemperatur in BUE W_

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

2.6 Simulationsrechnungen für das gesamte Jahr

In einer *Jahresberechnung* wurde insbesondere der Winter- und Übergangsfall untersucht. Hierbei wurde die Temperaturentwicklung im HOF betrachtet (Bild 9-11).

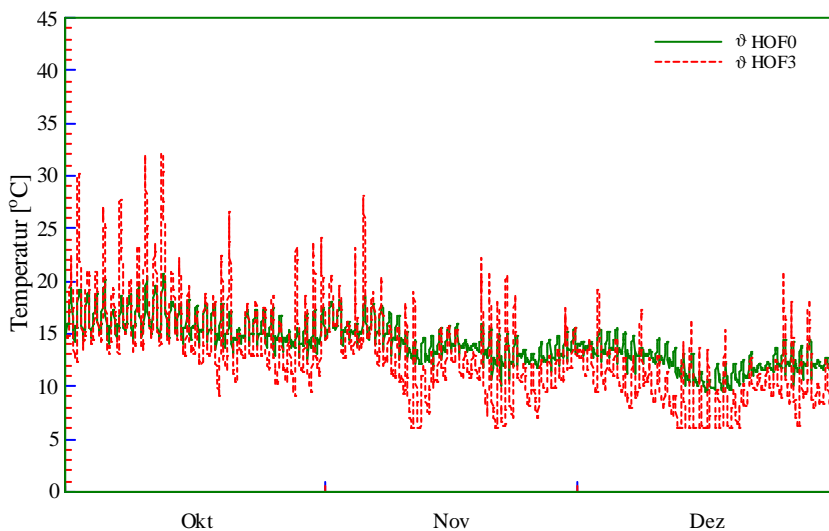


Bild 9 Temperaturverlauf HOF Okt - Dez

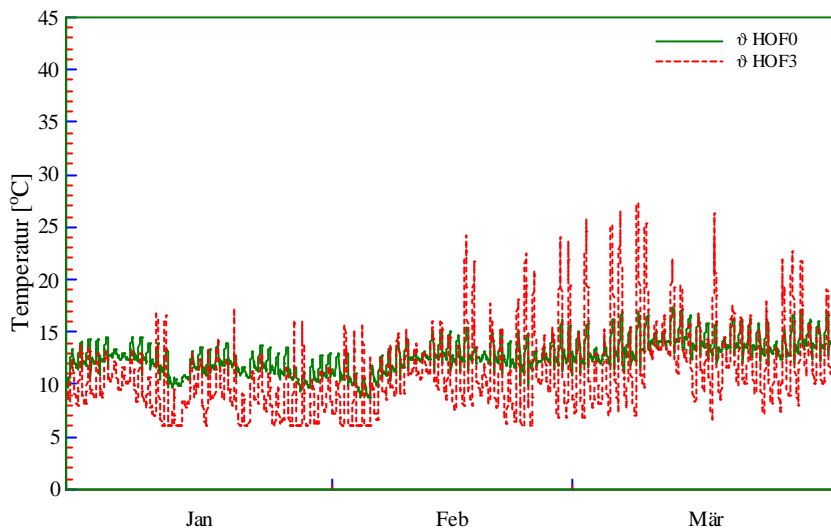


Bild 10 Temperaturverlauf HOF Jan - März

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

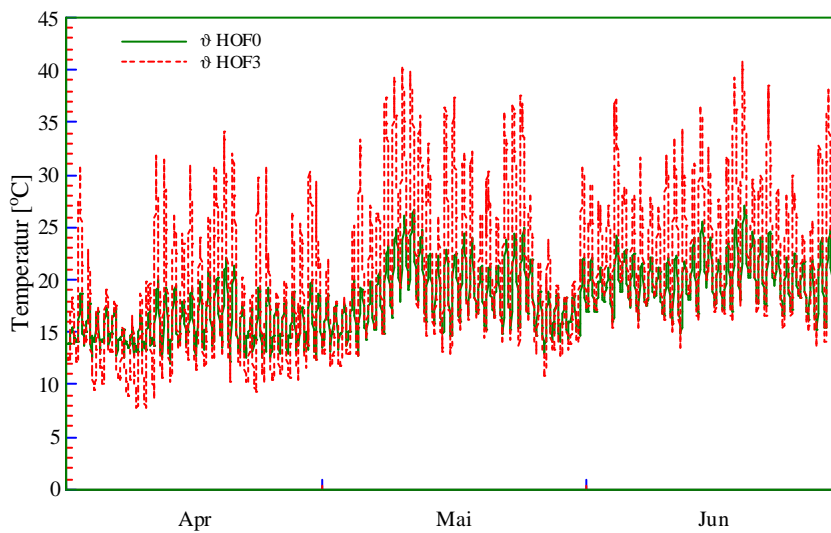
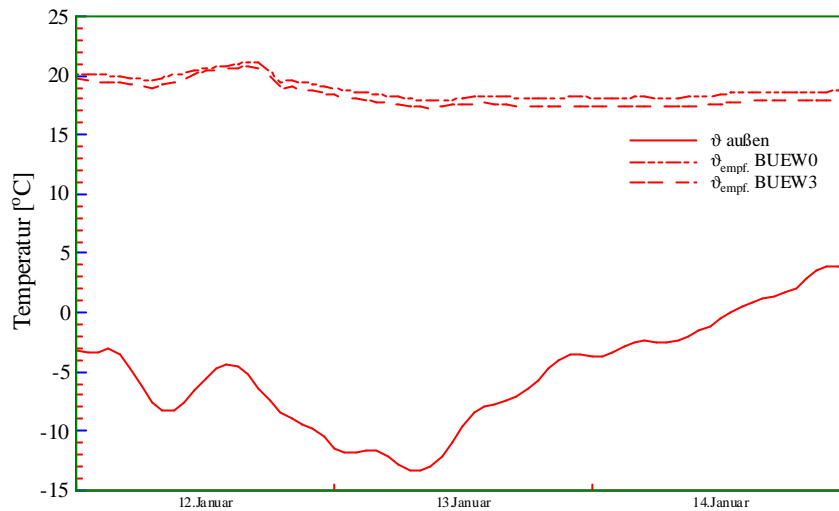


Bild 11 Temperaturverlauf HOF Apr - Jun

2.7 Simulationsberechnungen für den Winterfall

Den Verlauf der empfundenen Temperatur im Büro West für drei kalte Tage im Januar ist in Bild 12 dargestellt. Wie die Berechnungen zeigen liegt die Raumtemperatur