

Die Gebäudehülle als Wärmebrücke

Klaus Kreč, Büro für Bauphysik, A-3562 Schönberg am Kamp, Veltlinerstr. 9,
Österreich

1 Einleitung

Die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle beeinflussen die im Inneren des Gebäudes zur Einhaltung einer Soll-Temperatur erforderliche Heizleistung nachhaltig. Die Planung von Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf ist immer mit der Forderung einer Optimierung der Gebäudehülle in Hinblick auf die Reduktion der zu erwartenden Transmissionswärmeverluste verknüpft. Dies gilt auch für „sonnen- gestützte Häuser“, also für Gebäudeentwürfe, deren primäres Planungsziel eine möglichst gute Ausnutzung der Energie der auf das Gebäude einfallenden Sonnenstrahlung zwecks Reduzierung der erforderlichen Heizenergie ist.

Um die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle erfolgreich optimieren zu können, bedarf es planungsbegleitender Berechnungen. Die hierzu verwendeten Hilfsmittel sind Computerprogramme, die es gestatten sowohl das thermische Verhalten einzelner Teile der Gebäudehülle als auch das thermische Verhalten des gesamten Gebäudes in Abhängigkeit von der Planungsvariante vorher zu sagen. Für die Entwickler solcher Programme sind die Anforderungen insofern besonders hoch, als einerseits die physikalische Modellierung detailliert genug sein muss, um Ergebnisse in solch' einem Grad an Genauigkeit zu erhalten, daß sie dem Anspruch an eine hohe Planungssicherheit gerecht werden können. Andererseits muss bedacht werden, daß Überlegungen in Hinblick auf die Optimierung der thermischen Qualität des Gebäudes in frühen Planungsphasen besonders effektiv sind. Zielgruppe für Programme zur Beurteilung der thermischen Qualität von Baukonstruktionen und Gebäuden sollte aus diesem Grunde in erster Linie die Gruppe der PlanerInnen selbst sein und erst in zweiter Linie jene der Spezialfachleute wie z. B. BauphysikerInnen oder HaustechnikerInnen.

Die Beschreibung des Transmissionswärmeverlustes eines Bauteils ist nur bei Verwendung eines thermisch eindimensionalen Modells der Handrechnung zugänglich. Die Erfahrung mit diesen einfachen Berechnungsmethoden zeigte bei nicht oder nur wenig wärmedämmten Gebäuden eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen berechnetem „Bedarfs-Wert“ und gemessenen „Verbrauchs-Werten“, sofern bei der Flächenermittlung auf Außenmaße zurückgegriffen wurde. Mit steigendem Anspruch an die thermische Qualität des Gebäudes wird jedoch das Rechnen mit eindimensionalen Modellen zunehmend ungenauer. Grund für diesen Trend sind mehrdimensional ablaufende Wärmetransportvorgänge, deren Auswirkung auf die Transmissionswärmeverluste der gesamten Gebäudehülle mit besser werdender

Wärmedämmung stark ansteigt. Bei Gebäuden, deren Wärmedämmung den heute gültigen Bauordnungen und Verordnungen entspricht, ist die eindimensionale Rechnung bereits so ungenau, daß die erforderliche Planungssicherheit nicht mehr gegeben ist. Bei Passivhäusern mit ihren extrem hohen Ansprüchen an die Planungssicherheit ist das Erfassen von mehrdimensional ablaufenden Wärmeleitungsvorgängen – eine Thematik, die gerne unter dem Schlagwort „Wärmebrücken“ zusammengefasst wird – zu einem zentralen Punkt der Bauplanung geworden.

Das Erfassen des thermischen Verhaltens von Wärmebrücken ist bei allen für die Baupraxis relevanten Fragestellungen nur mit dem Einsatz numerischer Methoden unter Zugriff auf sogenannten „Wärmebrücken-Programme“ möglich. Obzwar mittlerweile eine Vielzahl solcher Programme existiert und am Markt angeboten wird, besteht die Problematik, daß die Handhabung der meisten dieser Programme für den Planer zu aufwendig ist. Aus diesem Grund werden Wärmebrückenberechnungen nach wie vor von Spezialfachleuten oder aber überhaupt nicht durchgeführt. Auch auf dem Gebiet der Planung von Passivhäusern findet eine planungsbegleitend durchgeführte rechnerische Optimierung der thermischen Eigenschaften von Bauteilanschlüssen nicht generell statt. Die Praxis, auf „passivhaustaugliche“ Komponenten zuzugreifen, bringt zwar die erforderliche Planungssicherheit mit sich. Die wünschenswerte Förderung innovativer Planungslösungen wird auf diese Weise jedoch nicht unterstützt.

