ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES MODELLS ZUR ENERGETISCHEN MODERNISIERUNG DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Simon Schmidt, Roland Göttig, Silke Dieterich, Michaela Hoppe

Lehrstuhl für Bauphysik, Technische Universität München, Germany

Schlüsselwörter: Mehrzohnenmodell, Validierung, Langzeitmesseung, energetische Modernisierung

KURZFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Nachhaltige Sanierung von Museumsbauten“ werden in ganz Deutschland bedeutende Museumsbauten auf ihren Sanierungbedarf und Sanierungsmöglichkeiten hin untersucht.

Innerhalb dieses Projektes wurde am Deutschen Museum in München die Abteilung Informatik und Mikroelektronik sowohl messtechnisch, als auch simulatorisch untersucht, n dessen Rahmen ein Modell, als Grundlage für die Empfehlungen zur energetischen Sanierung entwickelt wurde.

Im Beitrag sind sowohl die verwendeten Methoden als auch die aus der Validierung gewonnen Erkenntnisse und vorgeschlagenen Modernisierungsvarianten dargestellt.

ABSTRACT

As part of the research project „Nachhaltige Sanierung von Museumsbauten“ significant museum buildings in Germany are examined on their needs and opportunities of retrofitting.

Within this project both measurement and simulation have been carried out for the informatics and microelectronics department at the „Deutsches Museum“ in Munich. A model was build in order to become a basis for the retrofitting recommendations developed out of the simulation results.

The paper shows both the methods used and the knowledge gained from the validation and proposes retrofitting options.

EINLEITUNG

Die Abteilung der Informatik und Mikroelektronik ist direkt unter dem Dach im 3. OG des Süd-Ost-Traktes des Deutschen Museums gelegen und stellt sowohl durch die Lage, als auch durch die baulichen Gegebenheiten eine kritisches Gebäudeteil bezüglich der sich einstellenden raumklimatischen Parameter im gesamten Gebäudekomplex dar. Als Grundlage für die Entwicklung des Modells wurden sowohl im Außen–, als auch im Innenraum umfangreiche Messungen durchgeführt. Unter Verwendung des Programms IDA ICE 4 wurde, aus den bekannten Abmessungen und Aufbauten des Gebäudeteils, ein 3D-Modell der Räumlichkeiten erstellt. Anhand der gemessenen Größen konnte das Modell nach geeigneter Anpassung validiert werden. Die Hauptschwierigkeit bestand hierbei in der Implementierung der Nutzung, sowie des Nutzerverhaltens in den Räumen. Aufgrund des öffentlichen Charakters des Gebäudes waren die resultierenden, unterschiedlichen Besucherströme in den Räumen sowie das bedarfsweise Öffnen der Fenster durch das Personal nur mit Einschränkungen nachzuvollziehen.

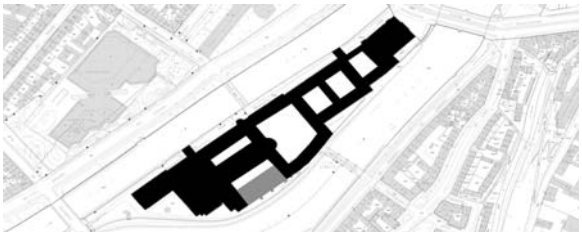

Abbildung 1: Lageplan des Museums mit Hervorhebung der untersuchten Abteilung

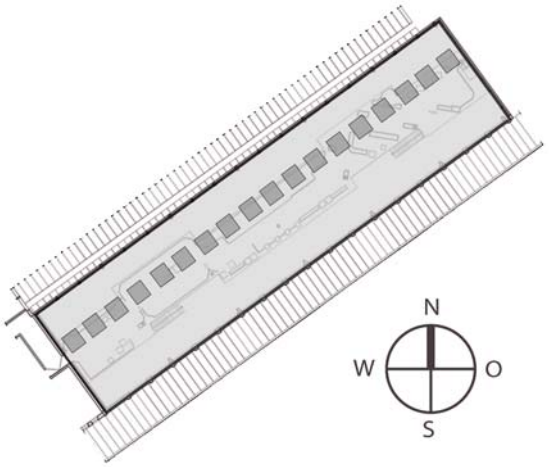

Abbildung 2: Grundriss des untersuchten Bereichs (Galerieebene mit Lichtkuppeln)

OBJEKTBESCHREIBUNG

Die nachfolgend aufgeführten Angaben zu den einzelnen Bauteilen wurden aus Literaturquellen, sowie aus Bestandsunterlagen entnommen und soweit möglich durch Messungen präzisiert.

Die Süd-Ost Fassade ist als Lochfassade mit einem Fensterflächenanteil von 33 % ausgebildet. Der

reine Glasflächenanteil beträgt 22 %. Die Wand besteht aus Betonplatten mit einem außen liegenden Vorsatzbeton mit Muschelkalk-Beimischung und einem innenseitigem Putz. Im Raster von 3,6 m sind als tragende Konstruktion Stahlbetonstützen eingesetzt, von denen jede dritte eine Breite von 0,85 m, die übrigen 0,55 m breit sind. Außenseitig werden diese Stahlbetonstützen durch Zierelemente zusätzlich betont. Je Raster ist eine Fenstereinheit bestehend aus drei gleichgroßen Dreh-/Kippfenstern mit einer Zwei-Scheiben-Isolierverglasung vorhanden. Die Fenster wurden 1986/87 eingebaut. Weder Sonneschutz noch Blendschutz sind vorhanden.

Im Ursprungszustand waren 1925 in der Nord-West Fassade ebenfalls Fenster vorhanden. Nach den Kriegszerstörungen musste dieser Bereich wieder neu aufgebaut werden. Die Wand wurde in den 60-er Jahren auf der Außenseite mit Betonsteinen aufgemauert und die Fenster wurden geschlossen. Als tragende Konstruktion dienen auch hier die im Innenbereich angeordneten Stahlbetonstützen. Beim Ausbau in den Jahren 1986/87 wurden die Bereiche zwischen den Stahlbetonstützen mit Wärmedämmung in geringer Stärke und Hochlochziegeln versehen.

Das Dach ist als Satteldach ausgeführt. Die äußere Abdeckung besteht aus Kupferblech. Unter der Abdeckung befindet sich eine Bimsbetonplatte. Diese ist auf der Rauminnenseite mit ca. 60 mm Mineralwolle gedämmt. Die innenseitige Dämmung des Daches und die Verkleidung mit Gipskarton erfolgten im Zuge des Ausbaus 1986/87. Die Verkleidung wurde unterhalb der Stahlbetonträger angebracht, wodurch ein relativ große Luftraum von 430 mm entsteht. Weitere Untersuchungen ergaben, dass die Dämmung durchgängig angeordnet wurde.

Alle 3,6 m ist in Feldmitte eine Lichtkuppel eingesetzt. Aus den Bestandsunterlagen geht nicht hervor, wann die Lichtkuppeln eingebaut wurden und welche Qualitäten diese haben. Es wird von zweischaligen Lichtkuppeln ausgegangen und dass diese vor der Baumaßnahme 1986/87 eingebaut wurden. An zwei Lichtkuppeln wurden 1987 Stellmotore zum Öffnen nachgerüstet, alle übrigen Lichtkuppeln sind fest verschlossen. Drei Lichtkuppeln im nördlichen Bereich sind durch ein innen liegendes, opakes Rollo verdunkelt. An den anderen Lichtkuppeln ist kein Sonnen- oder Blendschutz vorhanden.

Tabelle 1: Vorhandene U-Werte

Bezeichnung	Fläche	U-Werte
Süd-Ost Fassade	120 m^2	2,35 W/m^2K
Nord-Ost Fassade	194 m^2	0,61 W/m^2K
Dach	1082 m^2	0,45 W/m^2K
Fenster	74 m^2	1,55 W/m^2K
Lichtkuppel	58 m^2	2,70 W/m^2K

MESSUNGEN

Die Zielsetzung für die Messungen wurde darauf ausgerichtet, mit einem vertretbaren Aufwand möglichst alle relevanten Größen zu ermitteln. Am Deutschen Museum ist bereits eine Wetterstation vorhanden. Als Besonderheit kann angegeben werden, dass nicht nur wie üblich in Bodennähe (2 m Höhe) gemessen wird [VDI 3786 Blatt 13], sondern zusätzlich am Turm des Museums. Das 3. OG mit dem untersuchten Raum befindet sich etwa in der Mitte zwischen diesen beiden Messstellen, so dass jeweils die Mittelwerte für Außentemperatur, rel. Feuchte und Windgeschwindigkeit aufgenommen wurden. Sonstige Messwerte zu Windrichtung, Globalstrahlung und Regenmenge wurden am Turm aufgenommen. Im Innenraum werden entlang einer Querschnittsachse in Feldmitte Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichten an den wesentlichen Bauteilen (Dachflächen, Wandflächen, Boden) erfasst (Abbildung 3). Außerdem werden an den Stößen der Dachflächen, hinter der innen liegenden Gipskartonverkleidung der Dachfläche, in der Achse der Stahlbetonträger und direkt in Fensternähe Oberflächentemperaturen erfasst (Abbildung 4). Im Innenraum werden in jedem Geschoss und am nordwestlichen Übergang von Dach- zu Wandfläche Lufttemperatur und rel. Feuchte gemessen. Auf der Galerie werden zudem die operative Temperatur und der CO_2-Gehalt bestimmt (Abbildung 5). Die Messgenauigkeiten für die verschiedenen Größen, die im Innenraum erfasst werden, sind in Tabelle 2 angegeben.

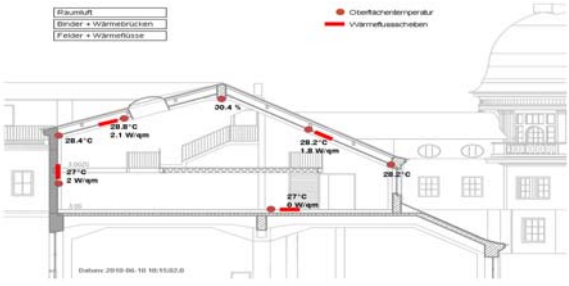

Abbildung 3: Visualisierung der gemessenen Oberflächentemperaturen und der Wärmestromdichten in Feldmitte

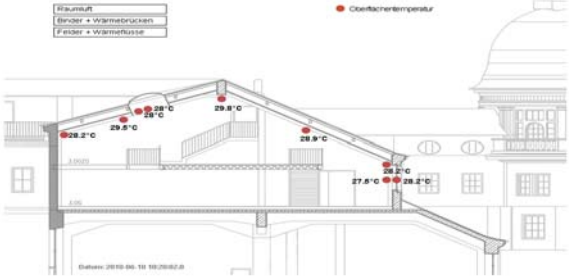

Abbildung 4: Visualisierung der gemessenen Oberflächentemperaturen in der Achse der Stahlbetonträger

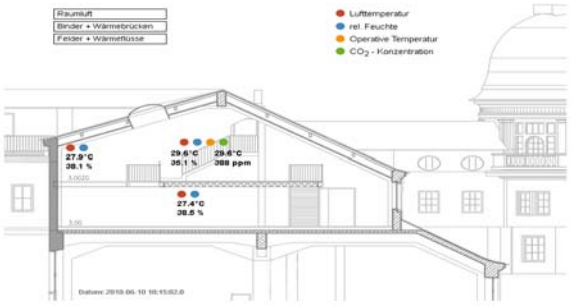

Abbildung 5: Visualisierung der gemessenen Raumluftparameter

Sämtliche Größen werden in einminütigen Abständen als gleitendes Mittel über 5 Minuten erfasst. Die Daten werde über ein PC-basiertes Messdatensystem vor Ort gespeichert und gleichzeitig via Internet an einen Server im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen übertragen. Das dem zugrunde liegende Internet Messdatenerfassungssystem (IMEDAS) erlaubt eine Online-Visualisierung und die Auswertung beliebiger Messkanäle [IMEDAS].

Tabelle 2: Messgenauigkeit der Messfühler

Größe	Messgenauigkeit	
	absolut	relativ
Oberflächentemperatur	±0,3 °C	
Lufttemperatur	±0,3 °C	
Globaltemperatur	±0,3 °C	
rel. Feuchte	±1,0 %	
Wärmestromdichte [W/m^2]		±5 %
CO_2–Gehalt [ppm]		±2 %

In Abbildung 6 sind typische Verläufe relevanter Messgrößen für jeweils einen Sommer- und Wintertag wiedergegeben. Die gemessenen CO_2-Konzentrationen im Winter lassen sich gut mit dem Nutzerverhalten erklären.

