

Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien

Manche Hersteller von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien werben mit hohen Dämmeigenschaften ihrer Produkte, die angeblich nicht mit Hilfe der klassischen Bauphysik beschrieben werden können. Um deren Dämmqualität zu überprüfen, werden In-situ-Messungen durchgeführt. Dazu werden zwei verschiedene Dachaufbauten parallel untersucht: einmal mit Mineralwolle, einmal mit IR-reflektierender Dämmung. Die Ergebnisse werden mit klassischen Labormessungen verglichen. Die Untersuchungen werden durch Simulationsrechnungen ergänzt. Aus allen Untersuchungen resultiert: die Dachkonstruktion mit der IR-reflektierenden Dämmung zeigt typische Merkmale eines Aufbaus mit geringerer Dämmwirkung. Außerdem lässt sich das Verhalten des Dachaufbaus mit der IR-reflektierenden Dämmung während der In-situ-Messung sehr gut mit den Ergebnissen aus den klassischen Labormessungen in Übereinstimmung bringen.

Experimental and theoretical investigations on infrared reflective insulation. *Some manufacturers of IR-reflective insulation products claim, that their products feature a high insulation quality that cannot be described by traditional methods of building physics. In situ measurements are carried out to verify. Two different roof systems are investigated parallel: one with mineral wool, the other with IR-reflective insulation. The results of the in situ tests are compared to those of traditional laboratory measurements. Further the examinations are completed by dynamic calculations. As a result it follows from all investigations, that the roof with IR-reflective insulation shows a typical characteristic of insulation with lower quality. The values of the traditional measurement match with the results of the in situ measurements.*

1 Einleitung

Bauherren sind verunsichert über die Dämmeigenschaften von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien (Bild 1): Manche Hersteller dieser Dämmstoffe werben mit Dämmeigenschaften, die denen von hochdämmenden Produkten entsprechen. Traditionelle Labormessungen ergeben allerdings viel geringere Werte. Wer hat Recht?

Um diese Frage zu beantworten wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen umfangreiche Vergleichsmessungen und Simulationen an Dächern von typischen Einfamilienhäusern durchgeführt.

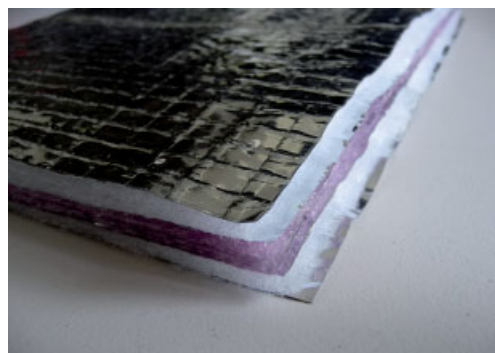


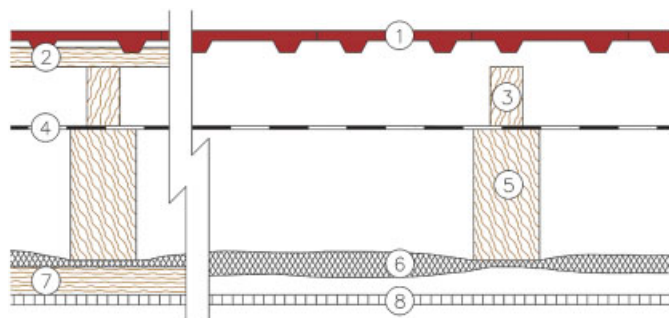
Bild 1. Infrarot reflektierendes Dämmmaterial (IR-Dämmung)
 Fig. 1. Infrared reflecting insulation material

2 Testbedingungen

Auf dem Freilandgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen stehen zwei baugleiche Gebäude in der Größe von typischen Einfamilienhäusern. Bild 2 zeigt die Südwest-Ansichten dieser sogenannten Experimentierhäuser. Sie sind verschattungsfrei angeordnet. Das Dach ist als 30° geneigtes Satteldach mit einem Mittelfirst ausgeführt. Die Dachflächen betragen jeweils ca. 98 m². Die Giebel-

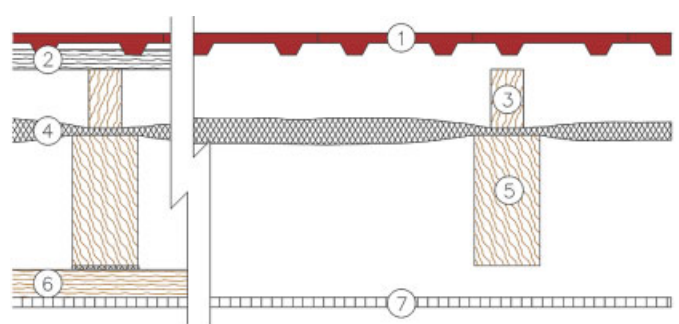


Bild 2. Experimentierhäuser auf dem Freilandgelände des Fraunhofer Instituts für Bauphysik in Holzkirchen
 Fig. 2. Test houses on the outdoor testing site of the Fraunhofer Institute for Building Physics in Holzkirchen



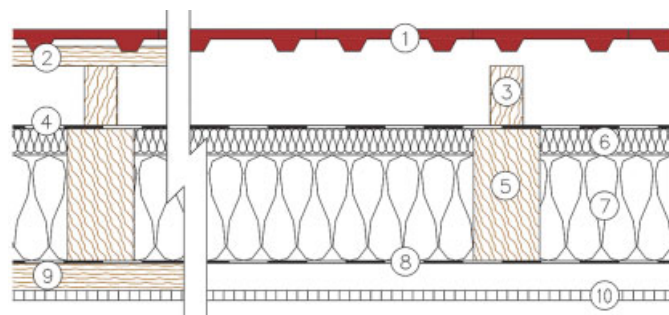
- ① DACHZIEGEL
- ② LATTUNG
- ③ KONTERLATTUNG
- ④ UNTERSANNBAHN
- ⑤ SPARREN 95/195
- ⑥ IR-REFLEKTIERENDE DÄMMUNG
- ⑦ LATTUNG
- ⑧ GIPSKARTON

Bild 3. IR-Dachaufbau 1 (Untersparrendämmung)
Fig. 3. IR roof construction 1 (under-rafter insulation)



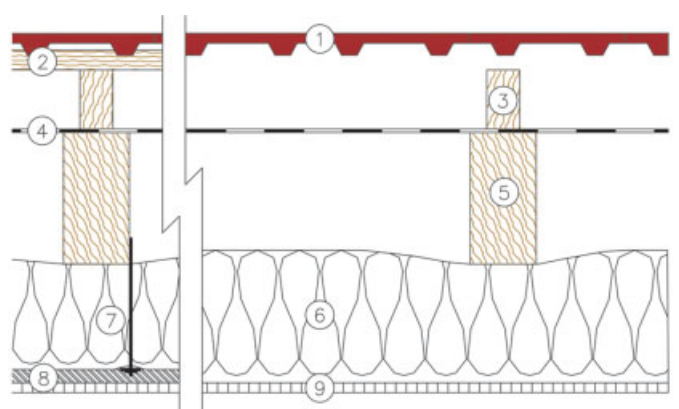
- ① DACHZIEGEL
- ② LATTUNG
- ③ KONTERLATTUNG
- ④ IR-REFLEKTIERENDE DÄMMUNG
- ⑤ SPARREN 95/195
- ⑥ LATTUNG
- ⑦ GIPSKARTON

Bild 4. IR-Dachaufbau 2 (Aufsparrendämmung)
Fig. 4. IR roof construction (over-rafter insulation)



- ① DACHZIEGEL
- ② LATTUNG
- ③ KONTERLATTUNG
- ④ UNTERSANNBAHN
- ⑤ SPARREN 95/195
- ⑥ MINERALWOLLE WLG 035 40 MM
- ⑦ MINERALWOLLE WLG 035 160 MM
- ⑧ DAMPFBREMSSE
- ⑨ LATTUNG
- ⑩ GIPSKARTON

Bild 5. Mineralwolle-Dachaufbau 1 (20 cm Zwischensparrendämmung, WLG 035)
Fig. 5. Mineral wool roof construction 1 (20 cm inter-rafter insulation, WLG 035)



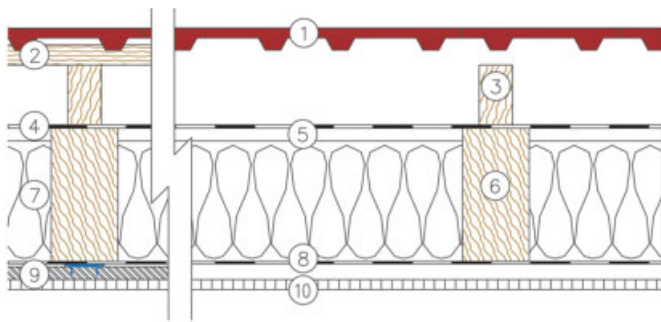
- ① DACHZIEGEL
- ② LATTUNG
- ③ KONTERLATTUNG
- ④ UNTERSANNBAHN
- ⑤ SPARREN 95/195 / BELÜFTETER ZWISCHENRAUM
- ⑥ MINERALWOLLE WLG 040 200 MM
- ⑦ BEFESTIGUNGSANKER
- ⑧ ALUMINIUMPROFIL
- ⑨ GIPSKARTON

Bild 6. Mineralwolle-Dachaufbau 2 (20 cm Untersparrendämmung, WLG 040, hinterlüftet)
Fig. 6. Mineral wool roof construction 2 (20 cm under-rafter insulation, WLG 040, ventilated)

wände sind in Ost- und Westrichtung orientiert. Für die Untersuchungen werden nur die Dachgeschosse der Häuser herangezogen, die jeweils nur aus einem Raum bestehen. Die Dachräume sind durch eine dicht schließende, gedämmte Luke über das Erdgeschoss erreichbar. Das Erdgeschoss wird während der Messungen auf 21 °C beheizt. Außerdem wird die Decke über dem Erdgeschoss gedämmt um Wärmeströme zwischen Dachgeschoss und Erdgeschoss zu vermeiden. Die Fenster in den Giebelwänden

sind gedämmt, von außen mit einem Rollladen und von innen mit einer Holzplatte verschlossen.

Von Dezember 2007 bis Mai 2009 werden verschiedene mehrwöchige Messperioden durchgeführt. Dabei werden zwei verschiedene Dachaufbauten mit IR-reflektierender Dämmung (IR-Dämmung) (Bild 3 und Bild 4) mit insgesamt drei verschiedenen Mineralwolle-Dachaufbauten (Bild 5, Bild 6 und Bild 7) unter verschiedenen Randbedingungen miteinander verglichen.



- ① DACHZIEGEL
- ② LATTUNG
- ③ KONTERLATTUNG
- ④ UNTERSPPANNBahn
- ⑤ BELÜFTETER ZWISCHENRAUM 15 MM
- ⑥ SPARREN 95/195
- ⑦ MINERALWOLLE WLG 035 180 MM
- ⑧ DAMPFBREMSE
- ⑨ ALUMINIUMPROFIL
- ⑩ GIPSKARTON

Bild 7. Mineralwolle-Dachaufbau 3 (18 cm Zwischensparrendämmung, WLG 035, hinterlüftet)

Fig. 7. Mineral wool roof construction 3 (18 cm inter-rafter insulation, WLG 035, ventilated)

3 Messaufbau

In beiden Häusern ist ein umfangreiches Mess- und Überwachungssystem installiert. Um das thermische Verhalten genau analysieren zu können, werden pro Haus jeweils 6 Messachsen eingerichtet: 3 auf der südlichen und 3 auf der nördlichen Dachseite (Bild 8). An allen Messachsen werden über den gesamten Querschnitt in jeder Bauteilschicht Temperatursensoren installiert. Die Mineralwolle erhält je nach Dämmstärke 3 bis 4 zusätzliche dazwischenliegende Temperatursensoren. In allen Messachsen werden Wärmestromscheiben auf der Gipskartonbeplankung angebracht. Die Messachsen sind jeweils in Feldmitte zwischen zwei Sparren angeordnet. An den Hauptmessachsen 2 und 5 werden zusätzlich die Wärmebrücken (Kreuzungspunkt Sparren – Lattung) untersucht. Um alle Wärmeverluste zu erfassen, werden auch an Giebelwänden, Kniestöcken und am Boden Wärmeströme und Oberflächentemperaturen gemessen. Die Lufttemperatur wird an fünf Stellen auf drei verschiedenen Höhen erfasst. Außerdem werden Luftfeuchte und operative Temperatur gemessen. Während der

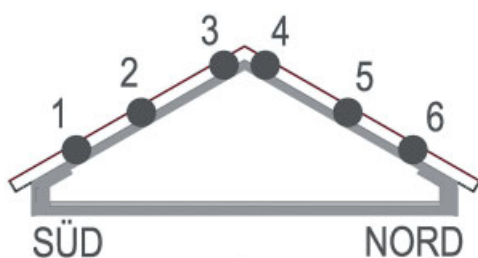


Bild 8. Messachsen

Fig. 8. Measurement axes

Wintermessperioden werden die Dachräume elektrisch auf 21 °C geheizt. Die Leistung der Radiatoren wird erfasst und dient als Größe für den Wärmeverlust. Während der Sommermessungen werden alle maßgebenden Kühl- bzw. Lüftungsmessdaten erfasst. Die meteorologischen Randbedingungen werden von der institutseigenen Wetterstation gemessen.

4 Heizenergieverbrauch bei verschiedenen Dachaufbauten

Im Winter 2007/2008 werden in drei Messphasen der IR-Dachaufbau 1 mit innenliegender IR-Dämmung (Bild 3) mit drei verschiedenen Mineralwolle-Dachaufbauten verglichen:

1. IR-Dachaufbau 1 (Bild 3) – Mineralwolle-Dachaufbau 1 (Bild 5) (11.12.2007 bis 21.1.2008),
2. IR-Dachaufbau 1 (Bild 3) – Mineralwolle-Dachaufbau 2 (Bild 6) (19.2.2008 bis 6.3.2008),
3. IR-Dachaufbau 1 (Bild 3) – Mineralwolle-Dachaufbau 3 (Bild 7) (22.3.2008 bis 30.4.2008).

In allen drei Messphasen werden beide Dachräume mit elektrischen Radiatoren auf 21 °C beheizt. Die dafür benötigte Heizenergie dient als Größe für den Wärmeverlust. In Tabelle 1 wird der Gesamtenergieverbrauch der beiden Dachräume für alle drei Messperioden einander gegenübergestellt: Transmissionswärmeverluste über alle Hüllflächen außer dem Dach, Infiltrationswärmeverluste, Heizenergieverbrauch und Transmissionswärmeverluste über die Dachflächen (berechnet über die Energiebilanz). Die Wärmeverluste über die Hüllflächen – außer dem Dach – sind während aller drei Messperioden durch die hohe Wärmedämmung klein. Auch durch Infiltration geht aufgrund der hohen Luftdichtheit der Gebäude sehr wenig Wärme verloren. Durch Erstellen einer Energiebilanz können die Wärmeverluste durch das Dach ermittelt werden. In allen drei Messperioden verbraucht der IR-Dachraum etwa doppelt soviel Heizenergie wie der Mineralwolle-Dachraum. Vergleicht man nur die Wärmeverluste über die Dachflächen, so ergeben sich in allen drei Messperioden durch das IR-Dach etwa 2,5 mal so hohe Wärmeverluste wie durch das Mineralwolldach. Diese Aussagen beziehen sich auf die kumulierten Werte der jeweiligen Messperiode.