Im Folgenden wird zunächst der wissenschaftliche Hintergrund und die normative Lage in Hinblick auf die Erfassung mehrdimensionaler Wärmeleitungsvorgänge kurz dargelegt und der derzeitige Stand der Technik bezüglich der angebotenen Wärmebrückenprogramme analysiert. Schließlich wird die Richtung einer gleichermaßen wünschenswerten wie auch notwendigen Weiterentwicklung auf dem Gebiet der thermischen Modellierung skizziert.

2 Das Konzept der thermischen Leitwerte

Die Beschreibung des Wärmedurchganges durch Baukonstruktionen infolge von Wärmeleitung erfordert die Aufstellung und Lösung der Wärmeleitungsgleichung, wobei die Beschreibung von Temperaturfeldern und Wärmeströmen im Normalfall die Verwendung aller drei räumlichen Koordinaten erfordert. In diesem Fall wird gerne von „dreidimensionaler Wärmeleitung“ gesprochen.

Wird in Betracht gezogen, daß die thermischen Vorgänge in der Gesamtheit aller das Gebäude bildenden Bauteile und Baukonstruktionen im Sinne einer möglichst genauen Modellierung von Interesse sind, so stellt die Aufstellung und Lösung der Wärmeleitungsgleichung eine äußerst komplexe Aufgabe dar. Selbst die gerne vorgenommene Beschränkung auf die Beschreibung der thermischen Vorgänge in der Gebäudehülle vereinfacht die Komplexität der Aufgabenstellung nur unwesentlich.

Im Buch „Wärmebrücken“ [Heindl et al., 1987] wird aus der Wärmeleitungsgleichung ein physikalisches Modell zur Beschreibung von Wärmetransportvorgängen in Gebäuden abgeleitet, das weder Einschränkungen in Hinblick auf die Form und die Materialzusammensetzung der Bauteile / des Gebäudes noch eine Begrenzung der Anzahl der Räume des Gebäudes vorsieht.

Durch gezielte Linearisierung der Wärmeleitungsgleichung erweist sich das entwickelte theoretische Konzept – das Konzept der thermischen Leitwerte – als gut handhabbar und führt auf verblüffend einfache Zusammenhänge. Natürlich wird die Einfachheit der Darstellung der grundsätzlich sehr komplexen Vorgänge durch die Einführung vereinfachender Annahmen erkaufte. Es sind dies die Annahme, daß Materialkenngrößen und Abmessungen temperaturunabhängig sind, das Ansetzen ortsunabhängiger Temperaturwerte für die einzelnen Räume des Gebäudes und das Festhalten am Konzept der Wärmeübergangskoeffizienten. Die genannten vereinfachenden Annahmen erweisen sich in der überwiegenden Zahl der in der Planungspraxis auftretenden Fragestellungen als zulässig und beeinträchtigen die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses nur unwesentlich.

Eines der Ergebnisse des skizzierten physikalischen Konzeptes ist die Aussage, daß der Wärmeverlust Φ_i eines Raumes i proportional zu den Lufttemperaturen Θ_j aller an die betrachtete Baukonstruktion angrenzenden Räume ist:

$$\Phi_i = - \sum_{j=0}^N L_{i,j} \cdot \Theta_j \quad . \quad (1)$$

Im Falle, daß die betrachtete Baukonstruktion mit dem Gebäude identisch ist, ist die Summe auf der rechten Seite von Gleichung (1) über sämtliche Innenräume – auch den interessierenden Raum i - und den Außenraum, d.h. die äußere Umgebung des Gebäudes, zu erstrecken.