an kalten Tagen unterhalb von 22°C. Dieses zeigt, dass die angesetzte Heizleistung nicht ausreicht, dass Temperaturniveau zureichen. Eine Erhöhung der Heizleistung ist erforderlich.



BBS INGENIEURBÜRO WF / 382H-V67

Bild 12 Temperaturverlauf Büro WEST / Winter

2.8 Zusammenfassung

Die durchgeführten Berechnungen zeigen das für moderne Gebäude unter wirtschaftlichen Abhängigkeiten Lösungsmöglichkeiten entwickelt werden können.

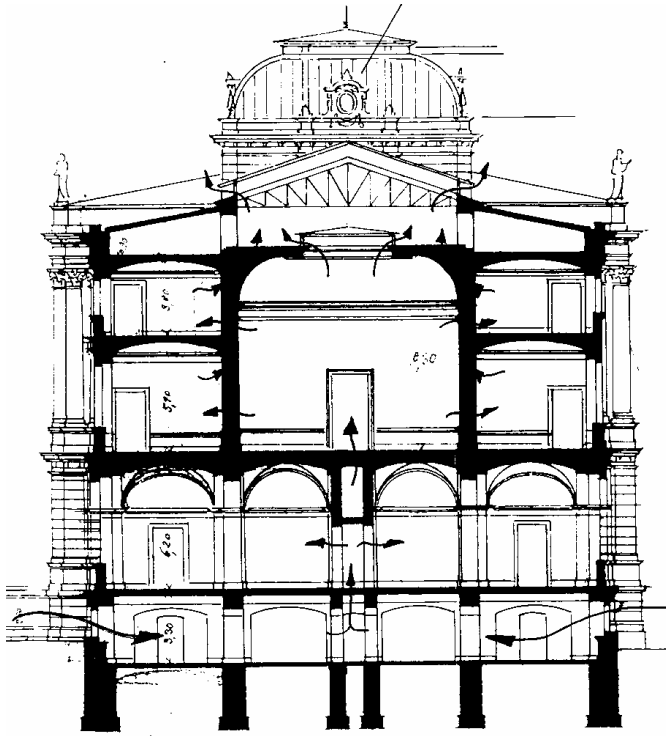
Hierbei können Machbarkeitsstudien ebenso durchgeführt werden wie Optimierungsrechnungen. Hierbei besteht für den Bauherrn die Möglichkeit, anhand unterschiedlicher Varianten die Qualität des Raumklimas, somit direkt auch die Investitions- und Unterhaltskosten, zu bewerten und somit seine Anforderungen in Hinblick auf seinen finanziellen Rahmen abzugleichen.

