

# **Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung – Aktualisierung**

Auftraggeber: Flumroc AG, Industriestrasse 8, CH-8890 Flums



Auftragnehmer und Autor des Berichtes: Heinrich Manz

August 2024

*Dank:* Der Autor dankt den Herren Damian Gort (Geschäftsführer) und Markus Thoma (Leiter Technik und Verkaufssupport) für den Auftrag und Herrn René Grob (Technik und Verkaufssupport) für die fachliche Begleitung der Arbeit.

*Haftungsausschluss:* Diese Arbeit wurde nach bestem Wissen und Gewissen aufgrund der verfügbaren und referenzierten Unterlagen erstellt. Der Autor lehnt ausdrücklich jegliche Haftung für allfällige Folgeschäden infolge inkorrektur Resultate und/oder Schlussfolgerungen ab.

*Bildquelle Titelseite:* Flumroc AG

*Autor:* Heinrich Manz, Dr. sc. techn., Prof., Talweg 168, CH-8610 Uster

**Inhalt**

	Seite
Zusammenfassung.....	4
1. Einleitung.....	6
2. Methodik.....	7
2.1 Rechenmodell .....	7
2.2 Umweltindikatoren.....	7
2.3 Ökobilanzdaten.....	7
2.4 Ökologischer Aufwand um $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu erreichen.....	7
2.5 Ökologisch optimale Dämmstärke.....	9
3. Resultate.....	11
3.1 Ökologischer Aufwand um $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu erreichen.....	11
3.2 Ökologisch optimale Dämmstärke.....	12
3.3 Übersicht ökologisch optimale U-Werte im Vergleich mit normativen Vorgaben.....	20
3.4 Vergleich der ökologisch optimalen U-Werte mit [Man15].....	20
4. Diskussion .....	21
Referenzen.....	25

## Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die optimalen Dämmstärken hinsichtlich Minimierung der Umweltbelastung (Umweltindikatoren: Umweltbelastungspunkte 21, nicht erneuerbare Primärenergie und Treibhausgasemissionen) bei Wohnbauten in der Schweiz ermittelt. Der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes wurde berücksichtigt und das Modell von [Man15] verwendet.

Unterschiedliche Optimierungskriterien (Umweltindikatoren) führen zu unterschiedlichen optimalen Dämmstärken. Die optimalen Dämmstärken sind umso grösser, je kälter das Aussenklima, je höher die Innenraumtemperatur, je kleiner das Gebäude, je „umweltfreundlicher“ die Wärmedämmung, je grösser die Lebensdauer der Wärmedämmung, je kleiner die Jahresarbeitszahl (bei Wärmepumpen) und je „schmutziger“ der Energieträger bzw. die Stromerzeugung (bei Wärmepumpen) ist. Die optimale Dämmstärke kann deshalb objektspezifisch relativ stark variieren.

Diese Studie zeigt, dass – verglichen mit [Man15] – aufgrund neuer, emissionsärmerer Herstellungsverfahren, für die Steinwolle-Wärmedämmung heute deutlich tiefere optimale Wärmedurchgangskoeffizienten entstehen.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Parameterstudie ergab – je nach Kombination von Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieträger bzw. Stromerzeugung, bei einem typischen Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich und dem gewählten Umweltindikator – ökologisch optimale Wärmedurchgangskoeffizienten von 0.043 W/(m<sup>2</sup>K) bis 0.278 W/(m<sup>2</sup>K).

Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich, Innenraumtemperatur 21°C, Steinwolle-Dämmung, Fensteranschlag innen, Lebensdauer der Wärmedämmung 40 Jahre, Erdsonde-Wärmepumpe mit JAZ = 3.9 und dem heutigen CH-Verbrauchermix für Strom, wurde eine optimale Dämmstärke bezüglich Umweltbelastungspunkten von 0.376 m bzw.  $U = 0.085$  W/(m<sup>2</sup>K) ermittelt. Falls eine Wärmepumpe mit JAZ = 2.8 eingesetzt würde, so ergäbe sich eine optimale Dämmstärke von 0.440 m bzw.  $U = 0.073$  W/(m<sup>2</sup>K). Bezüglich nicht erneuerbarer Primärenergie ergab sich für JAZ = 3.9 eine optimale Dämmstärke von 0.479 m bzw.  $U = 0.068$  W/(m<sup>2</sup>K). Bei JAZ = 2.8 entstand eine optimale Dämmstärke von 0.563 m bzw.  $U = 0.058$  W/(m<sup>2</sup>K). Bezüglich Treibhausgasemissionen ergab sich für JAZ = 3.9 eine optimale Dämmstärke von 0.260 m bzw.  $U = 0.120$  W/(m<sup>2</sup>K) und bei JAZ = 2.8 eine optimale Dämmstärke von 0.299 m bzw.  $U = 0.105$  W/(m<sup>2</sup>K).

Für ein typisches Mehrfamilienhaus mit Steinwolle-Dämmung im schweizerischen Mittelland und einer Erdsonden- oder Aussenluft-Wärmepumpe kann deshalb heute aus ökologischer Sicht ein Wärmedurchgangskoeffizient, der etwa dem SIA-Zielwert von  $U = 0.1$  W/(m<sup>2</sup>K) entspricht, empfohlen werden. Falls fossile Energieträger eingesetzt würden, so müsste aus ökologischer Sicht noch deutlich mehr gedämmt werden.

Da fossile Energieträger vorwiegend noch in Altbauten eingesetzt werden, sind hohe Dämmstärken hier besonders sinnvoll, jedoch bei Sanierungen oft nicht einfach zu realisieren.

Aufgrund der gefundenen Resultate kann insgesamt in grober Näherung gesagt werden, dass meist etwa die ersten 20 cm der Wärmedämmung sehr wichtig sind, um den ökologischen Aufwand wesentlich zu reduzieren. Der erste Bereich der Wärmedämmung trägt besonders viel zur Reduktion des ökologischen Aufwandes bei.

Die in dieser Studie gefundenen optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten sind grossmehrheitlich deutlich kleiner als die Grenzwerte und nicht selten auch tiefer als die Zielwerte gemäss [SIA 380/1]. D.h., dass heute aus ökologischer Sicht oft zu wenig gedämmt wird. Aufgrund des

typischerweise flachen Optimums, relativiert sich jedoch der dadurch entstehende ökologische Schaden.

Mit dem Ausbruch des Ukraine-Krieges im Februar 2022 und der veränderten energiepolitischen Situation, wurde zunehmend eine potentielle Strommangellage im Winter thematisiert. Deshalb ist es wünschenswert, den Elektrizitätsbedarf von Gebäudeheizungen im Winter mithilfe von guten Wärmedämmungen klein zu halten. Aus dieser Sicht leisten gut gedämmte Gebäude einen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Winter. Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen – und der damit verbundene steigende Stromverbrauch, auch im Winter – spricht ebenfalls für die Begrenzung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäudeheizungen im Winter.

Diese Arbeit bestätigt insgesamt, dass Wärmedämmungen hocheffizient und unverzichtbar für die Reduktion der Umweltbelastung infolge des Beheizens von Wohngebäuden sind. Dies gilt für die Schweiz bzw. generell für Klimata mit relativ kalten Wintern. Produzenten von Dämmstoffen tragen mit fortschrittlichen, umweltfreundlichen Verfahren bei Herstellung und Entsorgung wesentlich dazu bei, die ökologischen Vorteile der Wärmedämmung von Gebäuden noch weiter zu steigern.

**Stichwörter:** ökologischer Aufwand, ökologisch optimale Dämmstärke, schweizerische Wohnbauten, Lebenszyklus, Umweltbelastungspunkte 21, nicht erneuerbare Primärenergie, Treibhausgasemissionen, Dämmstoffe, Energieträger

## 1. Einleitung

Bei Erstellung, Betrieb, Sanierung und Entsorgung von Gebäuden bzw. der dabei verwendeten Materialien und Komponenten, entsteht ein gewaltiger Energie- und Ressourcenbedarf und es werden grosse Mengen an Emissionen verursacht.

Um den Energiebedarf infolge des Beheizens von Gebäuden zu reduzieren, werden normative bzw. behördliche Vorgaben an die Gebäudehülle entweder direkt, bezüglich der maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken und transparenten Bauteile der Gebäudehülle, oder indirekt, bezüglich des geschossflächenbezogenen Heizwärmebedarfs, formuliert [SIA380/1]. Die Dämmung von opaken Elementen der Gebäudehülle – Aussenwand, Dach und Boden – ist dabei von zentraler Bedeutung.

Die Frage, welche Dämmstärken bei Gebäuden energetisch und ökologisch sinnvoll sind, wurde bereits in mehreren Arbeiten untersucht. Im Rahmen des Projektes „Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung“ [Man15], welches durch das Bundesamt für Energie (BFE) und das Amt für Hochbauten (AHB) Zürich unterstützt wurde, wurden für typische Wohnbauten in schweizerischen Klimata, Aussagen bezüglich ökologisch optimalen Dämmstärken formuliert. Eine Vielzahl von Parametern der Bereiche Gebäudehülle, Gebäudetechnik, Energieträger bzw. Stromerzeugung, Innenraumtemperatur bei einem bestimmten Gebäude an einem bestimmten Standort, ist dabei für das Optimum relevant. Die in der Schweiz etablierten Umweltindikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PE, ne) und Treibhausgasemissionen (THGE) sowie Ökobilanzdaten aus der Ecoinvent-Datenbank [Eco10] wurden verwendet. Dieser Bericht [Man15] – bzw. das im Rahmen dieses Projektes erarbeitete Modell – stellt die Grundlage für die vorliegende Arbeit dar.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit aktuellen Ökobilanzdaten den Bereich für ökologisch sinnvolle Dämmstärken neu zu ermitteln und so die zentralen Aussagen von [Man15] punktuell zu überprüfen. Die aktuelle ökologische Bedeutung von Gebäudewärmedämmungen in schweizerischen Klimata soll aufgezeigt werden, wobei die Diskussion vor dem Hintergrund des technologischen Fortschritts und der veränderten energiepolitischen Situation erfolgen soll.

## 2. Methodik

### 2.1 Rechenmodell

Die Methode zur Quantifizierung des ökologischen Aufwandes und zur Bestimmung der ökologisch optimalen Dämmstärke infolge des Beheizens von Wohngebäuden in der Schweiz ist in [Man15] dokumentiert. Dieses mathematische Modell, welches als Input ökologische, physikalische und weitere Parameter erfordert, wurde in der vorliegenden Arbeit eingesetzt.

### 2.2 Umweltindikatoren

Die in der Schweiz etablierten Umweltindikatoren Umweltbelastungspunkte 21 (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PE, ne) und Treibhausgasemissionen (THGE) wurden verwendet [KBOB22].

Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21), gemäss der Methode der ökologischen Knappheit, quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm [KBOB22]. Die Methode basiert dabei auf politisch festgelegten Zielen oder Grenzwerten sowie auf der Differenz zwischen der effektiven Situation in der Schweiz und diesen Zielen. Darum wird sie auch als eine "distance-to-target" Methode bezeichnet.

Für die Grösse Primärenergie wird ausschliesslich der nicht erneuerbare Anteil betrachtet. D.h., nur der Bedarf an fossiler und nuklearer Primärenergie sowie die Biomasse aus Primärwaldrodung wird berücksichtigt. Die in [KBOB22] für die Primärenergie angegebene Einheit «kWh oil-eq» soll anzeigen, dass es sich um eine «bewertete» (gemäss Ökobilanzfachsprache «charakterisierte») Grösse handelt [Fri22]. Die Primärenergieinhalte der verschiedenen nicht erneuerbaren Energieträger (Steinkohle, Braunkohle, Rohöl, Erdgas und Uran) werden auf der Basis ihres oberen Heizwerts bzw. des Energiegehalts (Uran) zusammengefasst [Fri15].

Die Grösse Treibhauspotenzial, ausgedrückt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent, gibt an, welchen Beitrag eine bestimmte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt leistet. Als Referenzsubstanz wird dabei CO<sub>2</sub> verwendet.

### 2.3 Ökobilanzdaten

Die Ökobilanzdaten stammen im Wesentlichen aus [KBOB22]. Einzelne, methodenspezifische Daten wurden [Man15] entnommen.

### 2.4 Ökologischer Aufwand um $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu erreichen

In einem ersten Schritt wurde der ökologische Aufwand, um mit verschiedenen Dämmstoffen den Zielwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten eines opaken Bauteile gegenüber Ausenklima von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gemäss [SIA380/1] zu erreichen, quantifiziert. Es wurde vereinfachend angenommen, dass die Wand nur aus der Dämmschicht besteht. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird demnach wie folgt berechnet:

Wärmedämmstoff	Hersteller	Rechenwert Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Rechenwert Wärmeleitfähigkeit W/mK	Spezifischer ökologischer Aufwand (Herstellung und Entsorgung) $\beta$		
				Umweltbelastungspunkte 21 UBP/kg	Primärenergie, nicht erneuerbar kWh oil eq/kg	Treibhausgasemissionen kg CO <sub>2</sub> eq/kg
Steinwolle	Flumroc	50	0.034	1100	2.55	0.617
Glaswolle	Isover	38	0.030	1700	3.66	0.89
Polystyrol expandiert (EPS)	Swisspor	16.8	0.038	8790	26.7	6.95
Polystyrol extrudiert (XPS)	Swisspor	34.3	0.034	8880	25.5	6.96
Polyurethan (PIR)	Swisspor	30	0.020	9830	28.0	7.08
Schaumglas	GLAPOR	120	0.054	1020	3.15	0.707
Zellulosefasern	Isofloc	45	0.038	470	0.848	0.233

Tab. 1: Physikalische und ökologische Daten in Abhängigkeit der Wärmedämmstoffes  
(Quelle für Ökobilanzdaten: KBOB22)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad W/(m^2K)$$

$h_i$  Wärmeübergangskoeffizient innen:  $h_i = 7.7 \text{ W}/(m^2K)$

$h_e$  Wärmeübergangskoeffizient aussen:  $h_e = 25 \text{ W}/(m^2K)$

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes W/(m·K)

$d$  erforderliche Dämmstärke m

Die erforderliche Dämmstärke beträgt dann:

$$d = \lambda \left( \frac{1}{U} - \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad m$$

Der ökologische Aufwand pro m<sup>2</sup> Wand kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_{WD} = A \cdot d \cdot \rho \cdot \beta \quad \text{UBP, kg oil eq, kg CO}_2\text{eq}$$

$A$  Fläche:  $A = 1 \text{ m}^2$

$\rho$  Rohdichte des Dämmstoffes kg/m<sup>3</sup>

$\beta$  Spezifischer ökologischer Aufwand (total, Herstellung und Entsorgung)

Umweltbelastungspunkte	UBP/kg
Primärenergie, nicht erneuerbar	kWh oil eq/kg
Treibhausgasemissionen	kg CO <sub>2</sub> eq/kg

Bei den Ökobilanzdaten aus [KBOB22] wurden herstellerepezifische Werte verwendet. In [KBOB22] werden zum Teil Wertebereiche für die Rohdichten der jeweiligen Dämmstoffe angegeben. Es sind jedoch keine Angaben bezüglich Wärmeleitfähigkeiten verfügbar. Gemäss den auf den jeweiligen Websites verfügbaren produktspezifischen Herstellerangaben, wurden die Rechenwerte für die Rohdichten – innerhalb des Wertebereiches gemäss [KBOB22] – und die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten gewählt. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Daten.

## 2.5 Ökologisch optimale Dämmstärke

Die Tabellen 2 und 3 beruhen auf Daten aus [KBOB22] und zeigen den ökologischen Aufwand zur Bereitstellung von Nutzwärme bzw. elektrischer Endenergie in Abhängigkeit der Art der Stromproduktion.

Die Vielzahl der Inputparameter des Modells, welche variiert werden können, sowie die drei Umweltindikatoren ergibt eine sehr grosse Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten bzw. Fällen. Deshalb wurde ein Referenzfall definiert und die Parameterstudie gemäss dem Prinzip One-factor-at-a-time (OFAT) durchgeführt. D.h., ausgehend von einem Referenzfall wurde immer nur ein Parameter variiert.

Die Tabelle 4 zeigt die Daten des Referenzfalles für die Parameterstudie. Der Referenzfall entspricht im Wesentlichen einem typischen Neubau eines Mehrfamilienhauses im schweizerischen Mittelland.

Wärmequelle	Spezifischer ökologischer Aufwand (Nutzwärme)		
	$\alpha$		
	Umweltbelastungspunkte 21 UBP/kWh	Primärenergie, nicht erneuerbar kWh oil eq/kWh	Treibhausgasemissionen kg CO <sub>2</sub> eq/kWh
Heizkessel Heizöl EL	437	1.31	0.343
Heizkessel Erdgas	279	1.06	0.234
Heizkessel Holzsplit	164	0.056	0.021

Tab. 2: Spezifischer ökologischer Aufwand (bezogen auf die Nutzwärme) für die betrachteten Wärmequellen (Daten aus [KBOB22])

Stromproduktion	Spezifischer ökologischer Aufwand (elektrische Endenergie)		
	$\alpha$		
	Umweltbelastungspunkte 21 UBP/kWh	Primärenergie, nicht erneuerbar kWh oil eq/kWh	Treibhausgas- emissionen kg CO <sub>2</sub> eq/kWh
CH-Verbrauchermix	515	2.08	0.125
Atomkraft	674	4.21	0.024
Wasserkraft	76.8	0.025	0.012
Windkraft	110	0.087	0.028
PV vom Netz	151	0.159	0.048
PV am Standort erzeugt	86.5	0.131	0.037

Tab. 3: Spezifischer ökologischer Aufwand, bezogen auf die Endenergie, in Abhängigkeit der Art der Stromproduktion (Daten aus [KBOB22])

Gebäudetyp	MFH-6 (Mehrfamilienhaus mit 6 Wohnungen)
Standort	Zürich
Heizungsanlage	Erdsonden-Wärmepumpe, JAZ = 3.9
Energieträger	CH-Verbrauchermix
Wärmeverteilsystem	Fussbodenheizung
Dämmung	Steinwolle
Lebensdauer des Wärmeverteilungssystems der Heizungsanlage	30 Jahre
Lebensdauer der Wärmedämmung	40 Jahre
Fensteranschlag	innen
Innenraumtemperatur	21°C

Tab. 4: Daten des Referenzfalles für die Parameterstudie (vgl. [Man15])

Die Tabelle 5 zeigt als Übersicht die in der Parameterstudie variierten Grössen.

Variierter Parameter	Referenzfall	Variation
Gebäudetyp	MFH-6	EFH/MFH-12
Standort	Zürich	Davos/Lugano
Innenraumtemperatur	21°C	20°C/23°C
Dämmstoff	Steinwolle	EPS/XPS
Energieträger	Elektrizität, WP (JAZ = 3.9)	Heizöl/Erdgas
Jahresarbeitszahl WP	JAZ = 3.9	Luft/Wasser WP mit JAZ = 2.8
Strommix	CH-Verbrauchermix	Wasserkraft/PV am Standort erzeugt

Tab. 5: Übersicht der in der Parameterstudie variierten Grössen

### 3. Resultate

#### 3.1 Ökologischer Aufwand um $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu erreichen

Der ökologische Aufwand – gemessen mit den drei Umweltindikatoren – um mit einer Dämmstoffschicht den SIA-Zielwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten eines opaken Bauteils von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, ist in den Figuren 1 bis 3 ersichtlich.

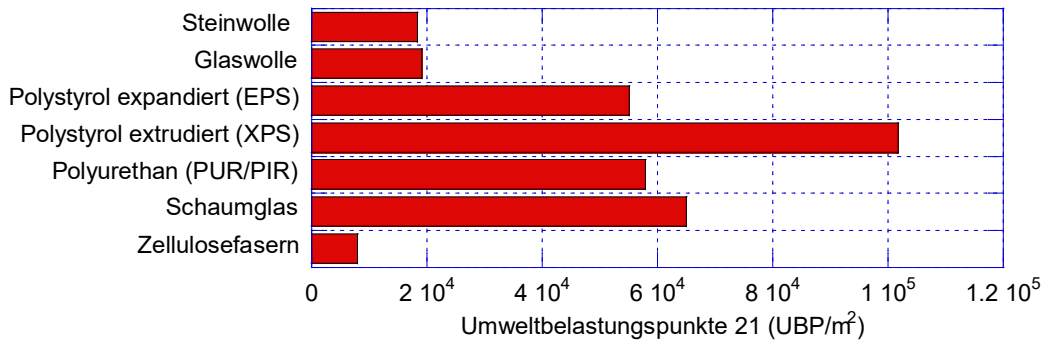


Fig. 1: Ökologischer Aufwand – Umweltindikator Umweltbelastungspunkte 21 – um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, für verschiedene Dämmstoffe.

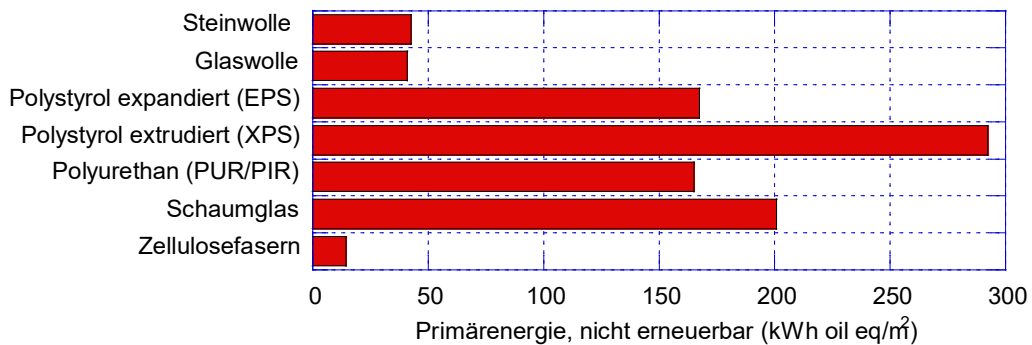


Fig. 2: Ökologischer Aufwand – Umweltindikator Primärenergie, nicht erneuerbar – um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, für verschiedene Dämmstoffe.

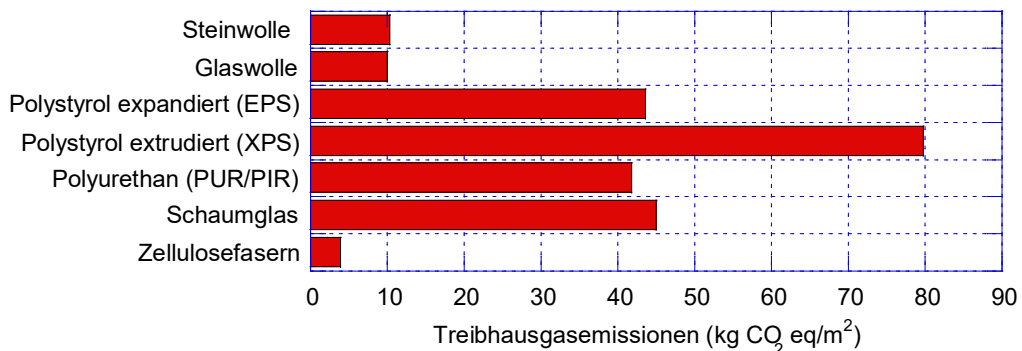


Fig. 3: Ökologischer Aufwand – Umweltindikator Treibhausgasemissionen – um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, für verschiedene Dämmstoffe.

### **3.2 Ökologisch optimale Dämmstärke**

Die Figuren 4 bis 10 zeigen die Resultate der Parameterstudie. Dargestellt ist jeweils der totale ökologische Aufwand pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr, gemessen mit den drei Umweltindikatoren, in Funktion der Dämmstärke bzw. des Wärmedurchgangskoeffizienten. Die Zahlenwerte der Optima sind in den Figuren eingetragen. Die Variation der einzelnen Parameter Gebäudetyp, Standort, Innenraumtemperatur, Dämmstoff, Energieträger, Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe) und Strommix führt zu einer Serie von je sechs Figuren, welche immer auf einer Seite dargestellt sind.

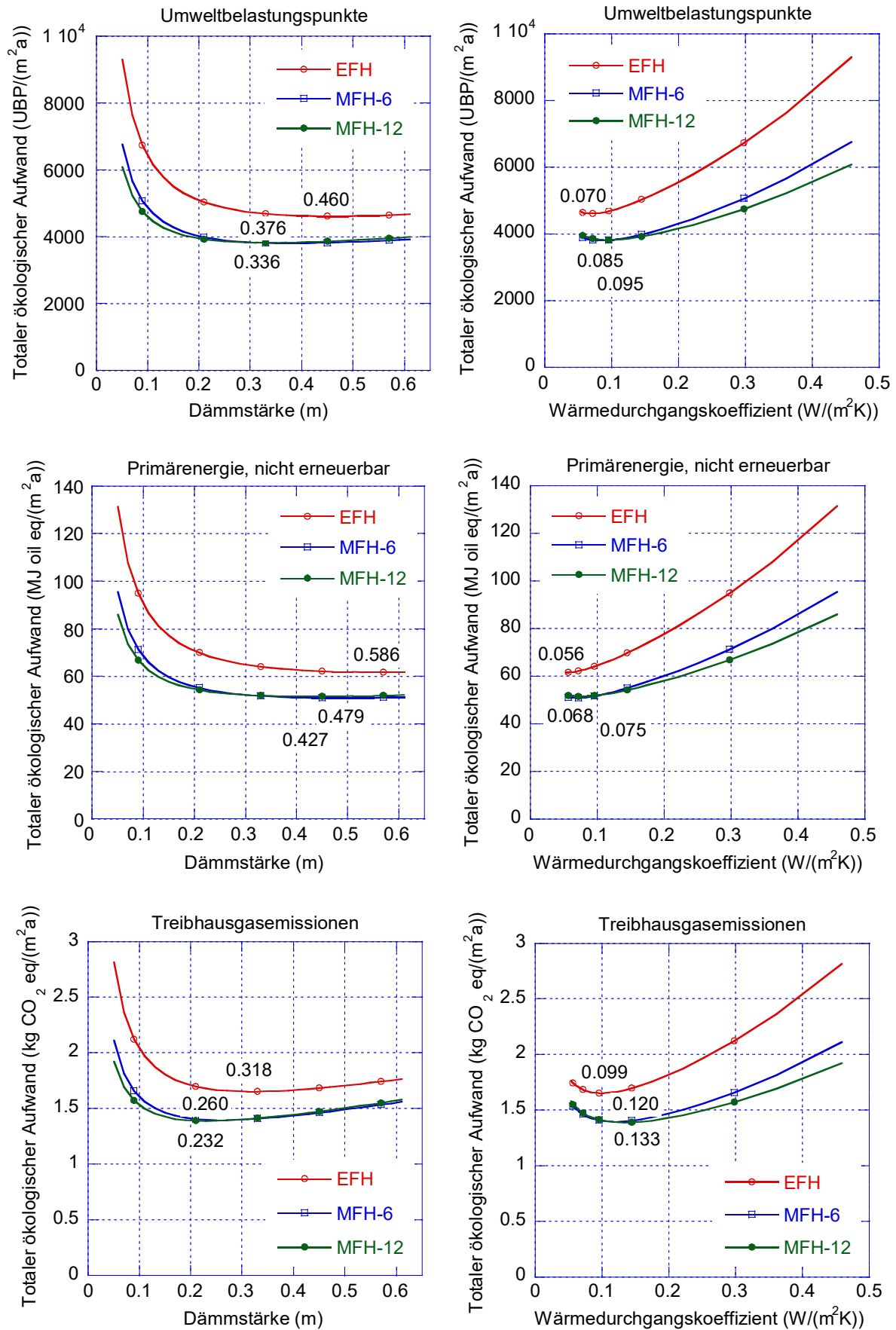


Fig. 4: Einfluss des Gebäudetyps (Referenzfall: MFH-6)

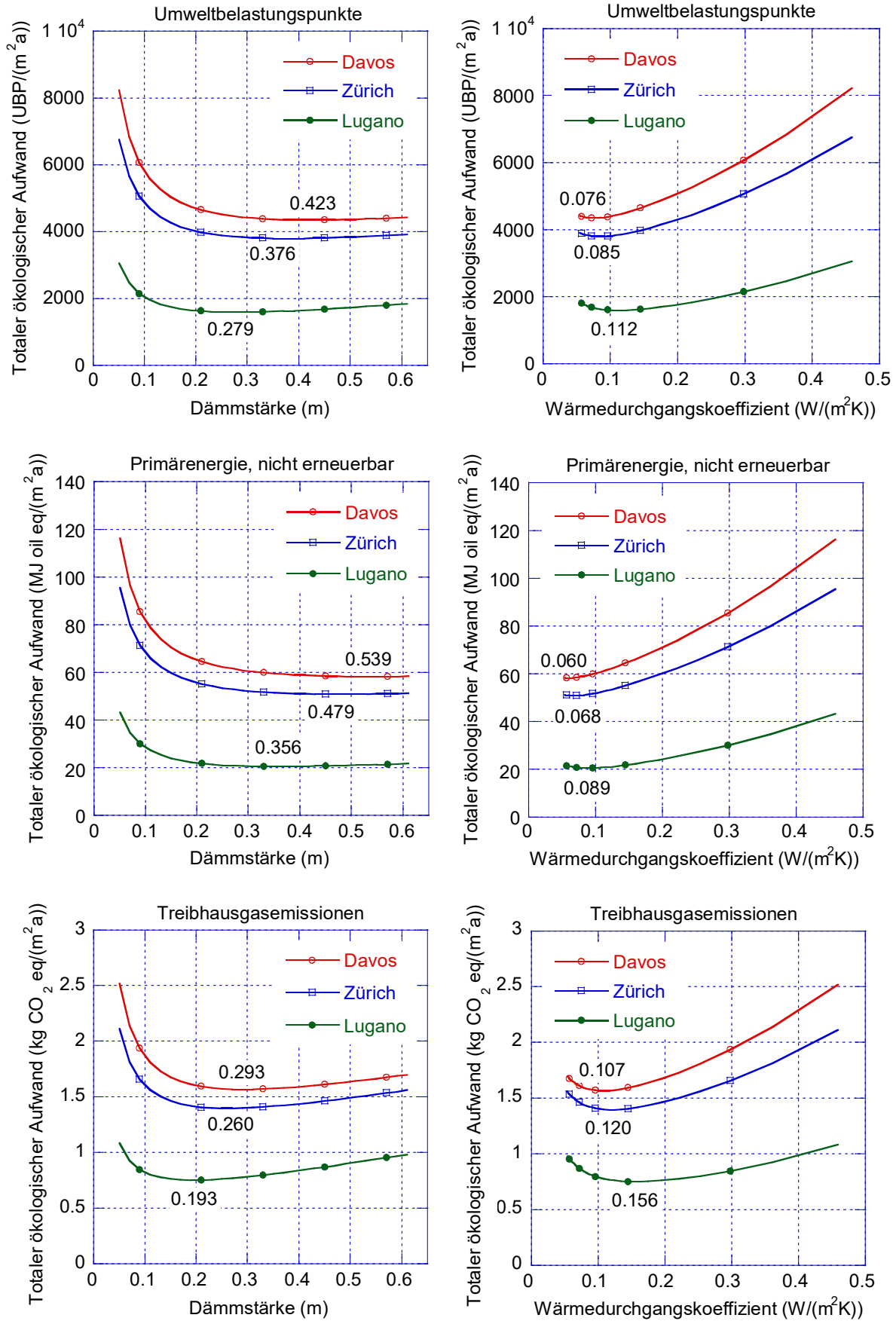


Fig. 5: Einfluss des Standortes (Referenzfall: Zürich)

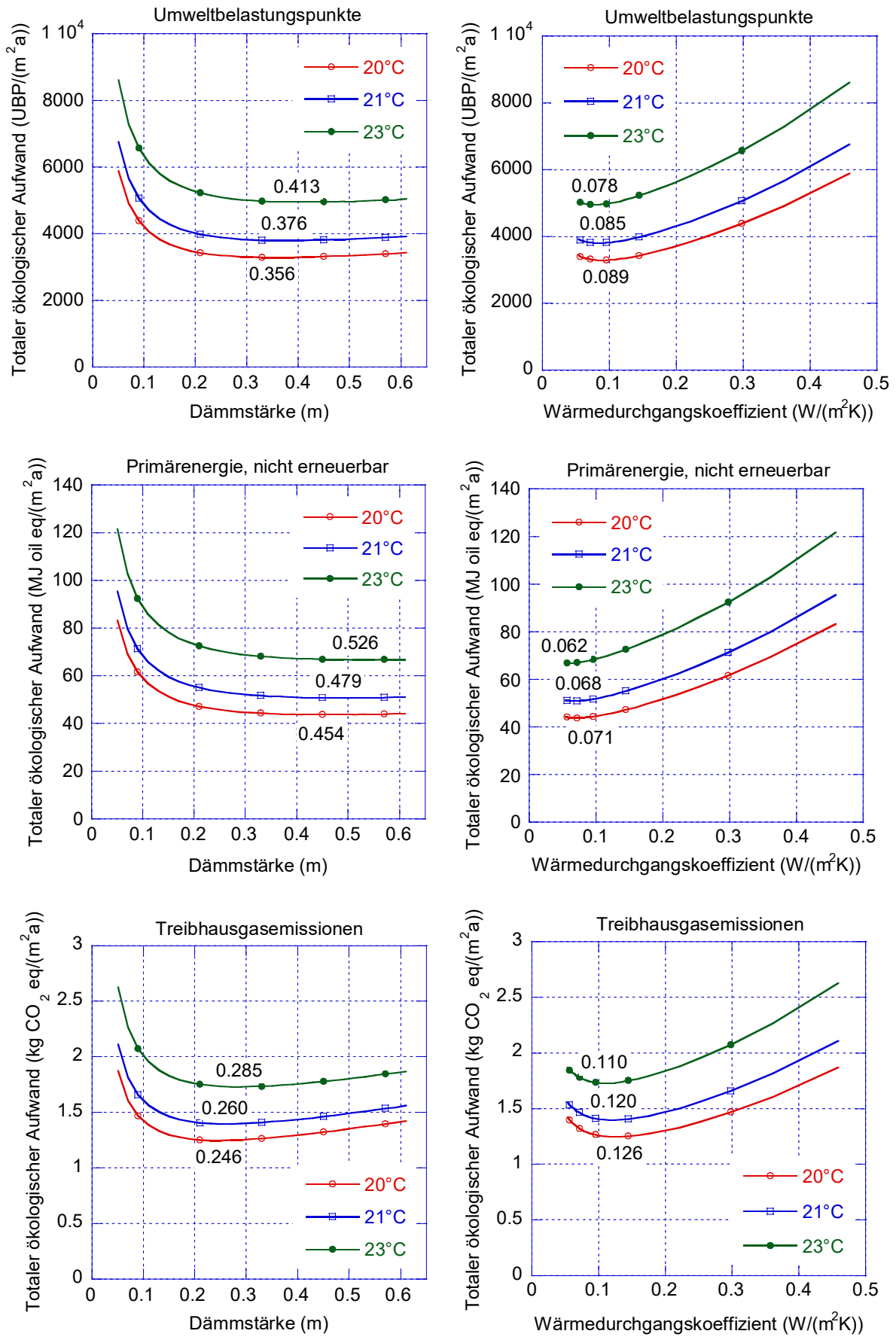


Fig. 6: Einfluss der Innenraumtemperatur (Referenzfall: 21°C)

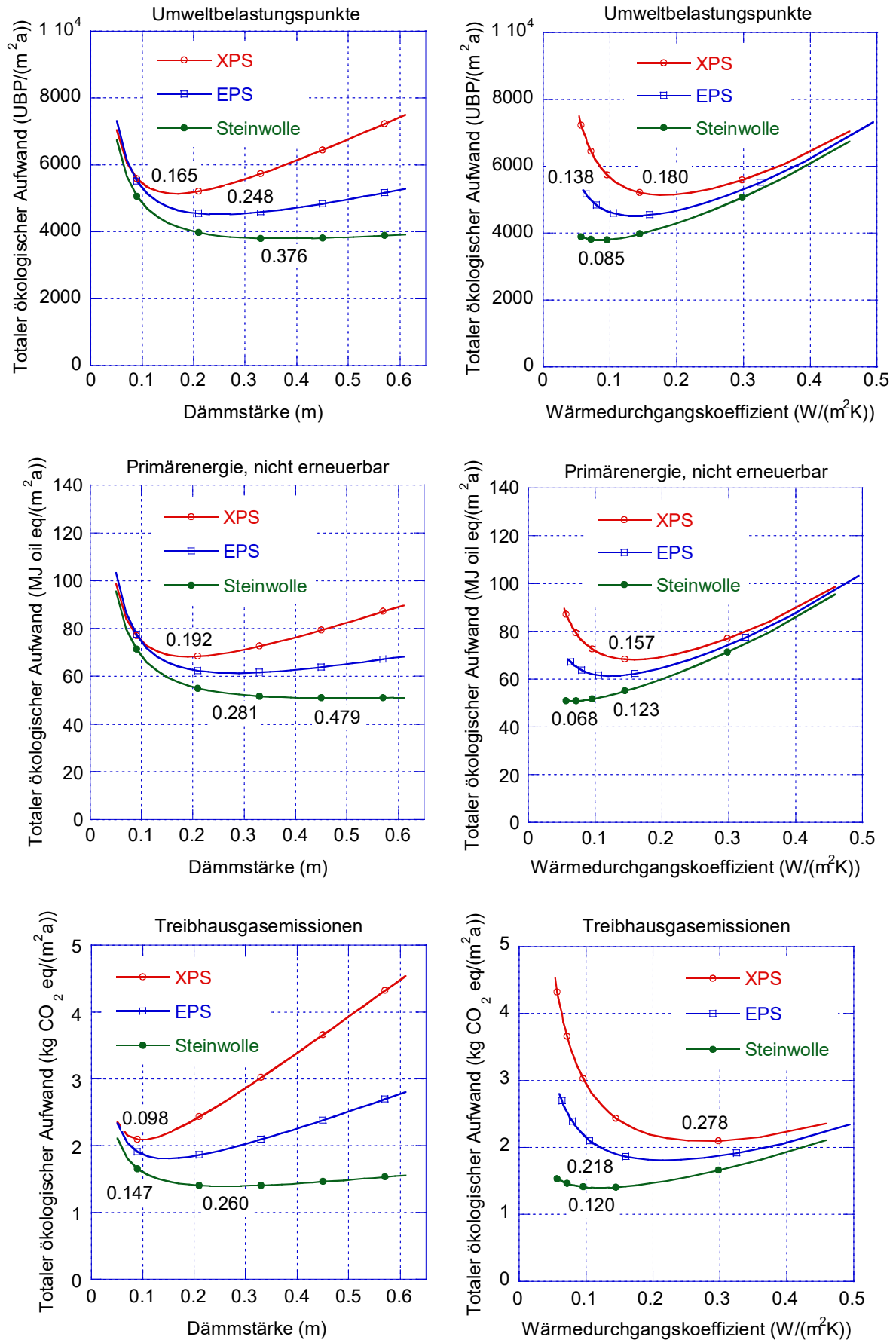


Fig. 7: Einfluss des Dämmstoffes (Referenzfall: Steinwolle). Hinweis: Veränderte Ordinatenachse bei Treibhausgasemissionen!

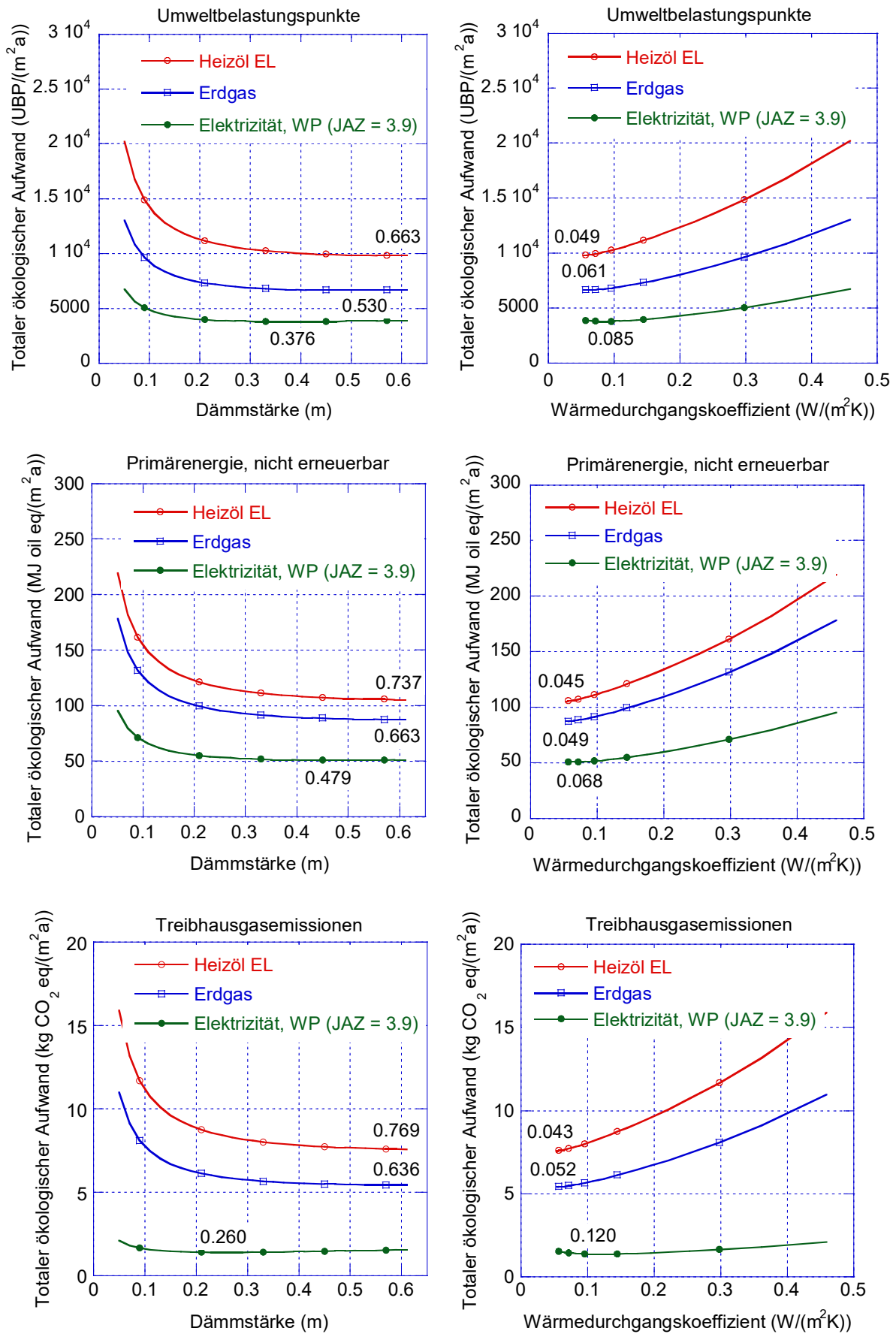


Fig. 8: Einfluss des Energieträgers (Referenzfall: Elektrizität, WP mit JAZ = 3.9). Hinweise: Veränderte Ordinatenachsen bei allen Umweltindikatoren! Optima für Heizöl EL und Erdgas teilweise ausserhalb des dargestellten Wertebereiches!

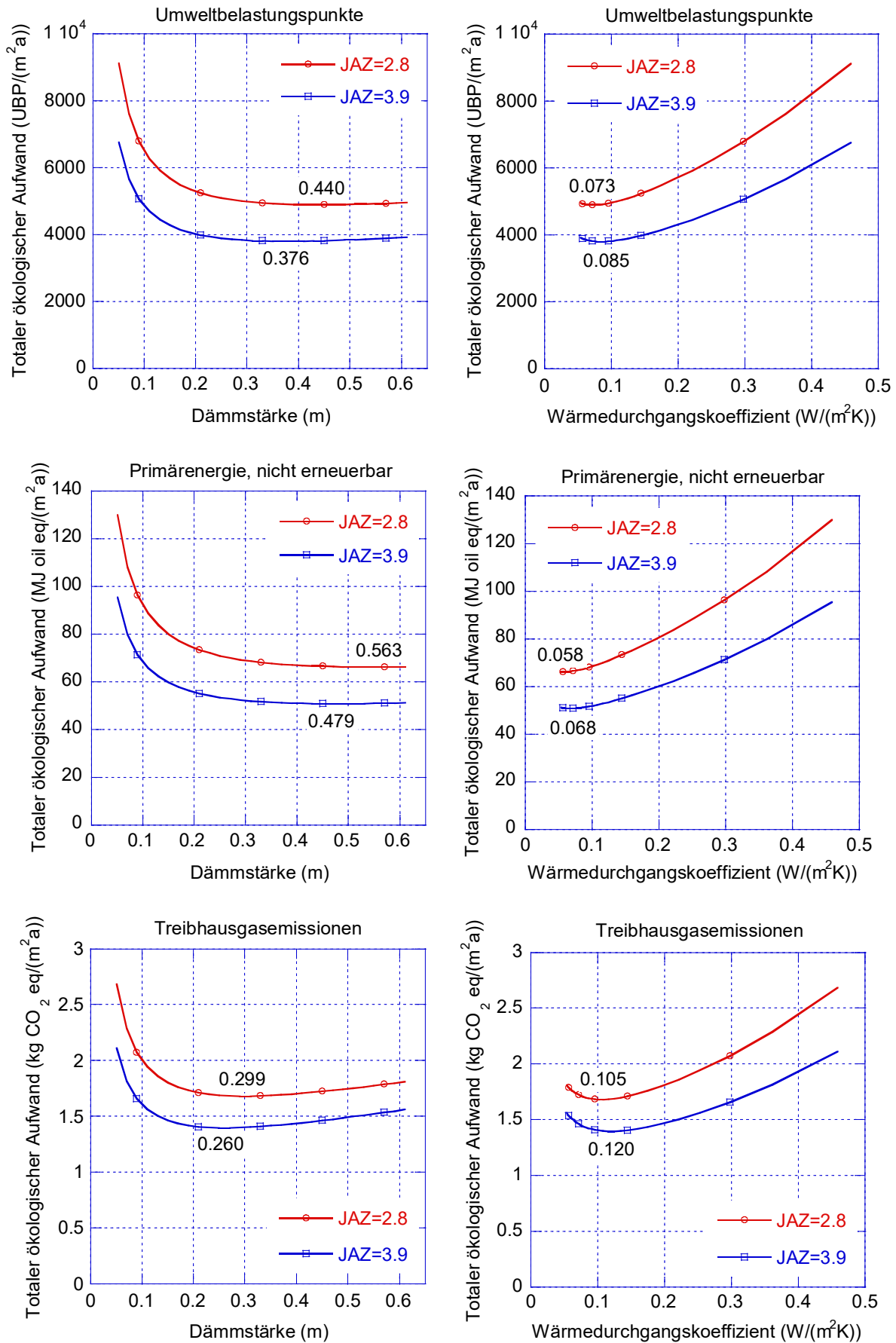


Fig. 9: Einfluss der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (Referenzfall: JAZ = 3.9)

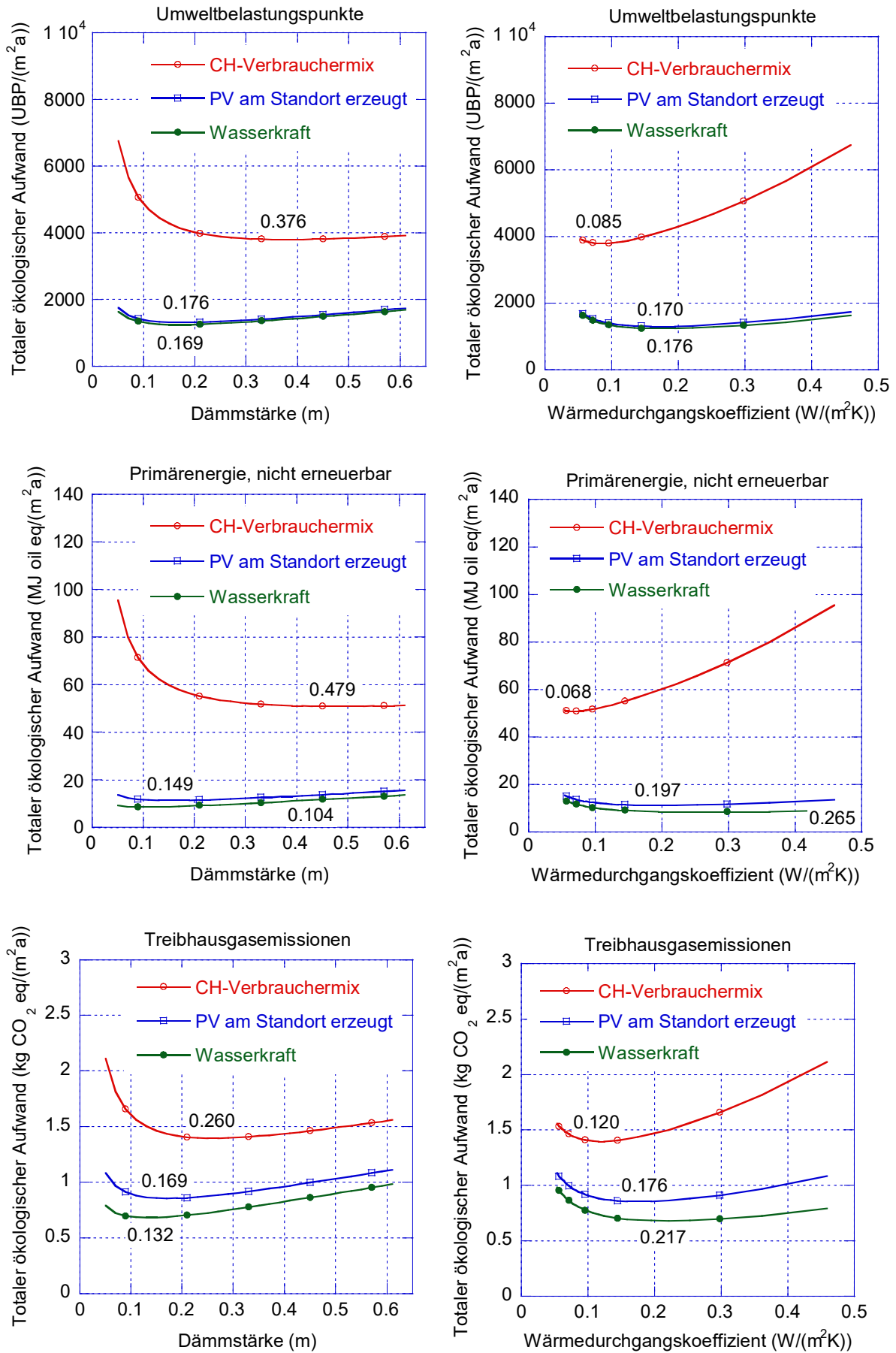


Fig. 10: Einfluss des Strommixes (Referenzfall: CH-Verbrauchermix)

### 3.3 Übersicht ökologisch optimale U-Werte im Vergleich mit normativen Vorgaben

Die Figur 11 zeigt die in Kap. 3.2 dargestellten ökologisch optimalen Dämmstärken bezüglich der drei Umweltindikatoren im Vergleich mit den Grenz- und Zielwerten gemäss den Normen [SIA380/1] bzw. [SIA180].

In den meisten Fällen entstehen optimale Wärmedurchgangskoeffizienten von kleiner als 0.17 W/(m<sup>2</sup>K) (Grenzwert SIA 380/1) bzw. sogar kleiner 0.1 W/(m<sup>2</sup>K) (Zielwert SIA 380/1).

Optimale Wärmedurchgangskoeffizienten von grösser als 0.2 W/(m<sup>2</sup>K) entstehen, falls der Strom nur aus Wasserkraft besteht und eine Erdsonden-Wärmepumpe mit JAZ = 3.9 verwendet wird – d.h., die Nutzwärme ist sehr sauber – oder Kunststoffschäume als Dämmstoffe in Kombination mit relativ sauberer Nutzwärme – d.h., CH-Verbrauchermix mit Erdsonden-Wärmepumpe mit JAZ = 3.9 – eingesetzt wird.

Optimale Wärmedurchgangskoeffizienten von kleiner 0.05 W/(m<sup>2</sup>K) entstehen, wenn der Energieträger Heizöl oder Erdgas ist.

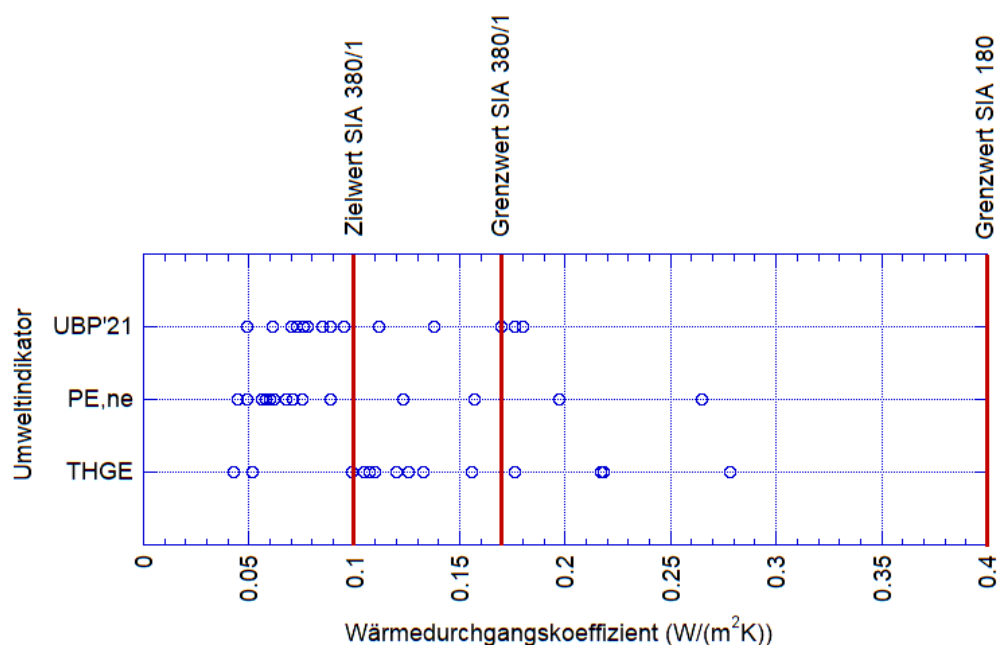


Fig. 11: Übersicht der berechneten ökologisch optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten bezüglich der drei Umweltindikatoren (siehe Kap. 3.2) im Vergleich mit den Grenz- und Zielwerten gemäss den Normen [SIA380/1] bzw. [SIA180].

### 3.4 Vergleich der ökologisch optimalen U-Werte mit [Man15]

Verglichen mit dem Bericht aus dem Jahre 2015 [Man15], in welchem Daten aus [Eco10] – auch für Steinwolle – verwendet wurden, ergibt sich in der vorliegenden Studie mit den Daten aus [KBOB22] eine deutliche Reduktion der optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten (siehe Tab. 6).

Die deutliche Reduktion der optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten ist, insbesondere aufgrund des stark reduzierten ökologischen Aufwandes bei der Herstellung von Steinwolle, nicht überraschend.

Umweltindikator	Wärmedurchgangskoeffizient $U_{opt}$ (W/m <sup>2</sup> K)	
	Vorliegende Studie	[Man15]
Umweltbelastungspunkte	0.085	0.16
Primärenergie, nicht erneuerbar	0.068	0.10
Treibhausgasemissionen	0.120	0.19

Tab. 6: Vergleich der in der vorliegende Studie für den Referenzfall berechneten ökologisch optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten mit [Man15] (Dämmstoff Steinwolle).

## 5. Diskussion

In dieser Studie wurden die optimalen Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung ermittelt, wobei das Modell von [Man15] verwendet wurde. Bezüglich Wärmedämmung wurde ausschliesslich der aufgrund der unterschiedlichen Dämmstärken entstehende variable ökologische Aufwand betrachtet. D.h., sowieso vorhandene Schichten (Innen- und Aussenputz, Mauerwerk etc.) wurden nicht berücksichtigt.

Die Umweltindikatoren Umweltbelastungspunkte, nicht erneuerbare Primärenergie und Treibhausgasemissionen, wurden als Masse zur Quantifizierung des ökologischen Aufwandes verwendet. Je nach Umweltindikator ergaben sich – naheliegenderweise – unterschiedliche optimale Dämmstärken.

Insbesondere der Einfluss der folgenden Grössen wurde in der vorliegenden Arbeit modelliert und quantitativ aufgezeigt:

- Gebäude (Geometrie, Innenraumtemperatur)
- Standort (Aussenklima)
- Wärmedämmung der Gebäudehülle (Dämmstoff)
- Heizungsanlage
- Energieträger und Stromerzeugung
- Umweltindikator

Die gefundenen optimalen Dämmstärken sind dabei umso grösser, je

- kälter das Aussenklima
- höher die Innenraumtemperatur
- kleiner das Gebäude
- „umweltfreundlicher“ die Wärmedämmung
- grösser die Lebensdauer der Wärmedämmung
- kleiner die Jahresarbeitszahl bei einer Wärmepumpe
- „schmutziger“ der Energieträger bzw. die Stromerzeugung bei einer Wärmepumpe ist.

Demzufolge kann die optimale Dämmstärke objektspezifisch relativ stark variieren.

Modellierungsdefizite und Unsicherheiten der Ergebnisse werden in [Man15] diskutiert und sind sinngemäss auf die vorliegende Studie übertragbar. Demnach entsteht die Unsicherheit der Ergebnisse vor allem aufgrund der – in [KBOB22] nicht quantifizierten und leider unbekannt – Unsicherheiten der Ökobilanzdaten.

Diese Studie zeigt, dass – verglichen mit [Man15] – aufgrund neuer, emissionsärmerer Herstellungsverfahren für die Steinwolle-Wärmedämmung heute deutlich tiefere optimale  $U$ -Werte entstehen (Tab. 6).

Die Figuren 1 bis 3 zeigen, dass Steinwolle, im Quervergleich mit anderen Dämmstoffen, einen relativ kleinen ökologischen Aufwand aufweist, um einen bestimmten Wärmedurchgangskoeffizienten zu erreichen.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Parameterstudie ergab – je nach Kombination von Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieträger bzw. Stromerzeugung, bei einem typischen Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich und dem gewählten Umweltindikator – ökologisch optimale Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0.043 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bis  $0.278 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich, Innenraumtemperatur  $21^\circ\text{C}$ , Steinwolle-Dämmung, Fensteranschlag innen, Lebensdauer der Wärmedämmung 40 Jahre, Erdsonde-Wärmepumpe mit  $JAZ = 3.9$  und dem heutigen CH-Verbrauchermix für Strom, wurde eine optimale Dämmstärke bezüglich Umweltbelastungspunkten von  $0.376 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.085 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ermittelt. Falls eine Wärmepumpe mit  $JAZ = 2.8$  eingesetzt würde, so ergäbe sich eine optimale Dämmstärke von  $0.440 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.073 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Bezüglich nicht erneuerbarer Primärenergie ergab sich für  $JAZ = 3.9$  eine optimale Dämmstärke von  $0.479 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.068 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Bei  $JAZ = 2.8$  entstand eine optimale Dämmstärke von  $0.563 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.058 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Bezüglich Treibhausgasemissionen ergab sich für  $JAZ = 3.9$  eine optimale Dämmstärke von  $0.260 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.120 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und bei  $JAZ = 2.8$  eine optimale Dämmstärke von  $0.299 \text{ m}$  bzw.  $U = 0.105 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Für ein typisches Mehrfamilienhaus mit Steinwolle-Dämmung im schweizerischen Mittelland und einer Erdsonden- oder Aussenluft-Wärmepumpe kann deshalb heute aus ökologischer Sicht ein Wärmedurchgangskoeffizient, der etwa dem SIA-Zielwert von  $U = 0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  entspricht, empfohlen werden. Falls fossile Energieträger eingesetzt würden, so müsste aus ökologischer Sicht noch deutlich mehr gedämmt werden.

Aufgrund der gefundenen Resultate kann insgesamt in ganz grober Näherung gesagt werden, dass meist etwa die ersten 20 cm der Wärmedämmung sehr wichtig sind, um den ökologischen Aufwand wesentlich zu reduzieren. Der erste Bereich der Wärmedämmung trägt besonders viel zur Reduktion des ökologischen Aufwandes bei.

Aufgrund des asymmetrischen Kurvenverlauf des totalen ökologischen Aufwandes in Funktion der Dämmstärke gilt, dass einige Zentimeter „zu viel dämmen“ ökologisch weniger schlecht ist, als einige Zentimeter „zu wenig dämmen“. Falls der Kurvenverlauf des ökologischen Aufwandes in Abhängigkeit der Dämmstärke im Bereich des Minimums relativ flach ist, dies ist meistens der Fall, so ist die genaue Dämmstärke nicht sehr kritisch.

Die optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten sind beim Umweltindikator Treibhausgasemissionen oft eher etwas grösser, als bei den anderen beiden Indikatoren. Der Grund dafür ist insbesondere die schweizerische Stromproduktion (vgl. Ökobilanzdaten). Beim CH-Verbrauchermix – im Wesentlichen Wasser- und Kernenergie – wird verhältnismässig wenig Kohlendioxid produziert. Dadurch verschieben sich die optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten bezüglich Treibhausgasemissionen zu grösseren Werten. Die im CH-Verbrauchermix enthal-

tene Kernenergie weist jedoch bezüglich der beiden anderen Umweltindikatoren höhere Werte auf. Somit entstehen bei den Indikatoren Primärenergie und Umweltbelastungspunkte eher kleinere optimale Wärmedurchgangskoeffizienten.

Bezüglich der Stromquelle «PV am Standort erzeugt» (Fig. 10) gilt einschränkend zu bemerken, dass hier – insbesondere im schweizerischen Mittelland – meist eine ausgeprägte saisonale Nichtübereinstimmung zwischen Stromproduktion und Stromnachfrage für die Gebäudeheizung besteht (Sommer-Winter).

Falls die verschiedenen Umweltindikatoren zu unterschiedlichen optimalen Dämmstärken führen und keinem Indikator eine klare Präferenz zugeordnet werden kann, so entsteht ein Zielkonflikt. Welche Dämmstärke soll nun aus ökologischer Sicht gewählt werden? Aufgrund des asymmetrischen Kurvenverlaufs (vgl. obige Diskussion) scheint es naheliegend, in dieser Situation zu höheren Dämmstärken zu tendieren, weil der „ökologische Schaden“ bezüglich der anderen Indikatoren relativ klein bleibt. Allerdings ist der Kurvenverlauf oft bereits vor dem Optimum relativ flach, so dass der ökologische Grenznutzen in diesem Bereich nur gering ist.

Verglichen mit einer Erdsonden-Wärmepumpe und dem CH-Verbrauchermix, gilt generell beim Energieträger Heizöl, in etwas reduziertem Masse auch bei Erdgas, dass die Umweltbelastung stark steigt. Es entstehen sehr grosse ökologisch sinnvolle Dämmstärken, welche die normativen Vorgaben, bzw. die in der Praxis anzutreffenden Dämmstärken, sehr deutlich übertreffen.

Da fossile Energieträger vorwiegend noch in Altbauten eingesetzt werden, sind hohe Dämmstärken hier besonders sinnvoll, jedoch bei Sanierungen oft nicht einfach zu realisieren.

Die in dieser Studie gefundenen optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten sind grossmehrheitlich deutlich kleiner als die Grenzwerte und nicht selten auch tiefer als die Zielwerte gemäss [SIA 380/1] (Fig. 11). D.h., dass heute aus ökologischer Sicht oft zu wenig gedämmt wird. Aufgrund des typischerweise relativ flachen Optimums, relativiert sich jedoch der dadurch entstehende ökologische Schaden.

Um die Umweltbelastung infolge des Beheizens von schweizerischen Wohnbauten zu minimieren, ergeben sich – zusätzlich zu Vorgaben bezüglich Dämmstärken – aus energie- bzw. umweltpolitischer Sicht insbesondere die folgenden Stossrichtungen:

- Ungedämmte Gebäude verursachen die grössten Umweltbelastungen: Die heutige Sanierungsrate von nur etwa 1% sollte erhöht werden.
- Verzicht auf den Einsatz von fossilen Energieträgern zu Heizzwecken: Ein Wechsel des Energieträgers – von Heizöl oder Erdgas zu einer effizienten Wärmepumpe mit CH-Verbrauchermix – bedeutet eine sprunghafte Reduktion des ökologischen Aufwandes.
- Umweltfreundliche Stromproduktion: Falls Wärmepumpen eingesetzt werden, ist der ökologische Aufwand zum Beheizen des Gebäudes wesentlich von der Art der Stromproduktion abhängig.

Die zunehmende Elektrifizierung von Gebäuden, die Verwendung von noch effizienteren Wärmepumpen, der verstärkte Trend zu erneuerbaren Energiequellen (saubere Nutzenergie) sowie der Klimawandel (wärmere Winter), führen tendenziell zu kleineren ökologisch optimalen Dämmstärken. Der technologische Fortschritt wird vermutlich bei Dämmstoffen auch zukünftig zu noch umweltfreundlicheren Herstellungsverfahren führen. Tendenziell steigen dadurch die ökologisch optimalen Dämmstärken. Welcher Effekt sich zukünftig stärker auswirken wird, ist

im Moment nicht absehbar und müsste durch eine analoge Studie mit aktualisierten Daten in einigen Jahren untersucht werden.

Mit dem Ausbruch des Ukraine-Krieges im Februar 2022 und der veränderten energiepolitischen Situation, wurde zunehmend eine potentielle Strommangellage im Winter thematisiert. Deshalb ist es wünschenswert, den Elektrizitätsbedarf von Gebäudeheizungen im Winter mithilfe von guten Wärmedämmungen klein zu halten. Aus dieser Sicht leisten gut gedämmte Gebäude einen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Winter. Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen – und der damit verbundene steigende Stromverbrauch, auch im Winter – spricht ebenfalls für die Begrenzung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäudeheizungen im Winter.

Diese Arbeit bestätigt insgesamt, dass Wärmedämmungen hocheffizient und unverzichtbar für die Reduktion der Umweltbelastung infolge des Beheizens von Wohngebäuden sind. Dies gilt für die Schweiz bzw. generell für Klimata mit relativ kalten Wintern. Produzenten von Dämmstoffen tragen mit fortschrittlichen, umweltfreundlichen Verfahren bei Herstellung und Entsorgung wesentlich dazu bei, die ökologischen Vorteile der Wärmedämmung von Gebäuden noch weiter zu steigern.

**Referenzen**

- [Eco10] Ecoinvent Datenbank Version 2.2, ecoinvent Centre, Dübendorf, 2010
- [Fri15] R. Frischknecht, F. Wyss, S. Büsser Knöpfel, T. Lützkendorf, M. Balouktsi, Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach, Int J Life Cycle Assess (2015) 20:957–969
- [Fri22] Persönliche Kommunikation, Email von Dr. Rolf Frischknecht, treeze, 2024-02-19
- [KBOB22] Ökobilanzdaten im Baubereich, KBOB/ecobau/IPB 2009/1:2022, Version 5, Excel-File, abgerufen am 2024-08-09  
[https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html](https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html)
- [Man15] H. Manz, H.-J. Althaus, C. Zeyer, D. Wohlgemuth, D. von Gunten, Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung, Hochschule Luzern, Horw, 2015, abgerufen am 2024-02-16  
<https://www.hslu.ch/-/media/campus/common/files/dokumente/ta/ta-forschung/zip/zip-berichte/schlussbericht-optimale-daemmstaerken.pdf?la=de-ch>
- [SIA180] SIA Norm 180: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2014
- [SIA380/1] SIA Norm 380/1: Heizwärmebedarf, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2016