



Experimentelle und rechnerische Untersuchung eines neuen Wandtrocknungssystems

Georg Geißer
Hartwig Künzel
Andreas Zegowitz

Experimentelle und rechnerische Untersuchung eines neuen Wandtrocknungssystems

Zur thermischen Trocknung von Wänden nach einem Wasserschaden werden häufig Infrarot-Heizplatten eingesetzt. Zum Erreichen der gewünschten Trocknungstemperatur an der Bauteiloberfläche benötigen diese über den Zeitraum der Trocknung große Mengen elektrischer Energie. Das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart hat ein neues, elektrisch betriebenes, diffusionsoffenes und flexibles Flächenheizsystem (EDF-Trocknungssystem) entwickelt. Durch seine Funktionsweise trocknet es Wände energieeffizient und gleichmäßig. Zur Ermittlung des Ist-Zustands des EDF-Trocknungssystems bei kontinuierlicher Betriebsweise und zum trocknungstechnischen und energetischen Vergleich mit einer marktüblichen IR-Heizplatte wurden experimentelle und rechnerische Untersuchungen durchgeführt. Das mithilfe der durchgeführten Versuche validierte Simulationsmodell ermöglicht weitere Optimierungsstudien bezüglich der Betriebsweise des neuen Trocknungssystems.

Stichworte Technische Trocknung; Wasserschaden; Energieeffizienz; Numerische Simulation

1 Einleitung

Die Haupteinsatzgebiete der technischen Bautrocknung liegen bei der Beseitigung von Wasserschäden durch defekte Wasserleitungen, durch Hochwasserereignisse und darüber hinaus bei der Neubautrocknung. Zur Wandtrocknung werden häufig IR-Heizplatten eingesetzt, die in einem bestimmten Abstand zur Wand aufgestellt werden und mittels Wärmestrahlung eine Temperaturerhöhung an der Bauteiloberfläche und im zu trocknenden Bauteil erreichen. Nach dem Trocknungsbeginn wird auf der Trocknungsseite im oberflächennahen Bereich durch den Flüssigwassertransport relativ schnell eine gute Austrocknung erreicht. Mit zunehmender Trocknung auf der beheizten Seite verlangsamt sich der Trocknungsprozess. Der Luftspalt zwischen IR-Heizplatte und Wandoberfläche ermöglicht in den ersten Tagen der Trocknung den Feuchtetransport an die Umgebung, trägt aber auch zum hohen Stromverbrauch bei.

Das neue EDF-Trocknungssystem [1] bewirkt ebenfalls eine Erwärmung der Bauteiloberfläche und damit eine Austrocknung von durchfeuchteten Bauteilen. Allerdings nicht durch Wärmestrahlung, sondern durch Wärmeleitung. Es besteht im Wesentlichen aus einer diffusionsoffenen Mineralwolldämmplatte auf der ein elektrischer Heizdraht schlangenförmig montiert ist. Dieser sorgt für die

Experimental and computational investigation of a new wall drying system. Thermal drying of walls after water damages is often done with an infrared dryer. To reach the desired drying temperature at the wall surface this type of drying system needs a large amount of electrical energy during the drying period. The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP in Stuttgart has developed a new, electrically operated, open to diffusion and flexible surface heating system (EDF drying system). Due to its functionality it dries walls energy efficient and even. Experimental and computational investigations have been carried out to determine the actual state of the EDF drying system in continuous operation mode and to compare the drying process and the amount of energy with a commercially available infrared dryer. The simulation model, validated with the results of the performed experiments, allows further optimization studies regarding the operation mode of the new drying system.

Keywords Technical drying; Water damage; Energy efficiency; Numerical simulation

notwendige thermische Energie. Das Trocknungsmodul wird, wie in Bild 1 dargestellt, direkt auf das zu trocknende Bauteil aufgebracht. Dadurch wird ein Großteil der thermischen Energie genutzt. Die diffusionsoffene Wärmedäm-

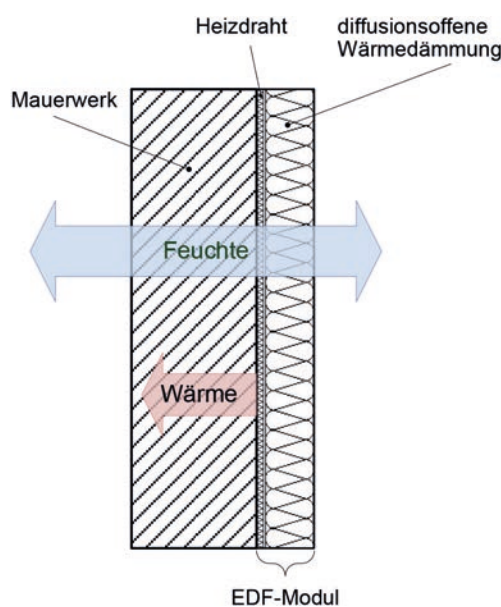


Bild 1. Funktionsschema des EDF-Trocknungssystems
Fig. 1. Functional scheme of the EDF drying system

mung minimiert die thermischen Verluste und ermöglicht den nahezu ungehinderten Abtransport der Feuchte vom Bauteil durch das Trocknungsmodul hindurch an die Umgebung.

Die technische Bautrocknung beruht oft auf Erfahrungswerten der ausführenden Unternehmen. Das Trocknen von Bauteilen aus neuen Materialien oder Materialkombinationen kann die Planung einer technischen Trocknungsmaßnahme aufgrund mangelnder Erfahrungswerte erschweren. Daher ist es nützlich, numerische Simulationsprogramme zu verwenden, um die Trocknungsdauer und die Energieeffizienz von Trocknungsgeräten in Abhängigkeit der jeweiligen Bauteilkombination prognostizieren zu können.

Neben experimentellen Untersuchungen werden deshalb auch Simulationsmodelle mit WUFI® Pro 6.1 [2] erarbeitet. Die Versuche beziehen sich ausschließlich auf die Trocknung von Hochlochziegelwänden.

2 Rechnerische Voruntersuchungen

Zunächst werden rechnerische Voruntersuchungen mit dem eindimensionalen numerischen Simulationsprogramm WUFI® Pro 6.1 durchgeführt. Die Erarbeitung eines EDF-Simulationsmodells dient zur Prognose der Trocknungsdauer und der zur Trocknung notwendigen Energiemenge. Darüber hinaus wird mittels numerischer Simulation eine geeignete Dicke für die Mineralwolldämmung des EDF-Moduls in Abhängigkeit der Trocknungstemperatur ermittelt. Insgesamt werden drei Dämmstoffdicken (30 mm, 50 mm, 80 mm) bei jeweils drei Trocknungstemperaturen (40 °C, 45 °C, 50 °C) simuliert. Die Simulationsmodelle berücksichtigen jeweils einen 115 mm dicken Hochlochziegel und eine Mineralwolldämmplatte mit der entsprechenden Stärke. Die jeweiligen Materialdaten sind in der WUFI® Datenbank enthalten. Der Hochlochziegel hat in der Realität Luftspalte, die im Simulationsmodell über die Porosität des Materials berücksichtigt werden. Bild 2 zeigt das EDF-Simulationsmodell mit einer 50 mm dicken Dämmschicht und der Verteilung der Rechengitter.

Die jeweilige Trocknungstemperatur wird mittels iterativer Bestimmung einer internen Wärmequelle zwischen Dämmung und Hochlochziegel erreicht. Als Randbedingungen auf der Innen- und Außenseite der Wand wird jeweils eine Temperatur von 20 °C und eine relative Feuchte

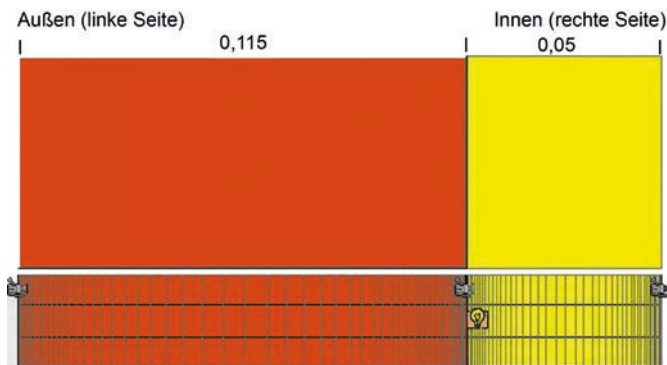


Bild 2. EDF-Simulationsmodell
Fig. 2. EDF simulation model

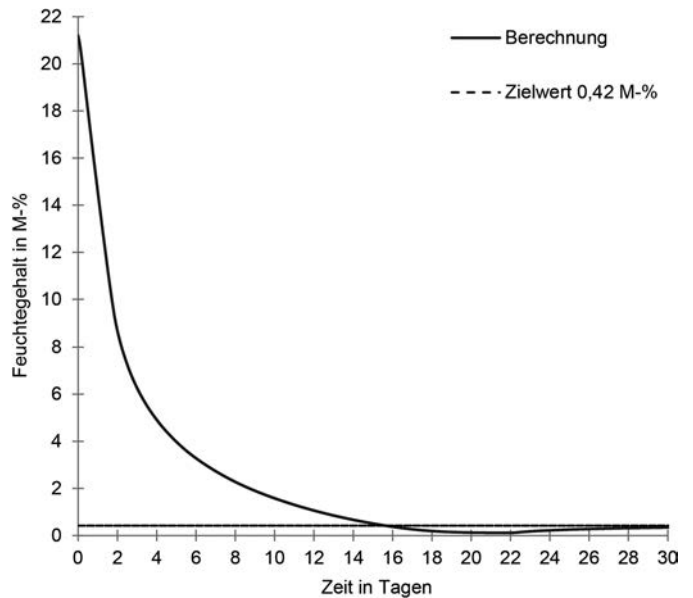


Bild 3. Berechneter Feuchteverlauf in M-% des Hochlochziegels. EDF-Trocknung mit Mineralwolle: 50 mm, θ_{OF} : 50 °C

Fig. 3. Calculated moisture curve in % m/m of the perforated brick. EDF drying with mineral wool: 50 mm, $\theta_{Surface}$: 50 °C

von 50% in Anlehnung an ein Norminnenraumklima nach DIN 4108 [3] berücksichtigt. Die Ergebnisse der Vorsimulation ergeben bei einer Dämmstoffdicke von 50 mm und einer Trocknungstemperatur von 50 °C an der Innenwandoberfläche die besten Ergebnisse. Die prognostizierte Trocknungsdauer beträgt mit diesen Parametern 16 Tage und die Berechnung der dafür notwendigen Energiemenge ergibt 15,9 kWh. Der berechnete Feuchteverlauf ist in Bild 3 dargestellt.

Die Ergebnisse dienen zur Festlegung der konstruktiven Abmessungen des EDF-Moduls. Bild 4 zeigt das Trocknungsmodul mit einer Fläche von 0,52 m² und einer Dämmstoffdicke von 50 mm.

Auf der Mineralwolldämmung wird eine Gewebematte angebracht, die zur Fixierung des elektrischen Heizdrahtes dient. Die spezifische Leistung des Trocknungsmoduls beträgt circa 250 W/m².

3 Experimentelle Untersuchungen

Das erstellte EDF-Simulationsmodell wird durch experimentelle Untersuchungen validiert und das konstruierte EDF-Modul mit einer IR-Heizplatte mit einer elektrischen Leistung von 680 W verglichen, um den Ist-Zustand bei einer kontinuierlichen Betriebsweise zu ermitteln.

Dazu werden zwei identische Hochlochziegelwände (Wand A und Wand B) mit einer Wanddicke von 115 mm in einem Klimasimulator errichtet. Beide Wände werden an den Oberflächen und in verschiedenen Bauteiltiefen sowie über drei Ebenen mit einer Vielzahl von Messsensoren ausgestattet. Dies ermöglicht die detaillierte Betrachtung der Temperatur- und Feuchteverläufe. Auch die klimatischen Umgebungsbedingungen und die Oberflächen der Trocknungsgeräte werden messtechnisch überwacht. Die Messungen der Oberflächentemperaturen erfolgen mit Thermoelementen. Die Temperatur und die relative

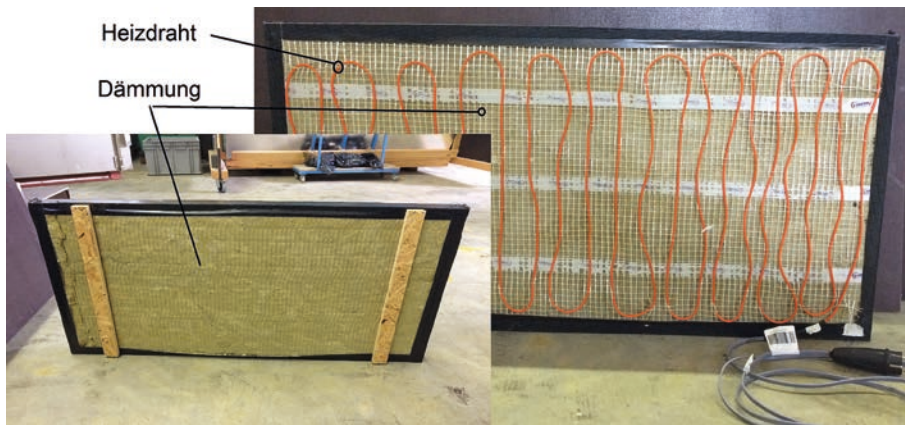


Bild 4. EDF-Trocknungsmodul
Fig. 4. EDF drying module



Bild 5. Sichtbarer Feuchteanstieg an der Außenseite von Wand A am Ende der Bewässerung
Fig. 5. Visible increase of moisture at the outside of wall A at the end of the wall irrigation

Feuchte der Versuchsumgebung und in der Wand wird jeweils mit kombinierten Temperatur- und Feuchtesensoren automatisch in einem Messintervall von einer Minute erfasst.

Die messtechnische Erfassung der Feuchtegehalte der Hochlochziegelwände erfolgt manuell, mehrmals täglich nach dem Widerstandsverfahren.

Zunächst werden beide Wände bei konstanten klimatischen Randbedingungen von ca. 20 °C und 50% relativer Feuchte bewässert. Die Bewässerung erfolgt so lange, bis kein Feuchteanstieg mehr verzeichnet wird. Bild 5 und Bild 6 zeigen den sichtbaren Feuchteanstieg an der jewei-



Bild 6. Sichtbarer Feuchteanstieg an der Außenseite von Wand B am Ende der Bewässerung
Fig. 6. Visible increase of moisture at the outside of wall B at the end of the wall irrigation

ligen Wandaußenseite. Das Umgebungsklima wird während des gesamten Versuchs aufrechterhalten. Anschließend wird Wand A mit einer konventionellen IR-Heizplatte und Wand B mit dem EDF-Trocknungssystem getrocknet, bis die jeweiligen Ausgangsfeuchtegehalte wieder erreicht werden. Die beiden Trocknungsgeräte werden so betrieben, dass sich an den Innenoberflächen der Wände über die gesamte Trocknungsdauer eine konstante Trocknungstemperatur von circa 50 °C einstellt.

Auf Bild 7 sind die beiden Wände im Klimasimulator während der technischen Trocknung zu sehen. Links Wand A, die mit der IR-Heizplatte in einem Abstand von 50 mm getrocknet wird und rechts Wand B. Hier wird das EDF-Modul direkt auf die Wand aufgebracht und mit Schraubzwingen fixiert. Nach dem Ausschalten der Trocknungsgeräte werden die klimatischen Randbedingungen noch für weitere sechs Tage aufrechterhalten.

Die Trocknungsdauer ist durch die nahezu identische Ausgangssituation bei beiden Wänden annähernd gleich und beträgt etwa 13 Tage.

Die Feuchteverläufe in vier Bauteiltiefen (5 mm, 50 mm, 70 mm, 110 mm) der beiden Wände in einer Höhe

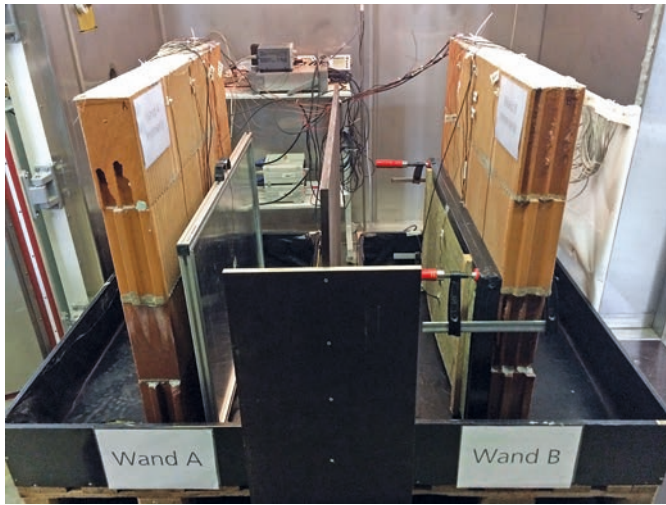


Bild 7. Technische Trocknung der Hochlochziegelwände A (IR-Trocknung) und B (EDF-Trocknung)
 Fig. 7. Technical drying of the perforated brick walls A (infrared drying) and B (EDF drying)

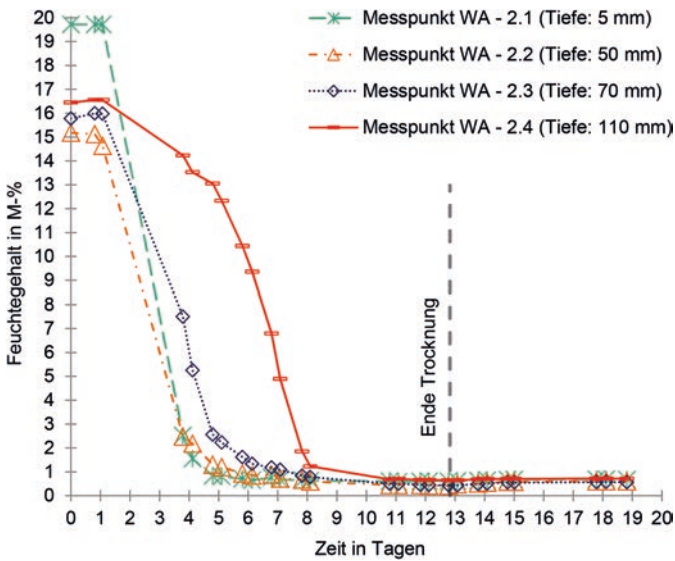


Bild 8. Feuchteverlauf in M.-% (unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten) der Hochlochziegelwand A (IR-Trocknung). Dargestellt sind die MP auf einer Höhe von 200 mm in vier Bauteiltiefen vom Trocknungsbeginn bis zum Versuchsende.
 Fig. 8. Moisture curve in % m/m (taking into account the uncertainties of measurement) of the perforated brick wall A (infrared drying). Shown are the measurement points at a height of 200 mm in four depths from the start of drying until the end of the experiment.

von 200 mm können Bild 8 und Bild 9 entnommen werden.

Die vier Messpunkte (MP) haben am Ende der Bewässerung nicht alle den Wert der freien Wassersättigung erreicht. Der Feuchtegehalt reduziert sich in den ersten Tagen nach Trocknungsbeginn jeweils relativ schnell. Danach erfolgt die Feuchtereduzierung langsamer, im Wesentlichen durch Wasserdampfdiffusion im Bauteilinneren. Die Feuchteverläufe der beiden Wände verhalten sich während der technischen Trocknung ähnlich.

Die Trocknung erfolgt von der beheizten Wandinnenseite, hin zur Außenseite (gegenüberliegende, nicht

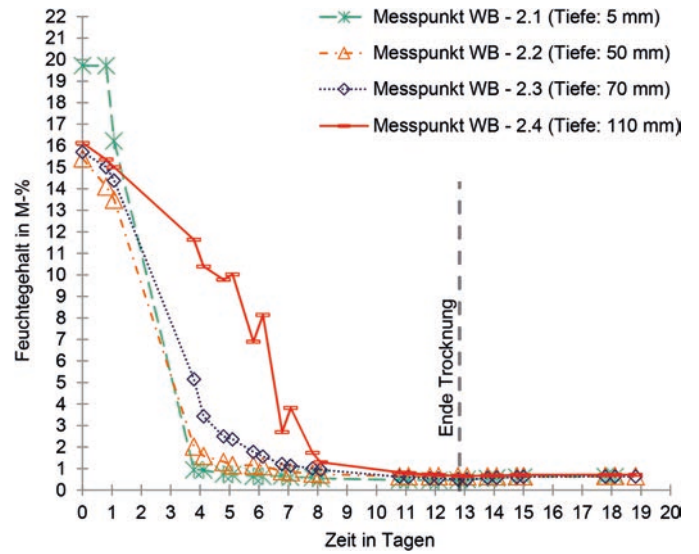


Bild 9. Feuchteverlauf in M.-% (unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten) der Hochlochziegelwand B (EDF-Trocknung). Dargestellt sind die Messpunkte auf einer Höhe von 200 mm in vier Bauteiltiefen vom Trocknungsbeginn bis zum Versuchsende.

Fig. 9. Moisture curve in % m/m (taking into account the uncertainties of measurement) of the perforated brick wall B (EDF drying). Shown are the measurement points at a height of 200 mm in four depths from the start of drying until the end of the experiment.

erwärmte Seite im Laborversuch). Der MP 2.4 in einer Tiefe von 110 mm erreicht jeweils als letztes die Feuchteausgangswerte, die vor der Bewässerung gemessen wurden und bestimmt somit wesentlich die Trocknungsdauer. Bei Wand B kommt es zwischenzeitlich immer wieder zu geringen Feuchteanstiegen. Dies wird auf eine Feuchteverteilung innerhalb des Bauteils, von oben nach unten, zurückgeführt, da bei Wand B die Feuchte im Bereich der Messensoren etwas höher anstieg als bei Wand A. Aus Tabelle 1 kann die durch technische Trocknung erreichte Feuchteabnahme der beiden Wände entnommen werden. Diese wurde durch die Wägung der beiden Versuchsaufbauten vor und nach der technischen Trocknung ermittelt.

Da die Trocknung der beiden Hochlochziegelwände jeweils bei einer Trocknungstemperatur von 50 °C und bei gleichen Umgebungsbedingungen erfolgt, ist die Trocknungsdauer trotz unterschiedlicher Trocknungsmethoden annähernd gleich.

Was sich allerdings erheblich unterscheidet, ist die in Tabelle 2 gezeigte, zur Trocknung benötigte elektrische Energie der beiden Trocknungssysteme.

Tabelle 1. Durch Wägung ermittelte Wasserabnahme der Versuchsaufbauten während der technischen Trocknung
 Table 1. Water content reductions, determined by weighing of the two experimental setups during the technical drying period

Versuchsaufbau	Wassermenge in kg
Wand A (IR-Trocknung)	7,5 ± 0,7
Wand B (EDF-Trocknung)	6,8 ± 0,7

Tabelle 2. Zur Wandtrocknung benötigte Energiemenge des jeweiligen Trocknungssystems

Table 2. Required electrical energy by the two drying systems for wall drying

Trocknungssystem	Energie in kWh
IR-Trocknung (Wand A)	168,9 ± 1,7
EDF-Trocknung (Wand B)	21,1 ± 0,2

Das neu entwickelte EDF-Trocknungssystem trocknet die Hochlochziegelwand demnach mit einem Energieeinsparpotenzial von über 80% gegenüber der IR-Heizplatte. Die in den Wänden A und B durch Wägung ermittelten Feuchtemengen unterscheiden sich geringfügig. Daher ist es sinnvoll, die eingesetzte Energiemenge des jeweiligen Trocknungssystems auf die dem Bauteil entzogene Wassermenge zu beziehen. Dies ermöglicht auch die Vergleichbarkeit mit anderen Trocknungssystemen und experimentellen Untersuchungen. Tabelle 3 zeigt jeweils die in Abhängigkeit des Trocknungssystems benötigte Energiemenge, um 1 kg Wasser in der Hochlochziegelwand zu trocknen.

Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass das EDF-System wesentlich sparsamer ist als die eingesetzte IR-Technik. Die energetische Einsparung liegt hier bei 86%.

Die Unterschiede bezüglich der notwendigen elektrischen Energie ergeben sich durch die verschiedenen Funktionsweisen der beiden Trocknungssysteme. Während das EDF-Modul direkt auf der Wand aufliegt, wird die IR-Heizplatte mit einem Abstand zur Wand errichtet, um den Abtransport der Feuchte zu gewährleisten. Dies führt allerdings auch zu thermischen Verlusten.

Die Messergebnisse der EDF-Trocknung zeigen Abweichungen zu den rechnerischen Voruntersuchungen bezüglich der Trocknungsdauer von etwa drei Tagen und der notwendigen Energiemenge von ungefähr 5 kWh. Dies wird auf die etwas abweichenden Anfangs- und Randbedingungen, unterschiedliche Zielfeuchtegehalte und leicht unterschiedliche Randbedingungen sowie auf die Unterschiede zwischen den mehrdimensionalen Laborverhältnissen und der eindimensionalen Simulation zurückgeführt.

4 Numerische Vergleichsrechnungen

Zur Optimierung der Simulationsmodelle werden die messtechnisch ermittelten Randbedingungen bezüglich Temperatur, Feuchte und Leistung in der Simulation berücksichtigt. Die gemessenen Feuchtegehalte in vier Bauteiltiefen, unmittelbar nach dem Ende der Bewässerung, werden in WUFI® als Anfangsfeuchtegehalte festgelegt. Dazu wird der Hochlochziegel im Simulationsmodell in vier Schichten unterteilt, die dem jeweils gemessenen Feuchtegehalt entsprechen. Als trocken wird ein Zielwert von 0,55 M.-% definiert. Dieser ergibt sich als Mittelwert aus den am Ende der Trocknung gemessenen Feuchtegehalten in vier Bauteiltiefen der Hochlochziegelwand.

Die gemessenen klimatischen Parameter in der Versuchsumgebung werden ebenfalls in die Simulationsmodelle eingearbeitet.

Die Trocknungstemperatur von 50°C soll durch zwei unterschiedliche Vorgehensweisen erreicht werden. Zu-

Tabelle 3. Zur Trocknung von 1 kg Wasser benötigte Energiemenge des jeweiligen Trocknungssystems

Table 3. Amount of electrical energy needed to dry 1 kg of water in relation to the drying system

Trocknungssystem	Energiemenge in kWh/kg _w
IR-Trocknung (Wand A)	22,5 ± 0,2
EDF-Trocknung (Wand B)	3,1 ± 0,1

nächst durch die Berücksichtigung der gemessenen elektrischen Leistung des EDF-Trocknungssystems als interne Wärmequelle und anschließend wird die Trocknungstemperatur analog zur Vorgehensweise der Voruntersuchung bestimmt. Die interne Wärmequelle wird iterativ angepasst, bis sich über den gesamten Trocknungszeitraum die gewünschte Oberflächentemperatur von 50°C einstellt. Dies dient dazu, die benötigte Energie unabhängig von durchgeführten Messungen ermitteln zu können.

Die Verwendung der Messdaten der Leistungsmessung führt in der Simulation zu höheren Oberflächentemperaturen als bei den Laborversuchen. Die Leistungsdaten werden so lange reduziert bis sich ein Verlauf der Oberflächentemperatur auf dem Niveau der Laborversuche ergibt. Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich ein Korrekturfaktor von $K = 0,68$.

Die Feuchteverläufe in Bild 10 ergeben sich aus der mittels Leistungsmessung und Korrekturfaktor K resultierenden Oberflächentemperatur und die Feuchteverläufe in Bild 11 resultieren aus der iterativ ermittelten Oberfläch-

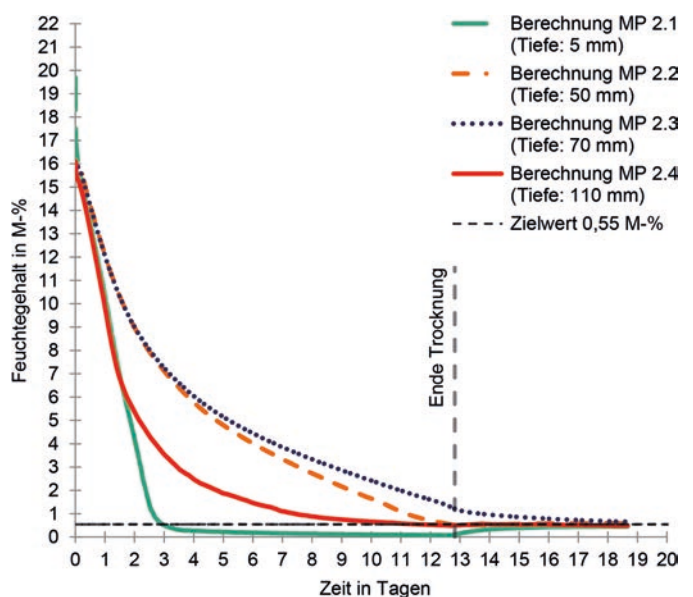


Bild 10. Berechnete Feuchteverläufe in % m/m bei EDF-Trocknung. Dargestellt sind die Feuchteverläufe an MP in vier Bauteiltiefen der Hochlochziegelwand. Diese resultieren aus der mittels Leistungsmessung und Korrekturfaktor ($K = 0,68$) ermittelten Oberflächentemperatur. Dargestellt ist auch das zu erreichende Feuchteniveau von 0,55 M.-%.

Fig. 10. Calculated moisture curve in % m/m of EDF drying. Shown are the moisture curves at measurement points in four depths of the perforated brick wall. These curves result from the surface temperature obtained by power measurement and correction factor ($K = 0.68$). Also shown is the reaching moisture level of 0.55 % m/m.

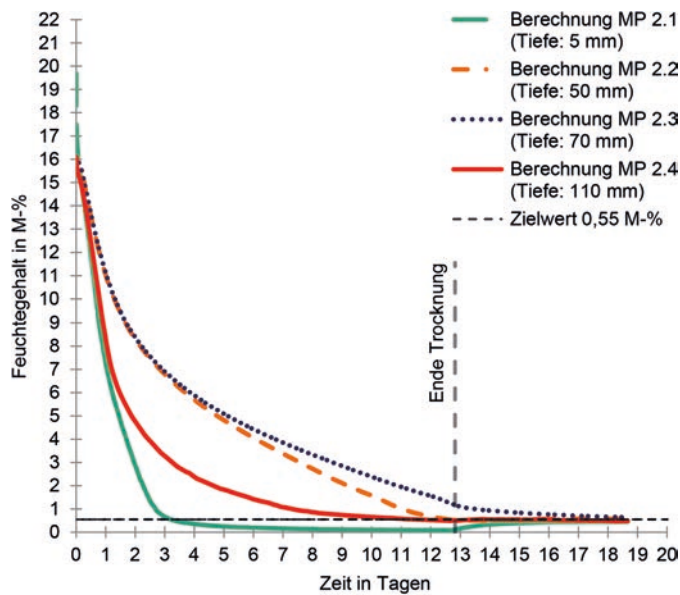


Bild 11. Berechnete Feuchteverläufe in M.-% bei EDF-Trocknung. Dargestellt sind die Feuchteverläufe an MP in vier Bauteiltiefen der Hochlochziegelwand. Diese resultieren aus der iterativ ermittelten Oberflächentemperatur. Dargestellt ist auch das zu erreichende Feuchteniveau von 0,55 % m/m.

Fig. 11. Calculated moisture curve in % m/m of EDF drying. Shown are the moisture curves at measurement points in four depths of the perforated brick wall. These curves result from the iteratively determined surface temperature. Also shown is the reaching moisture level of 0.55 % m/m.

chentemperatur. Das Feuchteverhalten an den jeweiligen Messpunkten ist bei beiden Vorgehensweisen nahezu identisch. Dies ermöglicht die Simulation der Trocknungstemperatur mittels iterativer Anpassung der internen Wärmequelle und somit auch die Prognose der Energiemenge ohne die Verwendung von Leistungsmessdaten.

Die durchgeführten Simulationen ergeben in tieferen Schichten der Hochlochziegel (MP 2.2, MP 2.3) längere Trocknungszeiten als bei den Laborversuchen. In den Randbereichen beziehungsweise den äußersten Schichten (MP 2.1, MP 2.4) stimmt die berechnete Trocknungsdauer jeweils gut mit den Messergebnissen überein. Der Datensatz des Hochlochziegels in WUFI® geht von einem homogenen Material aus, während der reale Stein im Inneren mehrere Luftschichten aufweist, die vermutlich zu einem schnelleren Feuchteabtransport als in der Simulation führen. Bild 12 zeigt beispielhaft den gemessenen und den berechneten Feuchteverlauf von MP 2.1 in einer Bauteiltiefe von 5 mm. Bei der Messung ergibt sich ein um etwa einen Tag verzögerter Trocknungsstart gegenüber der Berechnung. Dies wird auf den hohen Feuchteabtransport aus dem Bauteilinneren und den hohen relativen Feuchten in den Luftzwischenräumen zurückgeführt.

Durch die Verschiebung des berechneten Feuchteverlaufs ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Der MP 2.4 auf der Außenseite der Wand in einer Bauteiltiefe von 110 mm bestimmt bei den experimentellen Versuchen wesentlich die Trocknungsdauer und zeigt im Vergleich zur Simulation diesbezüglich ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Daher wird für weitere Betrachtungen

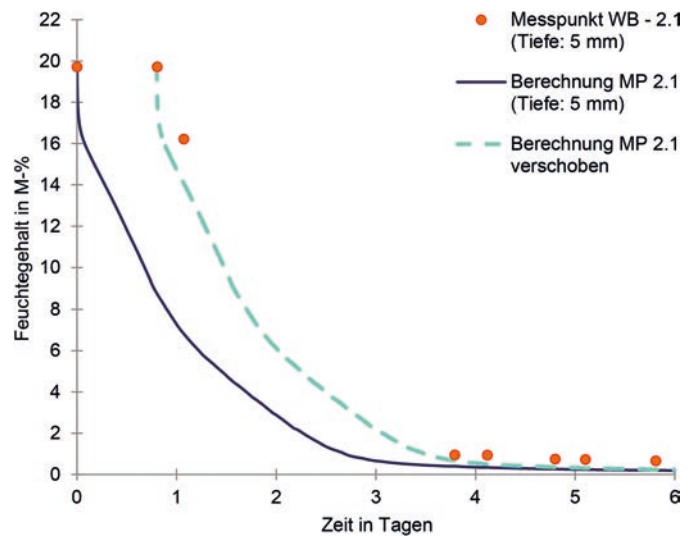


Bild 12. Messtechnisch ermittelter, berechneter und verschobener Feuchteverlauf in M.-% von MP 2.1 in einer Tiefe von 5 mm der Hochlochziegelwand bei EDF-Trocknung

Fig. 12. Metrologically determined, calculated and shifted moisture curves in % m/m of measurement point 2.1 in depth of 5 mm of the perforated brick wall with EDF drying

immer der MP 2.4 in der äußersten Schicht der Hochlochziegelwand herangezogen.

Die berechnete Trocknungsdauer stimmt gut mit der messtechnisch ermittelten überein. Sie beträgt jeweils ungefähr 13 Tage. Die Einführung des Korrekturfaktors K berücksichtigt die Unterschiede zwischen realen Verhältnissen und der eindimensionalen Simulation bezüglich der zur Trocknung notwendigen Energiemenge und ermöglicht eine genauere Prognose. Die unter Berücksichtigung von $K = 0,68$ berechnete Energiemenge beträgt 20,5 kWh und liegt etwas niedriger als die gemessene.

Die Ergebnisse bestätigen, dass mit dem EDF-Simulationsmodell in WUFI® die Trocknungsdauer von Hochlochziegelwänden nach einem Wasserschaden und die dafür notwendige Energiemenge bei bekannten Anfangs- und Randbedingungen eine relativ genau prognostiziert werden kann.

5 Erarbeitung von Optimierungsalgorithmen

Die Ermittlung des Ist-Zustands ermöglicht, mittels weiterer Parameterstudien mit WUFI® Optimierungsalgorithmen für das EDF-Trocknungssystem zu erarbeiten. Der Ist-Zustand des EDF-Moduls bei einer kontinuierlichen Betriebsweise weist bereits sehr gute Ergebnisse bezüglich der Energieeffizienz gegenüber der verwendeten IR-Heizplatte auf. Um zu prüfen, ob weitere Optimierungsmöglichkeiten der Trocknungsdauer und der zur Trocknung notwendigen Energiemenge mit einer zyklischen Betriebsweise des EDF-Trocknungssystems möglich sind, werden insgesamt vier verschiedene Optimierungsalgorithmen auf Grundlage der Ergebnisse bei einer kontinuierlichen Betriebsweise erarbeitet. Die Ergebnisse der bereits durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich der Feuchtegehalt in den ersten Tagen der Trocknung sehr stark reduziert und die nachfolgende Feuchtereduzierung wesentlich langsamer abläuft. Daher werden zu Beginn der Trocknung jeweils für mehrere Tage ein kon-

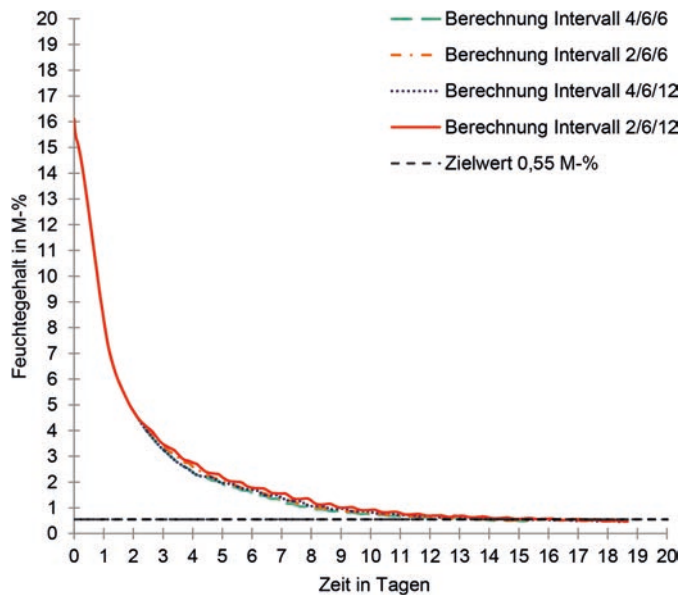


Bild 13. Berechnete Feuchteverläufe in % m/m in Abhängigkeit der jeweiligen zyklischen Betriebsweise. Des Weiteren ist der Zielwert von 0,55 % m/m angegeben.
Fig. 13. Calculated moisture curves in % m/m depending on the respective cyclic mode of operation. Furthermore, the target value of 0.55 % m/m is indicated.

tinuierlicher Betrieb und anschließend ein Intervallbetrieb mit einer Trocknungstemperatur von jeweils 50 °C simuliert.

Beim Intervall 1 wird die Trocknung zunächst für vier Tage kontinuierlich und danach im Intervallbetrieb mit sechs Stunden an und sechs Stunden aus (4/6/6) betrieben. Beim Intervall 2 wird zwei Tage kontinuierlich und anschließend mit einem Intervall von sechs Stunden an und sechs Stunden aus (2/6/6) getrocknet. Die Simulation von Intervall 3 beinhaltet zu Beginn eine viertägige kontinuierliche Trocknung. Danach folgt ein Intervallbetrieb mit sechs Stunden an und zwölf Stunden aus (4/6/12). Beim Intervall 4 wird am Anfang nur zwei Tage kontinuierlich getrocknet und im Anschluss wieder im Intervall, mit sechs Stunden an und zwölf Stunden aus (2/6/12). In Bild 13 sind die vier Feuchteverläufe in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsweise dargestellt.

Beim Einsetzen des Intervallbetriebs findet in den Pausenzeiten jeweils eine Feuchteumverteilung statt. Die

Tabelle 4. Berechnete Trocknungsdauer und Energiemenge der jeweiligen Betriebsweise; $\theta_{OF} = 50\text{ °C}$

Table 4. Calculated drying time and amount of energy depending on the respective mode of operation; $\theta_{Surface} = 50\text{ °C}$

Betriebsweise*	Trocknungsdauer in Tagen	Energie in kWh
kontinuierlich	13	20,5
Intervall 4/6/6	14	19,2
Intervall 2/6/6	15	18,9
Intervall 4/6/12	16	18,1
Intervall 2/6/12	17	17,3

* Intervallangaben: Tage an/Std. an/Std. aus

Tabelle 5. Berechnete Trocknungsdauer und Energiemenge in Abhängigkeit der Wanddicke; $\theta_{OF} = 50\text{ °C}$

Table 5. Calculated drying time and amount of energy depending on the wall thickness; $\theta_{Surface} = 50\text{ °C}$

Wanddicke in mm	Trocknungsdauer in Tagen	Energie in kWh
HLz 115	13	20,5
HLz 175	28	38,7
HLz 245	49	58,1
HLz 365	90	88,4

Verläufe sind ähnlich, erreichen aber den Zielwert von 0,55 M.-% teilweise in einem Abstand von drei Tagen. Die Simulationsergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass ein Intervallbetrieb zwar die Trocknungszeit um einige Tage verlängert, aber auch zu energetischen Einsparungen von bis zu circa 15% führt. Diese fallen im Vergleich zur bereits energieeffizienten kontinuierlichen Betriebsweise, absolut betrachtet, aber eher gering aus. Die Berechnungen müssen durch weitere experimentelle Untersuchungen validiert werden.

6 Anwendungsgrenzen der EDF-Trocknung

Um zu untersuchen, bis zu welcher Wanddicke die EDF-Trocknung theoretisch eingesetzt werden kann, erfolgt die Simulation mit drei weiteren Wanddicken. Zusätzlich zu den bereits durchgeführten Untersuchungen mit einer Wanddicke von 115 mm erfolgt mittels WUFI® die Trocknung von Hochlochziegeln mit Wanddicken von 175 mm, 245 mm und 365 mm. Der Ausgangsfeuchtegehalt entspricht jeweils der maximalen freien Wassersättigung. Die übrigen Simulationsparameter bleiben unverändert. Die Trocknung erfolgt kontinuierlich mit einer Trocknungstemperatur von 50 °C. Tabelle 5 enthält die Trocknungsdauer und die zur Trocknung notwendige Energiemenge in Abhängigkeit von der jeweiligen Wanddicke.

Je dicker die Hochlochziegelwand, desto länger die Trocknungszeit und umso höher die benötigte Energiemenge. Bis zu einer Wanddicke von 175 mm ist der Trocknungszeitraum noch vertretbar und beträgt 28 Tage.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine 60 mm dickere Wand zu einer mehr als doppelt so langen Trocknungsdauer führt.

Die berechneten Feuchteverläufe der drei zusätzlich untersuchten Wanddicken können Bild 14 entnommen werden.

Auch diese theoretischen Berechnungen müssen durch Laborversuche validiert werden. Bei dickeren Wänden kann beispielsweise die Erhöhung der Trocknungstemperatur die Trocknungsdauer verkürzen. Mögliche Materialschädigungen müssen bei einer Temperaturerhöhung allerdings ausgeschlossen werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten experimentellen und rechnerischen Untersuchungen belegen die Funktionalität und das hohe Energieeinsparpotenzial des EDF-Trocknungssystems ge-

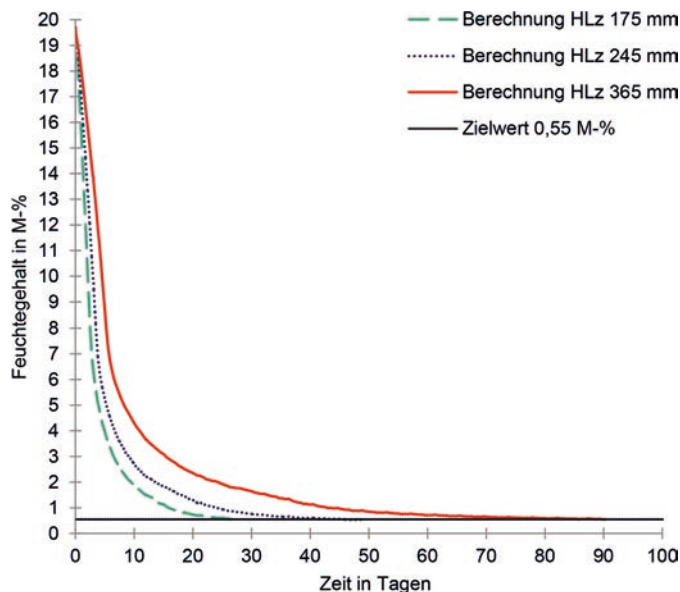


Bild 14. Berechnete Feuchteverläufe in % m/m von drei unterschiedlich dicken Hochlochziegelwänden. Dargestellt sind die Feuchteverläufe bei Wanddicken von 175 mm (HLz 175 mm), 245 mm (HLz 245 mm) und 365 mm (HLz 365 mm). Des Weiteren ist der Zielwert von 0,55 % m/m angegeben.

Fig. 14. Calculated moisture curves in % m/m of three different thick perforated brick walls. Shown are the moisture curves of a wall thickness of 175 mm (HLz 175 mm), 245 mm (HLz 245 mm) and 365 mm (HLz 365 mm). Furthermore, the target value of 0.55 % m/m is indicated.

genüber einer handelsüblichen IR-Heizplatte bei der technischen Trocknung von Hochlochziegelwänden. Mit dem erarbeiteten Simulationsmodell zur EDF-Trocknung ist eine relativ genaue Prognose der Trocknungsdauer und der Energiemenge unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors K möglich. Die erarbeiteten Optimierungsalgorithmen führen zwar zu einer etwas längeren Trocknungsdauer von Hochlochziegelwänden, aber auch zu weiteren energetischen Einsparungen.

Ab einer gewissen Wanddicke verlängern sich die Trocknungszeiten bei einer Trocknungstemperatur von 50 °C um ein Vielfaches.

Die jeweilige Trocknungsdauer bei den experimentellen und rechnerischen Untersuchungen ist auch von der Definition des trockenen Zustands abhängig. Zu Beginn der technischen Trocknung sinkt der Feuchtegehalt bei den durchgeführten Untersuchungen innerhalb weniger Tage stark ab. Der weitere Feuchterückgang erfolgt wesentlich langsamer. Dies liegt an den verschiedenen Feuchte-transportvorgängen im Material. Werden höhere Feuchtegehalte als trocken akzeptiert, kann dies die Trocknungsdauer um mehrere Tage verkürzen und somit auch zu einer Energieeinsparung beitragen. Allerdings muss die Gefahr von Folgeschäden immer ausgeschlossen werden.

Weitere Einsatzmöglichkeiten der EDF-Technik sind die Trocknung von Fußbodenaufbauten und Übergängen von Fußböden und Wänden sowie die Trocknung von Eck-

bereichen. Dies wären aufgrund der Funktionsweise des EDF-Trocknungssystems optimale Einsatzgebiete.

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die in den Versuchen verwendeten Hochlochziegelwänden. In der Praxis kann es aufgrund veränderter Randbedingungen zu abweichenden Ergebnissen kommen. Da die Trocknung von Bauteilen immer materialabhängig ist, sind die gewonnenen Erkenntnisse nur bedingt auf andere Materialien oder Bauteilkonstruktionen übertragbar. Dies bedarf weiterer Untersuchungen zu verschiedenen Materialien und Bauteilkombinationen.

Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen sind Bestandteil einer Masterarbeit zur technischen Bautrocknung [4]. Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit des Hermann-Rietschel-Instituts der TU Berlin und des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Stuttgart. Besonderer Dank gilt den Betreuern von der TU Berlin, Michael Schaub und Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel.

Literatur

- [1] Künzel, H.; Zegowitz, A.: Arrangement for heating, more specifically for drying a part of a building. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Anmelde-nr. 16190011.3, Deutschland. 29.03.2017. DE. Veröffentlichungsnr. EP3147420A1. IPC E04B 1/70 (2006.01)
- [2] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Universität Stuttgart: Dissertation 1994.
- [3] DIN 4108-3:2014-11 (2014) Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Berlin: Beuth.
- [4] Geißer, G.: Experimentelle und simulative Erarbeitung von Regelungs-algorithmen für ein Bautrocknungssystem, Masterarbeit, Institut für Energietechnik, Fachgebiet Gebäudeenergiesysteme, Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin, 2018.

Autoren dieses Beitrages:

Georg Geißer, M. Sc., g.geisser-edf@gmx.de
vormalig Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Abteilung Hygrothermik
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Hartwig Künzel, hartwig.kuenzel@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Zegowitz, andreas.zegowitz@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de