3 Fallbeispiel 2 - Untersuchungen zur Klimastabilität in historischen Museen

3.1 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 klimatechnisch geeignete 'Behältnisse' zur Aufbewahrung zu schaffen.



Querschnitt durch die Mitte.

Bild 13 Historisches Heizungs- und Lüftungssystem des Herzog-Anton-Ulrich-Museum - Schnitt durch den Oberlichtsaal und die angrenzenden Nord- und Südkabinette

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 zuzuging, 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 Raumluftfeuchte, 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 Umgebungfeuchte zu verändern. Dieser Zusammenhang wird durch die Sorptionsisotherme des jeweiligen Materials beschrieben. Bei Schwankungen der relativen Umgebungfeuchte 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 Klimaanlage 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 Discomfortzonen 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 Thermomodiffusion. Hierbei wird Feinstaub über Luftmoleküle in Richtung des Temperaturgefälles an kalte Oberflächen (z. B. ungedämmte Außenbauteile) transportiert.

3.2 Aufgabenstellung

Aufgabe der Bauphysik ist zunächst die Planung der bauphysikalisch richtigen 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 und die dauerhafte Gebäudenutzung sicherzustellen.

Zu den weiteren Planungsaufgaben der Bauphysik gehört auch die Mitwirkung bei der Erstellung eines 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 unter Zuhilfenahme einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse können verlässliche Aussagen über die Auswirkungen von baulichen Maßnahmen auf das Innenklima getroffen werden.

In einem weiteren Schritt geht es darum, die zur Raumklimatisierung erforderlichen Anlagenkomponenten sowie deren Betriebsweise an den instandgesetzten Baukörper anzupassen und zu optimieren.

Hierbei ergeben sich zunächst Erfordernisse an die Dimension und Funktionalität der haustechnischen Anlagen. Darüber hinaus werden alternative Lösungen diskutiert, deren Ziel darin besteht, den anlagentechnischen Aufwand, sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten betreffend, und die geforderten Raumklimaparameter in ein sinnvolles und allen Belangen gerecht werdendes Verhältnis zu bringen.

Die Klima- und Energieberechnungen erfolgen im zeitlichen Verlauf über die Dauer eines Jahres oder eines ausgewählten Zeitraumes. Sie ersetzen nicht die Berechnungen zur Auslegung klimatisierender Anlagen. Sie dienen jedoch dazu, die haustechnische Planung zu optimieren und Planungssicherheit hinsichtlich des Zusammenspiels von Baukörper, Klimaanlage und Museumsnutzung zu erlangen. Im Rahmen einer thermisch-energetischen Gebäudesimulation, bei der es zunächst um grundlegende Aussagen zum thermischen Verhalten der Ausstellungsräume geht, wird daher zunächst nur eine Klimatisierung mit dem Medium Luft betrachtet. Dies trifft auch auf das Heizen zu. Alternative Klimatisierungsvarianten, wie z. B. Flächenheizung oder Flächenkühlung,

die u. U. unterstützend eingesetzt werden können, werden einer separaten Begutachtung unterzogen. Die im Rahmen der Gebäudesimulation getroffenen Aussagen behalten auf diese Weise ein hohes Maß an Allgemeingültigkeit und müssen bei detaillierteren Betrachtungen auf dem Sektor der Anlagentechnik nicht grundlegend korrigiert werden.

3.3 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.

Neben den Mindestanforderungen nach DIN 4108 gelten Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz nach der Energieeinsparverordnung. Diese Energieeinsparmaßnahmen zielen darauf ab, 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.

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 thermisch-hygrische 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.

3.4 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 und zum anderen Grenzwerte für deren Schwankungsbreite einzuhalten.

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

Raumlufttemperatur $q_i = 18 \text{ bis } 20 \text{ }^\circ\text{C}$
relative Raumluftfeuchte $f_i = 50 \text{ bis } 55 \text{ \%}$

Ein solches Anforderungsprofil führt zwangsläufig zu einem großen anlagen- und regelungstechnischen Aufwand. Da ständig ein sehr enger Klimabereich angeregelt wird, wird auch das von den Konservatoren gefürchtete Zweipunktverhalten der Klimaanlage provoziert.

