

U-Wert-Berechnung bei inhomogenen Holzbaukonstruktionen

Marco Ragonesi (1)

Die meisten Holzbaukonstruktionen sind als inhomogene Systeme, mit Wärmedämmschichten zwischen der Holztragkonstruktion, konzipiert. Der die Wärmedämmschicht durchdringende Holzquerschnitt bildet dabei eine Wärmebrücke (Inhomogenität), die es bei der Beurteilung der Wärmeflüsse zu berücksichtigen gilt. Die korrekte Ermittlung der U-Werte stellt bei inhomogenen Holzbauten höhere Anforderungen als bei homogenen Konstruktionen; dies insbesondere dann, wenn ein Bauteil in mehreren Ebenen inhomogen aufgebaut ist, so z.B. bei kreuzweisem Lattenrost und Wärmedämmstoffen dazwischen. Neben dem Näherungsverfahren mit oberem und unterem Grenzwert (SIA 180 bzw. SN EN ISO 6946) und der U-Wert-Berechnung mittels Wärmebrückenberechnung, wird im folgenden ein komfortableres Verfahren gezeigt, das auf einer resultierenden Wärmeleitfähigkeit für die inhomogene(n) Schicht(en) Holz/Wärmedämmstoff beruht. Damit lassen sich auch die für einen angestrebten U-Wert erforderlichen Schichtdicken rechnerisch einfach und mit einer genügenden Genauigkeit optimieren.

Wärmeflüsse beim Holzbau: Vergleich von drei Varianten

Das Beispiel in Abbildung 1 zeigt eine Steildachkonstruktion mit Wärmedämmschichten zwischen Holzquerschnitten in vier Ebenen. Insbesondere bei hochwärmegeprägten Gebäudehüllen für MINERGIE-P-Bauten sind solche Holzbaukonstruktionen realistisch, um U-Werte im Bereich von $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu erreichen.

Die Norm SIA 180 (bzw. die SN EN ISO 6946) verweist betreffend die Berechnung des U-Wertes auf das Näherungsverfahren mit oberem und unterem Grenzwert (vgl. Abbildung 2). Die Praxis zeigt, dass viele Bauschaffende bereits bei der Definition der Systemgrenze für diese U-Wert-Berechnung (Aufteilung in Abschnitte und Scheiben) scheitern (oder eine solche gar nicht fachgerecht möglich ist) und deshalb auf eine einfache aber unzulässige Berechnung des mittleren U-Wertes ausweichen. Auch die Frage nach einer erforderlichen Schichtdicke für einen angestrebten U-Wert lässt sich mit diesem Verfahren nicht sehr komfortabel beantworten.

Als Alternative kommen für die U-Wert-Berechnung Wärmebrückenberechnungen oder ein Verfahren mit resultierenden Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom Holzanteilen in Frage (vgl. Abbildung 3). Selbst bei Wärmebrückenberechnungen

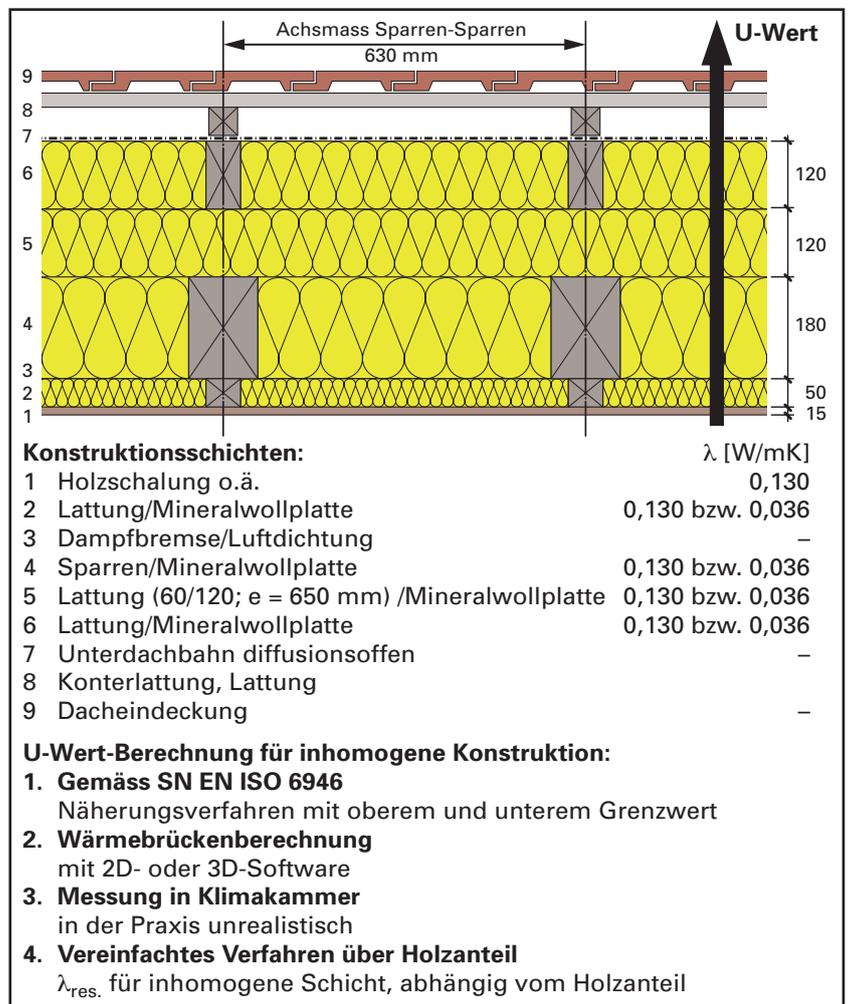
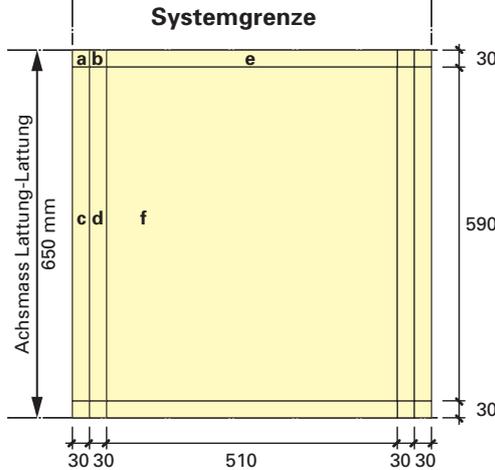
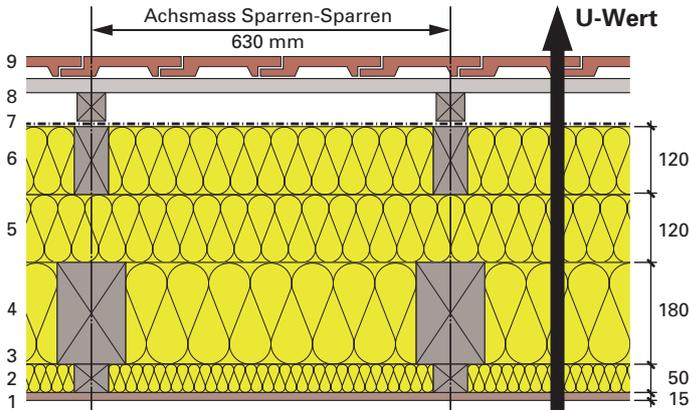


Abbildung 1: Mehrschichtig konstruiertes Steildach mit möglichen Varianten für die Bestimmung des U-Wertes.

