

Die Verknüpfung dynamischer Gebäude- und Bauteilsimulationsberechnungen

Möglichkeiten zur ganzheitlichen Betrachtungsweise des Temperatur- und Feuchteverhaltens in historischen Gebäuden

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

1 Einleitung

Die Beurteilung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Gebäuden ist entscheidend von der Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Rechenverfahren abhängig. Es zeigt sich, dass mit den bis dato eingesetzten, üblichen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmebilanz, z.B. Nachweise zur Wärmeschutzverordnung und zur Bestimmung des Feuchteverhaltens von Bauteilen, z.B. Verfahren nach DIN 4108, lediglich stationäre, für die entscheidenden Fragen der Zulässigkeit der Gebäude und Bauteile höchst unzulängliche Rechenmodelle zur Verfügung stehen. Die eingeführten Verfahren liefern unter, zumeist ungünstigen, extremen Randbedingungen brauchbare Vergleichs- und Zulässigkeitswerte, die aufgrund der vereinfachten Lösung nur Richt- und/oder Extremwerte aufzeigen. Eine Beurteilung und Vorausschau auf das reale wärme- und feuchtetechnische Verhalten von Gebäuden mit ihren Bauteilen ist nicht möglich.

Basierend auf den Erkenntnissen der auf diesem Gebiet bestehenden Grundlagenforschung konnten numerische Verfahren, wie dynamische Klimasimulationsberechnungen für Gebäude oder instationäre Verfahren zur Bestimmung der Wärme- und Feuchteverteilung im Bauteil, weiter entwickelt werden. Somit wird es möglich, klimatische Zustände nicht nur in Hinblick auf das Raumklima zu erfassen, sondern durch diese Kombination zu erwartende Schäden der äußeren Raumschale im Vorfeld einer Baumaßnahme differenzierter bewerten zu können.

Die Grundlagen der Modellrechnungen sind mittels paralleler Versuche verifiziert. Oftmals fehlen jedoch erforderliche Kennwerte für Baustoffe und Konstruktionen, die eine Bewertung der Rechenergebnisse in Frage stellen. Durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass die erforderlichen Kennwerte unbekannter Baustoffe mittels einfacher Laborversuche bestimmt werden können und dass es mit qualifizierter Anwendung der Programmsysteme möglich wird, eindeutige Abhängigkeiten der Wechselwirkung des Gebäudes aus seiner Nutzung auf das Bauteil zu bestimmen. Im Vorfeld einer geplanten Baumaßnahme oder Sanierung können so unterschiedliche Varianten realitätsnah beurteilt werden.

Diese Vorgehensweise wurde nun erstmals bei einem, von der Stadt Quedlinburg im Rahmen der Maßnahmen zur Erhaltung des Weltkulturerbes beauftragten Projektes, der Sanierung eines Hallenbades, eingesetzt. Hier sollen unter Berücksichtigung der extremen Nutzung erforderliche Maßnahmen zur Sanierung, wie Sicherung der Konstruktion vor klimabedingten Feuchteschäden, Erhöhung des Wärmeschutzes und Auswahl, Art und Regelung von unterschiedlichsten Heizungs- und Lüftungssystemen entwickelt werden.

2 Städtische Hallenbad der Stadt Quedlinburg

Das städtische Hallenbad der Stadt Quedlinburg befindet sich im Sanierungsgebiet des historischen Stadtkerns. Das Gebäude wurde 1904/05 errichtet und gilt, entsprechend seiner Ortslage und seiner Architektur, als denkmalgeschütztes Einzeldenkmal. Der 2-geschossige, unterkellerte Gebäudekomplex wird aus der Schwimmhalle, mit einem Becken ca. 9x18,5m, einer Sauna, öffentlichen Badzellen sowie den erforderlichen Nebenräumen gebildet. Das Außenmauerwerk besteht aus verputztem Ziegelmauerwerk, der Haupteingangsbereich sowie die Giebel des Dachgeschosses aus Fachwerk.

Das Heizungssystem des Hallenbades wird z.Zt. von einer Kohleheizung betrieben, deren Regelung darin besteht, dem Kessel unterschiedliche Mengen Brennstoff per Hand zuzuführen.

Aufgrund unzureichender Lüftungstechnik und eines mangelhaften Wärmeschutzes, auch/besonders im Bereich von Wärmebrücken, ist im Decken- und Wandbereich des Hallenbades, im Bereich der Feuchträume aber auch in Räumen üblicher Nutzung großflächig Schimmelpilzbefall festzustellen. Dieser Schimmelpilzbefall führt nicht nur zu ästhetischen Beeinträchtigungen, sondern stellt eine nicht zumutbare Gesundheitsgefährdung der Nutzer dar.

3 Feuchtetechnische Abhängigkeiten in einem Hallenbad

3.1 Raumklima

Das Behaglichkeitsempfinden eines Badegastes wird im Wesentlichen durch die Raumlufftemperatur, die Beckenwassertemperatur und durch die relative Raumlufffeuchte beeinflusst.

Eine Besonderheit des Schwimmhallenklimas liegt in der hohen Raumlufftemperatur von ca. 30°C, in Verbindung mit einer extrem hohen Luftfeuchte infolge der Wasserverdunstung aus dem Becken. Eine wesentliche Voraussetzung für ein angenehmes Schwimmhallenklima ist somit eine optimale Luftheizung bzw. Entfeuchtung bei entsprechender Luftführung [1].