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 Temperaturerhebung 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. Werden neben der konservatorischen Motivation auch wirtschaftliche und wärmephysiologische Aspekte mit berücksichtigt, so lassen sich nachfolgende, allgemein anerkannte Klimaanforderungen formulieren.

Raumlufttemperatur $q_i = (19) 20 \text{ bis } 24 (25...28) \text{ } ^\circ\text{C}$

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 [22] 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 angesehen.

relative Raumluftfeuchte $f_i = 45 \text{ bis } 60 \text{ } \%$

Die relative Raumluftfeuchte besitzt von allen konservatorischen Anforderungen die höchste Priorität. Da jedoch jede Materialgruppe (Holz, Textil, Papier, Metall) unterschiedliche hygroscopische 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 relativen Feuchte während einer Stunde. Diese Änderung sollte möglichst gering sein und die Schwan-
kungshäufigkeit möglichst klein gehalten werden. Als oberer Grenzwert werden $\Delta\phi \leq 2,5 \text{ } \%$ pro Stunde angegeben. Als maximale Änderung während eines Tages sind $\Delta\phi \leq 5 \text{ } \%$ anzustreben.

3.5 Das Rechenmodell

Die Raumklimaberechnungen werden auf der Grundlage des Testreferenzjahres TRY-02 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*). Dieses Außenklimamodell setzt sich aus der fünfmaligen Aneinanderreihung eines typisch extremen Julitages zusammen. Die Klimadaten dieses Julitages werden der VDI-Richtlinie 2078 entnommen, wobei Braunschweig der Kühllastzone 3 zuzuordnen ist.

Die Nutzungsbedingungen werden zusammengefasst wie folgt festgelegt:

- Besucherichte in den Ausstellungsräumen 5 Personen pro 100 m² Ausstellungsfläche (real case)
10 Personen pro 100 m² Ausstellungsfläche (worst case)
jeweils innerhalb der vom Museum vorgegebenen Öffnungszeiten
Wärmeabgabe und Wasserdampfproduktion des menschlichen Körpers werden als Funktion der Raumlufttemperatur berücksichtigt.
- Künstliche Beleuchtung, ganzjährig innerhalb der Öffnungszeit 10 W / m²
- Außenluftwechsel über Fugen und sonstige Undichtigkeiten $n = 0,10 \text{ h}^{-1}$
Außenluftwechsel zur Deckung der hygienisch erforderlichen Frischluftzufuhr $V = 20 \text{ m}^3/(\text{h Person})$

3.6 Baukonstruktive Betrachtung

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

- Die Mindestanforderungen des Wärmeschutzes nach DIN 4108 werden nicht erfüllt.
- Die Wärmebrückenwirkung im Bereich der Gebäudeaußenkanten ist bauschädlich.
- Der bauliche Standard des Gebäudes entspricht bei Weitem nicht dem Wärmeschutzstandard des energiesparenden Bauens

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 Wärmedämmputzsystemes sein. Die Stoffeigenschaften, insbesondere das hygri-sche Verhalten von Wärmedämmputzen, führt in vielen Fällen dazu, dass der Tauwasserschutz je nach Beschaffenheit der Konstruktion auch ohne zusätzliche Dampfsperre gewährleistet werden kann.

Im vorliegenden Fall konnte anhand der Gebäudesimulation allein durch eine wärmeschutztechnische Verbesserungsmaßnahmen im Bereich der massiven Außenbauteile auf das Anforderungsniveau der DIN 4108 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 zu grunde 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 m³/[h Person])
- Variante 3 Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades i.V. mit einer Sonnenschutzverglasung / bedarfsgerechte Lüftung

Die Berechnungsergebnisse sind in den nachstehenden Tabellen dargestellt.

Tabelle V. Ergebnisse Raumlufttemperatur

Variante	Himmels-orientierung	Ober-geschoss	Max. Raumluft-temperatur	max. Änderungs-geschwindigkeit der Raumluft-temperatur	max. Tages-schwankung der Raumluft-temperatur
1	Süden	1. OG	$\theta_{i,max} = 27 \text{ °C}$	$(d\theta/dt)_{max} = 3 \text{ K/h}$	$\Delta\theta_{max} = 5 \text{ K}$
2	Süden	1. OG	$\theta_{i,max} = 27 \text{ °C}$	$(d\theta/dt)_{max} = 3 \text{ K/h}$	$\Delta\theta_{max} = 4 \text{ K}$
3	Süden	1. OG	$\theta_{i,max} = 25 \text{ °C}$	$(d\theta/dt)_{max} = 3 \text{ K/h}$	$\Delta\theta_{max} = 3 \text{ K}$

Tabelle VI. Ergebnisse relative Raumluftfeuchte

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

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 Raumluftfeuchte sind noch gravierender. Während im Hochsommer die Tagesschwankungen der Raumluftfeuchte 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 Raumlufttemperatur. Auf diese Art können die Tagesmaxima der Raumlufttemperatur in den Südkabinetten um ca. 2 Kelvin gesenkt werden. Unter den oben erläuterten extremen Außenklimabedingungen betragen die Maximalwerte der Raumlufttemperatur 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 Raumlufttemperatur 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 CO₂-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 $g \approx 0,20..0,34$ 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 Beschichtungssystemes. 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.

3.7 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.

Es werden insgesamt sechs Klimatisierungskonzepte sowohl raumklimatisch als auch energetisch näher untersucht. Die ausgewählten Klimatisierungskonzepte unterscheiden sich durch

Die gewählten Klimakonzepte 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 wird, den technischen Aufwand betreffend, stufenweise vorgegangen.

3.7.1 Zusammenstellung der Berechnungsvarianten

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

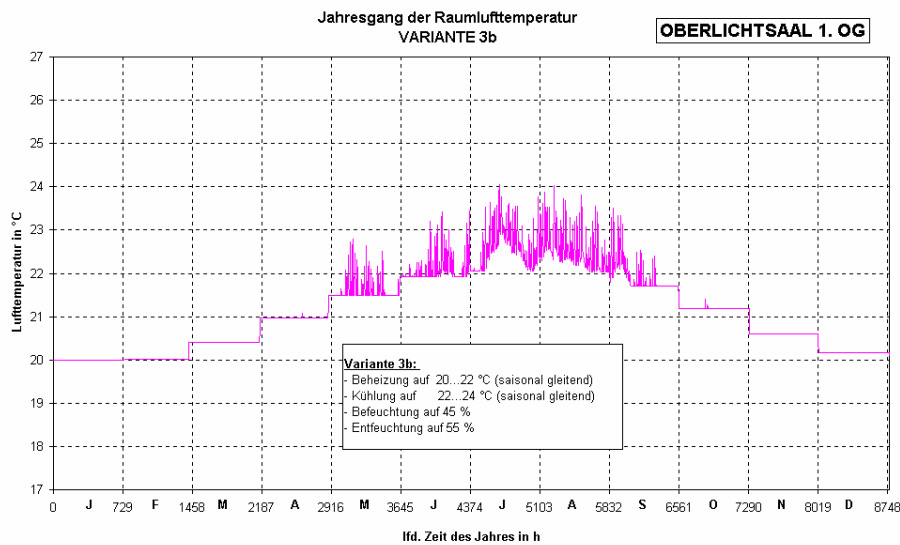
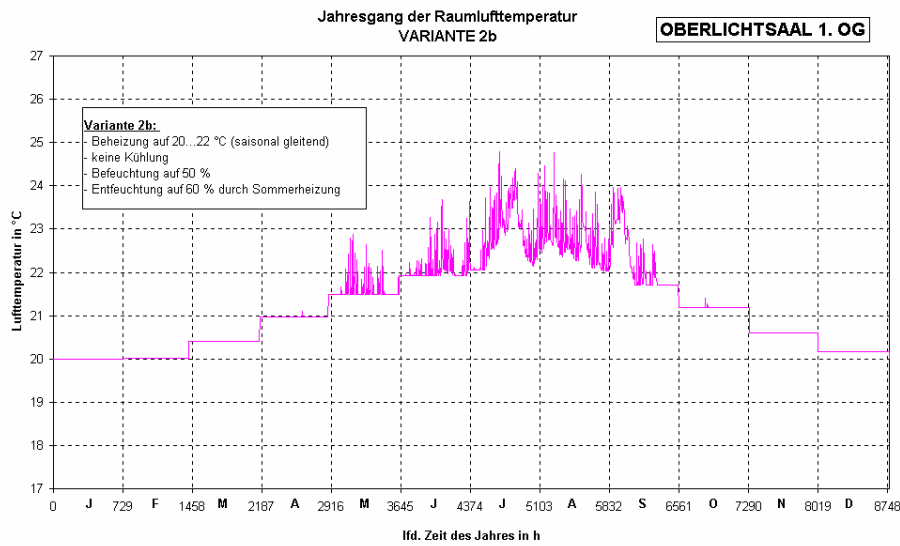
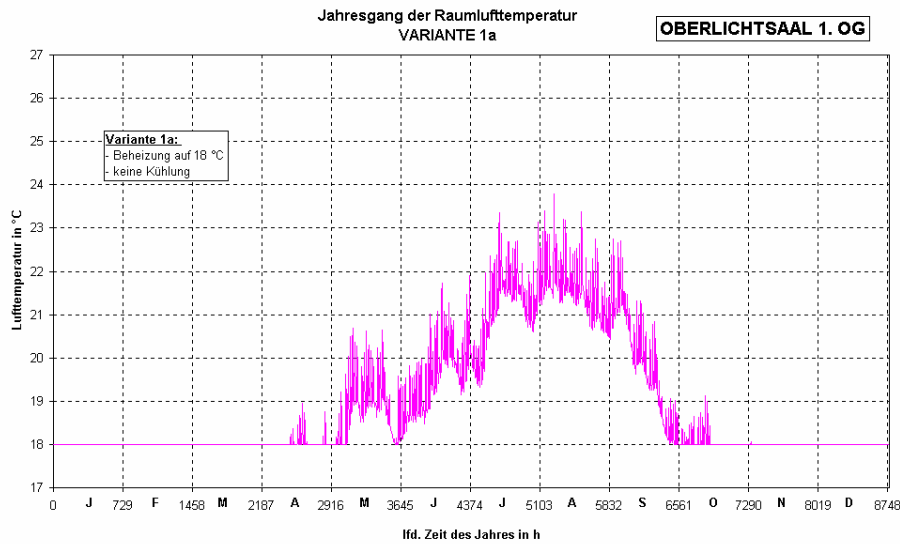