(1) Marco Ragonesi, dipl. Architekt HTA/Bauphysiker
Mitinhaber Ragonesi · Strobel & Partner AG
Bauphysik und Technische Kommunikation
Schützenstrasse 8, 6003 Luzern
Tel. 041 420 60 68 / m.ragonesi@rsp-bauphysik.ch

U-Wert mit Näherungsverfahren (SIA 180 bzw. SN EN ISO 6946)



oberer Grenzwert R_o :

$$R_a = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,13} + \frac{0,18}{0,13} + \frac{0,12}{0,13} + \frac{0,12}{0,13} + 0,08 + \frac{1}{25} = 3,981 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_b = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,036} + \frac{0,18}{0,13} + \frac{0,12}{0,13} + \frac{0,12}{0,036} + 0,08 + \frac{1}{25} = 7,395 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_c = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,13} + \frac{0,18}{0,13} + \frac{0,12}{0,13} + \frac{0,12}{0,036} + 0,08 + \frac{1}{25} = 6,391 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_d = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,036} + \frac{0,18}{0,13} + \frac{0,12}{0,036} + \frac{0,12}{0,036} + 0,08 + \frac{1}{25} = 9,805 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_e = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,036} + \frac{0,18}{0,036} + \frac{0,12}{0,13} + \frac{0,12}{0,036} + 0,08 + \frac{1}{25} = 11,011 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_f = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,036} + \frac{0,18}{0,036} + \frac{0,12}{0,036} + \frac{0,12}{0,036} + 0,08 + \frac{1}{25} = 13,421 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

$$R_o = \frac{0,4095}{\frac{0,0036}{3,981} + \frac{0,0036}{7,395} + \frac{0,0354}{6,391} + \frac{0,0354}{9,805} + \frac{0,0306}{11,011} + \frac{0,3009}{13,421}} = 11,458 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

Wärmedurchlasswiderstand R_t :

$$R_t = \frac{11,458 + 10,143}{2} = 10,801 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{10,801} = 0,093 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Gültigkeit: $\frac{R_o}{R_u} < 1,5$?

$$\frac{11,458}{10,801} = 1,06 \quad \checkmark$$

unterer Grenzwert R_u :

$$\lambda_{\varnothing,d_2} = \frac{(0,06 \cdot 0,13) + (0,57 \cdot 0,036)}{0,63} = 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\lambda_{\varnothing,d_4} = \frac{(0,12 \cdot 0,13) + (0,51 \cdot 0,036)}{0,63} = 0,054 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\lambda_{\varnothing,d_5} = \frac{(0,06 \cdot 0,13) + (0,59 \cdot 0,036)}{0,65} = 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\lambda_{\varnothing,d_6} = \frac{(0,06 \cdot 0,13) + (0,57 \cdot 0,036)}{0,63} = 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$R_u = \frac{1}{7,7} + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,18}{0,054} + \frac{0,12}{0,045} + \frac{0,12}{0,045} + 0,08 + \frac{1}{25} = 10,143 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$$

Abbildung 2: Das normkonforme Näherungsverfahren mit oberem und unterem Grenzwert (SIA 180 bzw. SN EN ISO 6946) ist aufwendig und lässt es nicht zu, einzelne Schichten komfortabel so zu optimieren, dass ein angestrebter U-Wert erreicht werden kann.

nungen mit 2D-Software muss für inhomogene Schichten, bei denen nicht durch den Wärmedämmstoff und das Holzwerk geschnitten wird (Schicht 5 in Abbildung 3), eine resultierende Wärmeleitfähigkeit angenommen werden, um einen korrekten U-Wert zu bekommen. Es stellt sich also mit Recht die Frage, weshalb der U-Wert von inhomogenen Holzbaukonstruktionen nicht wie bei homogenen Baueilen gerechnet werden kann, in dem für alle inhomogenen Schichten «Holz/Wärmedämmstoff» resultierende Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt werden.

Der Vergleich des U-Wertes der Steildachkonstruktion zeigt, dass mit all den drei Verfahren etwa derselbe U-Wert im Bereich von 0,091 bis 0,093 W/m²K ermittelt wird. Eine Messung des U-Wertes in der Klimakammer, wie er in SIA 180 auch erwähnt wird, ist in der Praxis wohl eher unrealistisch.