Als Proportionalitätsfaktoren treten in Gleichung (1) die thermischen Leitwerte $L_{i,j}$ auf. Aus Gründen der Energieerhaltung muss im stationären Fall die Summe der Leitwerte $\sum_{j=0}^N L_{i,j}$ den Wert 1 annehmen. Dieser Umstand führt unmittelbar zu einer eher gewohnten Schreibweise von Gleichung (1):

$$\Phi_i = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N L_{i,j} \cdot (\Theta_i - \Theta_j) \quad . \quad (2)$$

Es stellt sich also heraus, daß die Wärmeverluste eines Raumes proportional zu den Differenzen der Lufttemperaturen zwischen betrachtetem Raum und den benachbarten Innen- und Außenräumen sind. Proportionalitätsfaktoren sind wiederum die thermischen Leitwerte. Wichtig ist es anzumerken, daß die thermischen Leitwerte unabhängig von den Randbedingungen, d. h. den Temperaturen der an die Konstruktion bzw. das Gebäude angrenzenden Innen- und Außenräume sind und sich

somit bestens als Kenngröße für die Baukonstruktion bzw. das Gebäude eignen. Diesem Umstand wurde bereits dadurch Rechnung getragen, daß das Leitwert-Konzept in der internationalen „Wärmebrückennorm“ EN ISO 10211-1:1996 verankert wurde.

Wird nun auf die allgemeine Beschreibung der Wärmeströme im Gebäude verzichtet und das Augenmerk – wie zumeist üblich – auf die Wärmeverluste durch die Gebäudehülle gelegt, so vereinfacht sich Gleichung (2) zu

$$\Phi = L_{i,e} \cdot (\Theta_i - \Theta_e) \quad (3)$$

Die Wärmeverlustleistung Φ des Gebäudes erweist sich somit proportional zur Differenz aus Innenlufttemperatur Θ_i und Außenlufttemperatur Θ_e . $L_{i,e}$ ist der thermische Leitwert der Gebäudehülle. Bei Kenntnis des thermischen Leitwertes $L_{i,e}$ zwischen Gebäudeinnerem und außen kann somit der Wärmeverlust für beliebige Kombinationen aus Innen- und Außenlufttemperaturen gemäß Gleichung (3) per Hand errechnet werden.

Die zentrale Thematik der folgenden Ausführungen ist das Aufzeigen und Diskutieren von Möglichkeiten der Berechnung des thermischen Leitwertes der Gebäudehülle und ein kritisches Hinterfragen der hierfür üblicherweise verwendeten Praxis. Die internationale Norm EN ISO 10211-1 läßt für die Berechnung des thermischen Leitwertes zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren zu – das „indirekte“ und das „direkte“ Verfahren. Die Vor- und Nachteile dieser beiden Verfahren werden in den folgenden beiden Abschnitten analysiert.

3 Das indirekte Verfahren

Die Berechnung des Einflusses der Wärmebrücken in der Gebäudehülle auf die Transmissionswärmeverluste erfolgt heute faktisch generell nach dem „indirekten Verfahren“ der EN ISO 10211-1. Ausgangspunkt dieses Verfahrens ist die althergebrachte Methode der händischen Berechnung des Gesamtleitwertes der Gebäudehülle unter Zugrundelegung eines thermisch eindimensionalen Modells. Durch Multiplikation von Wärmedurchgangskoeffizienten – sogenannten „U-Werten“ – und den zugehörigen Bauteilflächen werden vorerst Teil-Leitwerte ermittelt. Durch Aufsummieren aller Teil-Leitwerte der Gebäudehülle wird schließlich der Gesamtleitwert in eindimensionaler Näherung errechnet.

Der Fehler der eindimensionalen Rechnung wird im Nachhinein in Form von Leitwertzuschlägen berücksichtigt. Diese Zuschläge haben im Fall zweidimensionaler Wärmeleitung die Form $\psi \cdot l$, wobei l die Längserstreckung des Bauteils oder des Bauteilanschlusses ist und ψ gemäß Diktion der EN ISO 10211-1 der „lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient“. Im Falle dreidimensionaler Wärmeleitung treten zusätzlich die „punktuellen Wärmebrückenverlustkoeffizienten“ χ auf.

Der Gesamtleitwert der Gebäudehülle ergibt sich durch Aufsummieren des eindimensional errechneten Gesamtleitwertes $\sum U \cdot A$ und sämtlicher Leitwertzuschläge:

$$L_{i,e} = \sum U \cdot A + \sum \psi \cdot l + \sum \chi \quad . \quad (4)$$

Die Wärmebrückenverlustkoeffizienten ψ und χ müssen entweder Katalogen oder Produktdeklarationen oder den Ergebnissen von Wärmebrückenberechnungen entnommen werden.

Das indirekte Verfahren schließt unmittelbar an das seit langer Zeit gängige Verfahren der eindimensionalen Berechnung von thermischen Leitwerten an. Dies mag auch der Grund sein, daß sich dieses Verfahren durchgesetzt hat und fast generell verwendet wird. Obzwar die Berechnung thermischer Leitwerte heutzutage zumeist unter Verwendung von Computerprogrammen erfolgt, muss doch festgehalten werden, daß das indirekte Verfahren ein sehr einfaches Handrechenverfahren ist, sofern die ψ - und χ -Werte einmal erhoben sind.

Im Bereich der Passivhausplanung ist das generell nicht einfach zu lösende Problem der Ermittlung von Leitwertzuschlägen insofern in den Hintergrund gerückt, als „passivhaustaugliche Komponenten“ sehr kleine oder negative Wärmebrückenverlustkoeffizienten aufweisen müssen. Die eindimensionale Berechnung des Gesamtleitwertes der Gebäudehülle ist bei Verwendung von Außenabmessungen bereits eine gute Näherung des dreidimensional errechneten Gesamtleitwertes, sofern ausschließlich passivhaustaugliche Komponenten zum Einsatz kommen.

Die Nachteile des indirekten Verfahrens sind allesamt im Umstand begründet, daß versucht wird, die Problematik der Beschreibung dreidimensional ablaufender Wärmeleitungsvorgänge mit einem für diese Fragestellung untauglichen Ansatz, dem thermisch eindimensionalen Modell, zu lösen. Der Fehler dieses Berechnungsansatzes wird durch Einführung der Leitwertzuschläge im Nachhinein zwar berichtigt, doch führt die Wahl des ursprünglich gewählten Modells zu Einschränkungen und Fehlerquellen, die für den Anwender durchaus gewichtig sind.

Dem indirekten Verfahren immanent ist seine Vieldeutigkeit. Sowohl bei der Berechnung der Flächen im eindimensionalen Modell als auch bei der Ableitung von ψ -Werten aus Wärmebrückenberechnungen können verschiedenste Ansätze gemacht werden. Das Verfahren wird jedoch nur dann richtige Ergebnisse liefern, wenn die Flächenberechnungen des eindimensionalen Modells konsistent mit den im Zuge der Berechnung der Wärmebrückenverlustkoeffizienten getroffenen Annahmen ist. Da es der Normalfall ist, daß der Anwender von ψ - und χ -Werten nicht ident ist mit jener Person, die die ψ - und χ -Werte aus Wärmebrückenberechnungen abgeleitet hat, steckt in der Mehrdeutigkeit des Verfahrens eine Fehlerquelle, die in ihrer Auswirkung nicht unterschätzt werden sollte.

Grundsätzlich ist es wichtig zu verstehen, daß das indirekte Verfahren eine reine Rechenvorschrift und kein Verfahren mit physikalischer Fundierung ist. Es ist daher auch nicht zulässig, den Wärmebrückenverlustkoeffizienten eine generell gültige physikalische Bedeutung beizumessen. Da es oft vorkommt, daß thermische Optimierungen von Baukonstruktionen oder Sanierungserfolge auch an der Veränderung der errechneten ψ - und χ -Werten gemessen werden, sei in der Folge die Feststellung, daß ψ - und χ -Werten reine Rechengrößen ohne physikalische Bedeutung sind, an einem sehr einfachen Beispiel illustriert.

Eine innen verputzte Wandkante aus 25 cm dickem Ton-Massivmauerwerk wird durch Anbringung einer außenseitig gelegenen Dämmstoff-Schicht thermisch optimiert. Die Dicke der Dämmstoff-Schicht wird von 0 cm (d. h. ungedämmt) bis 40 cm (Passivhaus-Standard) variiert. Untersucht werden soll die Veränderung des längenbezogenen Leitwertes sowie die Abhängigkeit der ψ -Werte bei Vergrößerung der Dämmstoff-Dicke.

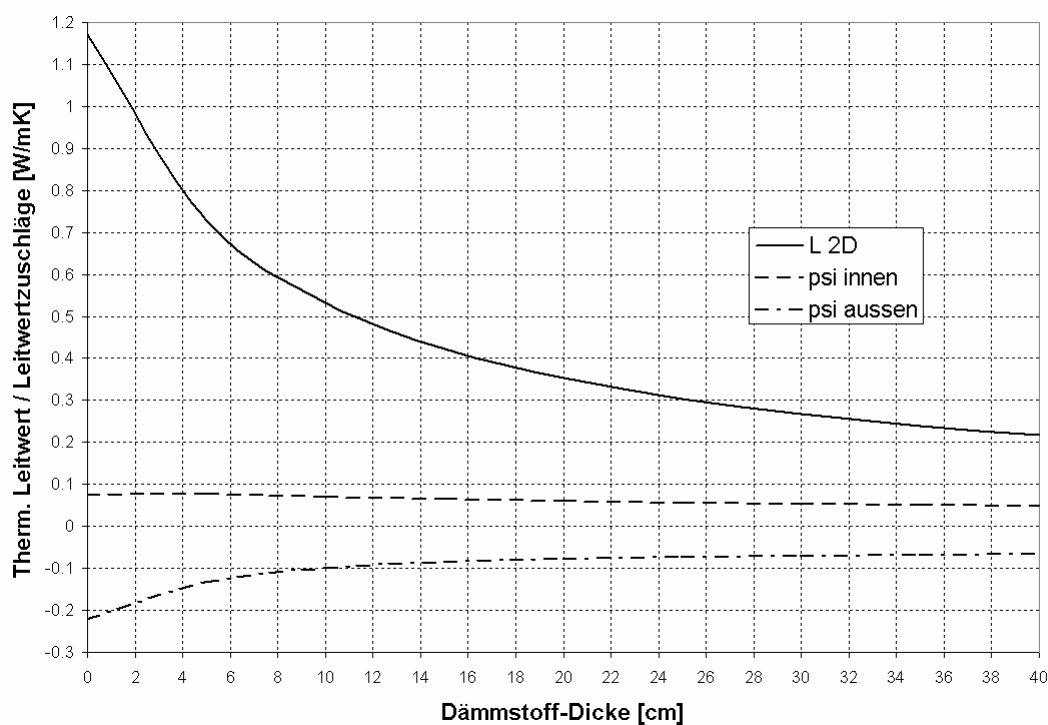


Abb. 1: Ergebnis der Parameterstudie: Verlauf der (2D-) Leitwerte und der ψ -Werte in Abhängigkeit von der Dicke der Dämmstoff-Schicht

Das Ergebnis der Parameterstudie in obiger Abbildung zeigt, daß der thermische Leitwert (L 2D) von $1,172 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ im ungedämmten Fall auf $0,216 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ für den hochwärmegedämmten Fall abnimmt. Gemäß Gleichung (3) nimmt in gleichem Maße auch der Wärmeverlust durch den betrachteten Bauteil-Ausschnitt ab – ein Effekt, der mit der Dämm-Maßnahme wohl bezweckt war. Der ψ -Wert bleibt bei Verwendung von Innenabmessungen hingegen nahezu konstant. Bei Verwendung

von Außenabmessungen ist der ψ -Wert negativ und zeigt mit ansteigender Dämmstoff-Dicke steigende Tendenz. Bereits dieses einfache Beispiel zeigt, daß es verfehlt wäre, den Wärmebrückenverlustkoeffizienten eine physikalisch relevante Bedeutung beizumessen. Sie zeigen nichts anderes als den Fehler der eindimensionalen Rechnung.

4. Das direkte Verfahren

Das Aufsummieren von Teil-Leitwerten im indirekten Verfahren entspricht dem Modell einer thermischen Parallelschaltung. Dies impliziert die Annahme, daß jene Teile der Gebäudehülle, für die Teil-Leitwerte errechnet wurden, untereinander nicht in thermischem Kontakt stehen. Zur leichteren Verständlichkeit dient das Bild der Zerteilung der Gebäudehülle in Teilbereiche mittels fiktiven Schnittebenen, durch die kein Wärmetransport möglich ist. Einer der Schwachpunkte des indirekten Verfahrens liegt nun darin, daß die Schnitte durch Bereiche geführt werden, in denen der Wärmefluss nicht senkrecht zur Bauteiloberfläche verläuft. Hierdurch wird durch das Setzen der fiktiven Schnittebenen der Wärmestrom im Vergleich zu den realen Gegebenheiten stark reduziert, was letztendlich zur Einführung der Korrektur mittels Wärmebrückenverlustkoeffizienten zwingt.

Auch das direkte Verfahren der EN ISO 10211-1 fußt auf dem Modell der thermischen Parallelschaltung. Der Unterschied zum indirekten Verfahren liegt lediglich darin, daß die fiktiven Schnitte nur in jenen Teilen der Gebäudehülle geführt werden, in denen das Vorliegen eindimensionaler Wärmeleitung, d. h. eine Wärmestromrichtung senkrecht zu den Bauteiloberflächen angenommen werden kann. Die fiktive Zerteilung der Gebäudehülle ist damit zulässig und birgt keine Fehler in sich.

Natürlich ergibt sich im direkten Verfahren die Notwendigkeit, die Teil-Leitwerte unter Verwendung thermisch mehrdimensionaler – meist dreidimensionaler – Modelle zu errechnen. Grundsätzlich existieren seit längerer Zeit Programme, die dies zu leisten im Stande sind. Der Grund dafür, daß das direkte Verfahren nur selten – und dann ausschließlich im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten – angewandt wird, ist wohl darin zu sehen, daß Benutzeroberflächen, die dreidimensionales thermisches Modellieren in übersichtlicher und einfacher Art und Weise erlauben, noch nicht entwickelt wurden.

Im direkten Verfahren kommen nur Leitwerte – und damit physikalisch interpretierbare Größen vor. Das Zusammenfügen von Teil-Leitwerten zu einem Gesamtleitwert ist im direkten Verfahren natürlich eindeutig und nicht fehlinterpretierbar. Zudem ergibt sich die Möglichkeit, die Wärmeleitungsvorgänge im gesamten Gebäude gemäß Gleichung (1) zu beschreiben. Die Einschränkung des indirekten Verfahrens auf „Zwei-Raum Fälle“, in denen nur zwischen innen und außen unterschieden werden kann, ist damit aufgehoben. Wie in [Kreč, 2000] detailliert dargelegt, ist die

aus dem direkten Verfahren ableitbare Leitwert-Matrix eine wesentliche Grundlage für Programme zur thermischen Simulation von Räumen, Raumgruppen und ganzen Gebäuden. Bei der Verwendung von Leitwerten ergibt sich zudem die Möglichkeit der Verallgemeinerung des Leitwert-Konzeptes auf instationäre Vorgänge. Die Wärmespeicherfähigkeit geht bei Verwendung dieses Modelles unter Berücksichtigung der Mehrdimensionalität des Wärmeflusses in die Berechnung ein [Kreč, 2000]

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Erfassung der Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle erfordert bei hoch wärmegeprägten Gebäuden, wie z. B. Passivhäusern, die Verwendung von thermisch dreidimensionalen Berechnungsmodellen. Auf der Grundlage des Leitwert-Konzeptes bietet die internationale Norm EN ISO 10211-1 zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren an.

Das „indirekte Verfahren“ zur Berechnung des thermischen Leitwertes der Gebäudehülle wird heute allgemein angewendet, birgt jedoch aufgrund der fehlenden physikalischen Fundierung und der daraus resultierenden Mehrdeutigkeit die Gefahr fehlerhafter Anwendung in sich. Für die Weiterentwicklung von Programmen zur Modellierung des thermischen Verhaltens von Bauteilen, Räumen und Gebäuden stellt sich kurzfristig die Aufgabe, Gebäudesimulationsprogramme und Wärmebrückenberechnungsmodulare derart zu verknüpfen, daß die Fehlerquellen des indirekten Verfahrens zum Großteil automatisch eliminiert werden.

Für die langfristige Entwicklung erscheint es sinnvoll und wünschenswert, zum derzeit kaum verwendeten „direkten Verfahren“ der EN ISO 10211-1 zu wechseln. Für solch' einen Schritt fehlen jedoch noch Programme mit jenem Grad an Benutzerfreundlichkeit, der sie für den Planer anwendbar und attraktiv macht. Die für diesen innovativen Schritt erforderliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit konzentriert sich hierbei auf die CAD gestützte dreidimensionale Modellierung der Gebäudehülle in einer Art, die eine Übernahme von Geometrie- und Baustoffdaten in ein thermisches Simulationsprogramm in einer für den Programmbenutzer verständlichen und weitgehend automatisierten Form möglich macht.

Heindl, W., Kreč, K., Panzhauser, E. und Sigmund, A.: **Wärmebrücken**, ISBN 3-211-82024-8, Springer-Verlag Wien - New York (1987)

Kreč, K.: **Zur rechnerischen Erfassung des Einflusses von Wärmebrücken auf das thermische Verhalten von Gebäuden**, Habilitationsschrift, TU Wien (2000)