

## **Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen durch ein- oder zweidimensionale Simulation?**

Herrn Professor Dr. Hans-Peter Leimer zum 50. Geburtstag gewidmet

**Hartwig M. Künzel und Daniel Zirkelbach**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen



**Dr.- Ing. Hartwig M. Künzel**

Jahrgang 1959, Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Erlangen-Nürnberg.

1987 wiss. Mitarbeiter, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen. 1994 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Seit 1994 Leiter der Abteilung Hygrothermik am IBP.

Mitglied bzw. Obmann in internationalen Normungsausschüssen und Fachgremien (z.B. WTA, CEN, ASHRAE). Über 200 Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften und Kongressbänden.



**Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach**

Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität München, von Juli 2001 bis März 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen, seit März 2004 Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik. Inhaltliche Schwerpunkte: Hygrothermische Simulation (WUFI®-Familie) und Bauen in anderen Klimazonen.

## **Kurzfassung**

Der moderne Leichtbau zeichnet sich durch inhomogene Bauteile aus, wie z.B. Holzrahmenkonstruktionen, die sich aus Vollholz- und Gefachanteilen zusammensetzen. Gemäß dem gegenwärtigen Stand der Technik, sollten nach Möglichkeit hygrothermische Simulationsverfahren zur Feuchteschutzbeurteilung von Konstruktionen eingesetzt werden. Dabei stellt sich hier die Frage, ob bei solchen Bauteilen grundsätzlich eine zweidimensionale Berechnung notwendig ist. Im vorliegenden Beitrag wird analysiert unter welchen Umständen eindimensionale Berechnungen für den Regelquerschnitt ausreichen und wie abgeschätzt werden kann ob eventuell doch eine zweidimensionale Berechnung erforderlich ist.

**Stichwörter:** Feuchteschutz, hygrothermische Simulation, Holzrahmenbau

## ***Moisture control assessment of wooden constructions by one- or two-dimensional simulation?***

*Dedicated to the 50<sup>th</sup> birthday of Professor Dr. Hans-Peter Leimer*

### **Abstract**

*Modern lightweight structures comprise inhomogeneous building assemblies, e.g. stud walls consisting of wooden members and cavity insulation. According to the present state-of-the-art, hygrothermal simulations should be employed to assess the moisture control of building constructions. The composition of wooden structures would imply that two-dimensional calculations are required for this assessment. This study analyzes the conditions where one-dimensional calculations provide satisfactory results and indicates where two-dimensional simulations may be necessary.*

**key words:** *Moisture Control, Hygrothermal Simulation, Wood Frame Construction*

## Einleitung

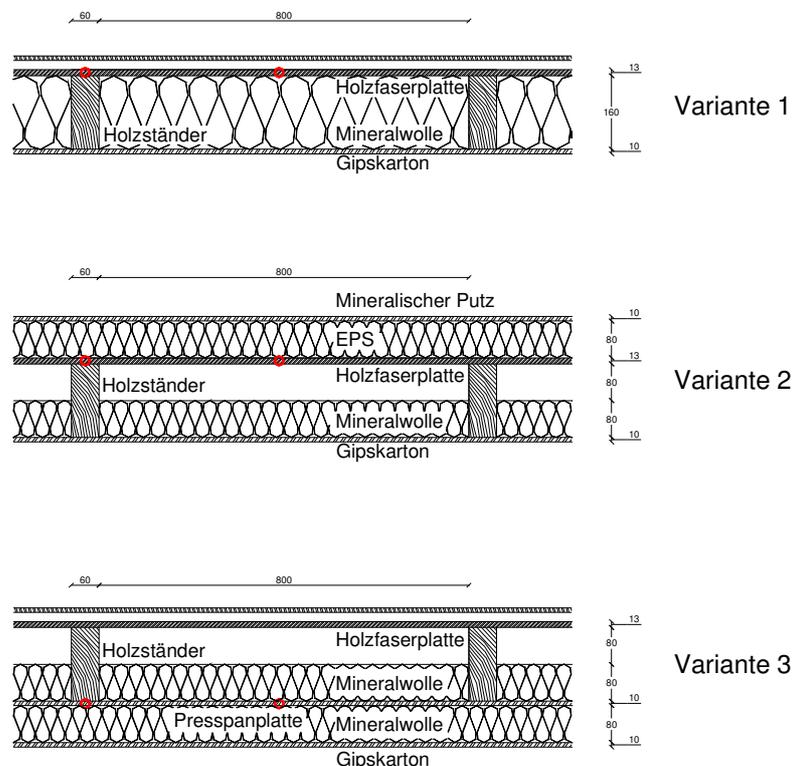
Bereits seit einiger Zeit sind Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen dem Praktiker verfügbar (z.B. MATCH [1], WUFI® [2], Delfin vormals DIM [3]). Die steigende Anzahl von einschlägigen Fachveröffentlichungen zeigt, dass diese Verfahren zunehmend eingesetzt werden. Wegen der starken Einschränkungen der stationären Dampfdiffusionsbetrachtungen nach Glaser wird inzwischen auch in der Neufassung der DIN 4108-3 [4] zur Beurteilung von begrünten Dachkonstruktionen oder zur Berechnung der Austrocknung von Rohbaufeuchte auf diese instationären hygrothermischen Berechnungsmodelle verwiesen.