Bild 14 Verläufe Raumlufttemperatur im Jahresgang

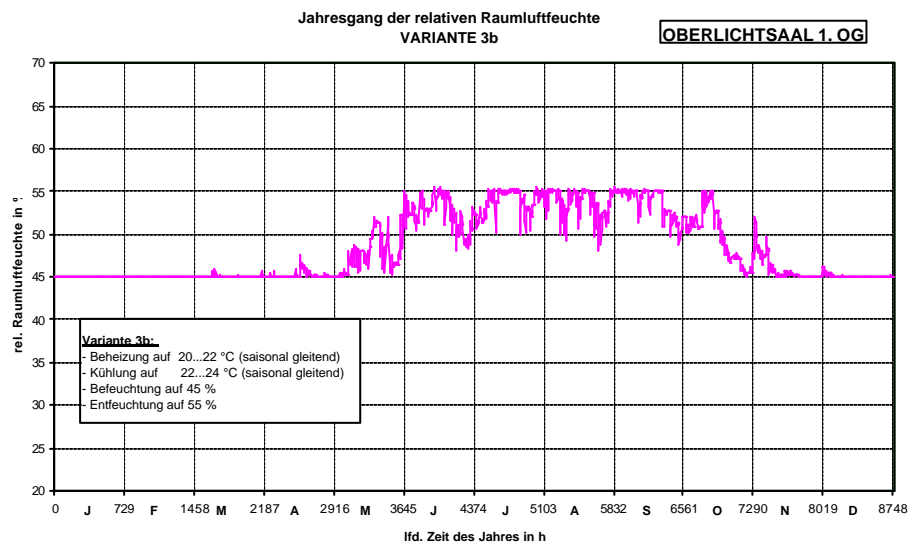
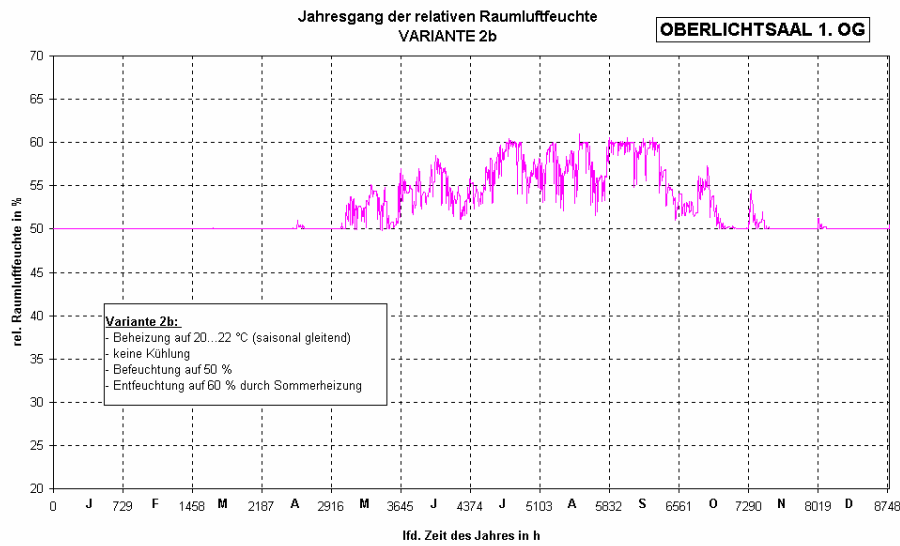
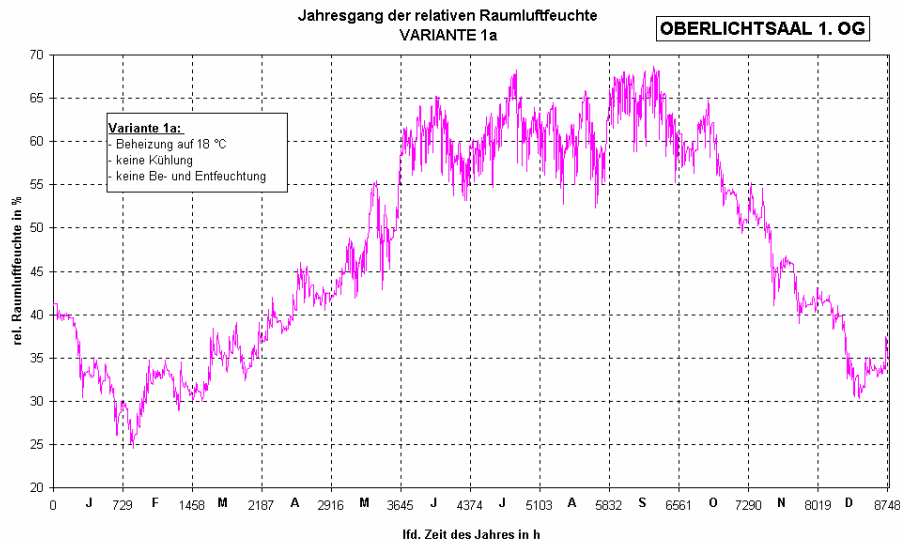


Bild 15 Verläufe Raumlufffeuchte im Jahresgang

Tabelle VII. Berechnungsergebnisse Jahresenergieverbrauch je m² Ausstellungsfläche in kWh/(m² 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.

3.8 Diskussion der Berechnungsergebnisse

3.8.1 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 Raumlufttemperatur auf + 18 °C angehoben. Im Zeitraum von Mai bis September beginnt die Raumlufttemperatur frei zu schwingen. Hierbei wird die vom Museum vorgegebene Obergrenze von + 20 °C überschritten. Die maximale Raumlufttemperatur 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 Raumlufttemperatur werden jedoch eingehalten.

Bezüglich der relativen Raumluftfeuchte 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 1a:

- Die vom Museum vorgegebenen strengen Randparameter für Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte 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 Raumluft auf keinen Fall verzichtet werden kann.

3.8.2 Varianten 2a und 2b

In einem nächsten Schritt erfolgt neben dem Beheizen eine Befeuchtung der Luft. Die notwendige Entfeuchtung der Raumluft während der Sommerperiode soll hingegen mit Heizen realisiert werden. 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 vorgegebenen 150-Stunden-Grenze.

Dies würde bedeuten, dass es sich bei Variante 2b um eine Lösung handelt, bei der mit moderatem technischem Aufwand befriedigende Raumklima-Verhältnisse 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.
- Weitere Berechnungen haben gezeigt, dass auch bei extremen Außenklimabedingungen und erhöhten inneren thermischen Belastungen die maximale Raumlufttemperatur am fünften Tag einer heißen und feuchten Sommerperiode $\theta_i = + 28$ °C beträgt und somit noch innerhalb des geforderten Klimabereiches liegt. 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.

