

**Ermittlung der Genauigkeit von
instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen
mittels eines stochastischen Konzeptes**

**Von der Fakultät
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von
Dipl.-Phys. Andreas H. Holm
aus Tegernsee**

**Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc.techn. h.c. Dr.-Ing. E.h.
Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. sc.techn. e.h. Karl Gertis**
**Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl**

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 2001

Lehrstuhl für Bauphysik

2001

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart sowie am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen und wurde teilweise mit finanziellen Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums gefördert. Mein Dank gilt in besonderem Maße Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis für die freie Hand bei der Entwicklung des Themas, den vielen wertvollen Anregungen und den damit verbundenen intensiven Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl danke ich für die freundliche Bereitschaft, diese Arbeit, auch von seiner neuen Wirkungsstätte in Weimar aus, als Mitberichter zu betreuen. Ebenfalls gebührt Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt für die Mitbetreuung dieser Arbeit.

Gleichzeitig möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel für die Möglichkeit, diese Arbeit innerhalb seiner Abteilung durchzuführen und auf sein Wissen zurückgreifen zu dürfen, recht herzlich bedanken, außerdem bei vielen Kolleginnen und Kollegen des IBP, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben – ob durch tatkräftige Hilfestellung bei der Modellentwicklung und rechnerischen Umsetzung oder Bereitschaft zu konstruktiver Kritik. Für Ersteres möchte ich speziell Herrn Dipl.-Ing. (FH) Veit Eitner und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Manfred Kehrer, für Zweiteres Herrn Dipl.-Phys. Thomas Schmidt und Herrn Dr.-Ing. Martin Krus besonders hervorheben. Zusätzlicher Dank gilt auch denjenigen Kollegen des IBP, die während der letzten Jahrzehnte kontinuierlich die Wetterdaten erfasst haben, auf die ich zurückgreifen durfte.

Besonderer Dank gilt auch zwei Kollegen und Freunden außerhalb des Institutes, Herrn Dr. Achilles Karagiozis und Herrn Dr. Thomas Bednar, mit denen ich immer wieder über die Entwicklung meiner Arbeit diskutiert habe und deren Anregungen viel zum Fortschritt und zum Abrunden beigetragen haben.

Nicht zuletzt ein ganz besonders herzliches „Danke“ meiner Frau Maleen, meinen Eltern und meinem Bruder.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Andreas Hagen Holm
Geboren: 19. November 1968 in Tegernsee
Eltern: Jochen Holm
Verena Paulus-Schaffry geb. Paulus
Familienstand: verheiratet seit 2001 mit Maleen Holm, geb. Fromm

Ausbildung

1975 bis 1976 Grundschule Holzkirchen
1976 bis 1979 Deutsche Schule, São Paulo (Brasilien)
1980 bis 1989 Gymnasium Miesbach
1989 bis 1996 Technische Universität in München Studienrichtung: Physik, Studienzweig: Technische Physik
Seit 1997 Aufbaustudium Betriebswirtschaft für Ingenieure und Naturwissenschaftler an der Fernuniversität Hagen mit abgeschlossenem Vordiplom

Auslandsstudienaufenthalte:

03/93 – 05/93 Praktikum an der „Universidade São Paulo“ (Brasilien)
01/95 – 09/95 Diplomarbeit an der „Universidade Porto“ (Portugal)

Berufliche Tätigkeit

1989 Industriepraktikum bei der Firma Gassner in Hausham – Bereich Maschinenbau (2 Monate)
1989 - 1996 Wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen (Voll- und Teilzeit)
1996 bis 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen, Abteilung Hygrothermik und an der Universität Stuttgart Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik
1998 bis 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart, abgestellt an das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verzeichnis der Formelzeichen	4
Abstract (Zusammenfassung in Englisch)	5
1. Problemstellung und Zielsetzung	8
2. Hygrothermische Grundlagen auf Basis vorhandener Literatur	9
2.1 Existierende Berechnungsmodelle und deren physikalische Grundlagen	10
2.1.1 Physikalische Grundlagen	10
2.1.2 Existierende Bewertungs- bzw. Berechnungsmodelle	14
2.1.3 Beschreibung des Berechnungsmoduls von WUFI	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.2 Bisherige Auswertung hygrothermischer Berechnungen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2.3 Bisherige Annahmen für Rand- und Anfangsbedingungen	18
2.3.1 Außenklima	19
2.3.2 Innenklima	20
2.3.3 Wärme- und Feuchteübergang	21
2.3.4 Absorptions- und Emissionsgrade für Strahlung	21
2.3.5 Hygrothermische Ausgangszustände	22
2.4 Unsicherheiten bei der Bestimmung der Stoffkennwerte	22
2.4.1 Grundkennwerte	22
2.4.2 Feuchtespeicherfunktion	23
2.4.3 Flüssigtransportkoeffizienten	24
2.5 Bisherige stochastische Ansätze hygrothermischer Modelle	25
3. Grenzen und Einschränkungen hygrothermischer Modelle	25
3.1 Quellfähige Baustoffe – Feuchteverhalten von Beton	26
3.2 Zeitveränderliche Kennwerte	27
3.3 Einfluß von Schichtgrenzen	27
3.4 Einfluß von Salzen auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport	30
4. Vom deterministischen Ansatz zum stochastischen Konzept	32
4.1 Auswahl typischer Klimazyklen	32
4.2 Approximationsmethoden für Stoffeigenschaften	35
4.2.1 Approximation der Feuchtespeicherfunktion	35
4.2.2 Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten	37
4.2.3 Vergleich mit Messungen und Anwendungsbeispiele	42
4.3 Entwicklung eines stochastischen Konzeptes	47
4.4 Rechnerische Umsetzung	49
4.4.1 Preprozessor	50
4.4.2 WUFI-Star-Calculator	51
4.4.3 Postprozessor	51
5. Genauigkeitsermittlung anhand von Beispielen	51
5.1 Zugrundegelegte Beispiele	51
5.2 Berechnungsergebnisse	54
5.2.1 Geneigtes Dach	54
5.2.2 Natursandsteinwand	58
5.2.3 Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale	61
5.2.4 Leichtbeton-Flachdach	64
6. Entwicklung eines Schnellverfahrens, Genauigkeitsbewertung und Folgerungen für die Praxis	67
7. Ausblick	70
8. Zusammenfassung	71
9. Literatur	73

Verzeichnis der Formelzeichen**Lateinische Zeichen**

a_k [-]	Absorptionsgrad für kurzwellige Strahlung
a_L [-]	Emissionsgrad für langwellige Strahlung
a_R [-]	Regenabsorptionsgrad
A [kg/m ² √s]	Wasseraufnahmekoeffizient
b [-]	Approximationsfaktor
D_D [m ² /s]	Wasserdampfdiffusionskoeffizient
D_{pc} [kg/(msPa)]	Flüssigtransportkoeffizient (Potential: Kapillardruck)
D_w [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient (Potential: Wassergehalt)
$D_{w,s}$ [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient für Saugen
$D_{w,t}$ [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient für Trocknung
D_{wo} [m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient für Oberflächendiffusion
D_φ [kg/(ms)]	Flüssigtransportkoeffizient (Potential: Relative Feuchte)
$E(U, V)$ [-]	Elastizität (Auswertgröße U, Eingangsgröße V)
K [-]	Korrekturfaktor
H [J/m ³]	Volumenbezogene Enthalpie des feuchten Baustoffs
h_v [J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
m_w [kg/m ²]	Aufgenommene Wassermenge
$\dot{m}_{\text{Feuchte}, m_m}$ [kg/(m ² s)]	Stromdichte des gesamten Feuchtetransports
$\dot{m}_{\text{Dampf}, m_v}$ [kg/(m ² s)]	Dampfdiffusionsstromdichte
$\dot{m}_{\text{Flüssig}, m_l}$ [kg/(m ² s)]	Flüssigtransportstromdichte
$\dot{m}_{\text{Konvektion}, m_c}$ [kg/(m ² s)]	Wasserdampfstromdichte hervorgerufen durch Luftkonvektion
p_D [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
p_O [Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche
p_N [Pa]	Normdruck

p_L [Pa]	Atmosphärischer Umgebungsdruck
p_c [Pa]	Kapillardruck
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
R_S [mm/h]	Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche
R_N [mm/h]	Normalregen
r [-]	Relative Häufigkeit
r_2 [s/m]	positionsabhängiger Proportionalitätsparameter
T [K]	Absolute Temperatur
u [kg/m ³]	Wassergehalt als Transportpotential
$u(\varphi)$ [kg/m ³]	Ausgleichswassergehalt bei einer relativen Luftfeuchte
u_{80} [kg/m ³]	Sorptionswassergehalt bei 80 % r. F.
u_{95} [kg/m ³]	Sorptionswassergehalt bei 95 % r. F.
u_f [kg/m ³]	Freie kapillare Wassersättigung
v [m/s]	Windgeschwindigkeit
w [kg/m ² √h]	Wasseraufnahmekoeffizient (bisheriges Symbol)

Griechische Zeichen

α [W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
α_c [W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
β_p [kg/m ² sPa]	Wasserdampfübergangskoeffizient
δ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
ϑ [°C]	Temperatur
λ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
ρ_w [kg/m ³]	Dichte von Wasser
φ [-]	Relative Luftfeuchte

Abkürzungen

DAS	Differentielle Sensitivitätsanalyse
MCA	Monte Carlo Analyse
TRY	Testreferenzjahr
WUG	WUFI-Star Projektdatei
VPR	WUFI-Star Steuerungsdatei

Abstract (Zusammenfassung in Englisch)

The hygrothermal behavior of a building component that is exposed to weather or soil humidity is an important aspect of its overall performance. Its importance is increasing as modern dwellings become more airtight and show elevated indoor humidity levels. Assessing the hygrothermal performance is, therefore, an essential step in designing new buildings or planning rehabilitation measures. Until now, the planner could only rely on manual design tools, such as the Glaser method described in German standard DIN 4108. Because of inherent simplifications and limitations, this simple steady-state assessment method only allows an estimate of the risk of interstitial condensation under standard conditions. If the moisture situation in a building component is to be simulated and assessed realistically, however, hygric phenomena must be accounted for in a more comprehensive way. This includes the effects of essential influences such as driving rain, rising dampness, construction moisture, hygroscopic moisture and reverse diffusion. In order to realistically account for hygric phenomena, numerous models and computer programs for calculating transient hygrothermal processes have been developed in different countries. Some have shown the ability to produce useful results.

The recent hygrothermal models have been validated by extensive and well-documented laboratory and outdoor experiments. In most cases, good agreement between measurement and calculation can be observed. Only occasionally does real behavior deviate significantly from the calculated results. Reasons may be that the calculation is not accurate enough or that the hygrothermal model does not include all of the relevant physical processes. As is true for all models, hygrothermal models are a simplified, often summary representation of certain physical circumstances. Models usually must remain incomplete, at least at the detail level. When the accuracy of hygrothermal models is to be assessed, possible restrictions and limitations must be determined and investigated in advance.

Until now in computations of transient coupled heat and moisture transport phenomena, the statistical variation of input parameters has been ignored in order to focus on the effect of individual isolated physical processes. The calculations are performed with what are assumed to be the average material parameters and climatic conditions. The results describe are assumed to definite hygrothermal conditions in the component. This procedure is called a deterministic analysis. Also the general basic assumptions are common to all current hygrothermal models. Properties of the materials are assumed constant during the period of observation. Materials are assumed to not contain hygroscopic impurities such as salts. It is also presumed that at interfaces where two materials are in contact, no changes occur in any materials do not

react with each other when they come in contact. Some of the author's observations about these assumptions are briefly discussed. The observations serve as examples that it is possible, if appropriate substitute assumptions are introduced, to apply the current hygrothermal models even to cases where the abovementioned assumptions are not valid. The substitute assumptions, too, are of purely deterministic nature. They can be subjected to the same statistical uncertainty analysis as the standard parameters of the models. Statistical analysis may even be helpful in testing the validity of the substitute assumptions by assessing how they are influenced by other parameters one at a time through sensitivity analysis. However, these model extensions have not yet gone beyond their early stages since they are areas of current research.

Even if the hygrothermal problem under consideration could be completely cast into a perfect model, the resulting hygrothermal conditions in the component would not be completely. The conditions depend on a series of parameters such as material properties or the exterior and interior climates. Many of these parameters have random statistical in nature, and their effect is not able to determined exactly. The resulting uncertainties in the computation evaluation of hygrothermal conditions in building components may be too large to be ignored. Until now hygrothermal problems were only solved in a deterministic way. However, there is increasing use of calculative assessments of the performance and usability of building products or constructions emphasizes. We need to gain insight the accuracy of the predictions made by the models and their sensitivity to variations in the input data.

When applying the deterministic method, it must be borne in mind that results with little uncertainty can only be reached if the input data are not subjected to much uncertainty. However, climatic conditions and material parameters in particular always exhibit more or less notable scatter. Climatic conditions are usually put into models as averages over times of the order of an hour and materials are described with properties that only an average reflect varying. They are also in dependence of production conditions and application circumstances. The Glaser method described in German standard DIN 4108-3 already accounts for the amount of variability to be expected, although in a very simple way. For most materials, the relevant table lists two values for the vapor diffusion resistance factor and the user is instructed to choose for each material the value that is less favorable for the outcome of the calculation. However, the complex situation in transient hygrothermal simulations does not permit the modeler to easily determine in advance which value for a particular material is the less favorable one. Stochastic models are needed which allow investigation of effects of variations in the properties

of the individual materials as well as their mutual interdependences, and which permit the modeler to recognize the essential parameters. The same applies to the effects of variations in the exterior climate and the behavior of the occupants.

The purpose of the present work is to devise a method for determining the statistical uncertainty in hygrothermal calculations and as a result of uncertainty in input parameters to implement this method in a software tool. Certain simplifications in the climatic boundary conditions and in the material parameters are necessary to arrive at a practical and user-friendly tool. Four typical hygrothermal strain categories and corresponding climatic short-cycles are defined to summarize the interaction between a building component and the climatic conditions. These categories are:

- I. increased driving rain load,
- II. summer condensation (so-called "reverse diffusion")
- III. construction moisture
- IV. winter condensation

In order to reduce computing time, the material parameters must be simplified, too. Since some parameters, such as the moisture storage function or the liquid transport coefficients, are complex functions of moisture content. They have too many degrees of freedom to be accessible to a quick analysis. Therefore new practical approximation methods were developed for the transport coefficients of capillary suction and drying as well as for the moisture storage function. Comparison with measurements shows that these approximation methods produce sufficiently accurate calculation results. The number of required basic material parameters is thereby reduced to the following:

- bulk density
- porosity
- heat capacity
- heat conductivity
- moisture-induced heat conductivity supplement
- sorption moisture at 80% and 95% rel. humidity
- free water saturation
- A-value (Liquid uptake coefficient)
- ratio $D_w, S/D_w, T$ (drying behavior)

Because of the complexity and non-linearity of the system of coupled differential transport equations, the accuracy of the calculation results cannot be assessed by means of an error propagation analysis. Stochastic methods must be used instead, and the current work concentrates on investigating

the differential sensitivity analysis (DSA) and the statistical analysis or Monte Carlo analysis (MCA).

Proceeding from the deterministic method to the stochastic method involves three steps:

- Step 1: Definition of the hygrothermal problem category.
- Step 2: Selection of the sensitive input data by means of the two-point method.
- Step 3: Differential or stochastic sensitivity analysis.

The conventional deterministic method is quite capable of characterizing the type and extent of the hygrothermal strain on a building component or construction. The first step of an uncertainty analysis is a deterministic investigation that uses the best possible estimates of the input parameters. The results of the deterministic calculation indicate the relevant problem category of the four defined above (step 1). A typical climatic short-cycle has been devised for each problem category. One possibility for the next step is to vary all the parameters of the deterministic calculation in all possible combinations and to analyze the effect on the results. However, the number of possible combinations quickly becomes so large that performing all the calculations and analyzing the variation of the results is impractical.

In order to reduce the number of calculations and the corresponding computational time, only a simple singular sensitivity analysis (two-point method) is performed for the component. This method takes the standard case as the starting point and successively varies each parameter while keeping the other parameters constant. That is, the calculation is repeated with the same climatic short-cycle, but one parameter R is successively set to $R+\Delta R$ and to $R-\Delta R$, so that one 'pessimistic' and one 'optimistic' case is considered for each parameter. The total number of required calculations is therefore twice the number of input parameters. The set of calculations performed with the different variations of the parameters leads to a set of alternative results for the respective performance criterion (e.g. the moisture balance). The influence of each parameter on the performance criterion can then be determined and assessed. In order to arrive at results that are non-dimensional, the so-called elasticity is used instead of partial derivatives. That is, the relative changes (in percent) are evaluated in order to better compare cause (e.g. a change in the A-value) and effect (e.g. drying times). If the relative changes are sorted according to their absolute value and their sign, weighted according to their frequency, and plotted as a distribution function, they constitute a simple risk profile. After this analysis (step 2), those input parameters can be singled out that have the largest effect on the calculation result. Mutual interdependences cannot be evaluated in this way, since only one parameter is being varied at a time. Furthermore, such a risk profile is based on the

implicit assumption that all variations in the variable parameters – and consequently all parameter combinations – are equally likely.

Based on the results of steps 1 and 2, two different concepts can be used to further assess the uncertainty of the simulation: differential sensitivity analysis and stochastic analysis. The differential sensitivity analysis (DSA) can be used to investigate the sensitivity with which a result obtained with quasi-certain parameters reacts to parameter variations. The DSA is usually applied when the investigated construction – judged on the basis of quasi-certain parameters - just barely passes the performance criteria. Depending on whether single or multiple input parameters are being varied, single or multiple sensitivity analyses may be performed. If singular critical values are to be determined, all parameters except one are kept at the constant original values while the value range of the remaining parameter is scanned. Scanning continues until the construction reaches the critical limit (e.g. water begins to accumulate). Traditional hygrothermal calculations use quasi-certain single-valued data. No insight into sensitivity is obtained. Singular sensitivity analyses allow some preliminary insight how building construction responds to variations in input parameters. On the other hand, the limitations of this method must not be ignored. Many of the input parameters depend on each other. For example, the approximated moisture storage function depends on the sorption moisture content at 80% and 95% RH and on the free saturation. The same data are also directly involved in the approximation of the liquid transport coefficients. A singular sensitivity analysis will not be able to correctly account for these correlations and may therefore yield erroneous results.

The effect of such interdependent material parameters on the calculation result can only be seen by stochastic analyses. This technique is called Monte Carlo Analysis (MCA). It involves generating possible combinations of simultaneously varied uncertain parameters by artificial random experiments. The reliability of the analysis increases with the number of repeated calculation runs. The MCA overcomes several limitations and deficiencies of the simple DSA. These conceptual strengths of the MCA, however, also cause problems when it is to be applied practically. To get more information entails increased demands on calculative power.

An automated stochastic simulation tool has been developed to make such an analysis much easier. It is called WUFI-Star (Stochastic Analysis Research) and contains an implementation of the stochastic concept described above. The software consists of a preprocessor, a calculation module based on the WUFI 3 program, and a postprocessor. Four examples representing the new defined hygrothermal problem categories were used to demonstrate that stochastic concept of this thesis. As one result, they show that it is not always

necessary to require utmost accuracy and precision of the input data, in particular the material data. It turns out that the variation in the computed performance criteria that is caused by different climate data sets for a single location or by different kinds of use is of the same order of magnitude as the uncertainty induced by "fuzzy" material or surface transfer parameters. In particular for material parameters, it is often easier to find typical ranges than certain numbers. The stochastic concept of the present work then pinpoints the sensitive input data that require particular care and quantifies the effect of the uncertainties on the results. Typical values of remain data may be estimated or taken from general tables.

The stochastic method is a useful tool for cases where the material or surface transfer parameters are not known completely or precisely, but a calculative hygrothermal assessment is nevertheless required. The user immediately receives essential information about the most sensitive input data and about the expected reliability of the calculation. The effort for measuring the unknown input parameters can be reduced to a minimum.

Because of the ever-increasing calculative power of affordable computers, the concept can already be used in practice. The required hygrothermal properties of building components during the planning phase to such a degree that their production and application involves only a minimal risk. With the method developed here the parameters that are crucial for the performance of a new product, their values and their uncertainties can be integrated into the product development in the earliest planning stages. This sets the product on the right track from the beginning and to yields at an optimal product with efficient work at low expense. Building upon the conventional deterministic method, the stochastic analysis is another step towards a hygrothermal safety concept.

1. Problemstellung und Zielsetzung

Dem hygrothermischen Verhalten von Bauteilen kommt aufgrund der Einflüsse von Witterung und Bodenfeuchte sowie infolge der zunehmend luftdichten Bauart und der damit ggf. erhöhten Raumluftfeuchte große Bedeutung zu. Die Beurteilung dieses Verhaltens ist daher bei Neubaumaßnahmen und bei Sanierungen wichtig. Bislang standen dem Bauplaner hierzu vor allem normative Regeln zur Verfügung, wie beispielsweise das in DIN 4108 [19] angegebene Glaserverfahren. Dieses einfache stationäre Bewertungsverfahren erlaubt aufgrund seiner Beschränkungen und Vereinfachungen ausschließlich die Beurteilung von Tauwasserrisiken unter normierten Bedingungen. Im Sinne einer realitätsnahen Erfassung und Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen müssen jedoch auch andere wesentliche Einflüsse (z.B. Schlagregenereignisse, aufsteigende Grundfeuchte, Baufeuchte, hygroskopische Feuchte oder Umkehrdiffusion) Berücksichtigung finden. Zu diesem Zweck sind in den letzten Jahren national und international zahlreiche Modelle und entsprechende PC-Programme zur Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens entwickelt worden, von denen einige nachweislich brauchbare Ergebnisse liefern.

In den letzten Jahren sind die hygrothermischen Modelle durch umfangreiche und gut dokumentierte Labor- und Freilandversuche validiert worden. In fast allen Fällen konnte man eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung beobachten. Nur gelegentlich weicht das tatsächliche Verhalten vom errechneten ab. Dieses kann einerseits an der Genauigkeit der Berechnung liegen, andererseits ist es aber auch denkbar, dass die tatsächlichen Vorgänge vom hygrothermischen Modell aufgrund möglicher Grenzen und Einschränkungen physikalisch nicht vollständig erfasst werden. Bei Ermittlungen der Genauigkeit hygrothermischer Modelle sind solche Grenzen vorab zu untersuchen und werden deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand einzelner Beispiele, wie etwa den „Anomalien“ im Verhalten von quellfähigen Baustoffen, angesprochen. Gleichzeitig wird gezeigt, dass in diesen Fällen durch einfache Modellerweiterungen jetzt eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Experiment erzielbar ist. Wird das vorliegende bauphysikalische Problem vollständig durch ein Modell erfasst, ist zu beachten, dass die hygrothermischen Zustände im Inneren der Baukonstruktionen von einer Reihe von Parametern, wie z.B. den Materialparametern oder den Außen- und Innenklimaverhältnissen, abhängig sind. Viele dieser Einflussfaktoren sind zufälliger Natur und deren Auswirkungen manchmal unbekannt. Daraus resultieren nicht vernachlässigbare Unsicherheiten bei der Berechnung von hygrothermischen Vorgängen in Bauteilen.

Bisher wurde der Aspekt der statistischen Variation von Eingabeparametern bei der Berechnung insta-

tionärer, gekoppelter Wärme- und Feuchtetransportphänomene ausgespart, um die Wirkung der einzelnen physikalischen Prozesse **isoliert** betrachten zu können. Die Berechnung wird durchschnittlichen Materialparametern und Klimarandbedingungen durchgeführt. Als Ergebnis erhält man präzisierte, hygrothermische Zustände im Bauteil. Diese Vorgehensweise bezeichnet man als deterministische Analyse. Aussagen über Ergebnisbandbreiten und Zuverlässigkeit der rechnerischen Prognosen gewinnen aber im Rahmen der immer häufiger durchgeführten rechnerischen Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Bauprodukten oder Konstruktionen immer mehr an Bedeutung.

Bei der deterministischen Methode ist zu beachten, dass ausreichend genaue Rechenergebnisse nur dann zu erzielen sind, wenn die Eingabedaten hinreichend genau bekannt sind. Vor allem ist bei den Klimarandbedingungen und bei den Materialparametern – diese variieren in der Regel produktions- bzw. applikationsabhängig – immer mit mehr oder weniger großen Streuungen zu rechnen. Selbst wenn mit Hilfe von Qualitätskontrollen versucht wird, die Schwankungsbreite von Materialeigenschaften einzuschränken, kann die Summe der Abweichungen zu kritischen Bedingungen führen. Die Variationsbreite der Materialparameter wird in einfacher Form bereits beim Glaserverfahren in der DIN 4108-3 [19] berücksichtigt. Dort sind für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der meisten Baustoffe zwei Werte angegeben, von denen immer der in der jeweiligen Situation ungünstigere Wert gewählt werden soll. Durch die komplexe Situation bei der instationären Bauteilberechnung ist es jedoch unmöglich, vorab zu bestimmen, welcher Stoffparameter in der jeweiligen Situation der ungünstigere ist. Deshalb sind stochastische Modelle erforderlich, welche die Bandbreite der hygrothermischen Eingangsparameter und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten untersucht und wesentliche Parameter hervorhebt. Das gleiche gilt auch für den Einfluss des Außenklimas sowie des Nutzerverhaltens.

Ziel dieser Arbeit soll die Erstellung eines Konzeptes zur Bestimmung der Genauigkeit von hygrothermischen Berechnungen sowie dessen softwaretechnische Realisierung sein. Für eine praktikierbare und anwenderfreundliche Umsetzung sind gewisse Vereinfachungen bei den Klimarandbedingungen und den Materialparametern notwendig. Entsprechend der Wechselwirkung eines Bauteiles mit den klimatischen Bedingungen (Tauwasserausfall, zu hohe Schlagregenbelastung, etc.) bietet es sich an, vier typische hygrothermische Gefährdungskategorien mit Kurz-Klimazyklen zu definieren. Für diese Gefährdungskategorien wird ein Schnellverfahren entwickelt, das aus abschätzenden Vorabrechnungen erste Informationen über die „sensibelsten“ Größen liefert. Für die komplexeren Materialkennwerte, wie Feuchtespeicherfunktion und Feuchtetransportkoeffizienten werden im Rahmen dieser Arbeit auch neuentwickelte Näherungsverfahren basierend auf einfachen Grundkennwerten vorgestellt,

denn für eine praxisorientierte Anwendung sind die bisherigen Funktionen aufgrund des damit verbundenen Messaufwands nicht geeignet. Durch den Vergleich mit Messungen muss gezeigt werden, ob diese Approximationsmethoden zufriedenstellend eingesetzt werden können. Damit wären material-spezifische Sensitivitätsstudien nur auf die einfachen Grundkennwerte beschränkt und somit überhaupt erst möglich.

Anschließend konzentriert sich die Arbeit auf zwei Verfahren der Unsicherheitsanalyse: die Sensitivitätsanalyse und die wahrscheinlichkeitsgestützte (stochastische) Analyse. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann untersucht werden, wie empfindlich die Lösung eines zunächst auf Basis quasi sicherer Daten aufgestellten Problems reagiert, wenn für einzelne Parameter andere Werte angesetzt werden. Liegen Wahrscheinlichkeitsurteile über wichtige Einflussfaktoren vor, so werden diese im Rahmen wahrscheinlichkeitsgestützter Analysen berücksichtigt. Falls mittels der dynamischen, stochastischen Analyse Informationen über mögliche Unsicherheiten der errechneten wärme- und feuchtechnischen Zustände erzielt werden können, so wäre ein erster Schritt in Richtung eines hygrothermischen Sicherheitskonzeptes zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Baustoffen und Bauteilen getan.

2. Hygrothermische Grundlagen auf Basis vorhandener Literatur

In der Bauphysik haben in den letzten Jahrzehnten Berechnungsmodelle zur Erfassung des instationären Feuchte- und Wärmetransports in mehrschichtigen Bauteilen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Ziel der Wärme- und Feuchteberechnung (WF-Berechnung) von Bauteilen ist es, die zeitliche Entwicklung der Temperatur- und Feuchtefelder unter realen Klimarandbedingungen innerhalb einer Konstruktion zu ermitteln. Die Zusammenhänge zwischen den Ursachen für Veränderungen (Potentiale) und den daraus resultierenden Reaktionen (Flüsse) des Systems werden durch stoffspezifische Transporteigenschaften charakterisiert und mit Hilfe von Transportgleichungen beschrieben. Aufgrund der Erhaltungssätze für Energie und Masse ergibt sich ein System von Differentialgleichungen, das eine Berechnung des zeitlichen Verhaltens ermöglicht. In mikroskopischer Betrachtungsweise werden die Energie- und Feuchteflüsse durch diejenigen Kräfte bestimmt, welche die einzelnen Moleküle des Festkörpers, des Wassers (in den jeweiligen drei Phasen: Dampf, flüssiges Wasser, Eis) und der Luft aufeinander ausüben. Unter praktischen Gesichtspunkten sind die Vorgänge zwischen den einzelnen Molekülen nicht von Interesse. Die Beschreibung des Gesamtsystems kann dafür durch makroskopische Größen wie Wärmestrom und Feuchtestrom erfolgen. Der Zustand eines kleinen, aber repräsentativen Ausschnittes des Gesamtvolumens lässt sich für diese

Betrachtungsweise durch die Temperatur sowie durch die Konzentration an gebundenem Wasser, Wasserdampf und Eis beschreiben.

Eine Modellbildung erfolgt allgemein immer unter gewissen Annahmen und Vereinfachungen, die eine Reduktion der Komplexität und des messtechnischen Aufwandes zur Bestimmung der Kenngrößen ermöglichen, gleichzeitig aber die Allgemeingültigkeit der Modelle einschränken. Die Vereinfachungen können an unterschiedlichen Stellen der Modelle vorgenommen werden. Je nach getroffenen Annahmen ergeben sich damit unterschiedliche Modelle zur Beschreibung eines Systems. Die getroffenen Vereinfachungen können dabei sein:

a) Annahme eines lokalen Gleichgewichtes

Üblicherweise erfolgt die Aufstellung der Bilanzgleichungen unter der Annahme eines lokalen Gleichgewichtes. Diese Annahme bedeutet, dass innerhalb eines mikroskopischen Ausschnittes des Gesamtsystems der Ausgleich zwischen den einzelnen Subsystemen (z.B. gebundenes Wasser – Wasserdampf) so schnell erfolgt, dass es für den viel langsamer ablaufenden Transport von einem mikroskopischen Ausschnitt zum nächsten so wirkt, als wären die einzelnen Subsysteme lokal immer im Gleichgewicht. Momentan laufen Untersuchungen des dynamischen Verhaltens der Feuchteaufnahme und -abgabe von Holz und Dämmstoffen [122], die Abweichungen von diesem Verhalten quantifizieren sollen.

b) Vernachlässigung von Transportrichtungen

Die realen dreidimensionalen Verhältnisse werden häufig nur zwei- oder eindimensional analysiert.

c) Vernachlässigung von Transportprozessen

Das zu untersuchende Problem ermöglicht meistens die Vernachlässigung einzelner Transportprozesse (z.B. Transport durch Gravitation, Molekulartransporte, etc.).

d) Approximation der Funktionen zur Beschreibung des Materialverhaltens

Auch bei den Materialparametern kann eine Vereinfachung erfolgen. So ist zum Beispiel die Wärmeleitfähigkeit oder die Feuchteleitfähigkeit von der Temperatur und vom Feuchtegehalt abhängig. Experimentell könnten diese Materialparameter bei relativ vielen Kombinationen aus Temperaturen und Feuchtegehalten bestimmt werden. Dies ist zeit- aufwendig und extrem kostenintensiv. Daher werden üblicherweise die Messungen beschränkt und die Veränderung mit der Temperatur und dem Feuchtegehalt durch Funktionen ausgedrückt. Ebenfalls werden bei den Materialparametern üblicherweise Anisotropieeffekte und Inhomogenitäten vernachlässigt.

2.1 Existierende Berechnungsmodelle und deren physikalische Grundlagen

Auf nationaler und internationaler Ebene sind, vor allem in den letzten zehn Jahren, zahlreiche Modelle zur Berechnung des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und eventuell zusätzlichen konvektiven Lufttransportes entwickelt worden, von denen einige nachweislich zuverlässige Ergebnisse liefern. Derartige Verfahren zur realitätsnahen Berechnung des tatsächlichen hygrothermischen Geschehens gehen, wie oben erläutert, weit über die bisher angewandten reinen Diffusionsmodelle hinaus. Ihre physikalische Grundlagen seien nachfolgend kurz erläutert.

2.1.1 Physikalische Grundlagen

Da die Phänomene der Wärmespeicherung und Wärmeleitung hinlänglich bekannt sind und der Wärmetransport durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel (Latentwärmeeffekt) im Zusammenhang mit dem Feuchtetransport zu sehen ist, wird hier nur auf die Feuchtetransport- und Feuchtespeicherphänomene eingegangen. Für die genauere Analyse von Frost-Tau-Prozessen, bei denen die Schmelzwärme und die wärmetechnischen Eigenschaften des Eises eine Rolle spielen, wird auf [3, 73, 83, 99] verwiesen.

Feuchtespeicherung

Jeder poröse Stoff nimmt mit der Zeit eine Stofffeuchte an, die von der umgebenden Luftfeuchte abhängt und um so höher ist, je feuchter die umgebende Luft ist. Die Feuchte wird dabei an den äußeren und inneren Oberflächen des porösen Stoffes durch van-der-Waals'sche Kräfte und durch Oberflächenkräfte des Wassers (Kapillarkondensation), die von der Kapillarstruktur und der Art des Stoffes abhängen, absorbiert. Man nennt die sich einstellende Stofffeuchte entweder Gleichgewichtsfeuchte, Sorptionsfeuchte oder hygroskopische Feuchte. Alle mineralischen Baustoffe sind hygroskopisch. Sie besitzen unter praktischen Bedingungen eine höhere Stofffeuchte als 0%. Bei nicht-hygroskopischen Stoffen wie Metallen, bestimmten Kunststoffen oder Gläsern hingegen lagert sich ohne Taupunktunterschreitung kein Wasser an. Sie sind bei Umgebungsbedingungen unter 100% trocken. **Bild 1** unten zeigt eine typische, stoffspezifische Feuchtespeicherfunktion für einen porösen, hygroskopischen Baustoff, wobei der Wassergehalt des Baustoffes in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und vom Kapillardruck (Saugspannung) aufgetragen wird. Typischerweise läßt sie sich in drei Bereiche gliedern, nämlich:

- Sorptionsfeuchtebereich
- Kapillarwasserbereich
- Übersättigungsbereich

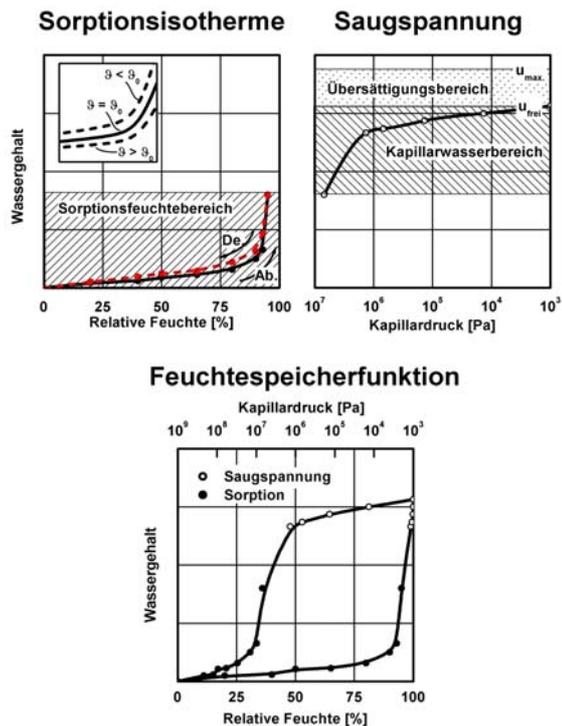


Bild 1: Schematische Darstellung der Sorptionsisotherme, der Saugspannungskurve und deren Verknüpfung zur Feuchtespeicherfunktion eines porösen Baustoffes in Abhängigkeit von der relativen Feuchte und vom Kapillardruck nach [74].

Links oben: Sorptionsisotherme

Im hygroskopischen Feuchtebereich wird der Wassergehalt in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Umgebungsluft gemessen. Dort ist ein Temperatureinfluss und ein Hystereseeffekt zwischen Ad- und Desorption vorhanden.

Rechts oben: Saugspannungskurve

Im überhygroskopischen Bereich wird die Saugspannung in den Poren in Abhängigkeit vom Kapillardruck gemessen.

Unten: Feuchtespeicherfunktion

Verknüpfung der beiden Funktionen über die Kelvin-Beziehung zu einer Darstellung.

Die Wasserdampfsorption hängt im bauphysikalisch interessanten Bereich in erster Linie von der relativen Luftfeuchte der Umgebung ab, die Umgebungstemperatur hat einen geringeren Einfluss [11, 16, 38, 72]. Aus diesem Grund wird die hygroskopische Feuchtespeicherung in Form von stoffspezifischen Sorptionskurven dargestellt **Bild 1** (links oben). Die Sorptionsisotherme hat für hygroskopische poröse Baustoffe einen typisch s-förmigen Verlauf und zeigt oft einen Hystereseeffekt zwischen Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe, der als Folge unterschiedlicher Befeuchtungs-/Trocknungsvorgänge oder anderer, durch die Porenraumgeometrie hervorgerufener Effekte angesehen wird [83]. Künzel [94] zeigt, dass der scheinbar gemessene Unterschied zwi-

schen Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe vor allem bei Materialien mit hohem Widerstand gegenüber Wasserdampfdiffusion einige Vol.-% betragen kann. Auch bei stark quellfähigen Stoffen ist der Hystereseeffekt ausgeprägt. Da gerade bei feinporigen Materialien eine exakte Bestimmung langwierig ist (ca. ein Jahr), erklärt er diesen Unterschied u.a. damit, dass in den meisten Fällen nicht ausreichend lange gemessen wird. Untersuchungen von Rode [127], der die Ergebnisse aus Berechnungen unter Berücksichtigung der Hysterese mit denen bei Verwendung einer mittleren Sorptionsisotherme vergleicht, zeigen, dass durch die Mittelung zwischen Ad- und Desorptionsisotherme ein ausreichend genaues Ergebnis erzielt wird. Bei den meisten Baustoffen ist dieser Unterschied generell so gering ausgeprägt, daß zur Charakterisierung des Sorptionsfeuchtebereiches die Adsorptionsisotherme ausreicht [94].

Bei relativen Luftfeuchten über 95 % steigt die Feuchtespeicherfunktion stark an. Hier beginnt der Kapillarwasserbereich, häufig auch überhygroskopischer Bereich genannt. Kapillarporöse, hygroskopische Materialien können Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung u_f aufnehmen. Die freie Wassersättigung ist als diejenige Stofffeuchte definiert, die durch freies Saugen ohne Einwirkung äußerer Kräfte erreicht werden kann. Bei kapillarporösen Baustoffen liegt die freie Wassersättigung immer unterhalb des durch den offenen Porenraum bestimmten maximal möglichen Wassergehaltes und stellt einen wichtigen Kennwert des Materials dar. Der Bereich der Feuchtespeicherfunktion zwischen der Ausgleichsfeuchte bei 95 % r. F. und der freien Wassersättigung wird mit der in [83] beschriebenen Saugspannungsmessung bestimmt. Mit Hilfe von thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen erhält man eine Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte φ über einer konkav gekrümmten Wasseroberfläche und dem kapillaren Unterdruck. Diese Beziehung ist bekannt als die Kelvinformel und wird in [73] abgeleitet:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{p_c}{\rho_w \cdot R_D \cdot T}\right) \quad (1)$$

φ [-]	Relative Luftfeuchte
p_c [Pa]	Kapillardruck
ρ_w [kg/m ³]	Dichte des Wassers
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	Absolute Temperatur

Die überhygroskopische Feuchtespeicherfunktion - oft auch Saugspannungskurve genannt - (dargestellt in **Bild 1** rechts oben) schließt nahtlos an die klassische Sorptionsisotherme (oben links) an. Führt man die Ergebnisse beider Messungen über die Kelvin-Beziehung zusammen [74], erhält man die im unteren Teil des Bildes dargestellte materialtypische Feuchtespeicherfunktion. Üblicherweise stellt man sie entweder als Funktion der relativen Feuchte

oder als Funktion des Kapillardrucks dar. Bei grobporigen mineralischen Baustoffen, wie beispielsweise Ziegel, ist der überhygroskopische Wassergehaltsbereich deutlich größer als der hygroskopische, so dass für genaue Analysen auf Saugspannungsmessungen nicht verzichtet werden kann. Bei feinporigen Materialien, wie etwa Beton ist die Sorptionsfeuchte bei 95 % r. F. bereits so hoch, dass der Verlauf im überhygroskopischen Bereich bis zur freien Wassersättigung ohne Genauigkeitsverlust extrapolierbar ist. Holz und Holzwerkstoffe sorbieren ebenfalls schon im hygroskopischen Bereich große Feuchtemengen, so dass auch dort eine Extrapolation der Sorptionsmessung bis zur freien Wassersättigung in der Regel ausreicht [63].

Der Übersättigungsbereich beginnt mit der freien Wassersättigung und endet mit der maximalen Sättigung u_{max} . In diesem Bereich sind auch Poren gefüllt, die sich bei normalen Saugvorgängen nicht füllen würden. Diese Poren tragen nicht zum Kapillartransport bei. Wassergehalte in diesem Bereich können aber trotzdem aufgrund von Dampfdiffusion im Temperaturgefälle auftreten [84].

Feuchtetransport

Ändern sich die Umgebungsbedingungen des Baustoffs, ist das Gleichgewicht gestört und Feuchte wird in das Innere aufgenommen oder an die Umgebung abgegeben. Dabei können je nach Ursache der Störung unterschiedliche Feuchtetransportmechanismen wirksam werden. Einen Überblick über die bisher bekannten Transportphänomene und deren Ursachen gibt **Tabelle 1**. In der Bauphysik sind im wesentlichen aber nur drei Transportmechanismen von praktischer Bedeutung, nämlich:

$$\dot{m}_{\text{Feuchte}} = \dot{m}_{\text{Dampf}} + \dot{m}_{\text{Flüssig}} + \dot{m}_{\text{Konvektion}} \quad (2)$$

\dot{m}_{Feuchte} [kg/(m ² s)]	Stromdichte des gesamten Feuchtetransportes
\dot{m}_{Dampf} [kg/(m ² s)]	Stromdichte der Dampfdiffusion
$\dot{m}_{\text{Flüssig}}$ [kg/(m ² s)]	Stromdichte des Flüssigtransports
$\dot{m}_{\text{Konvektion}}$ [kg/(m ² s)]	Stromdichte für Wasserdampf infolge Konvektion feuchter Luft

Die Konvektion feuchter Luft in Hohlräumen von Bauteilen, wie beispielsweise das Durchströmen von Bauteilen mit feuchter Raumluft aufgrund von Luftdruckunterschieden zwischen innen und außen, bedeuten praktisch meist mehrdimensionale Transportvorgänge im angrenzenden Baustoff. Sie werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Vor allem ist sie kaum vorab quantifizierbar und ließe sich auch nur durch dreidimensionale strömungsmechanische Berechnungsprogramme in

Tabelle 1: Übersicht über Wärme- und Feuchtetransportmechanismen in porösen Baustoffen mit Angabe der treibenden Potentiale und der beschreibenden Gleichungen. Eine baupraktische Bedeutung ist mit einem „+“, vernachlässigbare Effekte mit einem „-“ gekennzeichnet.

	Mechanismus	Treibendes Potential / Ursache	Gleichung	Bedeutung
Wärmetransport	Wärmeleitung	Temperatur	$\dot{q} = -\lambda(u) \cdot \nabla \vartheta$	+
	Wärmestrahlung	Temperatur	$\dot{q} = \sigma \left(\varepsilon T_O^4 - \alpha T_U^4 \right)$	+
	Enthalpietransport durch Luftkonvektion	Gesamtdruck Dichte	$\dot{q} = (-k_a \nabla p_L) \cdot cT$	Nur 2-dim.
	Enthalpietransport durch Feuchtebewegung	Dampfdiffusion mit Phasenwechsel Feuchtebewegung und Flüssigtransport im Temperaturfeld	$\dot{q} = -h_v \dot{m}_v - cT \dot{m}_{fl}$	+
Wasserdampftransport	Effusion	Dampfdruck	$\dot{m}_v = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla p_v$	+
	Gasdiffusion	Dampfdruck		+
	Lösungsdiffusion	H ₂ O-Konzentration	$\dot{m}_v = -D(c) \cdot \nabla c$	+
	Konvektion feuchter Luft	Gesamtdruck Dichte	$\dot{m}_v = (-k_a \nabla p_L) \cdot x$	Nur 2-dim.
Flüssigtransport	Kapillarleitung	Kapillarer Unterdruck	$\begin{aligned} \dot{m}_{FI} &= -D_{pc}(w) \cdot \nabla p_c \\ &= -D_w(w) \cdot \nabla w \\ &= -D_\varphi(w) \cdot \nabla \varphi \end{aligned}$	+
	Oberflächendiffusion	Relative Luftfeuchte	$\dot{m}_{FI} = -D_O \cdot \nabla \varphi$	+
	Sickerströmung	Gravitation	Unter baupraktischen Bedingungen meistens unbedeutend oder Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten	-
	Hydraulische Strömung	Gesamtdruck		-
	Elektrokinese	Elektrische Felder		-
	Osmose	Ionenkonzentration		-

realistischer Weise erfassen. Die weiteren Ausführungen beschränken sich daher auf folgende praktisch dominante Feuchtetransportphänomene:

- Wasserdampfdiffusion, als Transport von Wasserdampf
- kapillares Saugen, als Flüssigkeitstransport in den Porenräumen
- Oberflächendiffusion, als Flüssigtransport an den Porenoberflächen

In Baustoffen, die kein starres Porengefüge besitzen, wie z.B. Hölzer oder manche Kunststoffe, findet aufgrund der Einlagerung von Wassermolekülen zwischen den Makromolekülen die sog. Lösungsdiffusion statt. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass diese Art der Diffusion am ehesten durch den Dampfdiffusionsansatz beschreibbar ist, wobei der Diffusionswiderstand im Gegensatz zur normalen Dampfdiffusion von der Stofffeuchte abhängt. Andere Transportphänomene wie z.B. Sickerströmung durch Gravitation im nicht wassergesättigten Porenraum oder Wanderung von Wassermolekülen infolge elektrischer Felder oder osmotischer Drücke sind bislang nur unzureichend berechenbar. Da sie nur

in Ausnahmefällen eine Rolle spielen, werden sie in den meisten Modellen nicht betrachtet.

Das Zusammenspiel der dominierenden Feuchtetransportphänomene wird in **Bild 2** anhand des Modells einer Kapillarpore in einem Wandausschnitt erläutert. Auf beiden Seiten der betrachteten Pore sollen bauübliche Randbedingungen herrschen, d.h. der Dampfdruck sei innen größer als außen und die relative Luftfeuchte sei außen höher als innen. Ist der Baustoff ausreichend trocken oder nicht hygroskopisch, dann diffundiert der Wasserdampf entsprechend dem Dampfdruckgefälle von innen nach außen.

Wasserdampfdiffusion

Unter der Wasserdampfdiffusion versteht man jenen Transportprozess, bei dem aufgrund der thermischen Eigenbewegung der Wasserdampfmoleküle Konzentrations- oder Temperaturunterschiede zu einem gerichteten Teilchenstrom führen. Wird dieser Transport vom Impulsaustausch zwischen Wassermolekülen untereinander bestimmt (Porenraum >> freie Weglänge der Moleküle; Kontinuumstransport), so

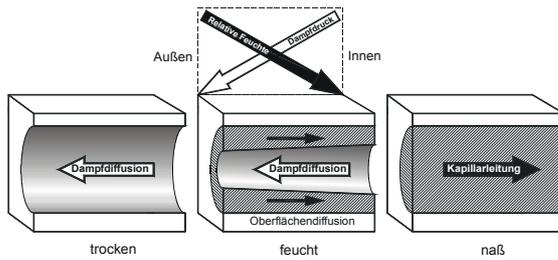


Bild 2: Schematische Darstellung der Transportphänomene in einer Baustoffpore einer Außenwand im Winter bei unterschiedlichem hohem Wassergehalt mit Angabe der treibenden Ursachen.

Je höher die Baufeuchte, desto größer wird der Flüssigkeitstransport gegenüber der Dampfdiffusion bis zur Umkehrung der Transportrichtung[99].

bezeichnet man diesen Vorgang als reine Diffusion, welche durch das 1. Fick'sche Gesetz beschrieben werden kann. Finden während des Transports im wesentlichen nur Wechselwirkungen zwischen Porenwand und Wassermolekül statt (Porenraum < freie Weglänge der Moleküle; Molekulartransport), spricht man von Effusion. Sie ist überwiegend für den Transport in den Poren mit einem Radius kleiner als 10^{-8} m verantwortlich. In der Regel ist aufgrund des breiten Porenspektrums innerhalb eines Baustoffes eine genaue Unterscheidung zwischen Effusion und Diffusion nicht möglich. Der gesamte Transport wird deshalb durch einen Mischtransport beschrieben. Zur Berücksichtigung der eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten im Porenraum wird eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl eingeführt. Sie gibt an, welcher Bruchteil an Wasserdampf durch den Baustoff im Vergleich zu Luft bei gleicher Schichtdicke transportiert werden kann. Da nur schwer zwischen beiden Prozessen zu differenzieren ist, kann die Wasserdampfstromdichte näherungsweise durch folgende Gleichung zusammen erfasst werden:

$$\dot{m}_D = -\frac{D_D}{\mu \cdot R_D \cdot T} \cdot \nabla p_D = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla p_D \quad (3)$$

\dot{m}_D [kg/(m ² s)]	Dampfdiffusionsstromdichte
D_D [m ² /s]	Wasserdampfdiffusionskoeffizienten in Luft
R_D [J/(kgK)]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	Absolute Temperatur
p_D [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
δ [kg/(msPa)]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

Die Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfdiffusionskoeffizienten D_D in Luft ist bisher nicht eindeutig bekannt. Vergleicht man die verschiedenen Angaben in der Literatur [81, 123, 136, 151], so sind im baupraktischen Temperaturbereich zwischen 0 und 60 °C Abweichungen von fast 20 % festzustellen. Am häufigsten aber wird die von Schirmer [136] empirisch aufgestellte Formel verwendet:

$$D_D = 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_N}{p_L} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (4)$$

p_N [Pa]	Normdruck
p_L [Pa]	Umgebungsdruck
T [K]	Absolute Temperatur

Bestimmt man die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gemäß der geltenden Norm DIN EN ISO 12572 [29], so zeigt sich bei hygroskopischen Materialien eine Abhängigkeit des gemessenen Wertes von der mittleren relativen Luftfeuchte, der die Probe ausgesetzt ist. Krus [83] hat durch Messungen unter Temperatur- und Feuchtegradienten gezeigt, daß die normalerweise beobachtete Feuchteabhängigkeit auf eine Überlagerung von Dampf- und Flüssigtransport zurückzuführen ist. Bei nicht porösen Baustoffen, wie z.B. Folien oder auch Holzwerkstoffen, sind durch andere physikalische oder chemische Effekte Abweichungen von dieser Beobachtung denkbar bzw. bekannt. Aus diesem Grund ist auch in den meisten heutigen Modellen zusätzlich eine feuchteabhängige Eingabe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl möglich.

Oberflächendiffusion

Enthält der Baustoff genügend hygroskopische Feuchte, so dass der Sorbatfilm an den Porenwänden beweglich wird (dies ist etwa ab 60 % r. F. der Fall) [40, 77], dann findet neben der normalen Dampfdiffusion auch die sog. Oberflächendiffusion, eine Bewegung sorbierter Wasserfilme an den Porenwänden, statt. Da die Dicke bzw. Beweglichkeit der sorbierten Molekülschicht gemäß der BET-Theorie [9] mit der relativen Feuchte zunimmt, erfolgt, wie in [83] nachgewiesen, ein Feuchtetransport im Sorbatfilm von Bereichen höherer Konzentration in Bereiche mit geringerer Konzentration an sorbiertem Wasser. Die treibende Kraft für die Oberflächendiffusion ist daher die relative Feuchte und nicht der Dampfdruck, so dass je nach Randbedingungen die Oberflächendiffusion auch entgegen dem Dampfdruckgefälle verlaufen kann. Bei der Oberflächendiffusion handelt es sich also um einen Flüssigtransport und nicht um eine Dampfdiffusion in der Gasphase. Dennoch ist es oft eine zweckmäßige Vereinfachung, die Oberflächendiffusion der Dampfdiffusion zuzuschlagen, z.B. durch Verwendung des im Feuchtbereich (wet-cup) ermittelten μ -Wertes. Dieses Vorgehen führt zu ähnlichen Rechenergebnissen wie die strikte Trennung beider Transportphänomene, wenn in der betrachteten Bauteilschicht keine großen Temperaturgradienten auftreten.

Kapillarleitung

Bei überhygroskopischer Feuchte im Material, beispielsweise infolge von Regenaufnahme, kommt es bei Füllung der Poren zur sog. Kapillarleitung, die die „effizienteste“ Form des Feuchtetransportes darstellt. Die treibende Kraft ist hier der kapillare Unterdruck, der sich aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers im Kapillarmeniskus und den Adhäsionskräften an der Grenzfläche zwischen Porenwandung und Wasser bildet. Der kapillare Unterdruck steht außerdem, wie bereits erwähnt, in einem funktionalen Zusammenhang mit der relativen Feuchte über dem Meniskus; d.h. der treibenden Kraft in der flüssigen Phase kann eine bestimmte relative Luftfeuchte in der Gasphase zugeordnet werden. Alternativ zum kapillaren Unterdruck kann deshalb auch die relative Feuchte als Transportpotential für die Kapillarleitung verwendet werden. Aufgrund der Wechselwirkungskräfte der Wassermoleküle untereinander und mit den Porenwandungen ergibt sich ein ausgleichender Feuchtestrom, bis sich die Wassermasse in einem Gleichgewicht befindet. Für die Kapillarleitung sind folgende drei Ansätze möglich.

$$m_i = -D_{pc}(p_c) \cdot \nabla p_c = -D_W(u) \cdot \nabla u = -D_\varphi(u) \cdot \nabla \varphi \quad (5)$$

m_i [kg/m ² s]	Flüssigtransportstromdichte
D_{pc} [kg/(msPa)]	Flüssigtransportkoeffizient (Kapillardruck)
D_w [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient (Wassergehalt)
D_φ [kg/(ms)]	Flüssigtransportkoeffizient (Relative Feuchte)
p_c [Pa]	Kapillardruck als Transportpotential
u [kg/m ³]	Wassergehalt als Transportpotential
φ [-]	Relative Feuchte als Transportpotential

Der Kapillartransport wird demzufolge entweder vom Kapillardruck-, von der relative Feuchte- oder vom Wassergehaltsgradienten ausgelöst. Der Flüssigtransportkoeffizient ist stark von der jeweiligen Zustandsgröße, z.B. Wassergehalt, und den Randbedingungen abhängig [83, 99]. Wird die Wasserzufuhr unterbunden, findet ein Weitertransport der Flüssigkeit statt. Diese Weiterverteilung der Flüssigkeit beruht darauf, dass die noch nicht gefüllten kleineren Poren aufgrund ihrer höheren Saugkraft über die vorhandenen Querverbindungen die größeren gefüllten Poren leersaugen. Es ist zu erwarten, dass dieses Weiterverteilen der Flüssigkeit langsamer abläuft als der Transport beim Saugvorgang. Ferner setzt über die zuvor benetzte Bauteiloberfläche ein Trocknungsvorgang ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren nachzufördern, spricht man vom sogenannten ersten Trocknungsabschnitt. Hier haben die Diffuseigenschaften des Baustoffes keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Da aber der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte

Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Der Wassergehalt und die relative Luftfeuchte an der Stoffoberfläche gehen dann zurück. Die Trocknungsgeschwindigkeit wird bestimmt durch das Zusammenspiel von immer geringer werdendem Flüssigtransport an die Oberfläche und Diffusion aus immer größerer Tiefe im Materialinneren. Es müssen also je nach Randbedingungen für den Flüssigtransport unterschiedliche Transportkennfunktionen angesetzt werden. Bisher hat man aus praktischen Gründen nur zwischen kapillarem Saugen und Weiterverteilen unterschieden. Streng genommen ist auch die Trocknung als eigenständiger Prozess mit eigenen Transportkoeffizienten in die Betrachtung mit einzubeziehen. Da aber numerisch und messtechnisch nicht zwischen Trocknung und Weiterverteilung zu unterscheiden ist, fasst man ge-

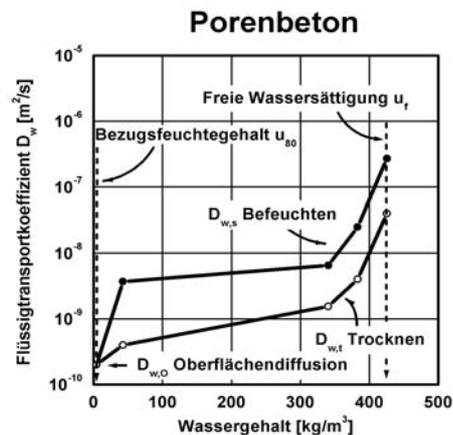


Bild 3: Flüssigtransportkoeffizienten für das Befeuchten durch kapillares Saugen und die Trocknung bzw. Feuchtwweiterleitung ohne Wasserkontakt, beispielhaft dargestellt für Porenbeton, nach [110].

Die Koeffizienten steigen mit dem Wassergehalt an. Unterhalb des Bezugsfeuchtegehaltes findet bei den meisten Baustoffen kein nennenswerter Flüssigtransport mehr statt. Hier ist eine prozessabhängige Differenzierung nicht mehr möglich. Bei diesem Feuchtegehalt geht man davon aus, dass der Flüssigtransport in Form von der Oberflächendiffusion stattfindet.

wöhnlich beide Prozesse zusammen. In einigen Modellen hat sich deshalb die in Bild 3 gezeigte prozessabhängige Differenzierung der Flüssigtransportkoeffizienten als vorteilhaft erwiesen [70, 99, 130].

2.1.2 Existierende Bewertungs- bzw. Berechnungsmodelle

Prinzipiell ist zwischen instationären und stationären Berechnungsmodellen zu unterscheiden. Die heute

noch gängigste Methode, die Gefährdung von Konstruktionen durch Wasserdampfdiffusion nachzuweisen, ist das GLASER-Verfahren nach DIN 4108, Teil 3 [19]. Dieses Verfahren zeigt unter den getroffenen Annahmen und Bedingungen eine mögliche Gefährdung der Konstruktion direkt an, es kann jedoch keine Aussage über die wirklichen Vorgänge im Bauteil machen. Es ist ursprünglich nur für Leichtkonstruktionen entwickelt worden und berücksichtigt weder Kapillarleitungseffekte noch Wärme- und Feuchtespeichermechanismen. Allerdings ist es durch Wahl der Randbedingungen und der Materialparameter die einfachste Form der hygrothermischen Bewertung inklusive gewisser „Sicherheitszuschläge“. In [19] sind für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der meisten Baustoffe zwei Werte angegeben, von denen immer der, in der jeweiligen Situation ungünstigere gewählt werden soll. Im Zuge der Einführung europäischer Normen wird der Nachweis in Zukunft mit dem Verfahren nach EN ISO 13788 erfolgen [31], der zwischenzeitlich in die DIN 4108-3 [19] übernommen worden ist. Auch hier ist das GLASER-Verfahren die Grundlage. Das Manko mit den einfachen Blockrandbedingungen soll durch Anpassung an nationale Klimaverhältnisse und Verwendung lokaler Monatsmittelwerte behoben werden. Allerdings führt diese Verkomplizierung des Berechnungs- und Bewertungsverfahrens nicht unbedingt zu zuverlässigeren Vorhersagen. Eine genaue Analyse der hygrothermischen Verhältnisse in Bauteilen ist nur möglich, wenn instationäre Einflußfaktoren entsprechend berücksichtigt werden.

Einen umfassenden, z.T. auch geschichtlichen Überblick, über verschiedene entwickelte Wärme-, Feuchte- und Lufttransportmodelle findet man unter anderem in [3, 71, 147]. Zusätzlich werden im Abschlußbericht des Projektes [53] bestehende Rechenprogramme anhand von sechs Beispielrechnungen miteinander verglichen und zum Teil Messergebnisse gegenübergestellt. Obwohl sich die gängigen Programme in verschiedenen Punkten unterscheiden, ist eine Klasseneinteilung entsprechend der jeweiligen Möglichkeiten analog **Tabelle 2** möglich. Zum heutigen Zeitpunkt kann die Mehrzahl der Modelle zum Typ 4 gezählt werden. Eine andere Unterteilung der Modelle ist die Art des Einsatzes und des jeweiligen Entwicklungsstandes (**Tabelle 3**). Viele der in [53] aufgeführten Modelle sind rein wissenschaftlicher Natur und wurden primär entwickelt, um die praktische Auswirkungen der verschiedenen physikalischen Prozesse besser zu verstehen bzw. neue bauteilbezogene Erkenntnisse zu untermauern. Modelle, die derzeit in praxistaugliche Computerprogramme implementiert und Dritten zugänglich sind bzw. in wichtigen neueren Forschungsarbeiten verwendet werden, sind in **Tabelle 3** zusammen mit den enthaltenen Transportphänomenen aufgelistet. Im Bereich der eindimensionalen Betrachtung sind vor allem die Programme „MATCH“ von Rode [127], „1d-HAM“ der Chalmers University of Technology in Schweden

[47], das amerikanische „MOIST“ [10], „UMIDUS“ aus Brasilien [114] sowie das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte „WUFI“ von Bedeutung [99]. Für zweidimensionale Berechnungen sind derzeit nur die beiden Programme „Delphin“ der TU Dresden [46] und „WUFI2d CFD“ [109] Dritten zugänglich. Im Rahmen dieser Arbeit wird, das Berechnungsmodul des 1994 von Künzel entwickelten Modells WUFI (eindimensional) verwendet [99]. Dieses Modell stellt einer Weiterführung der Ansätze von Kießl [73] dar und ist durch zahlreiche Labor- und Freilandversuche validiert.

2.1.3 Beschreibung des Berechnungsmoduls von WUFI

Die folgende Beschreibung beschränkt sich auf das Modell, das dem PC-Programm WUFI (Wärme- Und Feuchtetransport Instationär) zugrunde liegt. Basis ist die Idee, eine Funktion zur Beschreibung der Feuchtespeicherung (generiert aus der Sorptionsisotherme und der Saugspannungskurve) zu finden sowie die Erkenntnis, dass sich die Oberflächendiffusion und der Flüssigtransport mit der relativen Feuchte als Transportpotential (bzw. des Kapillardruckes via Kelvin-Beziehung) beschreiben lassen.

Der Transport von Wasserdampf und flüssigem Wasser wird getrennt betrachtet. Als Materialeingangsgrößen dienen entweder einfach zu bestimmende Kennwerte oder tabellarische Werte für die Transport- und Speicherkoeffizienten. Die zeitlich veränderlichen Wärme- und Feuchtetransportprozesse in Bauteilen werden mit Hilfe folgender gekoppelter Differentialgleichungen beschrieben:

Wärmetransport

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Feuchtetransport

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (7)$$

D_w [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient
H [J/m ³]	Enthalpie des feuchten Baustoffs
h_v [J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
p_D [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
u [kg/m ³]	Wassergehalt
δ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
ϑ [°C]	Temperatur
λ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
μ [-]	Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs
ρ_w [kg/m ³]	Dichte des Wassers
φ [-]	Relative Feuchte

Tabelle 2 Einteilung hygrothermischer Modelle nach [53] in verschiedene Typen entsprechend der dem jeweiligen Programm zugrundegelegten Komplexität.
Die meisten Programme, wie auch das in dieser Arbeit verwendete, fallen unter den Typ 4.

Typ	Physikalische Phänomene	Zeitverhalten	Materialparameter	Kopplung
1	- Wärmeleitung - Diffusion	Stationär	Konstant	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$
2	- Wärmeleitung - Diffusion inkl. Kapillarleitungseffekte	Stationär	konstant	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$
3	- Wärmetransport, - Wasserdampftransport	Instationär	Als Funktion des Wassergehaltes	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme
4	- Wärmetransport - Wasserdampftransport - Flüssigtransport	instationär	Als Funktion des Wassergehaltes und der Temperatur	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme
5	- Wärmetransport - Lufttransport	stationär /instationär	konstant	Enthalpietransport, Auftrieb (2-dim.)
6	- Wärmetransport - Wasserdampftransport - Lufttransport	stationär	konstant	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme, Enthalpietransport
7	- Wärmetransport - Wasserdampftransport - Lufttransport	stationär stationär instationär	konstant	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme, Enthalpietransport
8	- Wärmetransport - Wasserdampftransport - Lufttransport	instationär	Als Funktion des Wassergehaltes und der Temperatur	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme, Enthalpietransport, Auftrieb (2-dim.)
9	- Wärmetransport - Wasserdampftransport - Flüssigtransport - Lufttransport	instationär	Als Funktion des Wassergehaltes und der Temperatur	$p_{\text{sat}}(\vartheta)$, Latentwärme, Enthalpietransport, Auftrieb (2-dim.)

$p_{\text{sat}}(\vartheta)$: Sättigungsdampfdruck als Funktion der Temperatur ϑ

Beide Gleichungen enthalten auf der linken Seite die Speicherterme. Die Wärmespeicherung setzt sich aus der Wärmekapazität des trockenen Baustoffes und der des darin enthaltenen Wassers zusammen. Die Feuchtespeicherung wird durch die Ableitung der bereits erwähnten Feuchtespeicherfunktion beschrieben. Auf der rechten Seite der Gleichungen stehen die Transportterme. Der Wärmetransport basiert auf der feuchteabhängigen Wärmeleitung und dem Dampfenthalpiestrom. Dieser Dampfenthalpiestrom transportiert Wärme, indem Wasser an einer Stelle verdunstet, er dabei dieser Stelle Wärme entzieht und anschließend an eine andere Stelle diffundiert, dort kondensiert und dadurch Wärme zuführt. Diese Art des Wärmetransportes wird häufig als Latentwärmeeffekt bezeichnet. Der Feuchtetransport durch Oberflächendiffusion und Kapillarleitung infolge eines Gradienten der relativen Feuchte zeigt eine vergleichsweise geringe Temperaturabhängigkeit. Die Dampfdiffusion wird hingegen relativ stark vom Temperaturfeld beeinflusst, da der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur ansteigt.

Die Differentialgleichungen werden mit Hilfe eines impliziten Finite-Volumen-Verfahrens diskretisiert und entsprechend dem Ablaufschema in **Bild 4** iterativ gelöst. Die Genauigkeit der numerischen Lösung hängt von der Maschenweite des Gitters, der Größe der Zeitschritte und der Wahl der Abbruchkriterien ab. In der Regel ist die numerische Lösung so genau, dass der Einfluss der numerischen Parameter gegenüber dem Einfluss

der physikalischen Parameter, wie Material- und Klimadaten, vernachlässigt werden kann. Falsche Eingaben oder unrealistische Materialdaten können durch Plausibilitätskontrollen eingegrenzt werden.

2.2 Bisherige Auswertung hygrothermischer Berechnungen

Im Gegensatz zum Nachweisverfahren nach Glaser in DIN 4108-3 [19] gibt das instationäre Verfahren nicht mehr solche direkte Aussagen für die Bewertung einer Konstruktion. Die Beurteilung der hygrothermischen Berechnungsergebnisse aus instationären Verfahren muss meistens dem Anwender überlassen bleiben. Die Ergebnisse kann dieser beispielsweise bei der Planung von Neubau-, Umbau- und Sanierungsmaßnahmen verwenden zur

- Bestimmung der hygrothermischen Einsatzvoraussetzungen und Anwendungsgrenzen von Baustoffen und Bauteilen,
- Ermittlung von maximal zulässigen Raumluftfeuchtelasten im Sinne der Verhinderung von Tauwasserausfall, unzulässiger Auffeuchtung bestimmter Bauteile oder des Schimmelpilzwachstums,
- zeitlichen Extrapolation gemessener Daten (z.B. Feuchtegehalte oder Temperatur- wie Wärmestromverläufe) aus Freiland-Versuchen,

Tabelle 3: Übersicht über einige instationäre Feuchtetransportmodelle, mit Angabe jeweils erfasster Transportphänomene und wie sie derzeit für den Praktiker verfügbar sind oder in Forschungsarbeiten verwendet werden. Ein Plus-Zeichen bedeutet, dass diese Elemente enthalten sind.

	Autoren	Dimension	Wärmeleitung	Diffusion	Kapillarleitung	Luftströmung	Feuchtekonvektion	Enthalpietransport	GUI ¹⁾
MATCH	Rode [127]	1	+	+	+	+	+	+	+
WUFI-Pro 3.1	Künzel [99]	1	+	+	+			+	+
WUFI2d CFD	Künzel, Holm, Eitner [109]	2	+	+	+	+	+	+	+
Delphin	Grunewald [46]	1 und 2	+	+	+	+	+	+	+
TCCD2	Ojanen, Kohonen [120]	2	+	+		+	+	+	
TRATMO 2	Salonvaara [132]	1 und 2	+	+	+	+	+	+	
1d-HAM	Hagentoft, Blomberg [47]	1	+	+		+	+	+	+
Moist	Burch [10]	1	+	+	+				+
LATENITE	Karagiozis, Salonvaara [130]	1 und 2	+	+	+	+	+	+	
Umidos	Mendes, Ridley [114]	1	+	+	+			+	+
MoistureExpert	Karagiozis [70]	1 und 2	+	+	+	+	+	+	
Vie-HAM	Bednar [3]	2	+	+	+			+	
HMTRA	Gawin, Schrefler [39]	2	+	+	+	+	+	+	

¹⁾ GUI: Graphical User Interface und für Dritte verfügbar.

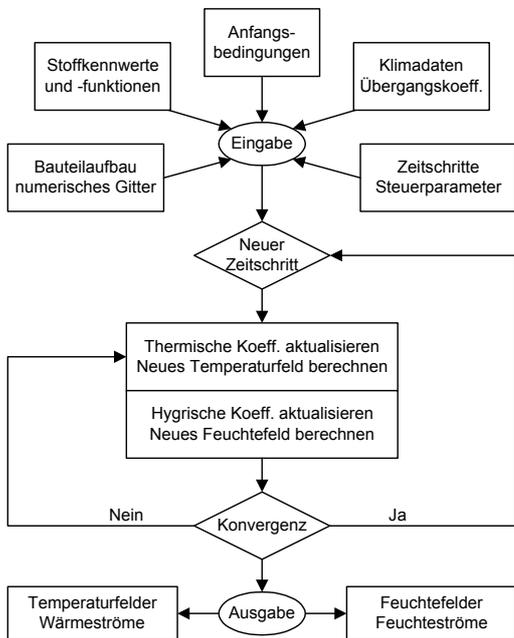


Bild 4: Ablaufschema des, das der Programmfamilie WUFI zugrunde liegt [99].

- Übertragung von bewährten Konstruktionen auf andere Klimaverhältnisse,
- Entwicklung und Optimierung von Bauprodukten

Die Ergebnisse sind in Form von Feuchte- und Temperaturverläufen sowie Profilen in beliebiger Orts- und Zeitaufösung verfügbar und können auf unterschiedliche Art dargestellt werden. Bild 5 zeigt eine Auswahl möglicher Darstellungen der Ergebnisse und deren Auswertungen. Zum einen kann die zeitliche Entwicklung einer bestimmten physikalischen Größe, zum anderen deren Verteilung in der Konstruktion von Interesse sein. In der Regel wird zuerst der Verlauf des Gesamtwassergehaltes und des Wassergehaltes in bestimmten Schichten betrachtet. Dabei wird zwischen dem kurzfristigen, beispielsweise der Trockenzeit für anfängliche Baufeuchte, und dem langfristigen bzw. eingependelten Verhalten unterschieden. Zielgrößen könnten dabei sein:

- Austrocknungszeiten
- Rücktrocknungszeiten
- Maximaler Wassergehalt
- Minimaler Wassergehalt
- Durchschnittlicher Wassergehalt
- Endwassergehalt
- Dauer bestimmter Bedingungen (z.B. bei Holz Wassergehalte über 20 M.-%)

Obwohl die Feuchteakkumulation innerhalb einer Konstruktion ein relativ langsamer Prozess ist, zeichnet sich meist schon nach einem Jahr die Tendenz des Gesamtwassergehaltes ab. Das Feuchteverhalten eines Bauteils kann man anhand der Jahresfeuchtebilanz (Differenz aus Wassergehalt nach einem Jahr und dem Anfangswassergehalt) beurteilen. Ist die Bilanz positiv, findet eine Akkumulation statt, ist sie negativ, trocknet die Konstruktion aus. Geht es aber beispielsweise darum, an bestimmten kritischen Stellen einer Konstruktion die hygrothermischen Verhältnisse zu untersuchen, dann ist dort die zeitliche Entwicklung der Temperatur, der relativen Feuchte oder gar der absoluten Feuchte auszuwerten. Alternativ kann man auch die Temperatur über der relativen Feuchte auftragen.

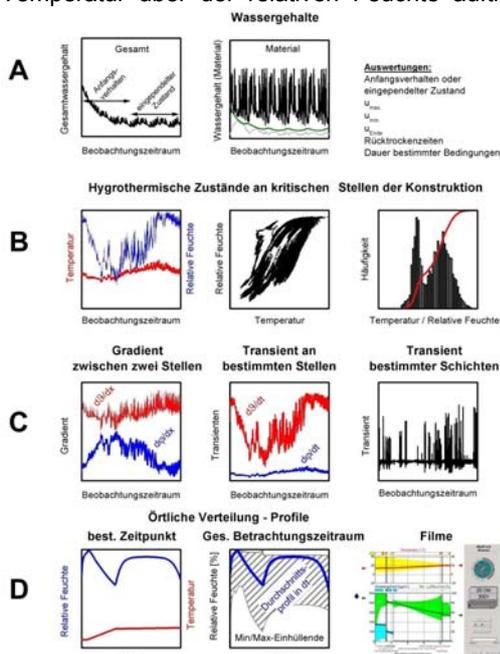


Bild 5: Verschiedene Darstellungs- und Auswertemöglichkeiten der Ergebnisse aus stationären hygrothermischen Berechnungen.

Die Darstellungs- und Auswertemöglichkeiten lassen sich in vier verschiedene Kategorien einteilen, nämlich:

- A: Auswertung des zeitlichen Wassergehaltverlaufes im Gesamtbauteil oder in einzelnen Schichten.
- B: Auswertung der zeitlichen hygrothermischen Zustände an möglichen kritischen Stellen der Konstruktion.
- C: Gradienten bzw. Transientenauswertung.
- D: Auswertung der örtlichen Verteilung der rel. Feuchte, Temperatur und des Wassergehaltes.

Für viele Fragestellungen, wie beispielsweise die hygrothermische Belastung eines Dämmstoffes [59], ist auch eine statistische Auswertung des Auftretens bestimmter hygrothermischer Zustände wichtig. Für andere Probleme (z.B. Aufschüsseln von Holzwerkstoffen) ist nicht nur der hygrothermische Zustand an einer bestimmten Stelle bedeutsam. Hier kann eine Gradienten- bzw. eine Transientenauswertung wichtige Informationen geben.

Neben der zeitlichen Entwicklung bestimmter physikalischer Größen ist oft auch deren örtliche Verteilung für die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit bedeutungsvoll. Dabei lassen sich die Ergebnisse entweder in Form von Profilen (Temperatur, rel. Feuchte und abs. Feuchte) zu bestimmten Zeitpunkten oder in Form von mittleren und extremen Profilen (minimale und maximale Zustände in der Konstruktion) während eines bestimmten Berechnungszeitraumes darstellen. Eine weitere nützliche Form der Ergebnisabbildung ist die Darstellung der Profile als Film oder Animation (Visualisierung der zeitlichen Entwicklung). Sie erleichtern nicht nur die Interpretation der Ergebnisse, sondern helfen oft auch, die durchaus komplexen physikalischen Speicher- und Transportphänomene zu veranschaulichen.

2.3 Bisherige Annahmen für Rand- und Anfangsbedingungen

Äußere und innere Umgebungsbedingungen sind wichtige Einflussfaktoren auf das hygrothermische Verhalten der Gebäudehülle. Die erfassbaren klimatischen Randbedingungen in einem Modells sind für die meisten Fragestellungen genauso wichtig wie die Wahl des Modells bzw. der Materialparameter. Bauteile stehen über ihre Oberflächen in direkter oder indirekter hygrothermischer Wechselwirkung mit der Umgebung. Das heißt, dass nicht nur die Umgebung auf das Bauteil einwirkt, sondern umgekehrt auch das Bauteil auf die Umgebung, wie z.B. durch Abgabe von gespeicherter Wärme oder durch sorptive Pufferung von Raumluftfeuchte. Diese Tatsache ist bei der Formulierung der Randbedingungen zu berücksichtigen.

Je nach Anwendungsfall unterscheidet man zwischen zwei Bereichen: die äußeren Umgebungsbedingungen über sowie unter der Geländeoberkante und die Innenraumverhältnisse. In beiden Fällen sind, bedingt durch die jeweiligen Austauschprozesse mit Hilfe von Konvektion und Strahlung bzw. Leitung und Diffusion, unterschiedliche Oberflächenübergangsbedingungen anzusetzen. Im folgenden wird kurz auf die jeweiligen Annahmen für die Klimarandbedingungen sowie die entsprechenden Oberflächenparameter eingegangen.

2.3.1 Außenklima

Die auf ein Bauteil einwirkenden Außenklimaparameter sind die Lufttemperatur, die Luftfeuchte sowie Strahlung und Niederschlag. Die Strahlungs- und Niederschlagsbeanspruchung ist abhängig von Neigung und Orientierung des Bauteils und muss auf die vorliegenden Verhältnisse umgerechnet werden. Zur Ermittlung des Schlagregens sind zusätzlich Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie Kenntnisse der Gebäudeumströmung erforderlich. Soll die langwellige Abstrahlung berücksichtigt werden, spielt bei vertikalen Bauteilen auch die Bodenbedo der Umgebung eine Rolle. Die täglichen Schwankungen der Witterungsverhältnisse erfordern in der Regel sehr kurzfristige Betrachtungsintervalle. Bei Fassaden ist zum Beispiel der Schlagregen eine der wesentlichen Feuchtequellen.

Für hygrothermische Berechnungen hat sich der Einsatz von Stundenmittelwerten als günstig erwiesen [102]. Kürzere Zeitintervalle als eine Stunde erfordern noch detailliertere Datensätze, die in der Regel nicht verfügbar sind. Einfache Analysen können in Ausnahmen auch mit klimatischen Tages- oder Monatsmitteln durchgeführt werden, allerdings ergibt es dann keinen Sinn, Strahlungs- und Regeneffekte zu untersuchen. Auf stündlicher Basis stehen beispielsweise die Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes [13] zur Verfügung, die durchschnittliche Klimabedingungen für zwölf unterschiedliche Regionen beinhalten. In der neuen DIN 4701 [20] (Neuaufgabe in Vorbereitung) werden die Testreferenzjahre als eine Grundlage zur Betrachtung des Energieverbrauchs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen aufgeführt. Wie die Erfahrung mit den Testreferenzjahren gezeigt hat, verführt die Existenz eines repräsentativen stündlichen Wetterdatensatzes dazu, diese Daten auch für Fragestellungen zu verwenden, für die sie nicht geeignet sind. So wurden die TRY u.a. benutzt für Untersuchungen zum sauren Regen und zum Schlagregen an Bauwerken. Da die TRY für solche Anwendungszwecke ungeeignet sind, wären die aus diesen Daten gewonnenen Ergebnisse zweifelhaft [13]. Die TRY sind nur dann für die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen geeignet, wenn der Schlagregen eine untergeordnete Rolle spielt bzw. gänzlich vernachlässigbar ist (z.B. bituminöse Anstriche, hydrophobierte Materialien oder wasserabweisende Dach- und Wandbekleidungen).

Wegen dieses Mangels und begünstigt durch die langjährige Wetterdatenerfassung in Holzkirchen wird ein - für die Region typischer, für Deutschland sogar extremer Datensatz - mit gemessenen Stundenwerten (sehr kalter Winter und extrem sonnenreicher Sommer) angeboten [110]. **Bild 6** zeigt die Jahresverläufe von Temperatur und Feuchte der Außenluft als gleitende Dekadenmittel mit Angabe der Tagesschwankungsbereiche. Im gleichen Bild sind auch die Dekadensummen der kurzwelligen Strahlung und des Schlagregens auf eine nach Westen orientierte Fassade dargestellt.

Während Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte für die Berechnung direkt aus den Klimadatensätzen übernommen werden können, sind Strahlung und Niederschlag auf die Ausrichtung des betrachteten Bauteils umzurechnen. Die kurzwellige Direktstrahlung und die langwellige Abstrahlung können mit Hilfe der VDI-Richtlinie 3789 [150] auf die jeweilige Orientierung und Neigung umgerechnet werden. Der Niederschlag senkrecht zur Bauteiloberfläche ist von der Orientierung, der Neigung, den Gebäudeumströmungsverhältnissen (Bebauung der Umgebung, Geländetopographie etc.) und vom betrachteten Fassadenausschnitt abhängig. Für Flachdächer werden zweckmäßigerweise Messwerte des Normalregens verwendet. Die Schlagregenbeanspruchung von Fassaden lässt sich aus dem Normalregen, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung ermitteln. Dazu sind in den letzten Jahren zahlreiche Studien durchgeführt worden [u.a. 34, 69, 117, 146]. Künzel errechnet empirisch den Schlagregen aus dem Normalregen unter Einführung eines stark positionsabhängigen Proportionalitätsfaktors [100]:

$$R_S = R_N \cdot r_2 \cdot v_{\text{Wind}} \quad (8)$$

R_S [mm/h]	Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche
R_N [mm/h]	Normalregen
v_{Wind} [m/s]	Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche
r_2 [s/m]	Positionsabhängiger Proportionalitätsparameter

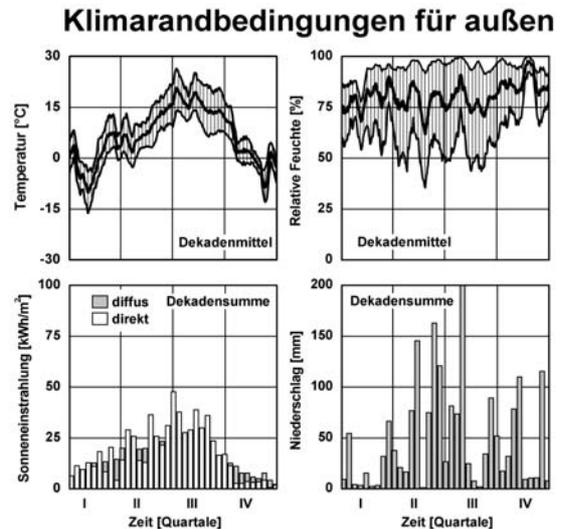


Bild 6: Meteorologische Randbedingungen auf der Basis gemessener Stundenmittelwerte eines für den Standort Holzkirchen (Alpenvorland) typischen Jahres, nach [110].

Die Außenlufttemperatur und -feuchte sind als gleitende Dekadenmittel mit Angabe des täglichen Schwankungsbereichs dargestellt; die kurzwellige Strahlung und der Niederschlag sind als Dekadensummen angegeben.

Die Untersuchungen [100, 139] haben gezeigt, dass in Randbereichen im Vergleich zur Fassadenmitte vor allem bei höheren Gebäuden eine deutlich größere Niederschlagsbeanspruchung auftreten kann. Dies ist durch die lokal unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Anströmverhältnisse zu erklären. Bei Hochhäusern kann in den Eckbereichen viermal so viel Schlagregen auf die Fassade treffen als in deren Mitte [54, 69, 97, 99, 139, 145]. Künzel gibt für wenig exponierte Stellen in der Mitte einer Gebäudefassade einen Wert von 0,07 s/m für r_2 an.

Eng an die Wahl der klimatischen Randbedingungen ist auch die Wahl der Zeitschritte geknüpft. Nachdem in der Regel Werte für das Außenklima als Stundenmittel zur Verfügung stehen, liegt demzufolge die zeitliche Auflösung der Berechnung in der gleichen Größenordnung. Die Wahl des Zeitschrittes ist bei den meisten Modellen nicht von großer Bedeutung. So erhöht ein Herabsetzen des Zeitintervalls von 1 Stunde auf 15 Minuten die Genauigkeit nicht so stark, dass eine vierfache Gesamtrechnzeit gerechtfertigt wäre. Vor allem, wenn man diesem Genauigkeitsgewinn die Unsicherheiten der Eingabedaten gegenüberstellt.

2.3.2 Innenklima

Für die rechnerischen Untersuchungen müssen neben den äußeren klimatischen Verhältnissen auch die Temperatur und die Luftfeuchte im Inneren des betrachteten Gebäudes bekannt sein. Im Gegensatz zum Außenklima wird das Raumklima durch das Nutzerverhalten bestimmt. Die Wärmekapazität und Wasserdampfsorptionsfähigkeit von Innenbauteilen und Einrichtungsgegenständen sorgen jedoch für einen etwas gedämpften Verlauf von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte. Deshalb sind nur für spezielle Fragestellungen stündliche Messwerte der Raumklimadaten erforderlich. Genauere Werte über die wirklichen Verhältnisse im Innenraum, vor allem über die der relativen Feuchte, sind nicht immer gemessen worden. Die z.B. in DIN 4108-3 [19] angegebenen, raumseitigen Randbedingungen für die Tauperiode (20 °C und 50 % r. F.) und die Verdunstungsperiode (12 °C und 70 % r. F.) sind allenfalls „pauschal“ für einfache stationäre Verfahren wie das von Glaser anwendbar und beinhaltet bewusst Sicherheitsaspekte. Das reale Verhalten von Bauteilen ist damit keinesfalls berechenbar. Dieses Manko ist in den letzten Jahren erkannt worden und führte zu großangelegten Datenerfassungen von bewohnten und unbewohnten Räumen mit dem Ziel, repräsentative Jahresverläufe der Raumluftverhältnisse zu bestimmen [u.a. 15, 37, 41, 42, 103, 133, 134, 148].

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass in Gebäuden mit natürlicher Belüftung ein Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur, Raumluftfeuchte und interner Feuchtelast besteht (siehe **Bild 7**).

Letztere ergibt sich aus der Feuchteproduktion und der Luftwechselzahl und ist die Differenz zwischen der Wasserdampfkonzentration im Raum und in der Außenluft. Daraus lassen sich die monatlichen Innenluftfeuchten errechnen. Künzel unterscheidet, basierend auf den Ergebnissen eigener Messungen [103], zwischen drei verschiedenen Innenraumluftverhältnissen. Für den Jahresverlauf definiert er eine Sinusfunktion mit Maximalwerten im August und Minimalwerten im Februar. Für Räume mit einer niedrigen Feuchtelast, wie z.B. Büroräume, liegt das winterliche Minimum bei 30 %, das sommerliche Maximum bei 60 % r. F. und der Jahresmittelwert bei 45 % r. F.. Für die Wohnraumnutzung (normale Feuchtelast) schwankt der Verlauf um den Jahresmittelwert von 50 % r. F. mit einer Amplitude von $\pm 10\%$ r. F.. Bei Küchen und Bädern, also Räumen mit einer hohen Feuchtelast liegt der Mittelwert bei 55%r.F., die Amplitude bei $\pm 5\%$ r. F. [103, 104].

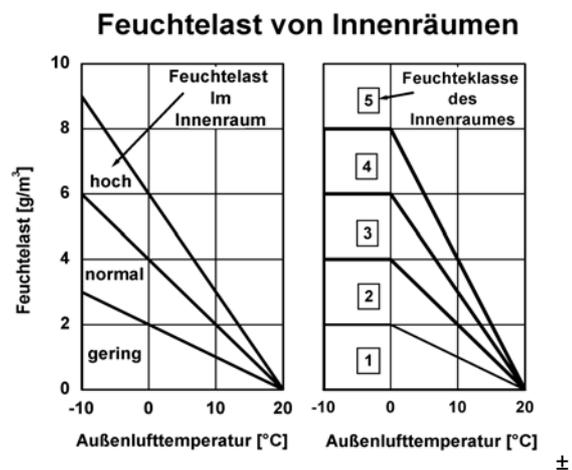


Bild 7: Feuchtelastbereiche in beheizten, nicht klimatisierten Räumen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

Links: Nach Messungen von Künzel [103]. Eine geringe Feuchtelast entspricht einer Nutzung als Büroraum, eine normale Feuchtelast einer Wohnraumnutzung und eine hohe Feuchtelast einer Nutzung als „Feuchtraum“ (z.B. Küche oder Bad).

Rechts: Nach DIN EN ISO 13788 [31]. Die Nutzung ist als Klasse definiert:

- 1: Lagergebäude
- 2: Büros, Läden
- 3: Wohnungen mit niedriger Belegung
- 4: Wohnung mit hoher Belegung, Sporthallen, Küchen, Kantinen, Gebäude mit Gasthermen
- 5: Spezialgebäude wie Brauereien, Schwimmhallen, etc.

Eine ähnliche Einteilung findet sich auch in der DIN EN ISO 13788 [31]. Die dortigen Angaben basieren vor allem auf Ergebnissen einer skandinavischen Studie. Wie in **Bild 7** zu erkennen ist, weichen die Grenzen der einzelnen Klassen und deren Verlauf unterhalb von 0 °C voneinander ab. So ergibt sich zum Beispiel eine maximale Feuchtelast für einen normalgenutzten Wohnraum bei einer durchschnittlichen Monatsaußenlufttemperatur von 10 °C nach Künzel von 2 g/m³, nach DIN EN ISO 13788 von 3 g/m³ (entspricht einer hohen Feuchtelast bei Künzel). Dies mag mit den unterschiedlichen Bauweisen und klimabedingten Lüftungsgepflogenheiten zu erklären sein und könnte bei sicherer Auslegung der Feuchteberechnung (höhere Innenraumluftfeuchte bedeutet in der Regel auch höhere Feuchte in der Konstruktion) als zukünftiger Ansatz gerechtfertigt sein. Fraglich ist allerdings der Verlauf bei Temperaturen unter 0 °C. Außerdem sind diese Verhältnisse nicht ohne weiteres auf andere Klimaregionen in Europa, vor allem in Südeuropa, zu übertragen [37].

Zwar liegen mehr Innenraumtemperaturmessungen als Feuchtemessungen vor, trotzdem fehlt im Gegensatz zur Feuchte noch die genaue Beschreibung des Jahresverlaufes für die Innenraumtemperatur in der Norm. Analog zur Feuchte kann man für den Jahresverlauf eine Sinusfunktion definieren. Die Amplitude bewegt sich im Behaglichkeitsbereich ca. zwischen 20 und 22 °C. Das Maximum tritt im Gegensatz zu dem beobachteten Verlauf der Raumluftfeuchte bereits im Juni auf [103].

2.3.3 Wärme- und Feuchteübergang

Durch Randbedingungen erster, zweiter und dritter Art lässt sich der Wärme- und Feuchteausaustausch eines Bauteils mit seiner Umgebung beschreiben. Das Außenklima, mit Ausnahme der Situation im Erdreich (Randbedingungen erster Art), und das Raumklima wirken über eine Grenzschicht auf die Bauteiloberfläche ein. Diese Grenzschicht stellt einen strömungsabhängigen Widerstand für den Wärme- und Feuchtetransport dar, der durch entsprechende Übergangskoeffizienten quantifiziert wird (Randbedingung dritter Art). Der Wärmeaustausch an der Oberfläche aufgrund von Konvektion und langwelliger Strahlung wird in der Bauphysik mit einem einzigen Wärmeübergangskoeffizienten (Summe aus beiden Anteilen) berücksichtigt [112]. Vor allem der konvektive Anteil hängt von den lokalen Strömungsverhältnissen, der Bauteilgeometrie und der Außenlufttemperatur ab und wird für energetische Berechnungen vereinfacht als konstant angenommen. Künzel schlägt, abweichend von den Werten in DIN 4108, folgende Werte vor [99]:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{außen}} &= & 17 & \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \\ \alpha_{\text{innen}} &= & 8 & \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})\end{aligned}$$

Der Wert für die raumseitige Bauteiloberfläche stimmt für ungestörte Wände und bei homogener

Raumlufttemperatur mit dem aus DIN 4108 [19] überein, der Wert für die außenliegende Bauteiloberfläche ist hingegen um fast 30 % niedriger. Begründet wird dies dadurch, dass für hiesige Klimaverhältnisse (mittlere Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s in Deutschland) der konvektive Anteil nur mit 10 W/(m²K) [135] zu berücksichtigen sei. Nur bei stark exponierten Bauteilen oder in großer Höhe sind höhere Werte gerechtfertigt. In der Regel ist eine detaillierte Berücksichtigung der spezifischen Konvektionseinflüsse am Bauteil nicht erforderlich, da die äußeren Übergangswiderstände im Vergleich zu den Widerständen der einzelnen Materialschichten relativ klein sind.

In den Wärmeübergangskoeffizienten ist auch ein Anteil enthalten, der den langwelligen Strahlungsaustausch mitberücksichtigt. Dieser Ansatz ist jedoch nur gültig solange der konvektive und der strahlungsbedingte Wärmefluss gleichgerichtet sind. Bei nächtlicher Unterkühlung hochgedämmter Bauteile ist dies nicht mehr der Fall. Für Berechnungen der nächtlichen Betauung von Bauteilen ist deshalb eine separate Anpassung des konvektiven Übergangs und der langwelligen Emission notwendig.