Zur Qualitätssicherung der modernen Rechenverfahren und ihrer Nutzung wurden im Grundlagen-Referat der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege) zwei Merkblätter erstellt [5, 6], die dem Praktiker bei der Auswahl und Anwendung dieser Rechenverfahren helfen sollen. Darauf aufbauend wurde auch ein entsprechender CEN-Normungsentwurf erarbeitet, der 2004 als Vornorm prEN 15026 [7] erschienen ist. Im Gegensatz zum WTA-Merkblatt 6-2-01, das für die feuchtetechnische Beurteilung gedämmter Holzkonstruktionen zweidimensionale Simulationen empfiehlt, beschränkt sich die prEN 15026 ausschließlich auf eindimensionale Berechnungen.

Anhand von Wandkonstruktionen in Holzbauweise mit und ohne Zusatzdämmung wird im Folgenden untersucht, ob eindimensionale Simulationen als Basis für die Feuchteschutzbeurteilung ausreichen oder ob zweidimensionale Berechnungen trotz ihrer Nachteile (z.B. komplexe Eingabe, lange Rechenzeiten, große Datenmengen) erforderlich sind.

## Durchführung der rechnerischen Untersuchung

Alle Berechnungen werden nach WTA [6] mit Hilfe der vielfach experimentell validierten EDV-Programme der am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Software-Familie WUFI® (WUFI® Pro 4.0 und WUFI® 2D 2.1) durchgeführt.



*Bild 1: Aufbau der untersuchten Konstruktionsvarianten mit Angabe der Monitorpositionen für die rechnerische Simulation (rot umkreist) an feuchtetechnisch neuralgischen Stellen im Bereich von Ständer und Gefach.*

Untersucht werden die Unterschiede, die sich bei der Beurteilung inhomogener Bauteile (z.B. Holzrahmenkonstruktion mit Ständer und Gefach) mit Hilfe einer ein- bzw. zweidimensionalen Berechnung ergeben. Als Beispiele werden hier ein Vertreter für moderne Holzbauwände (Variante 1) sowie ein Vertreter älterer Holzbauwände mit einer nachträglichen Zusatzdämmung außen (Variante 2) bzw. innen (Variante 3) gewählt. Bild 1 zeigt den Aufbau der verschiedenen Varianten. Während die Gefache bei Variante 1 (oben) zwischen Außen- und Innenbeplankung mit 160 mm Mineralwolle voll gedämmt sind, besitzen die Varianten 2 und 3 nur eine früher übliche, reduzierte Gefachdämmung von 80 mm. Dafür haben sie eine gleich dicke Zusatzdämmung in Form eines Wärmedämmverbundsystems bzw. in Form einer Innendämmung, so dass alle Varianten einen vergleichbaren U-Wert von ca.  $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$  aufweisen. Die hygrothermischen Stoffkennwerte der in Bild 1 bezeichneten Materialien stammen aus der WUFI®-Datenbank. Die Varianten 1 und 3 haben eine ideal belüftete Witterschutzschalung (d.h. hinter dieser Schalung herrschen Außenluftbedingungen), die wie das WDVS der Variante 2 eine Regenwasserpenetration in die Konstruktion unterbindet. Kritische Feuchteverhältnisse können somit nur durch Dampfdiffusion im Winter entstehen, da keine der Konstruktionsvarianten eine Dampfsperre besitzt. Um auf der sicheren Seite zu sein, werden alle Berechnungen für die Nordseite durchgeführt, wobei mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,4 für eine helle Fassade gerechnet wird.

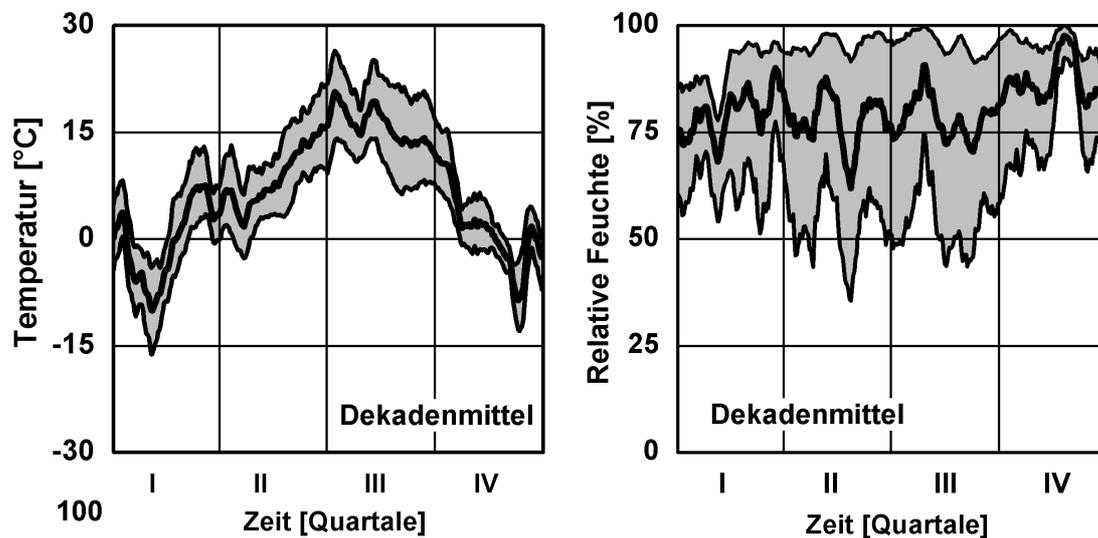


Bild 2: Temperatur und Feuchteverläufe des für die Berechnungen verwendeten meteorologischen Datensatzes. Die Linien in der Mitte stellen die Verläufe der Dekadenmittelwerte dar, die grau hinterlegten Bereiche geben die Bandbreite zwischen den Dekadenextremwerten an.

Als Außenklima werden Stundenmittelwerte von Temperatur, Feuchte und kurzweiliger Einstrahlung eines typischen Jahres am Standort Holzkirchen verwendet (siehe Bild 2). Die Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten an den äußeren und inneren Bauteiloberflächen sowie die Raumklimabedingungen für eine normale Wohnraumnutzung (normale Feuchtelast) entsprechen den WTA-Vorgaben [6]. Ausgehend von einer Gleichgewichtsfeuchte von 80% r.F. im gesamten Bauteil beträgt der Berechnungszeitraum ein Jahr. Da bei den folgenden Konstruktionsvarianten vor allem die Feuchtesituation im Winter als kritisch anzusehen ist, beginnen die Berechnungen jeweils im Oktober um eine eventuelle Auffeuchtung über die gesamte Heizperiode erfassen zu können.

### Ergebnisse der rechnerischen Untersuchung

Wie aus Bild 2 zu entnehmen endet die kalte Witterung mit Tagestemperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  etwa Mitte Februar. Da nach so einer Kälteperiode am Ende des Winters die größten Wassergehalte in der Konstruktion zu erwarten sind, werden im Folgenden auch die zweidimensionalen Feuchtefelder für diesen Zeitpunkt dargestellt. Bild 3 zeigt die berechnete Verteilung der relativen Feuchte am 15. Februar zwischen den Symmetrieebenen (von der Mitte des Holzständers bis zur Mitte des Gefachs) von Variante 1. Die höchste Feuchte (etwa 90 % r.F.) tritt in der äußeren Beplankung im mittleren Bereich des Gefachs auf, während die Holzfaserverplatte im Bereich des Ständers deutlich trockener bleibt.

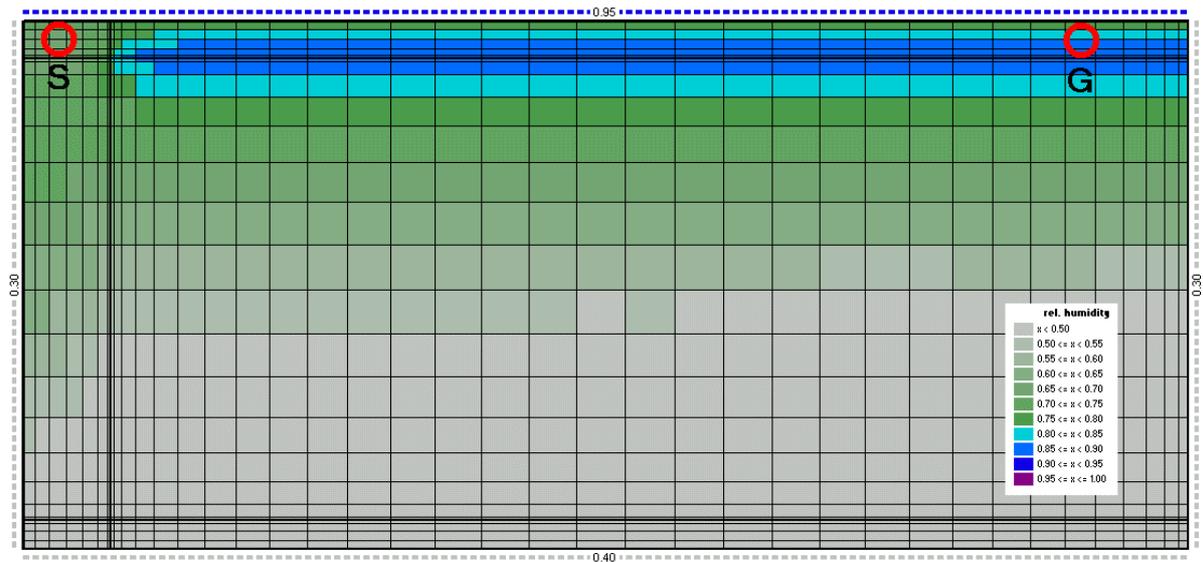


Bild 3: Verteilung der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 1 am 15. Februar um 0<sup>o</sup> Uhr. Die Monitorpositionen für die Darstellung des zeitlichen Verlaufs im folgenden Bild sind durch einen roten Kreis gekennzeichnet.

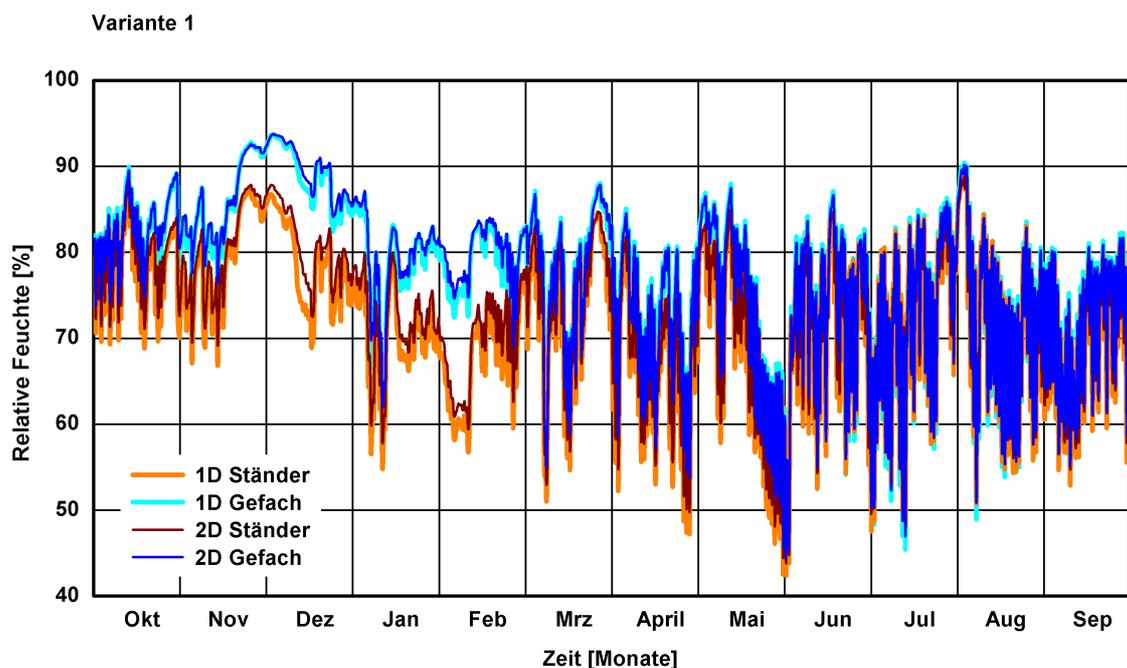
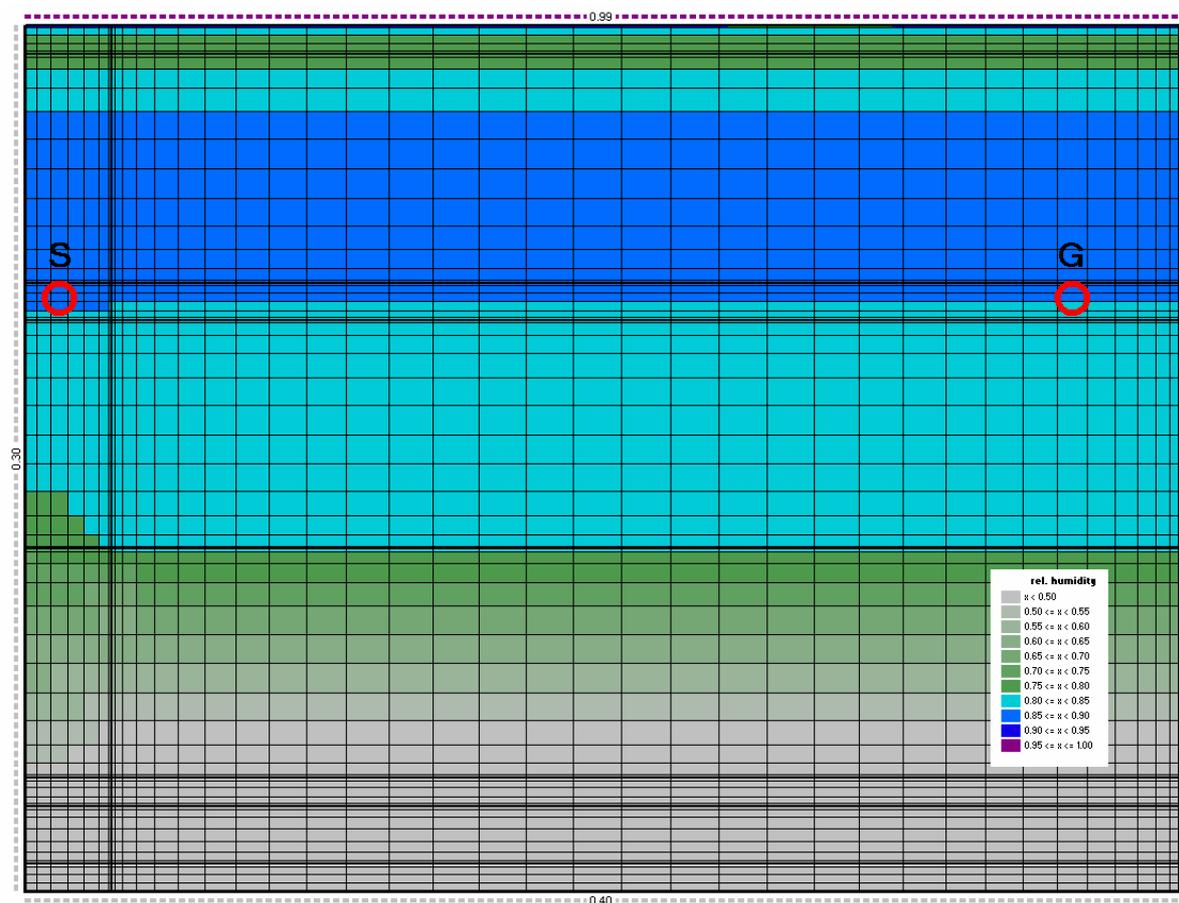


Bild 4: Jahresverläufe der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 1 an den im vorangegangenen Bild gekennzeichneten Monitorpositionen der zweidimensionalen Berechnung (dünne Linien, dunkle Farben) im Vergleich zu den Ergebnissen der eindimensionalen Simulation (dicke Linien, helle Farben).

Die Jahresverläufe der relativen Feuchte in der äußeren Holzfaserverplatte an den in Bild 3 gekennzeichneten Monitorpositionen sind in Bild 4 in dunklen Farben dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass die Feuchte in der Mitte des Gefaches im gesamten Berechnungszeitraum höher ist als im Bereich des Ständers. Allerdings tritt dort das Feuchtemaximum, nicht wie erwartet Mitte Februar sondern schon Anfang Dezember auf. Der Grund dafür liegt in der angenommenen Ausgangsfeuchte der Konstruktion (80% r.F.), die jedoch wegen des geringen Dampfdiffusionswiderstands der Außenbeplankung sehr schnell austrocknet, so dass bis Februar trotz intensiver Kälte keine Feuchteakkumulation stattfindet.

Vergleicht man die Verläufe der zweidimensionalen Berechnung mit denen der eindimensionalen Simulationen für die Symmetrieebenen von Gefach und Holzständer (in Bild 4 mit hellen Farben dargestellt) stellt man nur geringe Unterschiede zwischen den eindimensionalen und den zweidimensionalen Ergebnissen fest. Zur Beurteilung des Feuchteverhaltens der Konstruktionsvariante 1 anhand der Feuchtemaxima während der Heizperiode hätte in diesem Fall die eindimensionale Berechnung für den Gefachbereich völlig ausgereicht.



*Bild 5: Verteilung der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 2 am 15. Februar um 0<sup>00</sup> Uhr. Die Monitorpositionen für die Darstellung des zeitlichen Verlaufs im folgenden Bild sind durch einen roten Kreis gekennzeichnet.*

Das Ständerwerk der Konstruktionsvariante 2 entspricht dem der Variante 1 mit reduzierter Gefachdämmung (alte Bauart). Dafür ist hier außen ein Wärmedämmverbundsystem angebracht. Die Feuchteverteilung am Ende der kalten Winterperiode ist in Bild 5 dargestellt. Die Monitorpositionen sind wie bei der Variante 1 in der Holzfaserverplatte an den Symmetrieebenen gewählt worden. Sie liegen im blauen Bereich, d.h. dort wo die relative Feuchte am höchsten ist. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei der Variante 1 sind hier zum Beobachtungszeitpunkt nur geringe Unterschiede in den Feuchteverteilungen an Ständer und Gefach vorhanden. Die an den Monitorpositionen ermittelten Jahresverläufe in Bild 6 bestätigen diesen Trend. Im Gegensatz dazu zeigt die eindimensionale Berechnung deutlich größere Unterschiede zwischen dem Ständer- und Gefachbereich. Betrachtet man die höchste im Jahresverlauf auftretende Feuchte liegt man mit der eindimensionalen Simulation des Gefachbereichs auf der sicheren Seite.

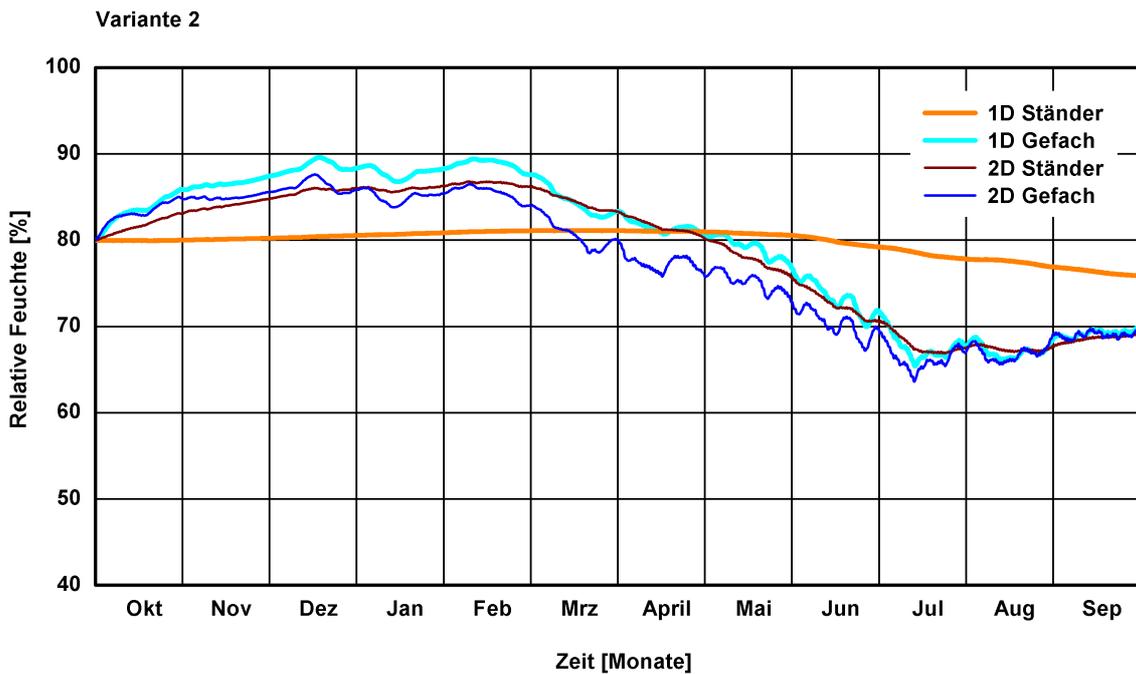


Bild 6: Jahresverläufe der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 2 an den im vorangegangenen Bild gekennzeichneten Monitorpositionen der zweidimensionalen Berechnung (dünne Linien, dunkle Farben) im Vergleich zu den Ergebnissen der eindimensionalen Simulation (dicke Linien, helle Farben).

Der Aufbau von Variante 3 entspricht dem von Variante 2 mit dem Unterschied, dass statt einer Außendämmung eine Innendämmung realisiert wurde. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass das Ständerwerk unter der Innendämmung mit einer Spanplatte beplankt ist und die Monitorpositionen von der Holzfaserverplatte in die Spanplatte verlegt wurden. Die zweidimensionale Feuchteverteilung am Ende der kalten Winterperiode ist in Bild 7 dargestellt. Diesmal liegt das errechnete Feuchtemaximum, im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen, nicht im Gefach sondern im Bereich des Holzständers. Auch die Jahresverläufe an den Monitorpositionen in Bild 8 zeigen, dass die Feuchte in der Spanplatte während des gesamten Winterhalbjahres im Bereich des Holzständers deutlich höher liegt als im Gefachbereich.

Dieses Phänomen kann anhand der in Bild 9 dargestellten Temperaturverläufe an diesen Monitorpositionen erklärt werden. Dort ist deutlich zu erkennen, dass die Wintertemperaturen der Spanplatte im Bereich des Ständers 2-3 K niedriger liegen als im Gefachbereich. Da sich eventuelle Dampfdruckunterschiede in der diffusionsoffenen Innendämmung aus Mineralwolle sehr schnell ausgleichen, herrscht an beiden Monitorpositionen annähernd derselbe Dampfdruck. Wegen der unterschiedlichen Temperaturen ist jedoch am Ständer der Sättigungsdampfdruck niedriger und dem entsprechend die relative Feuchte höher als im Gefachbereich.

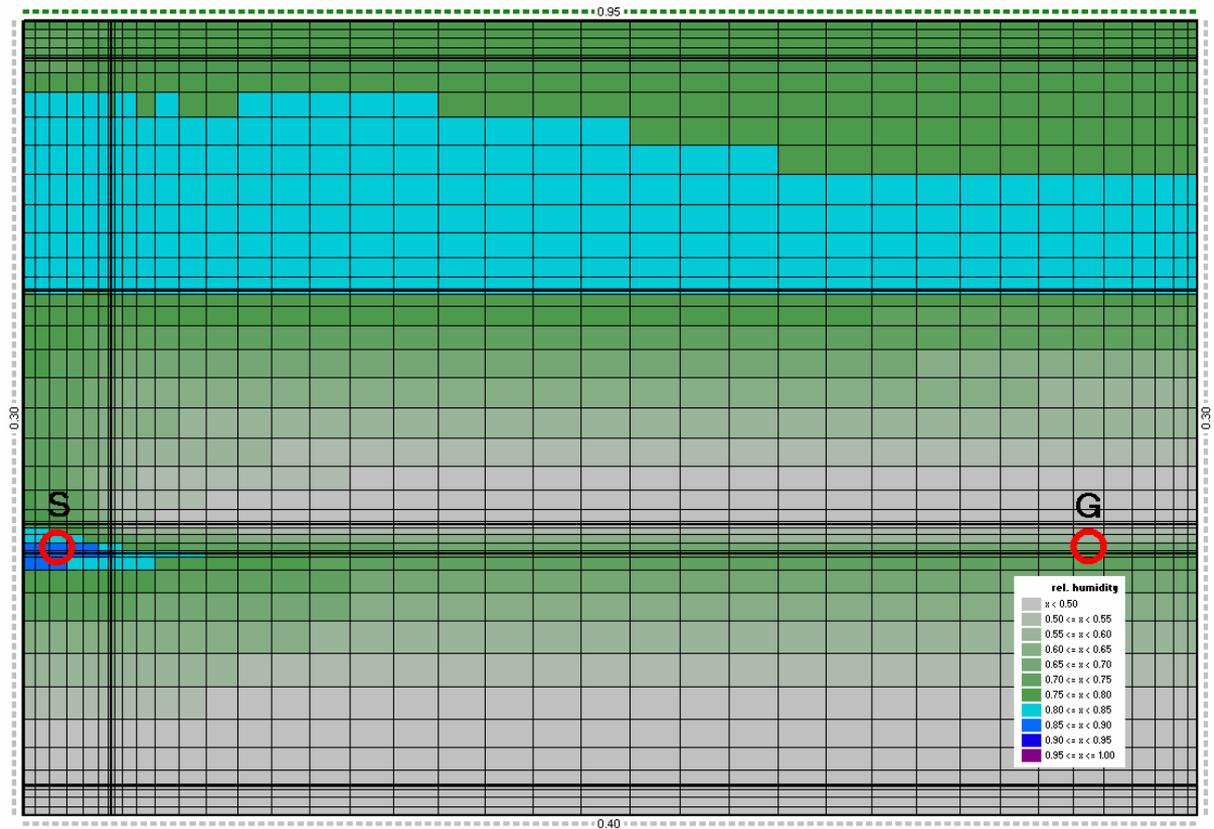


Bild 7: Verteilung der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 3 am 15. Februar um 0<sup>00</sup> Uhr. Die Monitorpositionen für die Darstellung des zeitlichen Verlaufs in den folgenden zwei Bildern sind durch einen roten Kreis gekennzeichnet.

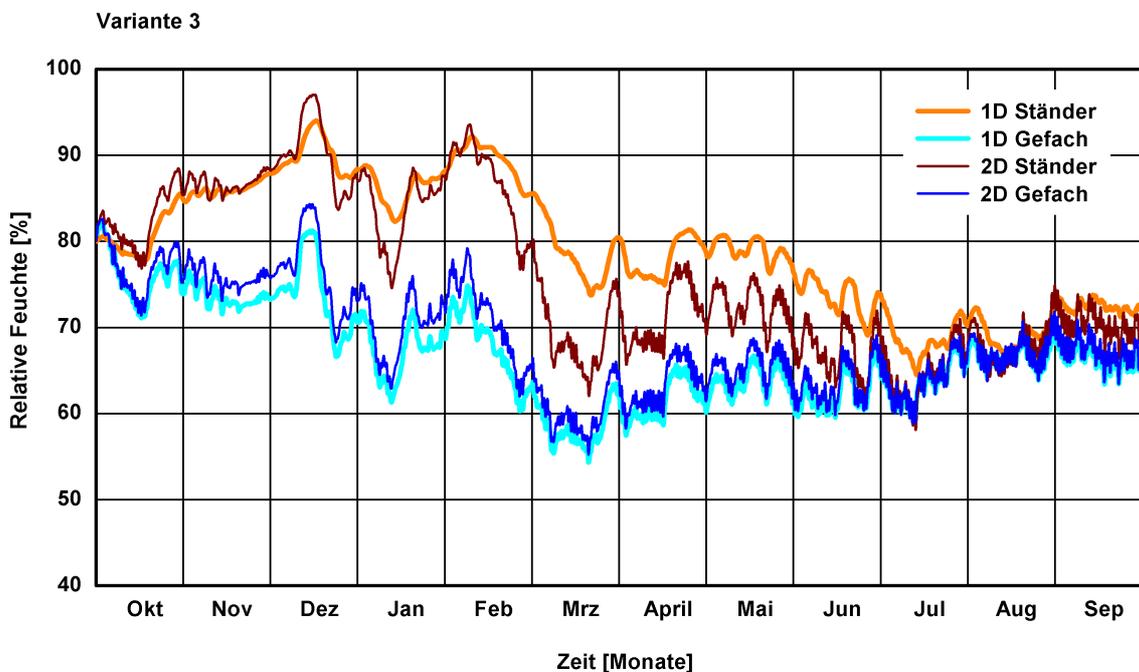


Bild 8: Jahresverläufe der relativen Feuchte in der Konstruktionsvariante 3 an den im vorangegangenen Bild gekennzeichneten Monitorpositionen der zweidimensionalen Berechnung (dünne Linien, dunkle Farben) im Vergleich zu den Ergebnissen der eindimensionalen Simulation (dicke Linien, helle Farben).

Zurückkommend auf den Vergleich zwischen ein- und zweidimensionaler Simulation in Bild 8 kann folgendes festgestellt werden. Im Gefachbereich sind die Ergebnisse sehr ähnlich. Die anfänglich etwas ungünstigeren Feuchteverhältnisse bei der 2D-Berechnung sind auf den Ausgangswassergehalt im Holzständer zurückzuführen, der bei der 1D-Berechnung nicht berücksichtigt wird. Vergleicht man die simulierten Verläufe im Bereich des Ständers zeigen sich, wie schon bei Variante 2 größere Abweichungen. Da jedoch hier am Ständer die deutlich kritischeren Feuchtebedingungen auftreten reicht die eindimensionale Berechnung zur Beurteilung der Feuchtesicherheit nicht mehr aus. Allerdings weisen auch die Ergebnisse der 1D-Berechnung darauf hin, dass die Feuchtesituation am Ständer kritischer ist als im Gefach.

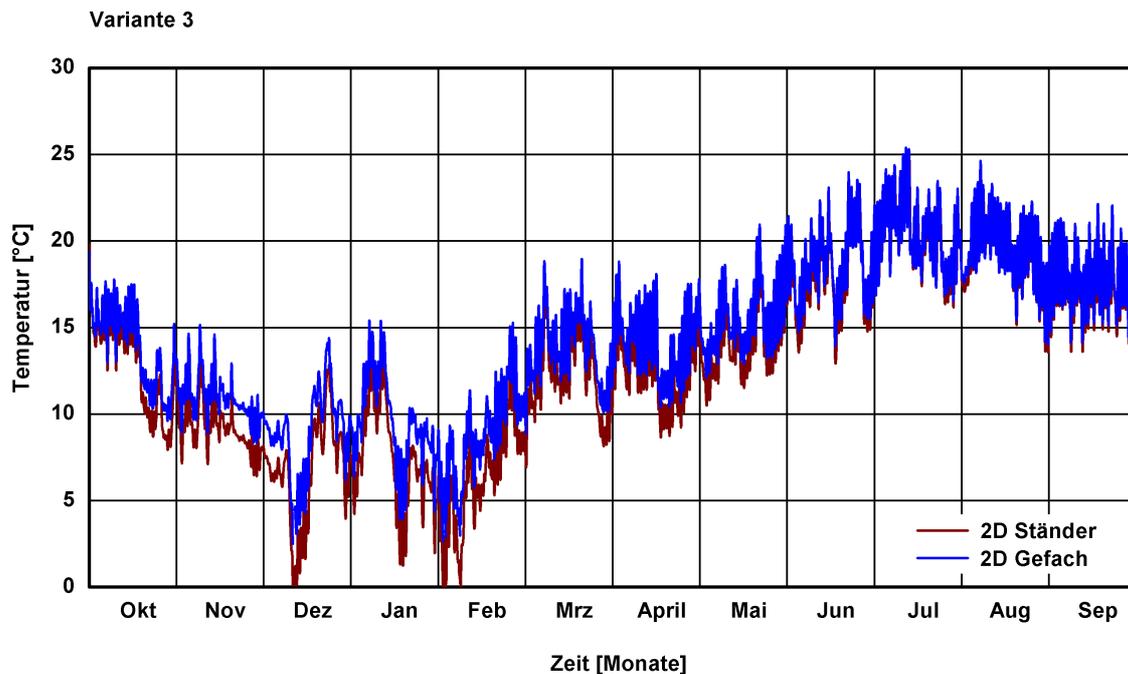


Bild 9: Jahresverläufe der Temperatur in der Konstruktionsvariante 3 an denselben Monitorpositionen wie in Bild 8 (zweidimensionale Berechnung).

## Schlussfolgerungen

Das vorrangige Ziel dieser Untersuchung war nicht die Feuchteschutzbeurteilung der vorgestellten Konstruktionsvarianten. Dazu hätte man die rechnerischen Simulationen über mehrere Jahre fortführen müssen um den eingeschwungenen Zustand zu erreichen, d.h. von den Anfangsbedingungen unabhängige Ergebnisse zu erhalten. Vielmehr sollte hier analysiert werden wann eine eindimensionale Berechnung (1D) zur Beurteilung der winterlichen „Tauwassergefahr“ bzw. der Gefahr von Schimmelpilzbildung [8] inhomogener Bauteile ausreicht bzw. wann eine zweidimensionale Simulation (2D) erforderlich ist. Aus den Ergebnissen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei nur einer Wärmedämmebene herrschen die kritischsten Feuchtebedingungen in den Bereichen mit den größten Temperaturgradienten, d.h. beim Holzbau im Gefachbereich. In solchen Fällen sind 1D-Berechnungen ausreichend.
- Bei zwei oder mehreren Dämmschichten in der Konstruktion sollte mit Hilfe von 1D-Berechnungen abgeschätzt werden, ob die kritischsten Feuchteverhältnisse tatsächlich auch im Regelquerschnitt (hier Gefachbereich) auftreten. Ist das nicht der Fall, wie z.B. bei der Konstruktionsvariante 3 mit Innendämmung, sind 2D-Berechnungen dringend zu empfehlen.
- Bei unklaren Verhältnissen sollte immer eine 2D-Berechnung zur Absicherung der 1D-Simulationen durchgeführt werden.

Diese Aussagen beschränken sich auf die Beurteilung der winterlichen Feuchteverhältnisse von Konstruktionen, die vom Prinzip den hier untersuchten Varianten ähnlich sind.

## Literatur

- [1] Rode Pedersen, C. *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. Diss. TU Denmark 1990.
- [2] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Universität Stuttgart 1994.
- [3] Grunewald, J.: *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. Diss. TU Dresden 1997.
- [4] DIN 4108-3: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz*. Juli 2001.
- [5] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: *Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen*. Mai 2002.
- [6] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Mai 2002.
- [7] prEn 15026: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Oktober 2004.
- [8] Sedlbauer, K.: *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Dissertation Universität Stuttgart (2001).