Die Analyse einzelner Tage mit extremen Wetterbedingungen (strahlungsarm – strahlungsreich, windstill – sehr windig) zeigt auch Schwankungen dieser Faktoren: Bei hoher solarer Einstrahlung und starkem Wind ändert sich das Verhältnis zugunsten des IR-Dachs. Bei viel Wind kann die Mineralwolle im Außenbereich luftdurchströmt werden. Damit reduziert sich die Dämmwirkung der Mineralwolle-Dämmung. Die äquidistant installierten Temperatursensoren zeigen: Der Temperaturverlauf über den Dämmungsquerschnitt ist nicht mehr linear.

Der Einfluss der Strahlung wird am Beispiel eines strahlungsreichen Tages (8. Januar 2008) dargestellt. Bild 9 zeigt die vorherrschenden Wetterbedingungen. An diesem Tag reduziert sich durch die Strahlung das Verhältnis des Heizenergieverbrauchs zwischen IR-Dachraum und Mineralwolle-Dachraum: Heizenergieverbrauch IR-Dachraum zu Mineralwolle-Dachraum ist nachts ungefähr 2,1, nachmittags unter Solareinstrahlung nur noch 1,8. In Bild 9 zeigt das untere Diagramm den Verlauf der Wärme-

Tabelle 1. Energiebilanz Winter 2007/2008 (Vergleich verschiedener Dachaufbauten)
 Table 1. Energy balance winter 2007/2008 (comparison of different roof constructions)

Winter 2007/2008 Energiebilanz der einzelnen Messperioden	11.12.2007–21.1.2008 (41 Tage \approx 984 h)		19.2.2008–6.3.2008 (17 Tage \approx 408 h)		22.3.2008–30.4.2008 (17 Tage \approx 408 h)	
Klimabedingungen (Mittelwert): Außentemperatur	-2,0 °C		-4,9 °C		-5,4 °C	
Globalstrahlung	46 W/m ²		108 W/m ²		162 W/m ²	
Windgeschwindigkeit	2,1 m/s		3,9 m/s		3,0 m/s	
Dach	MW-Dach- raum 1	IR-Dach- raum 1	MW-Dach- raum 2	IR-Dach- raum 1	MW-Dach- raum 3	IR-Dach- raum 1
Wärmeverluste Giebel, Kniestöcke, Decke EG (berechnet über gemessene Wärmeströme)	172 kWh	184 kWh	47 kWh	57 kWh	108 kWh	121 kWh
Wärmeverluste durch Infiltrations- luftwechsel (nach EN 832 [1] mit Hilfe einer Tracer-Gas-Messung)	33 kWh	45 kWh	33 kWh	17 kWh	50 kWh	23 kWh
Heizenergieverbrauch (gemessen)	617 kWh 100 %	1264 kWh 205 %	195 kWh 100 %	369 kWh 189 %	439 kWh 100 %	806 kWh 184 %
Wärmeverluste über das Dach (berechnet über die Energiebilanz)	412 kWh 100 %	1035 kWh 251 %	115 kWh 100 %	295 kWh 257 %	281 kWh 100 %	662 kWh 236 %

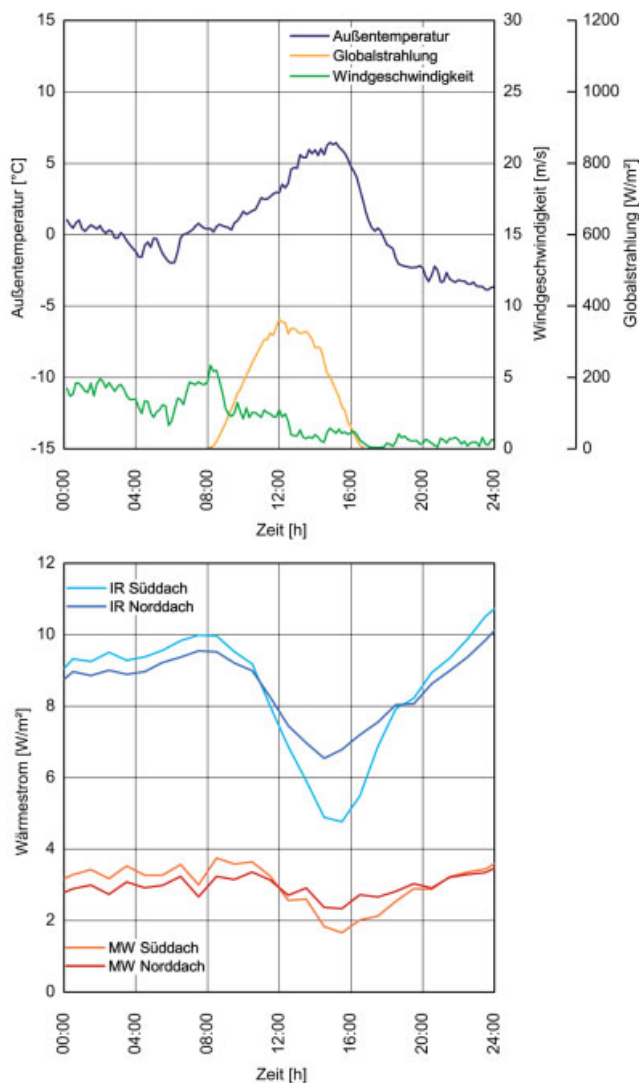


Bild 9. Wetterbedingungen und Wärmeströme an einem strahlungsreichen Tag (8. Januar 2008)
 Fig. 9. Weather conditions and heat flows on a day with high solar radiation (8 January 2008)

ströme von innen nach außen am 8. Januar. Dabei sind die Mittelwerte über alle 3 Messachsen für das Nord- und das Süddach getrennt dargestellt. Nachts sind die Wärmeverluste über das IR-Dach ungefähr dreimal so hoch wie über das Mineralwolle-Dach. Tagsüber reduzieren sich die Wärmeströme durch den Anstieg der Außentemperatur (Nord- und Süddach) und den Einfluss der Solarstrahlung (Süddach). Beim IR-Dach ist die absolute Reduktion der Wärmeströme durch die Solareinstrahlung deutlich größer als beim Mineralwolle-Dach. Das ist typisch für einen Dachaufbau mit geringerer Dämmwirkung.

5 Heizenergieverbrauch bei verschiedenen Luftdichtheiten

Im Winter 2008/2009 soll der Einfluss der Luftdichtheit auf das Verhältnis des Energieverbrauchs der Dachräume bestimmt werden. Dabei wird der IR-Dachaufbau 2 mit außenliegender IR-Dämmung (Bild 4) und der Mineralwolle-Dachaufbau 3 (Bild 7) untersucht. Es werden drei Perioden mit unterschiedlichen Luftdichtheiten gemessen:

1. sehr luftdicht ($n_{50} \approx 0,7 \text{ h}^{-1}$),
2. Grenzwert nach EnEV [2] für natürlich belüftete Gebäude ($n_{50} \approx 3 \text{ h}^{-1}$),
3. nicht luftdicht ($n_{50} \approx 10 \text{ h}^{-1}$).

Die Dachräume werden mit elektrischen Radiatoren auf 21 °C beheizt und der dazu benötigte Energieverbrauch gemessen. In Tabelle 2 sind die Wärmeverluste und der Heizenergieverbrauch beider Dachräume für alle 3 Messperioden zusammengefasst. Bei allen drei Luftdichtheiten ist der Heizenergieverbrauch des IR-Dachraums mehr als doppelt so hoch wie der des Mineralwolle-Dachraums. Die Wärme, die über das Dach verloren geht, lässt sich durch die Energiebilanz berechnen. In allen drei Messperioden sind die Wärmeverluste über das IR-Dach mehr als dreimal so hoch wie über das Mineralwolle-Dach. Der Einfluss der Luftdichtheit hat also keinen erkennbaren Einfluss auf das Verhältnis des kumulierten Heizenergieverbrauchs der bei-

Tabelle 2. Energiebilanz Winter 2008/2009 (Vergleich verschiedener Luftdichtigkeiten)

Table 2. Energy balance winter 2008/2009 (comparison of different air-tightness rates)

Winter 2008/2009 Energiebilanz der einzelnen Messperioden	$n_{50} \approx 0,7 \text{ h}^{-1}$ 48 Tage \approx 1152 h)		$n_{50} \approx 3 \text{ h}^{-1}$ 36 Tage \approx 864 h)		$n_{50} \approx 10 \text{ h}^{-1}$ 44 Tage \approx 1056 h)	
Klimabedingungen (Mittelwert):						
Außentemperatur	-2,2 °C		-1,0 °C		-8,6 °C	
Globalstrahlung	44 W/m ²		84 W/m ²		199 W/m ²	
Windgeschwindigkeit	2,1 m/s		3,6 m/s		2,8 m/s	
Dach	MW-Dach- raum 3	IR-Dach- raum 2	MW-Dach- raum 3	IR-Dach- raum 2	MW-Dach- raum 3	IR-Dach- raum 2
Wärmeverluste Giebel, Kniestöcke, Decke EG (berechnet über gemessene Wärmeströme)	200 kWh	205 kWh	160 kWh	138 kWh	82 kWh	70 kWh
Wärmeverluste durch Infiltrations- luftwechsel (nach EN 832 [1] mit Hilfe einer Tracer-Gas-Messung)	116 kWh	128 kWh	174 kWh	146 kWh	bei der sehr geringen Luftdichtigkeitsehr stark schwankend	
Heizenergieverbrauch (gemessen)	790 kWh 100 %	1787 kWh 226 %	642 kWh 100 %	1336 kWh 208 %	426 kWh 100 %	852 kWh 200 %
Wärmeverluste über das Dach (berechnet über Energiebilanz bzw. bei $n_{50} \approx 10 \text{ h}^{-1}$ berechnet über gemessene Wärmeströme)	474 kWh 100 %	1454 kWh 307 %	308 kWh 100 %	1052 kWh 342 %	205 kWh 100 %	687 kWh 335 %

den Dachräume, vorausgesetzt, beide Dachräume besitzen die gleiche Luftdichtheit. Dieses Verhältnis ändert sich allerdings unter Einfluss von Wind. An windreichen Tagen verringert sich das Verhältnis zugunsten des IR-Dachraums, was sich auf die reduzierte Dämmwirkung der Mineralwolle durch Luftdurchströmung erklärt. Das Verhältnis des Heizenergieverbrauchs bzw. der Wärmeverluste beider Dachräume ist in diesem Winter größer als im vorherigen Winter. Der IR-Dachaufbau 2008/2009 (Bild 4) hat mit nur einer angrenzenden ruhenden Luftschicht eine schlechtere Dämmwirkung als der IR-Dachaufbau 2007/2008 (Bild 3) mit zwei angrenzenden ruhenden Luftschichten.

6 Wärmedurchlasswiderstände R in-situ und im Labor

Für die Dämmmaterialien der ersten Messperiode im Winter 2007/2008 bestimmt die akkreditierte Prüfstelle des IBP, Institutsteil Stuttgart, die Wärmeleitfähigkeiten bzw. die Wärmedurchlasswiderstände nach gängigen Prüfverfahren. In Tabelle 3 sind die Wärmedurchlasswiderstände R, die für die Dämmmaterialien ermittelt wurden, darge-

stellt. Für die IR-Dämmung ergibt sich nach dem Hot-Box-Verfahren, bei dem die Dämmung vertikal eingebaut wird, ein doppelt so hoher Wert wie bei der Messung mit dem Plattengerät, bei der die Dämmung horizontal zusammengedrückt eingebaut ist. Diese verschiedenen Werte können für die entsprechenden Positionen im Dach angesetzt werden: in Feldmitte entspricht der Aufbau dem vertikalen Aufbau, am Sparren, auf dem die Dämmung durch die Befestigung zusammengedrückt ist, empfiehlt sich der niedrigere Wert aus der Messung mit dem Plattengerät. So werden die Werte auch in die folgenden Simulationsrechnungen eingesetzt. Zusätzlich wird der Emissionsgrad der IR-reflektierenden Dämmfolie gemessen.

Wesentlich ist, ob die mit gängigen Prüfverfahren ermittelten Wärmekennwerte auch für die IR-Dämmung gelten. Dazu sollen die Wärmedurchlasswiderstände, die sich mit Hilfe der im Labor gemessenen Kennwerte errechnen lassen, mit den In-situ-Wärmedurchlasswiderständen, die sich aus der Messung ergeben, verglichen werden. Herangezogen wird der Gesamtquerschnitt der Dachaufbauten von der Dachhaut bis zur Gipskartonbeplankung.

Tabelle 3. Laborwerte

Table 3. Laboratory values

Material	Mineralwolle	IR-reflektierende Dämmung	
Wärmedurchlasswiderstand R [m ² K/W]	5,69	1,00	0,5
Messverfahren	gemessen mit dem Plattengerät gemäß DIN EN 12 667 Einbau: horizontal	gemessen in der Hotbox nach DIN 52 611-1 Einbau: vertikal	gemessen mit dem Plattengerät gemäß DIN EN 12667 Einbau: horizontal
Emissionsgrad ϵ [-]	nicht gemessen	0,05	

Der Wärmedurchlasswiderstand setzt sich zusammen aus den R-Werten der einzelnen Schichten. Dabei werden die R-Werte der Luftschichten nach DIN EN ISO 6946 [3] mit $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei Oberflächen mit hohem langwelligen Emissionsgrad und $0,51 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei Oberflächen mit niedrigem langwelligen Emissionsgrad angesetzt. In Summe ergibt sich für den gesamten Dachaufbau von Dachhaut bis Gipskartonbeplankung mit der Mineralwolle-Dämmung $R = 6,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ und mit der IR-Dämmung $R = 2,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Tabelle 4). Der Wärmedurchlasswiderstand des IR-Dachaufbaus wird somit zu etwa 50 % aus den Wärmedurchlasswiderständen der an die IR-Dämmfolie grenzenden Luftschichten gebildet.

Zum Vergleich sollen die In-situ-Wärmedurchlasswiderstände R_{insitu} für beide Dachaufbauten bestimmt werden. Die Norm ISO 9869 „Vorortmessung des Wärmedurchlasswiderstandes und des Wärmedurchgangskoeffizienten“ [4] beschreibt die Wärmestrommethode zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes. Dieses Verfahren liefert keine hochgenauen Werte, erlaubt aber eine Abschätzung unter realen Bedingungen. In der ersten Messperiode im Winter 2007/2008 herrschen am 11. und 12. Dezember 2007 konstante Wetterbedingungen (Bild 10), die sich zur Bestimmung des In-situ -Wärmedurchlasswiderstands eignen. Die Zeitspanne vom 11. Dezember 18 Uhr bis zum 12. Dezember 6 Uhr soll angesetzt werden um die In-situ-Wärmedurchlasswiderstände zu bestimmen. In Anlehnung an die ISO 9869 [4] erfolgt die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands R bei konstanten Bedingungen nach

$$R = (\vartheta_{\text{si}} - \vartheta_{\text{se}})/q$$

mit

- ϑ_{si} Oberflächentemperatur innen [°C]
- ϑ_{se} Oberflächentemperatur außen [°C]
- q Wärmestromdichte [W/m^2].

Mit den entsprechenden Messgrößen ergeben sich die In-situ-Wärmedurchlasswiderstände der Dachkonstruktionen. Die Mittelwerte der In-situ-Wärmedurchlasswiderstände

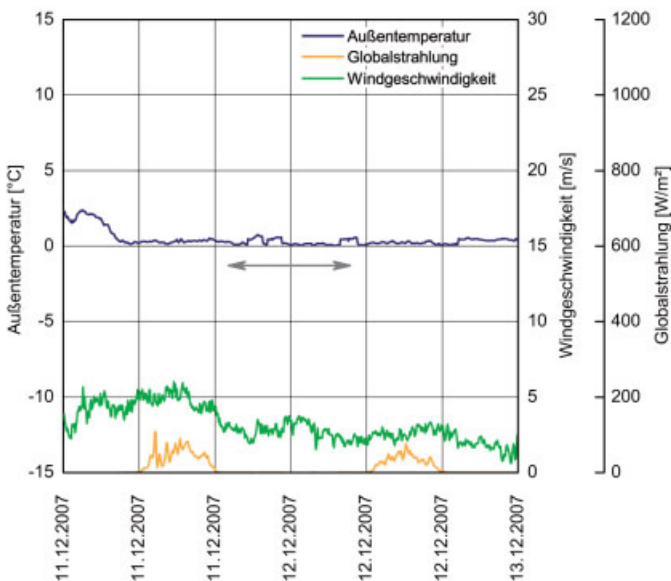


Bild 10. Wetterbedingungen vom 11. und 12. Dezember 2007
Fig. 10. Weather conditions on 11 and 12 December 2007

Tabelle 4. Ermittlung der Wärmedurchlasswiderstände
Table 4. Determination of thermal resistance

	Mineralwolle	IR-reflektierende Dämmung
Dachquerschnitt		
Wärmedurchlasswiderstände R [$\text{m}^2\text{K/W}$] (berechnet aus Labor-daten)	6,0	2,1
In situ-Wärmedurchlasswiderstände R_{insitu} [$\text{m}^2\text{K/W}$] (Mittelwert aus allen 6 Messachsen)	6,4	2,0

aus allen 6 Messachsen (Bild 8) sind ebenfalls in Tabelle 4 dargestellt: Mineralwolle-Dach $R_{\text{insitu}} = 6,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ und IR-Dach $R_{\text{insitu}} = 2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$. Die rechnerisch ermittelten R-Werte stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit mit den In-situ-R-Werten überein. Die Vorortmessung des Wärmedurchlasswiderstands bestätigt also die Labormessungen. D. h. auch bei der IR-Dämmung können die Wärmekennwerte durch gängige Labormethoden ermittelt werden.

7 Sommerfall

7.1 Messungen unter Sommerbedingungen

Die beiden Dachräume werden auch im Sommer 2008 parallel vermessen. Dazu werden verschiedene Randbedingungen gewählt: mit und ohne Kühlung, mit und ohne mechanische Lüftung, mit verschiedenen internen Wärmequellen, mit und ohne simuliertes Dachfenster. Unter den vorherrschenden klimatischen Randbedingungen lassen sich aus den Sommermessungen keine eindeutigen Rückschlüsse ziehen. Verschiedene Einflüsse, die abhängig sind von den Außentemperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht überlagern sich teilweise. Insgesamt ist das thermische Verhalten des IR-Dachraums typisch für einen Dachraum mit einer geringer gedämmten Dachkonstruktion: Eine höhere Aufheizung an warmen Tagen steht einer höheren Abkühlung in kühlen Nächten gegenüber. Die qualitative Bewertung der Dämmprodukte kann hier nicht anhand von Summenwerten zur thermischen Konditionierung der Räume (Kühlenergiebedarf, Lüftungsbedarf usw.) erfolgen. Eine ausschließliche Betrachtung von Gesamtenergiebedarfswerten lässt aufgrund der teilweise gegenläufigen Effekte keine aussagekräftigen Rückschlüsse auf die Dämmqualität einzelner Produkte ziehen. Je nach vorhandener Klimasituation und gewählten Randbedingungen (gewünschte maximale Raumtemperatur, Höhe der internen Wärmequellen, Lüftungs- und Kühlstrategien) können sich trotz unveränderter Aufbauten völlig unterschiedliche Gesamtenergiebedarfswerte ergeben.

Um die verschiedenen Einflüsse einzeln bewerten zu können, werden Simulationsrechnungen durchgeführt.

Dabei können einzelne Randbedingungen variiert und bewertet werden. Die Messungen werden zur Validierung des Simulationsmodells herangezogen.

7.2 Simulationen unter Sommerbedingungen

Um die in den Freiland-Untersuchungen gefundenen Ergebnisse auf ein breiteres Spektrum von Randbedingungen extrapolieren zu können, werden dynamische Simulationsrechnungen (TRNSYS 16) durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser rechnerischen Untersuchung liegt auf dem Einfluss eines warmen Sommerklimas. Um ein zuverlässiges numerisches Modell des in den Messungen untersuchten Dachraumes zu erhalten, wird das Modell sorgfältig an Hand der gewonnenen Versuchsmessdaten validiert. Für den Sommerfall geschieht dies anhand der Verläufe der Innenraumtemperaturen (Bild 11). Hierfür werden die Raumlufttemperaturen an fünf Stellen gemessen: In der Raummitte in den Höhen 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m und an den Seiten des Raumes unter dem Giebel auf 1,7 m Höhe. Man kann an dem Beispiel in Bild 11 sehr gut erkennen, dass die errechneten Raumlufttemperaturen stets innerhalb des gemessenen Temperaturbereiches liegen.

In dieser Untersuchung wird der Nutzkältebedarf für die Aufrechterhaltung einer bestimmten Raumlufttemperatur als Merkmal für die energetische Qualität unterschiedlicher Varianten herangezogen. Um mit den Konstruktionen der Sommermessungen auch eine Validierung eines Nutzenenergiebedarfs durchführen zu können, werden die verbrauchten und die errechneten Nutzwärmemengen der Wintermessungen miteinander verglichen (Tabelle 5). Hier zeigt sich, dass die Abweichungen stets unter 10 % für den Mineralwolldachraum und unter 5 % für den IR-Dachraum liegen. Die Qualität dieser Ergebnisse zeigt eindeutig, dass es problemlos möglich ist, IR-Foliendämmstoffe mit herkömmlichen, numerischen Methoden rechnerisch zu bewerten.

Folgende Randbedingungen sollen in den Simulationen variiert werden:

Tabelle 5. Vergleich der Nutzwärmemengen von gemessenem Verbrauch und errechnetem Bedarf

Table 5. Comparison of net heating energy of the measured consumption and the calculated demand

Messperiode	Haus	Verbrauch (Messung) [kWh]	Bedarf (Rechnung) [kWh]	Abweichung
Winter 1	IR	1244	1268	1,9 %
Winter 1	MW	597	647	8,4 %
Winter 2	IR	806	773	4,1 %
Winter 2	MW	439	413	5,9 %

- Außenklima: Carpentras/ Frankreich, Porto/ Portugal, Madrid/ Spanien,
- Infiltrationsluftwechsel: 0 bis 1 h⁻¹,
- maximal zulässige Raumtemperatur,
- Fensterflächen und deren Orientierung,
- die internen Wärmequellen.

Um den Einfluss eines heißen Außenklimas bewerten zu können, werden drei südeuropäische Städte ausgewählt: Carpentras (F), Porto (P) und Madrid (ES). Diese drei südlichen Klimata werden miteinander und mit einem durchschnittlichen und einem extrem heißen deutschen Sommer verglichen. In Bild 12 kann man erkennen, dass in allen Klimazonen mit einem nennenswerten Nutzkältebedarf der Mineralwolle-Dachraum stets weniger Energie benötigt als der IR-Dachraum, um eine Temperatur ≤ 26 °C zu halten. Dies entspricht dem Verhalten nach gängiger Theorie, da der höhere Wärmedurchlasswiderstand der Mineralwoll-Konstruktion das heiße Außenklima am Eindringen in das Gebäude hindert. Aus diesem gleichartigen Verhalten kann geschlossen werden, dass die Ergebnisse die im Folgenden mit dem Klima Madrids gewonnen werden, für sämtliche heißen Klimazonen Gültigkeit besitzen werden.

Der Basisvariante liegt ein Infiltrations-Luftwechsel von 0,3 h⁻¹ zu Grunde. Um den Einfluss der Infiltration

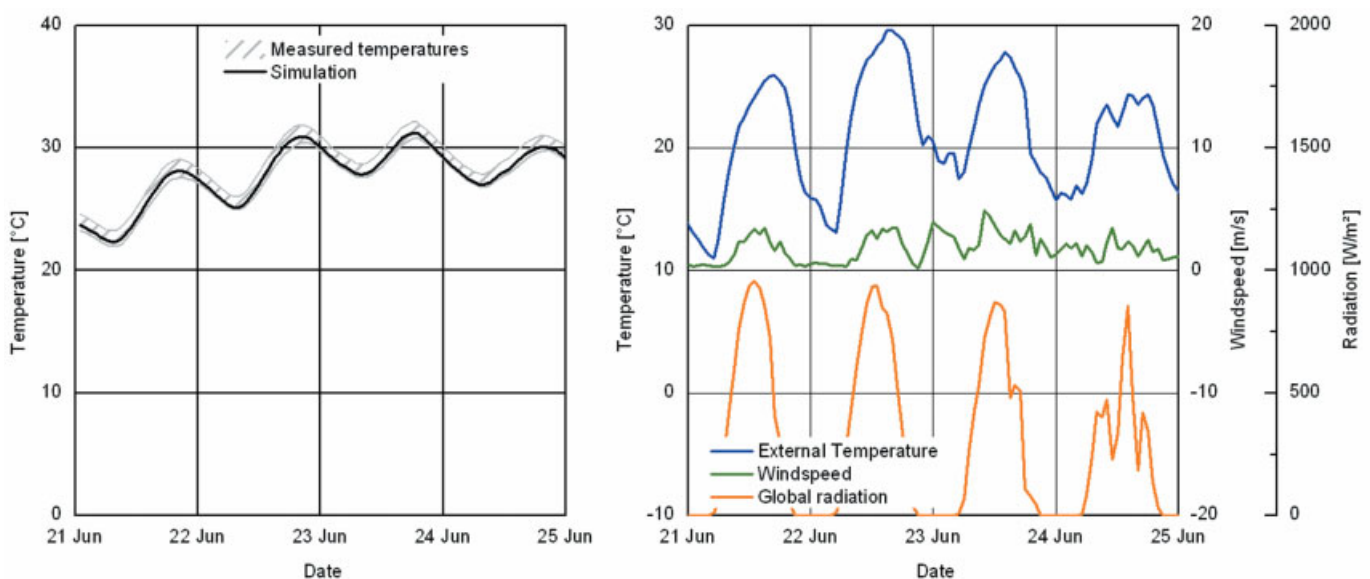


Bild 11. Gemessene und errechnete Raumlufttemperaturen vom 21. bis 25. Juni für den IR-Dachraum und das dazugehörige Außenklima.

Fig. 11. Measured and calculated indoor air temperatures of the reflective insulation attic and the prevailing weather conditions on June 21 to 25.

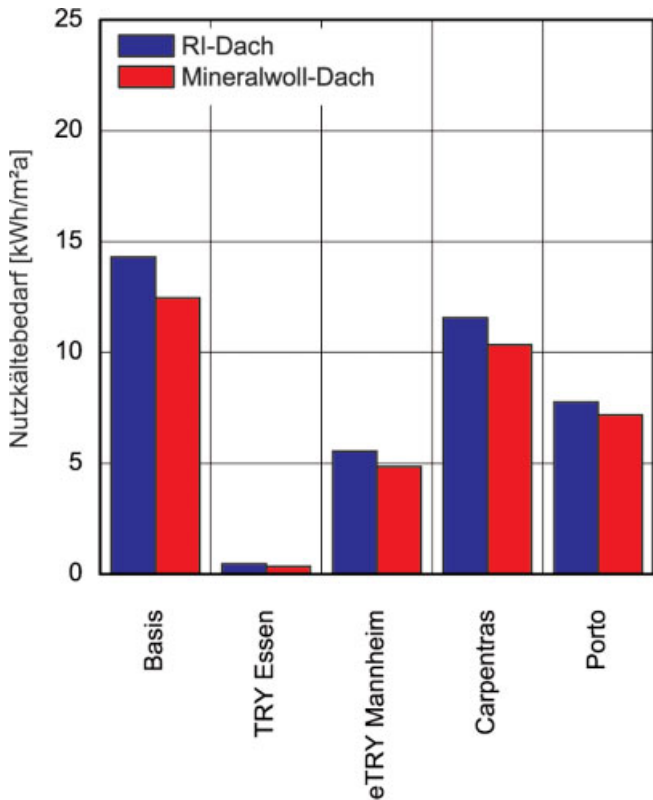


Bild 12. Einfluss des Außenklimas auf den Nutz-kältebedarf des mit Folie gedämmten (blaue Säule) und des mit Mineralwolle gedämmten (rote Säule) Dachraumes (Basisvariante Madrid).

Fig. 12. Influence of the outdoor climate on the net cooling energy demand of the attics (basic variation is Madrid) insulated by foil (blue column) and by mineral wool (red column).

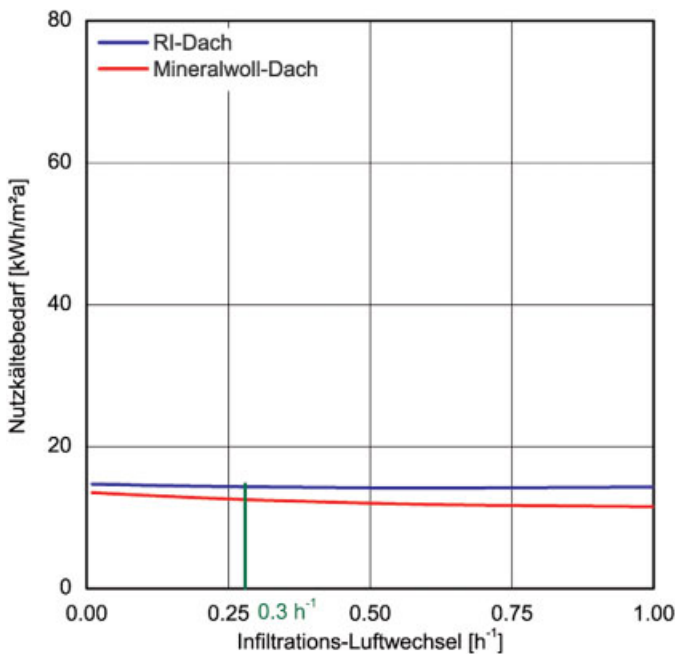


Bild 13. Nutz-kältebedarf in Abhängigkeit von der Infiltrations-Luftwechselrate. Raumtemperatur 26 °C. Die grüne Linie markiert die Werte der Basis-Variante (Madrid).

Fig. 13. Net energy demand for cooling in dependence of the air infiltration, indoor temperature 26 °C. The green line marks the values of the basic variation (Madrid).

auf das sommerliche Gebäudeverhalten zu untersuchen wird dieser Luftwechsel von 0,0 bis 1,0 h⁻¹ variiert. Wie man in Bild 13 erkennen kann, ist bei jedem betrachtetem Luftwechsel der Kühlenergiebedarf der IR-Folien-Konstruktion der höhere. Zudem ist der Einfluss in dem heißen Klima Madrids generell sehr gering. An dem Tagesgang des Kältebedarfs zeigt sich, dass durch eine höhere Infiltration tagsüber zwar mehr heiße Luft in das Gebäude gelangt, der Dachraum dafür aber nachts stärker ausgekühlt wird.

Um sicher zu gehen, dass die stärkere nächtliche Auskühlung der IR-Folienkonstruktion bei einer veränderten Raumtemperatur nicht dominanter wird und somit das energetische Verhalten der beiden untersuchten Dachkonstruktionen umkehrt, ist in Abbildung 14 für beide Konstruktionen der Nutz-kältebedarf in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Raumlufttemperatur dargestellt. Auch hier bleibt der Energiebedarf der IR-Folien-Dämmung stets über dem des Mineralwolle-Daches.

Die Fenster des Simulationsmodells sind „verschlossen“, wie während der Messungen. Um sicher zu gehen, dass diese Maßnahme das Ergebnis nicht maßgebend beeinflusst, wird ebenfalls ein je 1 m² großes Fenster in der östlichen und der westlichen Giebelwand betrachtet (Bild 15). Naturgemäß erhöht sich der Nutz-kältebedarf durch die zusätzlichen solaren Gewinne, die Dominanz der IR-Folien-Konstruktion bezüglich des Energiebedarfs bleibt jedoch bestehen, auch unabhängig von der Ausrichtung des Dachraums.

Um zu klären, ob und welches tägliche Profil für die internen Wärmequellen kritisch ist, wird eine Variante mit konstanten internen Wärmequellen und eine Variante mit einem Tagesgang nach Bild 16 untersucht. Es zeigt sich,

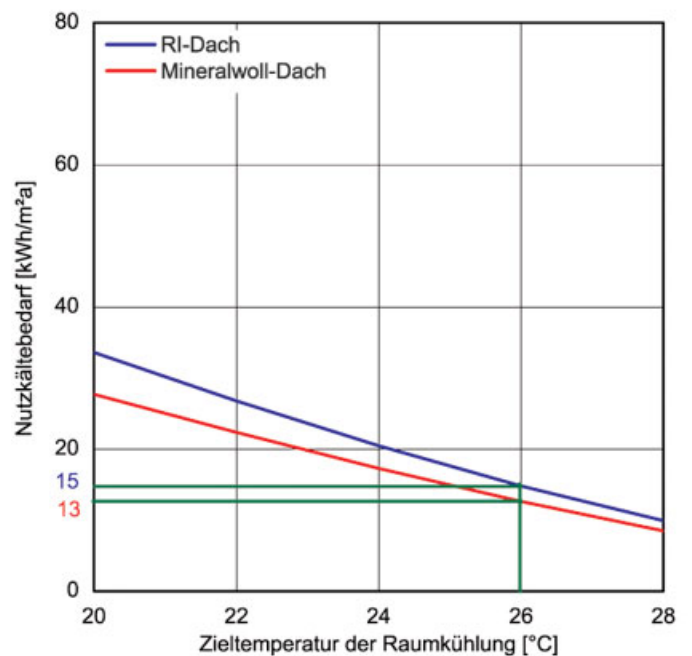


Bild 14. Nutz-kältebedarf in Abhängigkeit von der eingestellten Ziel-Temperatur der Raumkühlung. Infiltrationsluftwechsel 0,3 h⁻¹; interne Wärmequellen 5 W/m². Die grüne Linie markiert die Werte der Basisvariante (Madrid, 26 °C).

Fig. 14. Net cooling demand in dependence of the adjusted target temperature of room cooling. Infiltration rate 0,3 h⁻¹, internal heat sources 5 W/m². The green line marks the values of the basic variation (Madrid, 26 °C)

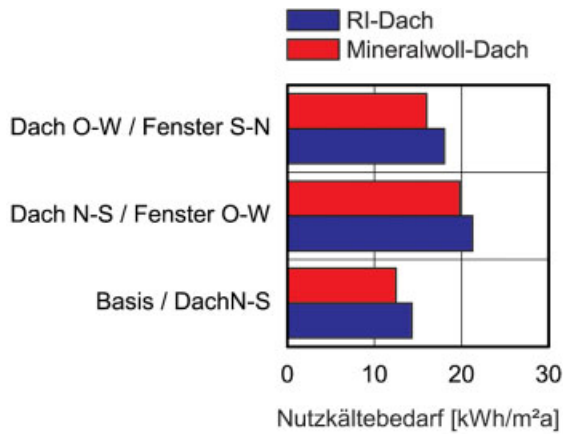


Bild 15. Einfluss von Fensterflächen und ihrer Orientierung auf den Nutzkältebedarf des IR- und des mit Mineralwolle gedämmten Dachraums

Fig. 15. Influence of window surfaces and orientation on the net cooling energy demand of the IR and the MW attic

dass der Unterschied nicht größer als 5 % wird. Aus diesem Grund wird in der weiteren Untersuchung mit konstanten Wärmequellen gearbeitet. Als entscheidender Einfluss bezüglich des Nutzkältebedarfs zeigt sich die Höhe der internen Wärmequellen. In Bild 17 ist erkennbar, dass es ab einer Höhe der internen Wärmequellen von 10,1 W/m² einen Schnittpunkt der beiden Linien des Nutzkältebedarfs gibt. Bei höheren Wärmequellen weist nun die Mineralwolle-Konstruktion den höheren Nutzkältebedarf auf. Bei derartig hohen internen Wärmequellen wird das Potential zur Energieabgabe nach außen so groß, dass die erhöhte Auskühlung durch die geringer gedämmten Dachflächen (IR-Dachraum) die solaren Wärmeeinträge während der heißen Tagesstunden überwiegt. Für die Rechenvariante mit Fenstern liegt dieser Schnittpunkt bei 8,6 W/m².

An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die normative Höhe der internen Wärmequellen für Wohngebäude zwischen 2,1 W/m² (DIN V 18599-10:2007-02 [5])