Da die klimatischen Randbedingungen nicht nur den Wärme-, sondern auch den Feuchteübergang beeinflussen, erfolgt dessen Behandlung analog. Zwischen dem Wasserdampfübergangskoeffizienten β_p und dem konvektiven Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten besteht ein linearer Zusammenhang [66, 138]. Daraus ergeben sich für die Feuchteübergangskoeffizienten 75 · 10⁻⁹ kg/(m²sPa) (außen) bzw. 25 · 10⁻⁹ kg/(m²sPa) (innen).

Für die Einwirkung von Schlagregen auf Fassaden ist die Einführung eines Regenabsorptionsgrades sinnvoll, da nur ein Teil des ankommenden Regenwassers an der Oberfläche „hängen“ bleibt. Der Rest spritzt beim Auftreffen auf die Fassade wieder weg oder läuft an der Oberfläche ab. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass für den Regenwasserabsorptionsgrad von vertikalen Flächen in der Regel der Wert 0,7 angesetzt werden kann. Für horizontale Flächen beträgt der Wert gewöhnlich 1.

2.3.4 Absorptions- und Emissionsgrade für Strahlung

Die Einwirkungen von Sonnenstrahlung auf ein Bauteil lassen sich am besten durch Wärmequellen beschreiben. Mit Hilfe eines von der Oberflächenfarbe abhängigen Energieabsorptionsgrades wird der Tatsache Rechnung getragen, daß nur ein Teil der auf das Bauteil auftreffenden kurzwelligen Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Dieser Absorptionsgrad beträgt ca. 0,4 für helle Oberflächen (z.B. weiße Außenputze) und zwischen 0,6 und 0,8 für dunklere Oberflächen, wie z.B. gestrichenes Holz, Klinker, Dachziegel und Bitumenbahnen.

2.3.5 Hygrothermische Ausgangszustände

Zu Beginn einer Berechnung müssen die Anfangsbedingungen für die Feuchte und Temperatur vorgegeben werden. Da sich die Temperaturverteilungen viel schneller als die Feuchteverhältnisse einstellen, reicht in der Regel die Vorgabe einer einheitlichen Anfangstemperatur. Die Anfangsfeuchte in den betrachteten Bauteilschichten muss genauer vorgegeben werden. Kann zu Beginn der Berechnung von „lufttrockenem“ Zustand ausgegangen werden, wird für alle Bauteilschichten die Sorptionsfeuchte bei 80 % r. F. angesetzt. Für langfristige Betrachtungen kann als Anfangsbedingung auch der eingeschwungene Zustand eines Bauteils unter den gegebenen Klimabedingungen verwendet werden. In diesem Fall werden die Berechnungen über mehrere Jahreszyklen mit demselben Klimadatenatz durchgeführt, bis sich von einem Zyklus zum nächsten keine Änderungen im Feuchteprofil zu einem bestimmten Stichtag mehr ergeben. Bei der Vorgabe der Anfangsfeuchte ist außerdem darauf zu achten, dass der chemisch gebundene Teil (z.B. Kristallwasser oder Hydratationswasser) nicht hinzugerechnet wird. Genaue Angaben zu typischen baufeuchten Zuständen fehlen bis dato leider meistens. Beim Einbau wird der Mauerwerksstein u.a. sowohl durch Flüssigkeit, die er dem Mörtel entzieht, als auch durch kaum zu vermeidende Witterungseinflüsse feucht. Bei Ziegel- und Kalksandsteinmauerwerken geht man im allgemeinen von ca. 10 bis 12 Vol.-%, bei Leichtelementen aus Porenbeton von ca. 18-22 Vol.-% aus.

2.4 Unsicherheiten bei der Bestimmung der Stoffkennwerte

In der Regel sind für die instationäre Berechnung der Temperaturfelder folgende Stoffkennwerte erforderlich:

- Trockenrohddichte ρ
- spezifische Wärmekapazität c
- Wärmeleitfähigkeit λ .

Falls der Einfluss der Materialfeuchte auf den Wärmedurchgangskoeffizienten quantifiziert werden soll, muss die Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes angegeben werden.

Die feuchtetechnischen Kennwerte, die für alle Baustoffe, also auch für nicht hygroskopische Materialien, vorhanden sein müssen, sind:

- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ -Wert)
- Porosität ε (entspricht dem maximal möglichen Wassergehalt u_{\max}).

Soll das Verhalten von hygroskopischen, kapillaraktiven Baustoffen korrekt erfaßt werden, sind außerdem noch die bereits in **Bild 1** gezeigte Feuchte-

speicherfunktion und die in **Bild 3** dargestellten, feuchteabhängigen Flüssigtransportkoeffizienten erforderlich. Bei diesen Koeffizienten hat sich die prozessabhängige Differenzierung als vorteilhaft erwiesen. Das hängt damit zusammen, dass der Befeuchtungsvorgang von mineralischen Baustoffen in Kontakt mit Wasser schneller abläuft als die kapillare Weiterverteilung bzw. Trocknung nach Unterbrechung der Wasserzufuhr.

Viele der Materialkennwerte sind heute in Datenbanken oder Tabellenwerken zusammengetragen [55, 91, 110]. Die Bestimmung einiger Materialparameter ist, wie zum Beispiel bei der Wärmeleitfähigkeit und der Diffusionswiderstandszahl, in entsprechenden nationalen bzw. internationalen Normen geregelt. Für andere Parameter sind in den letzten Jahren neue Meßmethoden entwickelt worden [u.a. 83, 124]. Diese sind zum Teil zeitintensiv und mit erheblichem Messaufwand verbunden. Ein vollständiger Satz an Messvorschriften für die Bestimmung aller Transportkoeffizienten existiert bis heute nicht.

Im folgenden soll kurz gezeigt werden, wie die einzelnen Parameter heute üblicherweise bestimmt werden und welche Unsicherheiten zu erwarten sind. Die hier angegebenen Werte für die Unsicherheiten ergeben sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Ungenauigkeitsquellen (z.B.: Materialinhomogenitäten, Produktionsstreuungen, Messunsicherheiten). Es sind zum Teil Erfahrungswerte von zertifizierten Labors. Eingeflossen sind zusätzlich die in den Normen angegebenen Unsicherheiten, wenn möglich aus einer Fehlerfortpflanzungsrechnung.

2.4.1 Grundkennwerte

Das Verfahren zur Bestimmung der Rohddichte ist in DIN 51065-1 [23] und DIN 52102 [24] beschrieben. Die Bestimmung der Rohddichte von Mörteln erfolgt nach DIN 18555-3 [21]. Demnach werden von einer trockenen Probe das Volumen geometrisch und die Masse gravimetrisch bestimmt. Ist die geometrische Form zu komplex, bestimmt man das Volumen nach dem Archimedes-Prinzip. Voraussetzung dafür ist, dass die Probe bereits mit Wasser gesättigt ist oder gegen das Eindringen von Wasser zuverlässig geschützt werden kann und das Material unter Wassereinfluss weder quillt noch schwindet. Messunsicherheiten werden nicht angegeben. In der Praxis sind Schwankungen bis zu ± 15 % keine Seltenheit. Bei auffallend inhomogenen Materialien, wie zum Beispiel Ziegel, sind die Schwankungsbreiten noch ausgeprägter.

Die Bestimmung der Porosität, d.h. die Ermittlung des Porenvolumens im Vergleich zum Gesamtvolumen, wird in der Regel mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt. Man gewinnt sie zum einen direkt aus der maximalen Wassersättigung, zum anderen durch Bestimmung der Reindichte (reine Materialdichte, ohne Luftporen) mit Hilfe der He-

liumpyknometrie. Beide Methoden liefern in der Regel vergleichbare Ergebnisse. Auch hier sind Schwankungen von ca. $\pm 10\%$ üblich.

Die Bestimmung der freien Wasseraufnahmefähigkeit erfolgt nach DIN 52103 [25] und DIN 51056 [22]. Dazu wird eine trockene Probe von allen Seiten her in drucklosen Kontakt mit Wasser gebracht. Die Probe bleibt solange unter Wasser, bis keine zeitliche Veränderung der Masse mehr zu beobachten ist. Zur Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme werden die Proben in einem Druckbehälter bis zum Erreichen der Massenkonstanz unter Wasser gelagert. In diesem Druckgefäß wird ein Vakuum erzeugt. Durch das von außen angelegte Vakuum können die noch verbliebenen Poren gefüllt werden. Eine wesentliche Fehlerquelle ist zum Beispiel die Festlegung des gesättigten Zustandes, denn die in den geschlossenen Poren eingelagerte Luft wird durch Diffusions- bzw. Lösungsprozesse ständig weniger und verändert somit das Ergebnis. Bei einigen Materialien sind Schwankungen bis zu $\pm 15\%$ beobachtbar.

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit erfolgt nach DIN 52615 [26], prEN ISO12572 [125] oder nach der ASTM-Richtlinie ASTM E96-00 [2]. Der Massenstrom in Richtung der niedrigeren relativen Feuchte wird unter isothermen Bedingungen nach Gleichung (3) ermittelt und daraus dann die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ bestimmt. Da im Sorptionsfeuchtebereich über 50 % relativer Luftfeuchte der kapillare Feuchtestrom bei feinporigen mineralischen Baustoffen einen nicht vernachlässigbaren Beitrag liefert, und da das im Porenraum vorhandene Wasser eine Verringerung des Diffusionsweges und damit eine Verringerung der effektiven Diffusionswiderstandszahl bewirkt, sollte zur Bestimmung des μ -Wertes bei diesen Materialien der Bereich 3 % bis 50 % relative Luftfeuchte (dry-cup-Verfahren) verwendet werden [83]. Eine Anzahl von Ringversuchen mit Vergleichsmessungen verschiedener Laboratorien ist auf nationaler und internationaler Ebene dazu durchgeführt worden [92, 149]. Einflüsse auf die Messunsicherheit ergeben sich z.B. aus

- der Bestimmung der Probendimension (Oberfläche und Dicke)
- der Abdichtung (zum Erzielen 1-dim. Verhältnisse)
- der Wägegenauigkeit
- dem Luftspalt im Prüfgefäß
- der Regelung der Klimarandbedingungen
- dem Handling bei der Prüfung (Prüfpersonal)

Burch und Desjarlais [11] leiten in ihren Untersuchungen die Unsicherheit aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ab und geben eine Genauigkeit von ± 5 bis 25 % für Diffusionsmessungen an. Wobei der größere Wert dadurch zu erklären ist, dass bei bestimmten Materialien sich schon kleine Unge-

naugigkeiten bedingt durch den Luftspalt zwischen Probe und Sorbens deutlich auf den μ -Wert auswirken. Das genormte Messverfahren legt für besonders diffusionsoffene Stoffe, wie z.B. einige Dachunterspannbahnen, den kleinsten bestimmbaren s_d -Wert auf 0,1 m fest. Für solche Stoffe sind genauere Meßmethoden erforderlich [89].

2.4.2 Feuchtespeicherfunktion

Bei der Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden. Für beide Bereiche existieren unterschiedliche Messmethoden. Im Sorptionsfeuchtebereich gibt es ein allgemein angewandtes einfaches Verfahren (vgl. DIN EN ISO 12571 [28]). Die Probe wird in einem über einer Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschranks eingestellten Klimas gelagert; der Ausgleichsfeuchtegehalt wird durch Wiegen der Probe ermittelt. Dieses Verfahren ist heute möglich für relative Luftfeuchten zwischen ca. 3 % und 95 %. Durch Erhöhen der relativen Luftfeuchte erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Die obere Grenze des Messbereichs liegt bei ca. 95 % r. F., da eine höhere Luftfeuchte wegen der Regelungscharakteristika der meisten Klimakammern zur Betauung der Proben führen würde. Die Meßunsicherheiten ergeben sich hier im wesentlichen aus der Genauigkeit der Waage und den Schwankungen der Klimarandbedingungen (Temperatur $\pm 0,5\text{ °C}$, relative Luftfeuchte $\pm 2\%$). Neben den systematischen Fehlern sind aufgrund der produktionsbedingten Materialschwankungen Feuchteunterschiede in der Größenordnung von ca. $\pm 20\%$ wahrscheinlich [94].

Ein anderes Problem bei der Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion im hygrokopischen Bereich ist die Zuordnung des nach 28 Tagen (Norm) Trockenbezugsgewichts. Vor allem bei „jungen“ Materialien wie Putzen, Estrichen oder Betonen, findet während des Messzeitraums ein ständiger Alterungsprozess statt. Die Messung wird dann entweder durch die noch nicht abgeschlossene Hydratation oder durch Carbonatisierungsprozesse verfälscht. Untersuchungen an relativ leichten Grund- und Sanierputzen ergaben je nach Wahl des Trockengewichtes (vor bzw. nach Abschluss der Sorptionsmessung) einen Unterschied von fast 100 % [90].

Im sog. überhygrokopischen Bereich zwischen 95 % r. F. bis zur freien Wassersättigung wird im allgemeinen auf die in [83] beschriebene Saugspannungsmessung zurückgegriffen. Bei dieser Meßmethode werden Baustoffproben zunächst durch Wasserlagerung frei (d.h. drucklos) gesättigt. Anschließend wird das Wasser in mehreren Druckstufen bis maximal 100 bar entfernt, wobei sich bei jeder Druckstufe ein Gleichgewichtswassergehalt einstellt. Die Auswertung dieser Messung ergibt eine überhygrokopische Feuchtespeicherfunktion, die an die

klassische Sorptionsisotherme anschließt (vgl. **Bild 1**). Gemessen wird in der Regel der Wassergehalt in Masseprozent, der dann mit Hilfe der Trockenrohichte des Materials wie üblich in Volumenprozent umgerechnet werden kann. Folgende Fehlerquellen sind bei der Bestimmung der Saugspannungskurve möglich:

a) Gewichtsverlust beim Wägen

Nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes müssen alle Proben (in der Regel etwa 10 bis 30 Stück) gewogen werden, was eine nicht zu unterschätzende Wägezeit bedeutet, in der die Proben durch Verdunstung Wasser verlieren können. Bei Messungen hat sich gezeigt, dass innerhalb der Zeit eines Wägedurchgangs (abhängig von Material und Druckstufe) zwischen 5 und 10 mg Wasser verdunsten.

b) zu kurze Messzeit

Wird eine Messung beendet, bevor sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, erhält man zu hohe Wassergehalte bei der betreffenden Druckstufe.

c) Änderung von Umgebungsbedingungen

Geringfügige Temperaturschwankungen in relativ konstant temperierten Laborräumen sind in ihrem Einfluss auf das Messergebnis zu vernachlässigen. Genauso sind die durch unterschiedliche Wetterlagen hervorgerufenen Luftdruckschwankungen im Vergleich zu den aufgetragenen Überdrücken so gering, dass kein nennenswerter Einfluss auf das Messergebnis zu erwarten ist.

d) falsche Anfangsfeuchte

Wird anstatt der freien Wassersättigung von vakuumgesättigten Proben ausgegangen, ergeben sich höhere Ausgangsfeuchten. Es sollte aber nur der Porenraum erfasst werden, in dem unter natürlichen Randbedingungen der Feuchtetransport stattfindet. Deshalb ist als Startfeuchte die freie Wassersättigung anzusetzen.

Im Rahmen eines Ringversuchs, an dem vier Prüfinstitute aus Europa teilgenommen haben, wurde eine Standardabweichung für die Wiederholbarkeit mit 0,2 Vol.-% und für die Reproduzierbarkeit mit 1,0 Vol.-% ermittelt [49, 50]. Da poröse Baustoffe aber bekanntermaßen bezüglich ihrer Stoffeigenschaften immer eine gewisse Streubreite aufweisen, ist einschließlich der erwähnten Fehlermöglichkeiten von einer Messunsicherheit von ca. $\pm 15\%$ auszugehen.

Eine andere Methode zur Bestimmung der überhygroscopischen Feuchteigenschaften besteht in der Integration der Porenradienverteilung, die in der Regel durch das relativ schnelle Messverfahren der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt wird. Da aber mit dieser Meßmethode im Gegensatz zur Saugspannungsmessung stets der gesamte und nicht nur der am Flüssigtransport beteiligte Porenraum erfasst wird, muss eine Anpassung der Messergebnisse durchgeführt werden [88].

2.4.3 Flüssigtransportkoeffizienten

Die experimentellen Ergebnisse bei der Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten zeigen, dass diese Kenngrößen stark vom Wassergehalt abhängen. Dies hängt damit zusammen, dass mit steigendem Wassergehalt der Transport von Wasser auch in größeren gefüllten Porenräumen erfolgt. Dadurch ergibt sich bei gleicher Saugspannungsdifferenz aufgrund des geringeren Widerstandes ein größerer Transport. Dieser Transport ist, bedingt durch den Einfluss der Viskosität und der Oberflächenspannung von Wasser, leicht temperaturabhängig.

Der Kapillartransportkoeffizient nach Gleichung (3) ergibt sich aus dem Massenstrom des Wassers und dem für den Transport verantwortlichen Potentialgradienten. Zu dessen Berechnung muss die Potentialverteilung experimentell bestimmt werden. Dies geschieht durch Aufnahme der zeitlichen Änderung der Feuchteprofile auf direktem oder indirektem Weg. Es ist dabei ein Feuchtemessverfahren mit relativ hoher örtlicher Auflösung einzusetzen. Wie diffizil die Stofffeuchtemessung ist, wird an der großen Anzahl der verschiedenen Meßmethoden ersichtlich [z.B. 17, 38, 83, 121, 124]. Eine gute Übersicht über die physikalischen Grundlagen, die Grenzen der Anwendung sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden wird in [6, 43, 65, 83] gegeben. Die Ergebnisse eines durchgeführten Ringversuches [36] zeigen erfreulicherweise, dass alle teilnehmenden Laboratorien trotz Anwendung unterschiedlicher Mess- und Auswertemethoden ähnliche Ergebnisse erzielen. Dabei sind Schwankungen von $\pm 30\%$ beobachtbar, die sich aber nicht auf die hygrothermische Analyse auswirken, denn die ebenfalls durchgeführte w-Wert-Bestimmung konnte korrekt nachgerechnet werden [53]. Zu gleichen Ergebnissen kommen auch die im Rahmen eines europäischen Projektes durchgeführten Messungen [36].

Folgende Fehlerquellen sind bei der Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten möglich:

a) zu lange Messzeit bei der Messung der Profile

Während der Bestimmung der Feuchteprofile wird die Wasserzufuhr bei einigen Verfahren unterbrochen. Während des Messvorganges für einen Zeitpunkt kann sich daher unter Umständen die Feuchteverteilung im Probeninneren verändern.

b) unzureichende Ortsauflösung

Dies kann sich gerade bei steilen Feuchtegradienten auf die daraus errechneten Flüssigtransportkoeffizienten auswirken. In der Nähe der freien Wassersättigung hingegen sind die Flüssigtransportkoeffizienten in der Regel hoch. Kleine Fehler in der Bestimmung der in diesem Feuchtebereich geringen Gradienten führen schon zu relativ großen Abweichungen in den daraus ermittelten Koeffizienten [82].

c) das Messverfahren

Die Wahl des Messverfahrens wirkt sich, bedingt durch die Messdauer und die Genauigkeit der Wassergehaltsbestimmung, direkt auf die Güte der Transportkoeffizienten aus.

2.5 Bisherige stochastische Ansätze hygrothermischer Modelle

Die durchgeführte Erhebung [53] der bis dato bekannten WF-Modelle beinhaltet die Ergebnisse verschiedener Berechnungen, durchgeführt mit 9 Modellen. Jedes der teilnehmenden Institute kannte die Eingabedaten, also Klimadaten, Konstruktionsaufbau und Materialparameter. Zusätzlich konnten die Materialeigenschaften an eigens dafür hergestellten Proben selber gemessen werden. Vergleicht man die einzelnen Resultate miteinander, so ergibt sich bei allen Fällen derselbe Trend mit unterschiedlichen Abweichungen.

Nachdem mit den bisherigen Modellen bei den Vergleichen zwischen Rechnungen und genau dokumentierten Experimenten eine immer bessere Übereinstimmung erzielt wird, sind Fragen der erzielbaren Genauigkeit der Ergebnisse und der Wichtigkeit der Eingabedaten derzeit von steigendem Interesse. Bisherige Ansätze der Sensitivitätsanalyse fokussierten sich fast ausschließlich auf einfache Glaserberechnungen bzw. Leichtkonstruktionen. Einfache Parametervariationen zur Studie der singulären Sensitivität verschiedener Eingabeparameter bei gekoppelten Vorgängen, insbesondere unter Einbeziehung des Flüssigtransportes, sind u.a. von Krus und Künzel [86] und Bednar [4, 5] durchgeführt worden. Stochastische Ansätze sind bisher fast ausschließlich für energetische Berechnungen bekannt [u.a. 56, 113].

Nielsen [119] versucht mit Hilfe eines einfachen stochastischen Konzeptes das Tauwasserrisiko in Wandkonstruktionen zu ermitteln, wobei er sich allerdings ausschließlich auf einfache Glaser-Berechnungen beschränkt. Geving [44] hat zahlreiche Parameterstudien und Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Programmen durchgeführt. Mit Hilfe der Monte Carlo Analyse und dem Programm 1d-HAM simuliert er für eine Leichtkonstruktion die hygrothermischen Verhältnisse und ermittelt so die kritischen Bedingungen für Schimmelpilzwachstum. Allerdings beschränkt er sich auf reine Diffusionsberechnungen (1d-HAM) mit stark vereinfachten Materialparametern. Aufgrund der damaligen Rechnerkapazitäten beruhen seine Ergebnisse nur auf 60 Einzelrechnungen, bei denen alle Eingabedaten unkorreliert, aber gleichzeitig variiert wurden. Ferner hebt er hervor, dass sich der Benutzer Gedanken über die Genauigkeit seiner Eingabedaten machen müsse, und schlägt einen Leitfaden zur Vorgehensweise bei hygrothermischen Berechnungen vor. Nur Salonvaara und Karagiozis haben in ihr Modell (LATENITE) für Materialparameter einen

einfachen Monte Carlo Zufallsgenerator implementiert; sie verwendeten diesen bisher nur einmal zur Studie des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand, wobei sie nur die Wärmeleitfähigkeit, den μ -Wert und die Flüssigtransportkoeffizienten variierten [131].

3. Grenzen und Einschränkungen hygrothermischer Modelle

Durch umfassende und gut dokumentierte Labor- und Freilandversuche sind hygrothermische Modelle validiert worden. In den meisten Fällen kann eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung beobachtet werden, nur gelegentlich weicht das tatsächliche Verhalten vom errechneten ab. Gründe dafür können sein, daß die Berechnung nicht ausreichend genau ist oder, daß die tatsächlich beobachteten Vorgänge vom hygrothermischen Modell nicht vollständig physikalisch erfaßt werden. Hygrothermische Modelle sind, wie jedes Modell, immer eine vereinfachende, häufig zusammenfassende und in der Regel zumindest in Details unvollständige Darstellung bestimmter physikalischer Gegebenheiten. Mögliche Grenzen und Einschränkungen sind bei der Ermittlung der Genauigkeit hygrothermischer Modelle vorab zu untersuchen und zu erfassen.

Grundlegende Annahmen aller hygrothermischen Modelle sind unter anderem, dass die Baustoffe ihre Materialeigenschaften während des Beobachtungszeitraumes nicht verändern und nicht mit anderen Materialien, wie etwa Salzen, belastet sind. Zusätzlich wird immer vorausgesetzt, dass es beim Kontakt zweier Baustoffe zu keinen Veränderungen innerhalb der beiden Materialstrukturen kommt. Im folgenden wird kurz auf eigene Beobachtungen eingegangen. Sie sind bewusst ausgewählt worden, um beispielhaft zu zeigen, dass eine Anwendung der bisherigen hygrothermischen Modelle auch bei solchen Grenzfällen möglich ist, dafür aber zusätzliche Modellannahmen getroffen werden müssen. Diese Annahmen sind rein deterministischer Art und könnten deshalb auch später in eine stochastische Unsicherheitsanalyse einfließen. Die Stochastik kann hier sogar helfen, die Gültigkeit der zusätzlichen Annahmen zu überprüfen, indem durch eine Unsicherheitsabschätzung der Einfluss anderer Parameter eruiert wird. Sind zum Beispiel Informationen über das zeitveränderliche Materialverhalten bekannt, dann müssen diese in einen stochastischen Ansatz mit eingebunden werden. Analoges gilt natürlich auch für die Quantifizierung der hier angesprochenen Widerstandsschichten bei Systemen aus Putz und Mauerwerksteinen. Allerdings steht die Bauphysik hier erst am Anfang, denn weiterreichende Erkenntnisse sind derzeit noch Gegenstand der Forschungsarbeit.

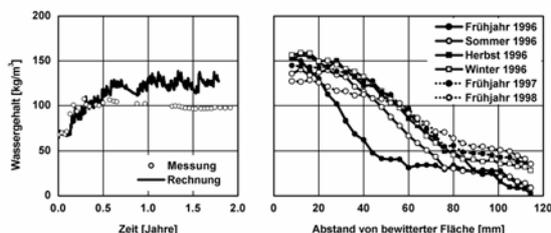


Bild 8: Hygrothermisches Verhalten eines 1 cm dicken, nach Westen orientierten Betonprismas, nach [63].

Links: Gemessener und berechneter Feuchteverlauf während des gesamten Zeitraumes von 2 Jahren.

Rechts: Mit Hilfe einer NMR-Anlage gemessene Feuchteprofile zu verschiedenen Zeitpunkten während des gesamten Beobachtungszeitraumes. Da im hinteren Teil (tiefer 12 cm) der Probe nur sehr geringe Wassergehalte gemessen werden, werden diese zur besseren Übersicht hier nicht dargestellt

Nach ca. einem halben Jahr kommt es zu einer scheinbaren „Selbstabdichtung“. Dieses anormale Verhalten wird in den bisherigen hygrothermischen Modellen nicht berücksichtigt.

3.1 Quellfähige Baustoffe – Feuchteverhalten von Beton

Besonders tonhaltige Baustoffe, Betone aber auch Holz, nehmen bei Befeuchtung Wasser in ihr Festkörperskelett auf und können es bei anschließender Trocknung wieder abgeben. Die damit verbundene Veränderung des Porenraumes führt zu einer Änderung des Materialverhaltens während der Be- und Entfeuchtungsvorgänge.

Führt man z.B. Feuchteberechnungen für ein 15 cm dickes, nach Westen orientiertes Betonprisma mit den im Labor ermittelten Materialkennwerten durch, so erzielt man für die ersten sechs Monate eine gute Übereinstimmung zwischen den rechnerisch und experimentell bestimmten Feuchteprofilen und dem mittleren Feuchteverlauf (**Bild 8** links). Setzt man allerdings die Beobachtung über die ersten sechs Monate hinaus fort, so ist ein, aus feuchte-technischer Sicht ungewöhnliches Verhalten auffällig. Die den Holzkirchener Witterungsbedingungen ausgesetzten Proben verhalten sich träge hinsichtlich Klimaeinflüssen. Der gemessene mittlere Wassergehalt verändert sich kaum mit den äußeren Bedingungen und bleibt konstant auf ca. 100 kg/m^3 . Der berechnete Verlauf weicht vom gemessenen ab und nimmt weiterhin zu. Ein ähnliches Verhalten ist bei den Feuchteprofilen zu beobachten. Diese sind

für verschiedene Zeitpunkte während des gesamten Beobachtungszeitraumes aus **Bild 8** (rechts) zu entnehmen. Hier kommt es zu einem scheinbaren Stillstand der Feuchteverteilung. Man kann fast von einer scheinbaren „Selbstabdichtung“ des Betons sprechen. Ähnliches Verhalten ist auch bei anderen Betonsorten zu beobachten [63]. Hier stoßen bisherige hygrothermische Modelle an ihre Grenzen und müssen vermutlich um weitere physikalische Transport- und Speicherphänomene erweitert werden. Das beobachtete Verhalten ist derzeit Gegenstand intensivster Forschungsarbeit.

Beobachtungen von Sosoro [143] über des Aufsaugverhaltens von Betonproben mit reinem Wasser und mit Ca(OH) -Lösung zeigen, dass nur die Prüfkörper im Kontakt mit der Lösung dem Kapillargesetz, also lineare Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit, folgen. Beim kapillaren Saugen des reinen Wassers nimmt das Aufnahmevermögen der Betonprobe kontinuierlich mit der Zeit ab. Nach [48] verhält sich flüssiges Wasser in den extrem kleinen Gelporen des Zementsteins wie ein „Bingham-Medium“ und führt so zu einem „anormalen“ Verhalten des Betons. Das bedeutet, dass bei Unterschreitung einer Mindestströmungsgeschwindigkeit eine Verfestigung der Flüssigkeit eintritt, die schließlich zum Stillstand führt. Messungen an einem, von der Porenradialverteilung mit Zementstein vergleichbaren Material (Poröses Glas) ergeben dagegen ein Wasseraufnahmeverhalten entsprechend dem \sqrt{t} -Gesetz [85, 152]. Auch der Versuch einer Erklärung durch Ablagerungsvorgänge kann entkräftet werden, indem man die kapillaren Wasseraufnahmeversuche mehrfach wiederholt. Es zeigt sich, dass das Wasseraufnahmeverhalten des Betons nahezu unverändert bleibt.

Zur weiteren Klärung wird an einer Freibewitterungsprobe, mit einer „scheinbar“ unveränderbaren Feuchtefront, das kapillare Wasseraufnahmeverhalten über die etwa zwei Jahre bewitterte Fläche gemessen. Die mit Hilfe der NMR-Anlage gewonnene zeitliche Entwicklung der Feuchteprofile ist in **Bild 9** oben dargestellt. Der Beton füllt sich nur langsam mit Wasser und die Feuchtefront wandert nicht wesentlich weiter in das Probeninnere hinein. Nach über 450 Stunden sind nur die ersten 50 mm der Probe gesättigt. Der Beton hat sich anscheinend selber „abgedichtet“. Führt man anschließend den gleichen Versuch an der selben Probe anschließend über die Rückseite durch, so müsste man erwarten, dass an der gleichen Stelle wie bei der vorderseitigen Wasseraufnahme keine Feuchteanreicherung möglich ist. Die gemessenen Feuchteprofile (**Bild 9** unten) zeigen aber, dass schon nach ca. 50 Stunden die Probe fast komplett durchfeuchtet ist. In [63] wird die einseitige gemessene Absperrwirkung eines bewitterten Betons beim kapillaren Saugen durch ein modellhafte Verengung der Kapillarporen erklärt. Dieses Modell wird derzeit durch weitere Messungen überprüft.

Das experimentelle Beispiel eines stark schlagregenexponierten Betonaußenbauteiles hat gezeigt, dass das hygrothermische Anfangsverhalten gegenwärtig schon recht gut mit den derzeitigen Berechnungsmodellen nachvollziehbar ist. Erst bei der rechnerischen Beurteilung des langfristigen Verhaltens stoßen die Modelle an ihre Grenzen. Hier werden in Zukunft bisher noch unbekannte Modellerweiterungen zur Beschreibung des Flüssigtransportes notwendig.

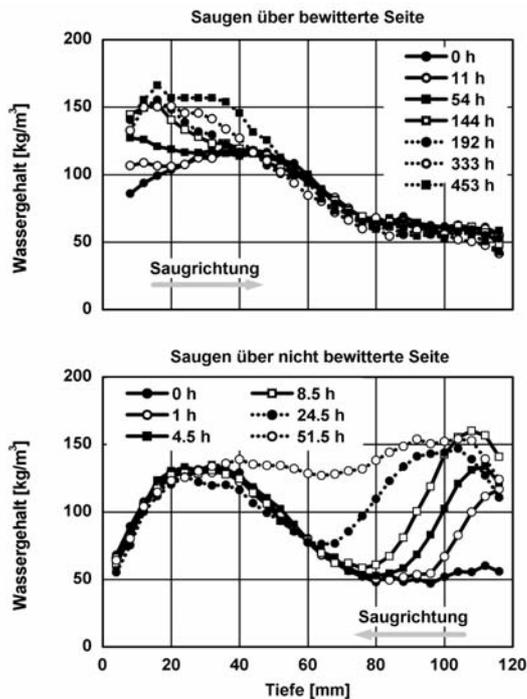


Bild 9: Entwicklung der Feuchteprofile für die kapillare Wasseraufnahme über beide Oberflächen einer einseitig bewitterten Betonprobe im Anschluß an eine zweijährige Bewitterung im Freiland, nach [63].

Oben: über die bewitterte Fläche

Unten: über die Rückseite des Betonprismas.

Bei der kapillaren Wasseraufnahme durch die bewitterte Seite füllt sich der Beton nur langsam mit Wasser, die Feuchtestront wandert aber nicht weiter in das Probeninnere hinein. Führt man denselben Versuch an der selben Probe anschließend über die Rückseite durch, so beobachtet man schon nach ca. 50 Stunden eine fast vollständige Durchfeuchtung der Probe.

3.2 Zeitveränderliche Kennwerte

Durch das Einwirken von Frost-Tauwechseln, Luftschadstoffen oder Sonnenlicht und durch fortschreitende Abbindeprozesse wie der Hydratation von Zementen oder durch Ausdiffundieren von Treibgasen

bei Wärmedämmstoffen kommt es zu irreversiblen Veränderungen der Porenraumgeometrie und der Materialeigenschaften und damit zu einer bleibenden Veränderung der Kenngrößen. Beobachtungen aus der Praxis zeigen [45], dass Veränderungen des Außenputzes dazu führen können, dass der Feuchtegehalt nach einiger Zeit wieder ansteigt. Bild 10 oben veranschaulicht den gemessenen Zeitverlauf einer mit Kunstharzputz verputzten Porenbetonwand. Nach dem anfänglichen Trocknen trat wieder eine deutliche Feuchtezunahme auf. Das ursprünglich intakte Verhältnis $w \cdot s_d$ wird im Laufe der Zeit gestört. Bei Berechnungen sind solche Veränderungen der Materialkennwerte zu erfassen. Allerdings gestatten die derzeitigen Berechnungsmodelle es nicht, zeitlich kontinuierlich veränderliche Kennwerte einzugeben. Nur durch eine stufenweise Anpassung kann dieses Verhalten angenähert werden. Der Alterungseinfluss führt zu einer Erhöhung der Transportkoeffizienten für den kapillaren Saugvorgang. Bei den Berechnungen in Bild 10 wird dies so simuliert, als ob sich der w -Wert im Fall 2 innerhalb von fünf Jahren von 0,1 auf $1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ erhöht hätte. Die Ergebnisse aus der Berechnung zeigen, dass nach zwei Jahren die Veränderung des Außenputzes einen solchen Einfluss auf den Gesamtwassergehalt haben, dass das Bauteil nicht weiter austrocknet, sondern sich langsam wieder „aufschaukelt“ und feuchter wird. Es kann zu einer Schädigung kommen. Der s_d -Wert der Beschichtung zeigt in dem zu erwartenden Bereich keinen großen Einfluss [58, 75]. Solche Effekte sind eigentlich bei Untersuchungen der Genauigkeit hygrothermischer Berechnungen mit einzubeziehen doch bis heute fehlen weitreichende Erkenntnisse über die tatsächlichen Alterungsprozesse und deren modellhafte Erfassung.

3.3 Einfluss von Schichtgrenzen

In der Vergangenheit waren viele Bemühungen darauf gerichtet, zunächst einmal die Feuchtetransportvorgänge in einfachen Bauteilen zu verstehen. Daraus entstanden mehrere Transportmodelle, die Schichtkontaktphänomene nur nebenbei behandeln. Da eine Gebäudewand in der Regel aus mehreren kapillaraktiven Baustoffschichten besteht, muss für die Berechnung des Feuchtehaushaltes auch der Feuchtetransport über Materialgrenzen berechnet werden können. Anders als beim Wärmetransport kann nämlich eine Materialgrenze für den Transport von Feuchte einen zusätzlichen Widerstand darstellen. Nur wenige Arbeiten beschäftigten sich mit einer Analyse der Transportvorgänge über Schichtgrenzen hinweg. Erst in letzter Zeit wurden einige Versuche unternommen, die Vorgänge erklären [3, 8, 35, 76]

Allgemein lassen sich für den Schichtkontakt zwei verschiedene Kontaktarten bzw. -qualitäten zwischen Materialien deklarieren:

- Idealer hygrischer Kontakt
- Natürlicher Kontakt

Die Art des Kontaktes hängt von vielen Faktoren ab. Auch kann sich diese mit der Zeit verändern. Die an einer Grenze vorherrschende Art lässt sich meistens nur mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop Aufnahmen analysieren. Im folgenden soll kurz auf die obigen Kontakttypen eingegangen werden [3, 8, 57, 76, 83, 111, 121].

Idealer hygrischer Kontakt

Von einem idealen hygrischen Kontakt spricht man, wenn zwei kapillaraktive Materialien ohne jeglichen kapillaren Übergangswiderstand miteinander verbunden sind. Untersuchungen an in idealem hygrischen Kontakt stehenden Natursandsteinen haben gezeigt, dass das Wasseraufnahmeverhalten der zusammengesetzten Prüfkörper stark abhängig ist

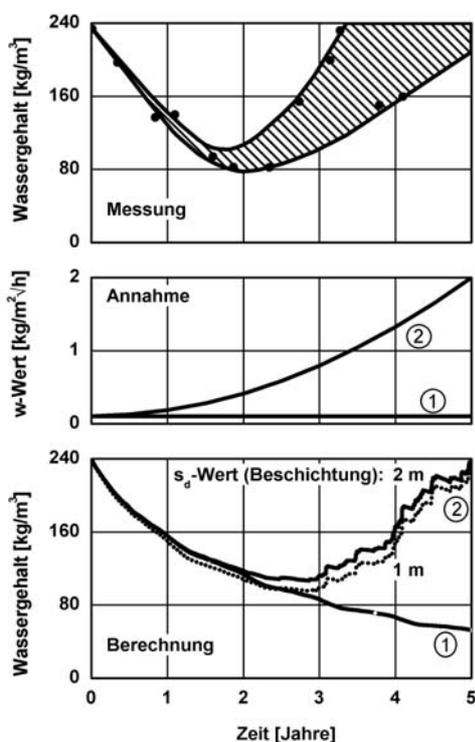


Bild 10: Gemessenes und berechnetes Austrocknungsverhalten einer frei bewitterten Leichtbetonwand mit Beschichtung.

Oben: Gemessener Verlauf des Wassergehalts nach Aufbringen einer Wetterschutzbeschichtung, nach [95].

Mitte: Annahme eines zeitlich konstanten (1) bzw. eines zeitabhängig zunehmenden (2) w -Wertes.

Unten: Berechnete Zeitverläufe des Wassergehaltes im Leichtbetonbauteil mit den Annahmen (1) und (2).

Nach anfänglichem Trocknen tritt nach etwa zwei Jahren wieder eine Feuchtezunahme auf. Diese ist eine Folge, dass das ursprünglich intakte Verhältnis $w \cdot sd$ mit der Zeit gestört wird. Bei der Berechnung sind solche Veränderungen der Materialkennwerte zu berücksichtigen.

von der Reihenfolge der Materialien [57, 76, 83]. So verhält sich zum Beispiel ein aus zwei unterschiedlichen Sandsteinvarietäten mit annähernd gleichen Wasseraufnahmekoeffizienten zusammengesetzter Prüfkörper (idealer Kontakt wird mittels einer Kaolintonschicht gewährleistet) bezüglich des Wasseraufnahmeverhaltens in einer Richtung wie ein monolithisches Material. Bei umgekehrter Reihenfolge ergibt sich dagegen ein anderes Verhalten. Haupteinflussfaktor ist die Charakteristik der beiden Saugspannungskurven.

Natürlicher Kontakt

Dieser entspricht dem häufigsten Fall in der Bauphysik. Die Kontaktfläche zwischen den zwei kapillaraktiven Materialien ist zwar physisch „perfekt“, die Porenstrukturen unterscheiden sich jedoch deutlich. Dies führt dazu, dass der Fluss von einem Material in das andere gehemmt ist. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass beim Aufbringen von Mörteln auf Steine im „grenznahen“ Porenraum des Steines Teile des Mörtelbindemittels auskristallisieren können. Damit verringert sich das Volumen des Porenraumes. Aufgrund der damit verbundenen Einengung der für den Transport zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche entsteht eine Reduktion des Feuchtetransportes. Insbesondere bei Mörteln mit hydraulischen Bindemitteln ist bei Berechnungen des Wassertransportes über die Mörtel/Stein-Grenzen der Kontakteffekt zu berücksichtigen. Eine geeignete Form der Modellierung dieses Widerstandes ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen [3, 8, 18, 57, 153]. Als günstig hat sich hierbei die Einführung von Widerstandsschichten zur Reduzierung des Flüssigtransportes erwiesen [57]. Welche Konsequenzen der Kontakt zwischen Putz und Mauerwerk haben kann, soll anhand der folgenden Beispiele kurz erläutert werden.

In **Bild 11** sind zusammen mit den Messverläufen der Wasseraufnahme für das System Kalkzementputz/Klinker die Ergebnisse der Rechnung als Linie mit eingezeichnet. Für die Probe mit idealem hygrischen Kontakt ergibt sich bei der Berechnung ohne Widerstand eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Der Einfluss des realen Kontaktes zwischen Putz und Stein auf den Feuchtetransport wird durch die angesprochene Einführung einer Widerstandsschicht nachgebildet. Deutlich zu erkennen ist, dass ohne kapillaren Widerstand die Rechnung deutlich von den Messergebnissen abweicht.

Die Einführung einer Widerstandsschicht ist nicht nur beim Saugen von Bedeutung. **Bild 12** zeigt den Einfluss der Widerstandsschicht auf das Austrocknungsverhalten einer 2-lagig verputzten Porenbetonprobe. Oben ist die zeitliche Entwicklung des Wassergehaltes für die einzelnen Materialien als Vergleich aufgezeigt. Die Trocknung erfolgt rechnerisch zu schnell. Das deutet darauf hin, dass die oben beschriebenen Widerstandsschichten nicht nur

für das Saugen, sondern auch für die Trocknung Wirkung zeigen. Durch Einführung einer Widerstandsschicht kann eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erreicht werden.

Die rechnerische Untersuchungen der Transportvorgänge beim Feuchteübergang zwischen Putz und Mauerstein zeigen, dass der kapillare Feuchte-transport über die Schichtgrenze behindert wird, sofern nicht künstlich ein idealer hygrischer Kontakt hergestellt wird.

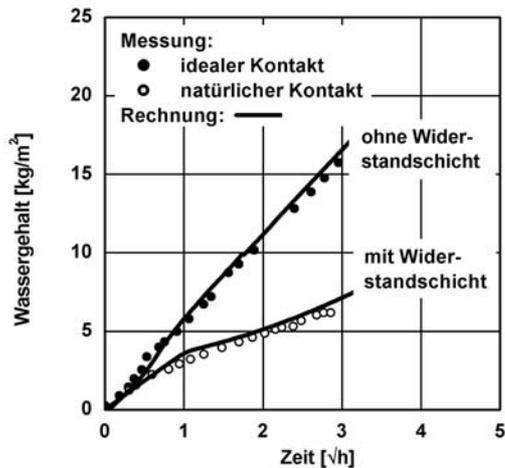


Bild 11: Wasseraufnahme für eine Probe bestehend aus 2 cm Kalkzementputz und 10 cm Klinker über der Wurzel der Zeit.

Zwischen beiden Materialien liegt entweder ein idealer hygrischer Kontakt oder ein realer Kontakt vor. Die Wasseraufnahme erfolgt durch den ca. 2 cm dicken Kalkzementputz. Die berechneten Ergebnisse sind als durchgezogene Linie dargestellt. Durch die Einführung einer Widerstandsschicht zwischen dem Kalkzementputz und dem Klinker läßt sich das Aufnahmeverhalten gut wiedergeben.

Die Meßwerte stammen von [63].

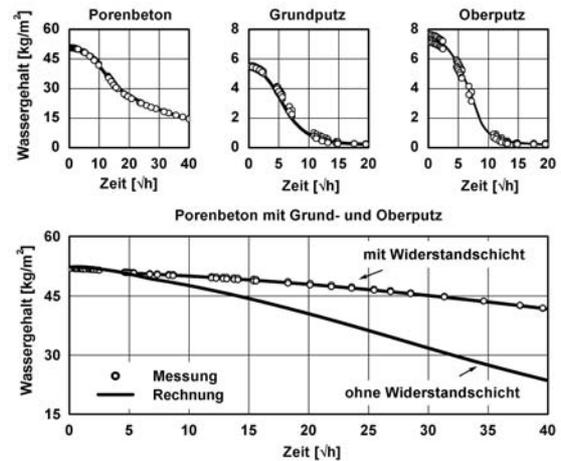


Bild 12: Einfluß einer Widerstandsschicht auf das Austrocknungsverhalten.

Oben: zeitliche Entwicklung des Wassergehaltes für die einzelnen Materialien.

Unten: zeitliche Entwicklung des Wassergehaltes für eine verputzte Porenbetonprobe.

Ohne Einführung einer Widerstandsschicht trocknet die berechnete Probe zu schnell aus (Meßwerte nach [153]).

Rasterelektronenmikroskopaufnahmen lassen vermuten, dass die Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze durch Kristallbildung von Salzen aus dem Putz „verstopfen“ [57]. Zu bemerken ist aber, dass beim hier beschriebenen Saugen ein konstanter Wasserkontakt über mehrere Tage bis Wochen stattfindet, während in eingebautem Zustand infolge Regen eine durchschnittliche Benetzungsdauer von vier Stunden erreicht wird. Die Trocknung geht von der freien Sättigung der Materialien aus, die in der Realität ebenfalls nicht erreicht wird. Eine Überprüfung der Eigenschaften der Widerstandsschichten unter realen Freilandbedingungen erscheint daher ratsam.

3.4 Einfluss von Salzen auf die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport

Die Anwesenheit hygroskopischer Salze kann die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport erheblich beeinflussen. Ist das Porengefüge der Baustoffe mit Salzen befrachtet, so beeinflussen diese mit dem Einsetzen der hygroskopischen Wirkung den Verlauf der Sorptionsisothermen. **Bild 13** zeigt beispielhaft den Verlauf der Sorptionsisothermen eines salzfreien Baustoffes und eines mit unterschiedlichen Salzlösungen belasteten Baustoffes. Die Salzbefrachtung führt bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte φ_h (Einsatz der hygroskopischen Wirkweise des Salzes) [1, 14, 38, 111, 118] zu einer sprunghaften Änderung des Materialfeuchtegehaltes. Untersuchungen von Larsen [111] ergaben allerdings, dass diese Änderung sich in der Realität stetig vollzieht. φ_h ist deshalb eher als ein „enger“ Feuchtebereich anzusehen. Oberhalb von φ_h ist die Sorptionsisotherme flach. Das führt dazu, dass keine nennenswerte Kapillarleitung mehr stattfinden kann, da diese ja durch den Gradienten des Wassergehaltes bestimmt wird.

Über einer gesättigten Salzlösung herrscht ein Wasserdampfpartialdruck, der bei Raumtemperatur einer Luftfeuchte von φ_h entspricht. Nimmt die Umgebungsluftfeuchte diesen Zustand an, setzt die hygroskopische Wirkung des Salzes ein. Die Wasserdipole lagern sich dabei an der Gitteroberfläche des Ionenkristalles an. Die dabei frei werdende Energie ermöglicht den Übergang einzelner Ionen in die wässrige Phase, bei der diese weitere Wassermoleküle binden. Die freigesetzte Hydratationsenergie bewirkt das Herauslösen weiterer Ionen aus dem Gitter, bis es schließlich aufgelöst ist [111]. Bei φ_h relativer Luftfeuchte werden aufgrund dieses Vorgangs so viele Wassermoleküle aus der Umgebungsluft in die entstandene Lösung aufgenommen, dass der Gleichgewichtszustand erreicht ist, bei dem sich ein Übergang von der gesättigten zur verdünnten Lösung einstellt. Mit zunehmendem Feuchtegehalt der Luft, also steigendem Wasserdampfpartialdruck, werden immer mehr Wassermoleküle in die verdünnte Salzlösung aufgenommen, d.h. die Lösung

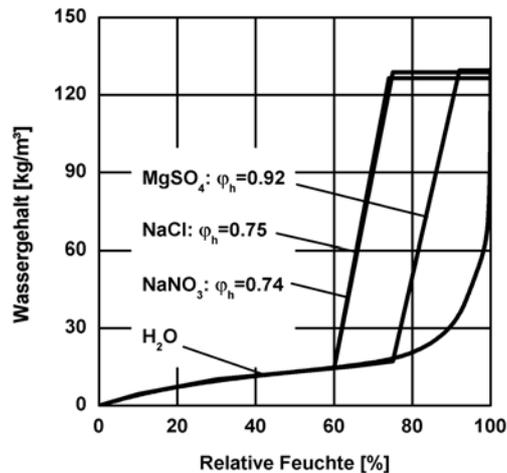


Bild 13: Verlauf der Sorptionsisothermen eines salzfreien und des mit unterschiedlichen Salzlösungen belasteten Baustoffes.

Die Salzbefrachtung führt bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte φ_h (Beginn der hygroskopischen Wirkweise des Salzes) zu einer relativ sprunghaften Änderung des Materialfeuchtegehaltes. Untersuchungen von Larsen [111] ergaben, dass diese Änderung sich in der Realität stetig vollzieht. Oberhalb von φ_h ist die Sorptionsisotherme äußerst flach. Das führt dazu, dass keine Kapillarleitung mehr stattfinden kann, da diese ja durch den Gradienten der relativen Feuchte bestimmt wird.

verdünnt sich weiter, bis der Partialdruck über der Lösung dem Wasserdampfpartialdruck der Luft entspricht. Mit zunehmender Verdünnung der Salzlösung herrscht an der Lösungsoberfläche ein Partialdruck, der sich immer mehr der Wasserdampfpartialdruck über der freien Wasseroberfläche nähert. Unterhalb φ_h relativer Luftfeuchte sind die Isothermen salzbelasteter Proben identisch mit denen des salzfreien Baustoffs. Hier liegt das Salz in kristalliner Form vor. Der Feuchtegehalt der Proben wird folglich nur durch die sorptive Anlagerung an den Porenwänden und der sich in feinen Porenräumen einstellenden Kapillarkondensation bestimmt.

Das Salz im Porenraum bindet nicht nur Wassermoleküle an sich, es beeinflusst auch die Dampfdiffusion. Im trockenen Zustand verengen die im Porenraum eingelagerten Salzkristalle die Diffusionswege durch den Baustoff. Daher steigt der Diffusionswiderstand von salzhaltigen Baustoffen an [111]. Der salzbedingte Anstieg des Dampfdiffusionswiderstands im Trockenbereich deutet auf eine räumliche Behinderung des Dampftransports hin, die proportional mit dem Salzgehalt ansteigt. Etwas anders liegen die Verhältnisse im Feuchtbereich zwischen 50% und 93% r. F.. Dort wird der Kristallisationspunkt des Kochsalzes bei 75% r.F.

Tabelle 4:

Meteorologische Jahresmittelwerte für Holzkirchen (Klimatensätze von 1990-1999 In der Tabelle sind jeweils der niedrigste und der höchste Wert hervorgehoben. Für die Berechnungen wird der Datensatz für das Jahr 1991 gewählt, da er für den Standort Holzkirchen ein für den Zeitraum der letzten 40 Jahre typisches Jahr repräsentiert.

Nr.	Problemkategorie	Anforderungen an den Kurz-Klimazyklus	Zeitintervall	Bewertungskriterium	Anwendungsbeispiel
I	winterliche Tauwasserbildung	Kalt, ohne Strahlung und Niederschlag	1 Jahr mit Tagesmittelwerten	- Gesamtwassergehalt - Wassergehalt in bestimmten Schichten - hygrothermische Verhältnisse an kritischen Stellen - Rücktrocknungszeit	Geneigte Dächer
II	erhöhte Schlagregenbeanspruchung	Kurzfristig hohe Schlagregenmenge und anschließende häufige „Frostereignisse“	1 Monat mit Stundenwerten	- Gesamtwassergehalt - Wassergehalt in der Vorsatzschale - Sättigungsgrad bei „Nulldurchgängen“	Einschaliges Mauerwerk, Kerndämmung
III	sommerliche Tauwasserbildung	Kurzfristig hohe Schlagregenmenge und anschließende Sonneneinstrahlung	1 Monat mit Stundenwerten	- Gesamtwassergehalt - Kernwassergehalt - Wassergehalt in der Tragschale - Wassergehalt in bestimmten Schichten - hygrothermische Verhältnisse an kritischen Stellen - Rücktrocknungszeit	Zweischaliges Mauerwerk, WDVS auf Holzwerkstoffen
IV	Baufeuchte	Kalt, ohne Strahlung und Niederschlag	1 Jahr mit Tagesmittelwerten	- Gesamtwassergehalt - Austrocknungszeit	Leichtbetonfertigbauteile

überschritten, so dass ein Teil des Salzes in Lösung geht. Dadurch wird zusätzliches Wasser durch Sorption aufgenommen, das sich durch Oberflächendiffusion am Feuchtetransport beteiligt. Deshalb wird in diesem Bereich ein Abnehmen des Diffusionswiderstandes gemessen.

Soll das hygrothermische Verhalten eines salzbelasteten Bauteils berechnet werden, muss der Einfluss des Salzes auf die Feuchtespeicherfunktion berücksichtigt werden. Für die folgenden Berechnungen des Austrocknungsverhaltens lateral abgedichteten Sander Sandsteinprismen bei 40°C und trockener Luft wird die in **Bild 13** gezeigte Feuchtespeicherfunktion verwendet. Die Wassergehaltsverteilung wird mit Hilfe der Kombination aus NMR und Gammadurchstrahlung [61, 62] gemessen. Das Feuchteprofil nach 66 Stunden reiner Saugzeit dient als Ausgangswert für die Berechnung. Nach 5, 174 und 430 Stunden Trocknung werden die Proben erneut vermessen [128]. **Bild 14** zeigt einen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Verteilung des Wassergehalts für drei mit unterschiedlichen Salzlösungen befrachtete Sander Sandsteinprismen. Als Referenz sind zusätzlich auch die Ergebnisse für ein salzfreies Prisma aufgeführt. Für alle drei Salze kann eine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden. Oberhalb von φ_h findet aufgrund der angepassten Feuchtespeicherfunktion kein flüssiger Wassertransport statt. Dies wird besonders deutlich bei dem Trocknungsprofil nach 430 h. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Berechnung ohne Anpassung der Feuchtespeicherfunktion [129] wird eine bessere Deckung erreicht. Einzig in der Nähe der Probenoberflächen sind die errechneten Wasserge-

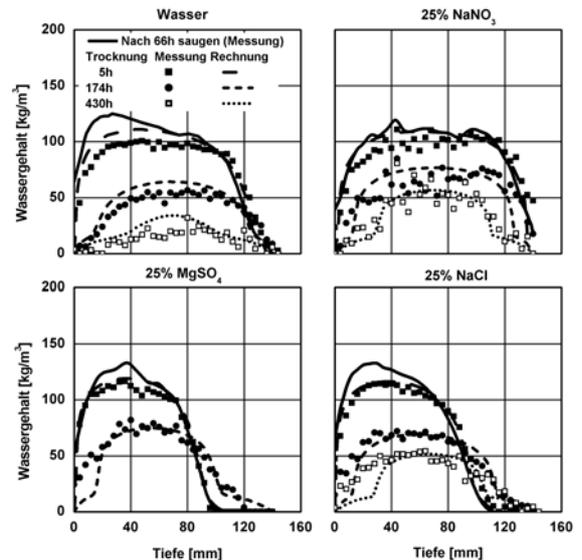


Bild 14: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Verteilungen des Wassergehalts für ein salzunbelastetes Prisma und drei mit unterschiedlichen Salzlösungen befrachtete Prismen aus Sander Sandstein.

Für alle drei Salze kann eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung gefunden werden. Oberhalb von φ_h findet aufgrund der angepassten Feuchtespeicherfunktion kein flüssiger Wassertransport statt.

Die Messwerte stammen von [129].

haltsprofile zu niedrig. Dies ist auf eine Konzentrationserhöhung aufgrund des dort verdunsteten Wassers und auf die durch die Salzausblühungen hervorgerufene Trocknungsblockade [96] zurückzuführen [129].

4. Vom deterministischen Ansatz zum stochastischen Konzept

Die im vorangegangenen Kapitel gezeigten Beobachtungen haben zwar Grenzen und Einschränkungen heutiger hygrothermischer Modelle aufgezeigt, doch in der Mehrheit der Anwendungsfälle kann das hygrothermische Verhalten zufriedenstellend abgebildet werden. Hier stellt sich dann natürlich die Frage nach der Genauigkeit dieser rechnerischen Ergebnisse. Aufgrund der komplexen gekoppelten Differentialgleichungssysteme ist die Beantwortung dieser Frage nicht mit einer Fehlerrechnung möglich. Ein stochastisches Konzept ist nötig.

Beim deterministischen Ansatz wird die Berechnung mit Mittelwerten für die einzelnen Materialparameter und mit durchschnittlichen Klimarandbedingungen durchgeführt. Die statistische Variation der Eingabeparameter wird ignoriert. Als Ergebnis erhält man eine konkrete Aussage über hygrothermische Zustände. Befriedigende Rechenergebnisse sind dabei nur dann zu erzielen, wenn die Eingabedaten hinreichend genau bekannt sind und das Problem vollständig vom Modell erfasst wird. Zusätzlich steigt die Gefahr von Fehlanwendungen, weil die Verführung, „per Knopfdruck schnell ein Ergebnis zu erhalten“, steigt und der Anwender durch Fehlerüberprüfungen der Programme und immer umfangreichere Datenbanken den Eindruck erlangt, sich immer weniger eigene Gedanken machen zu müssen, welche Eingaben mit welcher Genauigkeit wichtig sind. Dabei wird immer vergessen, dass man vor allem bei den Klimarandbedingungen und bei den Materialparametern mit mehr oder weniger großen Streuungen zu rechnen hat. Für den Anwender wären Hinweise zur die Genauigkeit der Berechnung eine große Hilfestellung.

Um diesen Streuungen Rechnung zu tragen, ist der Einsatz stochastischer bzw. probabilistischer Ansätze unumgänglich. Erst dann sind Aussagen bzw. Bewertungen über das Feuchteverhalten von Baukonstruktionen mit Angaben eines „Vertrauensbereiches“ möglich. Mit dem stochastischen Ansatz ist auch ein Schritt in Richtung eines hygrothermischen Sicherheitskonzeptes getan. Weiterhin lassen sich mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse auch Fragen, wie die Wichtigkeit einzelner Materialkennwerte und deren Vergleich zu den Schwankungen der äußeren Randbedingungen, beantworten.

Im folgenden wird die Entwicklung und die Umsetzung eines stochastischen Ansatzes beschrieben. Ziel soll sein, die „sensiblen“ Eingabedaten vorab herauszufiltern und dann mit Hilfe einer Unsicherheitsanalyse die Genauigkeit der Berechnung aufgrund der „unscharfen“ Eingabedaten zu ermitteln. Dabei werden zwei Verfahren vorgestellt: die differentielle Sensitivitätsanalyse und die wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die einzelnen Parameter aus dem deterministischen Ansatz in möglichen Parameterkombinationen zu variieren und deren jeweilige Wirkung zu bestimmen. Die Zahl der möglichen Kombinationen erreicht aber bei realen Konstruktionen leicht eine Größenordnung, bei der die Durchführung nicht mehr praktikabel ist. In solchen Fällen wird ein automatisiertes, stochastisches Berechnungskonzept sinnvoll. Allerdings sind bei dessen Umsetzung gewisse vereinfachte Annahmen zu treffen, um die Anzahl der Rechnungen und die Gesamtrechenzeit auf ein sinnvolles Mindestmaß zu reduzieren. Zur Reduzierung der Rechenzeit ist der Einsatz von charakteristischen Kurz-Klimazyklen ein geeignetes Mittel. Abhängig vom hygrothermischen Verhalten und der möglichen Gefährdung werden verschiedene Gefährdungstypen definiert und ein jeweils typischer Kurz-Klimazyklus erarbeitet. Einige der Materialparameter, wie etwa die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigtransportkoeffizienten sind komplexer Natur und kommen in dieser Form für eine „schnelle“ Anwendung im Normalfall nicht in Frage. Ausreichend genaue Rechenergebnisse sollten sich auch mit approximierten Materialfunktion erzielen lassen. Nur durch den Einsatz von solchen Näherungsverfahren sind sinnvolle Materialparameterstudien durchführbar.

4.1 Auswahl typischer Klimazyklen

Wie beschrieben, stellt die Wahl der Randbedingungen einen wesentlichen Eingabeparameter dar, da klimatische Bedingungen schwer vorhersagbar sind. Feuchteprobleme treten ferner in der Regel nicht bei durchschnittlicher, sondern eher bei extremer Witterung auf, wobei je nach Problemfall ein besonders kaltes (z.B. bei winterlichem Tauwasser) oder auch ein besonders warmes Jahr (z.B. bei Sommerkondensation) die ungünstigste Belastung darstellen kann [107]. Abhängig vom hygrothermischen Verhalten und der primären Gefährdung lassen sich folgende vier Gefährdungstypen definieren (**Tabelle 4**):

- I. Erhöhte Schlagregenbeanspruchung, wie etwa beim einschaligen Mauerwerk
- II. Sommerliche Tauwasserbildung (sog. „Sommerkondensation“ oder „Umkehrdiffusion“), wie etwa bei mineralischen Wärmedämmverbundsystemen auf Holzkonstruktionen
- III. Baufeuchte, wie etwa bei Leichtbetonfertigteilen
- IV. Winterliche Tauwasserbildung, wie etwa in geneigten Dächern

Ziel ist zunächst, für diese Problemkategorien charakteristische Kurz-Klimazyklen zu finden, um so aus abschätzenden Rechnungen erste Informationen über die jeweils „sensibelsten“ Größen zu erhalten. Die Frage, welchen Kurz-Klimazyklus man für eine Konstruktion wählt, hängt u.a. davon ab, welche primäre Gefährdung vorliegt und wie groß der Einfluss kurzfristiger Wetterereignisse bzw. wie groß die hygrothermische Trägheit der Konstruktion ist. Geht es beispielsweise um den Effekt der sogenannten Umkehrdiffusion, so ist es für die Unsicherheitsanalyse ausreichend, nur einen kurzen Zeitraum mit entsprechend kurzen Berechnungsschritten zu wählen, mit viel Niederschlag, hohen Außenlufttemperaturen und starker Sonneneinstrahlung. Für Betrachtungen der winterlichen Tauwasserrisiken oder der Austrocknung von Baufeuchte genügen Tagesmittelwerte, da nur der längerfristige Wettertrend wiedergegeben werden muss. Solche Datensätze sind aber nur zur Analyse der Systematik des Einflusses verschiedener Eingangsgrößen gerechtfertigt.

Als ein Standardklimadatenatz für hygrothermische Berechnungen wird ein Klimadatenatz für Holzkirchen aus dem Jahr 1991 verwendet [110]. Darin enthalten sind gemessene Stundenwerte für die Außenlufttemperatur, Globalstrahlung, Diffusstrahlung, West-Strahlung, rel. Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Normalregen, Schlagregen und Häufigkeit der Windrichtung für den Standort Holzkirchen. In einem ersten Schritt wird dieser Datensatz mit anderen aus den Jahren 1990 bis 1999 verglichen. **Tabelle 5** zeigt die jeweiligen Jahresdurchschnittswerte bzw. Jahressummen für die Datensätze des IBP von 1990 bis 1999. Demnach ist das Jahr 1991 mit einer durchschnittlichen Außenlufttemperatur von $6,4\text{ °C}$ im Vergleich zum Dekadennittel von $7,4\text{ °C}$ eher ein kaltes Jahr. Eine Auswertung für den längeren Zeitraum seit 1953 bewertet dieses aber als ein durchaus durchschnittliches Jahr [108]. Für den Anwendungsfall „winterliches Tauwasser“ würde ein kälteres ($\vartheta_{\text{Z},1996} = 6,0\text{ °C}$) bzw. bei „Sommerkondensation“ ein wärmeres Jahr ($\vartheta_{\text{Z},1994} = 8,9\text{ °C}$) die ungünstigste Belastung darstellen [107]. Die statistische Auswertung der Klimadaten für die einzelnen Verläufe während eines Jahres ist in **Bild 15** zu sehen. Eingezeichnet sind neben dem Durchschnitt aus den Jahren 1990 bis 1999 inkl. der beobachteten Standardabweichung auch die Werte für das wärmste (1994) und das kälteste (1996) Jahr. Während die einzelnen Monatsmittelwerte für die Außenlufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die monatliche Globalstrahlung einen relativ ähnlichen Charakter haben, sind die Schwankungen beim Niederschlag und bei der relativen Feuchte für die Berechnung lassen sich die Temperatur und Feuchte der Außenluft direkt aus den Klimadaten übernehmen; Strahlung und Niederschlag sind auf die Ausrichtung des betrachteten Bauteils umzurechnen.

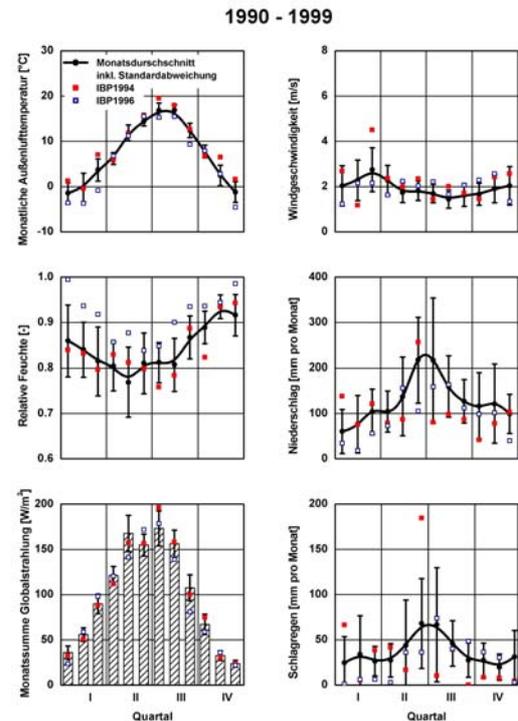


Bild 15: Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten für Holzkirchen.

Eingezeichnet sind neben dem Durchschnitt aus den Jahren 1990 bis 1999 einschließlich der beobachteten Standardabweichung auch die Werte für das wärmste (1994) und das kälteste (1996) Jahr. Während die einzelnen Monatsmittelwerte für die Außenlufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die monatliche Globalstrahlung einen relativ ähnlichen Charakter haben, sind die Schwankungen beim Niederschlag und bei der relativen Feuchte zum Teil extrem ausgeprägt.

Die kurzwellige Direktstrahlung und die langwellige Abstrahlung können auf die jeweilige Orientierung und Neigung umgerechnet werden. Bei Schlagregen ist dies schwieriger. Er ist außer von der Orientierung und Neigung auch von Gebäudeumströmungsverhältnissen abhängig. Wie bereits oben erwähnt, gibt es für die Errechnung der Schlagregenbeanspruchung aus dem Normalregen, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung zahlreiche Näherungsfunktionen. Diese sind allerdings nur empirisch und unter gewisser Annahmen aufgestellt worden. In Holzkirchen wird neben dem Normalregen auch der Schlagregen auf eine nach Westen orientierte Fassade kontinuierlich gemessen. Eine genaue Analyse dieser Daten und ein Vergleich zwischen den real gemessenen und den umgerechneten Werten hilft bei der Beurteilung der Güte der Näherungsmethode (**Bild 16** und **Bild 17**).

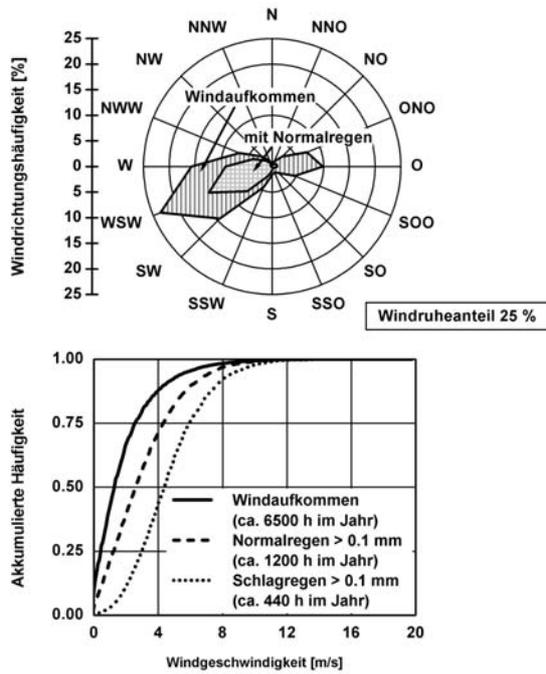


Bild 16: Auswertung der Holzkirchener Wind- und Regendaten.

Oben: Windrichtungshäufigkeit mit und ohne Regenereignis.

Unten: Häufigkeitsverteilung für die Windgeschwindigkeit.

Die höchste Schlagregenbeanspruchung ist für den Standort Holzkirchen auf eine nach WSW orientierte Fassade zu erwarten. Die Windereignisse mit östlichen Komponenten werden selten von Niederschlag begleitet. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit liegt bei Schlagregenereignissen mit einer Intensität größer als 0,1 mm bei ca. 4 m/s.

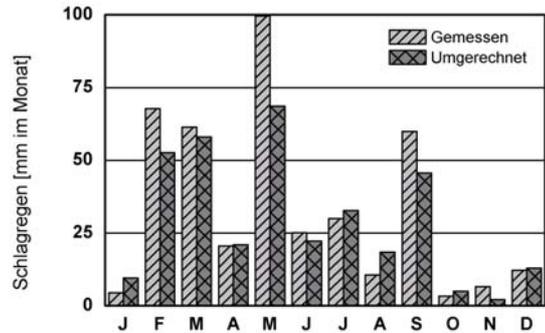
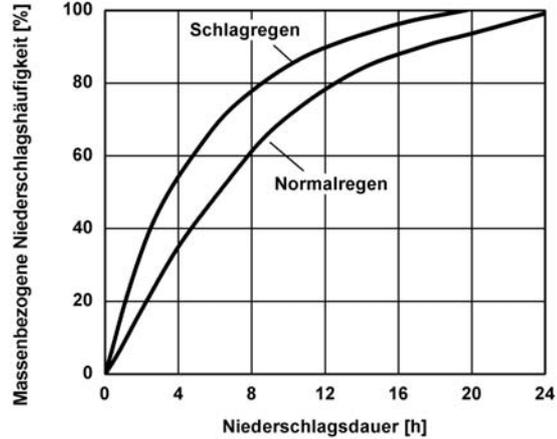
Bild 17: Auswertung der Holzkirchener Klimadaten hinsichtlich Niederschlag und Schlagregen:

Oben: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsdauer [99]

Unten: Vergleich des gemessenen mit dem nach Gleichung (8) berechneten Schlagregen.

Während die Hälfte der gesamten Jahresniederschlagsmenge bei Regenereignissen mit einer Dauer von 6 Stunden oder weniger fällt, beträgt die mittlere Dauer eines Schlagregenereignisses weniger als vier Stunden. Der gemessene Schlagregen liegt immer etwas höher als der umgerechnete, dies ist mit den in dieser Region typischen kurzfristigen Gewitterereignisse verbunden mit starkem Niederschlag zurückzuführen. Für die Schlagbeanspruchung einer Fassade werden solche Abweichun-

gen bei starken Intensitäten nicht unbedingt bemerkbar, denn ein großer Teil des Niederschlags spritzt durch den starken Impuls weg bzw. läuft als überschüssiges Wasser von der Oberfläche ab



Die Windrichtungshäufigkeit aus Bild 16 (oben) zeigt, dass für den Standort Holzkirchen die höchste Schlagregenbeanspruchung auf eine nach WSW orientierte Fassade zu erwarten ist. Die Windereignisse mit östlichen Komponenten (Ostwindanteil von 10 %) werden praktisch nicht von Niederschlag begleitet.

Bild 17 zeigt die Ergebnisse der Analyse des Schlagregens. Die Auswertung der Dauer von Niederschlagsperioden ist in Form einer massenbezogenen Häufigkeitsverteilung dargestellt. Während die Hälfte der gesamten Jahresniederschlagsmenge bei Regenereignissen mit einer Dauer von 6 Stunden oder weniger fällt, beträgt die mittlere Dauer eines Schlagregenereignisses weniger als vier Stunden [101, 102]. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit liegt bei Schlagregenereignissen mit einer Intensität größer als 0,1 mm bei ca. 4 m/s. Der Vergleich des gemessenen mit dem aus Gleichung (8) berechneten Schlagregen zeigt (im Bild links unten), dass der gemessene immer etwas höher liegt. Dies ist auf die in dieser Region typischen kurzfristigen Gewitterereignisse, verbunden mit starkem Niederschlag, zurückzuführen. Für die Schlagregenbeanspruchung einer Fassade sind

solche Abweichungen bei starken Intensitäten nicht unbedingt wichtig, denn ein großer Teil des Niederschlags spritzt durch den starken Impuls weg bzw. läuft als überschüssiges Wasser von der Oberfläche wieder ab.

Im folgenden werden alle weiteren Daten aber aus dem Datensatz IBP 1991 generiert. Gründe dafür sind, dass dieser Datensatz mittlerweile durch zahlreiche Vergleiche mit anderen parallel vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen erfassten Wetterdaten aus Freilandversuchen wohl der zuverlässigste ist. Außerdem repräsentiert dieser Datensatz für den Standort Holzkirchen ein für den Zeitraum der letzten 40 Jahre typisches Jahr.

Konstruktionen mit Schlagregenbeanspruchung und sommerlicher Umkehrdiffusion folgen schnell den klimatischen Randbedingungen. Deren Wassergehalt wird mehr von der kurzfristigen Schlagregenmenge oder Sonneneinstrahlung abhängen. Der Kurz-Klimazyklus für diesen Problemtyp muss stündliche Werte enthalten, bei denen viel Niederschlag, hohe Außenlufttemperaturen und Sonneneinstrahlung vorkommen, denn der Schlagregen und die Sonneneinstrahlung sind kurzfristige Effekte; sie haben einen nichtlinearen Einfluss, dürfen also nicht gemittelt werden. Zusätzlich darf der Beobachtungszeitraum für die Durchführung der Unsicherheitsanalyse nicht zu kurz gewählt werden, denn ein „sichtbarer“ Effekt kann unter Umständen erst durch einen mehrfachen Wechsel zwischen Beregnung und Besonnung auftreten. Als besonders günstig hat sich der Zeitraum vom 15. Juli bis zum 15. August erwiesen, weil sich die Klimaelemente (Niederschlag und Sonneneinstrahlung) in diesen Zeiten erfahrungsgemäß besonders stark ausprägen. Besteht bei der zu untersuchenden Konstruktion eher die Gefahr einer Frost-Tau-Schädigung, ist der Zeitraum vom 15. Dezember bis zum 15. Januar als Kurz-Klima-Zyklus zweckmäßiger (häufige Nulldurchgänge der Außenlufttemperatur bei gleichzeitig hoher Niederschlagsintensität). Die Wahl dieser Zeiträume gibt, wie anhand der Beispiele gezeigt wird, die Tendenz korrekt wieder und die Unsicherheitsanalyse kann um den Faktor 12 schneller durchgeführt werden.

Wenn die Konstruktion durch winterlichen Tauwasseranfall oder durch erhöhte Baufeuchte gefährdet sein könnte, genügt für die Unsicherheitsanalyse eine abschätzende Berechnung mit Tagesmittelwerten, denn kurzfristige Effekte wie Sonneneinstrahlung führen zu einer Begünstigung der Konstruktion aus hygrothermischer Sicht. Es genügt, den längerfristigen Wettertrend richtig wiederzugeben. Die Rechenergebnisse mit Tagesmittelwerten geben die Tendenz im Vergleich zu Monatsmitteln mit einer höheren Genauigkeit wieder. Bei der Durchführung der Unsicherheitsanalyse werden anstatt der 8760 Zeitschritte nur 365 benötigt.

4.2 Approximationsmethoden für Stoffeigenschaften

Für zahlreiche Baustoffe sind thermische und hygri-sche Materialeigenschaften in einschlägigen Datenbanken vorhanden. Die Bestimmung der Materialparameter ist in entsprechenden nationalen bzw. internationalen Normen geregelt oder es sind in den letzten Jahren neue Meßmethoden entwickelt worden. Die messtechnische Bestimmung ist zum Teil mit hohem Aufwand verbunden [83, 124], so dass sie für „schnellen“ Anwender im Normalfall nicht in Frage kommt. In vielen Fällen können jedoch Näherungsverfahren basierend auf theoretischen Modellen [3, 52, 81] oder empirischen Ansätzen [3, 12, 60, 73, 87] eingesetzt werden. Sind beispielsweise die kapillaraktiven Materialschichten in einem Bauteil nicht in direktem Kontakt oder wird diese Kontaktschicht nicht langfristig nass, dann werden mit Approximationsmethoden für die Feuchtespeicherfunktion aus dem Bezugsfeuchtegehalt u_{80} , dem Feuchtegehalt u_{95} und der freien Wassersättigung u_f ausreichend genaue Rechenergebnisse erzielt. Ähnliches gilt für die Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten und einfachen Trocknungsversuchen. Für die meisten praktischen Anwendungen können also hygroskopische und kapillaraktive Baustoffe durch folgende Materialparameter ausreichend genau spezifiziert werden:

- Feuchtegehalt u_{80} und u_{95}
- freie Wassersättigung u_f
- Wasseraufnahmekoeffizient w und Trocknungsverhalten

Im folgenden werden die jeweiligen Ableitung der Approximationsmethoden vorgestellt und durch Vergleich mit Messungen bzw. Rechnungen mit direkt bestimmten Kennwerten deren Gültigkeit bewiesen.

4.2.1 Approximation der Feuchtespeicherfunktion

Für viele Baustoffe ist in der Regel nur die Sorptionsisotherme bis etwa 95 % relative Feuchte bekannt oder ohne größeren Laboraufwand ermittelbar, wobei auch „genaue“ Messungen an einzelnen Materialproben, bedingt durch große Inhomogenitäten, nicht unbedingt repräsentativ sind; deshalb können große Schwankungen vorkommen. Ferner ist nach [76, 83] eine genaue Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion nur bei Bauteilschichten notwendig, bei denen ein Flüssigtransport von Schicht zu Schicht eine besondere Rolle spielt. Bei allen anderen Fällen wäre eine genaue Bestimmung gar nicht erforderlich. Deswegen sind Approximationsmethoden zur Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion auf Basis einfach zu ermittelnder Kennwerte in der Literatur häufig zu finden

[3, 51, 64, 77, 126]. Einige dieser Ansätze sind rein empirischer Natur, andere werden direkt aus der BET-Theorie [6] abgeleitet. Bei vielen Ansätzen wird bei 100 % r. F. der physikalisch nicht sinnvolle Wert einer unendlich hohen freien Sättigung erreicht. Die besten Ergebnisse werden mit der in [99] angegebenen Näherung erzielt, bei der die folgende Funktion vorgeschlagen wird:

$$u(\varphi) = u_f \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b-\varphi} \quad (9)$$

$u(\varphi)$ [kg/m ³]	Ausgleichswassergehalt
u_f [kg/m ³]	Freie kapillare Wassersättigung
b [-]	Approximationsfaktor
φ [-]	relative Luftfeuchte

Der Approximationsfaktor ergibt sich aus dem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80 % relativer Feuchte. Dieser ist auch als Bezugsfeuchtegehalt nach DIN 52 620 [27] bekannt und ist für die Bestimmung des Rechenwerts der Wärmeleitfähigkeit erforderlich.

Ein Vergleich zwischen der gemessenen und der nach Gleichung (9) angenäherten Feuchtespeicherfunktion zeigt, dass für Materialien mit relativ hohen Wassergehalten bei 80 % r. F. der untere Sorptionsfeuchtebereich aufgrund der Charakteristik der Funktion nicht korrekt wiedergegeben wird. Dies ist bei Holzwerkstoffen oder zementhaltigen Materialien, wie Kalkzementputz oder Betonen (**Bild 18** bis **Bild 21**) besonders zu beobachten. Bei anderen Materialien, besonders bei einigen Sandsteinen, werden im Kapillarwasserbereich (relative Feuchten über 95 %) zu hohe Werte erreicht. Für viele Fragestellungen ist die Näherungsmethode jedoch hinreichend gut, denn oft sind höhere Wassergehalte nicht oder nur kurzfristig zu erwarten.

Ist, wie etwa bei verputzten Mauerwerken, doch eine genauere Feuchtespeicherfunktion wichtig, so kommt es vor allem auf das Saugspannungsverhältnis der beiden Materialien an. Trägt man die komplette Feuchtespeicherfunktion nicht mehr als Funktion der relativen Feuchte, sondern als Funktion des Kapillardrucks auf, so ergibt sich für nahezu alle Materialien der in **Bild 1** unten dargestellte typische s-förmige Verlauf, der vor allem durch den Gradienten im Bereich der Feuchtespeicherfunktion zwischen 80 % und 95 % r. F. bestimmt wird. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird deshalb hier die Verwendung der folgenden empirischen Funktion mit den beiden freien Parametern p_{k1} und p_{k2} vorgeschlagen:

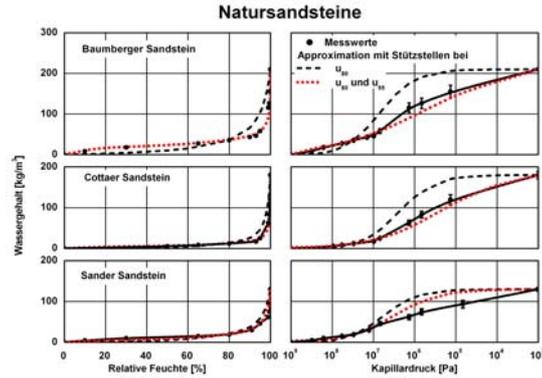


Bild 18: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für drei unterschiedliche Sandsteine.

Links: als Funktion der relativen Feuchte
Rechts: als Funktion des Kapillardrucks.

Bei den Messwerten wird zusätzlich der abgeschätzte Unsicherheitsbereich bedingt durch Materialschwankungen und die Meßmethode mit angegeben. Die angenäherten Funktionen werden mit Hilfe der Gleichgewichtsfeuchten bei 80 % und 95 % r. F. errechnet. Diese Werte sind ohne großen messtechnischen Aufwand leicht bestimmbar. Es zeigt sich, dass für die hier aufgeführten Beispiele eine recht gute Übereinstimmung der neu vorgeschlagenen Approximation nach Gleichung (10) mit den gemessenen Werten erzielt wird und deshalb in guter Näherung verwendet werden kann. Die Messwerte stammen von [83, 110].

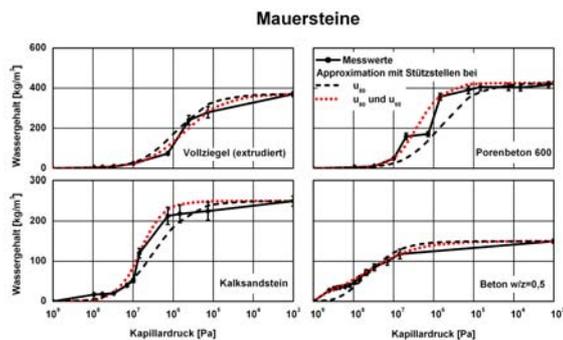


Bild 19: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für vier Mauerwerksbildner, dargestellt als Funktion des Kapillardrucks.

Die Messwerte stammen von [83, 110]

$$u(p_c) = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{p_c}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} \quad (10)$$

Sie lassen sich durch Einsetzen der beiden bekannten Sorptionsfeuchten bei 80 % und 95 % relative Luftfeuchte (oder einen anderen möglichst hohen Wert) errechnen. Der Wert bei 95 % r. F. ist meistens der letzte genau bekannte Punkt der Sorptionsisotherme. Diese Werte sind ohne großen messtechnischen Aufwand leicht bestimmbar. Die Umrechnung der relativen Feuchte erfolgt mit Hilfe der Kelvin-Formel (1). Für verschiedene Natursandsteine, Mauersteine, Putze und Holzwerkstoffe sind die beiden Approximationsmethoden im Vergleich zu den jeweils gemessenen Feuchtespeicherfunktionen in **Bild 18** bis **Bild 21** dargestellt. Die gemessenen Werte stammen dabei entweder aus eigenen Untersuchungen oder aus der WUFI-Materialdatenbank [110]. Bei den Messwerten wird

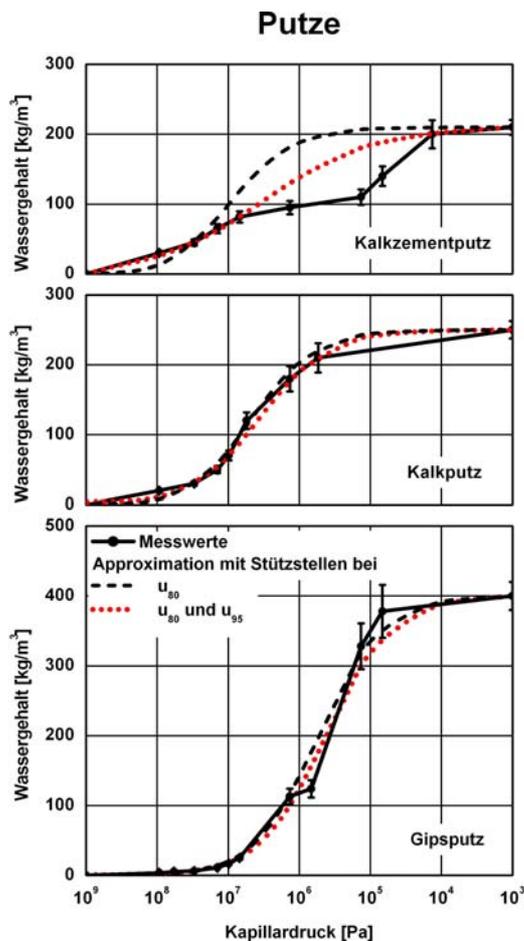


Bild 20: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für drei Putze.

Die Messwerte stammen von [83, 110]

zusätzlich der abgeschätzte Unsicherheitsbereich, bedingt durch Materialschwankungen und die Messmethode, mit angegeben. Es zeigt sich, dass für die hier aufgeführten Beispiele eine recht gute Übereinstimmung der neu vorgeschlagenen Approximation mit den gemessenen Werten erzielt wird und deshalb die vorgeschlagene Funktion in guter Näherung verwendet werden kann. Wenn nur die Sorptionsisotherme und die freie Wassersättigung bekannt sind, kann dann aus den Messpunkten bei 80 % und 95 % r. F. der obere Bereich mit Gleichung (1) hinreichend genau ergänzt werden.

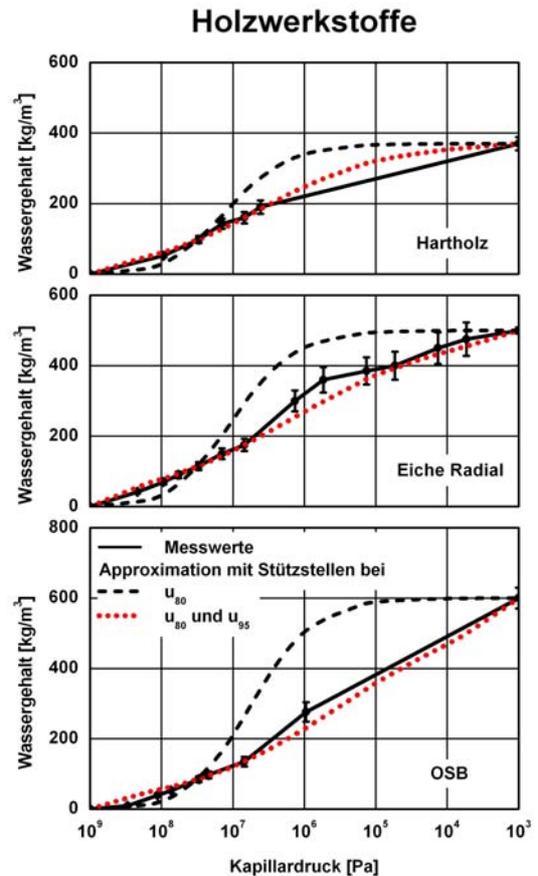


Bild 21: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für drei Holzwerkstoffe.

Die Messwerte stammen von [83, 110].

4.2.2 Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten

Während die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit relativ einfach und seit langem im Rahmen einer DIN-Norm[29] geregelt ist, gestaltet sich die Bestimmung der wassergehaltsabhängigen Kapillardrucktransportkoeffizienten aufwendiger. Sie erfordert die

Messung Wassergehaltsverteilungen im Baustoff mit Hilfe von speziellen Messanlagen, die z.B. auf der kernmagnetischen Resonanz oder der γ -Durchstrahlung beruhen. Zusätzlich ist, wie in [83, 99] beschrieben, zwischen Befeuchtung und Trocknung zu unterscheiden. D.h.: Es ergeben sich für die beiden Randbedingungen unterschiedliche Flüssigtransportkoeffizienten. Oft ist aber der zeitliche und finanzielle Aufwand für eine derartige Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten zu groß. Für diese Fälle wäre ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten vorteilhaft. Deshalb wird eine Methode vorgestellt, diese Koeffizienten aus bekannten Standardstoffkennwerten (freie Wassersättigung, Bezugsfeuchtegehalt und Wasseraufnahmekoeffizient) und einem einfachen Austrocknungsversuch abzuschätzen. Diese sind für Berechnungen des Feuchtehaushaltes vieler Materialien ausreichend genau.

Kapillares Saugen

Aus der Literatur sind einige Methoden zur Abschätzung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten (w -Wert), dessen Bestimmung normiert ist [26], bekannt. Einige dieser Methoden sind entweder zu ungenau oder messtechnisch zu komplex [3, 51, 52, 67, 80, 99, 144]. Zur Bestimmung einer Näherungsfunktion für die Kapillartransportkoeffizienten ist die Beziehung zwischen dem w -Wert als integralem Wert für die Wasseraufnahme und den feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten notwendig. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist nach DIN 52617 [26] gemäß folgender Gleichung definiert:

$$m_w = A \cdot \sqrt{t} \tag{11}$$

m_w [kg/m²] aufgenommene Wassermenge
 A [kg/m²√s] Wasseraufnahmekoeffizient

Krischer [81] hat mit dem Wassergehalt als treibendem Potential und den Kapillartransportkoeffizienten einen Potentialansatz eingeführt. Aus dem allgemeinen instationären Ansatz erhält man für ein konstantes D_w mit der Fehlerfunktion als Lösungsansatz folgende Beziehung:

$$m_w(t) = \int_{t=0}^t m_1(x=0, t) \cdot dt = \frac{2 \cdot \sqrt{D_{w,s}} \cdot u_f}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{t} \tag{12}$$

in Vergleich mit Gleichung ergibt nach Umformung:

$$\overline{D_{w,s}} = \frac{\pi \cdot A^2}{4 \cdot u_f^2} \tag{13}$$

u_f [kg/m³] freie Wassersättigung

Gleichung (13) ist nur für konstante, also feuchteunabhängige Kapillartransportkoeffizienten korrekt. Für nicht konstante Transportkoeffizienten ist die Beziehung zwischen D_w und dem Wasseraufnahmekoeffizient wesentlich komplizierter und nur in Ausnahmefällen analytisch lösbar. Deshalb muss hier

Parameter	Art	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Ø
Außenluft [°C]	Ø ¹⁾	8.01	6.37	7.88	7.5	8.85	7.36	5.96	7.70	7.74	7.53	7.49
Globalstrahlung [kW/m ²]	Σ ²⁾	1259	1190	1209	1156	1180	1116	1129	1215	1196	1189	1184
Niederschlag [mm]	Σ	2085	1867	2199	2178	1245	1315	1116	943	1043	1388	1538
Schlagregen [mm]	Σ	390	401	321	³⁾	423	370	320	425	419	³⁾	383
Relative Feuchte [%]	Ø	82.4	80.6	80.3	80.4	83.6	89.0	91.4	89.8	80.6	85.1	84.3
Windgeschwindigkeit [m/s]	Ø	1.91	1.59	1.68	1.77	2.22	2.55	1.96	2.21	1.94	1.53	1.94

Tabelle 5: Meteorologische Jahresmittelwerte für Holzkirchen (Klimatensätze von 1990-1999).

In der Tabelle sind jeweils der niedrigste und der höchste Wert hervorgehoben. Für die Berechnungen wird der Datensatz für das Jahr 1991 gewählt, da er für den Standort Holzkirchen ein für den Zeitraum der letzten 40 Jahre typisches Jahr repräsentiert.

ein Korrekturfaktor K eingeführt werden, so dass sich die folgende Beziehung für den mittleren Kapillartransportkoeffizienten ergibt:

$$\overline{D_{w,s}} = \frac{K \cdot \pi \cdot A^2}{4 \cdot u_f^2} \tag{14}$$

Für die meisten Baustoffe lassen sich die Kapillartransportkoeffizienten recht gut mit einer Exponentialfunktion approximieren [73, 99]:

$$D_{w,s}(u) = D_{w,s}(u_0) \cdot \exp\left(\frac{u}{u_f} \ln \frac{D_{w,s}(u_f)}{D_{w,s}(u_0)}\right) \tag{15}$$

$D_{w,s}(u_f)$ [m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung
$D_{w,s}(u_0)$ [m ² /s]	fiktiver Wert des Kapillartransportkoeffizient des trockenen Baustoffes

Für den mittleren Kapillartransportkoeffizienten nach Glg. (15) ergibt sich:

$$\overline{D_{w,s}} = \frac{D_{w,s}(u_f) - D_{w,s}(u_0)}{\ln(D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0))} \quad (16)$$

Aus Gleichung (14) folgt damit folgende Bestimmungsgleichung für $D_{w,s}(u_f)$:

$$D_{w,s}(u_f) = \frac{K \cdot \pi \cdot A^2 \cdot \ln(D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0))}{4 \cdot u_f^2} + D_{w,s}(u_0) \quad (17)$$

Der Korrekturfaktor K ist nur abhängig vom Verhältnis $D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0)$ und ist empirisch bestimmbar. Dazu wurde bei Verwendung der exponentiellen Näherung für verschiedene Verhältnisse $D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0)$ die zeitabhängige Wasseraufnahme zunächst rechnerisch bestimmt, in (17) eingesetzt und der Faktor K so angepasst, dass die Gleichung erfüllt wird. Es ergibt sich für K folgende Bestimmungsgleichung:

$$K = 0,025 \cdot 10^{(-0,4 \cdot (\log(\frac{D_{w,s}(u_f)}{D_{w,s}(u_0)}) - 3)) + 0,61} \quad (18)$$

Nach wie vor bleibt aber das Problem, dass (17) eine Gleichung mit zwei Unbekannten darstellt, so dass für ihre Lösung weitere Annahmen gemacht werden müssen. Künzel [99] legt das Verhältnis von $D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0)$ auf drei Zehnerpotenzen fest und erhält damit für einige Baustoffe eine recht gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung.

Allerdings bleibt auf diese Weise der Einfluss der unterschiedlichen Porenradienverteilungen auf die Form der Wassergehaltsprofile unberücksichtigt.

Oberhalb von 50 % relative Feuchte tritt im Mikroporenbereich mit Radien zwischen 10^{-9} und 10^{-7} m die sog. Kapillarkondensation auf, die auf eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes über konkav gekrümmten Menisken zurückzuführen ist [40, 77]. Der bei Messung des Wasserdampf-diffusionswiderstandes poröser Baustoffe nach [29] für den Feuchtebereich ermittelte, im Vergleich zum Trockenbereich meist kleinere Diffusionswiderstand, ist auf einen der Diffusion überlagerten Flüssigtransport in diesem Feuchtebereich zurückzuführen [83]. Aus der Differenz der dabei im hohen Luftfeuchtebereich zu den im Trockenbereich gemessenen Massenströme lassen sich bei Kenntnis der Sorptionsisotherme für den hygroskopischen Feuchtebereich die Kapillartransportkoeffizienten

berechnen. Das Berechnungsverfahren ist in [83] ausführlich erläutert. Die auf diese Weise aus Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtbereich ermittelten Flüssigtransportkoeffizienten sind für eine Reihe von Baustoffen in **Tabelle 6** aufgelistet. Wie ersichtlich, ergibt sich für alle aufgeführten Materialien fast der gleiche Transportkoeffizient von etwa $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s. Dies ist nicht überraschend, wenn man bedenkt, dass unter diesen Bedingungen in allen Proben die Poren bis zum gleichen maximalen Porenradius mit Wasser gefüllt sind. Damit sollte sich auch ein vergleichbarer Kapillartransportkoeffizient ergeben. Die größten Abweichungen vom Mittelwert von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s zeigen sich beim Porenbeton und bei Gips. Beide Materialien besitzen einen niedrigen Diffusionswiderstand und entsprechend geringen Unterschied zwischen Trocken- und Feuchtebereich, wodurch sich hier ein relativ großer Einfluss der Messfehler ergeben dürfte [87].

Für die Approximation kann also der Kapillartransportkoeffizienten im hygroskopischen Feuchtebereich auf $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s festgelegt werden. Dieser ist dem mittleren Sorptionswassergehalt bei der Diffusionsmessung im Feuchtebereich (50 / 93 % r. F.), also der Sorptionsfeuchte bei ca. 70 % r. F. zugeordnet. Da für die meisten Baustoffe nur der Wassergehalt bei 80 % r. F. bekannt ist, ist es sinnvoll, diesen Wert mitzuverwenden. Somit ergibt sich für die exponentielle Approximation des Kapillartransportkoeffizienten eine Funktion, die bei u_{80} mit einem Wert von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s anfängt und - abhängig vom Wasseraufnahmekoeffizient des Materials - bei u_f mit einem entsprechend höheren Wert endet. In Gleichung (15) wird aber von einer Exponentialfunktion ausgegangen, die fiktiv bei $u = 0$ beginnt. Gleichung (15) ergibt sich so durch Multiplikation mit dem Faktor $u_f/(u_f - u_{80})$ zu:

$$D_{w,s}(u_f) = \frac{K \cdot \pi \cdot A^2 \cdot \ln(D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0))}{4 \cdot u_f \cdot (u_f - u_{80})} + D_{w,s}(u_0) \quad (19)$$

u_{80} [kg/m ³]	Sorptionswassergehalt bei 80 % r. F. (Bezugsfeuchtegehalt)
$D_{w,s}(u_0)$ [m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich, stoffunabhängig auf $2 \cdot 10^{-10}$ m ² /s festgesetzt

Ein Umstellen von Gleichung (19) ergibt:

$$\frac{4 \cdot (D_{w,s}(u_f) - D_{w,s}(u_0))}{\pi \cdot K \cdot \ln(D_{w,s}(u_f)/D_{w,s}(u_0))} = \frac{A^2}{u_f \cdot (u_f - u_{80})} \quad (20)$$

Die rechte Seite von Gleichung (20) ist bekannt, die linke nur von $D_{w,s}(u_f)$ abhängig. Gleichung (20) ist in **Bild 22** dargestellt. Bei Kenntnis des Wasseraufnahmekoeffizienten, der freien Wassersättigung und des Bezugsfeuchtegehaltes kann somit $D_{w,s}(u_f)$ auf einfache Weise graphisch bestimmt werden kann. Problematisch wird dieser Ansatz erst bei Materialien, deren Wasseraufnahmekoeffizient relativ niedrig ist. Der Wert für die stoffunabhängige Oberflächendiffusion ist dann zu hoch. Dann muss durch iterative Anpassung der Kapillartransportkoeffizient herabgesetzt werden, sonst würde der geringe Wasseraufnahmekoeffizient nicht zutreffend wiedergegeben werden. In der Praxis geht es dann meist um reine Diffusionsbetrachtungen mit einem unwesentlichen Flüssigtransportanteil.

Kapillare Trocknung

Analog zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme lassen sich aus der Beobachtung des Trocknungsverhaltens eines anfangs wassergesättigten Versuchskörpers Informationen über die Kapillartransportkoeffizienten für den Weiterverteilungs- bzw. Trocknungsvorgang gewinnen. Trägt man ähnlich wie beim kapillaren Wasseraufnahmeversuch nach DIN 52 617 [26] die flächenbe-

zogene Änderung des Wassergehaltes während des Austrocknungsvorganges im Wurzelzeitmaßstab auf, so ergibt sich ein für alle Baustoffe ähnliches Verhalten. Es zeigt sich ein vom linearen \sqrt{t} -Verhalten abweichender Verlauf. Grund dafür ist, dass es sich beim Austrocknen um eine Überlagerung aus Diffusion und kapillarem Flüssigtransport handelt. Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich nach Krischer [81] unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren der Probe nachzuführen, muss die Verdunstung bei konstanten äußeren Klimarandbedingungen an der Oberfläche nahezu konstant

Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich nach Krischer [81] unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem

Inneren der Probe nachzuführen, muss die Verdunstung bei konstanten äußeren Klimarandbedingungen an der Oberfläche nahezu konstant bleiben. In diesem ersten Abschnitt der Trocknung

Tabelle 6: Übersicht über die feuchtetechnischen Kennwerte der untersuchten Materialien gemäß Ziffer 4.

Material	Rohdichte	Diffusionswiderstandszahl	Sorptionsfeuchten		freie Sättigung	Wasseraufnahmekoeffizient	Kapillartransportkoeffizient, Saugen	Faktor $D_{w,s}/D_{w,t}$
	ρ [kg/m ³]	μ [-]	u_{80} [kg/m ³]	u_{95} [kg/m ³]	u_f [kg/m ³]	w-Wert [kg/m ² √h]	$D_{w,s}(u_f)$ [m ² /s]	[-]]
Baumberger Sandstein	1980	20	36	58	210	2,5	$1,51 \cdot 10^{-7}$	2
Kalksandstein	1900	28	22	128	222	3,2	$3,14 \cdot 10^{-7}$	5
Porenbeton	600	10	11	50	425	5,6	$1,67 \cdot 10^{-7}$	3
Rüthener Sandstein	1950	17	12	17 ¹⁾	200	17	$1,11 \cdot 10^{-5}$	3

1) bei 90% r.F.

lässt sich die Verdunstungsrate ähnlich dem Wärmeübergang durch

$$\dot{m}_v = \beta_p (p_L - p_0) \quad (21)$$

\dot{m}_v [kg/m²s] Wasserdampfstrom-

β_p [kg/m²sPa] dichte
Wasserdampfübergangskoeffizient
 p_0 [Pa] Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche
 p_L [Pa] Wasserdampfpartialdruck der Umgebung

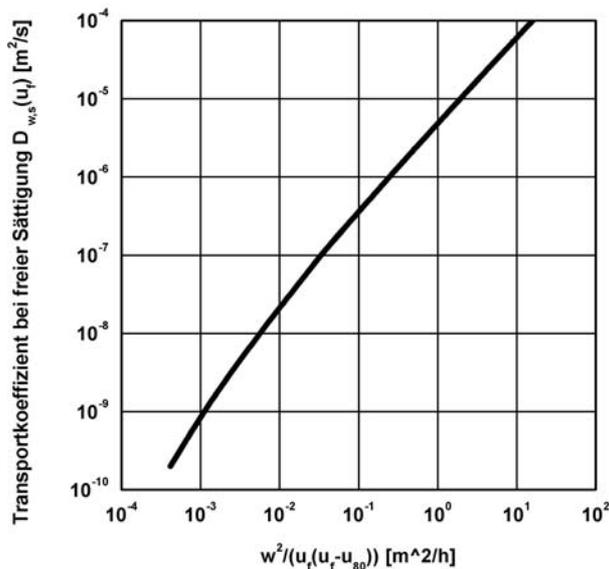


Bild 22: Graphische Ermittlung des Transportkoeffizienten für das kapillare Saugen bei freier Wassersättigung.

Es gilt folgender Zusammenhang zwischen den Standardmaterialparametern (w -Wert, freie Wassersättigung, Bezugsfeuchtegehalt) und dem gesuchten Flüssigtransportkoeffizienten $D_{w,s}(u_f)$.

$$\frac{4(D_{w,s}(u_f) - D_{w0})}{\pi \cdot K \cdot \ln(D_{w,s}(u_f)/D_{w0})} = \frac{w^2}{u_f \cdot (u_f - u_{80})}$$

Durch Einsetzen der Standardmaterialparametern kann der Wert für $D_{w,s}(u_f)$ direkt abgelesen werden.

beschreiben, wobei β_p näherungsweise aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden kann [99]:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha_c \quad (22)$$

α_c [W/m²K] konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Da der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Der Wassergehalt und die relative Luftfeuchte an der Stoffoberfläche gehen zurück.

Nachdem sich für die meisten Baustoffe die Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang gut mit einer Exponentialfunktion approximieren lassen, erscheint es sinnvoll, diesen Ansatz auch für den Trocknungsvorgang anzuwenden. Im

hygroskopischen Feuchtebereich, in dem der Flüssigtransport im Sorbatfilm abläuft, ist eine Unterscheidung in Saugen und Weiterverteilen physikalisch nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird derselbe Wert von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s beim Bezugsfeuchtegehalt zugrundegelegt. Somit ergibt sich für die exponentielle Approximation des Kapillartransportkoeffizienten für den Trocknungsvorgang eine Funktion, die ebenfalls bei u_{80} mit einem Wert von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s anfängt und - abhängig von den Ergebnissen der Trocknungsversuche - bei u_f mit einem entsprechend höheren Wert endet.

Die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung können durch einfache Trocknungsversuche ermittelt werden. Vom zu untersuchendem Material werden rechteckige Proben bis zur freien Sättigung in Wasser gelagert. Anschließend erfolgen eine Abdichtung aller Oberflächen - nicht jedoch die Verdunstungsfläche - mit einem wasserdampfundurchlässigen Material und eine Lagerung in einem Raum mit konstantem Raumklima. Um Abkühlungseffekte - bedingt durch die Verdampfung und somit beeinflussende Temperatureffekte - zu vermeiden, sind die Proben zusätzlich noch seitlich thermisch zu dämmen [3]. Die über die noch verbleibende Verdunstungsfläche erfolgende Austrocknung wird in regelmäßigen Abständen gravimetrisch erfasst. Die so experimentell gewonnenen Ergebnisse dienen als Grundlage für die folgende rechnerische Ermittlung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung mit einem Feuchte-transport-berechnungsprogramm. Für diese rechnerische Ermittlung wird WUFI eingesetzt. Da es sich beim Austrocknungsprozess um eine Überlagerung aus Flüssigtransport und Diffusion handelt, muss neben der freien Wassersättigung und dem Bezugsfeuchtegehalt auch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Materials bekannt sein. Bei der Ermittlung der Transportkoeffizienten für den Weiterverteilungsprozess werden die gemessenen und gerechneten Massenverläufe miteinander verglichen.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, bei der iterativen Bestimmung der Weiterverteilungskoeffizienten $D_{w,t}(u_f)$ als Startwert die aus dem w -Wert ermittelten Transportkoeffizienten des Saugvorganges einzusetzen. Für die Bestimmung von $D_{w,t}$ sind zwei Schritte durchzuführen. Zuerst muss der an der Verdunstungsfläche vorherrschende Wasserdampfübergangskoeffizient bzw. der über Gleichung (22) damit verbundene Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden. Dazu wird dieser schrittweise erhöht, bis für den ersten Trocknungsabschnitt die berechneten Gewichtsverläufe mit den Messungen übereinstimmen. Eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Wasserdampfübergangskoeffizienten kann erreicht werden, wenn man für die Austrocknung als Anfangswassergehalt anstatt der freien Sättigung die Vakuumsättigung wählt. Die Dauer des ersten Trocknungsabschnittes wird damit verlängert. Als zweiter Schritt wird der Kapillartransportkoeffizient $D_{w,t}(u_f)$ bei freier Sättigung solange angepasst, bis sich für die weitere Trocknung eine

Material	Mittlerer Sorptionsfeuchtegehalt bei 80 % rel. Feuchte [kg/m ³]	Flüssigtransportkoeffizient D_{wo} [m ² /s]
Baumberger	31	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Obernkirchner	2,7	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Rüthener	11	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Sander	18	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Gips	7,1	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Kalksandstein	24	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Porenbeton	44	$1,1 \cdot 10^{-10}$
Ziegel	2,9	$2,6 \cdot 10^{-10}$

Tabelle 7: *Flüssigkeitstransportkoeffizienten der Oberflächendiffusion für bestimmte Materialien aus [83]. Für die Berechnung sind isotherme Diffusionsmengen im Trocken – und Feuchtbereich sowie die Kenntnis der Sorptionsisotherme notwendig.*

minimale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf ergibt. Mit etwas Übung erreicht man bereits nach zwei bis vier Rechenläufen (je ca. 1 min Rechenzeit) eine recht gute Übereinstimmung. **Bild 23** zeigt die Durchführung der gesamten Approximation nochmals schematisch.

In Bild 24 ist der Einfluss der verschiedenen Parameter auf das rechnerisch ermittelte Trocknungsverhalten am Beispiel des Porenbetons dargestellt. Der Einfluss der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird erst dann bemerkbar, wenn der Wassergehalt soweit abgefallen ist, dass der Flüssigtransportanteil nicht mehr dominant ist. Der Wärmeübergangskoeffizient bzw. der damit verknüpfte Wasserdampfübergangskoeffizient ist für den Zeitpunkt des Abknickens nach dem ersten Trocknungsabschnitt verantwortlich. Die Trocknungsgeschwindigkeit steigt mit höherem Wasserdampfübergangskoeffizient, denn die Verdunstungsrate wird sowohl von der Wasserdampfpartialdruckdifferenz als auch vom Wasserdampfübergangskoeffizienten β bestimmt.

4.3.2. Vergleich mit Messungen und Anwendungsbeispiele

Die hier gezeigten Approximationsmethoden sollen anhand von einfachen Laborexperimenten und

durch Vergleich von Rechnungen mit exakten und genäherten Kennwerten evaluiert werden. Die feuchtetechnischen Grundkennwerte der untersuchten Materialien sind in aufgelistet. Mit diesen Angaben lassen sich die für hygrothermische Berechnungen benötigten weiteren Kennwerte bestimmen. Wie aus der Tabelle ersichtlich, beinhaltet die Palette der untersuchten Materialien recht unterschiedliche Baustoffe (verschiedene Natursandsteine, Ziegel und Kalksandstein). In der Auswahl sind sowohl extrem sorptionsfähige Materialien, Materialien mit sehr niedrigem Sorptionswassergehalt, als auch solche mit kleinem Wasseraufnahmekoeffizienten (Sander Sandstein mit $1,3 \text{ kg/m}^2\text{h}$) bis zu einem recht großen w -Wert vorhanden. Um die Gültigkeit der gewählten Approximationsmethoden zu zeigen, sind in Tabelle 7 für einige Materialien die berechneten (bestimmt aus einem rechnerischen Aufsaugversuch mit dem approximierten Transportkoeffizienten) und Wasseraufnahmekoeffizienten, inklusive der resultierenden Abweichung, aufgelistet. Durch den exponentiellen Ansatz für die Flüssigtransportkoeffizienten sind die beiden w -Werte nicht immer identisch. Die Abweichung beträgt aber in keinem Fall mehr als $\pm 5 \%$. Das ist vergleichbar mit der messtechnischen Unsicherheit. Die verwendeten Transportkoeffizienten bei freier Wassersättigung sind in **Tabelle 6** aufgelistet.

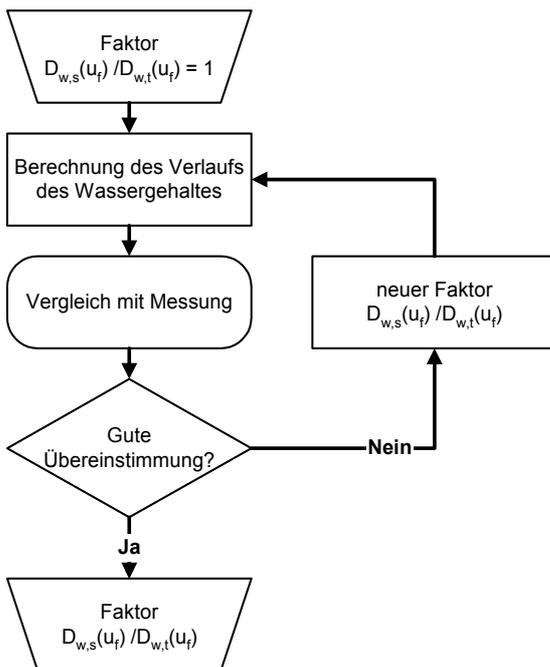


Bild 23: Ablaufschema der iterativen Bestimmung des Transportkoeffizienten $D_{w,t}(u_f)$ für die kapillare Trocknung bzw. des Faktors $D_{w,s}(u_f)/D_{w,t}(u_f)$ bei freier Wassersättigung.

Bei der Ermittlung der Transportkoeffizienten für den Weiterverteilungsprozess werden die bei konstanten Klimarandbedingungen gemessenen und gerechneten Massenverläufe der Austrocknung einer gesättigten Probe miteinander verglichen. Bei der iterativen Bestimmung des Weiterverteilungskoeffizienten $D_{w,t}(u_f)$ ist als Startwert der aus dem w -Wert ermittelte Transportkoeffizient $D_{w,s}(u_f)$ des Saugvorganges einzusetzen. Der Faktor $D_{w,s}(u_f)/D_{w,t}(u_f)$ muss solange angepasst werden, bis sich auch für die weitere Trocknung eine minimale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf ergibt.

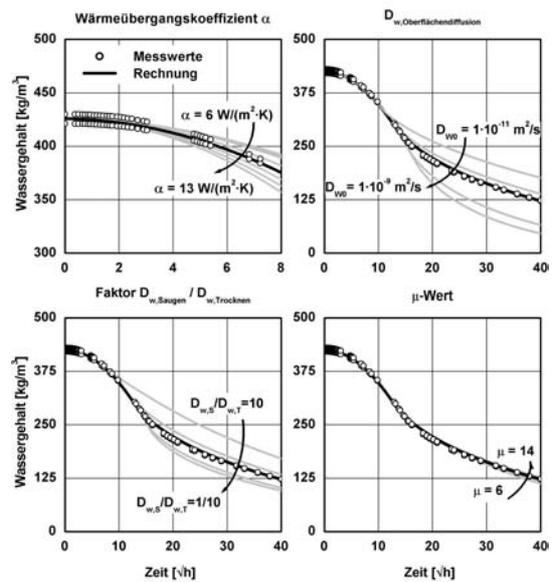


Bild 24: Zeitverlauf des Wassergehaltes einer anfangs gesättigten Probe aus Porenbeton bei einseitiger Austrocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern. Um die Einflüsse während der einzelnen Trocknungsabschnitte besser zu erkennen, ist der Verlauf des Wassergehaltes als Funktion der Wurzel der Zeit dargestellt.

Die Messwerte stammen von [153].

Tabelle 8: Vergleich der für die verschiedenen Materialien gemessenen und berechneten Wasseraufnahmekoeffizienten mit Angabe der Abweichung zwischen Messung und Rechnung.

Material	Wasseraufnahme w-Wert [kg/m ² √h]		Abweichung [%]
	gemessen	berechnet	
Baumberger	2,56	2,47	3,9
Rüthener	17,00	16,40	3,6
Sander	1,26	1,27	0,5
Kalksandstein	2,70	2,82	4,3
Ziegel	15,00	15,70	4,5
Porenbeton	6,20	6,30	1,6

Neben der integralen Wasseraufnahme ist auch die Verteilung des Wassergehalts innerhalb des Materials von Bedeutung. Deshalb sind für vier ausgewählte Materialien in

Bild 25 die mit Hilfe der approximierten Transportkoeffizienten berechneten Verteilungen den Messungen gegenübergestellt. Die gemessenen Wassergehaltsprofile wurden mit Hilfe einer NMR-Anlage bestimmt. Sowohl für den Baumberger Sandstein als auch für den Kalksandstein sowie den Ziegel weichen die mit den approximierten

Transportkoeffizienten berechneten Verteilungen nur geringfügig von den Messungen ab. Die Verlaufscharakteristik und die Aufnahmemenge werden mit nur geringen Abweichungen wiedergegeben. Lediglich beim Rüthener Sandstein ist eine geringe Abweichung zu beobachten. Diese Koeffizienten dienen nun als Startwerte für die iterativ zu berechnenden Flüssigtransportkoeffizienten des Trocknungsvorgangs. In **Bild 26** ist das Ergebnis der Messung des Trocknungsverlaufs für die gleichen Materialien als Punkte dargestellt. In allen Fällen ergibt sich ein recht ähnlicher typischer Verlauf mit unterschiedlich langem ersten Trocknungsabschnitt und anschließendem

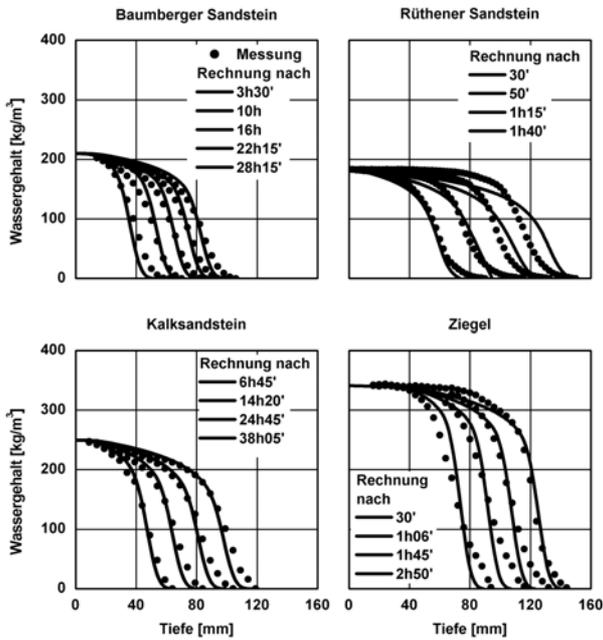


Bild 25: Wassergehaltsverteilungen über die Tiefe verschiedener Natursandsteinproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen eines Saugvorganges mit den angenäherten Flüssigtransportkoeffizienten.

Sowohl für den Baumberger Sandstein als auch für den Kalksandstein sowie dem Ziegel weichen die mit den approximierten Transportkoeffizienten berechneten Verteilungen nur geringfügig von den Messungen ab. Charakteristik und die Aufnahmemenge werden (mit nur geringen Abweichungen) korrekt wiedergegeben. Lediglich beim Rühthener Sandstein ist eine geringe Abweichung zu beobachten.

Die Messwerte stammen von [83].

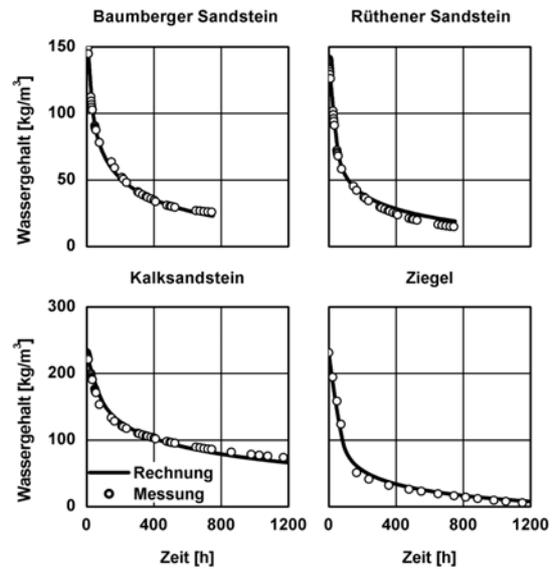


Bild 26: Zeitverlauf des Wassergehalts einer anfangs gesättigten Probe bei einseitiger Austrocknung unter Laborbedingungen (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte). Die Messergebnisse sind als Punkte dargestellt, die Rechenergebnisse als durchgezogene Linie.

In allen Fällen ergibt sich ein recht ähnlicher typischer Verlauf mit unterschiedlich langem ersten Trocknungsabschnitt (konstante Wassergehaltsabnahme) und anschließendem zweiten Trocknungsabschnitt. Die Messwerte stammen von [60].

zweiten Trocknungsabschnitt. Als durchgezogene Linien sind in diesen Diagramm die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen aufgeführt. Daraus resultieren die Transportkoeffizienten für die Trocknung bzw. das Verhältnis $D_{w,s}/D_{w,t}$ bei freier Wassersättigung aus **Tabelle 6**. Dabei zeigt sich, dass $D_{w,t}$ immer kleiner als $D_{w,s}$ ist.

Als weiteres Validierungsbeispiel sollen Berechnungen eines Aufsaugversuches an zwei porösen Materialien mit idealem kapillaraktiven Kontakt dienen. Untersuchungen, bei denen die Transportkoeffizienten und die Saugspannungskurve variiert wurden, zeigen nämlich einen dominanten Einfluss der Saugspannungskurve auf die berechnete Charakteristik des Wasseraufnahmeverlaufes. Dies verdeutlicht, dass eine möglichst genaue Bestimmung der Speicherfunktion für den überhygroskopischen Feuchtebereich von entscheidender Bedeutung ist, wenn bei zwei miteinander in Kontakt stehenden kapillaraktiven Baustoffen der Feuchte transport berechnet werden soll [76, 57]. Die Gültigkeit der hier vorgeschlagenen Näherungsverfahren soll anhand von Systemen aus unterschiedlichen Natursandsteinsorten gezeigt

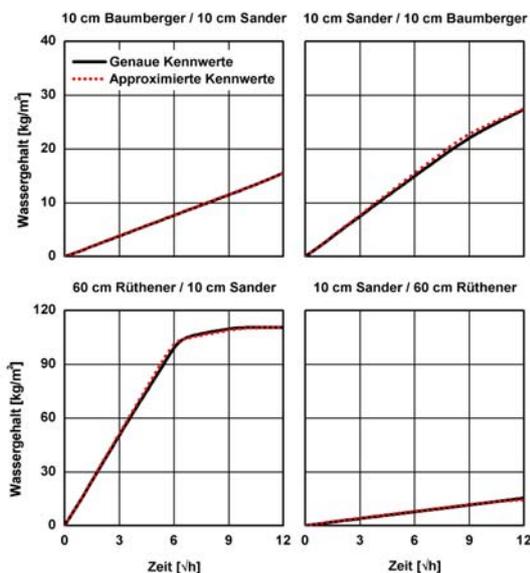


Bild 27: Berechneter Zeitverlauf der kapillaren Wasseraufnahme für Probekörper aus jeweils zwei verschiedenen Sandsteinen. Zwischen den Sandsteinen herrscht ein idealer hygrischer Kontakt.

Die Berechnungen werden mit genauen Kennwerten (Feuchtespeicherfunktion und Flüssigtransportkoeffizienten) und mit approximierten Kennwerten durchgeführt. Bei Verwendung der Approximationsmethode für Feuchtespeicherfunktion und Flüssigtransportkoeffizienten wird ein identisches Ergebnis erreicht wie unter Verwendung der exakt bestimmten Kennwerte.

werden. In **Bild 27** sind die mit WUFI erhaltenen Verläufe für die Wasseraufnahme dargestellt. **Bild 27** oben zeigt die Wasseraufnahme der Kombination aus 10 cm Baumberger Sandstein und 10 cm Sander Sandstein, unten die Kombination Sander/Rütthener Sandstein. Beide Kombinationen spiegeln, je nach Saugrichtung ein unterschiedliches Verhalten wieder. Bei den Berechnungen mit den approximierten Werten für die Feuchtespeicherfunktion und Flüssigtransportkoeffizienten wird ein quasi-identisches Ergebnis erreicht wie unter Verwendung von exakt bestimmten Kennwerten.

Alle bisher gezeigten Beispiele sind Anwendungen unter Laborbedingungen, aber auch unter realen Verhalten muss die Gültigkeit der vorgeschlagenen Approximationsmethoden überprüft werden. Dazu wird das Feuchteverhalten zweier nach Westen orientierter 25 cm dicker Natursandsteinwände (Sander und Baumberger Sandstein) über einen Zeitraum von fünf Jahren berechnet. Als klimatische Randbedingungen werden gemessene Stundenwerte eines für Holzkirchen typischen Jahres gewählt. Das Raumklima variiert sinusförmig zwischen 20 °C, 40 % relative Feuchte im Winter und 22 °C und 60 % relative Feuchte im Sommer. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt

auf der Außenseite 17 W/m²K, auf der Innenseite 8 W/m²K. Der kurzwellige Strahlungsabsorptionsgrad liegt bei 0,4. Für den Regenwasserabsorptionsgrad wird 0,7 angenommen. Die Innenseite ist mit einem dampfdichten Anstrich versehen. Für diese Beispiele sind in **Bild 28** die beiden errechneten Wassergehaltsverläufe verglichen. Bei Verwendung der angenäherten Speicher- und Transportkoeffizienten wird das reale hygrothermische Verhalten gut abgebildet. Hier ist über einen Zeitraum von fünf Jahren die Abweichung der beiden gerechneten Verläufe minimal. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den mit direkt bestimmten Kennwerten-

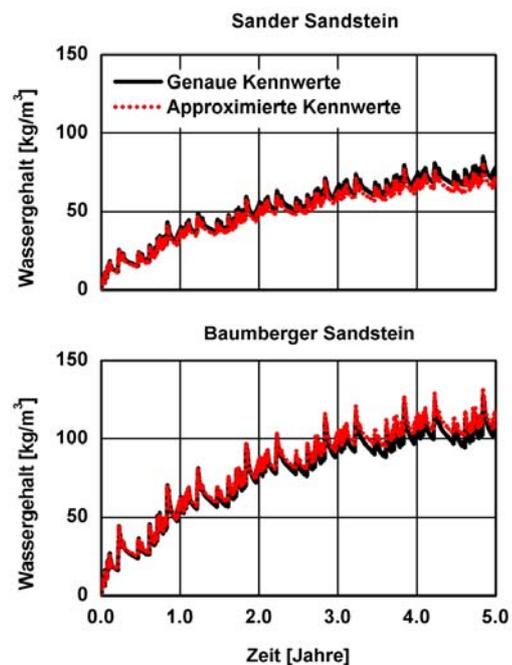


Bild 28: Berechneter Zeitverlauf des Wassergehaltes für zwei 25 cm dicke Natursandstein-Wandelemente unter Annahme realer Klimarandbedingungen über einen Zeitraum von fünf Jahren.

Die Berechnungen werden mit genauen Kennwerten (Feuchtespeicherfunktion und Flüssigtransportkoeffizienten) und mit approximierten Kennwerten durchgeführt. Auch bei Verwendung der angenäherten Speicher- und Transportkoeffizienten wird das reale hygrothermische Verhalten gut abgebildet. Hier ist über einen Zeitraum von fünf Jahren die Abweichung der beiden gerechneten Verläufe minimal.

Zugrundegelegte Daten:

Klima: Stundenwerte eines für Holzkirchen typischen Jahres und normale Innenraumnutzung

Die Innenseite ist mit einem dampfdichten Anstrich versehen. Die Materialdaten entsprechend den Angaben in Tabelle 6 oder entstammen der WUFI-Materialdatenbank [110].

bzw. mit angenährten Kennwerten durchgeführten Berechnungen zeigt, dass die hier vorgestellten Näherungsmethoden für die Feuchtespeicherung und die Flüssigtransportkoeffizienten ausreichend genau sind. Durch den Einsatz von solchen Näherungsverfahren sind somit sinnvolle Materialparameterstudien beim stochastischem Konzept mit einfachen

Grundkennwerten durchführbar. Diese sind im einzelnen:

- Rohdichte
- Porosität
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- feuchtebedingte Wärmeleitfähigkeitszunahme
- Sorptionsfeuchten bei 80 % und 95% relativer Luftfeuchte
- Freie Wassersättigung
- w-Wert
- Faktor $D_{w,s}/D_{w,T}$ (Trocknungsverhalten)

3.5 Entwicklung eines stochastischen Konzeptes

Bisher werden mögliche Unsicherheiten der Eingangsdaten aus hygrothermischen Berechnungen ausgespart, um die Wirkung der einzelnen physikalischen Prozesse jeweils isoliert betrachten zu können. Im folgenden soll statt dessen angenommen werden, dass die für die hygrothermischen Berechnungen benötigten Eingabedaten grundsätzlich „unsichere“ Größen darstellen. Zur Berechnung des gekoppelten instationären Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen sind eine Vielzahl von Kennwerten erforderlich, deren Bestimmung großenteils mit hohem messtechnischen Aufwand verbunden ist. Eine Schätzung des Einflusses dieser einzelnen Parameter würde weiterhelfen. Dies kann bei der Komplexität des Modells nur mit stochastischen Methoden angegangen werden. Als „Stochastik“ bezeichnet man dabei die Betrachtungsweise, welche die Zufälligkeit eines Sachverhaltes betont und in der Statistik bzw. Wahrscheinlichkeitstheorie, sowie den Natur- und Ingenieurwissenschaften, verwendet wird. Insbesondere wird die Stochastik als Oberbegriff zu Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie mit der Option eingeführt, dem Zufall eine Wahrscheinlichkeit zuzuordnen [33]. Die Techniken, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, sind die sogenannte differentielle Sensitivitätsanalyse (DSA) und die wahrscheinlichkeitstheoretische Analyse bzw. die Monte Carlo Analyse (MCA).

Der Weg vom deterministischen zum stochastischen Konzept kann der schematischen Darstellung aus **Bild 29** entnommen werden. Der Übergang erfolgt in drei Stufen:

- Stufe 1: Definition der hygrothermischen Problemkategorie.
- Stufe 2: Auswahl der sensiblen Eingabedaten mit Hilfe der 2-Punkt-Methode.
- Stufe 3: Differentielle oder wahrscheinlichkeitstheoretische Sensitivitätsanalyse

Der bisherige deterministische Ansatz erlaubt es grundsätzlich, sich ein Bild von Art und Umfang der Belastung eines Bauteils oder einer Konstruktion zu machen. Deshalb steht am Anfang der Unsicherheitsanalyse eine deterministische Untersuchung mit einer möglichst genauen Schätzung der Eingabedaten. Aus den Ergebnissen der deterministischen Berechnung ergibt sich die für den vorliegenden Fall maßgebliche Problemkategorie (Stufe 1 in **Bild 29**).

Mit der jeweiligen Problemkategorie ist, wie oben bereits erläutert, ein entsprechender typischer Kurz-Klimazyklus verknüpft. Nun besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die einzelnen Parameter aus dem deterministischen Ansatz in verschiedenen Kombinationen zu variieren und deren jeweilige Wirkung zu bestimmen. Die Zahl der möglichen Kombinationen erreicht aber leicht eine Größenordnung, bei der die Durchführung und die Auswertung einer Unschärfeanalyse Schwierigkeiten bereitet. Um den zeitlichen Aufwand und die Anzahl der Rechnungen möglichst gering zu halten, wird für das zu untersuchende Bauteil nur eine einfache singuläre Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Zwei-Punkt-Methode).

Zwei-Punkt-Methode

Ausgehend vom Standardfall wird untersucht, wie weit ein einzelner Parameter bei Konstanz der übrigen Eingabedaten das Ergebnis beeinflusst. Dafür wird mit dem Kurz-Klima-zyklus die Berechnung wiederholt, indem ein Eingabeparameter jeweils von P auf $P + \Delta P$ bzw. von P auf $P - \Delta P$ gesetzt wird. Das bedeutet, dass die Anzahl der Gesamtrechnungen zweimal so groß ist wie die der Eingabeparameter. Um einen deutlichen Effekt zu beobachten, wird vorgeschlagen, soweit vorhanden, für ΔP die doppelte Standardabweichung zu wählen.

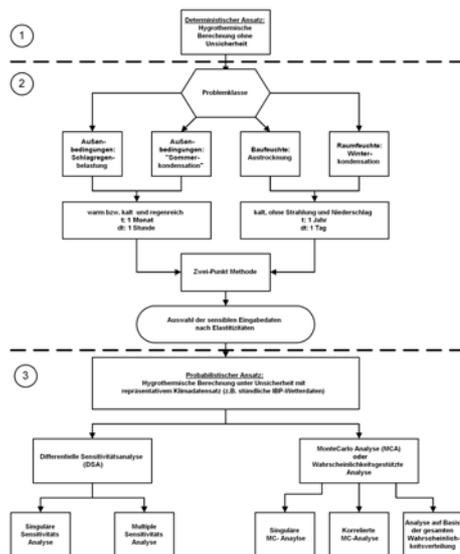


Bild 29: Schematische Darstellung des Weges vom deterministischen zum stochastischen Konzept.

Der Übergang erfolgt in drei Stufen:

Stufe 1: Definition der hygrothermischen Problemkategorie.

Stufe 2: Auswahl der sensiblen Eingabedaten mit Hilfe der 2-Punkt-Methode.

Stufe 3: Differenzielle oder wahrscheinlichkeitsgestützte Sensitivitätsanalyse

Bei dieser sogenannten „Zwei-Punkte-Methode“ wird ausgehend vom wahrscheinlichsten Wert zusätzlich ein pessimistischer und ein optimistischer Wert für die entsprechende Einflussgröße geschätzt. Durch die Kombination aller möglicher Ausprägungen sämtlicher Parameter ergibt sich eine Vielzahl alternativer Ergebnisse für das jeweilige Bewertungskriterium (z.B. Feuchtebilanzen). Der Einfluss der jeweiligen Eingabegröße auf das entsprechende Beurteilungskriterium wird festgehalten und bewertet. Um den Einfluss der verwendeten Maßeinheit auszuschalten, wird anstelle von partiellen Ableitungen die sogenannte Elastizität verwendet. Abweichend von dem im Baubereich gültigen Verständnis wird die Elastizität in dieser Arbeit wie folgt mathematisch definiert. Die Elastizität $E(U, V)$ einer Eingangsgröße V in bezug auf eine Auswertegröße U ist gleich dem Verhältnis der relativen Änderungen:

$$E(U, V) = \frac{\Delta U / U}{\Delta V / V} \quad (23)$$

Man verwendet dabei die relativen Änderungen (in Prozent), um Ursache (z.B. Veränderungen des w -Wertes) und Wirkung (z.B. Austrocknungszeiten) vergleichbar zu machen. Werden diese nach ihrem Betrag, Vorzeichen und unter Berücksichtigung der Häufigkeit, mit der sie auftreten, geordnet und graphisch in Form einer Verteilungsfunktion abgebildet,

so erhält man ein einfaches Risikoprofil. Nach diesem Schritt (Stufe 2 in Bild 29) können diejenigen Eingabeparameter herausgefunden werden, die den größten Einfluss auf das Ergebnis haben. Gegenseitige Abhängigkeiten sind nicht feststellbar, da immer nur ein einzelner Parameter für sich variiert wird. Bei der Ableitung eines solchen Risikoprofils wird auch implizit davon ausgegangen, dass alle Ausprägungen der unsicheren Parameter und damit auch alle Parameter-Kombinationen die gleiche Wahrscheinlichkeit haben. Ausgehend von den Ergebnissen der Stufen 1 und 2 können nun zwei verschiedene Ansätze zur Abschätzung der Unsicherheit verwendet werden, nämlich die differentielle Sensitivitätsanalyse und die wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann untersucht werden, wie empfindlich die Lösung eines zunächst auf Basis quasi sicherer Daten aufgestellten Problems reagiert, wenn für einzelne Parameter andere Werte angesetzt werden. Liegen Wahrscheinlichkeitsurteile über maßgebliche Einflussfaktoren vor, so werden diese im Rahmen wahrscheinlichkeitsgestützter Analysen berücksichtigt.

Differenzielle Sensitivitätsanalyse (DSA)

Mit Hilfe der differentiellen Sensitivitätsanalyse wird untersucht, wie empfindlich die Lösung einer zunächst auf der Basis quasi sicherer Daten aufgestellten hygrothermischen Berechnung reagiert, wenn einzelne Eingabedaten variiert werden. Üblicherweise findet die DSA dann Anwendung, wenn auf Basis sicherer Daten die betrachtete Konstruktion das Bewertungskriterium gerade erfüllt. Die Verfahren der Sensitivitätsanalyse können – abhängig davon, ob einzelne oder mehrere Eingangsdaten variiert werden – in singuläre und multiple Sensitivitätsanalysen unterteilt werden. Bei der Ermittlung singulärer kritischer Werte wird untersucht, wie weit ein einzelner Parameter bei Konstanz der übrigen Eingangsdaten gegenüber dem Ursprungswert verschlechtert werden kann, ohne dass die Konstruktion aus bauphysikalischer Sicht kritisch wird. Um den „kritischen“ Wert einer unsicheren Variable zu ermitteln, werden für alle übrigen Variablen die Ursprungsdaten angesetzt. Es ist zu klären, für welchen Wert der betrachteten Variable das Bewertungskriterium (z.B. ausgeglichene Wasserbilanz) gerade nicht mehr erfüllt ist. Im Vergleich zur traditionellen hygrothermischen Berechnung, die ausschließlich mit quasi sicheren, einwertigen Daten arbeitet, erlauben singuläre Sensitivitätsanalysen einen ersten Einblick in die Unsicherheitsstruktur einer Konstruktion. Auf der anderen Seite dürfen auch die Grenzen dieser Ansätze nicht übersehen werden. So wird die Möglichkeit, dass mehrere Parameter zugleich von ihren Ursprungswerten abweichen, nicht berücksichtigt. Diese Aufgabe kann jedoch bei Verwendung multipler Sensitivitätsanalysen gelöst werden.

Im Rahmen der multiplen Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einer gleichzeitigen Variation mehrerer Parameter auf die hygrothermische Risikobewertung

von Baukonstruktionen untersucht. Bei der Ermittlung kritischer Wertekombinationen wird dabei eruiert, inwieweit mehrere Parameter gleichzeitig von den ursprünglichen Plandaten abweichen dürfen, ohne das die Baukonstruktion bauphysikalisch „kritisch“ ist. Multiple Parametervariationen können sich dabei sowohl auf die Unsicherheit mehrerer Parameter zu einem Zeitpunkt als auch auf die Entwicklung eines Parameters im Zeitablauf beziehen. Werden nur zwei Größen variiert, so erhält man als Ergebnis einer solchen Rechnung beliebig viele „kritische“ Wertepaare. Diese können in einem Koordinatensystem, in dem beide Variablen abgetragen sind, durch einen Kurvenzug verdeutlicht werden, der die „vorteilhaften Kombinationen“ von den „unvorteilhaften“ abgrenzt. Bei der Ableitung wird vorausgesetzt, dass alle unsicheren Parameter und damit auch alle Parameter-Kombinationen die gleiche Wahrscheinlichkeit haben. Damit zeigt sich ein Problem der multiplen Sensitivitätsanalyse. Eventuell vorliegende Informationen über Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Abweichungen vom wahrscheinlichsten Wert werden vernachlässigt und durch eine Pauschalannahme ersetzt.

Monte Carlo Analyse (MCA) oder wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse

Die bisher behandelten Ansätze erlauben es grundsätzlich, sich ein Bild von Art und Umfang der mit einem Problem verbundenen Unsicherheiten zu machen. Aufschluss darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit die untersuchten Parameterveränderungen auftreten können, liefert eine Sensitivitätsanalyse hingegen nicht. Auch bleibt offen, welche Konsequenzen aus der Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf die hygrothermische Risikobewertung bei Feuchteberechnungsergebnissen von Baukonstruktionen zu ziehen sind. Für derartige Fälle können stochastische Simulationsverfahren eine Lösungshilfe darstellen. Diese Technik wird Monte Carlo Analyse (MCA) oder wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse genannt. Hierbei werden mögliche Kombinationen der unsicheren Parameterwerte durch künstliche Zufallsexperimente generiert. Die Zuverlässigkeit der Analyse steigt mit der Anzahl der wiederholten Berechnungsläufe. Für die sensiblen Eingabeparameter wird entweder eine Normal- oder Rechteckverteilung angenommen. Durch die MCA können etliche Einschränkungen und Schwächen der einfachen DSA überwunden werden. Diese konzeptionellen Stärken der MCA rufen in ihrer praktischen Anwendung aber auch Probleme hervor. Wie in vielen anderen Zusammenhängen auch, geht der Zuwachs an Abbildungsgüte des Modells zugleich mit einer Erhöhung der rechnerischen Anforderungen einher. Wie in **Bild 29** zu sehen ist, kann man zwischen drei Arten der MCA differenzieren, nämlich:

a) Singuläre MC-Analyse

Bei der singulären Monte-Carlo Analyse wird angenommen, dass die einzelnen Eingabeparameter unabhängig voneinander sind. Für einen einzelnen Parameter wird je nach vorliegender Information entweder eine Normal- oder eine Rechteckverteilung angenommen. Wenn man statistische Einflüsse von Materialparametern, bedingt etwa durch verschiedene Herstellerangaben zu einem Baustoff untersuchen will, ist die Annahme einer Rechteckverteilung gerechtfertigt. Materialparameterangaben eines konkreten Materials sind eher normalverteilt.

b) Korrelierte MC-Analyse

Viele der Eingabeparameter sind voneinander abhängig; eine singuläre Unsicherheitsanalyse kann diese Korrelation eventuell nicht korrekt berücksichtigen und unter Umständen zu einem falschen Ergebnis führen. So ist zum Beispiel die Feuchte-speicherfunktion abhängig vom Sorptionsfeuchtegehalt bei 80 %, bei 95 % r. F. und der freien Wassersättigung. Zugleich gehen diese Daten auch direkt in die Näherung für die Flüssigtransportkoeffizienten ein. Die Auswirkungen auf das Ergebnis, bedingt durch solche voneinander abhängigen Materialparameter, sind nur durch die korrelierte MCA zu erfassen:

$$\begin{aligned} u(\rho) &= f(\rho, u_{80}, u_{95}, u_f) \\ D_{w,Saugen}(u) &= f(u_{80}, u_f, w - \text{Wert}) \\ D_{w,Trocknen}(u) &= f(D_{w,Saugen}, \text{Faktor}) \end{aligned} \quad (24)$$

c) Analyse auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die sicherste, aber zugleich auch aufwendigste Art der Unsicherheitsanalyse ist diejenige auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Hier wird für jeden Eingabeparameter dessen Verteilung berücksichtigt. Der Zuwachs an Abbildungsgüte geht mit einer Vermehrung der Rechnungen einher. Zu wenige Rechnungen würden eventuell extreme Fälle nicht berücksichtigen.

3.6 Rechnerische Umsetzung

Die Umsetzung des stochastischen Konzeptes erfolgt mit dem eigens dafür entwickelten Programm WUFI-Star (**Stochastic Analysis Research**). Die einzelnen Bestandteile bzw. Module werden im folgenden nur kurz beschrieben, da der Schwerpunkt nicht auf die Programmiertechnik und eine mögliche Nachprogrammierung gelegt wird, sondern auf die Darstellung von deren Funktionen und Möglichkeiten. WUFI-Star besteht aus einem Pre- und Post-Prozessor sowie einem Rechenmodul auf Basis des Programms WUFI-3.1 [110]. Ziel von WUFI-Star ist

es, das stochastische Konzept aus **Bild 29** zu automatisieren. Zum besseren Verständnis der folgenden Module ist eine schematische Darstellung der rechnerischen Umsetzung Bild 30 zu entnehmen.

Die für die Monte Carlo Analyse benötigten Zufallszahlen werden mit Hilfe der Zufalls-Funktion (*Random*) aus Delphi 5 erzeugt. Bei dieser Funktion handelt es sich um einen affin-linearen-Kongruenz-generator. Er liefert Zufallszahlen im Bereich zwischen 0 und 1. In [116] wird dieser ausführlich getestet und verschiedenen statistischen Tests unterworfen. Die verwendete Generierung von normalverteilten Zufallszahlen basiert auf der Transformation gleichverteilter Zufallszahlen mit der inversen Verteilungsfunktion nach dem Box-Müller-Verfahren. Herleitung und Beweis finden sich in [7, 78, 116]. Zu erwähnen ist, dass das rechnerische Konzept so ausgelegt ist, das es im „Single-Mode“ (nur 1 PC) oder im „Multi-Mode“-Modus (mehrere PCs über Netzwerkverbindung) betrieben werden kann. Letzterer ist vor allem in Hinblick auf die Anzahl der Rechnungen, der Datenmengen und der Rechendauer vorteilhaft.

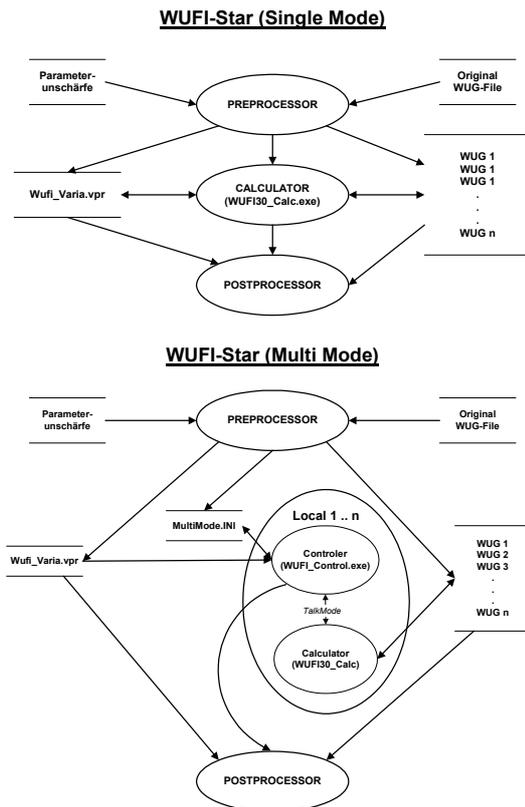


Bild 30: Schematische Darstellung der softwaretechnischen Umsetzung des probabilistischen Konzepts. Das Programm WUFI-Star arbeitet im Single-Mode (nur 1 PC) und im Multi-Mode (mehrere PCs über Netzwerkverbindung).

3.6.1 Preprozessor

Die Generierung der verschiedenen Variationen erfolgt mit dem Preprozessor WUFI-Star-Varia. Vom Benutzer sind über einen Eingabedialog für alle Größen (Material- und Übergangsparameter) jeweils Mittelwert und Standardabweichung σ sowie die Anzahl der zu erzeugenden Variationen zu definieren. Die entsprechend der vorliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung (Rechteck-, Dreieck- oder Normalverteilung) generierten Werte werden auf Gültigkeit (z.B. Porosität darf nicht größer als 100 % sein) überprüft und gegebenenfalls verworfen. Bei einer Verwerfung wird die Standardabweichung für die entsprechende Variable reduziert. Alle Informationen (Liste der erzeugten Dateien und zu variierende Größe inklusive der gewählte Verteilungen) sind in einem Steuerungsfile abgelegt. Der Preprozessor bietet folgende Modi an:

2-Punkt-Methode

Alle Eingabedaten werden einzeln entsprechend der angegebenen Standardabweichung jeweils einmal nach oben bzw. nach unten variiert. Dabei bleiben alle anderen Eingabedaten unverändert. Falls keine Standardabweichung bekannt ist, setzt WUFI-Star-Varia automatisch 20 % an. Je nach hygrothermischem Problemtyp werden die Berechnungen mit dem entsprechendem Kurz-Klimazyklus durchgeführt und anschließend für jeden Eingabeparameter die Elastizitäten ermittelt.

Abschätzung der Genauigkeit durch korrelierte MCA auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsdichte

Alle Eingabedaten werden gemeinsam n-mal ($n = \text{Anzahl der Variationen}$) nach der angegebenen Standardabweichung und Verteilung erzeugt und jeweils in einer WUFI-Projektdatei gespeichert. Je nach hygrothermischer Problemkategorie werden die hygrothermischen Berechnungen mit dem entsprechendem Kurz-Klimazyklus durchgeführt und für die gewählte Bewertungsgröße anschließend die Mittelwerte und Standardabweichungen festgestellt.

Singuläre DSA

In diesem Modus zerlegt WUFI-Star-Varia die gewählten Eingabegröße die Strecke $[x - \sigma\sqrt{3} \dots x + \sigma\sqrt{3}]$ in n ($\sigma = \text{Standardabweichung}$) äquidistante Teile. Alle anderen Eingabeparameter bleiben unverändert.

Singuläre MCA

Der zur Variation vorgesehene Parameter wird - bei Beibehalten der übrigen Parameter - n-mal nach der angegebenen Verteilung und Standardabweichung erzeugt.

Korrelierte MCA

Alle zur Variation vorgesehenen Parameter werden - bei Festhalten der übrigen – gemeinsam n-mal nach der jeweils angegebenen Verteilung und Standardabweichung erzeugt.

MCA auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsdichte

Alle Eingabeparameter werden gemeinsam n-mal nach der jeweils angegebenen Verteilung und Standardabweichung generiert.

3.6.2 WUFI-Star-Calculator

Das Modul WUFI-Star-Calculator berechnet die mit WUFI-Star-Varia erzeugten Dateien entweder im Single-Mode (nur 1 PC) oder im Multi-Mode (mehrere PCs über Netzwerkverbindung). Basis ist das Programm WUFI-3.1. Um eine möglichst schnelle und effektive Schnittstelle zu schaffen wurde der ursprüngliche Rechenanteil extrahiert, hinsichtlich der Rechenlaufzeit optimiert und eine externe Ansteuerung implementiert [30].

Single-Mode

Die einzelnen in der Hauptprojektdatei WUFI_Varia.VPR aufgeführten WUG-Dateien werden im Single-Mode auf einem einzelnen PC nacheinander abgearbeitet. Dieser Modus ist nur bei der singulären DSA oder nicht allzu umfangreichen MCAs zu empfehlen.

Multi-Mode

Vorgesehen ist dieser Modus speziell für die umfangreiche Monte-Carlo-Analyse. Der Pre-processor erzeugt neben der Projektdatei WUFI_Varia.VPR eine Informationsdatei MultiMode.Ini. Zu Beginn sowie während der Ausführung des Projektes durchsucht das Programm-Modul WUFI-Star-Controller nach freien Rechnerkapazitäten. Im Hintergrund koordiniert es, welche Rechnungen abgearbeitet bzw. noch durchzuführen sind und verteilt diese an die entsprechenden PCs. Die Kommunikation erfolgt über einen speziellen Talkmodus. Somit lassen sich eine Vielzahl von Berechnungen über Nacht gleichzeitig abarbeiten.

3.6.3 Postprozessor

Die Auswertung der Daten erfolgt mit dem neu entwickelten Auswerteprogramm WUFI-Star-Post. Aus der Projektdatei WUFI_Varia.VPR werden die Ergebnisse aus den aufgeführten WUG-Dateien nacheinander eingelesen und die entsprechenden Kennwerte, wie etwa Mittelwerte, Standardabweichungen und Häufigkeitsverteilungen ermittelt. Zusätzlich lassen sich die Ergebnisse graphisch darstellen und miteinander vergleichen.

4. Genauigkeitsermittlung anhand von Beispielen

Die Umsetzung des stochastischen Konzeptes wird für die vier Problemtypen bzw. Problemkategorien anhand der folgenden Konstruktionen beispielhaft gezeigt. Zwei Beispiele dienen in der Vergangenheit zur Validierung der deterministischen Berechnungen. Die anderen zwei stellen zur Zeit intensiv diskutierte Probleme dar.

4.1 Zugrundegelegte Beispiele

Geneigtes Dach

Als Beispiel für die Problemkategorie „winterliche Tauwasserbildung“ soll der in **Bild 31** links oben abgebildete Dachaufbau betrachtet werden. Bei von außen dampfdichten Dachkonstruktionen, wie beispielsweise Blechdächer oder Dächer mit dampfdichten Unterspannbahnen, galt bisher, dass eine Belüftung der Dämmung eine günstige Lösung darstellt. Energetisch günstiger wäre allerdings, wenn die gesamte Sparrenhöhe für Dämmzwecke genutzt werden könnte. Eine solche Konstruktion kann mit Hilfe einer Dampfsperre (s_d größer als 100 m) normgerecht durchgeführt werden. Praxisgerecht ist diese Konstruktion nicht, denn bereits durch kleinste Fehlstellen eindringende Feuchte bleibt im Dach und kann Schäden verursachen [137]. Aus diesem Grund wird heute mit Dampfbremsen gearbeitet, deren s_d -Wert im Bereich zwischen 1 bis 2 m liegt. Der feuchtetechnische Nachweis nach Glaser ist für solche Konstruktionen nicht geeignet, denn die pauschalierten Randbedingungen geben nicht die tatsächlichen Gegebenheiten wieder [104, 106].

Beim hier betrachteten Dach (mit 50 ° Neigung nach Norden orientiert) wird der 160 mm hohe Sparrenzwischenraum mit Zellulosefasern (angenommene Schüttdichte von 60 kg/m³) ausgefüllt. Auf der Holzschalung liegt eine dampfdichte, bituminöse Bahn. Der Dämmstoff hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/mK und einem μ -Wert von 1,5. Im Gegensatz zu mineralischen Faserstoffen besitzen Zellulosefasern eine gewisse Feuchtespeicherfähigkeit. Die Ausgleichwassergehalte bei 80 % und 95 % relativer Feuchte betragen 1 bzw. 4 Vol.-%. In sind sämtliche in die Berechnung eingehenden Eingabedaten aufgeführt. Zusätzlich sind die jeweils angesetzten Unsicherheiten angegeben. Die Dampfbremse wird durch eine 1 mm dicke Schicht mit entsprechenden μ -Werten berücksichtigt. Die abschließende, auf der Innenraumseite angebrachte Gipskartonplatte wird nur mit dem entsprechenden s_d -Wert von 0,15 m berücksichtigt [104]. Die Anfangsfeuchte der Baustoffe entspricht der Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte. Geprüft wird, inwieweit das im Winter anfallende Tauwasser im Sommer wieder abgeführt werden kann (Beurteilungskriterium ist also die Jahresfeuchtebilanz). Als klimatische Randbedingungen gelten entweder die IBP-Stundenwerte für das Jahr

1991 und normale Innenraumnutzung oder als Kurz-Klimazyklus die entsprechenden Tagesmittelwerte. Die Berechnungen beginnen im Oktober. Als Bewertungskriterien gelten die Erfüllung der Jahresfeuchtebilanz und die maximale Feuchtezunahme während des Beobachtungszeitraumes.

Natursandsteinwand

Frostschäden treten vor allem dann auf, wenn feuchte Bauteile häufigen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind [141]. Messungen an Wänden aus Natursteinmauerwerk ohne Innendämmung zeigen, dass nach einigen Zentimetern unter der Oberfläche ein Wassergehaltsmaximum erreicht wird, bevor der Wassergehalt relativ gleichmäßig bis zum hygroskopisch trockenen Zustand auf der Raumseite abnimmt. Ab einer bestimmten Tiefe bleibt der Wassergehalt das ganze Jahr über konstant, d.h. die instationäre Klimawirkung beschränkt sich auf die äußere Hälfte des Mauerwerks [105].

Als zweites Beispiel soll das Feuchteverhalten eines nach Westen orientierten 50 cm dicken Natursandstein-Wandelementes (Sander Sandstein) dienen. Dieses Beispiel (Wandaufbau in Bild 31 rechts

oben) ist in den letzten Jahren des öfteren als Validierungsbeispiel für instationäre Berechnungen, bei denen Schlagregen einwirkt, herangezogen worden [3, 83, 99]. Das Feuchteverhalten wird über einen Zeitraum von einem Jahr berechnet. Die gemessenen Stundenwerte eines für Holzkirchen typischen Jahres (1991) dienen als klimatische Randbedingung. Das Raumklima variiert sinusförmig zwischen 20 °C, 40 % relative Feuchte im Winter und 22 °C und 60 % relative Feuchte im Sommer. Für den Kurz-Klimazyklus werden ebenfalls Stundenwerte, allerdings nur für den Zeitraum 15. Dezember bis 15. Januar, herangezogen, da hier die wesentlichen Klimaparameter besonders ausgeprägt sind. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt auf der Außenseite 17 W/m²K, auf der Innenseite 8 W/m²K. Der kurzzeitige Strahlungsabsorptionsgrad liegt bei 0,4. Für den Regenwasserabsorptionsgrad wird 0,7 angenommen. Der raumseitige Gipsputz wird über einen entsprechenden s_d-Wert berücksichtigt. In *Tabelle 9* sind sämtliche in die Berechnung eingehenden Eingabedaten inklusive der jeweils angesetzten Unsicherheiten aufgeführt. Als Bewertungskriterien gelten die maximale Feuchtezunahme und der mittlere Wassergehalt im Bauteil während des Beobachtungszeitraumes.

Tabelle 9: Übersicht der Eingabedaten mit Angabe der Unsicherheiten und deren errechnete Elastizitäten (E1: Δu_{max} , E2: Δu_{Ende}) für das Beispiel eines gedämmten Daches (mit 50° nach Norden geneigt).

Oberflächenparameter

Parameter ¹⁾	außen			innen		
	Wert	E1	E2	Wert	E1	E2
1/α [m ² K/W]	1/19 ± 15 %	-0,3	-4,4	1/8 ± 15 %	0	0,05
s _d [m]	1000 ± 150	0	0	0,15 ± 0,05	-0,05	-0,02
a _k [-]	0,6 ± 0,1	-0,25	-4,2			
a _L [-]	0,3 ± 0,05	0	0			
a _R [-]	0					

E1 = Elastizität bez. Maximalwert
E2 = Elastizität bez. Endwert

Materialkennwerte

Parameter ¹⁾	Weichfaserplatte			Zellulosefaser (160 mm)			Dampfbremse: s _d 2 m (1 mm)		
	Wert	E1	E2	Wert	E1	E2	Wert	E1	E2
ρ [kg/m ³]	400 ± 40	0,05	0,5	60 ± 10	-0,1	-0,25	130 ± 10	0	0
Por. [-]	0,73 ± 0,1	0	0	0,95 ± 0,1	0	0			
c [kJ/kgK]	1500 ± 250	0	0	2500 ± 250	0,02	0,07	2300 ± 250	0	0
λ [W/mK]	0,09 ± 0,03	0,07	0,4	0,04 ± 0,01	-0,01	-0,5	2,3 ± 0,5		
Δ λ [%]	1,3 ± 0,25	0	0,09	0,74 ± 0,2	0,03	0	1,3 ± 0,25		
u ₆₀ [kg/m ³]	60 ± 10	-0,1	-1	10 ± 3	-0,1	-0,4			
u ₉₅ [kg/m ³]	90 ± 10 ²⁾	0,17	1,5	40 ± 10	0	0,2			
u _f [kg/m ³]	575 ± 50	0	0	430 ± 25	0	0,07			
μ (φ) [-]	μ (0): 200 ± 10% μ (25): 150 ± 10% μ (70): 30 ± 10% μ (100): 15 ± 10%	0 0 0 0	0 0 0 0	μ (0): 1,5 ± 10%	-0,14	-0,4	μ (0): 2000	-	-

¹⁾ Siehe Verzeichnis der Formelzeichen

²⁾ Bei 90 % r. F.

Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale

Bei zweischaligen Wänden übernimmt die Vorsatzschale den Witterungsschutz. Selbst ohne Luftschicht zwischen Außenschale und Kerndämmung bleibt, wenn hydrophobe Dämmstoffe verwendet werden und die Gesamtkonstruktion winddicht ist, der kapillare Feuchteeintrag bei Niederschlag auf die Vorsatzschale beschränkt [98]. Die hinter der Vormauer liegenden Bauteilschichten werden bei richtiger Ausführung vor Niederschlagswasser dauerhaft geschützt. Im Sommer kann jedoch eine Befeuchtung dieser Schichten durch die sog. Umkehrdiffusion stattfinden. Bei solarer Erwärmung der Vorsatzschale diffundiert die dort gespeicherte Regenfeuchte durch die Kerndämmung hindurch bis zur kühleren Tragschale und fällt dort als Tauwasser aus. Handelt es sich bei der Tragschale um Mauerwerk, wird dieses Tauwasser kapillar aufgenommen und in kühleren Perioden wieder abgegeben. Enthält die Innenschale jedoch feuchteempfindliche Materialien, wie z.B. Holzwerkstoffe, dann kann die sommerliche Umkehrdiffusion zu Problemen führen. Der kritische Wassergehalt, der bei Holzwerkstoffen nicht für längere Zeit überschritten werden sollte, liegt bei ca. 20 M.-% .

Am Beispiel des Wandaufbaus in Bild 31 links unten wird das Phänomen der sommerlichen Umkehrdiffusion berechnet. Als Innenschale dient eine Holztafelkonstruktion. Die Vorsatzschale besteht aus Klinkervormauerwerk. Der 12 cm dicke Spalt zwischen der Vormauerung und der Holzwerkstoffplatte der Tragschale ist voll mit hydrophobierter Mineralwollendämmung ausgefüllt.

Tabelle 11 führt sämtliche in die Berechnung eingehenden Eingabedaten auf. Zusätzlich sind die jeweils angesetzten Unsicherheiten angegeben. Betrachtet wird die Feuchtesituation in der Holzwerkstoffplatte über den Querschnitt einer nach Westen orientierten Wand. Für die Berechnungen werden das Raumklima entsprechend einer normalen Nutzung sowie Außenklimaverhältnisse für Holzkirchen (1991) zu Grunde gelegt. Für den Kurz-Klimazyklus werden ebenfalls Stundenwerte, allerdings nur für den Zeitraum 15. Juli bis 15 August, herangezogen.

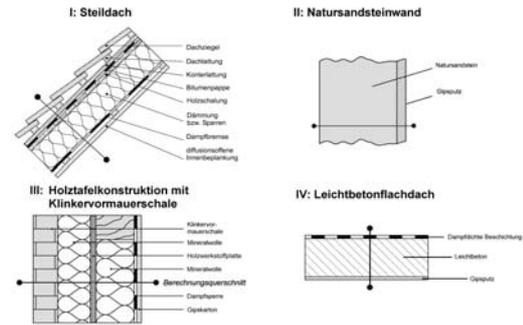


Bild 31: Konstruktiver Aufbau der gewählten Dach- und Wandbeispiele für die vier Problemkategorien nach Tabelle 4.

Leichtbeton-Flachdach

Ein klassisches Beispiel für die Demonstration hygrothermischer Rechenverfahren ist das Austrocknen eines Flachdaches aus Porenbeton. Da reine Dampfdiffusionsbetrachtungen nicht ausreichen, um das Austrocknungsverhalten von Flachdächern zu erklären, wurde Anfang der 80er Jahre ein Berechnungsverfahren vorgestellt [73], das durch Berücksichtigung des Kapillartransports in der Lage war, experimentelle Untersuchungsergebnisse aus den 60er Jahren [93] quantitativ nachzuvollziehen. Da dieser Dachaufbau in letzter Zeit durch Feuchteprobleme während der Austrocknung in südlichen Klimaregionen erneut die Aufmerksamkeit von Fachleuten erfahren hat, wird er hier exemplarisch für das hygrothermische Verhalten von massiven Leichtbeton-Flachdächern aufgegriffen.

In dieser Arbeit wird das Austrocknungspotential eines 20 cm dicken Leichtbeton-Flachdaches (Tabelle 12) mit einer anfänglichen Baufeuchte (20 Vol.-%) unter realen Klimabedingungen für Holzkirchen untersucht. Das Dach ist von außen mit einer dampfdichten, bituminösen Dachbahn abgedichtet. Auf der Rauminnenseite befindet sich ein Gipsputz, der mit einem s_d -Wert von 0,15 m berücksichtigt wird. Als Raumklimabedingungen gelten wieder die für eine normale Nutzung typischen Werte. Der Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite beträgt $1/8 \text{ m}^2\text{K/W}$, auf der äußeren Seite $1/19 \text{ m}^2\text{K/W}$. Für den kurzwelligen Strahlungsabsorptionsgrad der Dachhaut wird ein Wert von 0,7 angesetzt. Schlagregeneffekte werden aufgrund der wasserdichten Ausführung vernachlässigt. Die Rechnungen beginnen im April und werden für einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt. Als Bewertungskriterium gilt die Menge an ausgetrocknetem Wasser während des ersten Jahres.

Tabelle 10: Übersicht der Eingabedaten mit Angabe der Unsicherheiten und deren errechnete Elastizitäten ($E1: \Delta u_{\text{Ende}}$) für das Beispiel der 50 cm dicken Natursandsteinwand.

Oberflächenparameter

Parameter ¹⁾	Außen		innen	
	Wert	E1	Wert	E1
$1/\alpha$ [m ² K/W]	1/17 ± 15 %	0,1	1/8 ± 15 %	0,06
s_d [m]			0,15 ± 0,05	0,01
a_K [-]	0,7 ± 0,1	-0,03		
a_L [-]	0,9 ± 0,05	0		
a_R [-]	0,7 ± 0,1	0,5		

E1 = Elastizität bez. Δu_{Ende}

Materialkennwerte

Parameter ¹⁾	Sander (500 mm)	
	Wert	E2
ρ [kg/m ³]	2120 ± 50	0
Por. [-]	0,17 ± 0,015	0
c [kJ/kgK]	850 ± 100	0
λ [W/mK]	1,6 ± 0,1	-0,05
$\Delta \lambda$ [%]	8,0 ± 1,0	0
u_{80} [kg/m ³]	19 ± 2	-0,08
u_{95} [kg/m ³]	46 ± 5	-0,05
u_f [kg/m ³]	130 ± 20	-0,19
μ_{dry} [-]	33 ± 3	0,05
w-Wert [kg/m ² √h]	1,3 ± 0,25	1,1
$D_{\text{ws}}/D_{\text{wt}}$ [-]	3 ± 1	0,08

1) Siehe Verzeichnis der Formelzeichen

4.2 Berechnungsergebnisse

4.2.1 Geneigtes Dach

In **Bild 32** sind die Ergebnisse der 2-Punkt-Methode abgebildet, wobei auf der linken Seite die Resultate bei Durchführung mit realen Klimadaten zu sehen sind und auf der rechten Seite die bei Durchführung mit dem Kurz-Klimazyklus. Die Rechnungen werden mit den Eingabedaten entsprechend durchgeführt. Insgesamt

ergeben sich bei der 2-Punkt-Methode 69 verschiedene Fälle. Die Durchführung der Berechnung mit den „scharfen“ Eingabedaten unter realen Klimabedingungen ergibt eine gerade ausgeglichene Jahresfeuchtebilanz Δu_{end} mit einer maximalen Erhöhung Δu_{max} des Gesamtwassergehaltes während der Tauperiode von etwas über 0,4 kg/m². Diese beiden Größen dienen als weiteres Beurteilungskriterium (in **Bild 32** jeweils in der Mitte die Feuchtebilanz, jeweils unten die maximale Feuchtezunahme in der Gesamtkonstruktion). Es zeigt sich, daß die mit dem Kurz-Klimazyklus errechneten Verläufe die Tendenz richtig wiedergeben (rechts oben).

Tabelle 11: Übersicht der Eingabedaten mit Angabe der Unsicherheiten und deren errechnete Elastizitäten ($E1$: Wassergehaltsänderung der Holzwerkstoffplatte) für das Beispiel der Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale.

Oberflächenparameter

Parameter ¹⁾	Außen		innen	
	Wert	E1	Wert	E1
$1/\alpha$ [m ² K/W]	1/17 ± 15 %	0,37	1/8 ± 15 %	0,01
s_d [m]	0		0,15 ± 0,05	0
a_K [-]	0,68 ± 0,1	0,45		
a_L [-]	0,9 ± 0,05	0		
a_R [-]	0,7 ± 0,1	0,08		

E1 = Elastizität bez. Δu_{Ende} (Holzwerkstoffplatte)

Materialparameter

Parameter ¹⁾	Klinker (90 mm)		Mineralwolle (120 mm)		Holzwerkstoffplatte (20 mm)		Mineralwolle (140 mm)		Dampfbremse (1 mm)	
	Wert	E1	Wert	E1	Wert	E1	Wert	E1	Wert	E1
ρ [kg/m ³]	1900 ± 400	-0,15	60 ± 15	0,01	670 ± 70	0,04	60 ± 15	0,05	130 ± 40	0
Por. [-]	0,33 ± 0,03	0	0,95 ± 0,025	-0,05	0,60 ± 0,1	0	0,95 ± 0,03	0,05	0,0001 ± 10 %	0
c [kJ/kgK]	850 ± 200	-0,11	850 ± 100	0	1300 ± 300	0,04	850 ± 100	0,01	2300 ± 250	0
λ [W/mK]	0,6 ± 0,2	0,08	0,04 ± 0,01	0,2	0,09 ± 0,02	0	0,04 ± 0,01	0,14	2,3 ± 0,	0
$\Delta \lambda$ [%]	15 ± 3	0,03	1,0 ± 0,25	0,01	1,5 ± 0,5	0	1,0 ± 0,25	0,1	0	0
u_{80} [kg/m ³]	26 ± 6	0,09			86 ± 10	-0,5				
u_{95} [kg/m ³]	50 ± 10	-0,13			140 ± 20	1,0				
u_f [kg/m ³]	250 ± 50	-0,15			450 ± 50	-0,03				
μ (φ) [-]	μ (0): 10 ± 5	-0,06	μ (0): 1,3 ± 0,15	-0,25	μ (0): 240 ± 40 μ (40): 190 ± 20 μ (75): 50 ± 10 μ (100): 7 ± 2	0,01 0,01 0,02	μ (0): 1,3 ± 0,15	0,1	μ (0): 50000 ± 10%	0,1
w-Wert \sqrt{h} [kg/m ²]	3,8 ± 20 %	0,14								
D_{ws}/D_{wt} [-]	3 ± 1	0,01								

1) Siehe Verzeichnis der Formelzeichen

Tabelle 12: Übersicht der Eingabedaten mit Angabe der Unsicherheiten und deren errechnete Elastizitäten (E1: Wassergehalt nach 1. Jahr, E2: Austrocknungszeit) für das Beispiel des 20 cm Leichtbetonflachdaches.

Oberflächenparameter

Parameter ¹⁾	außen			innen		
	Wert	E1	E2	Wert	E1	E2
$1/\alpha$ [m ² K/W]	1/19 ± 15 %	-0,14	-0,28	1/8 ± 15 %	0,08	0,04
s_d [m]	1000 ± 150	0	0	0,15 ± 0,05	0,35	0,07
a_K [-]	0,7 ± 0,1	-0,13	-0,22			
a_L [-]	0,3 ± 0,05	0	0			
a_R [-]	0	0	0			

E1 ≡ Elastizität bez. $u(t=1a)$
E2 ≡ Elastizität bez. t bis $u(t)=u_{80}$

Materialparameter

Parameter ¹⁾	Leichtbeton (200 mm)		
	Wert	E1	E2
ρ [kg/m ³]	600 ± 50	-0,03	-0,01
Por. [-]	0,72 ± 0,1	0	0
c [kJ/kgK]	850 ± 100	0	0
λ [W/mK]	0,1 ± 0,02	0,03	0
$\Delta \lambda$ [%]	3,7 ± 0,5	0,04	0
u_{80} [kg/m ³]	11 ± 2	0,06	0,08
u_{95} [kg/m ³]	50 ± 5	0,03	0,02
u_f [kg/m ³]	425 ± 25	0,60	0,11
μ_{dry} [-]	8 ± 2,5	0,01	0,09
w-Wert [kg/m ² √h]	5,64 ± 2,0	-0,16	0,02
D_{ws}/D_{wt} [-]	3 ± 1	0,07	0,02

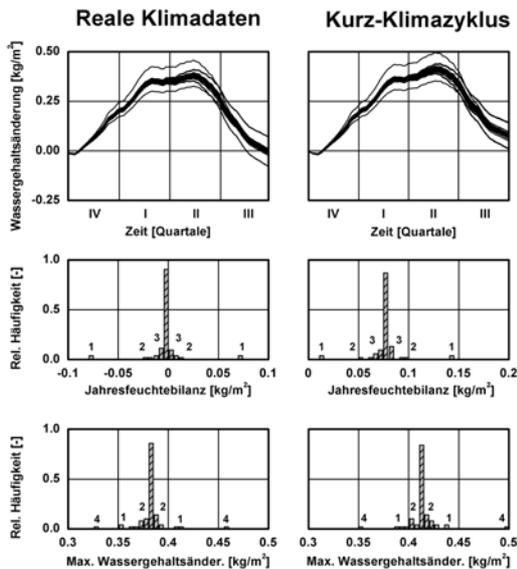


Bild 32: Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober über einen einjährigen Zeitraum (oben) und relative Häufigkeit von Jahresfeuchtebilanz (mittig) und maximaler Wassergehaltsänderung (unten) für einen realen (links) und verkürzten Klimazyklus (rechts), berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie I.

Zugrundegelegtes Beispiel:

Satteldach, Neigung 50 Grad gegen Norden. Geometrie- und Materialdaten gemäß Tabelle 7.

Die Ziffern in den Häufigkeitsverteilungen kennzeichnen die Eingabedaten mit der höchsten Elastizität:

- 1: Äußerer Wärmeübergangswiderstand und kurzweiliger Strahlungsabsorptionsgrad.
- 2: Feuchtespeicherfunktion des Weichholzes.
- 3: Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit des Weichholzes sowie Feuchtespeicherfunktion und Wärmeleitfähigkeit der Zellulose.
- 4: μ -Wert der Dampfbremse.

Ein Vergleich zwischen den Häufigkeitsverteilungen bei Durchführung mit den realen Klimadaten bzw. mit dem Kurz-Klimazyklus belegt, dass sowohl mit dem einen als auch mit dem anderen Klimadaten-satz die selben sensiblen Eingabedaten gefunden werden. Diese sind in den Häufigkeitsverteilungen mit Ziffern gekennzeichnet. Bei der Beurteilung der Feuchtebilanz zeigt sich, dass vor allem der kurzweilige Absorptionsgrad und der Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha$ den relativ größten Einfluss haben.

Beide beeinflussen das Temperaturverhalten der Dachoberhaut. Die maximale Feuchtezunahme wird allerdings durch den s_d -Wert der raumseitigen Dampfsperre bestimmt. Die wichtigsten Materialparameter sind die Feuchtespeicherfunktion und die Wärmeleitfähigkeit von Holz und von der Zellulosefaser-Dämmung.

Für beide Beurteilungsgrößen werden jeweils die Elastizitäten E1 (bez. Maximalwert) und E2 (bez. Feuchtebilanz) berechnet. Die resultierenden Werte für den Kurz-Klimazyklus sind in mit angegeben. Beide Elastizitäten belegen, dass die Oberflächenparameter den größten Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben. Sowohl der Wärmeübergangswiderstand wie auch der kurzweilige Strahlungsabsorptionsgrad haben in bezug auf die Feuchtebilanz eine Elastizität von annähernd -4. Das bedeutet, dass es bei einer Erhöhung dieser Werte zu einer „positiveren“ Feuchtebilanz käme. Unter positiver Feuchtebilanz versteht man im Allgemeinen, dass die Konstruktion austrocknet, also ein positives Ergebnis für die Gesamtbewertung. Bei Holz und bei Zellulosefaser sind die Materialparameter mit der höchsten Elastizität die Wärmeleitfähigkeit und diejenigen, die den Verlauf der Feuchtespeicherfunktion im zu erwartenden Feuchtebereich bestimmen, also u_{80} und u_{95} . Alle anderen Parameter, wie Porosität, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeitszuschlag und feuchteabhängige Diffusionswiderstände haben einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis. Von allen Materialparametern hat die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Dampfbremse die höchste Elastizität, vor allem hinsichtlich der maximalen Wassergehaltszunahme.

In **Bild 33** sind die Resultate der differentiellen Sensitivitätsanalyse (DSA) für die beiden Oberflächenparameter mit der größten Elastizität laut 2-Punkt-Methode (oben: kurzweiliger Strahlungsabsorptionsgrad a_k , unten: Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha_a$) dargestellt. Die linke Bildhälfte gibt jeweils die zeitliche Entwicklung des Gesamtwassergehaltes, die rechte Bildhälfte die Abhängigkeit des maximalen Wassergehaltes bzw. der Feuchtebilanz vom variierten Parameter wieder.

Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgröße. Die Ergebnisse der DSA stützen den gleichwertigen Einfluss der beiden Oberflächenparameter und deuten darauf hin, dass diese wesentlich die Genauigkeit des Ergebnisses bestimmen. Der Verlauf des Gesamtwassergehaltes während des Beobachtungszeitraumes ist maßgeblich von der Wahl des jeweiligen Parameters abhängig. Eine Erhöhung des kurzweiligen Strahlungsabsorptionsgrades bzw. des Wärmeübergangswiderstandes führt zu einer höheren Dachoberflächentemperatur und somit zu einem besseren Austrocknungspotential während der Verdunstungsperiode. Daraus folgt, dass die Elastizität mit Bezug auf die maximale Wassergehaltszunahme nicht so groß ist, wie die hinsichtlich der Feuchtebilanz. Der Zeitpunkt, ab dem die Wiederaustrocknung einsetzt, liegt bei niedrigen

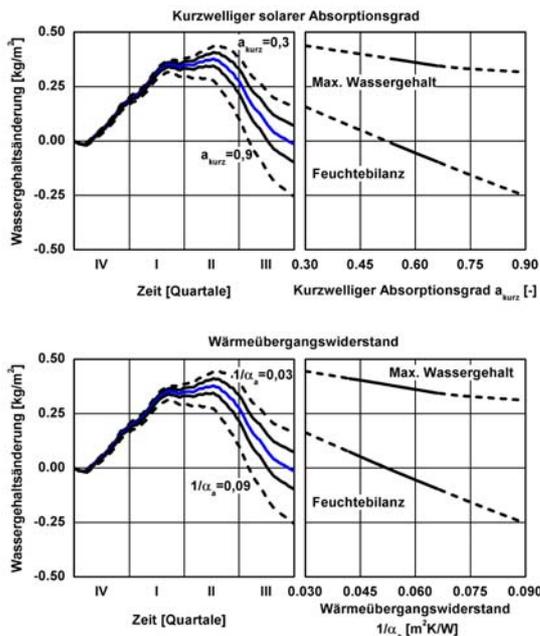


Bild 33: Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober über einen einjährigen Zeitraum und Abhängigkeit der maximalen Wassergehaltszunahme bzw. der Jahresfeuchtebilanz von den Oberflächenparametern mit der größten Elastizität, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie I (siehe Bild 32).

Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgröße entsprechend Tabelle 7.

Oben: kurzwelliger Strahlenabsorptionsgrad

Unten: Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha$
Links: zeitliche Entwicklung der Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober.

Rechts: maximaler Wassergehalt bzw. Feuchtebilanz in Abhängigkeit der variierten Eingangsgröße.

Beide Oberflächenparameter haben einen vergleichbaren Einfluß auf das errechnete hygrothermische Verhalten.

Dachoberflächentemperaturen erst etwa in Mitte des zweiten Quartals.

Die Ergebnisse der 2-Punkt-Methode haben gezeigt, dass die thermischen Materialkennwerte und die Feuchtespeicherfunktion für das Weichholz und die Zellosedämmung die relativ empfindlichsten Materialeingabegrößen sind. Um deren Einfluss zu studieren, ist die DSA nicht geeignet, denn die beiden Materialparameter sind jeweils von mehreren

Grundkennwerten – bei der Feuchtespeicherfunktion sind dies u_{80} , u_{95} und u_f – abhängig. Um Informationen über den Genauigkeitsanspruch dieser beiden erweiterten Materialfunktion zu erhalten, sind Monte-Carlo-Analysen (MCA) jeweils separat durchzuführen. Die Ergebnisse aus jeweils 200 Einzelrechnungen für den Verlauf der Wassergehaltsänderung der Gesamtkonstruktion sind in Bild 34 abgebildet. Die Bandbreite der Variation ist angegeben. Angenommen wird für jeden Parameter eine Normalverteilung. Neben der Einhüllenden aus allen Rechnungen ist zusätzlich der mittlere Verlauf und der Verlauf der beiden σ -Quantilen zu sehen. Sowohl für das Holz als auch für die Zellulosefaser ändert sich die Tendenz des Verlaufes durch die zufällige Variation nicht erheblich.

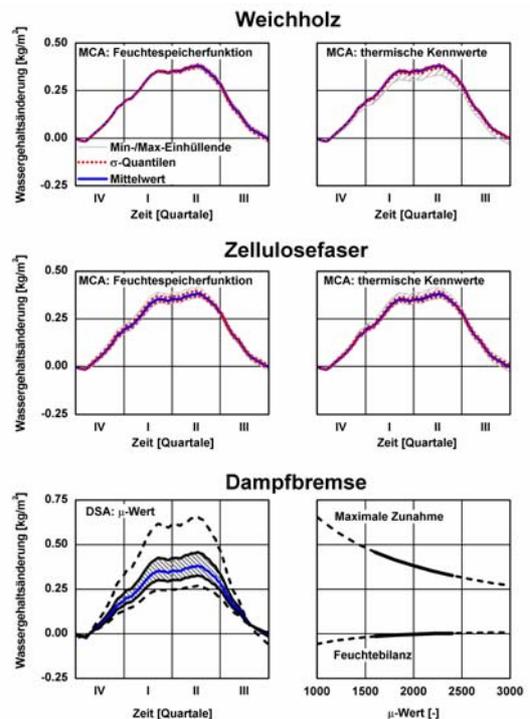


Bild 34: Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober über einen einjährigen Zeitraum und Abhängigkeit der maximalen Wassergehaltszunahme bzw. der Jahresfeuchtebilanz von den Materialeigenschaften mit der größten Elastizität, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie I (siehe Bild 32).

Oben: Monte Carlo Analyse (MCA) bei korrelierter Variation aller Parameter der Feuchtespeicherfunktion (links) sowie korrelierte Variation aller thermischen Kennwerte (rechts) des Weichholzes. ($n=200$)

Mitte: MCA bei korrelierter Variation aller Parameter der Feuchtespeicherfunktion (links) sowie korrelierte Variation aller thermischen Kennwerte (rechts) der Zellulose ($n=200$).

Unten: Singuläre Differentielle Sensitivitätsanalyse (DSA) für den μ -Wert der Dampfbremse. Auf der linken Seite ist die zeitliche Entwicklung der Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober und auf der rechten, der maximaler Wassergehalt bzw. die Feuchtebilanz in Abhängigkeit des variierten μ -Wertes zu sehen.

Es zeigt sich, dass vor allem der μ -Wert der Dampfbremse der Materialparameter mit der höchsten Einfluss ist.

Wie oben bereits erwähnt, ist das Ergebnis der Berechnung stark von der Wirkung der Dampfbremse abhängig. Da diese nur vom μ -Wert bestimmt wird, ist in diesem Fall eine singuläre differentielle Sensitivitätsanalyse vollkommen ausreichend. Deren Ergebnisse sind ebenfalls in **Bild 34** (unten) dargestellt. Die Feuchtebilanz ist im wesentlichen nicht stark abhängig vom μ -Wert bzw. dem s_d -Wert. Die Verwendung einer Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 1 m (entspricht bei einer fiktiven Dicke der Folie von 1 mm einem μ -Wert von 1000) führt zwar zu einer positiven Feuchtebilanz am Ende der Betrachtungsperiode (d. h. die Konstruktion trocknet aus), ist aber für die Konstruktion trotzdem ungeeigneter, denn die maximale Zunahme des Wassergehaltes während der Tauperiode ist mit ca. 0,7 kg/m² fast doppelt so hoch wie im Standardfall (s_d -Wert = 2 m). Die Wahl einer dichteren Dampfbremse führt zwar zu niedrigeren Feuchtezunahmen, das angefallene Tauwasser kann aber während der Verdunstungsperiode nicht vollständig wieder ausdiffundieren.

Mit Hilfe der MCA soll die Frage beantwortet werden, welchen unterschiedlichen Einfluss die angenommene Ungenauigkeit der Oberflächenparameter (**Bild 35** links) bzw. sämtlicher Materialparameter (rechts) auf die zeitliche Entwicklung der Gesamtwassergehaltsänderung haben. Der Anfangsverlauf der Oberflächenparameter-MCA ist nahezu für alle Fälle identisch. Erst ab dem Zeitpunkt, bei dem die Hauptfeuchte transportrichtung überwiegend von außen nach innen verläuft, driften die errechneten Verläufe deutlich auseinander. Die obere σ -Quantile der Feuchtebilanz nach dem Beobachtungszeitraum liegt bei etwa 0,1 kg/m², also für die Konstruktion deutlich im kritischen Bereich. Die Materialparameter-MCA hingegen zeigt, dass bedingt durch die Unsicherheit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Dampfbremse die größten Schwankungen in der Höhe der Feuchteakkumulation zu beobachten sind. Die resultierende σ -Quantile hingegen, liefert eine mehr oder weniger ausgeglichene Feuchtebilanz nach dem Beobachtungszeitraum.

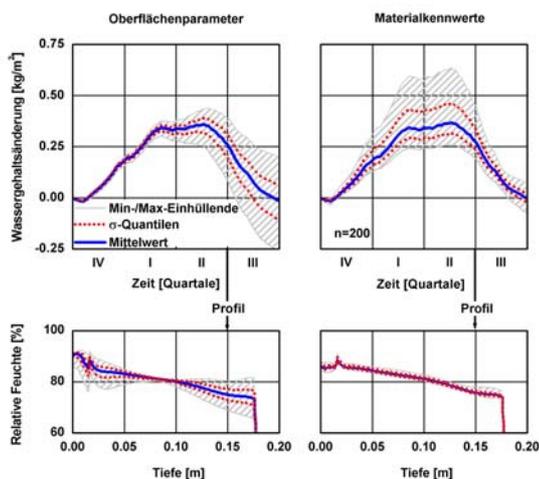


Bild 35: Vergleich der resultierenden Verläufe für die Gesamtwassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. Oktober (oben) bzw. der örtliche Verteilung der relativen Feuchte (unten) zu einem beliebigen Zeitpunkt (1. Juli) bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Oberflächenparameter (jeweils links) bzw. Materialkennwerte (jeweils rechts).

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:
reale Klimadaten für Holzkirchen [110], normale Raumnutzung, Aufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 9.

Beobachtet wird in **Bild 35** zusätzlich die örtliche Verteilung der relativen Feuchte über den Bauteilquerschnitt (unten) zu einem beliebigen gewählten Zeitpunkt, hier am 1. Juli. Die unterschiedlichen Auswirkungen der Variation der Materialparameter und der Oberflächenkoeffizienten sind deutlich zu erkennen. Während das Profil resultierend aus der MCA der Materialparameter scheinbar unabhängig von der möglichen Unschärfe der Eingabedaten ist, sind die beobachteten Schwankungen, resultierend aus der MCA der Oberflächenkoeffizienten, beachtlich.

4.2.2 Natursandsteinwand

Für die Natursandsteinwand, als ein repräsentatives Beispiel für den hygrothermischen Problemtyp II „erhöhte Schlagregenbelastung“, sind in **Bild 36** links die Ergebnisse der 2-Punkt-Methode bei Zugrundelegung realer Klimadaten und rechts die des Kurz-

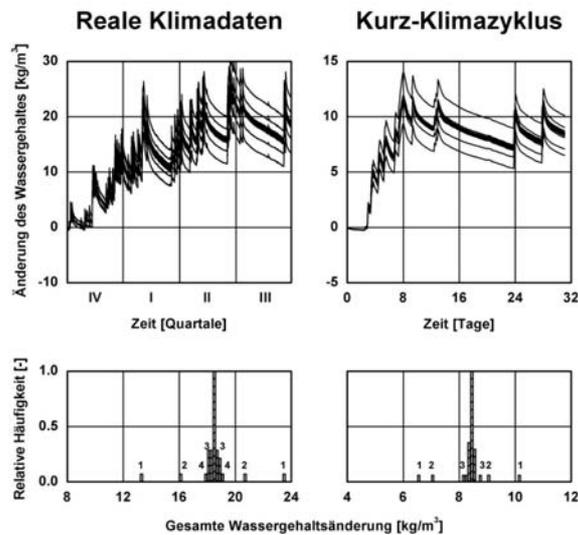


Bild 36: Wassergehaltsänderung während des jeweiligen Beobachtungszeitraums (oben) und relative Häufigkeit der Wassergehaltsänderung (unten) für einen realen und verkürzten Klimazyklus, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie II.

Zugrundegelegtes Beispiel:

50 cm dicke Natursandsteinwand,
nach Westen orientiert, Material-
daten gemäß

- Links: Simulation mit realen Klimadaten.
Rechts: Simulation mit dem Kurz-
Klimazyklus (15. Dezember bis
zum 15. Januar)
Oben: zeitliche Entwicklung der Wasser-
gehaltsänderung seit Beginn der
Rechnung am 1. April.
Unten: Häufigkeitsverteilung der Feucht-
zunahme während des Beobach-
tungszeitraumes.

Die Ziffern in den
Häufigkeitsvertei-
lungen kenn-
zeichnen die Eingabe-
daten mit
der höchsten Elastizität:

- 1 : w-Wert
2: Regenabsorptionsgrad
3: freie Wassersättigung
4: kurzweiliger Absorptionsgrad

Klimazyklus abgebildet. Die Berechnung erfolgt mit den Eingabedaten entsprechend Tabelle 9. Für beide Betrachtungen ergeben sich insgesamt 35 verschiedene Fälle. Obwohl unterschiedliche Klimadaten und Dauer gewählt worden sind, zeigt sich, dass die mit dem Kurz-Klimazyklus errechnete Tendenz für das klimabedingte Verhalten richtig ist. Der Kurz-Klimazyklus enthält demzufolge die entscheidenden Klimatelemente. Die Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen bei Zugrunde-

legung des realen bzw. des Kurz-Klimazyklus belegt, dass sowohl mit dem einen als auch mit dem anderen die selben sensiblen Eingabedaten gefunden werden. Die Ziffern in Bild 36 unten kennzeichnen die sensitivsten Eingabedaten in bezug auf die gesamte Wassergehaltsänderung. Dies sind der w-Wert und die freie Wassersättigung des Sandsteines sowie der Schlagregenabsorptionsgrad. Bei den Berechnungen mit den realen Klimadaten wirkt sich auch noch der kurzweilige solare Strahlungsabsorptionsgrad auf das errechnete Feuchteverhalten aus. Dieser Einfluss ist bei der 2-Punkt-Methode unter Zugrundelegung des Kurz-Klimazyklus nicht zu beobachten. Grund dafür ist, dass während der 30 Tage im Winter keine besonders hohen Strahlungsintensitäten vorkommen.

Die errechneten Elastizitäten für die Material- und Oberflächenparameter aus der 2-Punkt-Methode für den Kurz-Klimazyklus finden sich in Tabelle 9 wieder. Bei den Materialparametern hat, wie auch schon aus der Häufigkeitsdarstellung ersichtlich, der w-Wert den relativ größten Einfluss auf das Berechnungsergebnis. Dessen Elastizität ergibt sich zu 1,1 und ist im Vergleich zu derjenigen der anderen Eingabedaten mehr als doppelt so hoch. Der zweite entscheidende Materialparameter ist die Feuchte-speicherfunktion. Alle anderen Parameter wie Porosität, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeitszuschlag und Diffusionswiderstand haben einen nachrangigen Einfluss auf das Ergebnis. Der Oberflächenparameter mit der höchsten Elastizität

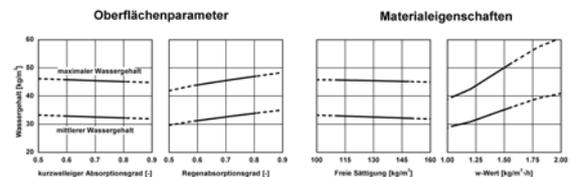


Bild 37: Mittlerer und maximaler Wassergehalt in Abhängigkeit von den Oberflächenparametern (links) und den Materialeigenschaften (rechts) mit der größten Elastizität, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie II (siehe Bild 36).

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:

reale Klimadaten für Holzkirchen [110],
normale Raumnutzung

Wandaufbau und Materialdaten gemäß
Tabelle 9.

Die durchgezogenen Linien repräsentieren
den möglichen Unsicherheitsbereich der
Einganggröße.

Es zeigt sich, dass in diesem Beispiel vor
allem eine genaue Bestimmung des w-
Wertes wichtig ist.

($E=0,5$) ist der Schlagregenabsorptionsgrad. Die Elastizität der anderen Oberflächenparameter ist von der Größenordnung her vergleichbar mit denjenigen der weniger sensitiven Materialparameter. Für die zwei sensitivsten Oberflächenparameter (links) bzw. Materialparameter (rechts) zeigt **Bild 37** den maximalen und mittleren Wassergehalt in einer Natursandsteinwand bei kontinuierlicher differentieller Variation des jeweiligen Eingabeparameters. In den Bildern ist der wahrscheinliche Bereich der Eingangsgröße durch durchgezogene Linien wieder gegeben. Die niedrige Elastizität für den kurzwelligen solaren Strahlungsabsorptionsgrad spiegelt sich in den flachem Kurvenverlauf wieder. Die DSA des Regenabsorptionsgrades bestätigt das Ergebnis aus der 2-Punkt-Methode. Typischerweise wird der Wert für a_R auf 0,7 geschätzt. Eine höhere Schlagregenbelastung durch $a_R=0,8$ führt zu einem höheren mittleren bzw. höheren maximalen Wassergehalt (ca. 6 %). Bei den Materialeigenschaften deutet die DSA darauf hin, dass eine sehr genaue Bestimmung der freien Sättigung nicht unbedingt notwendig ist. Obwohl diese in die Approximation der Feuchtespeicherfunktion und der Kapillartransportkoeffizienten eingeht, ist der Einfluss auf das errechnete Ergebnis gering. Wesentlicher Materialparameter ist der einfach zu bestimmende Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert). Materialbedingte Schwankungen zwischen $1,0$ und $1,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ führen zu einer Abweichung des Ergebnisses von etwa ± 10 bis ± 15 %.

Nachdem die drei Stützstellen der Approximationsgleichung für die Feuchtespeicherfunktion gemäß Gleichung (10) ebenfalls unsichere Größen darstellen, ergibt sich der schraffierte Bereich in **Bild 38** oben. Im unteren Teil des Bildes sind die resultierenden Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Trocknen dargestellt. Die Approximation erfolgt mit den Werten aus Tabelle 9. Bei freier Sättigung schwanken die Werte für das kapillare Saugen zwischen $2 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Eine Gegenüberstellung der resultierenden Verläufe für den Gesamtwassergehalt bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Eingabedaten, die nur die Flüssigtransportkoeffizienten (oben) bzw. die Feuchtespeicherfunktion (Mitte) beeinflussen, ist **Bild 38** zu entnehmen. Unten sind zusätzlich die Ergebnisse der MCA bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation sämtlicher Eingabedaten aufgeführt. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit für den Wassergehalt von etwa ± 13 %. Sie ergibt sich aus der durchschnittlichen σ -Abweichung gegenüber dem Mittelwert. Hauptunsicherheitsfaktor ist, wie im oberen Bild deutlich zu erkennen, der Flüssigtransport. Hier zeigt sich, dass vor allem eine korrekte Bestimmung des w -Wertes für das Ergebnis wichtig ist. Das genaue Verhältnis der Kapillartransportkoeffizienten bei freier Wassersättigung zwischen Saugen und Trocknen ist eher unerheblich.

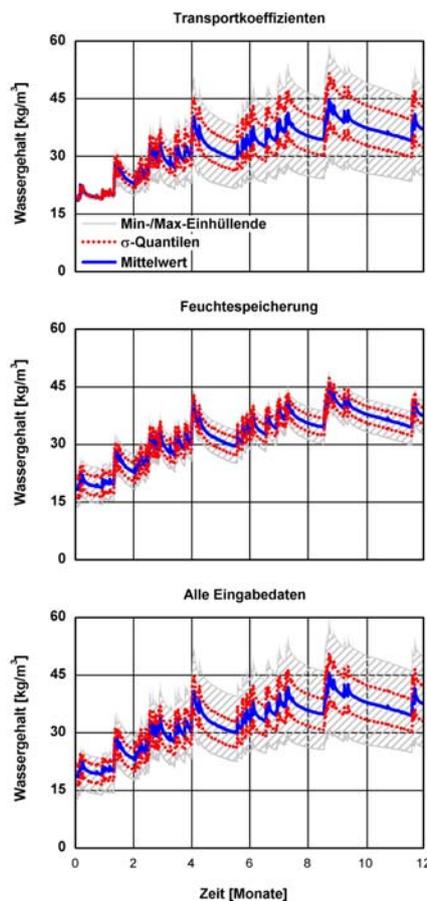


Bild 38: Zeitverlauf des Gesamtwassergehaltes in der Konstruktion seit Beginn der Rechnung am 1. April. Neben dem Mittelwert aus 300 Rechnungen sind die σ -Quantilen und die einhüllende Kurve aller Rechnungen dargestellt.

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:

reale Klimadaten für Holzkirchen [110], normale Raumnutzung Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 9.

Oben: Bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Eingabedaten, die die Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten beeinflussen.

Mitte: Bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Eingabedaten, die die Approximation der Feuchtespeicherfunktion beeinflussen

Unten: Bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation sämtlicher Eingabedaten.

Es ergibt sich eine Gesamtunsicherheit für den ermittelten Wassergehalt von etwa ± 13 % (durchschnittliche σ -Abweichung gegenüber Mittelwert).

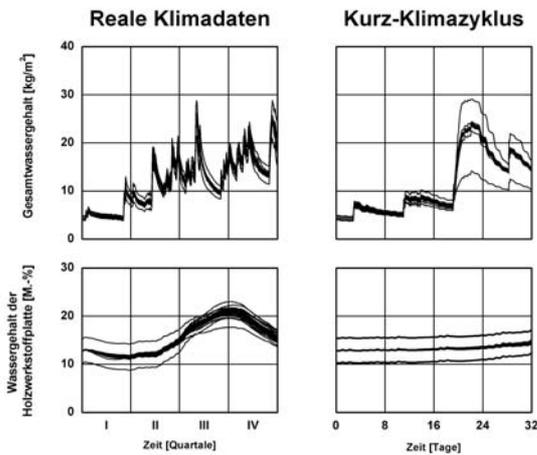


Bild 39: Gesamtwassergehaltsänderung (oben) und Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte (unten) während des Beobachtungszeitraumes bei Zugrundelegung eines realen und eines verkürzten Klimazyklusses, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie III.

Zugrundegelegtes Beispiel:

Nach Westen orientierte Holztafelkonstruktion mit WDVS und Klinkerverblendung (Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 11).

Links: Simulation mit realen Klimadaten.

Rechts: Simulation mit dem Kurz-Klimazyklus (15. Juli bis 15. August)

Oben: Zeitlicher Verlauf des Wassergehalts in der Gesamtkonstruktion seit Beginn der Rechnung am 1. Januar.

Unten: Zeitlicher Verlauf des Wassergehalts in der Holzwerkstoffplatte.

4.2.3 Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale

Für eine Holztafelkonstruktion mit einer Klinkervormauerschale sind in **Bild 39** rechts die Ergebnisse der 2-Punkt-Methode und des entsprechenden Kurz-Klimazykluses abgebildet. Auf der linken Seite finden sich die Ergebnisse unter Zugrundelegung realer Klimadaten wieder. Die Berechnung erfolgt mit den Eingabedaten entsprechend der

Tabelle 11. Für beide Betrachtungen ergeben sich insgesamt 97 verschiedene Fälle. Betrachtet werden in diesem Beispiel der zeitliche Verlauf der Wassergehaltsänderung in der Gesamtkonstruktion und der über den Plattenquerschnitt gemittelte

Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte. Die Berechnung mit realen Klimadaten zeigt, dass die Platte im Gegensatz zu den üblichen Erfahrungen im Winter austrocknet. Ab Mai nimmt sie aber kontinuierlich Feuchte auf, bis im Herbst ein Maximum erreicht wird und dann wieder eine Austrocknung stattfindet. Das sommerliche Auffeuchten rührt von der Umkehrung der Dampfdiffusion her. Der Wassergehalt in der Holzwerkstoffplatte steigt über 20 M.-% an. Da gleichzeitig ein relativ hohes Temperaturniveau herrscht, kann eine langfristige Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit der Platte durch Mikroorganismen nicht ausgeschlossen werden.

Es zeigt sich, dass die mit dem Kurz-Klimazyklus errechneten Verläufe die Tendenz richtig wiedergeben. Ein Vergleich zwischen den Häufigkeitsverteilungen bei Durchführung mit den realen Klimadaten bzw. mit dem Kurz-Klimazyklus belegt auch für diese hygrothermische Problemkategorie, dass sowohl mit dem einen als auch mit dem anderen die selben sensiblen Eingabedaten gefunden werden. Die Eingabeparameter mit der relativ höchsten Elastizität sind bei beiden Fällen vergleichbar und in *Tabelle 11* für den Fall des Kurz-Klimazyklus aufgeführt. Die höchsten Elastizitäten weisen der Wärmeübergangswiderstand und der kurzweilige Strahlungsabsorptionsgrad auf. Beide bestimmen direkt die mittlere Oberflächentemperatur. Eine Erhöhung dieser Werte führt zu einem höheren mittleren Feuchtegehalt in der Platte.

Die Materialparameter mit der relativ höchsten Elastizität bei der Klinkervormauerschale sind der Wasseraufnahmekoeffizient, die Ausgleichsfeuchten bei 80 % und 95 % relativer Feuchte, die Rohdichte sowie die thermischen Kennwerte (λ , $\Delta\lambda$ und c). Bei beiden Dämmschichten aus Mineralwolle ist vor allem die Kenntnis der trockenen Wärmeleitfähigkeit entscheidend für die Genauigkeit des errechneten mittleren Wassergehaltes in der Platte. Von allen Materialparametern der Holzwerkstoffplatte hat die Feuchtespeicherfunktion die höchste Elastizität. Allerdings ist dies nur auf die unterschiedlichen Ausgleichsfeuchten zurückzuführen. Würde man die mittlere relative Feuchte betrachten, wäre diese Abhebung gegenüber den anderen Daten nicht zu beobachten. Die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl muss den Elastizitäten zufolge nur von der Form der feuchteabhängigen Funktion her richtig wiedergegeben werden, die genauen Werte selber sind im Bereich der hier gewählten Schwankungen nicht auffallend sensibel.

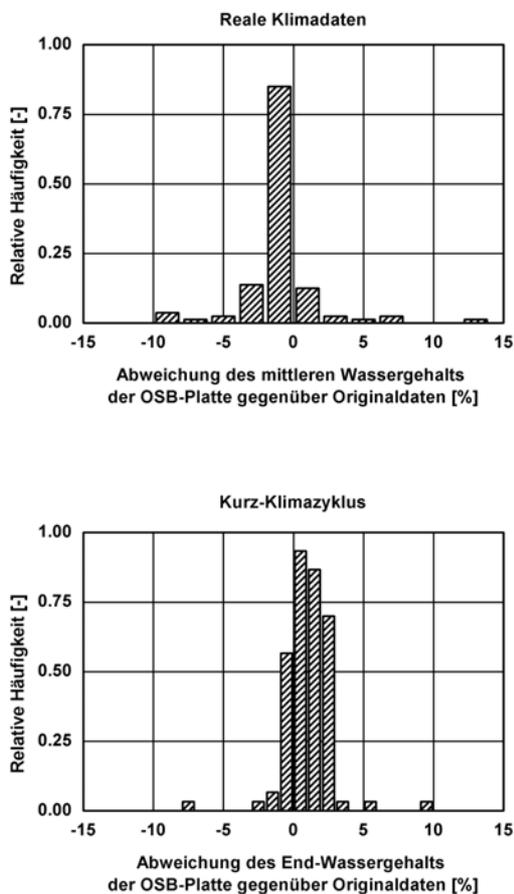


Bild 40: Verteilung der relativen Häufigkeit der Feuchtezunahme in der Holzwerkstoffplatte während des Beobachtungszeitraumes, berechnet nach der 2-Punkt-Methode (siehe Bild 43).

Oben: 2-Punkt-Methode mit realen Klimadaten

Unten: 2-Punkt-Methode mit dem Kurz-Klimazyklus.

Die Eingabeparameter mit der höchsten Elastizität sind bei beiden Fällen vergleichbar und sind in

Tabelle 11 für den Fall des Kurz-Klimazyklusses aufgeführt.

Die höchsten Elastizitäten haben sowohl der Wärmeübergangswiderstand als auch der kurzwellige Strahlungsabsorptionsgrad.

Für die Oberflächenparameter mit der relativ größten Elastizität wird eine differentielle Sensitivitätsanalyse (DSA) mit realen Klimadaten durchgeführt, deren Resultate dem **Bild 41** zu entnehmen sind. Aufgetragen ist jeweils der mittlere und der maximale Wassergehalt in der Holzwerkstoffplatte in Abhängigkeit der variierten Größe, wobei die durchgezogenen Linien den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgröße repräsentieren. Wie auch schon aus der 2-Punkt-Methode zu erkennen war, sind der mittlere und der maximale Wassergehalt stark vom Temperaturniveau der äußeren Schicht abhängig. **Bild 42** zeigt in der oberen Bildhälfte für die Klinkervormauerschale und in der unteren für die Holzwerkstoffplatte die Bereiche der zu erwartenden erweiterten Materialparameter. Sie ergeben aufgrund der Unsicherheiten (siehe

Tabelle 11) der Materialgrundkennwerte die in die Approximationsmethoden einfließen. Für beide Materialien ergibt sich für die Feuchtespeicherfunktionen ein breites Spektrum. Oben rechts ist für die Klinkervermauerung der Bereich aller möglichen Flüssigtransportkoeffizienten und rechts unten für die Holzwerkstoffplatte der Bereich der möglichen feuchteabhängigen Wasserdampfdiffusionswiderstände abgebildet. Der Einfluss dieser Streuungen kann mit Hilfe der korrelierten Monte-Carlo-Analyse eruiert werden (siehe **Bild 43**). In einem ersten Schritt werden ausgehend vom Standardfall 200mal alle Materialparameter der Klinkerschicht im Bereich ihrer möglichen Unsicherheiten gleichzeitig und zufällig variiert und anschließend der zeitliche Verlauf des mittleren Wassergehaltes in der Holzwerkstoffplatte berechnet. Anschließend erfolgt die MCA für die Klinkervormauerung nur für die Feuchtespeicherfunktion. Die Gegenüberstellung der beiden Ergebnisse in lässt erkennen, dass zum einen der Einfluss der Feuchtespeicherfunktion auf den errechneten Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte nicht essentiell ist und zum anderen auch die anderen Materialkennwerte der Klinkervormauerung, wie etwa der w-Wert, nicht ganz genau bekannt sein müssen. Die gleichen Untersuchungen werden für die Holzwerkstoffplatte durchgeführt, mit dem Ergebnis, daß die gesonderte Variation der Feuchtespeicherfunktion zu einer Abweichung des mittleren Wassergehaltes um ± 2 M.-% führt. Allerdings ist dies nur durch die unterschiedlich hohen Ausgleichsfeuchten zu Beginn der Rechnung bedingt (Sorptionsfeuchte bei 80 % r. F.).

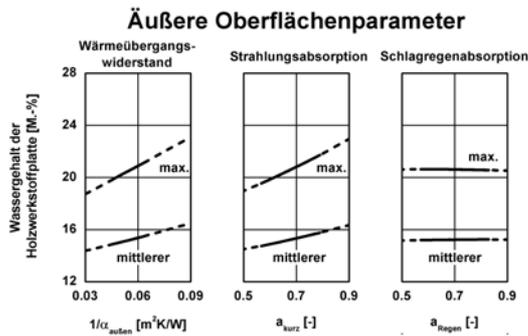


Bild 41: Mittlerer und maximaler Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte während des einjährigen Beobachtungszeitraumes in Abhängigkeit von den Oberflächenparametern mit der größten Elastizität, berechnet nach der 2-Punkt-Methode (siehe Bild 43).

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:
reale Klimadaten für Holzkirchen [110], normale Raumnutzung

Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 11.

Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgröße.

Den größten Einfluss auf den mittleren Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte haben sowohl der Wärmeübergangswiderstand als auch der kurzweilige Strahlungsabsorptionsgrad. Beide bestimmen direkt die mittlere Oberflächentemperatur. Eine Erhöhung dieser Werte führt zu einem höheren mittleren Feuchtegehalt in der Holzwerkstoffplatte.

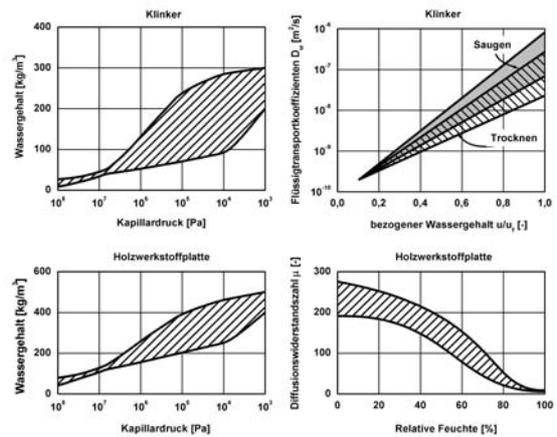


Bild 42: Darstellung der Materialfunktionen für das Anwendungsbeispiel der hygrothermischen Problemkategorie III.

Oben: Feuchtespeicherfunktion (links) und Flüssigkeitstransportkoeffizienten (rechts) für Saugen und Trocknen der Klinkervormauerung.

Unten: Feuchtespeicherfunktion (links) und feuchteabhängiger Diffusionswiderstand (rechts) für die Holzwerkstoffplatte.

Der schraffierte Bereich stellt jeweils die möglichen Unsicherheiten der Materialkenngröße dar, resultierend aus den Schwankungen der Eingangsgrößen für die Approximation (siehe Tabelle 11).

Für beide Materialien ergibt sich ein sehr breites Spektrum.

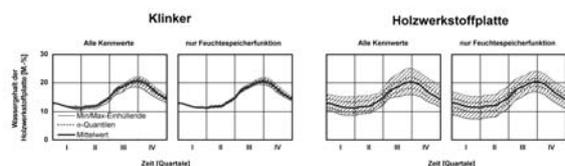


Bild 43: Resultierende Verläufe des Wassergehalts in der Holzwerkstoffplatte bei wahrscheinlichkeitgestützter Variation aller Materialkennwerte (jeweils links), bzw. nur der Eingabedaten, die in die Approximation der Feuchtespeicherfunktion eingehen (jeweils rechts). Neben dem Mittelwert aus 300 Rechnungen sind die s-Quantillen und die einhüllende Kurve aller Rechnungen dargestellt.

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:

reale Klimadaten für Holzkirchen [110], normale Raumnutzung

Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 11.

Die Gegenüberstellung der beiden Ergebnisse lässt erkennen, dass zum einen der Einfluss der Feuchtespeicherfunktion auf den errechneten mittleren Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte nicht essentiell ist und zum anderen auch die anderen Materialkennwerte des Klinkers, wie etwa der w -Wert, nicht ausnahmslos exakt bekannt sein müssen. Die Ergebnisse der MCA für die Holzwerkstoffplatte zeigen, dass die gesonderte Variation der Feuchtespeicherfunktion zu einer Abweichung des Wassergehaltes um ± 2 M.-% (durchschnittliche s -Abweichung gegenüber Mittelwert) führt. Allerdings ist dies nur durch die unterschiedlich hohen Ausgleichsfeuchten zu Beginn der Rechnung bedingt (Sorptionsfeuchte bei 80 % r. F.).

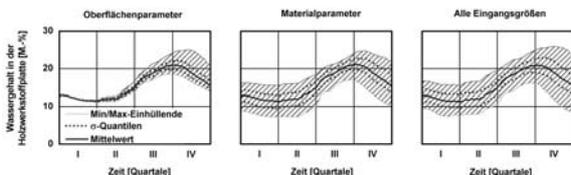


Bild 44: Resultierende Verläufe des Wassergehalts in der Holzwerkstoffplatte bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation ($n=200$) der Eingabedaten entsprechend Tabelle 20 und unter Zugrundelegung realer Klimadaten.

Links: Monte Carlo Analyse (MCA) bei korrelierter Variation aller Oberflächenparameter.

Mitte: MCA bei korrelierter Variation aller Materialparameter.

Rechts: MCA bei korrelierte Variation sämtlicher Eingabedaten, also Oberflächenparameter und Materialparameter.

Der Vergleich zeigt, wie unterschiedlich die Eingangsdaten den Verlauf der Berechnung beeinflussen. Während die Oberflächenparameter erst mit steigender Rechendauer den Verlauf beeinflussen, ist, bedingt durch die Wahl der Anfangszustände, schon zu Beginn eine Abweichung um ± 2 M.-% zu beobachten. Die resultierende Unsicherheit aufgrund aller Eingabedaten von etwa 10 % (durchschnittliche s -Abweichung gegenüber Mittelwert) ergibt sich aus der entsprechenden MCA.

Zum Schluss sind in **Bild 44** die resultierenden Verläufe für den über den Plattenquerschnitt gemittelten Wassergehalt der Holzwerkstoffplatte, bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Oberflächenparameter (links) bzw. Materialkennwerte (Mitte), abgebildet. Der Vergleich zeigt, wie unterschiedlich die Eingangsdaten den Verlauf der Berechnung bestimmen. Während die Oberflächenparameter erst mit steigender Rechendauer den Verlauf beeinflussen, ist, bedingt durch die Wahl der Anfangszustände, schon zu Beginn eine Abweichung um ± 2 M.-% zu beobachten. Die resultierende Unsicherheit aufgrund aller Eingabedaten von etwa ± 10 % ergibt sich aus der entsprechenden MCA (**Bild 44** rechts).

4.2.4 Leichtbeton-Flachdach

Ausgehend von einer Einbaufeuchte der Leichtbeton-Fertigteile von 20 Vol.-% zu Beginn der Rechnung (1. April) sind die berechneten Trocknungsverläufe aus der 2-Punkt-Methode für die Flachdachvarianten in **Bild 45** dargestellt. Auf der linken Seite finden sich die Ergebnisse der Berechnung mit realen Klimadaten, auf der rechten Seite, diejenigen mit dem Kurz-Klimazyklus wieder. Der schraffierte Bereich stellt die Einhüllende aus allen 35 Einzelrechnungen dar. Die anfänglich rasche Austrocknung von 10 Vol.-% (15 kg/m²) innerhalb von sechs Monaten ist auf die Erwärmung der bituminierten Dachoberfläche durch solare Einstrahlung während des Sommers zurückzuführen. Da das Dach nur nach innen austrocknen kann, entsteht dabei eine Feuchtelast für die Raumluft, die abgeführt werden muss. Während dies in unseren Breiten durch Fensteröffnen und Lüftung erreicht werden kann, sind die Klimaanlage in feuchtwarmen Klimazonen häufig nicht entsprechend ausgelegt, so dass die Raumluftfeuchte während der Austrocknungsphase unzulässig hoch werden kann. Nach etwa 2,5 Jahren hat der Leichtbeton seine Baufeuchte mehr oder weniger komplett abgegeben und ist im hygrokopischen Gleichgewicht.

Als Bewertungskriterium dient der Wassergehalt im Leichtbeton nach dem ersten Jahr. Die Ziffern in den beiden Häufigkeitsverteilungsdiagrammen (jeweils unten) kennzeichnen die Eingabedaten mit der relativ höchsten Elastizität. Ein Vergleich der beiden Bildhälften zeigt die Qualität der rechnerischen Abschätzung der sensiblen Eingabedaten mit der neu eingeführten 2-Punkt-Methode und dem Kurz-Klimazyklus. Die errechneten Elastizitäten sind für alle Eingabedaten in **Tabelle 12** zusammengefasst. Die relativ höchsten Elastizitäten bei den Materialparametern haben die freie Wassersättigung und der w -Wert. Bemerkenswert ist, dass, obwohl der Austrocknungsprozess als eine Superposition aus Kapillarleitung und Dampfdiffusion zu sehen ist, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Leichtbetons eine nicht genau zu bestimmende Größe darstellt. Bei den Oberflächenparameter haben der s_d -Wert der Innenbeschichtung (eigentlich ein

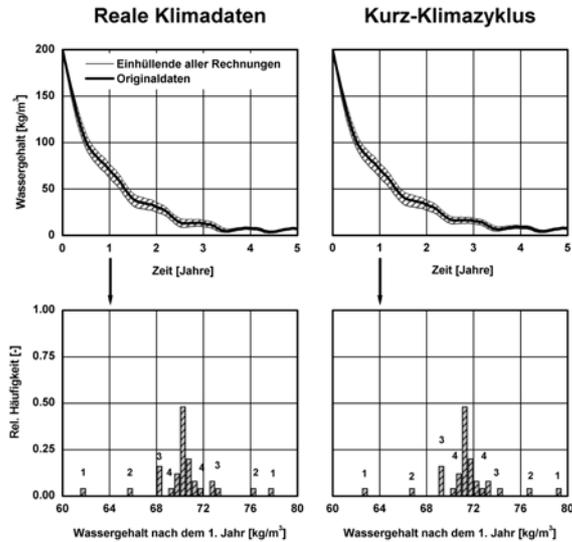


Bild 45: Wassergehaltsänderung seit Beginn der Rechnung am 1. April über einen fünfjährigen Zeitraum (oben) und relative Häufigkeit des Gesamtwassergehaltes nach dem ersten Jahr (unten) in der 20 cm dicken Leichtbetonwand für einen realen und verkürzten Klimazyklus, berechnet nach der 2-Punkt-Methode gemäß hygrothermischer Problemkategorie IV.

Zugrundegelegtes Beispiel:

20 cm Leichtbetonflachdach (Aufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 21).

Die Ziffern in den Häufigkeitsverteilungen kennzeichnen die Eingabedaten mit der höchsten Elastizität:

- 1: Freie Wassersättigung
- 2: s_d -Wert der Innenbeschichtung
- 3: Äußerer Wärmeübergangswiderstand und kurzweiliger Absorptionsgrad, w -Wert
- 4: Faktor $D_w, s/D_w, t$

Materialparameter, wird aber der Einfachheit halber nur mit einem Diffusionswiderstand berücksichtigt), der äußere Wärmeübergangswiderstand und der kurzweilige solare Strahlungsabsorptionsgrad die relativ höchsten Elastizitäten.

Der Einfluss der äußeren bzw. inneren Oberflächenparameter mit der größten Elastizität, in Bezug auf den Wassergehalt nach einem Jahr, wird mit Hilfe der DSA (Bild 46) untersucht. Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgröße. Den relativ größten Einfluss hat der s_d -Wert der Innenbeschichtung. Für Gipsputz setzt man üblicherweise Werte zwischen 0,1 und 0,2 m an. Allein diese Unsicherheit führt zu Wassergehalten nach einem Jahr im Bereich zwischen 82 kg/m^3 und 65 kg/m^3 . Das entspricht einer mittleren Abweichung von ca. 10 %. Der große

Einfluss der Außenoberflächentemperatur auf das Feuchteverhalten von Flachdächern beruht gemäß DSA auf den Annahmen für den Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha_a$ und für den kurzweiligen Absorptionsgrad.

Für den Leichtbeton ist in Bild 47 der Bereich der möglichen Unsicherheiten der Feuchtespeicherfunktion (oben) bzw. der Flüssigtransportkoeffizienten (unten) schraffiert gekennzeichnet. Die Approximation erfolgt mit den Werten aus Tabelle 12. Durch die angenommene Unsicherheit der freien Wassersättigung ergibt sich das sehr breite Spektrum der Feuchtespeicherfunktion. Die Flüssigtransportkoeffizienten bei freier Sättigung schwanken für das kapillare Saugen zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

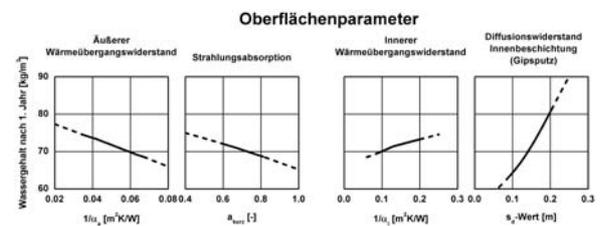


Bild 46: Wassergehalt nach dem ersten Jahr im Leichtbetonflachdach in Abhängigkeit von den nach der 2-Punkt-Methode ermittelten Oberflächenparametern mit der größten Elastizität (siehe Bild 49).

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:

reale Klimadaten für Holzkirchen [110], normale Raumnutzung Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 21.

Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgrößen. Den größten Einfluss hat der s_d -Wert der Innenbeschichtung. Für Gipsputz setzt man üblicherweise Werte zwischen 0,1 und 0,2 m an.

Der Wärmeübergangswiderstand $1/a$ und der kurzweilige Absorptionsgrad bestimmen durch Veränderung der Außenoberflächentemperatur das Austrocknungsverhalten wesentlich. Den größten Einfluss hat der s_d -Wert der Innenbeschichtung.

Obwohl bei der Approximation die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigtransportkoeffizienten gegenseitig korrelieren, soll zunächst für die Materialeigenschaften des Leichtbetons mit der größten Elastizität nur der singuläre Einfluss mit Hilfe der DSA untersucht werden (**Bild 48**). Dabei zeigt sich, dass die Austrocknungsgeschwindigkeit im wesentlichen vom w-Wert und der freien Wassersättigung abhängig ist. Beide Materialeigenschaften gehen direkt in die Approximation der Kapillartransportkoeffizienten ein. Eine höhere freie Sättigung bedeutet einen höheren Endwassergehalt, wobei dies durch die Verschiebung der Feuchtespeicherfunktion zu erklären ist. Das Ergebnis der DSA belegt die Vermutung, dass der einfache Faktor zwischen den Flüssigtransportkoeffizienten bei freier Wassersättigung für Saugen und Trocknen nicht unbedingt mit 10 angenommen werden darf.

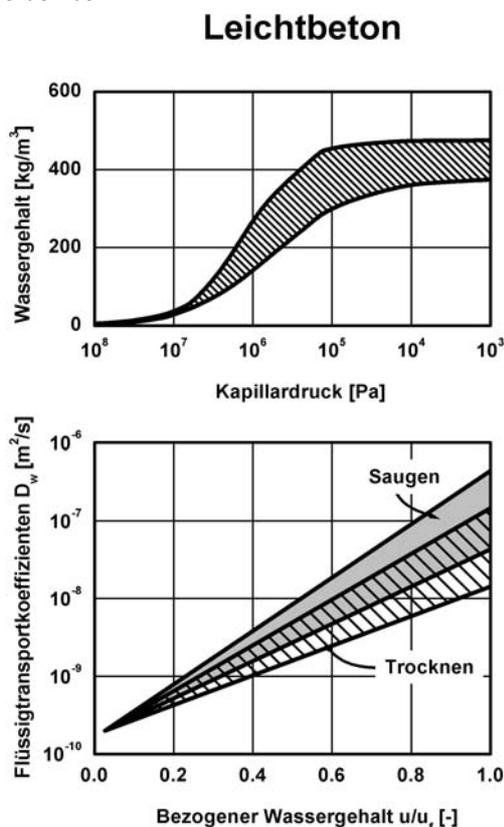


Bild 47: Feuchtespeicherfunktionen (oben) und Flüssigtransportkoeffizienten (unten) für den untersuchten Leichtbeton. Die Unsicherheitsbereiche sind schraffiert gekennzeichnet.

Die Approximation erfolgt mit den Werten aus Tabelle 21. Durch die angenommene Unsicherheit der freien Wassersättigung ergibt sich das sehr breite Spektrum der Feuchtespeicherfunktionen. Die Flüssigtransportkoeffizienten bei freier Sättigung schwanken für das kapillare Saugen zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

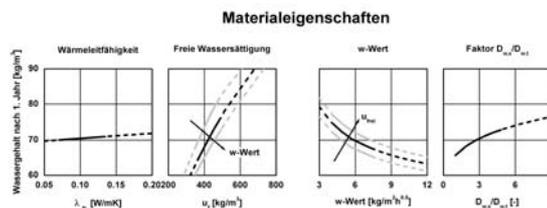


Bild 48: Wassergehalt nach dem ersten Jahr im Leichtbetonflachdach in Abhängigkeit von den nach der 2-Punkt-Methode ermittelten Materialeigenschaften mit der größten Elastizität (siehe Bild 49).

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:

reale Klimadaten für Holzkirchen [110],
normale Raumnutzung
Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 12.

Die durchgezogenen Linien repräsentieren den möglichen Unsicherheitsbereich der Eingangsgrößen. Für den w-Wert und die freie Wassersättigung sind zusätzlich die Ergebnisse der multiplen Sensitivitätsanalyse (grau) in die Diagramme eingezeichnet, da diese den größten Einfluss auf die Austrocknungsgeschwindigkeit haben. Beide Materialeigenschaften gehen direkt in die Approximation der Kapillartransportkoeffizienten ein.

Die Wichtigkeit der verschiedenen Eingabeparameter wird mit den in **Bild 49** gegenübergestellten Verläufen für den Gesamtwassergehalt bei wahrscheinlichkeitsgestützter Variation aller Materialkennwerte (oben), aller Oberflächenparameter (Mitte) bzw. Variation aller Eingabedaten gleichzeitig (unten) ermittelt. Dargestellt sind neben der Einhüllenden aus jeweils 300 Einzelrechnungen, die Mittelwerte und die σ -Quantilen. Die Bandbreiten der Variationen sind in **Tabelle 12** angegeben. Angenommen wird eine Normalverteilung. Die Resultate der MCA bei alleiniger Variation der Materialparameter führen zu einer errechneten Unsicherheit für den Wassergehalt nach einem Jahr von etwa $\pm 7 \%$, bei ausschließlicher Variation sämtlicher Oberflächenübergangsbedingungen von etwa $\pm 12 \%$. Wird davon ausgegangen, dass sämtliche Eingabedaten prinzipiell unsichere Größen darstellen, ergibt sich aus der MCA eine Ungenauigkeit der Berechnung von etwas unter $\pm 15 \%$. Dieses Ergebnis demonstriert, welche große Bedeutung die genaue Kenntnis der Oberflächenübergangsbedingungen hat.

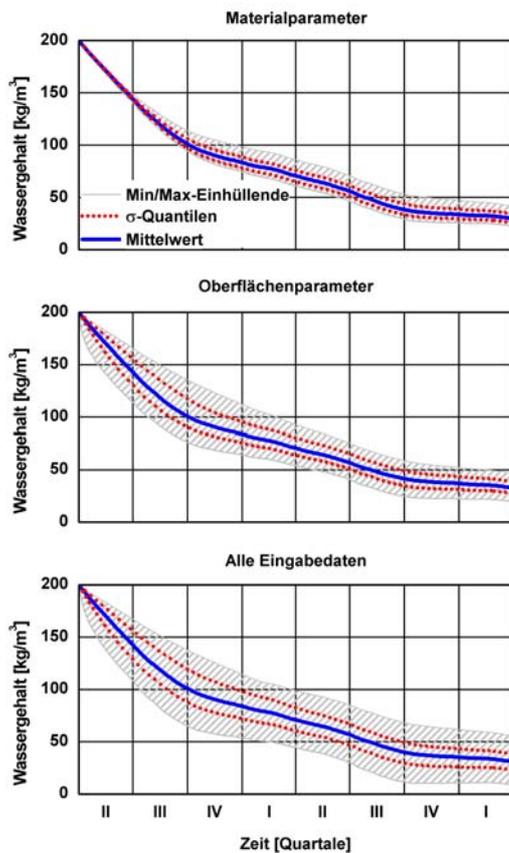


Bild 49: Zeitverlauf des Gesamtwassergehaltes im Leichtbetonflachdach seit Beginn der Rechnung am 1. April. Neben dem Mittelwert aus 250 Rechnungen sind die s -Quantilen und die einhüllende Kurve aller Rechnungen dargestellt.

Zugrundegelegte Daten und Randbedingungen:
reale Klimadaten für Holzkirchen [110],
normale Raumnutzung
Wandaufbau und Materialdaten gemäß
Tabelle 21.

Oben: Bei wahrscheinlichkeitgestützter Variation aller Materialparameter

Mitte: Bei wahrscheinlichkeitgestützter Variation aller Oberflächenparameter

Unten: Bei wahrscheinlichkeitgestützter Variation sämtlicher Eingabedaten.

Es ergibt sich eine Gesamtunsicherheit für den ermittelten Wassergehalt von etwa $\pm 12\%$ (durchschnittliche s -Abweichung gegenüber Mittelwert).

Das Ergebnis demonstriert die große Bedeutung einer genauen Kenntnis der Oberflächenübergangsbedingungen.

5. Entwicklung eines Schnellverfahrens, Genauigkeitsbewertung und Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse der vier Beispiele haben gezeigt, dass mit Hilfe des hier vorgestellten stochastischen Konzeptes zum einen die Sensitivität bestimmter Eingabedaten ermittelt werden kann, zum anderen erhält man mit Hilfe der wahrscheinlichkeitsgestützten Analyse ein Bild von Art und Umfang der mit einem Anwendungsfall verbundenen Unsicherheiten. Doch erfordert die Monte Carlo Analyse unter realen Klimabedingungen einen verhältnismäßig hohen Zeitaufwand mit enormen Datenmengen. Für abschätzende Untersuchungen der Genauigkeit kann, wie im folgenden gezeigt wird, auch ein neuentwickeltes, 2-stufiges Schnellverfahren verwendet werden.

Das Verfahren beruht auf der Erkenntnis, gewonnen im Rahmen dieser Arbeit, dass die instationären Berechnungen mit dem jeweiligen Kurz-Klimazyklus als Randbedingung das hygrothermische Verhalten einer bestimmten Problemkategorie tendenziell richtig wiedergeben. Damit sollten sich nicht nur die sensiblen Eingabedaten herausfiltern lassen. Durch Kombination mit der Monte Carlo Analyse müsste es auch möglich sein die Genauigkeit der Ergebnisse zu ermitteln. Vorgegangen wird dazu in zwei getrennten Schritten. Mit Hilfe der 2-Punkt-Methode werden zuerst die sensiblen Material- und Übergangsparameter bestimmt. Anschließend erfolgt mit diesen Eingabedaten und dem Kurz-Klimazyklus entsprechend der vorliegenden Problemkategorie eine korrelierte Monte-Carlo-Analyse auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Diese MCA liefert als Ergebnis die abgeschätzte Unsicherheit einer Bewertungsgröße. Für die im Rahmen dieser Arbeit berechneten Beispiele werden in **Tabelle 13** die ermittelten Unsicherheiten mittels Monte Carlo Analyse (MCA) auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung und realer Klimadaten bzw. mittels der MCA auf Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Parameter mit der jeweils höchsten Elastizität und dem Kurz-Klimazyklus verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Schnellverfahren die Genauigkeit für die hier vorgestellten Beispiele bis auf etwa einen Prozentpunkt vorab ermittelt werden kann. Dieses Verfahren ist in die neue Software WUFI-Star implementiert. Das Ergebnis des Schnellverfahrens sollte aber nur für qualitative Aussagen verwendet werden. Sind Beurteilungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit gefragt, ist die Durchführung der MCA auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung und realer Klimadaten nicht zu umgehen.

Beispiel	Problemkategorie	MCA: (alle Eingabedaten, reale Klimadaten)	MCA: (Parameter mit der höchsten Elastizität, Kurz-Klimazyklus)
Natursandsteinwand	I	13 %	13 %
Holztafelkonstruktion	II	10 %	11 %
Geneigtes Dach	III	17 %	16 %
Leichtbetonflachdach	IV	12 %	11 %

Tabelle 13: Vergleich der ermittelten Unsicherheiten mittels Monte Carlo Analyse (MCA) auf Basis der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung und realer Klimadaten bzw. mittels der MCA auf Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Parameter mit der höchsten Elastizität und dem Kurz-Klimazyklus.

Für eine Bewertung der Ergebnisse aus dem stochastischen Konzept und für praktische Schlußfolgerungen sind die ermittelten Genauigkeiten hervorgerufen durch Material- und Oberflächenparameter mit denjenigen klima- und nutzungsbedingter Einflüsse zu vergleichen. Dazu werden für einige Beispiele aus den vorangegangenen Kapiteln die deterministischen Berechnungen für den Standort Holzkirchen mit den Klimadaten der Jahre 1990 bis 1999 (**Bild 50**) bzw. für unterschiedliche Innenraumtemperaturen und Nutzungsbedingungen (**Bild 51**) wiederholt. Eine Übersicht über die Monatsmittel einiger erhebliche Klimaparameter sowie eine statistische Auswertung zeigen **Tabelle 5** und **Bild 15**.

Für die Untersuchungen des klimabedingten Einflusses an einem Standort werden die Ergebnisse der deterministischen Berechnungen für die jeweilige Bewertungsgröße in Relation zu den Jahresdurchschnittstemperaturen des zugrundeliegenden Klimadatensatzes gebracht, dies ist in **Bild 50** dargestellt. Für das geneigte Dach und das Leichtbetonflachdach ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Feuchtebilanz bzw. dem Wassergehalt nach einem Jahr und der Jahresmitteltemperatur, wobei sich ein warmes Jahr für die Konstruktion günstig auswirkt. Bei der Holztafelkonstruktion mit einer Klinkervormauerschale hängt die mittlere Feuchte der Holzwerkstoffplatte offenbar auch von der Jahresmitteltemperatur ab. Ein wärmeres Jahr erhöht jedoch das Risiko der Auffeuchtung der Holzwerkstoffplatte durch Umkehrdiffusion. Zur Beurteilung der Wichtigkeit der verschiedenen Eingabedaten (Material-, Oberflächen- und Außenklimaparameter) ist in der Darstellung ein schraffierter Bereich, der die errechnete Ungenauigkeit aus der Materialparameter-MCA und korrelierter MCA angibt, mit eingezeichnet. Aus der Gegenüberstellung mit dem Einfluss der Außenklimaparameter ergibt sich, dass beim geneigten Dach und bei der Konstruktion mit Klinkervormauerschale die Unsicherheiten im Berechnungsergebnis, bedingt durch die Variation der Klimarandbedingungen für außen bzw. durch die

„unscharfen“ Material- und Oberflächenparameter, vergleichbar sind. Beim Leichtbetonflachdach führen die Klimaschwankungen zu einer ähnlichen Unsicherheit wie die Materialschwankungen (siehe grau hinterlegter Bereich im Diagramm).

Wie die Ergebnisse aus **Bild 50** zeigen, besteht offenbar ein direkter Zusammenhang zwischen hydrothermischem Verhalten und durchschnittlicher Jahresaußenlufttemperatur. Davon ausgehend soll hier eine sehr einfache, aber für gröbere Abschätzungen durchaus brauchbare Näherungsmöglichkeit für fehlende Klimadaten - für zahlreiche Standorte stehen keine stündlichen Klimadaten über einen Zeitraum von mehreren Jahren zur Verfügung - vorgestellt werden. Dafür wird für den Berechnungszeitraum eines beliebigen Jahres der Standardklimadatenatz mit Hilfe eines Temperaturshiftes bei Beibehaltung aller anderen Klimadaten an die Jahresdurchschnittstemperatur dieses Jahres angepasst. Dazu wird in jedem Zeitschritt zu der jeweiligen Außenlufttemperatur des Standarddatensatzes die Differenz zwischen der Jahresdurchschnittstemperatur des zu untersuchenden Jahres und des Standardjahres addiert. In **Bild 50** sind die jeweils berechneten Bewertungsgrößen für die drei Beispiele (geneigtes Dach, Leichtbetondach, Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale) über der Jahresdurchschnittstemperatur von zehn verschiedenen Jahren dargestellt. Jede Berechnung wird jeweils einmal mit den realen Klimadaten des Jahres (Punkte) und einmal mit den über Temperaturshift an das jeweilige Jahr angepassten Standarddaten von 1991 (Kreise) durchgeführt. Für das geneigte Dach und das Leichtbetonflachdach ist eine relativ gute Übereinstimmung der errechneten Jahresfeuchtebilanz bzw. des Wassergehaltes nach einem Jahr bei Verwendung der angepassten und der realen Klimadaten zu erzielen. Geringfügige Abweichungen sind beim Beispiel für die sommerliche Umkehrdiffusion zu beobachten. Grund dafür ist, dass dieser Effekt von der durchschnittlichen Jahresaußenlufttemperatur und vom Wassergehalt und damit von der Schlagregenbelastung der Außenschale abhängig

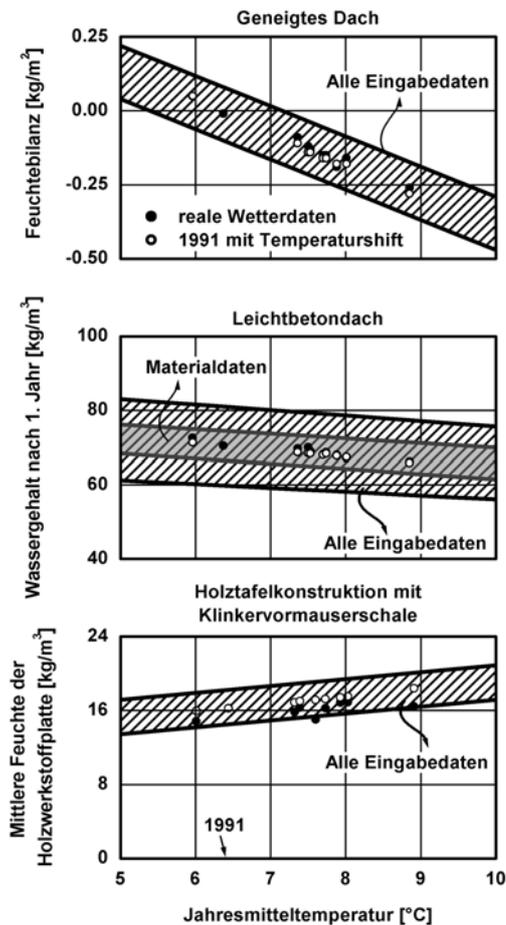


Bild 50: Abhängigkeit der Bewertungsgröße von der Jahresmitteltemperatur. Der schraffierte Bereich gibt die Ungenauigkeit aus der MCA an.

Oben: Jahresfeuchtebilanz eines geneigten Daches.

Mitte: Wassergehalt in einem Leichtbetonflachdach nach dem ersten Jahr.

Unten: Mittlere Feuchte der Holzwerkstoffplatte in einer Holztafelkonstruktion mit Klinkervormauerschale.

Zugrundegelegte Daten:

Normale Raumnutzung, reale Klimadaten für Holzkirchen (Punkte) bzw. mit Temperaturshift korrigierte Daten von 1991 (Kreise).

Für die drei Beispiele lässt sich jeweils ein linearer Zusammenhang der Bewertungsgröße mit den Jahresmittelwerten der Außenlufttemperatur erkennen.

ist. Da aber, wie **Tabelle 5** belegt, die jährlichen Schlagregengemengen zum Teil

Teil sehr unterschiedlich sind, kann die vorgestellte Methode nicht zu einer „hundertprozentigen“ Übereinstimmung führen. Im Sinne einer Sicherheitsabschätzung ist diese Art der Klimadatenanpassung auch für die Problemkategorie III geeignet, denn in keinem Fall liegt der errechnete Wassergehalt unter dem bei Zugrundelegung der realen Klimadaten. Folglich kann die Abschätzung des Einflusses eines warmen bzw. kalten Jahres auf die hygrothermischen Verhältnisse in einer Konstruktion durch die geringfügige Veränderung der Klimadaten mit hinreichender Genauigkeit erfolgen. Die Methode der Anpassung der Standardklimadaten durch einen entsprechenden Temperaturshift könnte auch für hygrothermische Berechnungen an anderen Standorten eine effektive Alternative zu fehlenden Klimadaten darstellen. Jahresdurchschnittstemperaturen sind für fast alle größeren Städte bekannt.

Neben den Materialparametern, den Oberflächenübergangsbedingungen und den äußeren Witterungseinflüssen ist eine Bauteilbewertung entscheidend vom Nutzerverhalten abhängig. In **Bild 51** oben ist beispielhaft für das geneigte Dach die Feuchtebilanz und unten für das baufeuchte Leichtbetonflachdach der Wassergehalt nach dem ersten Jahr in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Raumtemperatur dargestellt. Dabei sind zum einen die Amplituden des Jahrestemperaturverlaufes (jeweils links) und zum anderen die Feuchtelast (jeweils rechts) für den Innenraum variiert. Es zeigt sich, dass wie bei den äußeren Bedingungen ein nahezu linearer Zusammenhang mit der durchschnittlichen Raumlufttemperatur besteht. Aber allein die Veränderung der durchschnittlichen Raumlufttemperatur um 1K führt zu einer Abweichung der Feuchtebilanz, die vergleichbar ist mit jener, bedingt durch die Schwankungen der restlichen Eingabedaten. Die Amplitude hingegen hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Eine veränderte Feuchteproduktion führt zu einer deutlicheren Veränderung der Feuchtebilanz. Beim Leichtbetonflachdach hingegen ist das Ergebnis zwar auch abhängig von der Raumlufttemperatur, doch verglichen mit dem Einfluss der Materialparameter bzw. der unterschiedlichen Feuchtelasten von untergeordneter Bedeutung.

Zu folgern ist, dass hochgenaue Eingabedaten, speziell bei Materialeigenschaften, nicht immer erforderlich sind. Wie die Beispiele für die vier verschiedenen Gefährdungskategorien darlegen, sind die Unterschiede in der errechneten Bewertungsgröße - bedingt durch verschiedene Klimadatenansätze für einen einzigen Standort und Nutzungsverhältnisse - von der Größenordnung her vergleichbar mit der Ungenauigkeit, bedingt durch die „unscharfen“ Eingabedaten. Vor allem bei den Materialdaten ist es in vielen Fällen einfacher, typische Bandbreiten der Eingabedaten zu finden. Das stochastische Konzept dieser Arbeit hilft, die sensiblen Eingabedaten herauszufinden und deren Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis zu quantifizieren. Sie ist speziell

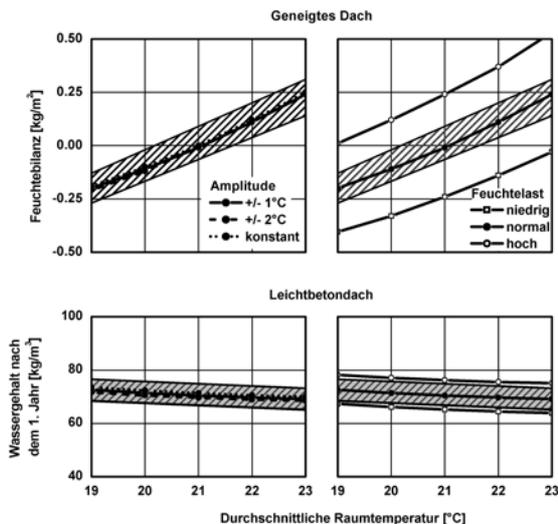


Bild 51: Abhängigkeit der Bewertungsgröße von der durchschnittlichen Raumtemperatur. Der schraffierte Bereich gibt die Ungenauigkeit aus der MCA an. Variiert werden zum einen Amplitude und Jahresdurchschnitt der Raumtemperatur (links) und zum anderen Feuchtelast und Jahresdurchschnitt der Raumtemperatur (rechts).

Oben: Jahresfeuchtebilanz eines geneigten Daches.

Unten: Wassergehalt in einem Leichtbetonflachdach nach dem ersten Jahr.

Zugrundegelegte Daten:

Reale Klimadaten für Holzkirchen [110]. Wandaufbau und Materialdaten gemäß Tabelle 7 und Bild 12.

für die Fälle geeignet, bei denen die Material- und Oberflächenparameter nicht genau bestimmt bzw. bekannt sind und trotzdem eine hygrothermische Berechnung durchgeführt werden muss. Durch die 2-Punkt-Methode bekommt der Anwender hygrothermischer Modelle sofort Informationen über die sensibelsten Daten und kann, wenn nötig, seinen Arbeitsaufwand für die messtechnische Erfassung der Eingabeparameter auf ein notwendiges Mindestmaß reduzieren. Ebenfalls sind durch das vorgestellte Schnellverfahren Schätzungen über den Gütegrad einer Berechnung möglich. Mit dem stochastischen Konzept ist im Vergleich zum bisherigen deterministischen Ansatz ein Schritt in Richtung eines hygrothermischen Sicherheitskonzeptes getan. Als Ergebnis erhält man mögliche Bandbreiten hygrothermischer Zustände. Durch die Anknüpfung an Prognosemodelle, wie etwa das von Sedlbauer [142] entwickelte Modell zur Vorhersage von Schimmelpilzwachstum, lassen sich Schadenswahrscheinlichkeiten ziemlich genau ermitteln.

6. Ausblick

Die Arbeit hat gezeigt, dass die Eingangsparameter - d.h. die Klima- und Materialdaten - einen hohen Einfluss auf die Ergebnisse hygrothermischer Bauteilberechnungen ausüben. Durch stochastische Sensitivitätsanalysen ist eine Aussage über Bandbreite (in **Bild 52** exemplarisch durch graue Flächen dargestellt) und Zuverlässigkeit rechnerischer Prognosen möglich. Auf diese Weise sind die für den betrachteten Fall dominanten von weniger maßgeblichen Einflussparametern differenzierbar. Da nur für die dominanten Einflussparameter möglichst genaue Angaben erforderlich sind, wird durch dieses Vorgehen auch der Aufwand für die Zusammenstellung bzw. Ermittlung der Eingangsparameter reduziert.

In vielen Fällen reicht die detaillierte Kenntnis des hygrothermischen Bauteilverhaltens allein nicht aus, um Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit treffen zu können. Dazu sind spezielle Beurteilungskriterien bzw. Bewertungsmodelle erforderlich, um aus den instationären Temperatur- und Feuchteverläufen Aussagen zur Dauerhaftigkeit und zum Schadensrisiko ableiten zu können. Hier steht man allerdings erst am Anfang einer Entwicklung, die in Zukunft für eine bessere feuchtetechnische Beurteilung und damit auch Schadensprävention im Bauwesen sorgen wird. Dies kann auch als Grundlage für ein bauphysikalisches Sicherheitskonzept dienen, das bislang in konsequenter Ausprägung fehlt. Nachfolgend werden die zur Zeit national wie auch international verfolgten „Entwicklungsschienen“ im Zusammenhang mit der hygrothermischen Bauteilberechnung anhand von **Bild 52** erläutert.

Ein Entwicklungsschwerpunkt ist die Einbindung der hygrothermischen Bauteilberechnung in die Ermittlung des Energie- und Feuchtehaushaltes von Gebäuden, wie durch die Schleife A in **Bild 52** symbolisiert. Daraus entsteht eine breitere Berechnung von Gebäudeeigenschaften, die eine genaue Analyse der thermischen und hygrischen Rückkoppelungen zwischen dem Gesamtgebäude und seinen Bauteilen ermöglicht. Dazu gehören z.B. die Feuchtepufferwirkung der Umschließungsflächen bei Änderungen der Feuchtelast im Raum oder die Feuchtesorption bzw. -desorption bei Änderungen der Raumlufttemperatur. Ein Zweck dieser Entwicklung ist die Schaffung von Planungswerkzeugen zur Reduzierung des Klimatisierungsaufwandes in Gebäuden. Durch gezielte Nutzung des Wärme- und Feuchtespeichervermögens von Gebäudeumschließungsflächen und Einbauten sollen Raumklima-schwankungen - soweit wie möglich ohne Einsatz von mechanischen Anlagen - begrenzt werden. Da nach neueren Erkenntnissen [32] für das Behaglichkeitsempfinden des Menschen die Raumluftenthalpie eine bisher unterschätzte Rolle spielt, dürfte mit einer zunehmenden Nachfrage nach hygrothermischen Gebäudeberechnungsmodellen zu rechnen sein.

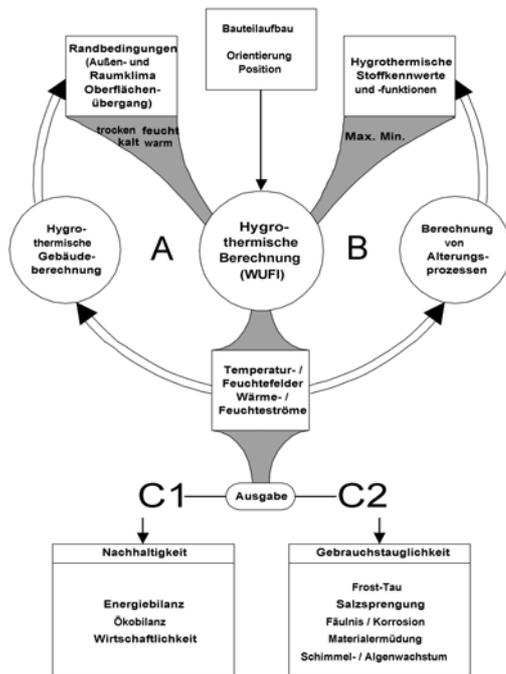


Bild 52: Darstellung zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich hygrothermischer Berechnungen. Der grau hinterlegte Bereich repräsentiert das probabilistische Konzept dieser Arbeit.

Die hygrothermischen Wechselbeanspruchungen von Bauteilen führen zu einer langfristigen Veränderung der Materialien. Dieser klimabedingte Alterungsprozeß kann durch chemische oder auch durch physikalische Vorgänge vonstattengehen. Häufig ist mit der Alterung eine Veränderung der hygrothermischen Stoffeigenschaften verbunden, was wiederum das instationäre Temperatur- und Feuchteverhalten des Bauteils beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist in Bild 52 durch die Schleife B schematisch dargestellt. Durch die Integration von Alterungsfunktionen in die hygrothermische Bauteilsimulation werden langfristige Prognosen für Bauteile unter Praxisbedingungen ermöglicht.

Die Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilberechnung zeigen die in der Praxis auftretenden, instationären Temperatur- und Feuchtefelder sowie Wärme- und Feuchteströme auf. Daraus lassen sich in Verbindung mit weiteren Modellansätzen Rückschlüsse auf das energetische Verhalten und die Ökobilanz [140] der untersuchten Bauprodukte ziehen (Ergebnisverarbeitung C1 in Bild 52). Beispielsweise sind die feuchtebedingten Transmissions- oder Latentwärmeverluste sowie die erforderlichen Lüftungsraten zum Abführen der Feuchte über die Nutzungsdauer eines Gebäudes bilanzierbar. Solche Ergebnisse können dann auch in die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit einfließen.

Von großer praktischer Bedeutung ist die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Baustoffen und Bauteilen in Abhängigkeit von ihren hygrothermischen Beanspruchungen. Wie in der Ergebnisverarbeitung C2 in Bild 52 zusammengefasst, kann die Gebrauchstauglichkeit durch Frost, Salzsprengwirkung, Fäulnis oder Korrosion sowie durch hygrothermische Materialermüdung und Algen- oder Schimmelpilzwachstum beeinträchtigt werden. In allen Fällen spielen Feuchtevorgänge eine Rolle. Entsprechende Auswertemodelle müssen in der Lage sein, aus den lokalen Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Bauteil Schadenswahrscheinlichkeiten abzuleiten, die unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit des untersuchten Bauteils zulassen [142].

7. Zusammenfassung

Die Arbeit hat gezeigt, dass mit Hilfe des stochastischen Konzeptes die Sensitivität bestimmter Eingabedaten und die Unsicherheitsbereiche hygrothermischer Berechnungen ermittelt werden können. Bisher wurden Unsicherheiten aus der hygrothermischen Risikobewertung ausgespart; man hat die Wirkung der einzelnen physikalischen Prozesse isoliert betrachtet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird statt dessen davon ausgegangen, dass die für die hygrothermischen Berechnungen benötigten Eingabedaten grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet sind, die mit Hilfe von stochastischer Ansätze abgeschätzt werden können. Zur Bestimmung werden zwei Verfahren zur Unsicherheitsanalyse vorgestellt: die differentielle Sensitivitätsanalyse und die wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die einzelnen Parameter aus dem deterministischen Ansatz in verschiedenen Kombinationen zu variieren und deren jeweilige Wirkung zu bestimmen. Bei einfachen Situationen bereitet dies auch keine Probleme. Die Zahl der möglichen Kombinationen erreicht aber bei realen Konstruktionen leicht eine Größenordnung, bei der die Durchführung und die Auswertung dieser Art von Unschärfeanalyse erhebliche Schwierigkeiten bereiten. Für derartige Situationen ist ein automatisiertes, stochastisches Simulationskonzept ein möglicher Lösungsweg. Die Umsetzung des stochastischen Konzeptes erfolgt mit dem neu entwickelten Programm WUFI-Star (Stochastic Analysis Research). Allerdings sind bei der Umsetzung gewisse vereinfachende Annahmen zu treffen. Diese dienen einerseits dazu, die Anzahl der Rechnungen und die Gesamtrechnenzeit auf ein Mindestmaß zu reduzieren; andererseits sind ohne diese Vereinfachungen keine sinnvollen Parametervariationen möglich.

Zur Reduzierung der Rechenzeit ist der Einsatz von charakteristischen Kurz-Klimazyklen ein geeignetes Mittel. Abhängig vom hygrothermischen Verhalten und der möglichen Gefährdung lassen sich vier Problemkategorien definieren:

- I. erhöhte Schlagregenbeanspruchung,
- II. sommerliche Tauwasserbildung (sog. „Umkehrdiffusion“)
- III. Baufeuchte
- IV. winterliche Tauwasserbildung

Für jede dieser Problemkategorien wurden typische Kurz-Klimazyklen definiert. Einige der Materialparameter, wie etwa die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigtransportkoeffizienten sind komplexer Natur und kommen in dieser Form für eine „schnelle“ Anwendung im Normalfall nicht in Frage. Deshalb wurden für die Transportkoeffizienten des kapillaren Saugens und Trocknens sowie für die Feuchtespeicherfunktion neue, praxistaugliche Approximationsmethoden vorgestellt, mit denen ausreichend genaue Rechenergebnisse zu erzielen sind. Das stochastische Konzept arbeitet dann nur noch mit einfachen Materialgrundkennwerten. Im einzelnen werden folgende Grundkennwerte benötigt:

- Rohdichte
- Porosität
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- feuchtebedingte Wärmeleitfähigkeitszunahme
- Sorptionsfeuchten bei 80 % und 95 % relativer Luftfeuchte
- Freie Wassersättigung
- w-Wert
- Faktor $D_{w,s}/D_{w,t}$ (Trocknungsverhalten)

Die bisherigen deterministischen Ansätze erlaubten es grundsätzlich, sich ein Bild von Art und Umfang der Feuchtebelastung eines Bauteils zu machen. Deshalb steht am Anfang der Unsicherheitsanalyse stets eine deterministische Betrachtung mit einer möglichst genauen Schätzung der Eingabedaten. Aus den Ergebnissen der deterministischen Berechnung müssen zunächst für den behandelten Fall die richtige Problemkategorie und der damit verknüpfte Kurz-Klimazyklus definiert werden. Anschließend lässt sich aus der mit relativ geringem Rechenaufwand verbundenen Zwei-Punkt-Methode herausfinden, wie empfindlich die Lösung einer mit quasi sicheren Daten ausgeführten hygrothermischen Berechnung reagiert, wenn einzelne Eingabedaten variiert werden. Der Einfluss der jeweiligen Eingabegröße auf das Beurteilungskriterium wird festgehalten und deren Auswirkung auf die Bewertungsgröße beobachtet. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde statt partieller Ableitungen die sog. „Elastizität“ neu eingeführt; sie dient als Sensitivitätsmaß. Die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung der Unsicherheit müssen dann nur

noch mit den Eingabedaten mit der höchsten Elastizität durchgeführt werden.

Aus den gezeigten Anwendungsbeispielen für das stochastische Konzept ist zu folgern, dass hochgenaue Eingabedaten, speziell bei Materialeigenschaften, nicht immer erforderlich sind. Wie die Beispiele darlegen, sind die Unsicherheiten der errechneten Bewertungsgröße, bedingt durch verschiedene Klimadatensätze für einen Standort oder für Nutzungsverhältnisse, von der Größenordnung her vergleichbar mit der Unsicherheit infolge „unscharfer“ Material- und Oberflächenparameter. Vor allem bei den Materialdaten ist es in vielen Fällen einfacher, typische Bandbreiten der Eingabedaten als genaue Einzelwerte zu finden. Das stochastische Konzept hilft jedoch, die sensiblen Eingabedaten herauszufinden und deren Auswirkungen auf das Ergebnis zu quantifizieren. Es ist vor allem geeignet für die Fälle, bei denen die Material- und Oberflächenparameter nicht genau bekannt sind und trotzdem eine hygrothermische rechnerische Beurteilung notwendig ist. Der Anwender dieser Methode erhält rasch wichtige Informationen über die sensibelsten Eingabedaten sowie über den Gütegrad einer Berechnung und kann den Arbeitsaufwand für eine messtechnische Erfassung der unbekanntesten Eingabeparameter auf ein notwendiges Mindestmaß reduzieren.

Das Konzept kann dank immer leistungsstärkerer Rechner heute bereits dazu dienen, die bauphysikalischen Eigenschaften von Bauteilen bereits in der Planungsphase so zu definieren, dass deren praktischer Einsatz ohne großes Risiko erfolgen kann. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren können Art und Ausmaß der maßgeblichen Größen zur Beurteilung von Gebrauchstauglichkeiten samt den ihnen anhaftenden Unsicherheiten einbezogen werden, um schon in der frühen Entwicklungsphase von Bauprodukten die „Weichen“ für ein optimales Produkt zu stellen und effizient und kostengünstig zu arbeiten. Mit dem stochastischen Konzept ist im Vergleich zum bisherigen deterministischen Ansatz ein weiterer Schritt in Richtung eines bauphysikalischen Sicherheitskonzeptes getan worden.

8. Literatur

- [1] Arnold, A., et al.: Wandmalerei, Zerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 5 (1991), H. 2, S. 171-200.
- [2] ASTM E96-00: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. Ausgabe 2000.
- [3] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden - Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation Technische Universität Wien (2000).
- [4] Bednar, Th. und Dreyer, J.: Die Genauigkeit von Simulationsprogrammen für den Wärme- und Feuchtehaushalt von Bauteilen. WTA-Schriftenreihe Heft 18 "Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren", Aedificatio Verlag Freiburg (1999).
- [5] Bednar, Th.: Influence of the variation of material properties and uncertainties of the material data model on the results of moisture performance calculations of constructions, Online-Proceedings, Materialsweek 2000, München (2000).
- [6] Berliner, M.A.: Feuchtemessung. VEB Verlag Technik Berlin (1980).
- [7] Brandt, S.: Datenanalyse. Spektrum Akademischer Verlag (1999).
- [8] Brocken, J.P.: Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks. Dissertation Technische Universität Eindhoven (1998).
- [9] Brunauer, S., Emmett, P.H. und Teller, E.: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of American Chemical Society 60 (1938), H. 2, S. 309-319.
- [10] Burch, D. M. und Chi, J.: MOIST - A PC program for predicting heat and moisture transfer in building envelopes - Release 3.0. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 917, Gaithersburg, MD (1997).
- [11] Burch, D. M. und Desjarlais, A. O., Water-Vapor Measurements of Low-Slope Roofing Materials. National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 5681, Gaithersburg, MD (1995).
- [12] Carmeliet, J. und Roels, S.: Determination of the Isothermal Moisture Transport Properties of Porous Building Materials. Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 24 (Januar 2001) H. 3, S. 183-210.
- [13] Christoffer, J.; Hollan, E.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Offenbach a. Main (2000).
- [14] Christen, H.R.: Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie. Verlag Sauerländer Aarau, Salle Verlag Frankfurt/Main (1968).
- [15] Cunnigham, M.J.: Inferring ventilation and moisture release rates from field psychrometric data only using system identification techniques. Building and Environment, Vol. 36 (Januar 2001) H. 1, S. 129-138.
- [16] Dahl, S. und Kuehn, Th.; Ramsey, J. u.a.: Moisture Storage and Non-Isothermal Transport Properties of Common Building Materials. HVAC&R Research, 2 (1996), H. November, S. 42-58.
- [17] Descamps, F.: Continuum and discrete modelling of isothermal water and air transfer in porous media. Dissertation Katholieke Universiteit Leuven (1997).
- [18] Depraetere, W., Carmeliet, J. und Hens, H.: Moisture transfer across interfaces in porous materials Measurements and simulations. Tagungsband 1 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 241- 250.
- [19] DIN 4108-3: Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001.
- [20] DIN 4701: Regeln für die Berechnung der Heizlast von Gebäuden (Norm-Entwurf). Februar 2001.
- [21] DIN 18555-3: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte. September 1982.
- [22] DIN 51056: Bestimmung der Wasseraufnahme und der offenen Porosität. August 1985.

- [23] DIN 51065: Bestimmung der Rohdichte an Förmlingen und Bruchstücken. August 1987.
- [24] DIN 52102: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. August 1988.
- [25] DIN 52103: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. Oktober 1988.
- [26] DIN 52617: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Mai 1987.
- [27] DIN 52620: Bestimmung des Bezugsfeuchtegehaltes von Bau- und Dämmstoffen. Mai 1989.
- [28] DIN EN ISO 12571, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Ausgabe April 2000.
- [29] DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit. September 2001
- [30] Eitner, V.: Bestimmung der Unsicherheit im gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport auf Basis des dem PC-Programm WUFI zugrundeliegenden Transportmodells. Diplomarbeit Fachhochschule München (2001)
- [31] EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen - Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. April 2000.
- [32] Fanger, P.O.: Menschliche Anforderungen an zukünftig zu klimatisierende Umgebungen. KI 36 (2000), H.3, S.114-119.
- [33] Fischer, L.: Sicherheitskonzept für neue Normen -ENV und DIN-neu - Grundlagen und Hintergrundinformationen Teil 1: Normung im Konstruktiven Ingenieurbau In: Bautechnik 75 (1998), H. 11, S. 930-951.
- [34] Frank W.: Einwirkung von Regen und Wind auf Gebäudefassaden; Stand der gegenwärtigen Kenntnisse aufgrund der Literatur In: Berichte aus der Bauforschung (1973), H. 86, S. 17- 40.
- [35] Freitas, V.: Transferência de humidade en paredes de edefícios. Dissertation Universidade do Porto (1992).
- [36] Freitas, V. P. et al.: Determination of the water diffusivity of porous materials by gamma-ray attenuation and NMR. International Symposium in Moisture Problems in Building Walls Proceedings, Porto (1995), S. 445-460.
- [37] Freitas, V. P.: The indoor climate and moisture problems in the building envelope. International Symposium on indoor quality in practice, Oslo 1995.
- [38] Garrecht H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf das Mauerwerk. Dissertation Universität Karlsruhe (1992).
- [39] Gawin D.: Modelling of coupled hygrothermal phenomena in building materials and building components (in Polnisch). Scientific Bulletin of Łódź Technical University Nr 853, Dissertation Series Nr. 279, Editions of Łódź Technical University, ISSN 0137-4834, Łódź (2000).
- [40] Gertis, K. und Werner, H.: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 258, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1976), S. 6-36.
- [41] Gertis, K. und Erhorn, H.: Wohnfeuchte und Wärmebrücken. HLH 36 (1985), H. 3, S. 130-135.
- [42] Gertis, K. und Erhorn, H.: Neue Überlegungen zum Mindestwärmeschutz. WKSB-Sonderausgabe (1985), S. 39-42.
- [43] Gertis, K.: Zur praktischen Aussagekraft von Feuchtemessungen bei Baustoffen. Technologie und Anwendung der Baustoffe (1992), H. Festschrift Rostásy, S. 1-7.
- [44] Geving, S.: Moisture design of building constructions – hygrothermal analysis using simulation models. Dissertation NTNU Trondheim (1997).

- [45] Gösele, K., Schüle, W. und Künzel, H.: Schall - Wärme - Feuchte. 10. Auflage Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. Bauverlag Wiesbaden und Berlin (1997).
- [46] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation TU Dresden (1997).
- [47] Hagentoft, C.-E.: PC-program: 1D-HAM. Notes on heat transfer 5-93. Department of Building Physics, Lund University. Report TVBH-7147, (1993).
- [48] Hall, C. et al.: Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials. Journal Of Materials Science Letters 14 (1995), p. 1178-1181.
- [49] Hansen, Morten H.: Retention curves measured using pressure plate and pressure membrane apparatus Description of method and interlaboratory comparison - Nordtest Technical Report 367 (1998).
- [50] Hansen, M. et al.: Interlaboratory comparison of the measurements of retention. Beitrag CIB W40, Kyoto (1997).
- [51] Häupl, P. und Fechner, H.; Neue, J.: Numerische Berechnung des hygrischen Verhaltens von Außenwänden. Tagungsband DFG-Forschungsschwerpunkt Bauphysik der Außenwände 1997 Internationaler Bauphysikkongress 25. und 25. September 1997 Berlin, IRB-Verlag Stuttgart (1997). S. 159-170.
- [52] Häupl, O.; Fechner, H.; Neue, J.: Bestimmung der Parameter der Kapillarwasserleitfähigkeit aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten. Tagungsband 2 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 483-496.
- [53] Hens, H.: Modelling, Heat Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts. Final Report IEA-Annex 24, KU Leuven (1996).
- [54] Högberg, A.: Measurement of Microclimate near a Building Surface. Tagungsband 2 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 649-657.
- [55] Hohmann, R.: Materialtechnische Tabellen, Bauphysikkalender 2001, 1. Jahrgang, Verlag Ernst & Sohn Berlin (2001), S.261-336.
- [56] Hokoi, S.; Matsumoto, M.: An Analysis of Stochastic Properties of Room Air Temperature and Heating Load Influences of randomness Parameters.
- [57] Holm, A., Krus, M., Künzel, H.M.: Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2 (1996), H. 5, S. 375-396.
- [58] Holm, A. und Worch, A.: Einsatzmöglichkeiten des Computersimulationsprogramms WUFI bei Putzen. FAS-Schriftenreihe, Heft 9, Putzinzustandsetzung: Vorträge anlässlich der 9. Hanseatischen Sanierungstage im November 1998 im Ostseebad Kühlungsborn.
- [59] Holm, A.; Künzel, H.M.: Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwolleplatten in Wärmedämmverbundsysteme. wksb 43 (1998), H. 41, S. 2-6.
- [60] Holm, A.; Krus, M.: Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerische Anpassung. Bauinstandsetzen 4 (1998), H. 1, S. 33-52.
- [61] Holm, A., Krus, M.: Zerstörungsfreie Bestimmung der Salzgehaltsverteilung durch Kombination zweier Meßmethoden. IBP-Mitteilung 25 (1998), Nr. 340.
- [62] Holm, A. und Künzel, H.M.: Bestimmung der Wasser- und Salzgehaltsverteilung durch Kombination von NMR- und γ -Durchstrahlungsmessungen. Bauinstandsetzen 6 (2000), H. 4, S. 401-414.
- [63] Holm, A., Krus, M. und Künzel, H.M.: Beton aus feuchtetechnischer Sicht: Kennwerte und rechnerische Bewertungsansätze für Klimawirkungen in Betonaußenbauteilen. DFG-Schlußbericht Bauphysik der Außenwände, IRB-Verlag Stuttgart (2000), S. 333-352.
- [64] Hussein, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion. Universität Dortmund, Dissertation 1982. Als Manuskript gedruckt.

- [65] Hundt, J., Buschmann, J.: Moisture Measurement in Concrete. In: *Materiaux et Constructions* 4 (1971), H. 22, S. 253-259.
- [66] Illig W.: Die Größe der Wasserdampfübergangszahl bei Diffusionsvorgängen in Wänden von Wohnungen, Stallungen und Kühlräumen. *Gesundheits-Ingenieur* 73 (1952). H. 7/8, S. 124-127.
- [67] Janz, M.: A Test Method for the moisture diffusivity at very high moisture levels International Symposium in Moisture Problems in Building Walls Proceedings, Porto (1995), S. 168-177.
- [68] Karagiozis, A. N.: Overview of the 2-D Hygrothermal Heat-Moisture Transport Model Latenite, IRC Internal Report, National Research Council of Canada, Ottawa, (1993).
- [69] Karagiozis A. N.: Hadjisophocleous G.: Wind-driven rain on tall buildings. Building physics in the nordic countries, Proceeding of the 4th Symposium Volume 2, Espoo, Finland (1996) S. 523-532.
- [70] Karagiozis, A. N.: Advanced Hygrothermal Model MOISTURE-EXPERT, Oak Ridge National Laboratory (2000).
- [71] Karagiozis A. N.: Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.
- [72] Kast, W. und Jokisch, F.: Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik in porösen Feststoffen. *Chemieingenieur Technik* 44 (1972), H. 8, S. 556-563.
- [73] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtettransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen (1983)
- [74] Kießl, K., Krus, M. und Künzel, H.M.: Weiterentwickelte Mess- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Praktische Anwendungsbeispiele. *Bauphysik* 15. (1993), H. 2, S. 61-67.
- [75] Kießl, K.: Prüffeldmessungen und Feuchteberechnung Vorteil, Grenzen und Kombination an Beispielen. *Bauphysik* 21 (1999), H. 6, S. 274-281.
- [76] Klier, M.: Kapillarer Feuchteaus-tausch in verschiedenen Baustoffen. Feuchteprofilmessungen im Kontaktbereich der Baustoffe und Erweiterung vorhandener Modellansätze. Diplom-Arbeit Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik (1995).
- [77] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH Wiesbaden (1974).
- [78] Knuth, D.: *Seminumerical Algorithms, The Art of Computer Programming*, Band 2. 2. Auflage Addison-Wesley, (1981).
- [79] Kolmogorov, Andrej N.: *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer Verlag Berlin (1933).
- [80] Koronthalyova, O. und Matiasovsky, P.: Factors Influencing Correctness of the Simulation Model of the Building Structures Hygrothermal Behaviour. Beitrag CIB W40, Prag (1999).
- [81] Krischer, O. und Kast, W.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin (1978).
- [82] Krus M.: The sensitivity of the diffusivity function. "Science-Project"-Meeting, Holzkirchen, 17.-18. Jan. 1994.
- [83] Krus, M.: Feuchtettransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation Universität Stuttgart (1995).
- [84] Krus, M. und Künzel, H.M.: Flüssigtransport im Übersättigungsbereich. In: *IBP-Mitteilung* 22 (1995) Nr. 270.
- [85] Krus, M. und Künzel, H.M.: Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen. *IBP-Mitteilung* 22 (1995) Nr. 273.
- [86] Krus, M. und Künzel, H.M.: Berechnung des Feuchtehaushaltes von Porenbetonbauteilen In: *Gesundheits-Ingenieur* 117 (1996), H. 3, S. 134-139.
- [87] Krus, M., Holm, A. und Schmidt, Th.: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert. *Bauinstandsetzen* 3 (1997), H. 1, S. 219-234.
- [88] Krus, M. und Holm, A.: Approximationsverfahren für die

- Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte Tagungsband 2 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 423-432.
- [89] Krus M. und Fitz C.: Bestimmung des Diffusionswiderstandes extrem diffusionsoffener Folien. IBP-Mitteilung 27 (2000) Nr. 362.
- [90] Krus, M. und Holm, A.: Kapillartransport von Sanierputzen. Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.
- [91] Kumaran, M. K.: Report IEA Annex 24, Task 3: Material Properties, International Energy Agency Annex 24 on Heat, Air and Moisture Transport in New and Retrofitted Building Envelope Parts, Leuven (1996)
- [92] Kumaran, M. K.: Interlaboratory Comparison of the ASTM Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials (E 96-95). Journal of Testing and Evaluation 26 (1998), H. 2, S. 83-88.
- [93] Künzel, H.: Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in Flachdachkonstruktionen. Berichte aus der Bauforschung H. 48, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1966
- [94] Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 4 (1982), H. 3, S. 101-107.
- [95] Künzel, H.: Gasbeton – Wärme- und Feuchteschutz. Bericht 11 des Bundesverbandes der Porenbetonindustrie, 1989.
- [96] Künzel, H.: Trocknungsblockade durch Mauerversalzung. Bautenschutz + Bausanierung 14 (1991), H. 4, S. 63 - 66.
- [97] Künzel, H.: Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden. Untersuchungen an Fachwerkelementen und Fachwerkhäusern und Folgerungen für die Praxis. Fachbuchreihe "Bauforschung für die Praxis", Band 23. IRB-Verlag Stuttgart (1996).
- [98] Künzel, H.: Zweischalige Außenwände mit Kerndämmung und Klinkerverblendung. wksb 41 (1996), H. 37, S. 15-19.
- [99] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [100] Künzel, H.M.: Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen IBP Mitteilung 21 (1994) Nr. 263.
- [101] Künzel, H.M.: Regendaten für die Berechnung des Feuchtetransports In: IBP Mitteilung 21 (1994) Nr. 265.
- [102] Künzel, H.M.: Einfluß der Mittelwertbildung von Klimadaten auf die Ergebnisse von Feuchtetransportberechnungen. Dresden 1994. S. S. 332-344.
- [103] Künzel, H.M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP Mitteilungen 24 (1997) Nr. 314.
- [104] Künzel, H.M.: Außen dampfdicht, vollgedämmt ? bauen mit holz (1998), H. 8, S. 36-41.
- [105] Künzel, H.M. und Kießl, K.: Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau aktuell 98 (1998) S. D48-D57.
- [106] Künzel, H.M.: Dampfdiffusionsberechnungen nach Glaser – quo vadis ? IBP Mitteilung 26 (1999) Nr. 355.
- [107] Künzel, H.M. und Schmidt, Th.: Auswahl und Aufbereitung von meteorologischen Datensätzen für Feuchtetransportberechnungen. Tagungsband 2 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 637-647.
- [108] Künzel, H.M. und Schmidt, Th.: Wetterdaten für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen. IBP Mitteilung 27 (2000) Nr. 364.
- [109] Künzel, H.M., Holm, A. und Eitner, V.: WUFI2d-CFD. Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.
- [110] Künzel, H.M., Schmidt, Th. und Holm, A. : WUFI-3.1: Programm zur instationären Berechnung des eindimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen, Holzkirchen (2001).
- [111] Larsen, P.K.: Desalination of painted brick vaults. Department of Structural

- Engineering and Materials Technical University of Denmark, Series R, No 52, 1999.
- [112] Lutz, P. et al. : Lehrbuch der Bauphysik. B.G. Teubner Stuttgart (1997).
- [113] Macdonald, I. und Strachan, P.: Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings* 33 (2001), H. 3, S. 219-227.
- [114] Mendes, N., et al.: UMIDUS: A PC Program For The Prediction Of Heat And Moisture Transfer In Porous Building Materials. *Proceedings of Building Simulation '99*, Volume 1: 277-283.
- [115] Mises, Richard von: *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. Einführung in die neue Wahrscheinlichkeitslehre und ihre Anwendung.* Springer Verlag Wien (1936).
- [116] Moeschlin, O.: *Künstlicher Zufall. Experimentelle Stochastik.* Fernuniversität Hagen (1995).
- [117] Mook van, F., *Measurements and simulations of driving rain on the Main Building of the TUE, Proceedings of the 5th Symposium of Building Physics in the Nordic Countries, Göteborg (SE), 24-26 August 1999, p. 377-384.*
- [118] Nielsen, C.B.: *Salts in Porous Building Materials.* Building Materials Laboratory. Dissertation The Technical University of Denmark (1991).
- [119] Nielsen, A.: *Use of Statistics for Prediction of Risk for Condensation in a Wall Construction.* International Symposium in Moisture Problems in Building Walls *Proceedings, Porto* (1995), S. 3-12.
- [120] Ojanen, T., Kohonen, R. and Kumaran, M.K.: *Modelling heat, air and moisture transport through building materials and components.* Chapter 2 in *Moisture Control in Buildings*, ed. H. Trechsel, ASTM Manual Series MNL 18, Philadelphia (1994).
- [121] Pel,L.: *Moisture transport in porous building materials.* Dissertation Technische Universiteit Eindhoven (1995).
- [122] Peuhkuri, R.: *Different Methods of Measuring Moisture Sorption Mechanisms.* Beitrag CIB W40, Wellington (2001).
- [123] Philip, J.R. und de Vries, D.A.: *Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients.* *Transactions, Amer. Geophysical Union* 38 (1957), H. 2, S. 222-232.
- [124] Plagge, R.; Grunewald, J.; Häupl, P.: *Simultaneous Determination of Water Retention Characteristic and Moisture Conductivity using Instantaneous Profile Techniques.* Tagungsband 2 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 433-443.
- [125] prEN ISO12572: *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties.* Entwurf. Juni 2001.
- [126] Ricken, D.: *Ein einfaches Berechnungsverfahren für die eindimensionale, instationäre Wasserdampfdiffusion in mehrschichtigen Bauteilen.* Dissertation Universität Dortmund (1989).
- [127] Rode C.: *Combined heat and moisture transfer in building components.* Dissertation Technical University of Denmark (1990).
- [128] Rucker P.: *Einfluß von Salz auf den Feuchtetransport in Mauerwerk.* Diplomarbeit Universität Stuttgart (1999).
- [129] Rucker, P., Holm, A. und Krus, M.: *Determination of moisture and salt content distributions by combining NMR and gamma ray measurements.* Online-*Proceedings, Materialsweek 2000, München* (2000).
- [130] Salonvaara M. und Karagiozis, A. N.: *Moisture Transport in Building Envelopes using an approximate Factorization Solution Method.* *Proceedings of the Second Annual Conference of the CFD Society of Canada, Toronto, (1994).*
- [131] Salonvaara, M. und Karagiozis, A, N.: *Parametric Study on Material Properties Using Stochastic Modeling, IEA Annex 24 Task1 Simplified Modeling* (1994).
- [132] Salonvaara, M.: *Tratmo2. Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.*
- [133] Sandberg, P.I.: *Building components and building elements – Calculation of surface*

- temperature to avoid critical surface humidity and calculation of interstitial condensation. Draft European Standard CEN/TC 89 W10 N107.
- [134] Sanders, C.: Report IEA Annex 24, Task 2: Environmental Conditions, International Energy Agency Annex 24 on Heat, Air and Moisture Transport in New and Retrofitted Building Envelope Parts, Leuven (1996).
- [135] Schaub H. und Werner H.: Wärmeübergangskoeffizienten unter natürlichen Klimabedingungen. IBP Mitteilung 13 (1986) Nr. 109.
- [136] Schirmer, R.: Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. 2. VDI Beil. Verfahrenstechnik (1938), H. 6, S. 170-177.
- [137] Schulze, H.: Hausdächer in Holzbauart. Werner-Verlag Düsseldorf (1987).
- [138] Schwarz, B.: Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen. Dissertation Universität Stuttgart (1971).
- [139] Schwarz, B.: Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden. HLH 24 (1973), H. 11, S. 376-384.
- [140] Sedlbauer, K. und Wörle, G.: Ökobilanzierung von Bauprodukten, ohne Nutzungsphase nutzlos? Bauphysik 20 (1998), H.6, S.209-219.
- [141] Sedlbauer, K. und Künzel, H.M.: Frost damage of Masonry Walls – A hygrothermal Analysis by Computer Simulations. Journal of Thermal Envelope & Building Science 23 (2000), H. 3, S. 277-281.
- [142] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [143] Sosoro, M. und Reinhardt, H.-W.: "Effect of moisture in concrete on fluid absorption." In: The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability. Herausgeber. H. Jennings, H. Kropp, K. Skrivener, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht 1996 S. 443-456.
- [144] Stopp, H. und Strangfeld, P.: Die neue Porenbetondämmplatte - eine Möglichkeit hochwertiger Innendämmung mit mineralischen Dämmstoffen. Tagungsband 1 des 10. Bauklimatisches Symposiums, Dresden (1999), S. 295-303.
- [145] Straube, J. F.: Moisture control and enclosure wall systems. Dissertation University of Waterloo (1998).
- [146] Straube J. F.: Burnett E.F.P.: Simplified prediction of driving rain on buildings Amerika. Proc. of International Building Physics Conference, Eindhoven, September 18-21, (2000), S. 375-382.
- [147] Straube J. F.: Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.
- [148] TenWolde, A.: Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.
- [149] Trechsel, H.; Bomberg, M.: Water vapor transmission through building materials and systems; Mechansims and Measurements (1989).
- [150] VDI-Richtlinie 3789: Umweltmeteorologie, Blatt 2: Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung. Oktober 1994
- [151] Vos, B. H.: Meßmethoden zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes des Feuchtegehaltes und der Feuchteverteilung. Gesundheits-Ingenieur 89 (1968), H. 3, S. 74-80 und H. 4, S. 115-118.
- [152] Winter, K., Krus, M., Künzel, H.M.: Feuchtetransport in feinporigen Materialien. Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997), H. 1, S. 1-14.
- [153] Zirkelbach, D.: Austrocknungsverhalten von hochdämmenden Mauersteinen. Diplomarbeit Technische Universität München (2001).