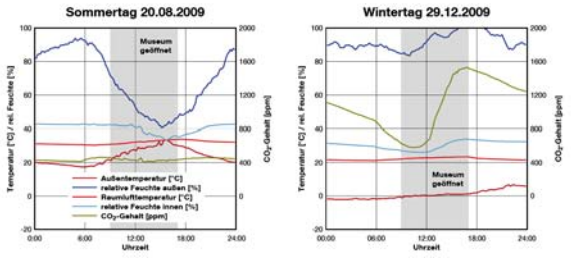

Abbildung 6: Typische Verläufe wesentlicher Messgrößen an einem Sommer- und einem Wintertag

Im dargestellten Beispiel ist davon auszugehen, dass das Personal gegen 6:00 Uhr morgens die Fenster geöffnet hat. Ab 9:00 Uhr wird das Museum geöffnet, aber erst gegen 11:00 Uhr gelangt eine größere Zahl von Besuchern in die Abteilung Informatik und Microelektronik - die CO_2-Konzentration steigt entsprechend. Mit abnehmender Besucherzahl und gegen Ende der Öffnungszeiten um 17:00 Uhr sinkt die CO_2-Konzentration wieder. Im Sommer wird wesentlich intensiver gelüftet als im Winter, dadurch gibt es keine ausgeprägten Änderungen der CO_2 Konzentration. Außen- und Innenklima nähern sich nach längerer Lüftungszeit mit geöffneten Fenstern und Oberlichtern stark aneinander an.

In Abbildung 7 werden Monatsverläufe für August 2009 und Dezember 2009 dargestellt. Auch hier ist besonders im Wintermonat auffallend, wie stark der CO_2-Gehalt von der Anzahl der Besucher abhängt. An den wenigen Tagen, an denen das Museum geschlossen ist (9.12.2009 nachmittags, 24.12.2009 und 25.12.2009) sinkt die CO_2-Konzentration deutlich.

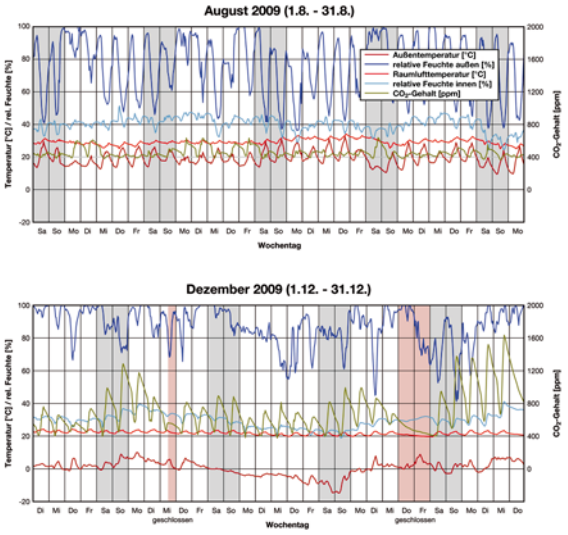

Abbildung 7: Typische Verläufe wesentlicher Messgrößen im August und Dezember

MODELLENTWICKLUNG

Randbedingungen

Außer einer herkömmlichen Ölheizung mit Radiatoren steht keine Anlagentechnik für die Lüftung, Kühlung oder Klimatisierung der Ausstellungsbereiche Informatik und Mikroelektronik zur Verfügung. Die Räume werden natürlich über die Fenster und die beiden öffenbaren Lichtkuppeln gelüftet. Das Öffnen und Schließen der Fenster und Lichtkuppeln erfolgt manuell während der Öffnungszeiten durch das Aufsichtspersonal bzw. in den Morgenstunden durch die Reinigungskräfte. Eine aus Befragung und Beobachtung abgeleitete Öffnungsstrategie ist in Abbildung 8 dargestellt. Diese wird temperaturgesteuert im Programm verwendet.

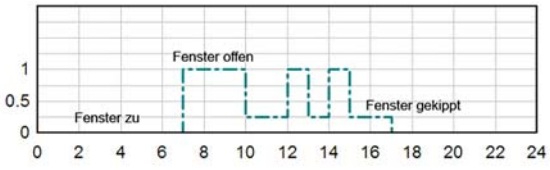

Abbildung 8: Fensteröffnungsstrategie

Neben den Personen werden als weitere interne Lasten lediglich die Leuchten zum Ansatz

gebracht, da ansonsten keine el. Verbraucher mit hoher Anschlussleistung betrieben werden. Das Licht wird täglich um 5:00 Uhr vom Reinigungspersonal eingeschaltet, eine Anpassung an die Tageslichtverhältnisse erfolgt im Betrieb nur sehr selten. Erst gegen 17:00 Uhr, nach Schließung des Museums für den Publikumsverkehr, wird das Licht, bis auf eine Notbeleuchtung ausgeschaltet. Das verwendete Beleuchtungsschema ist in Abbildung 9 aufgezeigt.

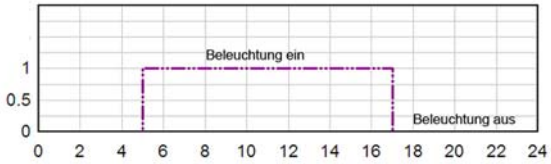

Abbildung 9: Belichtungszeiten

Während der Öffnungszeiten besuchen jährlich knapp 1 Million Personen das Museum auf der Museumsinsel, in den Sommermonaten sind es über 100.000 Personen im Monat. Einige besuchen nur das im gleichen Stockwerk gelegene Cafe´ und nutzen die Abteilung als Durchgang. Täglich um 14:00 Uhr beginnt eine Führung durch die beiden Abteilungen. Im Jahr 2008 fanden 261 Führungen mit insgesamt 3.881 Teilnehmern statt. Im Durchschnitt nahmen 15 Personen an einer Führung teil. Nach 16:00 Uhr nimmt die Besucherzahl in der Abteilung wieder ab. Die aus den oben genannten Angaben abgeleitete Personendichte ist in Abbildung 10 wiedergegeben.

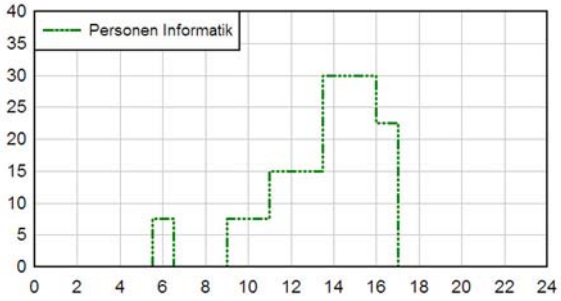

Abbildung 10: Schema der Besucherdichte

Simulation

Die Abteilungen Informatik und Mikroelektronik befinden sich in einem gemeinsamen Raum, wobei die Abteilung Mikroelektronik auf einer Galerie untergebracht wurde. Für die Berechnungen der Raumtemperaturen wurden zwei Zonen jeweils für die Informatik (gelb) und Mikroelektronik (rot) gebildet. Da beide Zonen über einen gemeinsamen Luftraum verbunden sind, wird auch die Temperaturschichtung berücksichtigt.

Mit der Simulation wurden die zeitlichen Verläufe der Raumtemperaturen in den Zonen Informatik und Mikroelektronik errechnet und mit den gemessenen Lufttemperaturen verglichen. Da den Berechnungen die tatsächlichen Wetterdaten, zugrunde liegen, ist ein Vergleich der nachgebildeten dynamischen Prozesse mit der Realität möglich. Spezielle Anpassungen des Modells wurden in folgenden Punkten getätigt:

1. Die Speichermassen durch Innenwände, Möbel und Ausstellungsstücken wurde erhöht, um den Temperaturabfall in der Nacht realistisch abzubilden.

2. Das Nutzerprofil zum Öffnen der Fenster und Lichtkuppeln wurde, von einer Abhängigkeit der Zeit auf eine Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Zeit geändert.

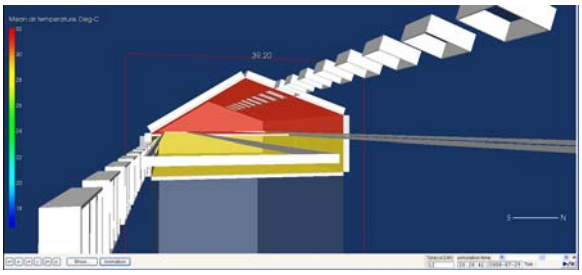

Abbildung 11: Screenshot aus der Simulationssoftware

VALIDIERUNG

Übereinstimmung

Um die Abweichung der gemessenen von den simulierten Ergebnissen bestimmen zu können wurde die Methode der mittleren quadratischen Abweichung herangezogen. Hierbei wird jeweils die Differenz aus Mess- und Berechnungswert pro Zeitschritt gebildet und anschließend ein quadratischer Mittelwert gebildet (Varianz). Zusammen mit den Maximalwerten der Messwerte und Medianen der Abweichung kann eine Entscheidung über die Qualität der Simulationsergebnisse getroffen werden. Die gefunden Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt und können für die Temperatur und rel. Feuchte als sehr gut eingestuft werden. Die absoluten, sowie die quadratischen Abweichungen für die Monate August und Dezember sind in Abbildung 12 dargestellt. Für den Wintermonat ergibt sich aus der Simulation ein nahezu konstanter Verlauf der Raumlufttemperatur, der durch die Modellierung einer idealen Heizung zu begründen ist.

Tabelle 3: Ergebnis der statistischen Fehlerabschätzung

Betrachtete Größe	Minimum Messwert	Maximum Messwert	Median Abw.
Temperaturen	19,92	34,11	-1,00
rel. Feuchten	18,87	54,44	1,04
	Varianz		
Temperaturen	1,91		
rel. Feuchten	13,83		

Ursachen für die, auch nach den genannten Anpassungen, noch vorhanden Abweichungen liegen

an verschiedenen Unsicherheiten. Beispielhaft sei hier auf die Modellierung der Personen, als auch auf die Umsetzung der Fenster- und Interzonalen Lüftung eingegangen.

Die Modellierung der Personen birgt zum einen die Problematik, dass nur schwer abgeschätzt werden kann, wie viele Personen zu welcher Zeit sich in den Abteilungen befinden und zum anderen, wie lange sie dort verweilen. Die Abteilung wird von den Besuchern neben dem Besuch der Dauerausstellung auch als Durchgang zum sich im gleichen Stockwerk befindlichen Café benutzt. Um eine grobe Abschätzung der Besucherzahlen zu erhalten, wurden die gemessenen CO_2-Werte ausgewertet und mit den, durch eine Zählung ermittelten Besucherzahlen verglichen. Hieraus konnte dann eine Abschätzung der Personendichte aufgrund der sich einstellenden Konzentration getroffen werden, die sich im Schema der Besucherdichte (Abbildung 10) widerspiegelt. Eine weitere Anpassung der Besucherströme in Abhängigkeit von Witterungseinflüssen kann angenommen, jedoch noch nicht belegt werden.

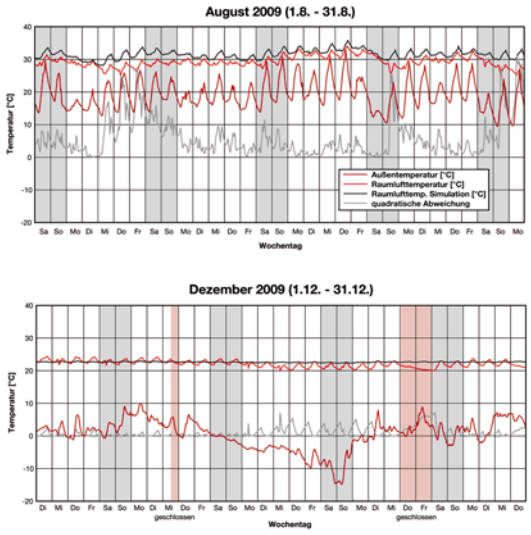

Abbildung 12: Vergleich von Messung und Simulation der Temperaturen im August und Dezember

Die Strategie zur Öffnung der Fenster (Abbildung 8) wurde lediglich auf Aussagen des Personals und eigenen Beobachtungen entwickelt. Jedoch birgt auch die Berechung der freien Lüftung im Programm IDA-ICE 4 Fehlerquellen. Die Implementierung der freien Lüftung im verwendeten Programm erfolgt dichte- und druckinduziert. Für jede an die Öffnung angrenzende Zone werden Dichte und Druck bestimmt und daraus ein Gefälle errechnet. Die Berechnung des Durchflusses erfolgt dann über die Öffnungsfläche, den Dichte- und Druckunterschied, sowie einen Durchflusskoeffizienten, der die Beschränkung des Durchflusses im Vergleich zum idealen Durchfluss angibt. Hierbei wird in IDA ICE 4 sowohl für Öffnungen in horizontalen als auch in vertikalen Ebenen gleichermaßen vorgegangen. Die verwendeten Modelle unterscheiden sich lediglich in der Berechnung der Dichte und Druckverteilungen, sowie in der Anzahl der Durchflussvarianten.

Die vorhandenen Differenzen zwischen den Mess- und den Simulationsergebnissen liegen hauptsächlich an folgenden Einflüssen:

- „Ein-Knoten-Modell“ des Simulationsprogramms
- Nur teilweise repräsentative Wahl der Messorte, da die Messfühler so angebracht werden mussten, dass sie im täglichen Museumsbetrieb nicht stören.
- Ungenauigkeit der Messfühler
- Ungenauigkeiten in der Modellierung der internen Speichermassen

Sanierungsvorschläge

Ausgehend von dem vorgestellten Modell wurden acht Sanierungsvarianten untersucht (Abbildung 13). Aus konservatorischer Sicht wurde das Hauptaugenmerk hierbei auf die Einhaltung von Grenztemperaturen und maximalen Temperaturschwankungen gelegt. Es wurde somit hauptsächlich versucht, die internen Lasten und Energieeinträge zu minimieren. Da von der Museumsleitung bauliche Maßnahmen an der Fassade und am Dach aus Denkmalschutzgründen bisher nicht geplant waren, wurden diese Varianten als untergeordnet betrachtet und zurückgestellt.

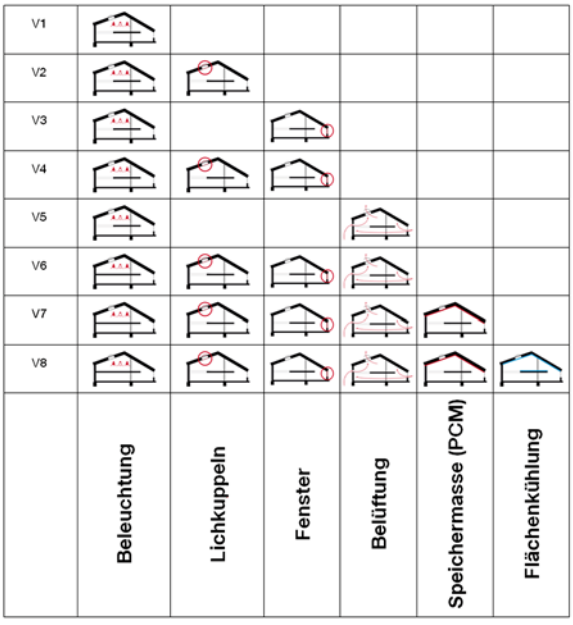

Abbildung 13: Vorgeschlagene Sanierungsvarianten

Die Variantenuntersuchungen zeigen, dass der Austausch der Halogen-Strahler gegen LED Strahler in den Abteilungen Informatik und Mikroelektronik und eine zeit- und helligkeitsabhängige Schaltung der Beleuchtung in Kombination mit einer Nachtlüftung

zu effektiven Verbesserungen des sommerlichen Wärmeschutzes führen. Da im Museum bereits sehr gute Erfahrungen mit LED-Strahlern gemacht wurden, wird empfohlen, diese Maßnahme zuerst umzusetzen. Allein diese Maßnahme ergäbe eine rechnerische Verringerung der sich einstellenden Temperaturen um 2-5 K. In Anbetracht der hohen internen Speichermassen, könnte so auch eine geringere Schwankungsbreite der Raumlufttemperatur erreicht werden.

AUSBLICK

Derzeit werden im Deutschen Museum Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Diese Maßnahmen umfassen die außenseitige Dämmung des Daches, den Austausch der Lichtkuppeln und die Erneuerung der Beleuchtung durch die vorgeschlagenen LED-Systeme. Die während und nach den Maßnahmen gesammelten Messdaten sollen anschließend mit den Berechnungen verglichen werden und so die Qualität des Modells überprüft werden.

LITERATUR

Hilbert, G.S.: Sammlungsgut in Sicherheit. 3. vollst. überarb. u. erw.Aufl. Berlin (2002)

Poeverlein, R.: Der Wiederaufbau des Deutschen Museums in München. Deutsches Museum (1953).

Haas, V.: Energetische Sanierungsempfehlung für das Deutsche Museum am Beispiel des Sammlungsbau Osttrakts. Diplomarbeit TUM, Lehrstuhl für Bauphysik (2009).

VDI 3786 Blatt 13, Meterologische Messungen Messstation, August 2006.

IMEDAS, Internet Messwerterfassungs- und DatenauswertungsSystem, http://www.ibp.fraunhofer.de/software/imedas.html, 11.6.2010