

Moderne Rechenverfahren für die Diagnostik

Dipl.-Phys. A. Holm

Dipl.-Phys. K. Sedlbauer

Dr.-Ing. H. M. Künzel

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

Zusammenfassung

Moderne Rechenverfahren, die es erlauben, die hygrothermischen Vorgänge in Bauteilen instationär und realitätsnah zu beschreiben, setzen sich immer mehr gegenüber den in DIN 4108 beschriebenen Normverfahren durch. Dies liegt auch daran, daß verschiedene Einflüsse wie Schlagregen, aufsteigende Grundfeuchte oder Baufeuchte bei der diagnostischen Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen damit berücksichtigt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand folgender Beispiele, die mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Programm-Paket WUFI 3.0 berechnet wurden, gezeigt, wie moderne Rechenverfahren für die Diagnostik eingesetzt werden können:

- Feuchteeinfluß auf die Dämmwirkung,
- Feuchteverhaltens von Putzen - Mechanische Beanspruchung durch hygrothermische Wechsellast,
- Schlagregenfeuchte in Sichtmauerwerk mit Innendämmung,
- Frostschäden im Winter - Analyse durch feuchtetechnische Berechnungen am Beispiel einer Kalksandsteinwand,
- Rechnerische Ermittlung der Schimmelpilzgefahr.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Dem hygrothermischen Verhalten von Bauteilen kommt wegen der Wittereinwirkung, dem Wasser im Boden sowie aufgrund der zunehmend winddichten Bauart und der damit ggf. erhöhten Raumluchtfeuchten große Bedeutung zu; d.h. deren Beurteilung ist bei Neubaumaßnahmen wie Sanierungen unabdingbar. Bislang stehen dem Bauplaner hierzu vor allem normative Regeln zur Verfügung wie z.B. das in DIN 4108 [1] angegebene Glaserverfahren. Dieses einfache stationäre Bewertungsverfahren weist jedoch folgende wesentliche Beschränkungen und Näherungen auf:

- Berechnungen sind nur mit stationären Randbedingungen möglich,
- Feuchtetransportvorgänge werden nur infolge Wasserdampfdiffusion berücksichtigt,
- Sämtliche Speichervorgänge und Weiterverteilungseffekte werden nicht erfasst,
- Temperatur- und Feuchteberechnungen werden unabhängig voneinander betrachtet.

Im Vergleich zum bisherigen Bewertungsverfahren nach Glaser, das ausschließlich die stationäre Beurteilung der winterlichen Tauwassergefahr erlaubt, müssen im Sinne einer realitätsnahen Erfassung und Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen auch andere Einflüsse (z.B. Schlagregenereignisse, aufsteigende Grundfeuchte, Baufeuchte, hygroskopische Feuchte oder Sommerkondensation) Berücksichtigung finden. Zu diesem Zweck sind in den letzten Jahren national sowie international zahlreiche zuverlässige Modelle mit entsprechenden PC-Programmen zur Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens entwickelt worden. Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen validierten Programmsystemen haben gezeigt, daß bei gleichen Einsätzen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erreicht wird. Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Problem der hygrothermischen Modellierung als gelöst zu betrachten. Das führt dazu, daß die Akzeptanz in Fachkreisen, das hygrothermische Verhalten von Bauteilen und Konstruktionen nun auch mit diesen modernen Verfahren zu beurteilen, in den letzten Jahren ebenfalls kontinuierlich gestiegen ist.

Die Vorteile der hygrothermischen Simulation haben in den letzten Jahren zu einer starken Nachfrage nach rechnerischen Untersuchungen vor allem im Bereich der Altbausanierung geführt, da dort Standardlösungen häufig versagen. Grund dafür ist, daß die Ergebnisse aus solchen hygrothermischen Simulationsmodellen in Form von Feuchte- und Temperaturverläufen wie -profilen in beliebiger Orts- und Zeitauflösung verfügbar sind und bei der Planung von Neubau-, Umbau- und Sanierungsmaßnahmen verwendet werden können, beispielsweise zur:

- Bestimmung der hygrothermischen Einsatzvoraussetzungen und Anwendungsgrenzen von Baustoffen und Bauteilen,
- Ermittlung von maximal zulässigen Raumluftheftelasten 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,
- Übertragung von bewährten Konstruktionen auf andere Klimaverhältnisse,
- Entwicklung und Optimierung von Bauprodukten.

Die Ergebnisse der hygrothermischen Gebäude- oder Bauteilsimulation 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 Verhalten der untersuchten Konstruktionen ziehen. Bild 1 zeigt eine schematisierte Darstellung der von modernen Simulationsprogrammen benötigten Eingabedaten (Bauteilaufbau, Innen- und Außenklima) sowie die Möglichkeiten der aus den Ergebnissen abzuleitenden Beurteilungen des hygrothermischen Verhaltens. So wird die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Bauteilen und Baustoffen durch Feuchteeinwirkungen beeinträchtigt werden, z.B.:

- Verminderung der Wärmedämmung,
- mechanische Belastung durch Feuchtwechsel bei Quell- und Schwindvorgängen,
- erhöhte Feuchtelasten an den Bauteiloberflächen mit der Folge einer Algen- oder Schimmelpilzbildung,
- Schäden durch Frost, Fäulnis oder Korrosion bei erhöhter Materialfeuchte.

2. Beispiele für mögliche Ergebnisinterpretationen

Im Rahmen dieser Arbeit soll anhand von einigen Beispielen gezeigt werden, wie moderne Rechenverfahren für die Diagnostik eingesetzt werden können. Zur Quantifizierung des hygrothermischen Verhaltens in Abhängigkeit von der Bewitterung sind instationäre Berechnungsmodelle erforderlich. Sie müssen in der Lage sein, den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Wänden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen witterungsbedingten Einwirkungen realitätsgetreu abzubilden. Alle hier vorgestellten Ergebnisse sind mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten und durch umfangreiche Experimente validierten Programm-Paket WUFI 3.0 [2] berechnet worden.

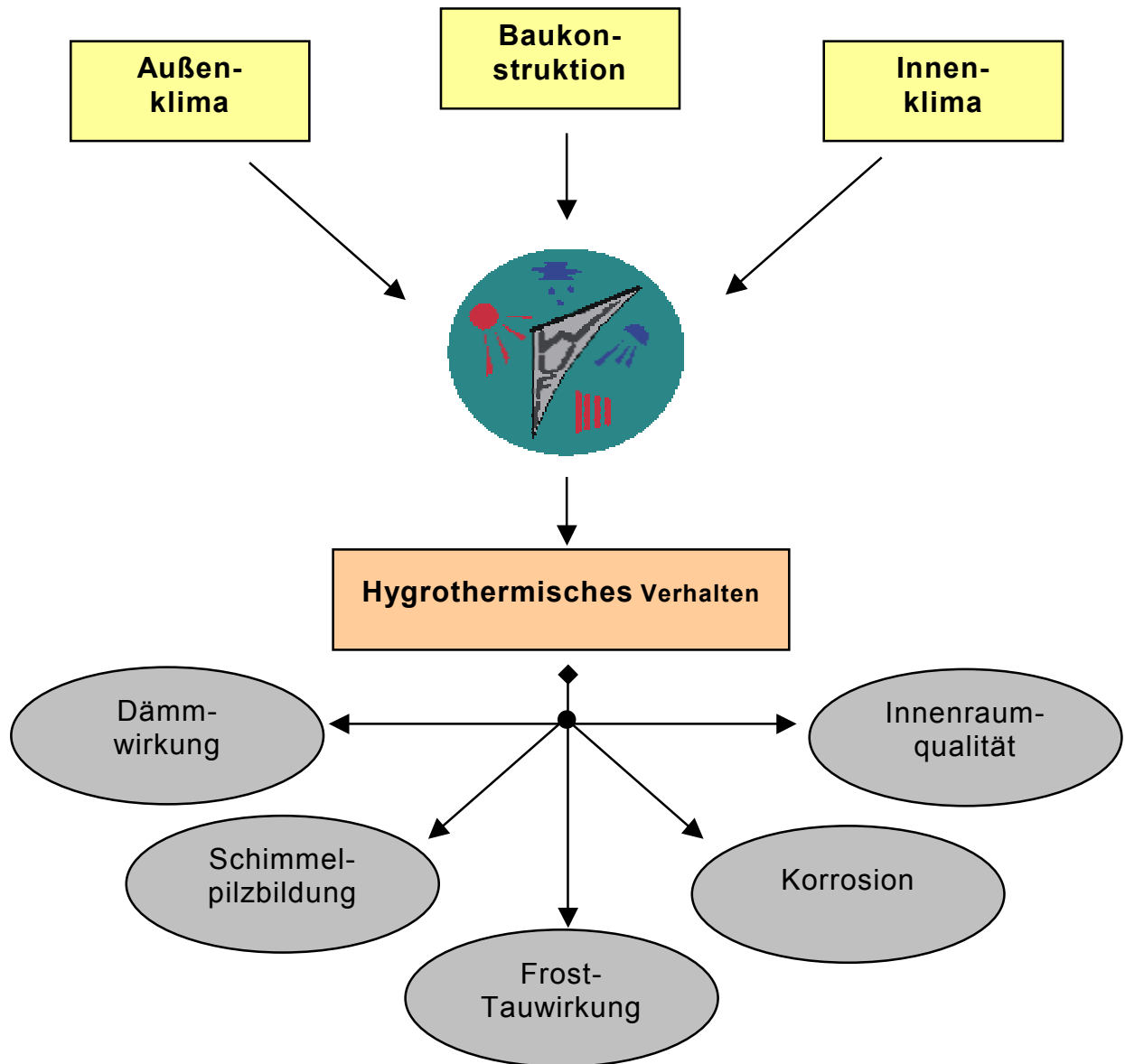


Bild 1: Schematische Darstellung der von WUFI benötigten Eingabedaten sowie der Möglichkeiten der Ergebnissinterpretation

Die Abkürzung WUFI steht für "**W**ärme- und **F**euchttransport **i**nstationär". **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt einige Screenshots des speziell für den Praktiker entwickelten Programms. Aufgrund immer leistungstärkerer Rechner und der sehr verständlichen Menü- und Dialogstruktur sowie einer umfangreichen Material- und Konstruktionsdatenbank ist dieses Programm nun nicht mehr ausschließlich der Wissenschaft, sondern vor allem Baustoffherstellern, Ausbildungsbetrieben, Ingenieuren, Architekten und anderen Praktikern zugänglich.

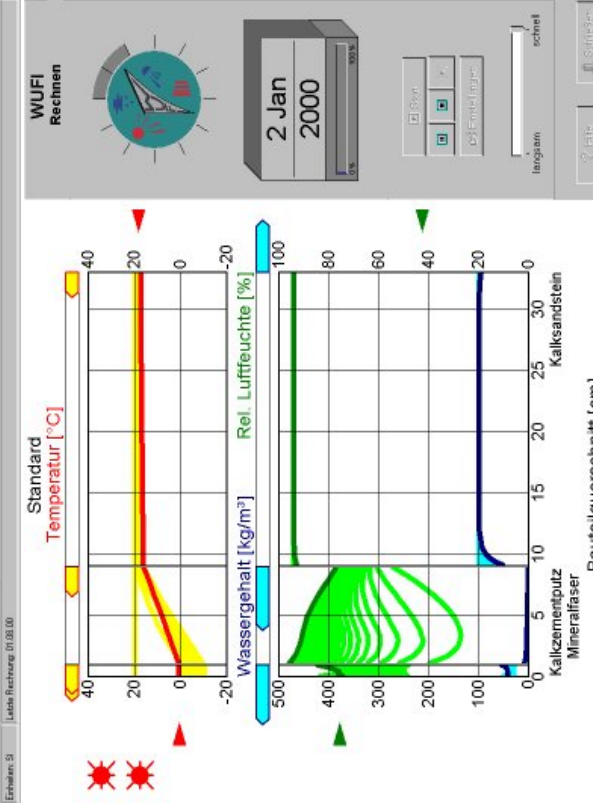
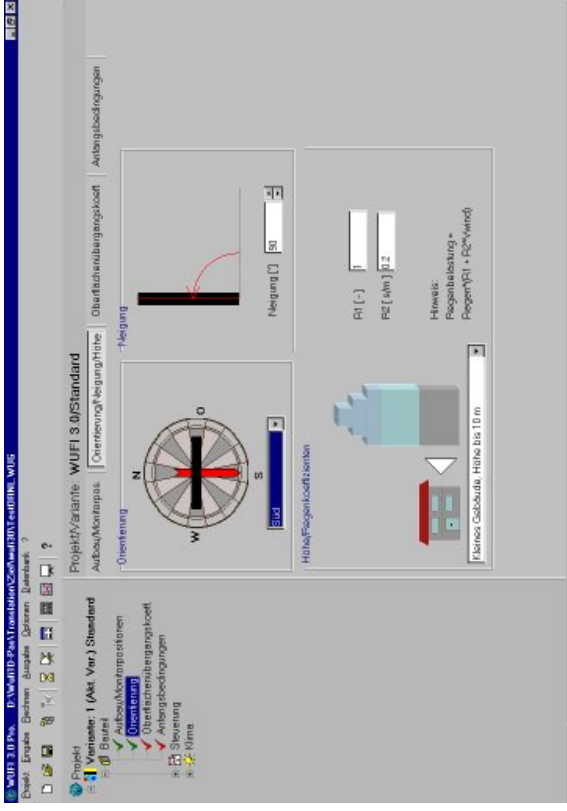
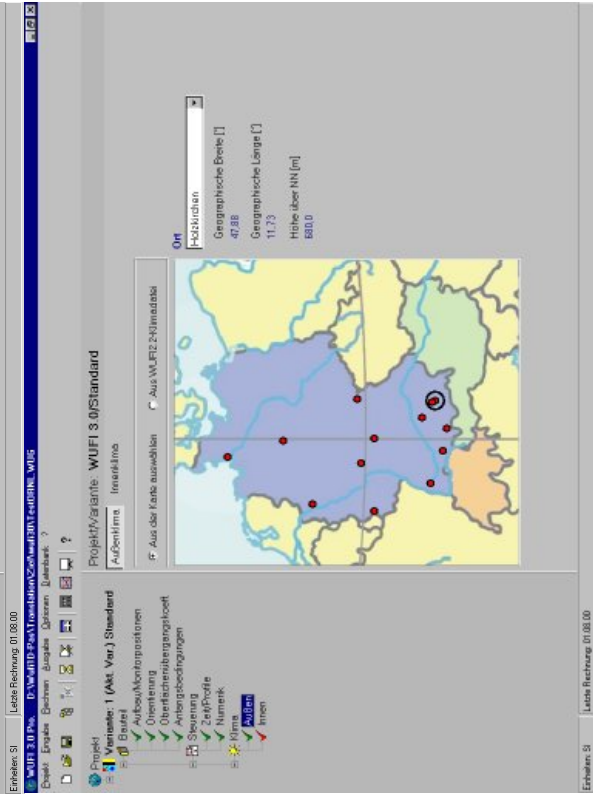
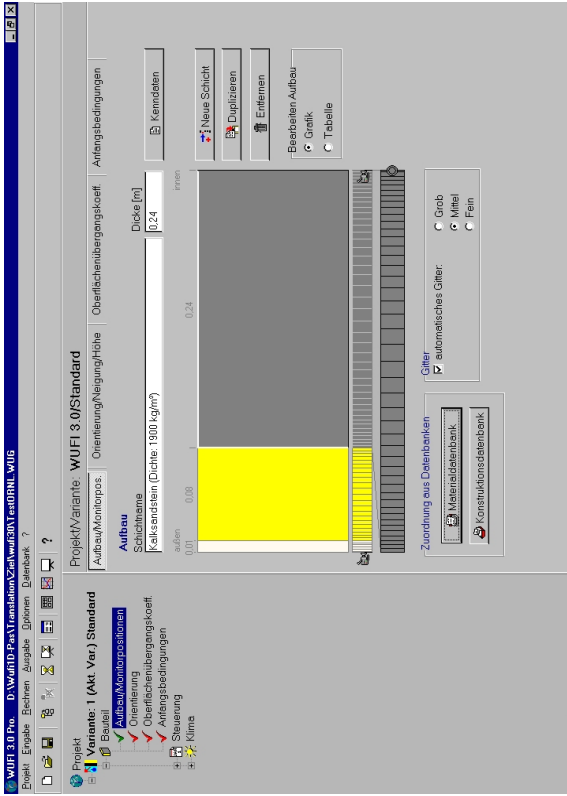


Bild 2: Screenshots des PC-Programms WUFI 3.0

2.1 Feuchteinfluß auf die Dämmwirkung

Durch das Aufbringen eines Wärmedämmverbundsystemes auf ein baufeuchtes Mauerwerk wird das Austrocknungsverhalten beeinflußt. Da die in der Wandkonstruktion enthaltene Feuchte die Wärmedämmwirkung reduziert, ist eine rasche Trocknung auch aus energetischen Gesichtspunkten wichtig. Mit Hilfe von rechnerischen Untersuchungen wird der Einfluß von verschiedenen Parametern auf die Austrocknungszeiten und den resultierenden k-Werten ermittelt. Ein wesentlicher Einflußparameter ist der Diffusionswiderstand des Dämmstoffes und der Innenbekleidung. Bei einem Mauerwerk, bestehend aus 30 cm Hochlochziegel, trocknet das Mauerwerk bei Verwendung von EPS-WDVS und raumseitigem Fliesenbelag am langsamsten aus. Am schnellsten hingegen das System mit Mineralwolle und innenliegendem Gipsputz. Hier findet eine Austrocknung sowohl nach innen als auch nach außen statt. Vom Trocknungsverhalten vergleichbar ist das System mit Mineralwolle und Fliesen und das mit EPS und Gipsputz.

Die Auswirkungen auf den effektiven k-Wert sind in Bild 3 oben aufgezeichnet. Dabei ist hier der mittlere k-Wert während der entsprechenden Heizperiode für die betrachteten Varianten angegeben. Bei der Verwendung von Hochlochziegeln als Mauerwerksbildner ist in allen vier Fällen der k-Wert während der ersten Heizperiode um ca 25 bis 35 % höher als der projektierte. Der projektierte k-Wert wird bei Verwendung von EPS als Dämmstoff und raumseitiger Verfliesung erst im 7. Winter erreicht, während dies bei MW-WDVS und innenliegendem Gipsputz schon vor dem dritten Winter der Fall ist. Bei allen vier Fällen liegt der im eingeschwungenen Zustand erzielte k-Wert um ca. 5 % unter dem projektierten. Grund dafür ist, daß sich im Laufe der Jahre im Hochlochziegel eine Ausgleichsfeuchte von ca. 60 % r.F. einstellt, bei der Berechnung des projektierten k-Wertes hingegen 80 % r.F. angenommen werden [3, 4].

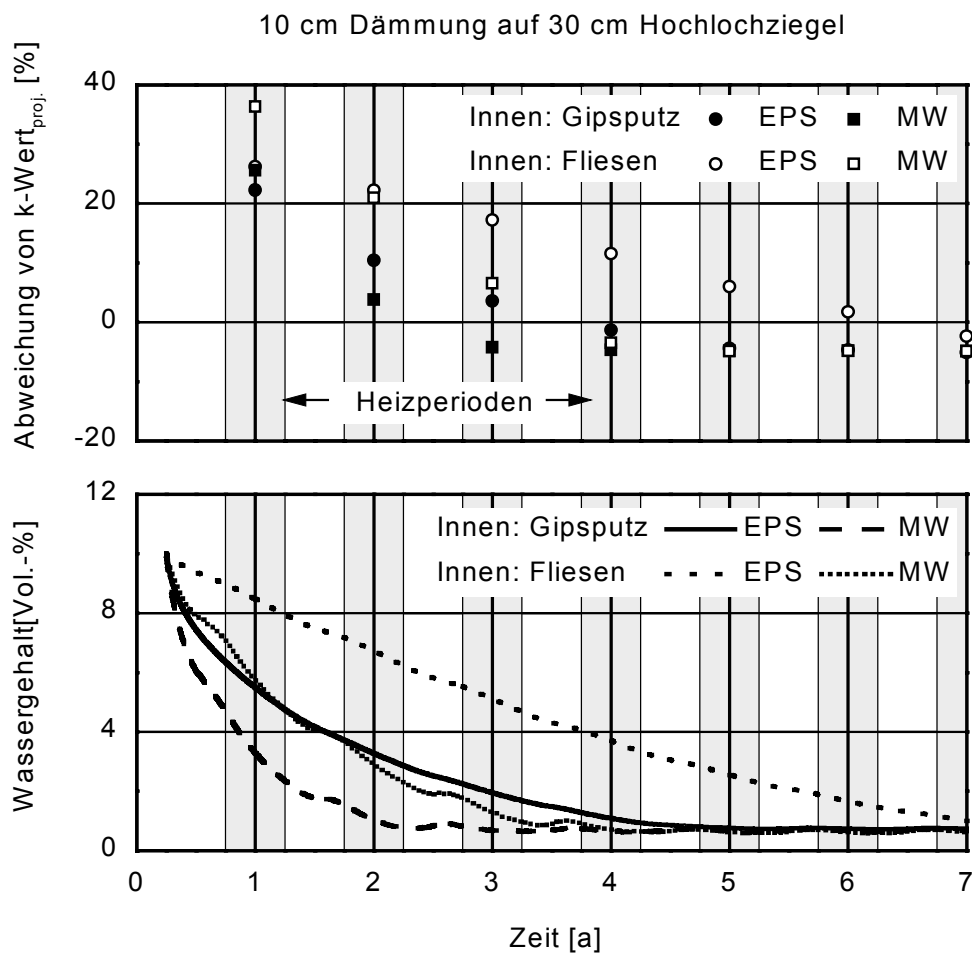


Bild 2: Einfluß der Innenraumbekleidung und des Dämmstoffes auf das Austrocknungsverhalten (unten) des anfänglich baufeuchten Hochlochziegels und die Auswirkung der Feuchte auf den erzielten k-Wert (oben).

2.2 Feuchteverhaltens von Putzen - Mechanische Beanspruchung durch hygrothermische Wechsellast

Ein Beispiel für die Interpretation der Ergebnisse aus den hygrothermischen Berechnungen sind die mechanischen Belastungen durch thermische und hygri sche Verformungen bzw. den daraus resultierenden Eigenspannungen in Außenputzen auf Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Betrachtet wird hygrothermische Verhalten eines Außenputzes in Abhängigkeit von Bewitterung und Untergrund an den folgenden Wandkon-struktionen untersucht:

1. Monolithisches Ziegelmauerwerk (36 cm)
2. Kalksandsteinmauerwerk (24 cm) mit EPS-Außendämmung (8 cm)

3. Kalksandsteinmauerwerk (24 cm) mit Mineralwolle-Außendämmung (8 cm).

Alle Wände haben denselben k-Wert von $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Stoffkennwerte der dient in allen Fällen ein 1 cm dicker, wasserabweisender Kalkzementputz mit einem w-Wert von $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ und einem s_d -Wert von 0,2 m.

Ausgehend von einer Sorptionsfeuchte der Außenwände bei 80% relativer Feuchte sind die Berechnungen, beginnend im April, für jeweils ein Jahr durchgeführt worden. Die sich dabei ergebenden Temperatur- und Feuchteverläufe im Außenputz sind beispielhaft für eine trockene Periode im Juli in Bild 3 und 5 dargestellt. Bild 3 zeigt die Putzoberflächentemperatur für den Standardfall in Abhängigkeit vom Untergrund im Vergleich zur Außenlufttemperatur. An klaren Tagen kann die Putztemperatur mehr als 10 K über die Außenlufttemperatur ansteigen, wobei auf dem Wärmedämmverbundsystem erwartungsgemäss etwas höhere Temperaturen auftreten als auf der monolithischen Wand. In der Nacht sinkt nur die Temperatur auf dem Wärmedämmverbundsystem deutlich unter die Außenluft, während die Speicherfähigkeit der monolithischen Wand nur eine geringe Oberflächenunterkühlung aufweist. Dementsprechend verhalten sich auch die Feuchteverläufe an den Putzoberflächen im gleichen Zeitraum. Bild 5 zeigt oben die relative Feuchte an der Putzoberfläche der drei betrachteten Konstruktionsvarianten. Während es bei den außen gedämmten Wänden unabhängig vom Dämmstoff zu nächtlicher Tauwasserbildung kommt (relative Feuchte = 100 %, ist das bei der monolithischen Wand nicht der Fall. Tagsüber sind die Unterschiede in der Oberflächenfeuchte relativ gering. Etwas anders sieht es an der Grenzfläche zwischen Putz und Mauerwerk bzw. Dämmung aus. Während dort die Feuchte bei der monolithischen Wand unbeeinflusst von den Tagesschwankungen im Bereich des Bezugsfeuchtegehaltes liegt, ist sowohl beim Putz auf EPS-Dämmung wie auch auf Mineralwolledämmung eine gewisse Auswirkung der hygrothermischen Vorgänge an der Oberfläche spürbar. Über das ganze Jahr ergeben sich für die verschiedenen Wandkonstruktionen sehr ähnliche mittlere Oberflächentemperaturen von $7,5^\circ\text{C}$ mit Extremwerten zwischen etwa -20°C und $+40^\circ\text{C}$. Auch die Oberflächenfeuchten sind im Jahresmittel mit 78% bzw. 80% r.F. sehr ähnlich mit Extremwerten zwischen 15% und 100% r.F. Etwas ausgeprägter sind die Unterschiede beim mittleren Wassergehalt der Aussenputze mit 7 Vol.-% auf der monolithischen Wand und 9 Vol.-% auf den Wärmedämmverbundsystemen.

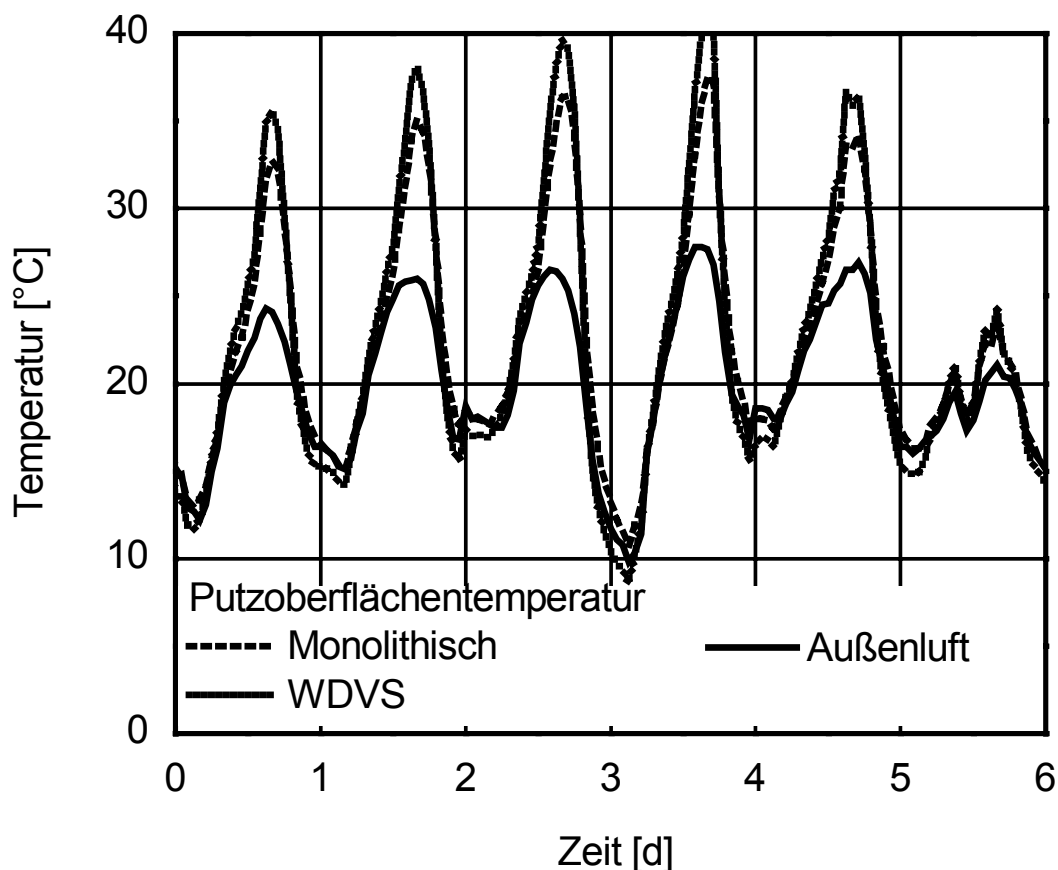


Bild 3: Verläufe der Putzoberflächentemperatur im Vergleich zur Außenluft während einer trockenen Periode im Juli.

Um die Mechanische Beanspruchung durch hygrothermische Wechsellast zu beurteilen, müssen die Informationen über die thermischen bzw. hygrischen Verformungen bekannt sein. Bild 5 zeigt dazu den Vergleich zwischen thermischer und hygrischer Längenänderung von solchen Außenputzen. Die abgebildeten Werte stellen den Durchschnitt aus Labormessungen an über 20 Proben unterschiedlicher Hersteller dar. Übertragen auf die Verhältnisse am Bau würde dies bei freier Verformbarkeit der Außenputze eine thermisch bedingte Längenänderung von 0,4 mm/m und eine noch größere hygrische Dilatation von 0,7 mm/m bedeuten. Beide Prozesse sind jedoch, wie die Ergebnisse aus den WUFI-Berechnungen gezeigt haben, häufig gegenläufig, da der Putz bei einer Erhöhung der Temperatur austrocknet, was die thermisch bedingte Ausdehnung mit einer gewissen Zeitverzögerung durch hygrisches Schwinden kompensiert. Da die Putzoberflächen jedoch in der Regel nicht frei beweglich sind, kommt es zu Spannungen und bei Überschreiten der Festigkeit zu Rissen oder Ablösungen vom Untergrund.

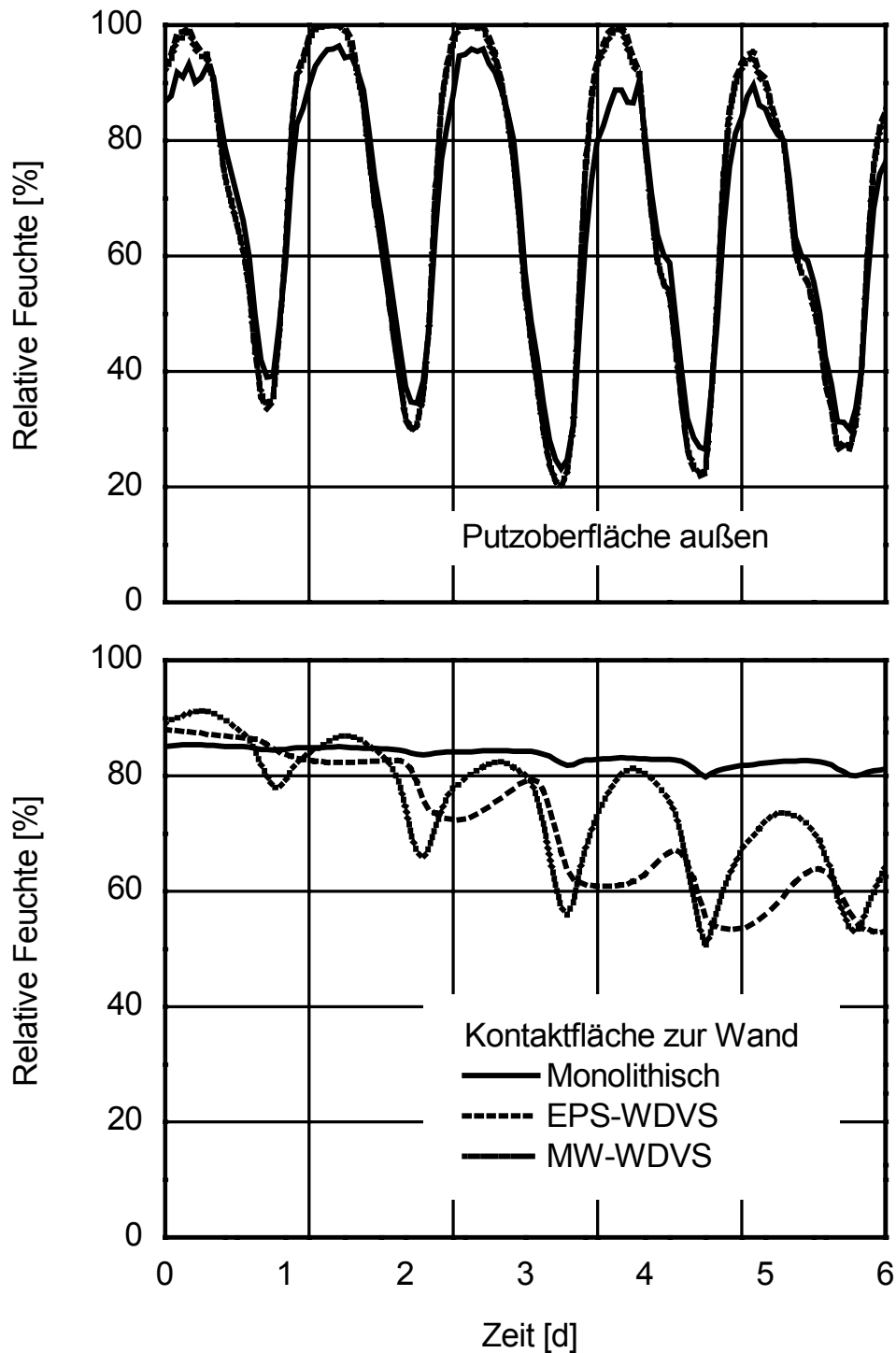


Bild 4: Verläufe der relativen Feuchte während einer trockenen Periode im Juli.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge bei Putzen mit heutigen Berechnungsmethoden in Abhängigkeit von den Putzeigenschaften, dem Untergrund und den Klimabedingungen quantifizierbar sind. Bei Kenntnis der feuchtebedingten Schadensmechanismen kann das anwendungsspezifische Putzschadensrisiko rechnerisch abgeschätzt werden und gegebenenfalls Systemverbesserungen konzipiert und evaluiert werden.

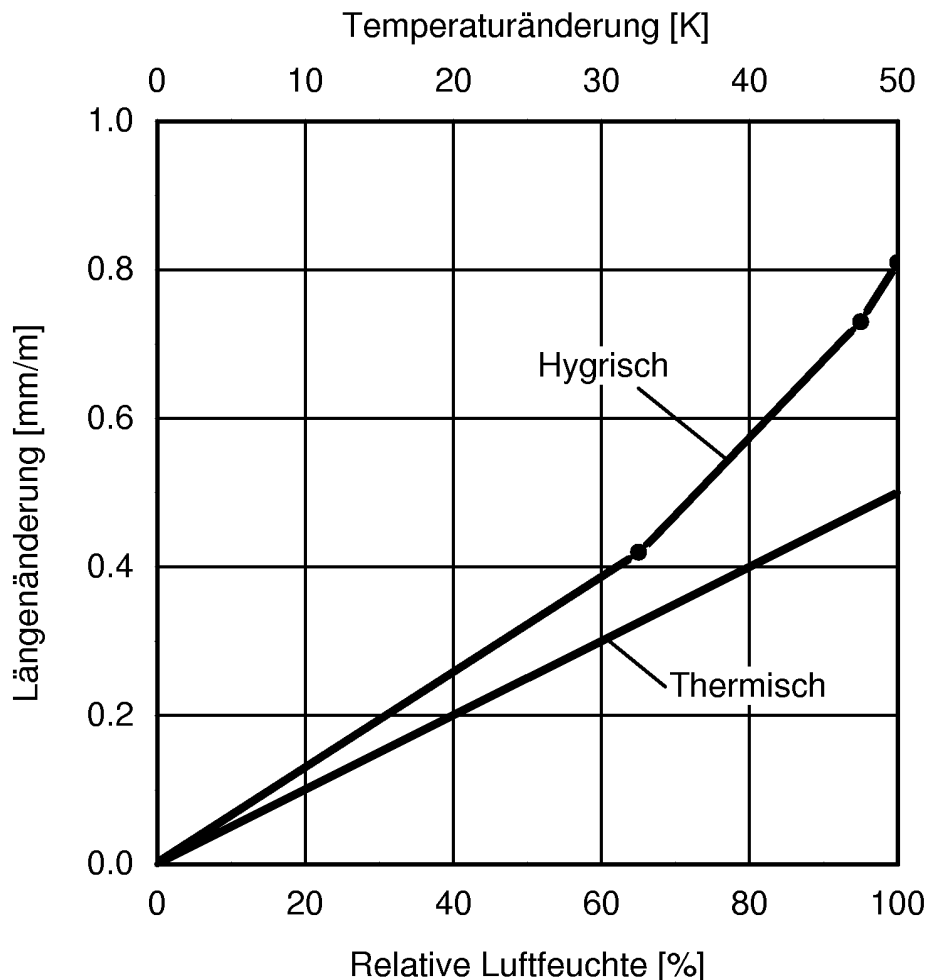


Bild 5: Thermische bzw. hygrische Längenänderung von Außenputzen in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. der relativen Luftfeuchte

2.3 Schlagregenfeuchte in Sichtmauerwerk mit Innendämmung

Aus hygrothermischer Sicht ist die Außendämmung i.a. einer Innendämmung vorzuziehen. Häufig sprechen jedoch ökonomische oder rechtliche (Grenzabstand) Gründe sowie Aspekte des Denkmalschutzes gegen eine Außendämmung, so daß die Innendämmung die einzige Möglichkeit bleibt, um den Energieverbrauch eines Gebäudes zu senken und die Behaglichkeit zu erhöhen. Das Problem der Tauwassergefahr und entsprechende konstruktive Lösungen (z.B. durch Dampfsperren) sind hinlänglich bekannt. Daß die Innendämmung jedoch auch Auswirkungen auf die niederschlagsbedingte Feuchtesituation der Fassade hat und eventuell das Frostschadensrisiko erhöht, wird meist übersehen. Am Beispiel eines bewitterten Sichtmauerwerks aus Vollziegel wurde dieser Effekt in [5] rechnerisch simuliert und durch begleitende Freilanduntersuchungen verifiziert. Bild 6 zeigt die Feuchteverhältnisse in einem 40 cm dicken Mauerwerk mit und ohne anschließender Innendämmung im eingeschwungenen Zustand (d.h. die Simulation wird mit

demselben Jahresklimadatensatz solange fortgeführt, bis sich die instationären Feuchteprofile von einem Jahr zum anderen nicht mehr ändern). Der schraffierte Bereich zeigt die Bandbreite der innerhalb eines Jahres auftretenden Wassergehalte im Querschnitt der schlagregenbeanspruchten Wände. Die durchgezogene Linie beschreibt die über das Jahr gemittelte Feuchteverteilung von der Außenoberfläche des Mauerwerks bis zu seiner Innenoberfläche, wo der Innenputz bzw. die Innendämmung aus Polystyrol-Hartschaum beginnt. Trotz periodischer Wassersättigung der Fassade bei intensivem Schlagregen entspricht die mittlere Feuchte an der Außenoberfläche, wegen der günstigen Trocknungsbedingungen bei Sonnenschein etwa dem Bezugsfeuchtegehalt des Mauerwerks. Durch die starke Feuchteabhängigkeit des Kapillartransports steigt der zeitlich gemittelte Wassergehalt unter der Oberfläche jedoch rapide an. Bei der Wand ohne Innendämmung wird nach einigen Zentimetern ein Maximum durchschritten, bevor der Wassergehalt relativ gleichmäßig bis zum hygroskopisch trockenen Zustand auf der Raumseite abnimmt. Ab etwa 20 cm Tiefe bleibt der Wassergehalt das ganze Jahr über konstant, d.h. die instationäre Klimawirkung beschränkt sich auf die äußere Hälfte des Mauerwerks.

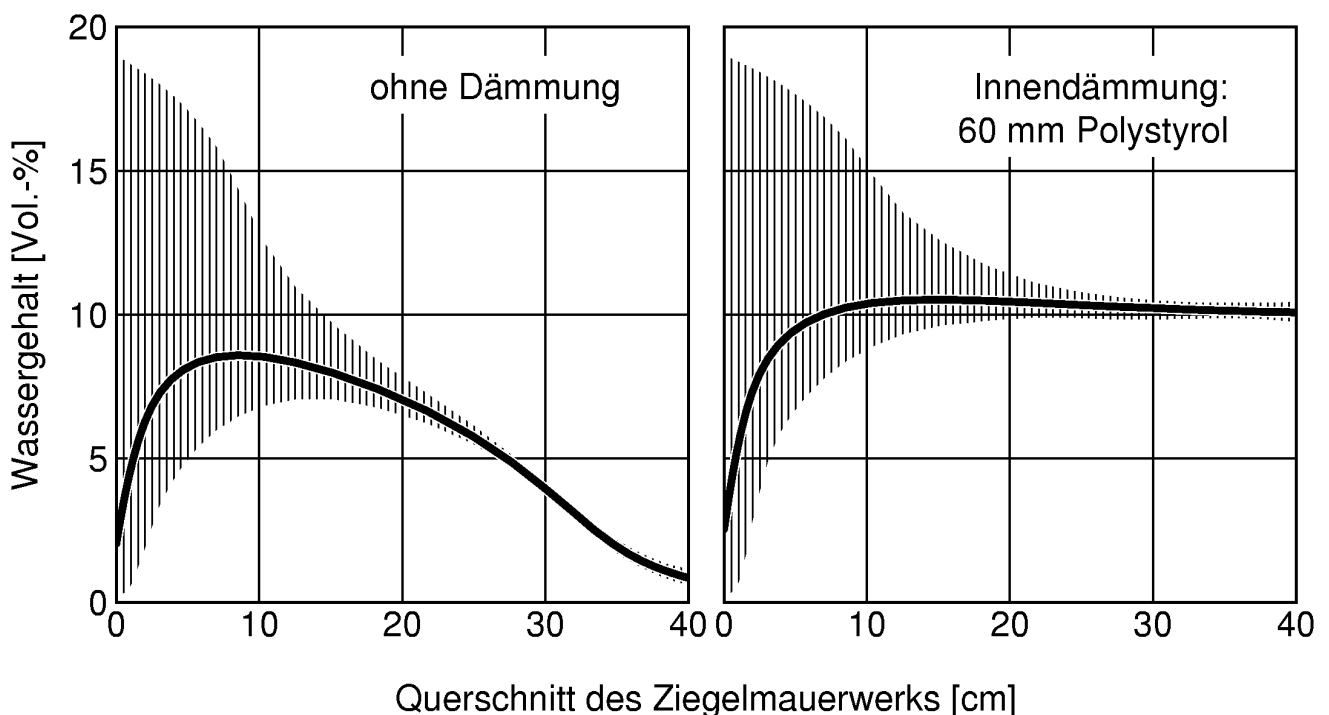


Bild 6: Jahresdurchschnitt (durchgezogene Linien) und jährliche Schwankungsbreite der Materialfeuchteprofile in einem schlagregenbeanspruchten, einschaligen Ziegelsichtmauerwerk mit und ohne Innendämmung.

Die Innendämmung verändert die Feuchteverhältnisse im Mauerwerk nachhaltig. Der Wassergehalt unter der Außenoberfläche steigt hier noch stärker an, ohne daß anschließend ein spürbarer Rückgang der Materialfeuchte nach innen zu verzeichnen wäre. Das hat zwei Gründe: Bei gleicher Schlagregenbelastung behindert der Diffusionswiderstand der Polystyrol-Dämmplatten die Austrocknung nach innen und zusätzlich wird das mittlere Temperaturniveau des Mauerwerks durch die Dämmung gesenkt, so daß auch die Trocknung nach außen vermindert wird. Im Vergleich zur ungedämmten Variante steigt der Gesamtwassergehalt im Mauerwerk durch die Innendämmung deutlich an. Bei Frost birgt dieser Feuchteanstieg ein entsprechendes Schadensrisiko, dem nur durch einen verbesserten Regenschutz beispielsweise in Form einer Fassadenhydrophobierung begegnet werden kann [5].

2.4 Frostschäden im Winter - Analyse durch feuchtetechnische Berechnungen am Beispiel einer Kalksandsteinwand

Frostschäden als ein typisches Beispiel für eine Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit treten vor allem dann auf, wenn feuchte Bauteile häufigen Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind. Die Beobachtung, daß gerade in milden Wintern - so auch im Winter 98/99 - Frostschäden gehäuft auftreten, bestätigt, daß nicht das Temperaturniveau der Außenluft allein als Beurteilungskriterium zur Risikoabschätzung herangezogen werden darf, sondern daß das Zusammenspiel aus der Anzahl von Frost-Tau-Wechseln im Bauteilinneren und den dabei auftretenden Wassergehalten der Materialien beurteilt werden müssen.

Da Freilanduntersuchungen erst retrospektiv Schäden zeigen, bietet die rechnerische Beurteilung eines möglichen Schadensrisikos hinsichtlich o.g. Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen Vorteile. Auf Basis der in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des IBP gemessenen meteorologischen Daten wurden für Wandaufbauten aus verschiedenen Materialien mittels WUFI-Berechnungen sowohl die Anzahl der Nulldurchgänge im Baustoff pro Winterhalbjahr als auch die dabei vorhandenen entsprechenden Feuchtegehalte im Material für verschiedene Klimadaten und Ausrichtungen ermittelt [6, 7]. Im folgenden soll die Diskussion der Ergebnisse beispielhaft für einen nach Westen ausgerichteten Wandaufbau aus Kalksandstein erfolgen, da dort nach dem Winter 1998/99 besonders deutliche Schäden beobachtet wurden, wie Bild 7 zeigt.



Bild 7: Fotografische Aufnahme von Frostschäden an einer Westwand aus Kalksandstein im Gelände der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des IBP nach dem Winter 1998/99.

Der im Laufe des Winters defekt gewordene Farbanstrich (Bild 7) wird in den Berechnungen mit einem s_d -Wert von 0,5 m angenommen. Gleichzeitig wird in der äußersten Schicht der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) im Vergleich zum unbeschichteten Kalksandstein um etwa 30 % verringert, da die Beschichtung trotz Fehlstellen die Wasseraufnahme reduziert. stellt die im Winter 1999 gemessenen Tagessummen des Schlagregens (Mitte) sowie die im gleichen Zeitraum auftretenden minimalen Außenlufttemperaturen dar (unten) dar. Im Bild 8 oben sind die für diese Randbedingungen mit WUFI berechneten Wassergehaltsverläufe der äußeren 5 cm für eine Kalksandsteinwand ohne Beschichtung und mit defektem Farbanstrich dargestellt. Bei der gestrichenen Wand findet durch den Diffusionswiderstand der Farbschicht eine deutlich geringere Austrocknung statt, der Gesamtwassergehalt schwankt zwischen 11 und 13 M.-%. Dies bedeutet, daß die Gefrierpunktsunterschreitung oft bei Wassergehalten nahe der freien Wassersättigung stattfindet (ab einem Wassergehalt von 12 M.-% wird bei Kalksandstein Frostschaden erwartet). Die unbeschichtete Wand hingegen nimmt bei Schlagregen Feuchte auf, gibt sie aber anschließend auch schnell wieder nach außen ab, so daß Frost oftmals erst bei nicht mehr kritischen Bedingungen auftritt.

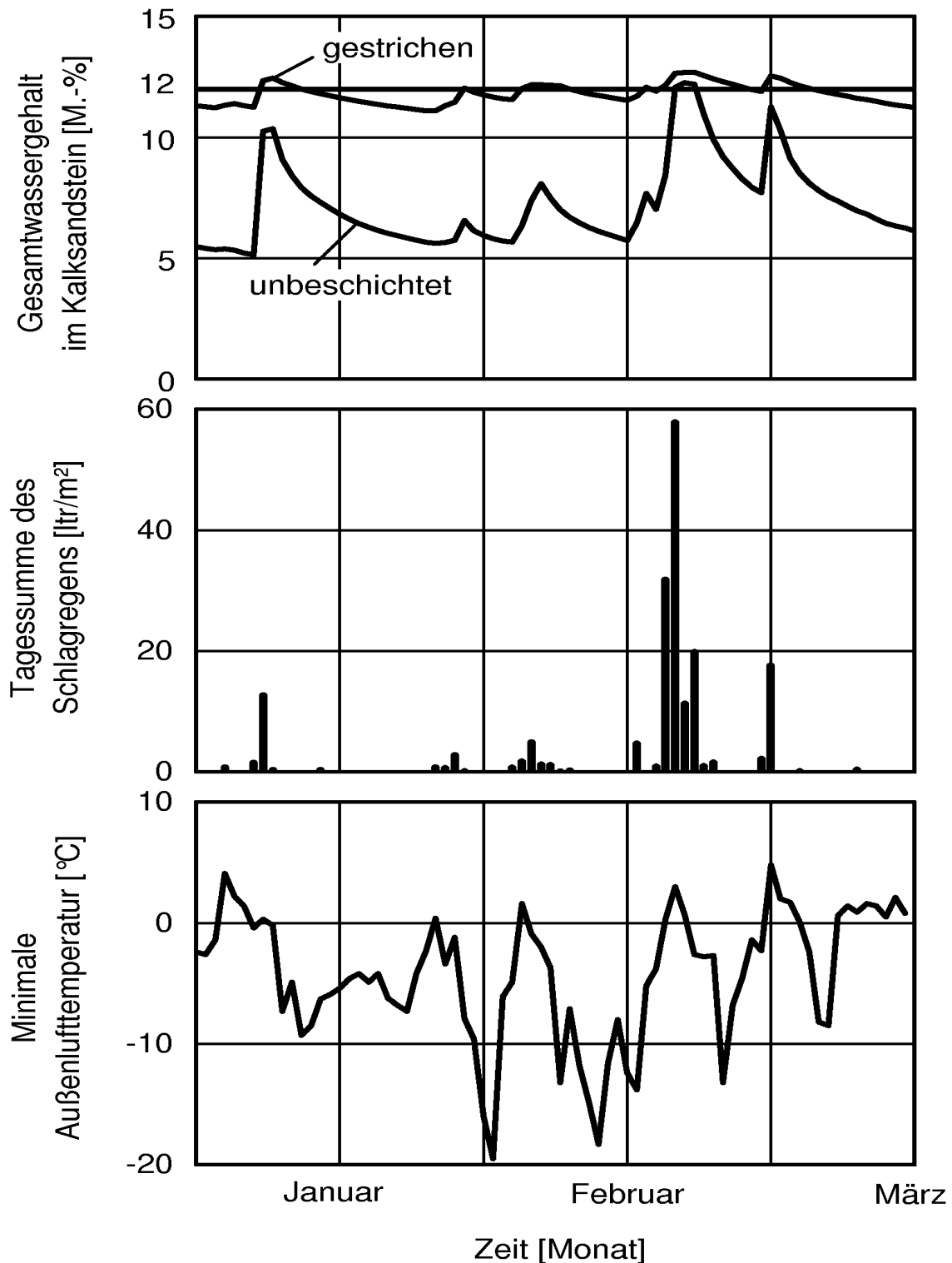


Bild 8:

Zeitverlauf des mit WUFI berechneten Gesamtwassergehalts der äußeren 5 cm für eine Kalksandsteinwand ohne Beschichtung und mit defektem Farbanstrich (Bild oben) mit Angabe der gemessenen Tagessummen des Schlagregens (Bild Mitte) sowie die im gleichen Zeitraum auftretenden minimalen Außenlufttemperaturen (Bild unten).

2.5 Rechnerische Ermittlung der Schimmelpilzgefahr

Bei ungünstigen Umgebungsbedingungen kann auf Bauteiloberflächen mikrobielles Wachstum entstehen. Die wichtigsten Einflußparameter sind Temperatur und relative Feuchte sowie ein entsprechender Nährboden und die tägliche Dauer der zusammenwirkend wachstumfördernden Bedingungen (Koinzidenzdauer). So können gewisse xerophile Schimmelpilzarten schon ab Feuchten von 65 %, die meisten Arten ab 80 % gedeihen. Die Temperaturbandbreite liegt zwischen 0°C und 50°C. Daher wird generell im genannten Temperatur- und Feuchtebereich ein Gefährdungspotential gesehen. Bild 7 zeigt die qualitative Bewertung der Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze in Abhängigkeit von den genannten Einflußfaktoren. Diese funktionalen Zusammenhänge bilden die Basis für eine Prognosemethode zur Beurteilung von Schimmelpilzwachstum, die bereits mehrfach angewendet und experimentell validiert wurde [8]. Als Eingangsdaten fungieren die lokalen Temperatur und Feuchteverhältnisse aus der instationären hygrothermischen Simulation. Die erforderliche Verknüpfung der Einflußparameter erfolgt mit Hilfe der Fuzzy-Logik. Sie berücksichtigt die in der Natur vorhandene Unschärfe z.B. bei der Angabe eines für das Wachstum der Schimmelpilze günstigen Feuchtebereichs. Das Ergebnis der Prognose ist ein Maß für die Stärke des Schimmelpilzwachstums.

3. Ausblick

Das Programm WUFI soll in nächster Zeit mit verschiedenen weiteren Analysemöglichkeiten erweitert werden. Derartige Prä- oder Postprozeßmodule sollen es u.a. erlauben, den Einfluß der Eingabeparameter systematisch zu ermitteln, biologische Besiedlungen auf Oberflächen vorherzusagen oder auch die hygrothermische Raumklimabehaglichkeit zu beurteilen. Aktuelle Informationen über den entsprechenden Entwicklungsstand sind jederzeit übers Internet unter www.BAUPHYSIK.de oder www.WUFI.de möglich.

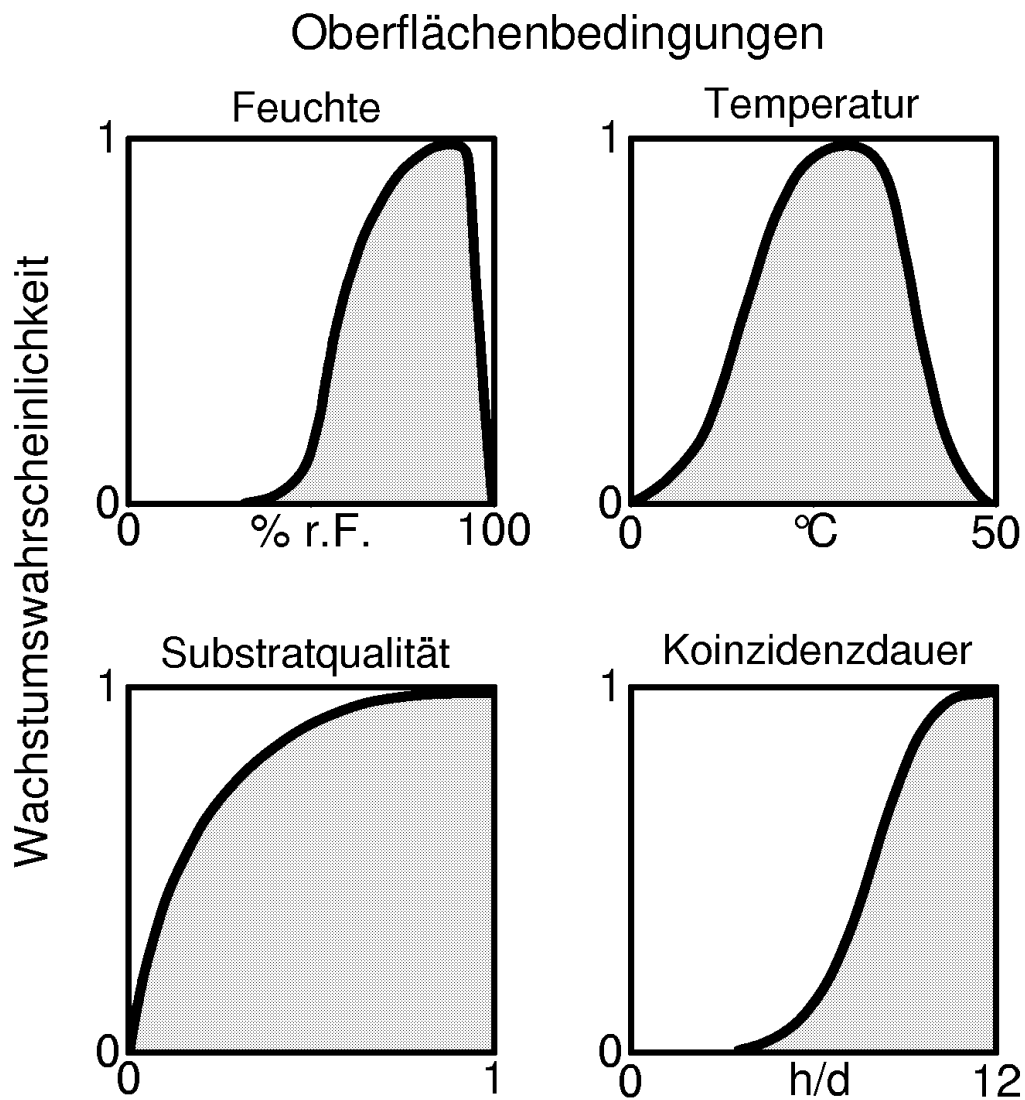


Bild 9: Qualitative Beurteilung der Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze in Abhängigkeit von den relevanten Einflußfaktoren.

4. Literatur

- [1] DIN 4108, Teil 5. *Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren*. August 1981.
- [2] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [3] Holm, A.; Künzel, H.M.: *Trocknung von Mauerwerk mit Wärmedämmverbundsystemen und Einfluß auf den Wärmedurchgang*. Tagungsband 2 des 10. Bauklimatischen Symposiums, Dresden 1999, S.

637-647.

- [4] Holm, A.: *Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwolleplatten in Wärmedämmverbundsystemen und Auswirkung auf die Festigkeit*. Tagungsband 5. Internationales Kolloquium - Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen – MSR '99, Esslingen, S. 1237-1246.
- [5] Künzel, H.M.; Kießl, K.: *Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung*. Mauerwerksbau aktuell 98, S. D.50-D.56. Werner-Verlag, Düsseldorf 1998.
- [6] Sedlbauer, K.; Krus, M.; Künzel, H.M.: *Schadensrisiko bei Außenbauteilen durch Niederschlag und Frosteinwirkung - Analyse von Klimadaten durch feuchtetechnische Berechnungen*. 10. Bauklimatisches Symposium: Tagungsbeiträge Bd. 2, 27.-29. Sept. 1999 in Dresden. Dresden: TU, 1999, S. 669-678.
- [7] Sedlbauer, K.; 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.
- [8] Sedlbauer, K.; Oswald, D.; König, N.: *Schimmelgefahr bei offenen Luftkreisläufen. Vorstellung einer Prognosemethode auf der Basis von Fuzzy-Algorithmen*. Gesundheits-Ingenieur, Heft 5 (1998), S. 240 - 247.