Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 93 (1975)
Heft: 44

Artikel: Die Berechnung von Wärmebrücken
Autor: Frei, Oskar
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72858

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Erfahrungsaustausch auf internationaler Ebene

An den meisten der erwähnten Vorhaben ist Sulzer durch Studien oder Lieferungen massgebend beteiligt. Deren Kunden profitieren dabei vom Erfahrungsaustausch, den Sulzer in allen technischen und wirtschaftlichen Fragen auf internationaler Ebene pflegt.

An einer kürzlich abgehaltenen Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Fernwärme (AGFW), in welcher Sulzer-Fachleute als Mitglieder beteiligt sind, wurden aktuelle Fragen über den Stand und die Entwicklung der Fernwärmeversorgung in Deutschland eingehend studiert. Allgemein herrscht Übereinstimmung, dass sich die Fernheizung – nicht zuletzt dank Förderung durch die Bundesregierung – weiterhin stark entwickeln wird. Fachleute rechnen damit, dass sich der Anteil der Fernwärme an der Deckung des Wärmebedarfes für Raumheizung und Warmwasserbereitung von gegenwärtig rund 6% schon bis 1980 verdoppeln wird. Die Grundlastdeckung aus nuklearen Heizkraftwerken wir zurzeit für verschiedene Ballungsgebiete ernsthaft studiert[2]).

[2]) Die AGFW bei der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke wurde im Jahre 1971 zur Förderung des Wirtschaftszweiges Fernwärme gegründet. Mitglieder sind Fernwärmeversorgungsunternehmen und anerkannte Fachleute auf dem Gebiet der Fernwärmeversorgung. Die AGFW beschäftigt sich mit Grundsatzfragen der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung, sowie der Möglichkeit kostengünstigerer Erzeugung und Verteilung der Fernwärme.

Die Berechnung von «Wärmebrücken»

Von **O. Frei**, Guntershausen

DK 697.133

Einleitung

Unter dem Begriff «Wärmebrücken» versteht man in der Bauphysik Teile der Konstruktion, die eine höhere Wärmeleitfähigkeit, d.h. einen geringeren Wärmedämmwert als die benachbarten, seitlich zur Wärmeflussrichtung liegenden Bauteile aufweisen. Sie bieten der abfliessenden Wärme einen geringeren Widerstand, also eine «Brücke» zur kälteren Seite hin (vgl. Bild 1).

In der Praxis vorkommende «Wärmebrücken» sind beispielsweise:

- Sandwichwand, wo die äussere Schale über eine zwischenliegende Dämmschicht mit der inneren, tragenden Schale mit Stahlankern, Schwerbetonstegen usw. befestigt wird
- Unterbruch einer gut dämmenden Deckenkonstruktion durch durchgehende Balken
- Fenster und Türen
- Gebäudeecken oder hervorkragende Bauteile (hier sei auf die zahlreich vorhandene Literatur verwiesen: [2, 3, 4, 5]).

Der geringere Wärmedämmwert solcher «Wärmebrükken» hat zwei Auswirkungen zur Folge:

1. Erniedrigung der Oberflächentemperatur auf der warmen Seite einer Aussenwand (bzw. Aussendecke), was unter Umständen zu Tauwasserbildung führen kann.
2. Verringerung des mittleren Wärmedämmwertes der betreffenden Aussenwand (bzw. Aussendecke), d.h. erhöhte mittlere Wärmedurchgangszahl oder grösserer Wärmeverlust.

Während die zuverlässige Ermittlung der Oberflächentemperatur, besonders bei «Wärmebrücken» geringer Ausdehnung, nur digital oder messtechnisch möglich ist, kann die mittlere Wärmedurchgangszahl einer mit «Wärmebrücken» versehenen Konstruktion analytisch mit guter Genauigkeit berechnet werden.

Das Ergebnis der im folgenden beschriebenen Rechenmethode wurde mit dem Ergebnis einer ausführlichen digitalen Rechnung verglichen und sehr gute Übereinstimmung gefunden. Im weiteren wird dieses Vorgehen mit Rechenempfehlungen anderer Arbeiten ([1], [2]) verglichen. Dabei stellt sich heraus, dass die aufgrund bisher üblicher Rechenarten erhaltenen Resultate für Extremfälle («Wärmebrücken» sehr hoher Wärmeleitfähigkeit) allzu pessimistisch sind. Die oft auch in Fachkreisen verbreitete Ansicht, dass eine noch so kleine «Wärmebrücke» hoher Wärmeleitfähigkeit den mittleren Wärmedämmwert einer Konstruktion merklich herabsetzen kann, wird durch die durchgeführte Untersuchung nicht bestätigt.

Berechnung der mittleren Wärmestromdichte und der mittleren Wärmedurchgangszahl

Analytische Berechnung

Die Wärmebrücke (Bild 1) wird ideell vom übrigen Bauteil als völlig isoliert betrachtet; für die beiden Komponenten wird der Wärmedurchgang getrennt berechnet. Dieser Überlegung liegt die Annahme zugrunde, dass die vom besser isolierenden Bauteil I auf der warmen Seite in die «Wärmebrücke» II einströmende Wärmemenge durch die auf der kalten Seite von II nach I abströmende Wärmemenge kompensiert wird. Dies bestätigt auch das mit dem Digitalcomputer ermittelte Ergebnis und die erhaltene Temperaturverteilung (Bild 4). Der Wärmestrom $\dot{Q}$ wird wie folgt berechnet:

$$(1) \qquad \dot{Q} = (A_I k_I + A_{II} k_{II})\,(T_i - T_a)$$

Für die mittlere Wärmestromdichte q lässt sich dann schreiben:

$$(2) \qquad \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \left(\frac{A_I}{A}\,k_I + \frac{A_{II}}{A}\,k_{II}\right)(T_i - T_a), \text{ wobei}$$

$$(3) \qquad k_I = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_I} + \frac{1}{\alpha_a}$$

$$(4) \qquad k_{II} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_{II}} + \frac{1}{\alpha_a}$$

Aus Gl. (2) folgt für die mittlere Wärmedurchgangszahl k_m:

$$(5) \qquad k_m = \frac{\dot{q}}{T_i - T_a} = \frac{A_I}{A}\,k_I + \frac{A_{II}}{A}\,k_{II}$$

Die mittlere Wärmedurchgangszahl berechnet sich als flächenmässig gewichtetes Mittel der Wärmedurchgangszahlen k_I und k_{II} der einzelnen Komponenten.

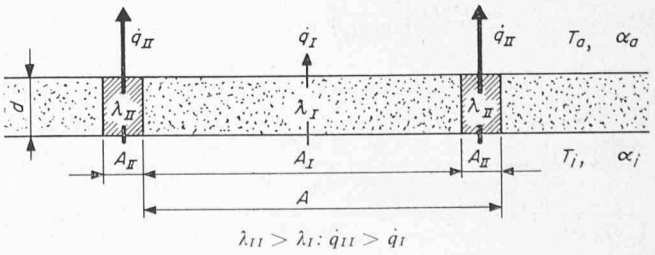

Bild 1. Wärmebrücke

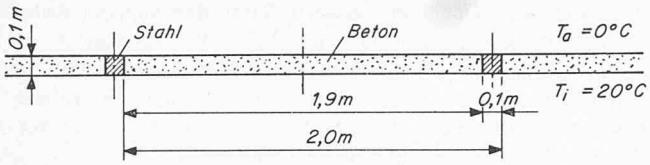

Bild 2. Rechenbeispiel

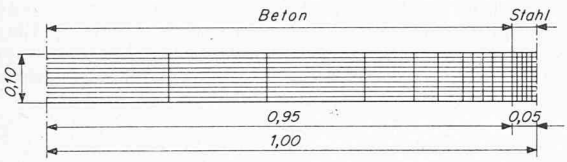

Bild 3. Diskretisierter Ausschnitt

Digitale Berechnung und Vergleich der Ergebnisse mit der analytischen Berechnung

Die Temperaturverteilung und der Wärmedurchgang wird für das folgende Beispiel digital durchgerechnet:

Wärmeübergang aussen: $\alpha_a = 20 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right) = 23{,}2 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\,°}\right)$

Wärmeübergang innen: $\alpha_i = 6{,}7 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right) = 7{,}8 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\,°}\right)$

Wärmeleitfähigkeit Beton: $\lambda_B = 1{,}0 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{mh}\,°}\right) = 1{,}16 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}\,°}\right)$

Wärmeleitfähigkeit Stahl: $\lambda_S = 30 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{mh}\,°}\right) = 34{,}8 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}\,°}\right)$

Flächenverhältnis Beton: $A_B/A = 19/20$

Flächenverhältnis Stahl: $A_S/A = 1/20$

Wandstärke: $d = 0{,}1$ (m)

Da das Problem der bezüglich in Bild 2 eingezeichneten Achsen (–·–·–) symmetrisch ist, kann sich die Berechnung auf den Abschnitt zwischen den beiden Symmetrieachsen beschränken. Für die Computerrechnung wird dieser Abschnitt in einzelne, kleine Rechtecke unterteilt (Bild 3). Das Programm ([6]) löst iterativ die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung von jeder Rechteckzelle zu ihren benachbarten Zellen unter Berücksichtigung der eingegebenen Randbedingungen. Als Ergebnis der Digitalrechnung wird die Temperaturverteilung (Bild 4) und der abfliessende Wärmestrom erhalten. Die digitale Berechnung der mittleren Wärmestromdichte ergibt dabei folgenden Wert:

$$\dot{q} = 69{,}6 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}}\right) = 80{,}8 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$$

Vergleichsweise dazu liefert die analytische Rechnung nach Gl. (5) folgende Ergebnisse:

$$(3) \quad \frac{1}{k_B} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_B} + \frac{1}{\alpha_a} = 0{,}149 + 0{,}1 + 0{,}05 = 0{,}299 \left(\frac{\text{m}^2\text{h}\,°}{\text{kcal}}\right)$$

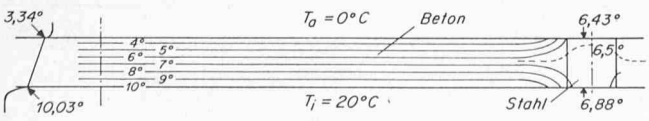

Bild 4. Temperaturverteilung

$$(4) \quad \frac{1}{k_S} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_S} + \frac{1}{\alpha_a} = 0{,}149 + 0{,}0033 + 0{,}05 = 0{,}202 \left(\frac{\text{m}^2\text{h}\,°}{\text{kcal}}\right)$$

$$\rightarrow k_B = 3{,}34 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right) \quad k_S = 4{,}95 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right)$$

$$(5) \quad k_m = \frac{A_B}{A} k_B + \frac{A_S}{A} k_S = 3{,}173 + 0{,}2475 = 3{,}42 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right) = 3{,}97 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\,°}\right)$$

Damit wird die mittlere Wärmestromdichte $\dot{q}$:

$$\dot{q} = k_m (T_i - T_a) = 3{,}42 \cdot 20 = 68{,}2 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}}\right) = 79{,}4 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$$

Die Abweichung von 1,8% gegenüber der Computerrechnung kann als sehr gering, d.h. die Übereinstimmung der analytischen mit der numerischen Rechnung als gut bezeichnet werden.

Demgegenüber erhält man mit der in [1] und [2] zitierten Rechenmethode bedeutende Abweichungen:

$$(6) \quad \frac{1}{k_m} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\frac{A_I}{A}\frac{\lambda_I}{d} + \frac{A_{II}}{A}\frac{\lambda_{II}}{d}} + \frac{1}{\alpha_a}$$

Für das vorliegende Beispiel würde nach Gl. (6):

$$k_m = 4{,}17 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}\,°}\right) = 4{,}84 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\,°}\right)$$

Dies entspricht einer Überschätzung des Wärmedurchganges von 20%. Die Ursache der Abweichung liegt in der in Gl. (6) getroffenen Annahme, dass die Oberflächentemperaturen bei beiden Teilen I und II gleich sind, was nach Bild 4 bei weitem nicht der Fall ist. Durch Messungen ist man auf die Unzuverlässigkeit der nach Gl. (6) erhaltenen Ergebnisse aufmerksam geworden, ohne aber die Rechenmethode zu revidieren. Diesem Umstand ist bei der Normung nach DIN 4108,8.2 nur insofern Rechnung getragen worden, dass nach Gl. (6) gerechnet werden kann, solange das Verhältnis λ_I/d: λ_{II}/d höchstens 1:5 beträgt. Innerhalb dieser Grenze sind die Abweichungen der Ergebnisse nach Gl. (6) unwesentlich. Eine derartige Beschränkung der analytischen Berechnung ist nach Gl. (5) unnötig, wie das durchgerechnete Beispiel zeigt. Zudem kann damit der Kostenaufwand einer Messung erspart werden.

Besonders extrem werden die Diskrepanzen zwischen Gl. (5) und Gl. (6) bei stark unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Teile I und II, auch wenn die «Wärmebrücke» flächenanteilmässig kaum ins Gewicht fällt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1. Beispiel einer mit Metallankern durchdrungenen Wärmedämmschicht

$\frac{A_I}{A}$	$\frac{A_{II}}{A}$	λ_I	λ_{II}	d (m)	k_I	k_{II}	k_m Gl. (6)	k_m Gl. (5)
0,9993	0,0007	0,04	40	0,05	0,69	4,98	1,068	0,6935

Das Beispiel zeigt deutlich, dass durch die geringe Ausdehnung der «Wärmebrücke» die mittlere Wärmedurchgangszahl k_m [Gl. (5)] nur unmerklich höher als diejenige der ungestörten Schicht liegt.

Temperaturverteilung

Berechnet man im Beispiel nach Bild 2 die Temperaturverteilung elementar, d.h. die beiden Komponenten werden getrennt als ebene Wand berechnet, so erhält man für die Oberflächentemperaturen:

Beton:

$$(7) \quad T_{Wi} = T_i - \frac{k_B (T_i - T_a)}{\alpha_i} = 20 - \frac{3{,}34 \cdot 20}{6{,}7} = 10{,}03\ (^\circ\mathrm{C})$$

$$(8) \quad T_{Wa} = T_a + \frac{k_B (T_i - T_a)}{\alpha_a} = 0 + \frac{3{,}34 \cdot 20}{20} = 3{,}34\ (^\circ\mathrm{C})$$

Stahl:

$$(7') \quad T_{Wi} = T_i - \frac{k_S (T_i - T_a)}{\alpha_i} = 20 - \frac{4{,}95 \cdot 20}{6{,}7} = 5{,}22\ (^\circ\mathrm{C})$$

$$(8') \quad T_{Wa} = T_a + \frac{k_S (T_i - T_a)}{\alpha_a} = 0 + \frac{4{,}95 \cdot 20}{20} = 4{,}95\ (^\circ\mathrm{C})$$

Ein Vergleich mit der digital gerechneten Temperaturverteilung (Bild 4) zeigt, dass der Temperaturverlauf in der Betonwand ab einer Entfernung von etwa einer Wandstärke von der «Wärmebrücke» demjenigen der ebenen Wand entspricht. In der Nähe der «Wärmebrücke» wird die Betontemperatur von der tieferen Temperatur des Stahles beeinflusst, während diese, verglichen mit dem Temperaturverlauf der ebenen Wand, im Mittel um rund 1,5°C höher liegt, also von der Betonwand erwärmt wird. Bemerkenswert ist, dass auch deren Oberflächentemperaturen dadurch etwas höher liegen (rund 1,6 °C) als dies die elementare Rechnung erwarten lässt.

Während die Rechenmethode für die mittlere Wärmedurchgangszahl k_m und die mittlere Wärmestromdichte $\dot{q}$ nach Gl. (5) allgemein angewendet werden kann, können die Ergebnisse für die Temperaturverteilung nur qualitativ auf andere Anordnungen übertragen werden.

Für die Beurteilung der Gefahr der Tauwasserbildung auf der warmen Seite einer «Wärmebrücke» wird die elementare Berechnung der Oberflächentemperatur nach Gl. (7') empfohlen. Wie der Vergleich mit dem Ergebnis nach Bild 4 zeigt, liegt man damit jedenfalls auf der sicheren Seite. Um aber eine genauere Aussage über die Möglichkeit der Tauwasserbildung machen zu können, ist man entweder auf eine numerische Berechnung mit dem Computer oder auf Messungen angewiesen.

Verwendete Symbole und Definitionen

$\dot{Q}$	$\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{h}}, \mathrm{W}\right)$	Wärmestrom
$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$	$\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{m^2 h}}, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}\right)$	Wärmestromdichte
A	$(\mathrm{m^2})$	Fläche
d	(m)	Wandstärke
$k = \frac{q}{T_i - T_a}$	$\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{m^2 h\,^\circ}}, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,^\circ}}\right)$	Wärmedurchgangszahl
α	$\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{m^2 h\,^\circ}}, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2\,^\circ}}\right)$	Wärmeübergangszahl
λ	$\left(\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{m h\,^\circ}}, \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m\,^\circ}}\right)$	Wärmeleitfähigkeit
T	$(^\circ\mathrm{C})$	Temperatur

Indices:				
	i	innen	a	aussen
	I	Teil I	II	Teil II
	B	Beton	S	Stahl
	Wi	Wand innen	Wa	Wand aussen
	m	mittel		

Literaturverzeichnis

[1] *Gösele, Schüle:* Schall, Wärme, Feuchtigkeit. Grundlagen, Erfahrungen und praktische Hinweise für den Hochbau. Zweite überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden/Berlin 1972, Bauverlag GmbH.

[2] *F. Eichler:* Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 1, Berechnungsgrundlagen. Zweite verbesserte Auflage. Berlin 1969, VEB Verlag für Bauwesen.

[3] *E. Amrein:* Element 12, Wärmeisolation. Zürich 1965, VSZS Verband Schweizerischer Ziegel- und Steinfabrikanten.

[4] *H. Kuenzel:* Der Wärmeschutz von Ecken «Gesundheits-Ingenieur», Heft 10/1961, S. 297.

[5] *H. Kuenzel:* Die Wärmebrücken – Wirkung von Ecken in Bauwerken «Boden, Wand + Decke», Heft 12/1963, S. 754.

[6] *P. Bremi:* Berechnung stationärer und instationärer Temperaturfelder mit Hilfe elektronischer Rechenautomaten. Technische Rundschau SULZER – Forschungsheft 1970.

Adresse des Verfassers: *Oskar Frei*, dipl. Masch.-Ing. ETH, Sonnhalde, 8357 Guntershausen.

Kunststoff-Verbundverbau

Neues Ausbausystem für Hohlräume und Baugruben

Von Dr. **E. Rotter** und Dr. **H. Habenicht**, Salzburg

DK 691.175

Aus den Erkenntnissen über das Gebirgsverhalten im Zuge der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise und das Werkstoffverhalten der herkömmlichen Ausbaumittel wurde das Erfordernis abgeleitet, Werkstoffe mit besser variierbaren Eigenschaften einzusetzen, damit den Reaktionsweisen des Gebirges besser entsprochen werden kann. Als Lösung hierzu werden Kunststoffe herangezogen, deren Eigenschaften und Wirkungsweise am ehesten geeignet erscheinen. Vor allem weisen sie bei hoher Festigkeit einen weiteren Bereich der Verformbarkeit auf und erlauben somit grössere Deformationen des Gebirges, welche ihrerseits die Gebirgsspannungen weiter senken. Somit scheint es möglich, den Gebirgstragring auch in schwächeren Gebirgsqualitäten noch wirkungsvoll entwickeln zu können. Die in Betracht gezogene Ausführungsform hat die Gestalt des patentrechtlich geschützten Kunststoff-Verbundverbaues. Dieser besteht aus einem Verbund von Kunststoffankern und einer Kunststoffbeschichtung. In betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht bringt der Kunststoff-Verbundverbau Verbesserungen durch Einfachheit, Schnelligkeit, Betriebskonzentration und Ersparnis baulicher Massnahmen.