Raumlufftemperatur

Für die thermische Behaglichkeit des Badegastes ist eine ausreichend hohe, gleichmäßige Oberflächentemperatur der Raumbegrenzungsflächen notwendig, da bei niedrigen Oberflächentemperaturen die Raumluff an kalten Bauteilen abkühlt und nach unten sinkt. Hierdurch werden unangenehme Zuglufferscheinungen erzeugt.

Um den Wärmeverlust des Menschen infolge Verdunstung des an ihm haftenden Wasserfilms zu mindern, sollte die Raumlufftemperatur 2 bis 4 K höher liegen als die Beckenwassertemperatur. In der Schwimmhalle ergibt sich, in Abhängigkeit zur Beckenwassertemperatur, eine Raumlufftemperatur von 30°C bis 34°C [2].

Raumlufffeuchte

Die relative Luftfeuchte während des Badebetriebes liegt i.A. bei ca. 60% [3], wobei die Verdunstungsmenge des Beckenwassers einerseits von der Wasseraufnahme der Luft, andererseits von der Stabilität der Grenzschicht aus wasserdampfgesättigter Luft, direkt über der Wasseroberfläche abhängig ist. Diese Grenzschicht kann eine Verdunstung weitgehend behindern. Außerhalb des

Badebetriebes ist der Einfluss der Grenzschicht groß, da i. a. eine stabile Luftschichtung vorliegt. Der Einfluss der Grenzschicht nimmt jedoch mit zunehmendem Badebetrieb, bedingt durch die Verwirbelungen, ab. Um die relative Luftfeuchte nicht übermäßig zu erhöhen, sollten folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

1. Möglichst geringe Verdunstung von der Beckenoberfläche. Hierzu sollte die Raumlufttemperatur auf $\theta_{\text{Luft}} \leq \theta_{\text{Wasser}} + 2\text{K}$ geregelt werden.
2. Vermeidung des Anstiegs der Luftfeuchte infolge Absenkung der Raumlufttemperatur.

4 Vorgehensweisen zur Entwicklung eines Sanierungskonzeptes

Aufgrund der dargestellten Probleme ist eine sorgfältige Planung einer Sanierungsmaßnahme des Gebäudes unumgänglich. Basis einer folgenden Untersuchung ist dabei die Bestimmung der örtlichen Situation, da allgemeine Aussagen über das Verhalten von Gebäuden und Bauteilen, bedingt durch erheblichen Unterschiede der Bauteile und Baustoffe, nicht möglich sind. Die Vorgehensweise ist umfangreich in [4] dargestellt.

Die Grundlage des Sanierungskonzeptes bilden hierbei die

- Bestimmung der örtlichen Situation, Bauteile, Details
- Messung der Temperatur und Feuchte über einen gewissen Zeitraum
- Bestimmung der bautechnischen Kennwerte
- Durchführung von Vergleichsrechnungen zur Eichung der Programmsysteme
- Berechnungen von Sanierungsvarianten im Jahreszyklus

4.1 Grundlagen der Berechnung zur Bestimmung des thermischen und hygrischen Verhaltens von Gebäuden und Bauteilen

Das Gebäude

Bei den Berechnungen wird das Gebäude in Hinblick auf seinen Standort, seiner Geometrie, Neigung und Azimut, der Bauteile und Baustoffe, der Nutzung und des Außenklimas als Modell für eine Klimasimulationsberechnung abgebildet. Für die rechentechnische Betrachtung wird als Vorgabe für das Außenklima das Testreferenzjahr TRY 02, entsprechend dem nord- und westdeutschen Tiefland, zugrunde gelegt.

Die Baustoffe und Bauteile

Die Bestimmung der wärme- und feuchtetechnischen Abhängigkeiten der Baustoffe erfolgt auf der Grundlage nach [4].

Bei den Berechnungen werden die Baustoffe berücksichtigt hinsichtlich

- ihrer wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte
- ihrer Absorption (bei außen liegenden Bauteilen)
- ihrer Speicherfähigkeit
- ihrer Absorption, Reflexion und Durchlasswiderstände bei Verglasungen.

Die Gebäudenutzung

Die Beeinflussung des Raumklimas durch die Wärme- und Feuchteabgabe der Besucher, die inneren Wärmegewinne aus Beleuchtung sowie der erhöhte Luftwechsel beim Öffnen und Schließen der Türen, wurde während der Öffnungszeiten des Schwimmbades, Mo-Fr 7-21 Uhr, Sa 8-16 Uhr, So 8-12 Uhr, berücksichtigt. Die vorhandene Luftwechselrate wurde im Rahmen einer Parameterstudie [Kap. 6.3] ermittelt und mit 0,6 [1/h] angesetzt.

Da das Bad zurzeit noch mit Kohle beheizt wird, ist eine witterungsgeführte Regelung der Heizung nicht möglich. Der Heizzyklus beginnt um 5 Uhr morgens, um ca. 7 Uhr wird die maximale Leistung erreicht und endet um 19 Uhr an Werktagen. Über Nacht kühlt das Schwimmbad ab.

Da der Heizer die Kohlen nach Bedarf auflegt, können die Raumlufttemperaturen nicht geregelt werden. Für die Simulationsberechnung wurde vereinfachend eine maximale Temperatur von 30°C angesetzt. Grundlage für die Angaben der maximalen Heizleistung in den einzelnen Zonen war die Wärmebedarfsberechnung nach [5] die Berechnung des Wärmebedarfs für die Wassererwärmung im Hallenschwimmbaden nach [1]. Grundlage hierbei ist die Wärmebilanz je m² Wasseroberfläche aus dem Verlust infolge Verdunstung und dem Gewinn durch Konvektion.

Die Berechnung des Verdunstungsstromes erfolgte nach der Daltonschen Verdunstungsbeziehung nach [2]. Hierbei werden unterschiedliche Verdunstungsbeiwerte für den Ruhe- und Badebetrieb angesetzt. Es zeigt sich, dass die Berechnungen, verglichen mit den gemessenen Werten, eine zu geringe relative Luftfeuchte ergab. Eine Parameterstudie [Kap. 6.3] führt zu einem Wert von $e=16$ [g/(hPa m² h)], sowohl für den Bade-, als auch für den Ruhebetrieb.

5 Thermisch-Hygrische Gebäudesimulationsberechnung

5.1 Das Programmsystem TRNSYS

TRNSYS (= Transient System Simulation Program [6]) ist ein Programm, zur Simulation von thermischen Systemen unter instationären Bedingungen. Das Rechenprogramm berücksichtigt dynamische Effekte, die nach aktuellen Angaben zugrunde gelegt werden. Die Variationen der nachstehenden Randbedingungen die ein Bauwerk belasten, ermöglichen einerseits die energetische Beurteilung von Planungsmaßnahmen, als auch die Auswirkungen auf das Raumklima durchzuführen.

Für die rechentechnische Betrachtung wurde das Gebäude auf Grundlage der Entwurfspläne sinnfällig in einzelne Raumzonen gegliedert, wobei Räume mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen zusammengefasst sind.

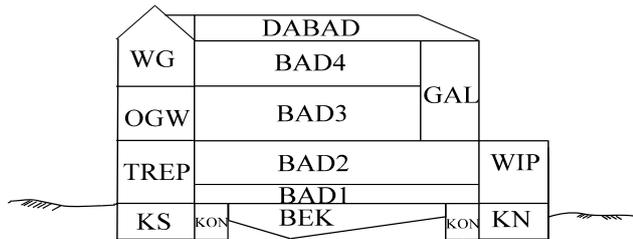


Bild 1 Gebäudemodell des Hallenbades Quedlinburg

Um das Klima in der Schwimmhalle möglichst genau zu erfassen, wurde der Raum in vier horizontale Zonen und eine Beckenzone eingeteilt. Die Zone BAD1, direkt über dem Becken, berücksichtigt hierbei die besonderen feuchtetechnischen Prozesse.

5.2 Klimamessungen vor Ort

Grundlage einer Berechnung ist die 'Eichung' des Programmsystems durch den Vergleich einer messtechnischen mit einer rechentechnischen Bestimmung des Temperatur- und Feuchteverhaltens. Aus diesem Grund wurde in der Zeit vom 25.10.95 bis zum 9.11.95 die Temperatur- und Feuchte im Bad messtechnisch aufgezeichnet.

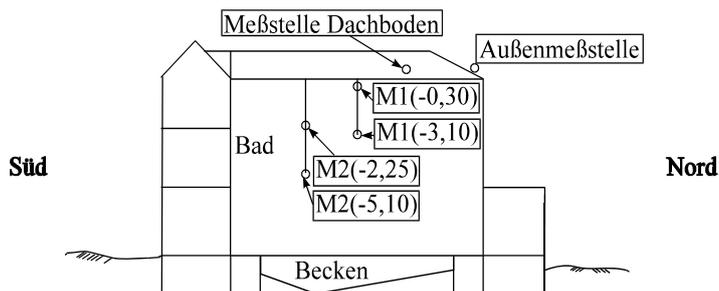


Bild 2 Lage der Messstellen

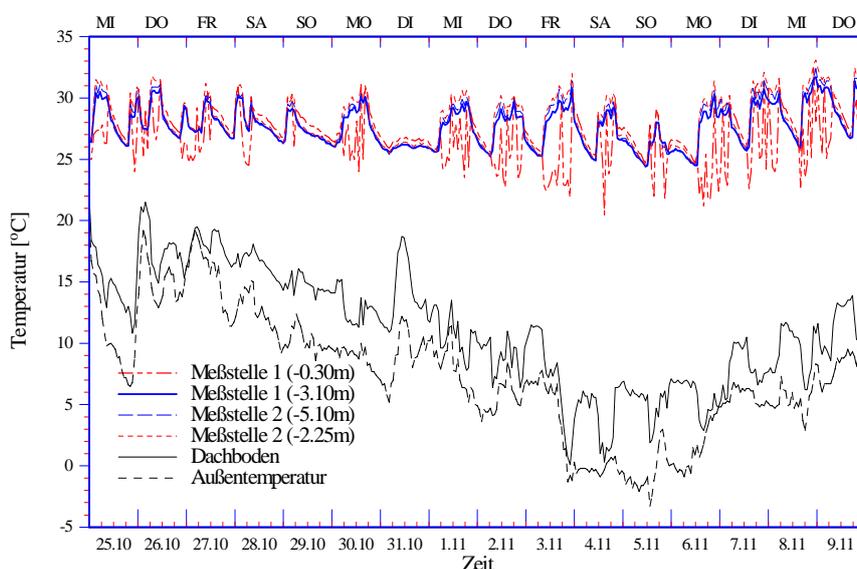


Bild 3 Gemessene Temperaturverläufe

Der Verlauf der Dachbodentemperatur ist dem der Außentemperatur angepasst, die Temperaturen liegen um ca. 3 K höher als die Außentemperaturen. Im Schwimmbad betragen die Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht ungefähr 5 K.

Deutlich ist der Aufheizvorgang in den frühen Morgenstunden zu erkennen. Tagsüber schwanken die Temperaturen um ca. 30°C. Gegen Ende der Öffnungszeiten, d.h. nach Beendigung des Heizens, sinken sie auf Nachtwerte von ca. 25°C ab.

Im Tagesverlauf sind leichte Temperaturschwankungen sichtbar, die auf das nicht regulierbare Heizsystem zurückzuführen sind.

Am Wochenende schließt das Hallenbad gegen Nachmittag. Die Heizperiode ist somit kürzer als die an den Wochentagen. Am 31.10.95 war das Hallenbad aufgrund eines Feiertages geschlossen. Diese Tage lassen sich deutlich im Temperaturverlauf ablesen.

Die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Messstellen im Schwimmbad verhalten sich grundsätzlich entsprechend. Die Messstelle 1 (-0.30m) befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Dachbodenöffnung. Es zeigt sich, dass die dort auftretenden Luftströmungen die Temperaturen in diesem Bereich stark beeinflussen.

Bedingt durch eine Kondensation am kapazitiven Außenfeuchtefühler konnte die Feuchte ab dem 1.11. nicht bestimmt werden, die fehlenden Klimadaten wurden durch Daten einer zentralen Wetterstation ergänzt.

Die Innenfeuchte liegt in einem Bereich von 45% bis 75%, wobei um 5 Uhr die maximale Luftfeuchte erreicht wird, da das Hallenbad zu diesem Zeitpunkt die niedrigste Innentemperatur aufweist. Während der Öffnungszeiten schwankt die relative Luftfeuchte um $\pm 10\%$.

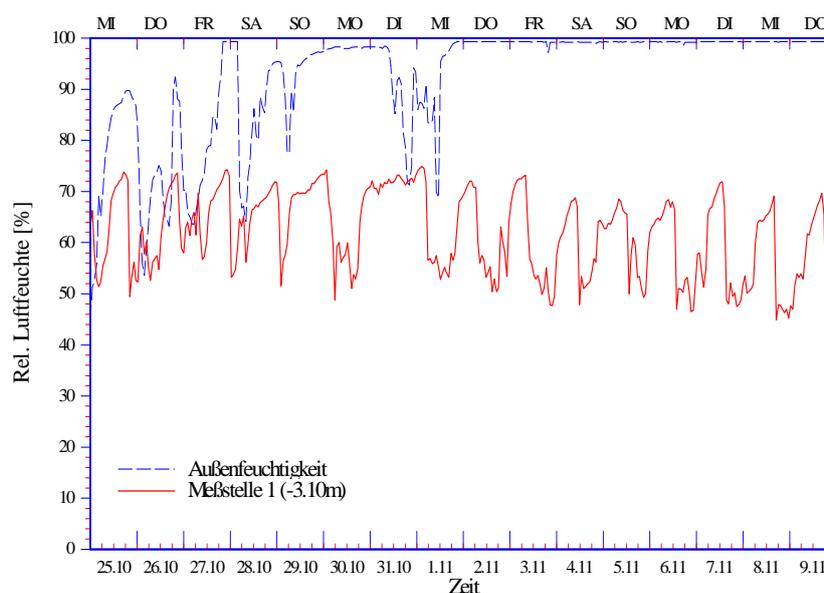


Bild 4 Gemessener Feuchtigkeitsverlauf

5.3 Vergleichsberechnung

Bei der vergleichenden Simulationsberechnung des Gebäudes wurden die gemessenen Außentemperaturen und -feuchten auf das nach Kap. 4 ff. generierte Gebäude aufgebracht und das Temperatur- und Feuchteverhalten ermittelt.

Temperaturverhalten

Bei der vergleichenden Betrachtung sind die gemessenen Temperaturen der Messstelle 1, mit den nach TRNSYS berechneten Temperaturen, Zone BAD3 in Bild 5 dargestellt.

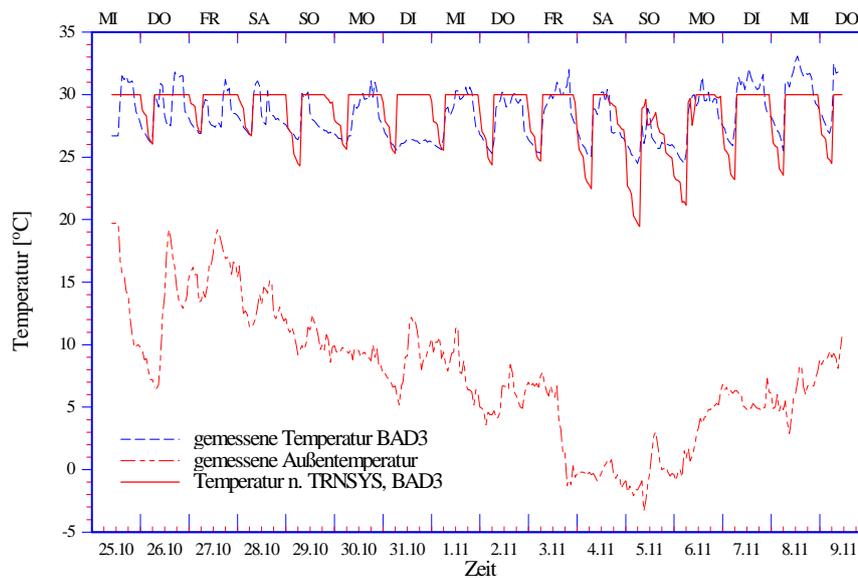


Bild 5 Vergleich Temperaturverlauf Simulation - Messung

Die Temperaturen der Berechnung liegen tagsüber, gemäß Vorgabe der Heizungssteuerung, bei konstant 30°C.

Das Wochenende, mit seinen veränderten Öffnungszeiten, ist durch ein frühes Absinken der Temperatur deutlich zu erkennen. Der Feiertag am 31.10.95 wurde in der Simulationsberechnung nicht berücksichtigt. Der Anstieg der Temperatur in den Morgenstunden stimmt mit der Messung überein.

Das Absinken der Temperatur nach Schließung des Schwimmbades, simuliert durch ein Abregeln der Heizung, zeigt geringe Abweichungen gegenüber der Messung. Das Schwimmbad kühlt im Vergleich zur Simulationsberechnung abends schneller ab. Während der Frostperiode liegen die simulierten Nachttemperaturen ca. 4 K unter den gemessenen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Temperaturverlauf der Simulation dem der Messung folgt. Abweichungen lassen sich auf die unregelmäßige Kohleheizung zurückführen.

Feuchteverhalten

Die Luft nimmt in Abhängigkeit ihrer Temperatur eine bestimmte Masse an Wasserdampf bis zu ihrer Sättigung auf. Mit zunehmender Temperatur der Luft steigt die aufnehmbare Wassermenge, so dass die relative Luftfeuchte bei gleicher Massemenge sinkt. Diese Abhängigkeiten sind aus den Bild 5 und 6 deutlich zu erkennen.

In Bild 6 wird die gemessene Feuchte, Messstelle 1 (-3.10m), der Feuchte nach Berechnung, Zone BAD3, gegenübergestellt.

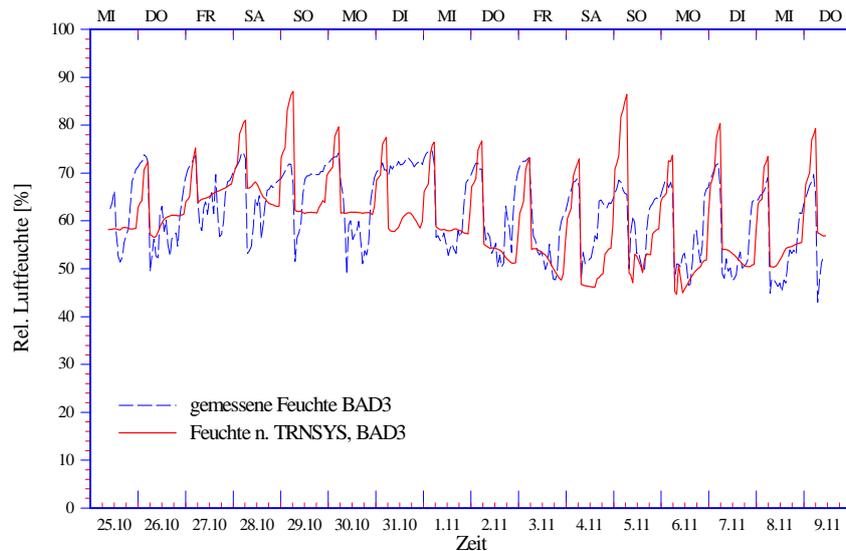


Bild 6 Vergleich Simulation - Messung: Feuchteverlauf BAD3

Die relativen Luftfeuchten liegen in einem Bereich von 45% bis 85%. Abweichungen von der gemessenen relativen Luftfeuchte sind auf die Abweichungen im Temperaturverlauf bzw. auf den vereinfachten Ansatz der Nutzerbedingungen zurückzuführen.

5.4 Temperatur und Feuchteverhalten des Gebäudes im Testreferenzjahr

Um das Gebäude im Jahresverlauf beurteilen zu können, wird das Testreferenzjahr TRY 02, entsprechend dem nord- und westdeutschen Tiefland, auf das Gebäude aufgebracht und das wärme- und feuchtetechnische Verhalten aufgezeigt.

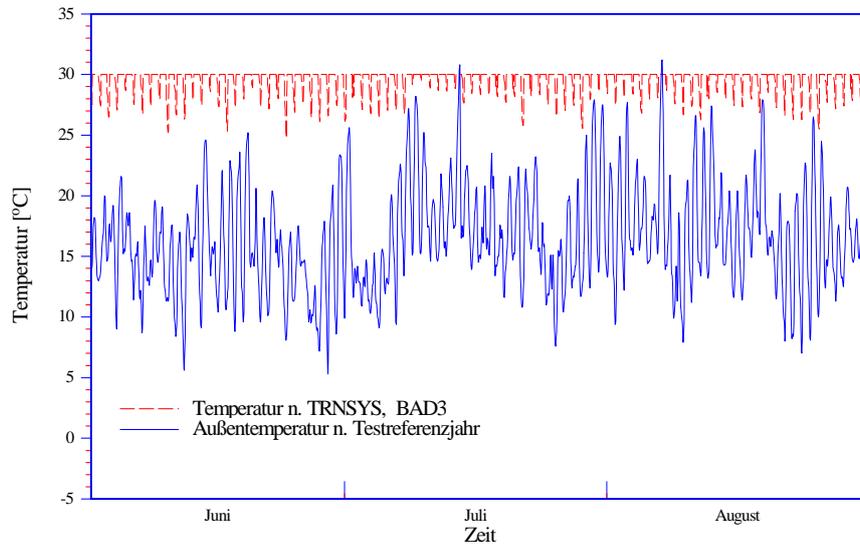


Bild 7 Temperaturverlauf BAD3, Sommerperiode TRY 02

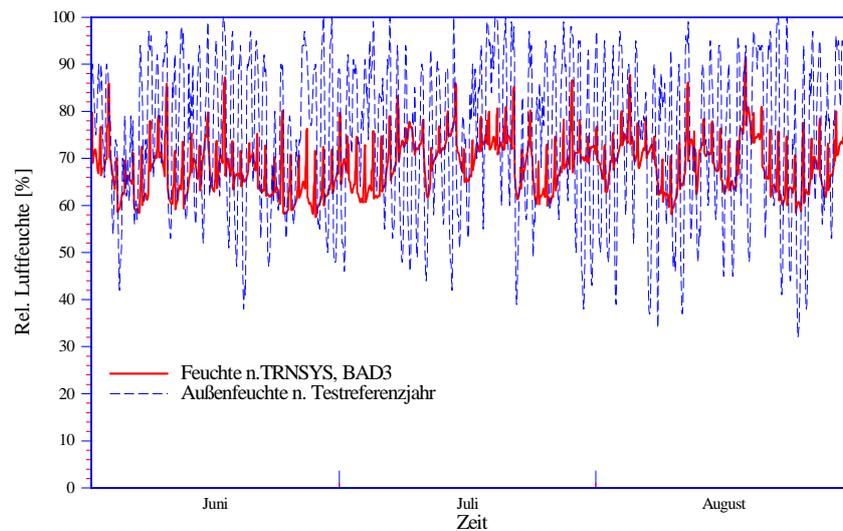


Bild 8 Feuchteverlauf BAD3, Sommerperiode TRY 02

In den Sommermonaten schwanken die Temperaturen der Zone BAD3 zwischen 25°C (Nachtwerte) und 30°C. An hintereinander folgenden warmen Tagen kühlt das Schwimmbad nachts kaum ab. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte schwankt entsprechend dem Temperaturverlauf.

Bild 9 und 10 zeigen die Klimaverhältnisse im Winter.

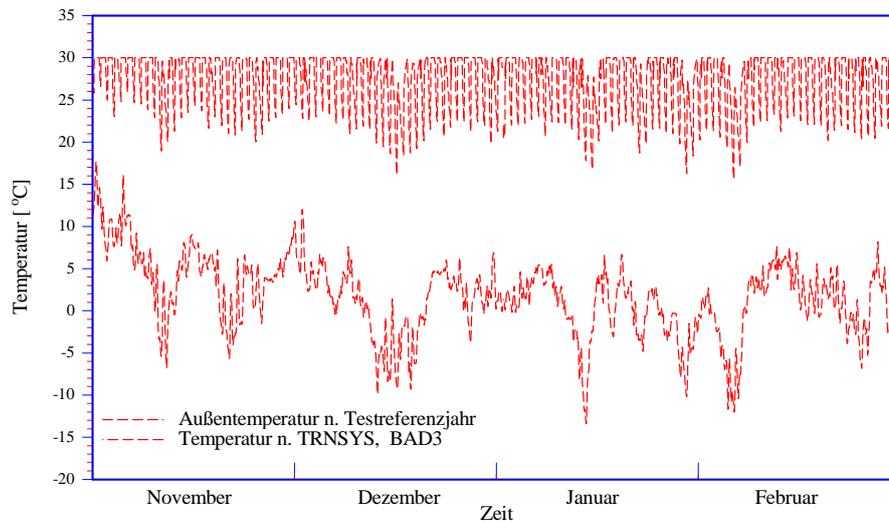


Bild 9 Temperaturverlauf BAD3, Winterperiode TRY 02

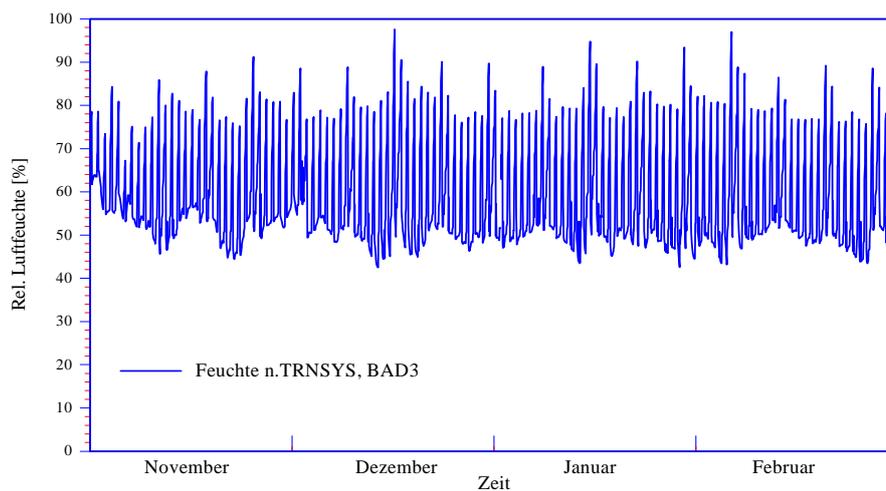


Bild 10 Feuchteverlauf BAD3, Winterperiode TRY 02

In den Wintermonaten schwanken die Temperaturen in BAD3 zwischen 16°C und 30°C. An kalten Frosttagen kann während der Öffnungszeiten die Temperatur von 30°C in der Schwimmbadhalle nicht erreicht werden. Nachts sinken in dieser Zeit die Temperaturen auf 16°C. Die relative Luftfeuchte erreicht zu diesem Zeitpunkt Höchstwerte von 98%. Aus diesen Gründen sind die Bauteiloberflächen stark Tauwasser gefährdet.

6 Thermische und Hygrische Bauteilsimulationsberechnung

Um die Auswirkungen eines veränderlichen Raumklimas auf die Bauteile genauer zu betrachten wurden ergänzend zu den in TRNSYS vorhanden Feuchteberechnungen, die Berechnungen der Bauteile mit dem Programmsystem WUFI [7, 8] durchgeführt.

6.1 Grundlagen der Berechnung

Bei der Berechnung des Wärmetransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Wärmeleitung
- Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel
- kurzwellige Sonnenstrahlung
- langwellige nächtliche Abstrahlung (nur bei TRY-Klimadaten).

Konvektiver Wärmetransport durch Luftströmungen werden nicht mit aufgenommen, da er meist schwer zu erfassen und selten eindimensional ist.

Bei der Berechnung des Dampftransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Dampfdiffusion
- Lösungsdiffusion

Wiederum wurde konvektiver Dampftransport durch Luftströmungen vernachlässigt.

Bei der Berechnung des Flüssigtransports berücksichtigt WUFI folgende Transportmechanismen:

- Kapillarleitung
- Oberflächendiffusion

Die durch Schwerkraft bedingten Sickerströmungen, hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden, sowie elektrokinetische und osmotische Effekte werden nicht erfasst.

Als Randbedingungen der Berechnung werden die meteorologischen Daten des TRY 02, wie Temperatur, Strahlung, Regen/Schlagregen, relative Luftfeuchte auf das Bauteil aufgebracht. Die Raumklimadaten, Temperatur und relative Feuchte, werden aus den Berechnungen der Gebäudesimulation übernommen und auf das Bauteil aufgebracht.

6.2 Auswertung der Berechnungen

Bei der Bewertung der Feuchteentwicklungen zeigt sich, dass der Gesamtwassergehalt ab dem 6. Jahr bis auf einen maximalen Bereich ansteigt.

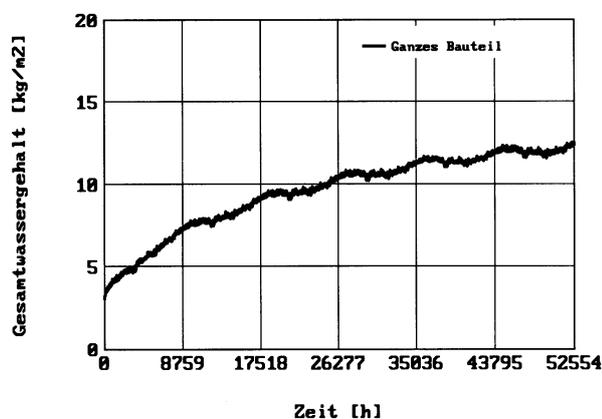


Bild 11 Gesamtwassergehalt im Bauteil

Hierbei muss beachtet werden, dass sich ein eingeschwungener Zustand erst nach mehreren Jahren einstellt. Bei reduzierter zeitlicher Betrachtung würden die bis dato ermittelten Feuchtwerte nicht den Endzustand darstellen!

Bei der Betrachtung der Feuchteentwicklung der Baustoffe gilt, dass eine Gefährdung der Baustoffe ausgeschlossen werden kann solange die Gebrauchstauglichkeit der Baustoffe nicht gefährdet ist. Grenzwerte der Baustoffe siehe [9].

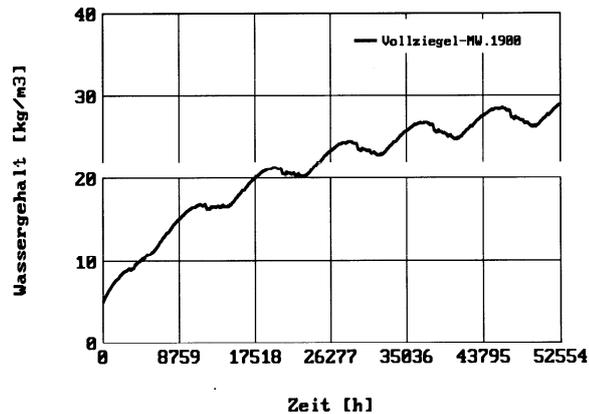


Bild 12 Feuchteentwicklung im Vollziegel MW

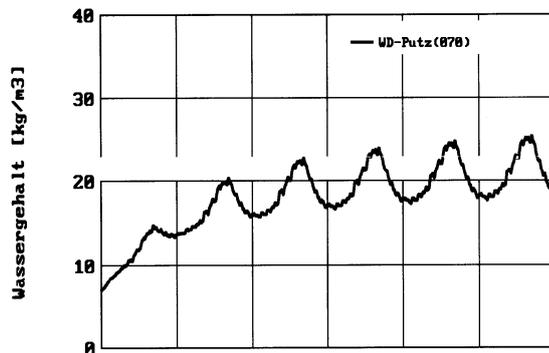


Bild 14 Feuchteentwicklung im Wärmedämmputz

Die Berechnungen zeigen folgende Feuchteentwicklung:

- Ziegel max. $u = 30 \text{ kg/m}^3 = 1.5 \text{ M-\%} \pm 0.25 \text{ M-\%}$
- Wärmedämmputz max. $u = 26 \text{ kg/m}^3 = 8 \text{ M-\%} \pm 3 \text{ M-\%}$

Die Gebrauchstauglichkeit der Baustoffe ist nicht eingeschränkt.

7 Raumakustische Betrachtungen

Die Halligkeit eines Raumes wird physikalisch durch seine Nachhallzeit T gekennzeichnet. Die Nachhallzeit ist die Zeitspanne, in welcher der Schallpegel in einem Raum, nach Abstellen der Quelle, um 60 dB absinkt.

Nach Sabine [10] gilt für die Nachhallzeit:

$$T = 0.163 \cdot \frac{V}{A}$$

mit

T Nachhallzeit [s]

V Raumvolumen [m³]

A Äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

Durch die äquivalente Schallabsorptionsfläche wird der Raumeindruck bestimmt. Ist A groß so ist eine geringe Halligkeit vorhanden, ist A jedoch klein wirkt der Raum sehr hallig.

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines leeren Raumes setzt sich zusammen aus der Summe der einzelnen schallabsorbierenden Begrenzungsflächen des Raumes.

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \cdot S_i$$

mit

A äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

S Begrenzungsfläche [m²]

a Schallabsorptionsgrad [-]

Nach DIN 18032 sollte die Nachhallzeit in Sporthallen $T \leq 1,8$ s nicht überschreiten. In Anlehnung an DIN 18032 wird für die Schwimmhalle im städt. Hallenbad Quedlinburg die gleiche Anforderung angestrebt.

7.1 Bestimmung der Nachhallzeit

7.1.1 Messtechnische Bestimmung

Die Schwimmhalle mit den Abmessungen in Länge/Breite/Höhe von ungefähr 25m/16m/7 bis 10m ist mit einer gewölbten Decke versehen und besitzt an den Längsseiten und an der Stirnseite einen Laubengang. Dieser ist 2.5 m tief und hat einen Säulenabstand von 4,0 m.

Zum Zeitpunkt der Messung fand kein Badebetrieb statt, das Becken war mit Wasser gefüllt.

Mit der Messanordnung der Fa. Bruel & Kjaer, bestehend aus Analysator 2144, Verstärker, Dodekaeder und Mikrofon wurden zur Ermittlung der Nachhallzeit 6 Messungen an 5 Mikrofonstandorten und 2 unterschiedlichen Lautsprecherstandorten ausgewertet.

Die einzelnen Messungen ergaben über die Frequenz gemittelt mittlere Nachhallzeit für das Schwimmbad von

$$T = 4.91 \text{ s}$$

7.1.2 Rechnerische Ermittlung

Für die rechnerische Ermittlung der Nachhallzeit wurden die schallabsorbierenden Flächen näherungsweise zu

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \cdot A_i = 76 \text{ m}^2$$

Mit dem Volumen der Schwimmhalle von ca. 2600 m³ ergibt sich die Nachhallzeit zu

$$T = 0.163 \cdot \frac{V}{A} = 0.163 \cdot \frac{2600}{76}$$

$$T = 5.6 \text{ s}$$

Die Abweichung zwischen Rechnung und Messung sind zum einen auf Maßungengenauigkeiten der Planungsunterlagen zurückzuführen, zum anderen konnten die Schallabsorptionsgrade der historischen Materialien nur näherungsweise Tabellenwerken entnommen werden.

7.2 Instandsetzungsmaßnahme

Zur Reduzierung der Nachhallzeit soll auf Teilflächen ein Akustikputzsystem aufgebracht werden. Als absorbierende Flächen werden dabei die Deckenfläche, ausgenommen dem Kassetteneinschub, und die Innenseiten der Außenwände ab ca. 2m Höhe, nach dem Fliesenabsatz vorgesehen.

Durch diese Maßnahme verringert sich die Nachhallzeit rechnerisch auf

$$T \approx 0.163 \cdot \frac{2600}{247}$$

$$T \approx 1.7 \text{ s}$$

Nach Abschluss der Instandsetzungsmaßnahme sollten überprüfende Messungen zur Bestimmung der tatsächlich vorhandenen Nachhallzeit durchgeführt werden.

8 Schlussbetrachtung

Die durchgeführten Berechnungen der Verknüpfung dynamischer Gebäude- mit Bauteilsimulationsberechnungen zeigen neue Möglichkeiten für die Bestimmung des Temperatur- und Feuchteverhaltens in historischen Gebäuden mit seinen Bauteilen und Einbauten.

Es wird möglich die wärme- und feuchtetechnischen Abhängigkeiten genauer darzustellen und eindeutige Tendenzen der Wechselwirkungen auch über langjährige wechselnde Zustände zu beschreiben.

Insgesamt wird deutlich, dass die bauphysikalischen Betrachtungen auf den Gebieten des

- *Wärme- / Feuchte- / Schall- aber auch des Brandschutzes*

bei der Instandsetzung auch bei der Neuplanung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise unterliegen müssen.

9 Literatur

- 1 Saunus, C. Planung von Schwimmbädern; Krammer-Verlag, Düsseldorf 1984
- 2 VDI Richtlinie 2089, Wärme-, Raumluftechnik, Wasserver- und -entsorgung in Hallen und Freibädern Juli 1994
- 3 Köpke, A.; Geld nicht zum (Hallen) Fenster hinauswerfen; Haustechnische Rundschau 1/1993
- 4 BBS INGENIEURBÜRO Berichte Nr. 4
Bauphysikalische Untersuchungen zur Entwicklung eines Sanierungskonzeptes,
Bausubstanz 4 + 5+6/94
- 5 DIN 4701, Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfes von Gebäuden;
März 1983
- 6 TRNSYS Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Wisconsin 1992
- 7 Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.
Dissertation Universität Stuttgart 1994
- 8 Künzel, H.M.: Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components.
One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag 1995.
- 9 Leimer, H.-P.: Beitrag zur Bestimmung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen bei der Sanierung historischer Fachwerkgebäude.
Dissertation Weimar 1991
- 10 Sabine, W. C.: Amer. Arch. and Building News, 1920