3.8.3 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 W/m² beträgt, lässt sich für die maximale Kühllast jeweils ein Wert von ca. 8 W/m² ermitteln. Das heißt die Auswirkungen beider Varianten auf die Anlagendimensionierung sind relativ gering. Die Ursache, weshalb sich die Kühllast bei einer Kühlung auf + 24 °C (Variante 3b) gegenüber der Kühllast bei einer Kühlung auf + 20 °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 aufsatteln.

Deutliche Unterschiede lassen sich jedoch bei den jährlichen Energieverbräuchen erkennen. Variante 3b weist gegenüber Variante 3a einen

Mehrverbrauch an Heizenergie von $\Delta \approx 26$ kWh/(m² a)

auf. Ursache dafür ist die Anhebung des Temperaturniveaus während der Heizperiode von + 18 °C (Variante 3a) auf + 20 °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 °C anstatt auf + 20 °C heruntergekühlt werden muss.

Den Berechnungen zufolge kann bei einer Aufweitung des Temperaturbereiches im Sommer auf + 24 °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 $\theta_i = + 20 \text{ °C}$ empfohlen.

3.9 Zusammenfassung

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 tollerierbarer Grenzen, hier saisonal gleitend, wirtschaftliche Möglichkeiten, gerade auch bei Reduzierung der Anlagentechnik, zu erzielen sind.

4 Literatur

1. 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
2. E DIN EN ISO 13792: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien für vereinfachte Berechnungsverfahren, Oktober 1997
3. VDI-Richtlinie 6020: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, Blatt 1: Gebäudesimulation, Mai 2001
4. DIN 4108 “Wärmeschutz im Hochbau”, Teile 2 und 3 (Ausgabe 08/81) und Teil 4 (Ausgabe 11/91)
5. 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
6. DIN EN ISO 7730 “Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit”, Ausgabe 09/95
7. DIN 1946 “Raumluftechnik”, Teil 2: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln); Ausgabe 01/94
8. DIN EN ISO 10211-1 “Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen”, Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (Ausgabe 11/95)
9. VDI-Richtlinie 2078 “Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)”, Ausgabe 10/94
10. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung WSchV) vom 16.08.1994 mit Anlagen
11. Testreferenzjahre; Deutscher Wetterdienst Offenbach – Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung; Datum der Erstellung: 11/84
12. 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
13. Raumklima in Museen; Eine Informationsschrift des Fachinstitutes Gebäude-Klima e.V.; Bietigheim-Bissingen 1999
14. Bode, J. u. Leimer H.-P.: Thermisch- energetische Gebäudesimulation, Vorlesungsskript zur Vertiefung Bauphysik; FH-Hildesheim SS 2002
15. Feist, W.: Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden – ein Methodenvergleich, Bauphysik 16 (1994), H. 2, S. 42 ff.
16. Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation – Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze (1. Auflage), Verlag C. F. Müller GmbH Heidelberg, 1994
17. Glück, B.: Testreferenzjahr – ein Vorschlag zur Neudefinition und Ergänzung, Gesundheits-Ingenieur 116 (1995), H. 5, S. 258 ff.
18. Huber, A.: Klimaschwankungen und ihre Auswirkungen auf Kunst- und Kulturgut in öffentlichen Sammlungen. Aus: Linzer Werkstattgespräche (3. Auflage) 1992
19. Hilbert, G.S.: Sammlungsgut in Sicherheit; Teil 2: Lichtschutz – Klimatisierung; Gebr. Mann Verlag Berlin 1987
20. Kornadt, O.: Gebäude von Morgen, Beton-Verlag 1997
21. 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
22. Leimer H.-P. u.a.: Vorlesungsskripte zur Baukonstruktion und Bauphysik; FH-Hildesheim WS 2001
23. 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.

5 Programmsysteme für die Gebäudesimulation

1. DOE-2, Blast, EnergyPlus, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, USA
2. TRNSYS, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, USA
3. Bsim2000, Danish Building and Urban Research, Horsholm, Denmark
4. WUFI-Plus, Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen

5. PSICE, Hoschar AG, Karlsruhe
6. TAS, EDSL Ltd, UK
7. Clim2000, Research and Development Division of Electricité de France
8. COMFIE, Centre d'energetique, Ecole des Mines de Paris