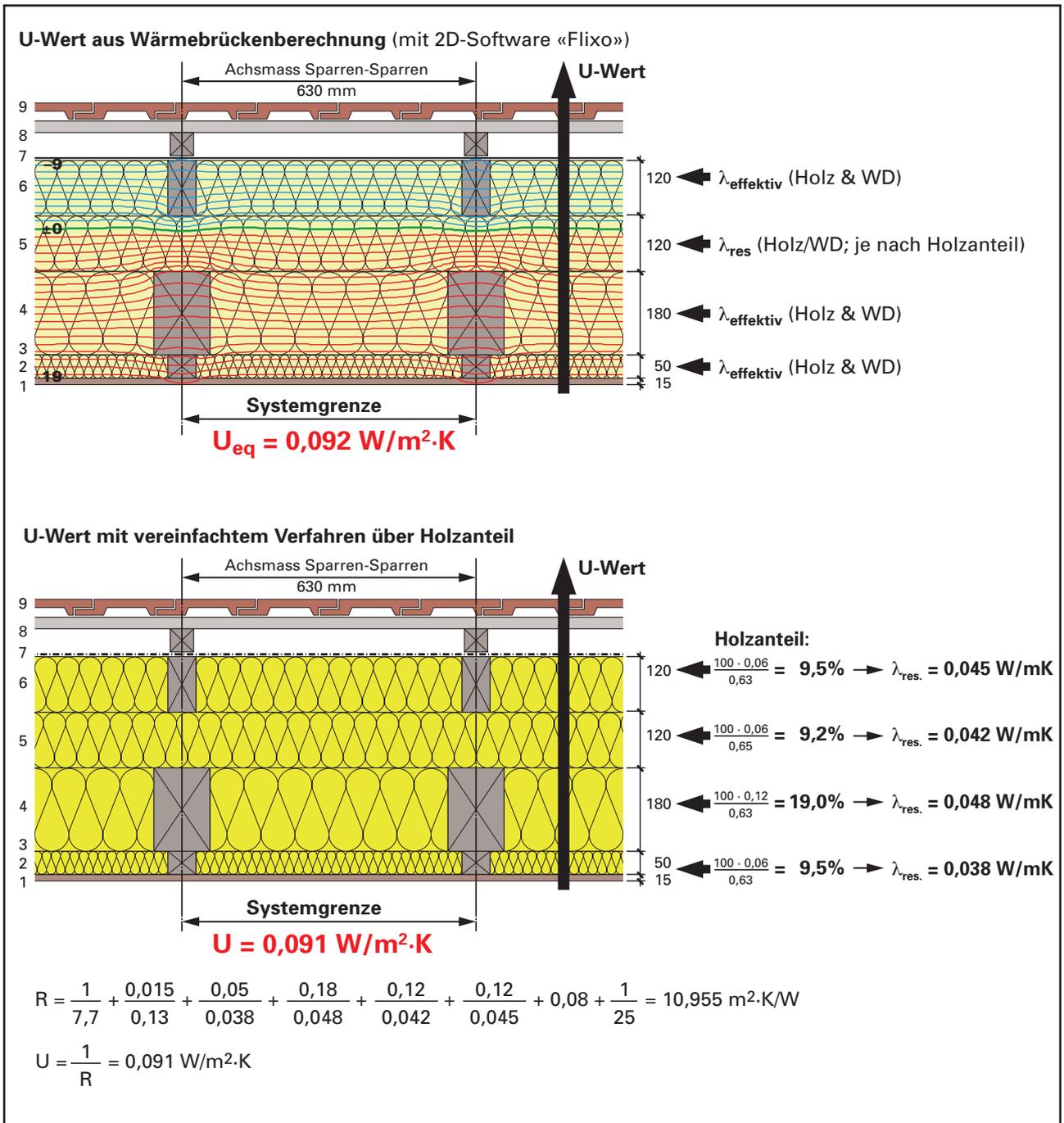


Abbildung 3: Auch bei der Ermittlung des U-Wertes mittels Wärmebrückenberechnung ist für die Schicht 5 eine resultierende Wärmeleitfähigkeit als Ersatzwert für die inhomogene Schicht «Lattung/Mineralwollplatte» erforderlich, um einen korrekten U-Wert zu bestimmen. Mit der resultierende Wärmeleitfähigkeit, in Abhängigkeit vom Holzanteil, kann somit auch der U-Wert von inhomogenen Konstruktionen einfach bestimmt werden, wie bei einer homogenen Konstruktion. Auch die Optimierung einer Schicht, um einen angestrebten U-Wert zu erreichen, ist mit dieser Methode einfach möglich.

Einflussfaktoren auf die resultierende Wärmeleitfähigkeit von inhomogenen Schichten

Für jede inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff» gibt es eine resultierende Wärmeleitfähigkeit, die zwischen derjenigen des Wärmedämmstoffes (0 % Holzanteil, λ_D der Wärmedämmschicht) und derjenigen des Holzwerkstoffes (100 % Holzanteil, z.B. $\lambda_{\text{Holz}} = 0,13 \text{ W/mK}$) liegt (vgl. Abbildung 4). Offensichtlich ist der Einfluss des Holzanteils und der Wärmeleitfähigkeiten des Wärmedämmstoffes. Weniger klar ist der Einfluss der Schichtdicke und einer Überdämmung bei mehrschichtigen Konstruktionen. Abbildung 5 zeigt die untersuchten Einflussfaktoren: Ob die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff» 12 cm oder 36 cm dick ist, spielt keine Rolle betreffend die resultierende Wärmeleitfähigkeit. Relevant ist aber eine Überdämmung bzw. ein mehrschichtiger Aufbau der Konstruktion. In den Abbildungen 7 bis 12 sind jeweils für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmstoffe (λ_D von 0,03 bis 0,044 W/mK), bei λ_{Holz} von 0,13 W/mK, die resultierenden Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit des Holzanteils und der Überdämmung angegeben. Diese Kennwerte basieren auf der Rückrechnung der resultierenden Wärmeleitfähigkeit aus der Bestimmung des Wärmeflusses bei der inhomogenen Schicht mittels Wärmebrückenberechnung (Berechnung mit Flixo).

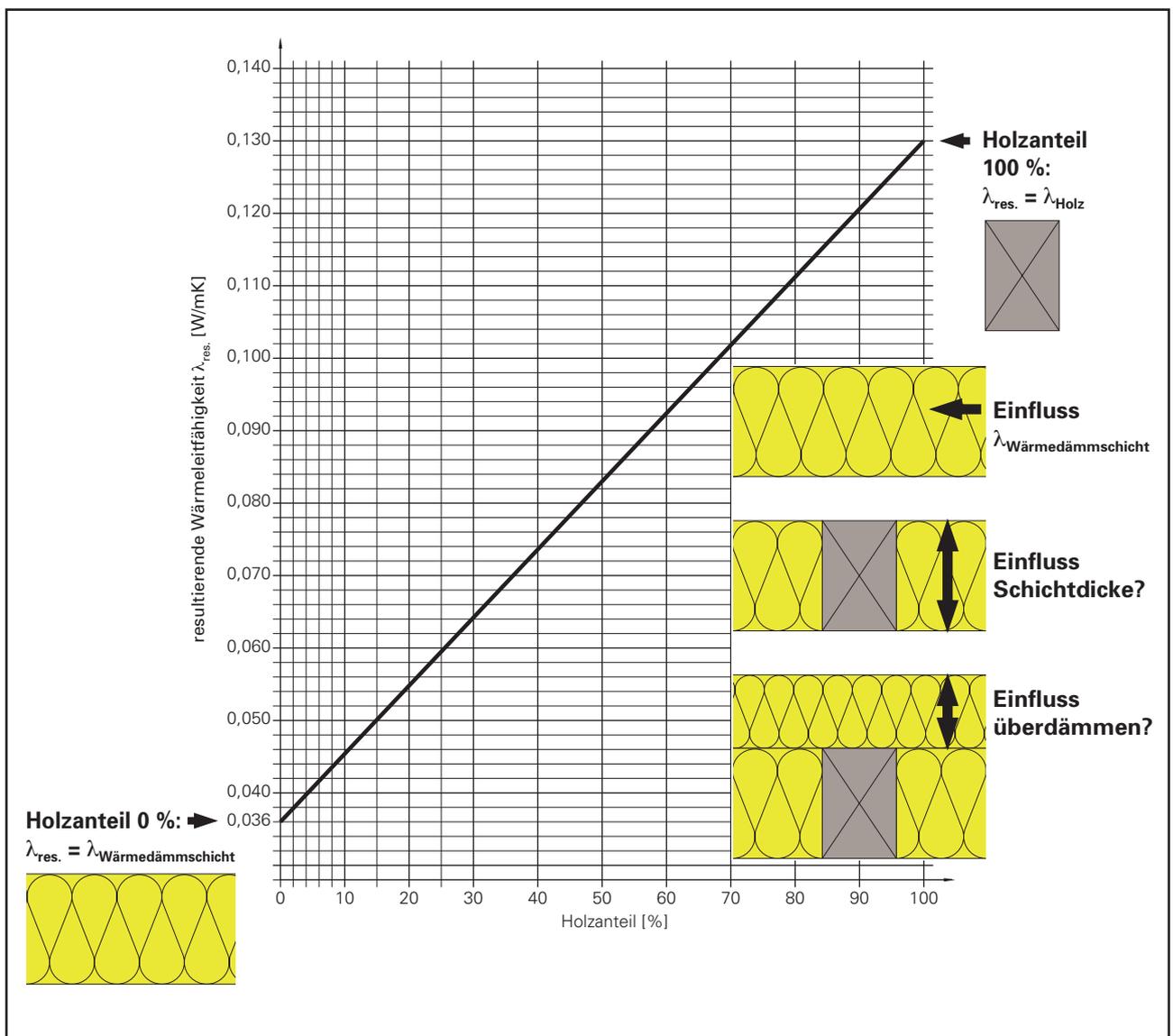


Abbildung 4: In Abhängigkeit vom Holzanteil resultieren unterschiedliche Wärmedämmeigenschaften der inhomogenen Schicht «Holz/Wärmedämmstoff». Je besser die Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes ist, desto gravierender wirken sich durchdringende Holzquerschnitte und somit der Holzanteil aus.

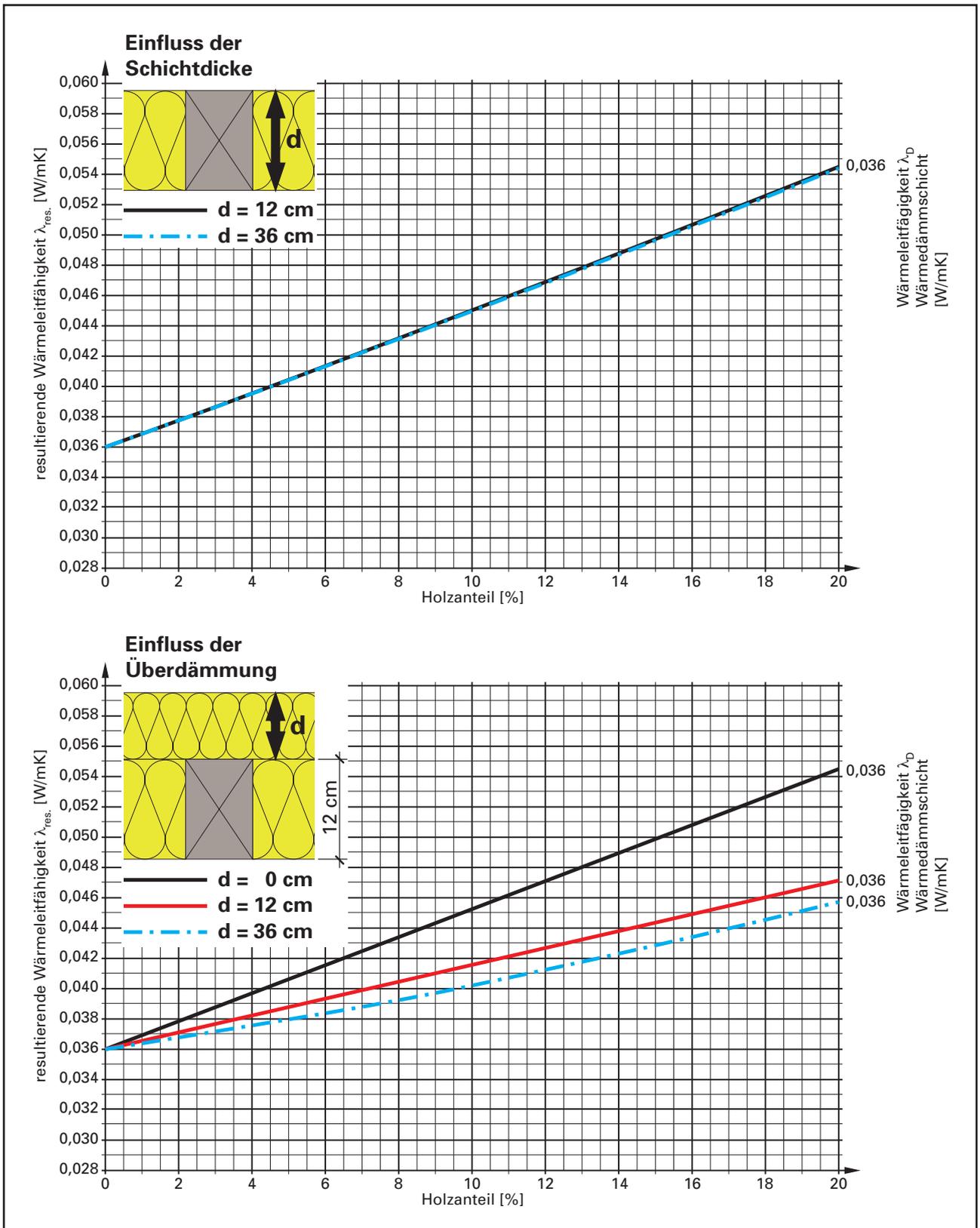


Abbildung 5: Die Dicke der inhomogenen Schicht hat keinen Einfluss auf die resultierende Wärmeleitfähigkeit. Durch eine Überdämmung der inhomogenen Schicht kann jedoch die resultierende Wärmeleitfähigkeit massgeblich verbessert werden.

U-Wert-Vergleich bei ein- oder zweischichtiger Aussenwand

Aus Abbildung 6 gehen die nach drei unterschiedlichen Methoden berechneten U-Werte für eine einschichtig und eine zweischichtig wärmedämmte Aussenwand hervor. Bei der einfachen Berechnung über die resultierende Wärmeleitfähigkeit hängt die Genauigkeit des ermittelten U-Wertes stark von der Ablesegenauigkeit von $\lambda_{res.}$ aus den Diagrammen ab.

Bei der einschichtigen Aussenwand werden U-Werte zwischen $0,117 \text{ W/m}^2\text{K}$ (U_{eq} aus Wärmebrückenberechnung) und $U = 0,119 \text{ W/m}^2\text{K}$ (mit dem vereinfachten Verfahren « $\lambda_{res.}$ ») ausgewiesen. Der U-Wert von $0,118 \text{ W/m}^2\text{K}$ gemäss SN EN ISO 6946 (mit oberem und unterem Grenzwert) liegt dazwischen. Insgesamt sind die Abweichungen beim U-Wert der einschichtigen Aussenwand gering.

Bei der zweischichtigen Aussenwand wird bei den drei Berechnungsmethoden jeweils ein analoger U-Wert von $0,109 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgewiesen.

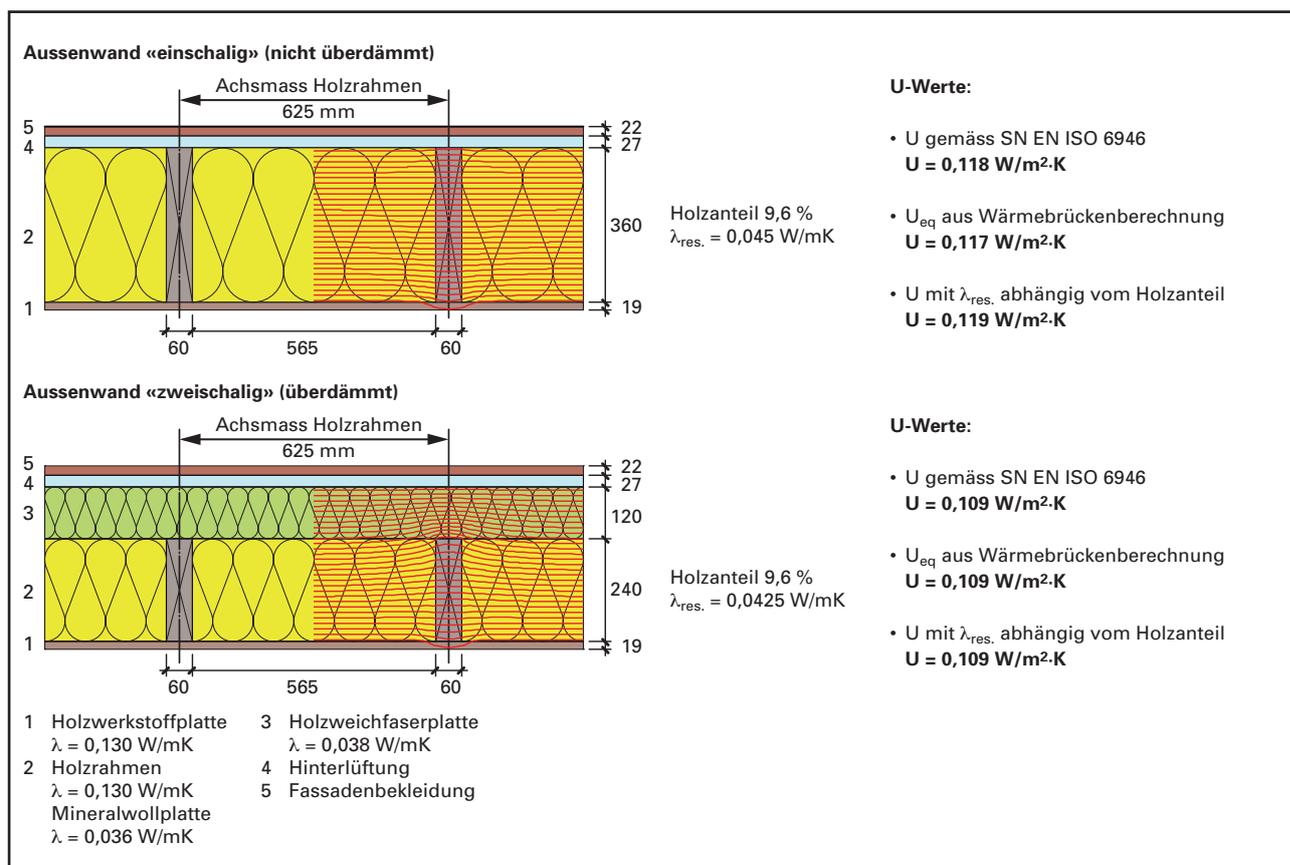


Abbildung 6: Vergleichende U-Wert-Berechnung bei ein- und zweischichtiger Aussenwand. Die Unterschiede der rechnerisch nach drei Methoden ermittelten U-Werte sind sehr gering und legitimieren dadurch das vereinfachte Verfahren über die resultierende Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{res.}$ in Abhängigkeit vom Holzanteil.

Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Methode zur U-Wert-Berechnung von inhomogenen Holzkonstruktionen über die resultierende Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{res.}$ in Abhängigkeit vom Holzanteil, liefert im Vergleich mit anderen Berechnungsmethoden absolut vergleichbare und somit korrekte U-Werte. Mit dieser Methode lassen sich U-Werte auch bei mehrschichtigen Holzbaukonstruktionen so einfach berechnen wie bei homogenen Bauteilen. Zudem können einzelne Schichten betreffend die erforderliche Schichtdicke, um einen angestrebten U-Wert zu erreichen, rechnerisch komfortabel optimiert werden. Selbst für die präzise Bestimmung des Wärmeflusses einer inhomogenen Holzbaukonstruktion, über eine Wärmebrückenberechnung, liefern diese Diagramme die korrekte resultierende Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{res.}$ für inhomogene Schichten, die mittels 2D-Software nicht als inhomogen erfasst werden können.

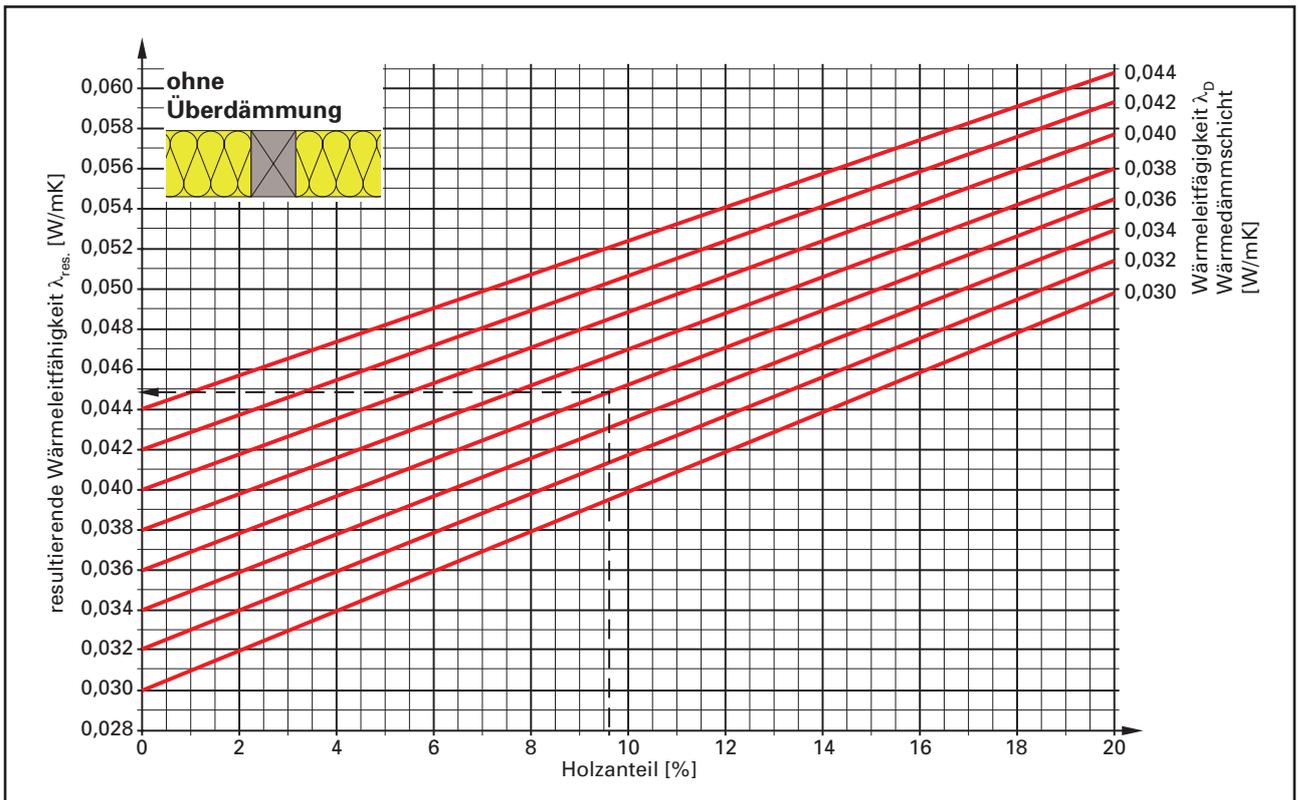


Abbildung 7: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», ohne Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.

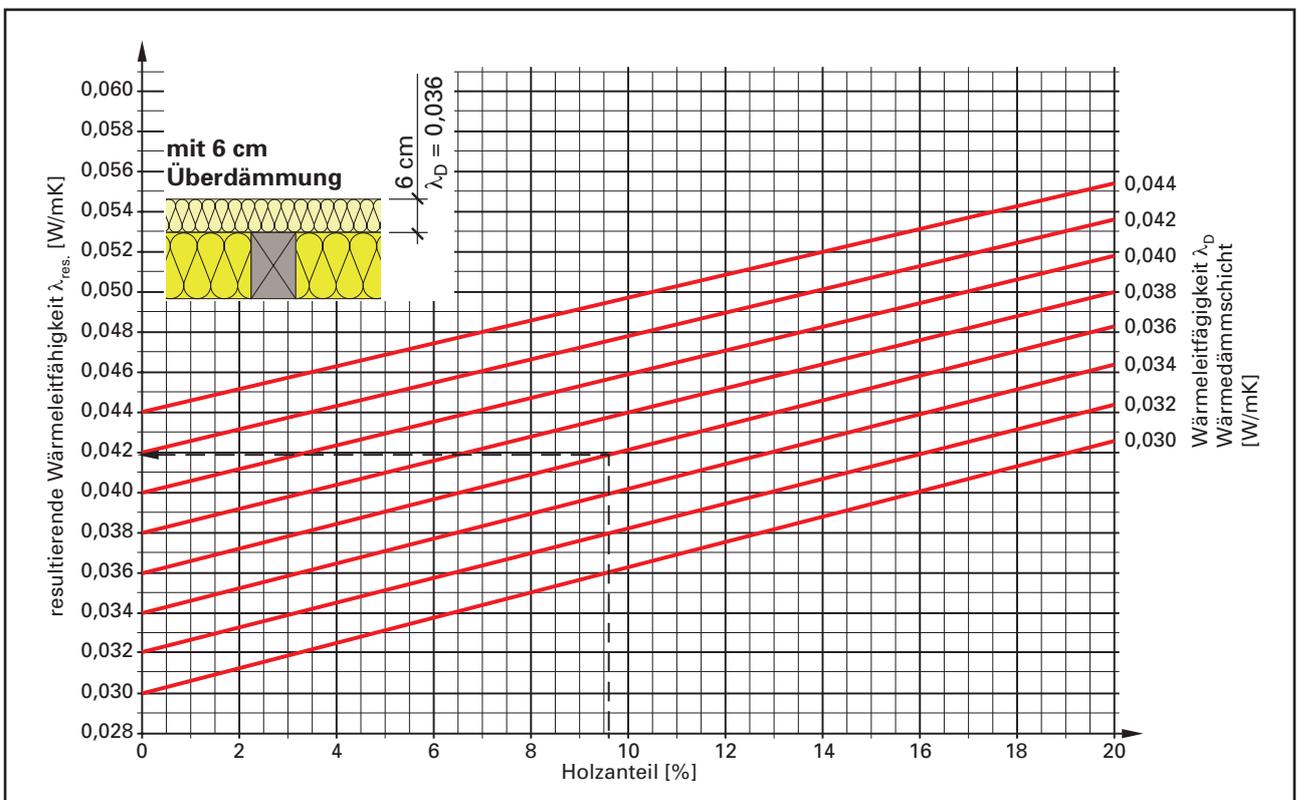


Abbildung 8: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», bei 6 cm Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.

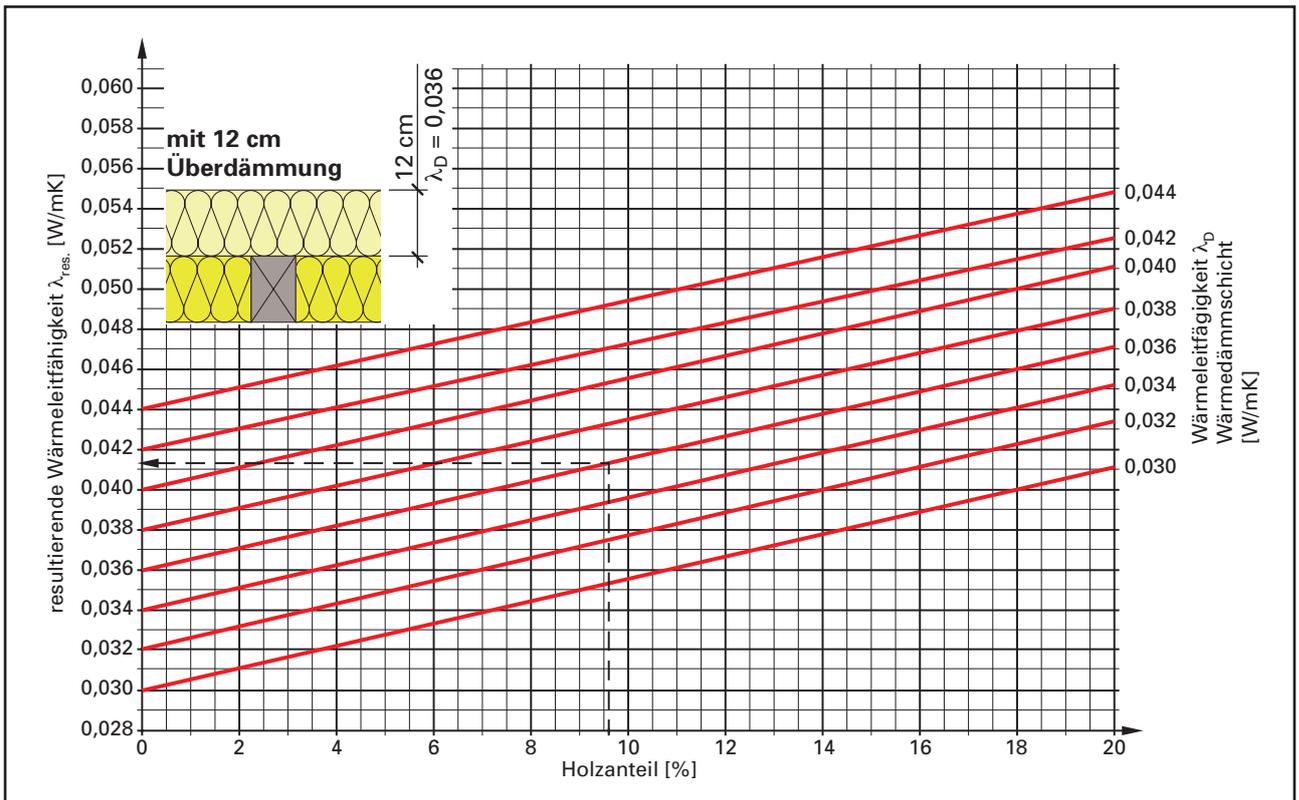


Abbildung 9: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», bei 12 cm Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.

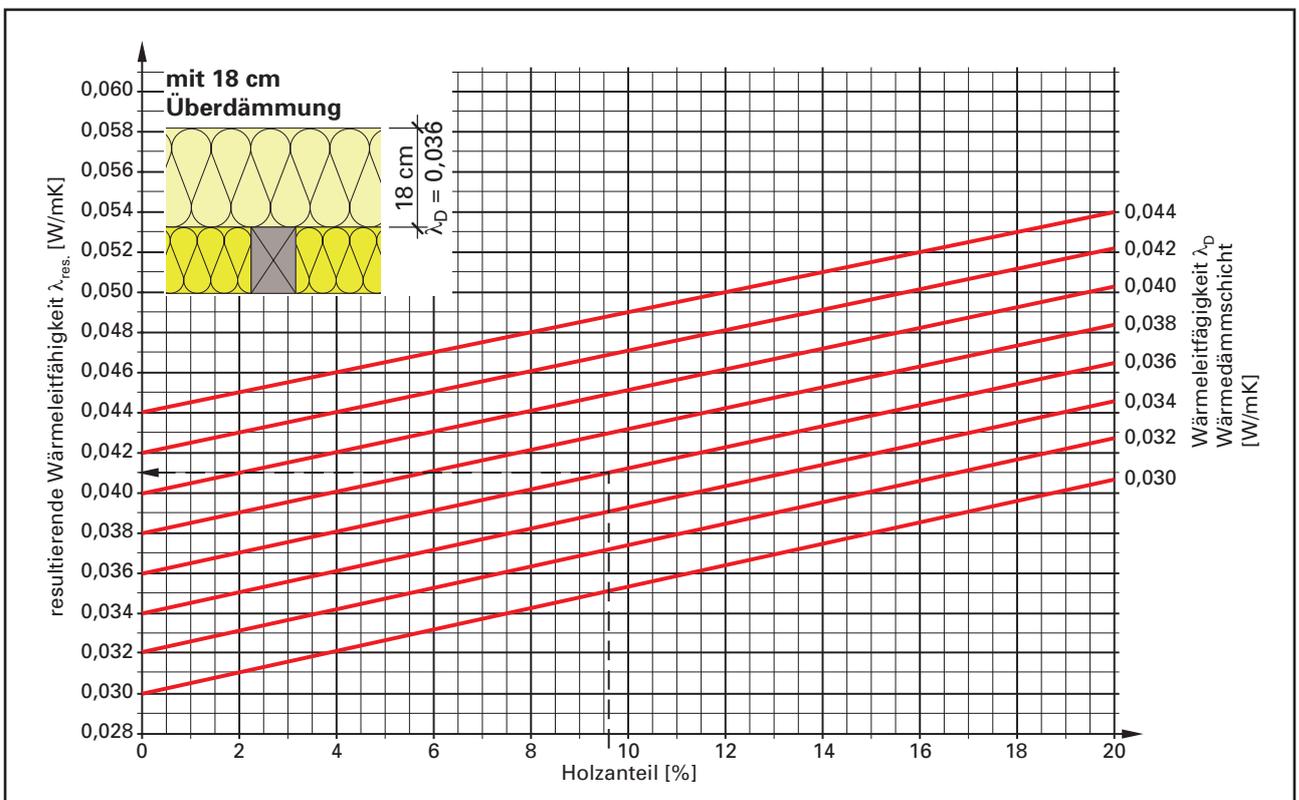


Abbildung 10: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», bei 18 cm Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.

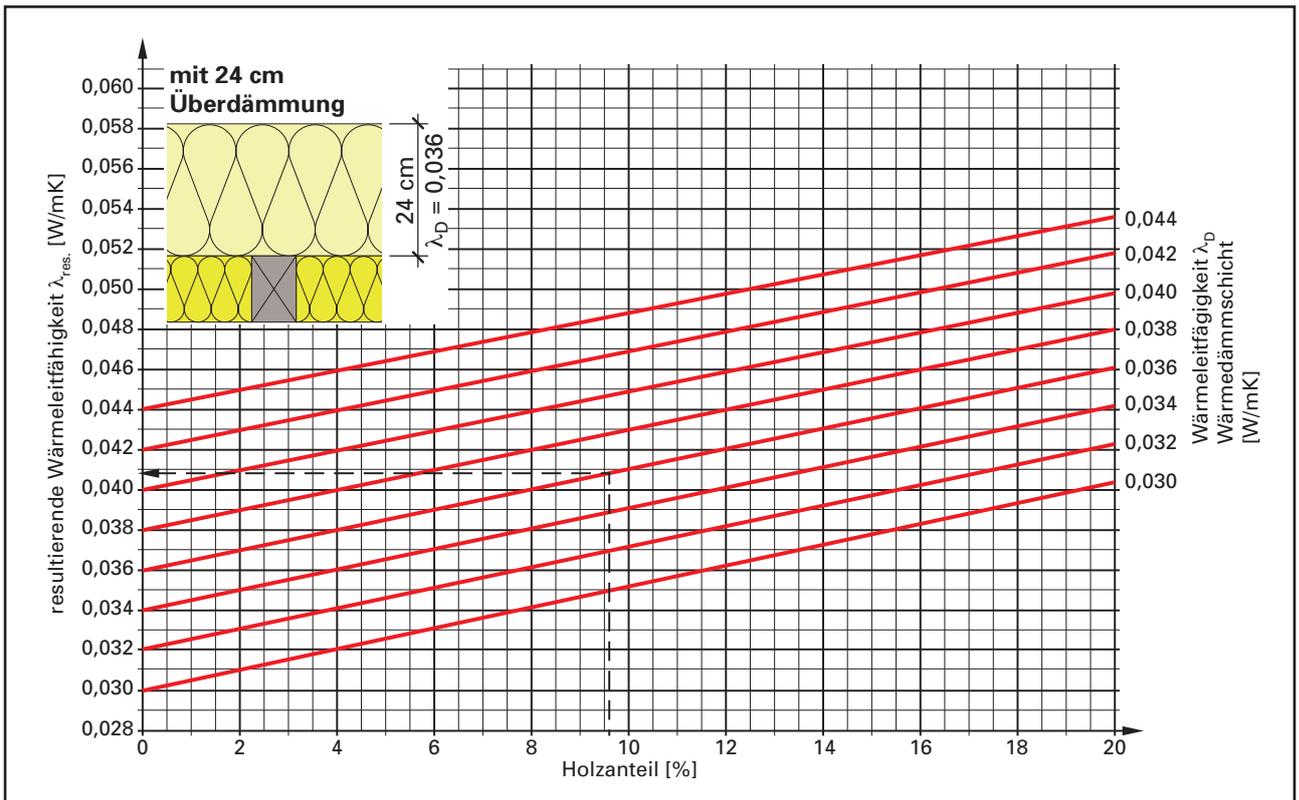


Abbildung 11: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», bei 24 cm Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.

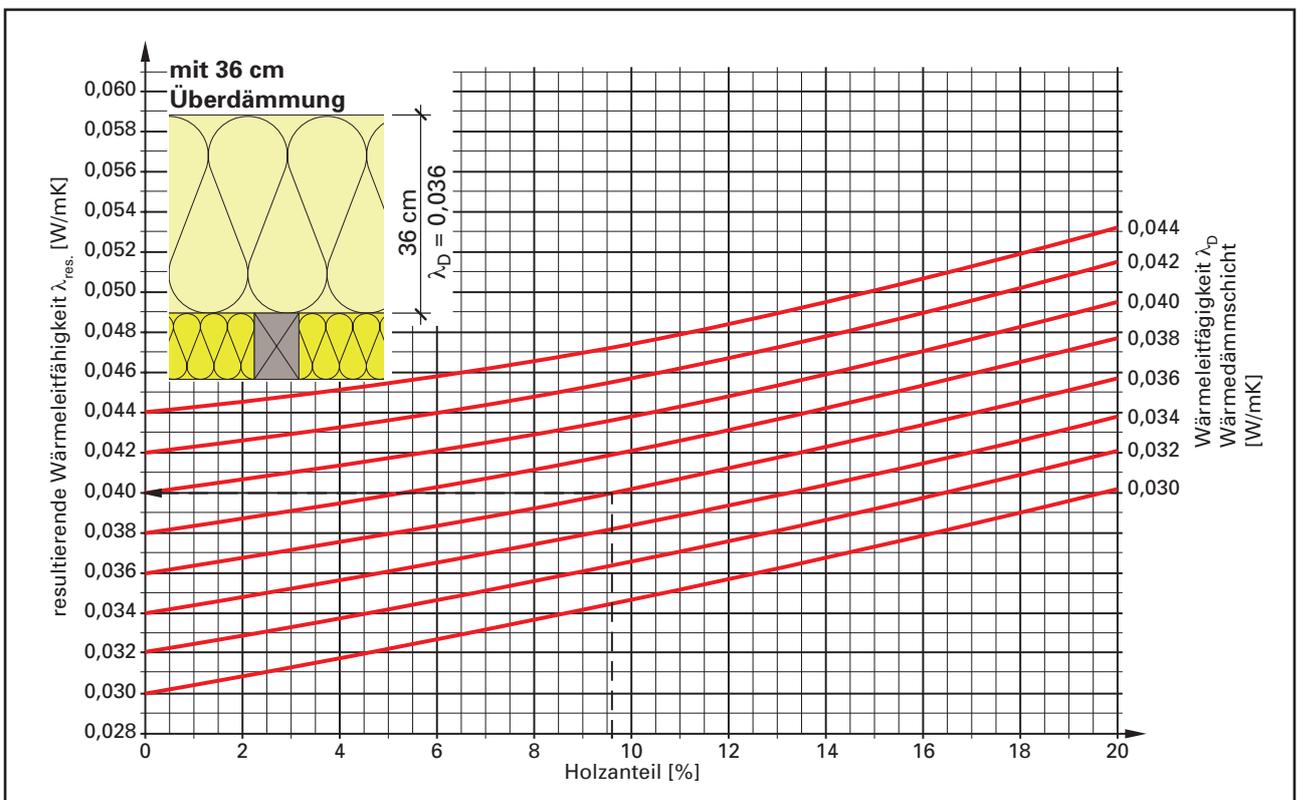


Abbildung 12: Resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_{res} für die inhomogene Schicht «Holz/Wärmedämmstoff», bei 36 cm Überdämmung, in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes.