

Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen

LINEARE WÄRMEBRÜCKEN IN WANDAUFBAUTEN TEIL 2



Der Vermeidung bzw. richtigen Einschätzung von Wärmebrücken kommt in der Planung von Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen eine entscheidende Bedeutung zu. Der folgende Beitrag fasst eine Studie zusammen, die hierzu an der Technischen Universität München durchgeführt wurde.

Anlass für die Untersuchungen

Offensichtlich sind die Auswirkungen von Wärmebrücken in Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen gravierender im Vergleich zum Einsatz konventioneller Dämmstoffe¹. Dies hat zwei Gründe, die in engem Zusammenhang stehen:

- Erstens die erheblich geringere Wärmeleitung von Vakuum-Dämmsystemen und
- zweitens, und dies wirkt im Hinblick auf Wärmebrücken verstärkend, die folglich deutlich geringeren eingesetzten Dämmstärken.

Die daher auftretenden grösseren Oberflächen-Temperaturunterschiede im Bereich von Wärmebrücken stellen eine potentiell grosse Gefahr für Tauwasserausfall dar und führen damit in der Folge zu möglichem Schaden für Konstruktion und Gesundheit.

Von vielen Seiten wird daher ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmsystemen erhöhtes Augenmerk auf die Konstruktion und die damit verbundenen Wärmebrücken zu richten sei. Auch sei eine genaue Abschätzung dieser Aspekte in der Planungsphase durch thermische und hygrische Simulationen in vielen Fällen unumgänglich.²

Die Ursache dafür liegt wohl auch darin, dass die quantitativen Folgen von Wärmebrücken schwer

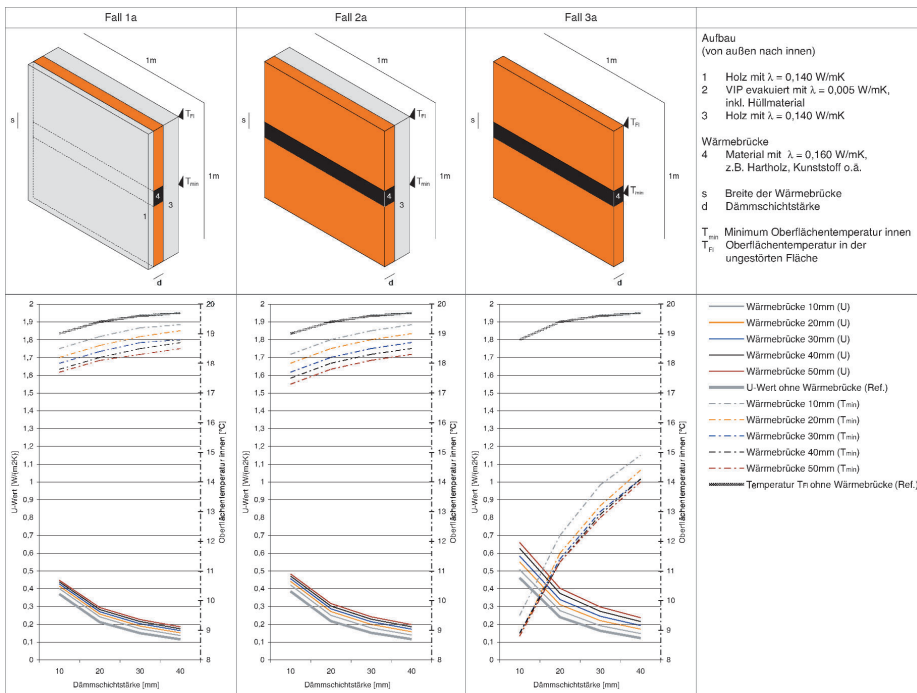
abschätzbar sind, da die resultierenden wirksamen Effekte ungleich komplexer sind als beispielsweise im Falle von ungestörten, schichtenartigen Wandaufbauten.

Die im Folgenden vorgestellte Untersuchung hatte daher zum Ziel, im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmsystemen auftretende lineare Wärmebrücken an variierten Beispielfällen zu quantifizieren und daraus allgemeinere Aussagen abzuleiten (und letztendlich dem Planer fundiertere Abschätzungen solcher Konstruktionen zu ermöglichen).

Insbesondere standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche Abhängigkeit besteht zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung und der Signifikanz der Wärmebrücke?
- Wie wirken sich Variationen von Dämmstärke und Wärmebrückenbreite aus?
- Wie machen sich zusätzliche Schichten, die ihrerseits wieder wärmedämmend und -verteilend und hinter bzw. hinter und vor der Dämmschicht angebracht sind, bemerkbar?
- Wie weit «stretet» die Wärmebrücke in Richtung Feldrand?
- Wie sind die Auswirkungen auf den Gesamt-U-Wert?

* Jan Cremers, Dipl.-Ing. Architekt
Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie
Prof. Thomas Herzog
D-München



2

■ Wie ändern sich die Oberflächentemperaturen innen auf der ungestörten Fläche und im Bereich der Wärmebrücken?

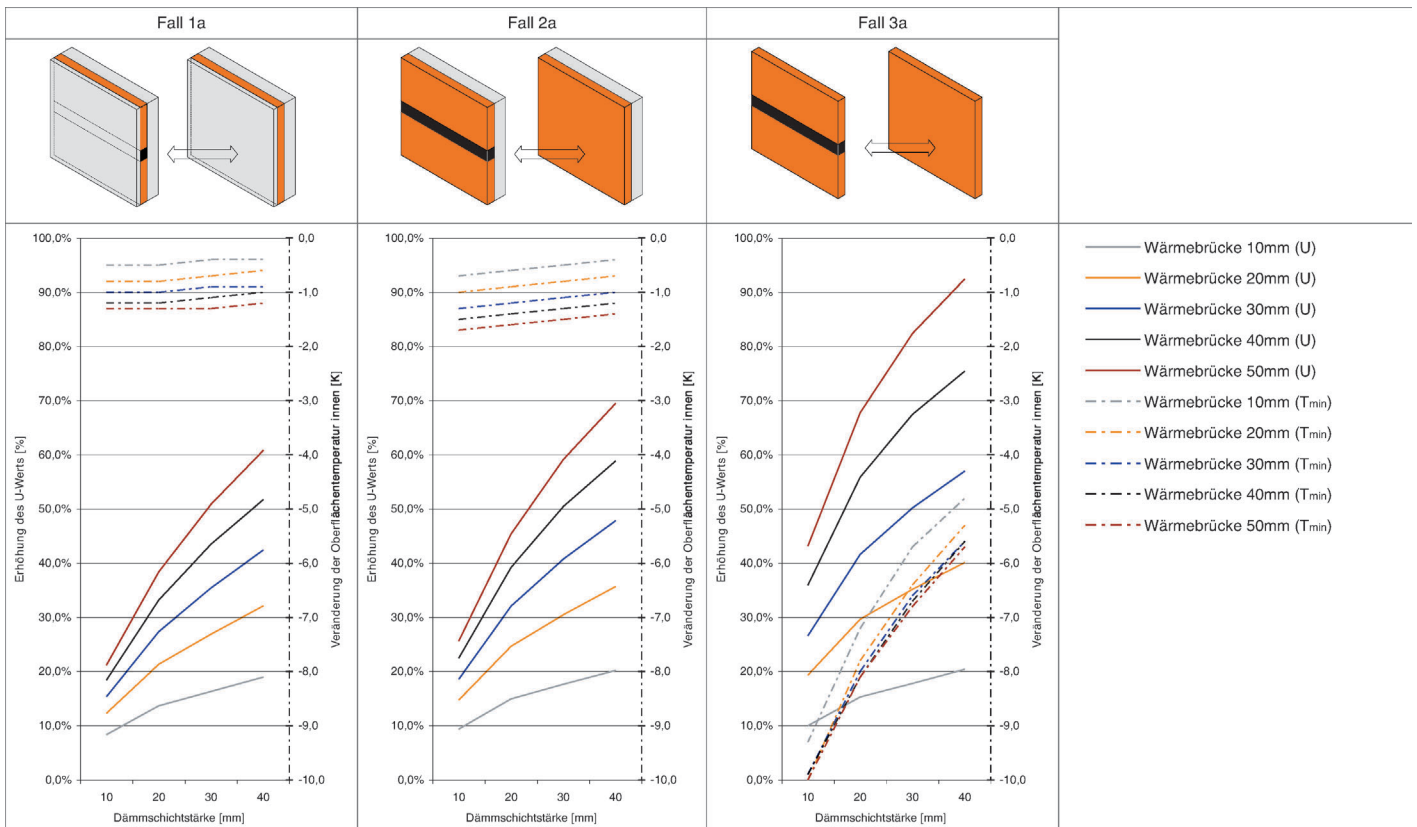
Punktartige Wärmebrücken, die natürlich auch Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen betreffen können, wurden hier aus mehreren Gründen nicht untersucht:

■ Wegen der üblichen plattenförmigen Gestalt von Vakuum-Dämmsystemen dürften sie in der Praxis bis auf weiteres deutlich weniger oft anzutreffen sein.

■ Die Simulation bedeutet einen ungleich höheren (und im Hinblick auf das Ziel der Untersuchung vermutlich unverhältnismässigen) Aufwand.

■ Es sind kaum parametrisierbare Szenarien vorstellbar, die darauf basierend allgemein verwertbare Aussagen zulassen würden.

Lineare Wärmebrücken ergeben sich bei der Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen, deren wesentliches Charakteristikum darin besteht, dass sie nicht durchdrungen werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn Schienensysteme eingesetzt werden, wie sie im Allgemeinen zur Befestigung aussenliegender Schalen oder Schichten benötigt werden, wenn diese nicht vollständig selbsttragend und stabilisiert sind.



3

Lineare Wärmebrücken ergeben sich darüber hinaus grundsätzlich auch unvermeidbar im Randbereich von Vakuum-Dämmsystemen, da alle bekannten und geeigneten Hüllmaterialien über eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die des evakuierten Dämmstoffs verfügen. Bei einigen Anwendungsbeispielen ist dieser Effekt signifikant, bei Vakuum-Isolationspaneelen der aktuellen Generation in der Regel jedoch (vor allem aufgrund der starken Reduzierung der Metallschichtstärken im Folienaufbau) von untergeordneter Bedeutung. Dennoch stellen die nach wie vor bestehende Uneinheitlichkeit sowie die Abhängigkeit des Randeffekts von der Formatwahl ein grosses Problem bei der Festlegung eines einheitlichen, genormten Rechenwerts für die Wärmeleitfähigkeit dar, wie er beispielsweise für eine bauaufsichtliche Zulassung benötigt wird.

Untersuchungsaufbau Geometrische Szenarien

Folgende Wandaufbauten liegen der Untersuchung zugrunde:

Ein Massivholzelement von 1 m x 1 m und 60 mm Stärke ist aussenseitig mit einem Vakuum-Dämmsystem versehen, das von einer horizontalen, linearen Wärmebrücke unterbrochen ist. Vor der

Dämmebene befindet sich in direktem Anschluss eine weitere Holzplatte von 15 mm (Fall 1, vergleiche Abbildung 1).

Für den zweiten Fall kommt der gleiche Aufbau, allerdings ohne äussere Holzplatte, zum Einsatz – eine einer hinterlüfteten Fassade vergleichbare Situation.

Der dritte Fall hat nur noch das Vakuum-Dämmsystem und die Wärmebrücke im Blick, die dann – ohne die innenliegende Massivholzplatte – voll zur Wirkung kommt.

Jeder dieser Fälle wird der Simulation einmal mit funktionstüchtigem, voll evakuiertem sowie mit schadhaftem, belüftetem Vakuum-Dämmsystem zugrunde gelegt.

Der Aufbau aller untersuchten Fälle ist in Abb. 2 oben grafisch veranschaulicht.

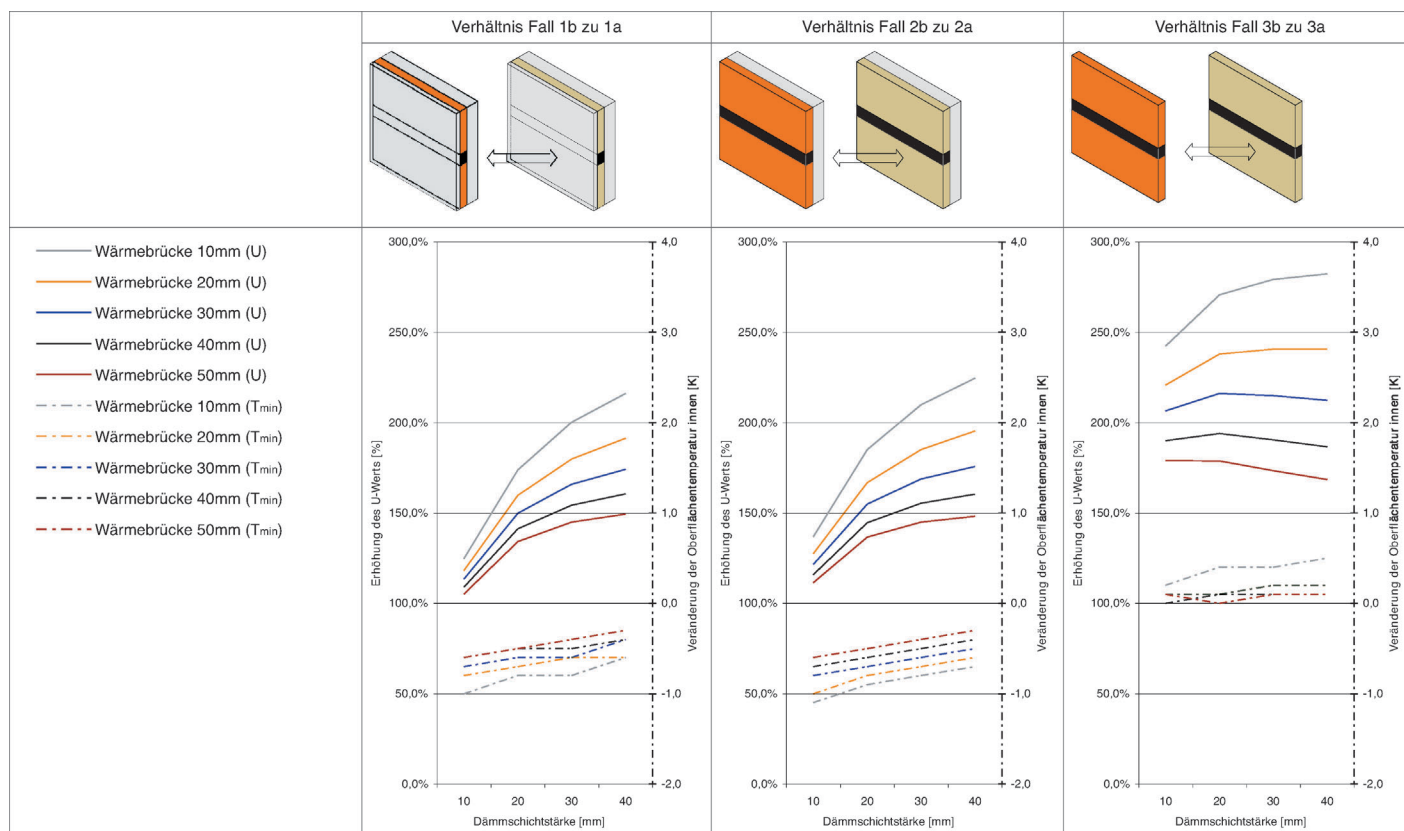
Um zu quantitativen Aussagen über die Einzelsituation hinaus zu gelangen, werden sowohl die Abmessungen der Wärmebrückenbreite zwischen den Massen 10 (entsprechend 1% der Gesamtfläche) und 50 mm (5% der Gesamtfläche) sowie die Stärke des Dämmsystems zwischen 10 und 40 mm (jeweils in Schritten von 10 mm) variiert.

Um verschiedene Wärmebrückenbreiten überhaupt sinnvoll untersuchen zu können, ist es erforderlich, dass die Wärmeleitfähigkeit des Wär-

mebrückenmaterials nicht zu hoch ist. Dies ist der Hauptgrund für den Ansatz der Wärmeleitfähigkeit von 0,160 W/m²K für das Wärmebrückenmaterial (also z.B. Hartholz, bestimmte Kunststoffe o.ä.). Wollte man eine entsprechende Untersuchung z.B. mit Wärmebrücken aus Aluminium durchführen, so wäre eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 221 W/m²K (ca. das 1400-fache!) zugrunde zu legen. Eine Varianz der Wärmebrückenbreite wäre dann im Mikrometerbereich anzusetzen sinnvoll gewesen, um die wirksamen Effekte aufzeigen zu können.

Die Festlegung der Grösse des betrachteten Ausschnitts von einem Quadratmeter hat den Vorteil, dass die flächenabhängigen Ergebnisgrössen (U-Wert und Wärmefluss) im Sinne der Veranschaulichung leicht in absolute Grössen umgedeutet werden können. Ausserdem stellt dieses Mass sicher, dass sich der Einfluss der Wärmebrücke in allen betrachteten Varianten nicht bis zum Rand erstreckt, die Minderung des U-Wertes durch die Wärmebrücke also vollumfänglich erfasst ist.

Insgesamt ergeben sich sechs betrachtete Fälle, die ihrerseits in insgesamt 20 (= 4 x 5) Varianten nebeneinandergestellt sind. Für jede der 120 Fallvarianten ist eine eigene Geometrieerstellung und ein eigener Simulationsdurchlauf notwen-



1 Modell des Wandaufbaus.

2 Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse für die drei Fälle mit funktionstüchtigem Vakuum-Dämmsystem.

3 Vergleich der drei Fälle mit funktionstüchtigem Vakuum-Dämmsystem zu den entsprechenden Referenzsituationen in grafischer Darstellung.

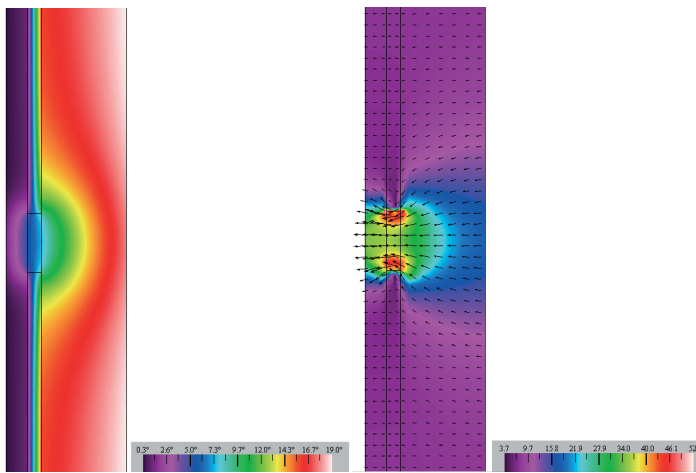
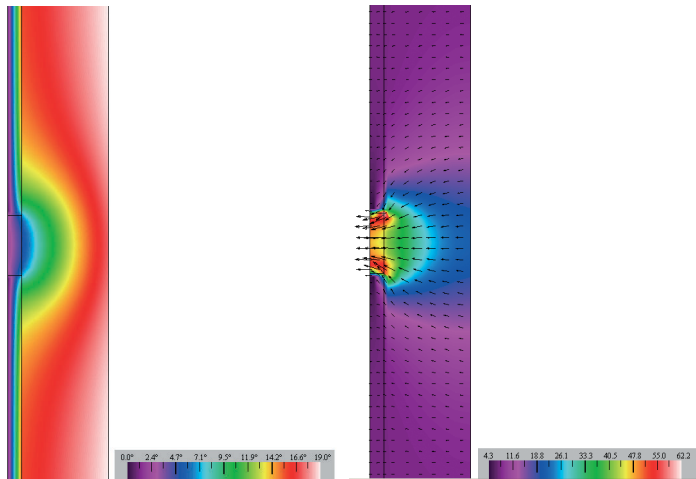
4 Vergleich der Fälle mit evakuiertem und belüftetem Vakuum-Dämmsystem untereinander, in grafischer Darstellung.

5 Fall 2a, $s = 50$ mm, $d = 10$ mm
Isothermische Darstellung, Legende in $^{\circ}\text{C}$

6 Fall 2a, $s = 50$ mm, $d = 10$ mm
Heat-Flux-Darstellung, Legende in $[\text{W}/\text{m}^2]$

7 Fall 1a, $s = 50$ mm, $d = 10$ mm
Isothermische Darstellung, Legende in $^{\circ}\text{C}$

8 Fall 1a, $s = 50$ mm, $d = 10$ mm
Heat-Flux-Darstellung, Legende in $[\text{W}/\text{m}^2]$



dig, da aus den oben angeführten Gründen eine ausreichend genaue Abschätzung nicht möglich ist.

Simulationstechnik

Um zu präzisen Aussagen über den Temperaturverlauf im Bauteil, die sich einstellenden Oberflächentemperaturen und die entsprechenden U-Werte zu gelangen, ist es erforderlich, ein FEM-basiertes Simulationswerkzeug heranzuziehen, da vereinfachende Verfahren die seitlichen Rand- und Streueffekte solcher Wärmebrücken nicht oder nur unzureichend erfassen können.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte ohne empirische Validierung nicht als abgesichert gelten können. Insbe-

sondere sind in der Praxis nahezu unvermeidbare, sich durch Ungenauigkeiten oder Toleranzen ergebende Luftspalten, die im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmungen stets selbst Wärmebrücken darstellen, in dem vereinfachten Aufbau nicht berücksichtigt. Die vergleichsweise simple geometrische Ausgangssituation lässt allerdings eine hohe Genauigkeit der absoluten Werte und insbesondere der relativen Verhältnisse der einzelnen Varianten untereinander erwarten.

Hinweise zu den Isothermen- und Heat-Flux-Darstellungen

Neben dem U-Wert, der von einer kontinuierlichen Ausdehnung des gezeichneten Schnittbil-

des in z-Richtung und einer senkrechten Projektion in y-Richtung (also nicht kantenlängenbezogen) ausgeht, liefert die Simulationssoftware³ als weiteres Ergebnis den Verlauf der Isothermen und des Wärmeflusses (Heat-Flux) durch das Bauteil. Für die grafische Darstellung wird das jeweils auftretende Temperatur- bzw. Wärmefluss-Spektrum auf die verfügbaren Farben aufgespreizt. Daher ist für die Interpretation die jeweils beigelegte Farblegende elementarer Bestandteil. Mit anderen Worten: Die Grössenzuordnung der einzelnen Farben ist in jeder Darstellung unterschiedlich.

Die Isothermendarstellung gibt neben dem Temperaturverlauf im Bauteil Auskunft über die zu erwartenden Oberflächentemperaturen. Zusammen mit einer entsprechenden Annahme von jeweils anzusetzender Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit liesse dies Aussagen über einen zu erwartenden Tauwasserausfall zu.

Angesetzte Materialkennwerte

Diese Untersuchung bemüht sich auf der einen Seite um möglichst allgemeingültige Aussagen, auf der anderen Seite ist es unumgänglich, ein ausreichend spezifisches Szenario zugrunde zu legen, um überhaupt quantitative und damit vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Dies stellt in gewisser Weise einen unlösbaren Konflikt dar, dem hier vor allem in der parallelen Betrachtung verschiedener Varianten begegnet werden soll.

Ähnliches gilt für die Festlegung der einzelnen Materialkennwerte, insbesondere der angesetzten Werte für die Wärmeleitfähigkeit, die der Darstellung in Abb. 2 zu entnehmen sind.

Ergebnisse

Ermittelte Werte

Für jede gerechnete Variante lieferte das Simulationsprogramm neben der genauen Temperatur- und Wärmeflussverteilung im Bauteil insbesondere folgende Resultate:

- U-Wert des betrachteten Ausschnitts
- Oberflächentemperatur auf der Innenseite im Bereich der Wärmebrücke (T_{min})
- Oberflächentemperatur auf der Innenseite im Bereich der ungestörten Fläche (T_{n})

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurde für jede Fallvariante und jede untersuchte Dämmschichtstärke eine entsprechende Referenzvariante ohne Wärmebrücke untersucht, jeweils aufgelistet und grafisch dargestellt. Auf diese Weise wird die jeweilige absolute Wirkung

der Wärmebrücke zusätzlich optisch deutlich. Die prozentuale (U-Wert-) und absolute (Oberflächentemperatur-)Veränderung ist grafisch in Abb. 2 visualisiert.

Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit wurden jeweils die Ergebnisse für den U-Wert und für die innere Oberflächentemperatur über der Wärmebrücke T_{\min} in ein Schaubild zusammengefasst.

In Abb. 3 ist der Vergleich zwischen den beiden untersuchten Vakuum-Dämmsystem-Varianten (evakuiert/belüftet) grafisch veranschaulicht.

Die Abb. 5 und 7 zeigen die durch die Simulation für jede Variante ermittelte Temperaturverteilung in Isothermendarstellung am Beispiel einer Variante ($s = 50$ mm, $d = 10$ mm, funktionstüchtiges Vakuum-Dämmsystem) auf, die Abb. 6 und 8 analog die Wärmeflussverteilung für dasselbe Beispiel.

Interpretation der Ergebnisse

...im Vergleich zur jeweiligen Referenzvariante

Alle im Folgenden vorgenommenen Interpretationen müssen sich grundsätzlich auf das hier untersuchte Szenario beschränken.

Abb. 3 veranschaulicht, dass die Veränderung (Erhöhung) des U-Wertes sich umso mehr bemerkbar macht, je stärker die Dämmschicht angesetzt wird und vor allem, je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes ist (Abb. 4). Dieser Effekt wird durch eine zunehmende Wärmebrückenbreite s nochmals deutlich gesteigert. Innerhalb der hier untersuchten Szenarien bildet der Fall 3a mit $s = 50$ mm und $d = 40$ mm das Maximum: Hier verdoppelt sich der U-Wert durch die Wärmebrücke nahezu.

Die relative Veränderung von T_{\min} ist weitgehend unabhängig von der Dämmschichtstärke d und jeweils von geringer Abweichung zwischen den betrachteten Wärmebrückenbreiten s , sobald mindestens eine weitere (dämmende) Schicht vorhanden ist (Fälle 1 und 2), gut zu sehen in Abb. 3. Ausserdem ist sie dann ungefähr proportional zur Wärmebrückenbreite.

Bei durchgehender Wärmebrücke (Fall 3) macht sich die Dämmschichtstärke d jedoch massiv bemerkbar. Für diesen Fall gilt ausserdem, dass die Temperatur T_{\min} bereits ab einer relativ geringen Wärmebrückenbreite nahezu ausschliesslich durch die Wärmeleitfähigkeit des Wärmebrückenmaterials bestimmt wird. Die Grenze liegt für das hier untersuchte Szenario in der Nähe von $s = 20$ mm.

...im Vergleich funktionsfähiger/ nicht funktionsfähiger Vakuum-Dämmsysteme

Neben den schon beschriebenen Effekten ist hier vor allem auffällig, dass die Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücken (T_{\min}) für geringe Dämmschichtstärken in den Fällen mit evakuierten Vakuum-Dämmsystemen relativ gesehen niedriger liegen als bei den schlechter gedämmten Fällen (mit belüfteten VIP).

Bei durchgehender Wärmebrücke (Fälle 3a und 3b) liegt T_{\min} für die Fälle mit funktionstüchtigen Dämmsystemen immer (leicht) unter den Vergleichswerten für defekte Systeme.

In den untersuchten Szenarien nimmt T_{\min} im Versagensfall der Vakuum-Dämmung niemals um mehr als 0,8 K ab. Dieser Maximalunterschied tritt im Fall 2 bei minimaler Wärmebrückenbreite (10 mm) und Dämmschichtstärke (10 mm) auf. Erwartungsgemäss verschlechtert sich allerdings der U-Wert drastisch. Die maximale Zunahme um ca. 280% ist hier im Fall 3 bei minimaler Wärmebrückenbreite (10 mm) und maximaler Dämmschichtstärke (40 mm) zu beobachten. Durch die «Abmilderung» des Effekts aufgrund zusätzlicher Schichten stellt der Fall 1 in der konträren Situation, also bei maximaler Wärmebrückenbreite (50 mm) und minimaler Dämmschichtstärke (10 mm) mit ca. 105% das Minimum an Zunahme dar, was allerdings immer noch dramatisch zu nennen ist.

Rückschlüsse aus den Isothermen- und Wärmefluss-Darstellungen

Die Isothermendarstellungen veranschaulichen den «Energie-Einzugsbereich» der Wärmebrücken, der die Wärmestromdichte-Maxima an den Wärmebrückenrändern (in den Heat-Flux-Darstellungen in den Abb. 6 und 8 farblich als auch in der Ballung der Pfeile sichtbar) zur Folge hat. Insbesondere die Heat-Flux-Darstellungen verdeutlichen, dass vereinfachende, abschätzende Verfahren ihre Grenzen haben müssen.

Weitere Verwendung der Ergebnisse

Neben einer rein thermischen Betrachtung sind hygrische Aspekte für die Beurteilung eines Wandaufbaus, vor allem im Hinblick auf potentielle Schäden, von grosser Bedeutung. Dies bezieht sich vor allem auf Kondensat an der inneren Oberfläche und auf Dampf oder ebenfalls (und potentiell kritischer, da unsichtbar) Kondensat im Inneren des Wandaufbaus; beides steht neben den Eigenschaften des Wandaufbaus in Zusammenhang mit der aussen und innen anlie-

genden relativen Luftfeuchtigkeit, dem Luftdruck und der Höhenlage des Objekts.

Daher sind hier auch keine verallgemeinernden Aussagen möglich. Zum Beispiel bildet für einen Luftdruck von 950 mbar, einer Höhenlage von 540 m ü.M., einer Raumtemperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit innen von 65% eine Innenoberflächentemperatur von 16 °C die Grenze, ab der mit Tauwasserausfall zu rechnen ist.⁴

Wichtig ist der Hinweis, dass nicht erst mit akutem Tauwasserausfall mit Beeinträchtigungen zu rechnen ist, sondern schon, je nach Einzelsituation, bei darüber liegenden Temperaturen ein die Schimmelpilzbildung begünstigendes Millieu entstehen kann mit entsprechenden ästhetischen und vor allem gesundheitlichen Folgen. Hier ist vor allem die Raumluftströmungssituation gemeint, die zum Beispiel dazu führen kann, dass Nischen oder Bereiche hinter Vorsprüngen deutlich geringeren konvektiven Effekten ausgesetzt sind, also grössere freie Wandbereiche. Wärmebrücken im Bereich von solchen Stellen sind also besonders kritisch.

Der Autor ist Architekt und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog und beschäftigt sich derzeit im Rahmen eines Promotionsvorhabens mit dem Thema der architektonischen Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle.

Anmerkungen

- [1.] vergl. Bundi, Reto: Vakuumisolierte Paneele, in Fassade 3/2003, S. 19–22
- [2.] vergl. Cremers, Jan: Vakuum-Dämmsysteme – Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise in DETAIL, Zeitschrift für Architektur + Baudetail, 2005-5, S. 522–525, sowie allgemein: www.vip-bau.de und www.vip-bau.ch
- [3.] FEM-Simulationssoftware: THERM 5.2 (Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL, San Francisco, USA)
- [4.] vergl. h,x-Diagramm nach Mollier, z.B. in Zürcher/Frank: Bauphysik. Stuttgart: B. G. Teubner, 1998, S. 185