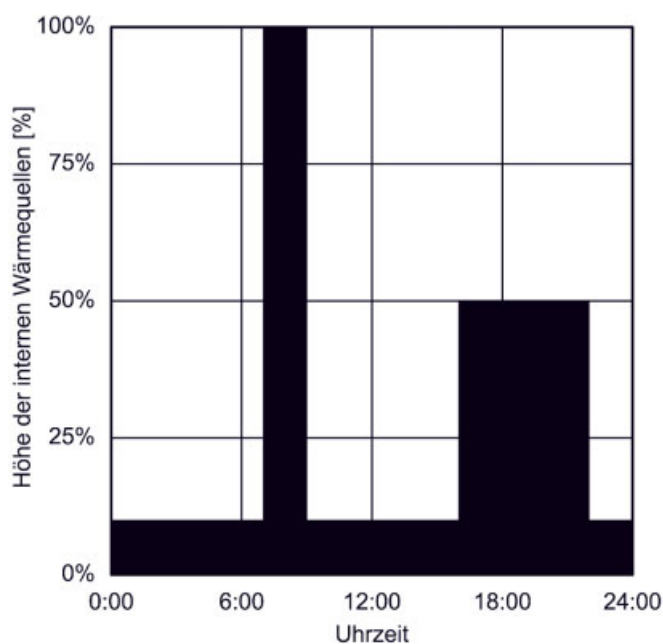


Bild 16. Tägliches Lastprofil der internen Wärmequellen

Fig. 16. Daily load profile of the internal heat sources

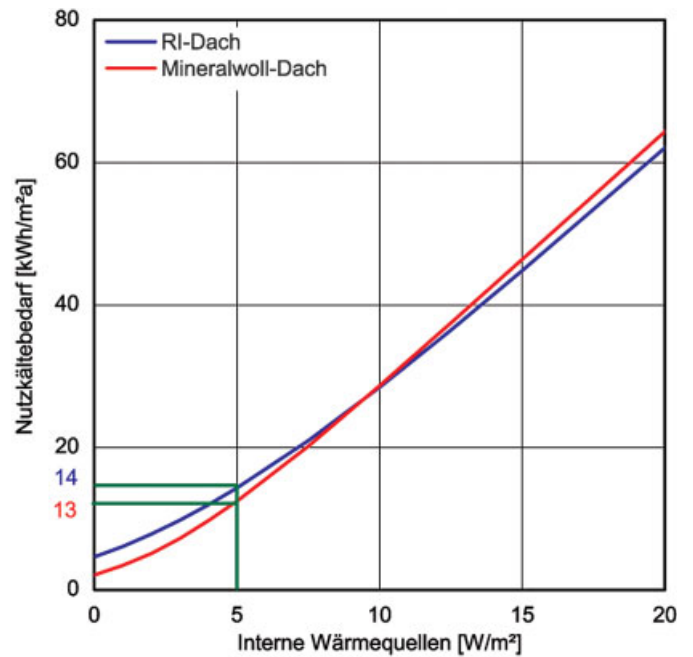


Bild 17. Nutzkältebedarf in Abhängigkeit von der Höhe der internen Lasten. Infiltrationsluftwechsel 0,3 h⁻¹; Raumtemperatur 26 °C. Die grüne Linie markiert die Werte der Basis-Variante (5 W/m²).

Fig. 17. Net cooling energy demand in dependence of the height of the internal loads, infiltration rate 0.3 h⁻¹. Indoor temperature 26 °C. The green line marks the values of the basic variation (5 W/m²).

und 5 W/m² (DIN 4108-2:2003-07 [6]) liegt und sie somit deutlich geringer anzusetzen ist als die gefundenen Schnittpunkte. Solche internen Wärmequellen treten ausschließlich bei Nichtwohngebäuden wie Bürobauten auf, allerdings lassen die Randbedingungen dieser Simulation in keinem Fall eine direkte Übertragung auf diese Gebäudetypen zu.

Eine zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigt keinerlei Verhalten, das einer Bewertung nach den gängigen Methoden der Norm entgegensteht. Es muss lediglich beachtet werden, dass die anzusetzenden Wärmedurchlasswiderstände entsprechend ihrer Einbausituation ermittelt werden müssen: für den gequetschten Einbau mit dem Hot-Plate-Verfahren und für den freien Einbau zwischen zwei Luftschichten mit der Hot-Box-Methode. Beim freien Einbau muss zusätzlich zu dem R-Wert aus der Hot-Box-Messung noch die IR-reflektierende Eigenschaft der IR-Dämmungsoberfläche berücksichtigt werden. Wie die Modellvalidierung zeigt, lässt sich sowohl das ganzjährige als auch das tägliche Verhalten eines Bauteils mit IR-Dämmung sehr gut mit dem konventionellen Ansatz eines normativen Wärmedurchlasswiderstands abbilden. Auch der höhere Nutzkältebedarf der IR-Konstruktion mit geringerem Wärmedurchlasswiderstand, der nach den Rechenmethoden der Normung erwartet werden muss, findet sich als eindeutige Tendenz in den Ergebnissen dieser Simulationsuntersuchung wieder.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In umfangreichen Untersuchungen werden verschiedene IR-Dachaufbauten mit verschiedenen Mineralwolle-Dachaufbauten verglichen. Die Ergebnisse der parallelen Mes-

sungen an den baugleichen Experimentierhäusern zeigen, dass auch die Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien mit den bekannten Regeln der Bauphysik abgebildet werden können. Auch die vielfältigen Simulationsrechnungen und die Validierung der zugehörigen numerischen Modelle bestätigen diese Erkenntnis.

Der IR-Dachraum verbraucht in allen Messperioden durchschnittlich mehr als das Doppelte an Heizenergie. Das heißt: Die Dämmwirkung der untersuchten IR-Dämmfolien ist durchschnittlich um mehr als die Hälfte geringer als die aller untersuchten Mineralwolle-Dämmsysteme. Das gilt auf jeden Fall, wenn die Winddichtigkeit der Gebäudehülle für beide Dachräume gleich hoch ist. Auch eine undichte Gebäudehülle zeigt keine Vorteile für die IR-Dämmung gegenüber der Mineralwolle-Dämmung, solange beide untersuchten Dachräume die gleiche Luftdichtheit aufweisen.

Bei der Untersuchung extremer Wetterbedingungen, wie z. B. Tage mit viel oder wenig Wind und strahlungsreiche und strahlungsarme Tage können weitere Ergebnisse abgeleitet werden. Hohe Sonneneinstrahlung bewirkt einen größeren Rückgang des Heizenergieverbrauchs beim IR-Dachraum gegenüber dem Mineralwolle-Dachraum, was typisch ist für einen Dachaufbau mit geringerer Dämmwirkung. Wind kann bei Durchströmung der Mineralwolle einen Rückgang der Dämmwirkung bewirken. Es ist also wichtig, die Mineralwolle vor einer Durchströmung mit Wind zu schützen.

Bei extrem hohen internen Wärmequellen ist der geringe Wärmedurchlasswiderstand der IR-Dämmung vorteilhaft.

Die Wärmedurchlasswiderstände, die nach Abzug der R-Werte der angrenzenden Luftschichten der In-situ-Messungen resultieren, bestätigen die im Labor gemessenen wärmetechnischen Kennwerte. Traditionelle Labormessungen können also auch bei der energetischen Bewertung von IR-reflektierenden Dämmfolien angewendet werden.

Wichtig: In-situ-Messungen können keine Labormessungen ersetzen. Je nach Klimarandbedingungen können andere Ergebnisse erzielt werden. Vor allem bei Sommermessungen überlagern sich teilweise gegenläufige Effekte.

In-situ-Messungen können auf jeden Fall zur Validierung von Simulationsmodellen herangezogen werden. Durch Simulationsrechnungen können die Messergebnisse extrapoliert werden. Die Ergebnisse der umfangreichen Simulationsrechnungen bestätigen, dass auch hier einer Bewertung des IR-Dämmmaterials durch die gängigen Methoden der Norm nichts entgegen steht.

Literatur

- [1] EN 832:2000-02 Thermal performance of buildings – calculation of energy use for heating – residential buildings.
- [2] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) Ausgabe Juli 2007.
- [3] DIN EN ISO 6946:2008-04 Bauteile -Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007. Berlin: Beuth-Verlag, 2008.
- [4] ISO 9869:1994-08 Wärmeschutz – Bauteile-Vorortmessung des Wärmedurchlasswiderstandes und des Wärmedurchgangskoeffizienten. Berlin: Beuth-Verlag, 1994.
- [5] DIN V 18599-10:2007-02 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [6] DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth-Verlag, 2003.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, Ordinarius für Bauphysik der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; Leiter des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik Stuttgart, Holzkirchen, Kassel

Dipl.-Ing. Matthias Kersken, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institutsteil

Holzkirchen, Abteilung Energiesysteme, Gruppe Fassadenkonzepte

Dipl.-Ing. Almuth Schade, wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institutsteil

Holzkirchen, Abteilung Energiesysteme, Gruppe Fassadenkonzepte

Dipl.-Ing. Herbert Sinnesbichler, Institutsteil Holzkirchen, Abteilung

Energiesysteme, Gruppenleiter Fassadenkonzepte

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley