



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 13.4.2015

Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, CH-8021 Zürich

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch/technik-architektur

Autoren:

- Daniela Wohlgemuth, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, daniela.wohlgemuth.01@hslu.ch
- Dimitri von Gunten, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, dimitri.vongunten@hslu.ch
- Dr. Christian Zeyer, E plus U Energie- und Umweltberatung & swisscleantech, christian.zeyer@swisscleantech.ch
- Dr. Hans-Joerg Althaus, Quantis Schweiz/Deutschland – Environmental Life Cycle Assessment Consultants & swisscleantech, hans-joerg.althaus@swisscleantech.ch
- Prof. Dr. Heinrich Manz, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, heinrich.manz@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns
BFE-Programmleiter: Rolf Moser
BFE-Vertragsnummer: SI/500841-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Dank

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie (BFE) und dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Rolf Moser (BFE) danken wir für einige sehr wertvolle Diskussionen.

Projektbegleitung

- Rolf Moser und Andreas Eckmanns, Bundesamt für Energie, Bern
- Dr. Annick Lalive d'Épinay und Dr. Heiri Gugerli, Fachstelle nachhaltiges Bauen, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich

Inhalt

	Seite
Formelzeichen.....	4
Zusammenfassung.....	6
Abstract.....	8
1. Einleitung.....	10
2. Methodik.....	12
2.1 Konzept.....	12
2.2 Vorgehen zur Definition der Referenzwohngebäude.....	13
2.3 Standorte.....	15
2.4 Gebäudesimulation und Heizwärmebedarf.....	15
2.5 Ökologischer Aufwand zur Deckung des Heizwärmebedarfs im Betrieb.....	18
2.6 Ökologischer Aufwand für Gebäudekomponenten.....	20
2.6.1 Wärmedämmung.....	20
2.6.2 Heizungsanlage.....	24
2.7 Totaler ökologischer Aufwand.....	26
2.8 Sensitivitätsanalyse.....	29
2.9 Vereinfachende Annahmen.....	30
2.10 Kriterien Feuchteschutz und thermischer Komfort.....	33
2.11 Kriterien Konstruktion und Recht.....	33
2.12 Unsicherheit der Resultate.....	33
3. Resultate.....	35
3.1 Parameterstudien (One-factor-at-a-time) Neubau und Altbau.....	35
3.2 Vergleich mit Normen und behördlichen Vorgaben.....	55
4. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit.....	58
4.1 Einleitung.....	58
4.2 Methodik.....	58
4.3 Resultate.....	60
4.3.1 Ökonomisches Optimum und Sensitivitätsanalyse.....	60
4.3.2 Ökologisch-ökonomische Betrachtung mit Schwerpunkt „Treibhausgase“.....	64
5. Diskussion	67
Literatur.....	72
 Anhang.....	 75
A Dokumentation der Ökobilanzdaten.....	76
B Modellierung der Befestigung der Dämmmaterialien.....	83
C Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden im Vergleich.....	86
D Koeffizienten <i>A</i> und <i>B</i> zur Charakterisierung des Heizwärmebedarfs.....	90

Formelzeichen

Indizes

<i>DS</i>	Dämmstoff
<i>HW</i>	Heizwärmebedarf
<i>HA</i>	Heizungsanlage
<i>WD</i>	Wärmedämmung (Dämmstoff und Unterkonstruktion)
<i>WP</i>	Wärmepumpe
<i>WV</i>	Wärmeverteilung
<i>UK</i>	Unterkonstruktion
<i>MW</i>	Mauerwerk
<i>tot</i>	total
<i>min</i>	minimal
<i>opt</i>	optimal
<i>eff</i>	effektiv bzw. bezogen auf effektive Wärmeleitfähigkeit
<i>ref</i>	Referenz bzw. bezogen auf Referenzwärmeleitfähigkeit, $\lambda_{ref} = 0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
<i>i</i>	Fallnummer (Gebäudetyp, Standort), wobei $i \in \{1, 2, \dots, 12\}$
<i>j</i>	Art des Aufwandes, wobei $j \in \{\text{Primärenergie}, \text{Treibhauspotenzial}, \text{UBP}\}$
<i>k</i>	Material der Wärmedämmung, wobei $k \in \{\text{EPS}, \text{Steinwolle}, \text{PUR}, \dots\}$
<i>p</i>	Wärmeverteilungssystem, wobei $p \in \{\text{Radiatoren}, \text{Fussbodenheizung}, \text{Luftheizung}\}$

Variablen, lateinische Buchstaben

<i>h</i>	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
<i>m</i>	Lebensdauer der Heizungsanlage (Anzahl Jahre)	a
<i>n</i>	Lebensdauer der Wärmedämmung (Anzahl Jahre)	a
<i>x</i>	Dämmstärke, wobei	m
<i>x</i>	Dämmstärke bei Referenzwärmeleitfähigkeit in der Simulation	
<i>x_{eff}</i>	(effektive) Dämmstärke	
<i>A</i>	Koeffizient, welcher den Heizwärmebedarf charakterisiert	$\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$
<i>B</i>	Koeffizient, welcher den Heizwärmebedarf charakterisiert	$\text{MJ}/(\text{m}\cdot\text{a})$
<i>C</i>	Koeffizient, welcher den ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Heizungsanlage charakterisiert:	
	Primärenergie	MJ/m^2
	Treibhauspotenzial	$\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2$
	Umweltbelastungspunkte	UBP/m^2
<i>D</i>	Koeffizient, welcher den ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Heizungsanlage charakterisiert:	
	Primärenergie	MJ/m
	Treibhauspotenzial	$\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}$
	Umweltbelastungspunkte	UBP/m
<i>JAZ</i>	Jahresarbeitszahl	-
<i>R</i>	thermischer Widerstand	$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$
<i>U</i>	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Variablen, griechische Buchstaben

α	spezifischer ökologischer Aufwand im Betrieb (Heizwärmebedarf), unter Berücksichtigung der Wärmequelle:	Primärenergie	MJ/MJ
		Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/MJ
		Umweltbelastungspunkte	UBP/MJ
β	spezifischer ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Wärmedämmung:	Primärenergie	MJ/kg
		Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/kg
		Umweltbelastungspunkte	UBP/kg
γ	Verhältnis zwischen ‚opaker Fassaden- und Dachfläche‘ und Geschossfläche		-
δ	Koeffizient, welcher den konstanten (dämmstärkenunabhängigen) ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt	Primärenergie	MJ/m ²
		Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m ²
		Umweltbelastungspunkte	UBP/m ²
ε	Koeffizient, welcher den variablen (dämmstärkenabhängigen) ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt	Primärenergie	MJ/m ³
		Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m ³
		Umweltbelastungspunkte	UBP/m ³
ζ	spezifischer ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen:	Primärenergie	MJ/MJ
		Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/MJ
		Umweltbelastungspunkte	UBP/MJ
λ	Wärmeleitfähigkeit		W/(m·K)
ρ	Dichte des Dämmstoffs		kg/m ³

Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die optimalen Dämmstärken hinsichtlich Minimierung der Umweltbelastung (Indikatoren Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkte) bei Wohnbauten in der Schweiz – unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszykluses eines Gebäudes – ermittelt.

Der Einfluss von Dämmstoff (EPS, Steinwolle, Glaswolle etc.), Unterkonstruktion (Dübel, Latten, Schrauben, Platten), Standort (Zürich, Davos, Lugano etc.), Gebäudegeometrie (EFH oder MFH), Innenraumtemperatur, Heizungsanlage, bestehend aus Heizkessel oder Wärmepumpe sowie Wärmeverteilung (Radiatoren-, Fussboden- oder Luftheizung), Energieträger (Heizöl, Erdgas, Holz bzw. Umweltwärme und Elektrizität) und Stromerzeugung (CH-Verbrauchermix, UCTE-Mix, Energiestrategie 2050 etc.) wurde quantitativ aufgezeigt. Zur Bewertung wurden anerkannte Methoden und Datenbanken eingesetzt sowie die Aspekte thermischer Komfort und Feuchteschutz als auch Kosten berücksichtigt.

Ein mathematisches Modell wurde entwickelt und die erforderlichen Eingabedaten in den drei Bereichen Wärmedämmung, Heizungsanlage und Heizwärmebedarf bereitgestellt. Bei der Wahl der Gebäudeparameter, Ökobilanzdaten etc. wurde angestrebt, möglichst die schweizerischen Verhältnisse abzubilden.

Es wurde aufgezeigt, dass eine quantitative, ökologische Analyse von „Dämmstandards“ unter Berücksichtigung aller relevanter Parameter möglich ist. Unterschiedliche Optimierungskriterien (Primärenergie, Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte) 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 Stromproduktion (bei Wärmepumpen) ist. Die optimale Dämmstärke kann deshalb objektspezifisch relativ stark variieren. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte auf, dass viele Gebäudeparameter, welche für den Heizwärmebedarf relevant sind, dies für die optimale Dämmstärke nicht sind.

Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich, Innentemperatur 21°C, Dämmung mit EPS, 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 $d = 0.28$ m bzw. ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U = 0.10$ W/(m²K) bestimmt. Falls eine Wärmepumpe mit $JAZ = 2.9$ eingesetzt würde, so ergäbe sich eine optimale Dämmstärke von $d = 0.32$ m bzw. $U = 0.09$ W/(m²K). Falls der Strom gemäss den Zielen der ‚Energiestrategie 2050‘ des Bundes produziert würde (Annahme $JAZ = 3.9$), so entstünde ein Optimum von $U = 0.18$ W/(m²K) bzw. $d = 0.16$ m. Falls dasselbe Gebäude mit Heizöl betrieben würde, so läge das Optimum bei $U = 0.09$ W/(m²K) bzw. $d = 0.32$ m.

Im ersten Bereich der Dämmung – oft ganz grob etwa zwischen 0 und knapp 20 cm (entsprechend $U \approx 0.15$ W/(m²K)) – fällt der totale ökologische Aufwand in Funktion der Dämmstärke relativ steil ab. Dieser Bereich der Wärmedämmung ist deshalb zur Minimierung der Umweltbelastung sehr wichtig. Der Kurvenverlauf des totalen ökologischen Aufwandes ist asymmetrisch. D.h., um ein bestimmtes Mass „zuviel dämmen“ ist ökologisch weniger nachteilig als um dasselbe Mass „zuwenig dämmen“.

Ein Wechsel des Energieträgers – von Heizöl oder Erdgas zu einer effizienten Wärmepumpe mit CH-Verbrauchermix – bedeutet im Allgemeinen eine sprunghafte Reduktion des ökologischen Aufwandes.

Der quantitative Einfluss der Unsicherheit der Eingabeparameter des Modells auf die Resultate wurde mit Hilfe einer Monte-Carlo-Methode untersucht. Da die Unsicherheiten der Ökobilanzergebnisse in der verwendeten Ecoinvent-Datenbank nicht verfügbar sind, kann jedoch keine verbindliche Aussage zur totalen Unsicherheit der Resultate formuliert werden.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigte, dass die ökonomisch optimalen Dämmstärken mehrheitlich signifikant kleiner als die entsprechenden ökologischen Optima sind. Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich wurden ökonomischen Optima von $U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einem Heizölkessel und $U = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einer Erdsonden-Wärmepumpe ($JAZ = 3.9$) gefunden. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die ökonomischen Optima wurde aufgezeigt. Mehr dämmen als ökonomisch optimal muss auch unter dem Aspekt des ökologischen Grenznutzens betrachtet werden. Ganz grob kann gesagt werden, dass bis etwa $U \approx 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ die Mehrkosten relativ gering bleiben.

Diese Studie zeigt insbesondere die Einflussfaktoren auf die ökologisch optimale Dämmstärke auf und quantifiziert diese. Die Studie zeigt ebenfalls, dass die aktuellen normativen bzw. behördlichen Vorgaben bezüglich Wärmedurchgangskoeffizienten – aus der Sicht der Minimierung der Umweltbelastung – insgesamt ganz grob und pauschal als sinnvoll bezeichnet werden können. Es ist jedoch möglich und prüfenswert, normative bzw. behördliche Vorgaben durch den Einbezug weiterer Parameter (z.B. Energieträger) objektspezifisch zu präzisieren und so den ökologischen Aufwand des Gebäudeparkes Schweiz weiter zu reduzieren.

Stichwörter: ökologisch optimale Dämmstärke, schweizerische Wohnbauten, Lebenszyklus, Primärenergie, Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte, Heizungsanlage, Energieträger, Kosten

Abstract

This study sets out to calculate the optimal thicknesses of thermal insulation of residential buildings in Switzerland as regards minimising the environmental impact (environmental indicators: cumulative energy demand, global warming potential and eco-points) and taking the whole life cycle of a building into account.

The impact of insulation material (polystyrene, rockwool, glass wool etc.), subconstruction (dowels, slats, screws, slabs), location (Zurich, Davos, Lugano etc.), building geometry (single-family or multi-family house), internal temperature, heating system including furnace or heat pump and heat distribution (radiator, floor or air heating), energy carrier (heating oil, natural gas, fuelwood, environmental heat and electricity) as well as generation of electricity (Swiss consumer and UTCE mix, energy strategy 2050) was shown quantitatively. Widely acknowledged life cycle assessment methods and databases were applied. Thermal comfort, protection against moisture as well as costs were taken into consideration.

A mathematical model was developed and all required input data of the three domains thermal insulation, heating system and heating energy demand made available. The goal was to represent the Swiss situation when choosing the input data.

This study shows that a quantitative, ecological analysis of insulation standards taking all relevant parameters into account is feasible. Different optimisation criteria (environmental indicators) result in different optimal insulation thicknesses. The optimal insulation thicknesses are the larger the colder the external climate, the higher the internal temperature, the smaller the building, the more “environmentally friendly” the insulation material, the longer the service life of the insulation, the smaller the annual mean of the coefficient of performance COP (in the case of a heat pump) and the “dirtier” the energy carrier or the generation of electricity (in the case of a heat pump). Therefore, the optimal thickness can vary quite significantly from case to case. By means of a sensitivity analysis it was shown that many parameters, which are relevant for the heating energy demand, are not relevant for the optimal thickness.

For a multi-family house with six flats in Zurich, internal temperature 21°C, insulation made of polystyrene, service life of insulation of 40 years, ground-source heat pump with a $COP = 3.9$ and today's Swiss consumer mix for electricity, an optimal insulation thickness in terms of eco-points of $d = 0.28$ m corresponding to a thermal transmittance of $U = 0.10$ W/(m²K) was found. If a heat pump with a $COP = 2.9$ was used the optimal thickness would change to $d = 0.32$ m or $U = 0.09$ W/(m²K). If the electricity was generated according to the goals of the “energy strategy 2050” of the Swiss government (assumption $COP = 3.9$) an optimum of $d = 0.16$ m or $U = 0.18$ W/(m²K) would apply. If the same building was heated by oil an optimum of $d = 0.32$ m or $U = 0.09$ W/(m²K) would occur.

Within the first part of the insulation – often roughly between 0 and nearly 20 cm (corresponding to $U \approx 0.15$ W/(m²K)) – the total environmental impact as a function of the insulation thickness decreases significantly. This part of the insulation is, therefore, very important as regards minimising the environmental impact. The shape of the curve of the total environmental impact is asymmetric meaning that a certain measure of “too much insulation” is ecologically less damaging than the same measure of “not enough insulation”.

This study shows that a change of the energy carrier – from heating oil or natural gas to an efficient heat pump with a Swiss consumer mix – in general results in a very pronounced reduction of the environmental impact.

The quantitative impact of the uncertainty of the input parameters of the model on the results was analysed by means of a Monte-Carlo method. Because the uncertainties of the LCA data were not available in the ecoinvent database, no total uncertainties of results could be calculated.

An economic analysis showed that optimal insulation thicknesses from the point of view of economics are mostly significantly smaller than from the point of view of ecology. For a multi-family house with six flats in Zurich an economical optimum of $U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in the case of heating oil and $U = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in the case of a ground-source heat pump with a $COP = 3.9$ was calculated. The influence of several parameters on the optimum was shown. If more insulation is used than what would be optimal in terms of economics the ecological marginal benefit has to be taken into consideration. However, up to very roughly $U \approx 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ the additional costs remain small.

This study analyses and quantifies the factors that influence the ecological optimum of thermal insulation and shows their impact on the result. The results suggest that today's Swiss standards and regulatory requirements as regards thermal transmittances of opaque elements of building envelopes – from the point of view of minimizing the environmental impact – can be considered, by and large, as reasonable. However, standards and regulatory requirements could be refined and adjusted case-by-case taking additional parameters into account (e.g. energy carrier) and hence reduce the environmental impact of the building stock.

Key words: optimal ecological thickness of thermal insulation, Swiss residential buildings, life cycle, cumulative energy demand, global warming potential, eco-points, heating system, energy carrier, costs

1. Einleitung

Bei Erstellung, Betrieb, Renovation und Entsorgung von Gebäuden entsteht ein gewaltiger Energie- und Ressourcenbedarf und es werden grosse Mengen an Emissionen verursacht. Weltweit ist der Gebäudebereich für 70% der Landschaftsveränderungen, 50% des Ressourcenbedarfs und 40% der Emissionen verantwortlich [Une03]. In der Europäischen Union entfällt 40% des Gesamtenergieverbrauchs auf Gebäude [Ric10]. Die 1.64 Millionen Gebäude in der Schweiz – 83% davon sind reine Wohngebäude – benötigen 46% des inländischen Gesamtenergieverbrauchs bzw. 49% des fossilen Inlandverbrauchs und 37% des Stromverbrauchs [ScE12]. Das Beheizen von Gebäuden in der Schweiz im Jahr 2011 führte zu 31% des inländischen Endenergiebedarfs und zu 39% des Treib- und Brennstoffverbrauches [BFE12].

Gebäude stellen auch beträchtliche ökonomische Werte dar. So wird der Wiederbeschaffungswert des schweizerischen Gebäudeparks auf etwa 2'500 Milliarden CHF geschätzt [Bur10]. Die Kosten für die energetische Sanierung aller alten Gebäude in der Schweiz werden auf ungefähr 280 Milliarden CHF prognostiziert [Von12]. Die Hausbesitzer und der Bund werden voraussichtlich mehr als 40 Jahre benötigen, um diese Leistung zu erbringen. Es ist von grosser Bedeutung, die gewaltigen ökonomischen Aufwände, welche die Energiewende erfordert, in eine ökologisch möglichst sinnvolle Richtung zu lenken.

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]. Auf welcher Grundlage können die Grenz- und Zielwerte definiert werden? Welches Optimierungskriterium soll angewandt werden?

Die Frage, welche Dämmstärken bei Gebäuden energetisch, ökologisch oder ökonomisch sinnvoll sind, wurde bereits in zahlreichen Arbeiten untersucht bzw. wurden Überlegungen zu Betriebsenergie und grauer Energie bei Gebäuden formuliert [Bar13, Ber14, Boe02, Boe07, Sch12, Zey11, Rag12, Spr95, Set10, Man10, Dom07, Kay12, Kay08, Ost11, Oze11, Zhu11]. Die meist verwendete Heizgradtagmethode [Bar13, Boe02, Boe07, Dom07, Man10, Kay08, Spr95, Rag12, Zey11, Zhu11] kann jedoch – nicht zuletzt aufgrund der starken Abhängigkeit der Anzahl der Heizgradtage von der Dämmstärke – den effektiven Heizwärmebedarf nur sehr ungenau beschreiben. Die Einflüsse von Gebäudetechnik und Energieträger wurden bis anhin höchstens ansatzweise berücksichtigt. Zudem wurden vor allem die Einzelkriterien Primärenergie, CO₂-Emissionen und Kosten betrachtet. In [Boe07] wurden die erforderlichen Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt, um die Post-Kyoto-Klimaschutzziele zu erreichen. In Referenz [Ost11] werden ökologisch optimale Dämmstärken – unter Verwendung von mehreren Umweltindikatoren – von 50 cm bis 70 cm postuliert. Bezüglich Klimadaten, Energieträgern und Heizsystemen wurden Annahmen, welche für Deutschland repräsentativ sind, getroffen sowie eine fixe Heizgrenztemperatur von 18°C eingesetzt.

Die Vielzahl der für ein Optimum relevanten Parameter der Bereiche Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieträger bzw. Stromerzeugung bei einem bestimmten Gebäude an einem bestimmten Standort, erschwert die Analyse wesentlich. Aufgrund von unterschiedlichen Klimata, Baukonstruktionen etc. – aber auch von länderspezifischen Situationen bezüglich Stromversorgung oder Ökobilanzdaten – sind Resultate nur sehr beschränkt übertragbar. Somit fehlt bis heute eine zuverlässige, umfassende und aktuell für die Schweiz

gültige Grundlage, um ökologisch sinnvolle Dämmstärken bei Wohngebäuden definieren zu können. In Anbetracht der ökologischen und ökonomischen Bedeutung dieser Fragestellung ist dies erstaunlich. Auf der Basis der erwähnten Arbeiten, soll deshalb die Frage nach den ökologisch optimalen Dämmstärken in der vorliegenden Studie vertieft und bezogen auf die Schweiz sowie mit Hilfe von aktuellen Ökobilanzdaten behandelt werden. Es soll – unter Verwendung eines mathematischen Modells – quantifiziert werden, welchen Einfluss die Dämmstärke bei verschiedenen Kombinationen von Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieversorgungssystem auf die Umweltbelastungen beim Beheizen von schweizerischen Wohngebäuden aufweist und die ökologisch optimalen Dämmstärken aufgezeigt werden. Das Ziel ist es, besser zu verstehen, wie die thermische Behaglichkeit in schweizerischen Wohngebäuden im Winter garantiert und gleichzeitig die Umweltbelastungen bei Erstellung, Betrieb und Entsorgung von Gebäuden bzw. Gebäudekomponenten minimiert werden können. Die Resultate der Studie sind grundsätzlich sowohl auf Sanierungen als auch auf Neubauten anwendbar.

Im Folgenden wird deshalb eine Methode zur Quantifizierung des ökologischen Aufwandes und zur Bestimmung der ökologisch optimalen Dämmstärke infolge des Beheizens von Wohngebäuden in der Schweiz entwickelt und beschrieben. Der ökologische Aufwand wird dabei in Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkten ausgedrückt.

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. Der chemisch gespeicherte Energieinhalt der fossilen Rohstoffe und der Primärwaldbiomasse (= oberer Heizwert) und der thermische Energieinhalt des in einem Druckwasserreaktor erzeugten Dampfes (560 GJ/kg Unat) werden addiert.

Die Grösse Treibhauspotenzial, ausgedrückt in kg CO₂-Äquivalent, gibt an, welchen Beitrag eine bestimmte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt leistet. Als Referenzsubstanz wird dabei CO₂ verwendet. In dieser Studie wird die mittlere Erwärmungswirkung der Emissionen über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP 100 a) betrachtet.

Die Methode der ökologischen Knappheit [BAF08, BAF09] ist ein für die Schweiz entwickeltes Bewertungsverfahren, um die Auswirkungen von emittierten Stoffen wie z.B. CO₂ oder NO_x sowie den Einsatz von Ressourcen wie z.B. Erdöl oder Wasser zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte UBP) zusammenzufassen. 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 "distance-to-target" Methode bezeichnet.

2. Methodik

2.1 Konzept

Die drei Größen Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkte, welche den ökologischen Aufwand repräsentieren, werden in Funktion der Dämmstärke modelliert:

- **Wärmedämmung (WD):** ökologischer Aufwand infolge Herstellung und Entsorgung der Wärmedämmung in Abhängigkeit der Dämmstärke; unverzichtbare, bereits vorhandene Fassadenelemente (Aussen- und Innenputz, Mauerwerk etc.) werden nicht betrachtet; berücksichtigt werden der Dämmstoff, die Materialien für die Unterkonstruktion (Dübel, Latten, Schrauben) bzw. die für einen bestimmten Dämmstoff erforderlichen Zusatzelemente (Weichfaserplatte bei Zellulosefasern, XPS-Platten und PUR-Montagestreifen bei VIP) sowie die Lebensdauer
- **Heizungsanlage (HA):** ökologischer Aufwand infolge Herstellung und Entsorgung der ev. vorhandenen Wärmepumpe und des Wärmeverteilsystems (Radiatoren-, Fussboden- oder Luftheizung), unter Berücksichtigung der Lebensdauer (Bemerkung: Heizkessel siehe Heizwärmebedarf)
- **Heizwärmebedarf (HW):** ökologischer Aufwand im Betrieb zur Deckung des Heizwärmebedarfs, unter Berücksichtigung von Gebäudetyp, Standort (lokales Klima), Energieträger sowie Jahresarbeitszahl und Stromproduktion bei Wärmepumpen; der ökologische Aufwand infolge Herstellung und Entsorgung der Heizkessel ist in den verwendeten Ökobilanzdaten für den Heizwärmebedarf enthalten

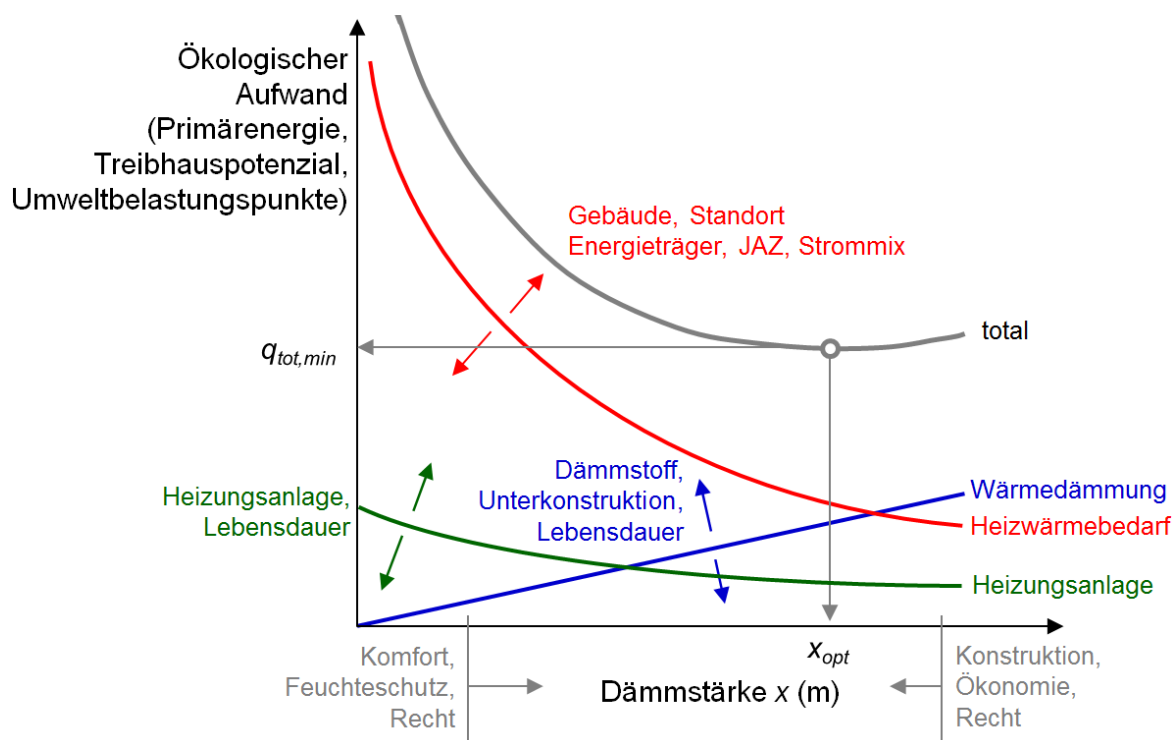


Fig. 1: Grundidee zur Bestimmung der ökologisch optimalen Dämmstärke x_{opt} bzw. des minimalen totalen ökologischen Aufwandes $q_{tot,min}$.

Diese drei Einflussbereiche werden je durch eine Funktion mit verschiedenen Parametern beschrieben, welche entweder aufgrund von Gebäudesimulationen und/oder Ökobilanzdaten

bestimmt werden. Die Betrachtung wird für ein Betriebsjahr und pro Quadratmeter Geschossfläche durchgeführt, wobei die unterschiedlichen Lebensdauern von Wärmedämmung mit Unterkonstruktion sowie Heizkessel und Wärmeverteilsystem der Heizungsanlage berücksichtigt werden. Der totale ökologische Aufwand entsteht durch die Überlagerung der drei Funktionen. Durch die analytische Ermittlung der Extremalstelle (Minimum) der Funktion für den totalen ökologischen Aufwand, wird die optimale Dämmstärke bzw. der minimale totale ökologische Aufwand bestimmt. Fig. 1 illustriert diese Grundidee.

Zusätzliche Kriterien bei der Wahl der Dämmstärke sind auch Komfort, Feuchteschutz, Konstruktion, Recht und Ökonomie. Aus der Sicht des thermischen Komforts (insbesondere Infrarotstrahlungsaustausch Mensch-Wandoberflächen) und des Feuchteschutzes (Oberflächenkondensation, Schimmelpilz) ist eine minimale Dämmstärke erforderlich, damit die innenraumseitigen Oberflächentemperaturen im Winter nicht zu tief liegen. Die Kriterien Konstruktion, Recht und Ökonomie können die Dämmstärke ebenfalls begrenzen (siehe Fig. 1).

2.2 Vorgehen zur Definition der Referenzwohngebäude

Gemäss [BFS11] besteht der Gebäudepark der Schweiz aus 1.64 Millionen Gebäuden mit einer Wohnnutzung. Davon sind 1.36 Millionen reine Wohngebäude: 0.95 Millionen Einfamilienhäuser und 0.42 Millionen Mehrfamilienhäuser. Gemäss derselben Quelle gibt es in diesen Gebäuden 4.08 Millionen Wohnungen. Unterscheidet man aufgrund der Anzahl Wohneinheiten pro Wohngebäude so gilt nach [BFS04] die Aufteilung, wie in Tab. 1 gezeigt. Das Einfamilienhaus ist demnach mit einem Anteil von 66.6% das häufigste Gebäude. Nur 8.3% der Wohngebäude besitzen mehr als 6 Wohneinheiten.

1 Wohneinheit	66.6 %
2 Wohneinheiten	12.4 %
3 Wohneinheiten	5.3 %
4 Wohneinheiten	2.7 %
5 bis 6 Wohneinheiten	4.8 %
7 bis 9 Wohneinheiten	4.0 %
10 bis 14 Wohneinheiten	2.5 %
15 bis 19 Wohneinheiten	0.9 %
Mehr als 20 Wohneinheiten	0.9 %
Total	100 %

Tab. 1: Wohngebäude nach Zahl der Wohneinheiten [BFS04, S. 57]

Im Jahre 2010 wurden gemäss [BFS11] mehr als die Hälfte der Gebäude in der Schweiz mit Heizöl beheizt (Tab. 2). Weitere wichtige Energieträger für die Heizung waren Gas, Holz und Elektrizität, wobei die Zahl der Wärmepumpen in den letzten Jahren stark angestiegen ist.

Jedes Wohngebäude ist grundsätzlich ein Unikat, wobei doch gewisse geometrische und baukonstruktive Eigenschaften wesentlich verbreiteter sind als andere. Im Rahmen dieser Studie wurden vereinfachend drei für den schweizerischen Gebäudebestand „typische“ Wohngebäude unterschiedlicher Grösse definiert. Mit Hilfe dieser Gebäude werden die weiteren Untersuchungen durchgeführt (Tab. 3).

<i>Energieträger der Heizung</i>	<i>Anteil Gebäude</i>
Heizöl	51.2 %
Kohle	0.1 %
Gas	15.1 %
Elektrizität	10.2 %
Holz	12.1 %
Wärmepumpe	8.6 %
Sonnenkollektor	0.1 %
Fernwärme	1.8 %
Andere Energieträger	0.6 %
Total	100 %

Tab. 2: Gebäude nach Heizungsart und Energieträger der Heizung [BFS11, S.19]



Fig. 2: Fassadenfotos „typischer“ schweizerischer Mehrfamilienhäuser mittlerer Grösse [WvG13]

<i>Gebäudetyp</i>	<i>Einfamilienhaus EFH</i>	<i>Mehrfamilienhaus MFH-6</i>	<i>Mehrfamilienhaus MFH-12</i>
Anzahl Wohneinheiten	1	6	12
Gebäude Länge (m)	13.3	27.6	27.6
Gebäude Breite (m)	10.3	9.0	9.0
Gebäude Höhe (m)	5.2	8.2	16.4
Fensterfläche N (%)	11	11	11
Fensterfläche O (%)	15	15	15
Fensterfläche S (%)	41	41	41
Fensterfläche W (%)	25	25	25
gedämmte Hüllfläche (m ²)	243.1	599.3	1200.5
Widerstand Mauerwerk (m ² K/W)	0.54	0.54	0.54
Geschossfläche (m ²)	124.4	745.2	1490.4
Gamma* (-)	1.25	0.94	0.77

Tab. 3: Drei Typen von Referenzgebäuden mit einigen Gebäudeparametern (mit * bezeichnete Grösse wird nachfolgend definiert)[WvG13, WvG14]

Aufgrund von Fassadenfotos (Fig. 2), Plänen, Normen, SIA-Merkblättern etc. wurden die Parameter der Referenzgebäude bestimmt. Das Vorgehen dazu ist in [WvG13, WvG14] beschrieben.

2.3 Standorte

Je nach Standort variiert das Aussenklima und somit auch der bei einer bestimmten Dämmstärke entstehende Heizwärmebedarf. Tab. 4 charakterisiert das Klima an drei Standorten, welche das schweizerische Mittelland, eine alpine Region sowie die Südschweiz repräsentieren. Insgesamt wurden in dieser Studie sieben Standorte in der Schweiz verwendet.

	Zürich-SMA	Davos	Lugano
Höhe (m ü. M.)	556	1561	275
Jahresmitteltemperatur (°C)	8.5	3.1	11.8
Jährliche Globalstrahlung horizontal (MJ/m ²)	4285	4907	4658
Mitteltemperatur im Januar (°C)	-1.1	-6.2	1.9
Globalstrahlung horizontal im Januar (MJ/m ²)	106	174	148
Heizgradtage 20°C/12°C (K·d)	3717	5884	2644

Tab. 4: Klimadaten von drei Standorten [SIA381/2]

2.4 Gebäudesimulation und Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf der Referenzgebäude wurde an den jeweiligen Standorten mit Hilfe der Methode der thermischen Gebäudesimulationen ermittelt, in welcher sämtliche Energieflüsse, welche den Heizwärmebedarf bestimmen, berücksichtigt werden. Berechnet werden die zeitabhängigen solaren Gewinne, die Transmissionswärmeflüsse, der Lüftungswärmefluss, die internen Wärmequellen und die Wärmeaufnahme bzw. -abgabe der Bauteile. In Zeitschritten von einer Stunde werden die Energiebilanzgleichungen gelöst und die benötigte Heizleistung, damit die vorgegebene Innentemperatur nicht unterschritten wird, berechnet. Daraus ergibt sich der in einem Betriebsjahr erforderliche Heizwärmebedarf.

Die beiden Gebäudesimulationsprogramme IDA ICE [IDA09] und HELIOS [HEL09] wurden verwendet, wobei die definitiven Heizwärmebedarfswerte mit IDA ICE bestimmt wurden.

Vereinfachend wurde angenommen, dass dieselbe Dämmstärke und derselbe Dämmstoff für Fassaden und Dach verwendet werden. Variiert wurde bei einem bestimmten Gebäude an einem bestimmten Standort die Dicke der Wärmedämmung der Fassaden und des Daches. Alle übrigen Parameter blieben unverändert (Ceteris-Paribus-Annahme).

Es wurde von der in der Schweiz sehr weit verbreiteten Massivbauweise ausgegangen. Der Dämmstoff wird aussen auf das Mauerwerk (Fassaden) bzw. auf die Betonplatte (Dach) angebracht.

Der Wertebereich der Dämmstärken in den Simulationen betrug:

$$0.05 \text{ m} \leq x \leq 0.6 \text{ m} \quad (1)$$

x Dämmstärke bei Referenzwärmeleitfähigkeit, m
 wobei $\lambda_{ref} = 0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Das Resultat der Simulation ist der Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Geschossfläche in Abhängigkeit (diskret) der Dämmstärke:

$$q_i = f(x) \quad \text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a}) \quad (2)$$

i Fallnummer

Es werden drei unterschiedliche Gebäudetypen in sieben schweizerischen Klimata betrachtet. Für jeden dieser Fälle wurde der Heizwärmebedarf in Abhängigkeit der Dämmstärke ermittelt.

Die mit Hilfe der Gebäudesimulation berechneten diskreten Werte des Heizwärmebedarfs pro Quadratmeter Geschossfläche wurden mit Hilfe von Fitfunktionen mit dem folgenden Ansatz zusammengefasst:

$$q_i(x) = A_i + B_i \cdot \frac{1}{x} \quad \text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a}) \quad (3)$$

i Fallnummer

A Koeffizient, welcher den Heizwärmebedarf charakterisiert $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$

B Koeffizient, welcher den Heizwärmebedarf charakterisiert $\text{MJ}/(\text{m}\cdot\text{a})$

Der Ansatz in Gl. 3 wurde, nicht zuletzt im Hinblick auf eine einfache analytische Lösung für die optimale Dämmstärke, definiert. Fig. 3 zeigt beispielhaft Simulationsresultate und Fits. In Anhang D sind die – im Folgenden verwendeten – Koeffizienten A und B von drei Gebäuden an sieben Standorten tabelliert (Quelle [WvG14]).

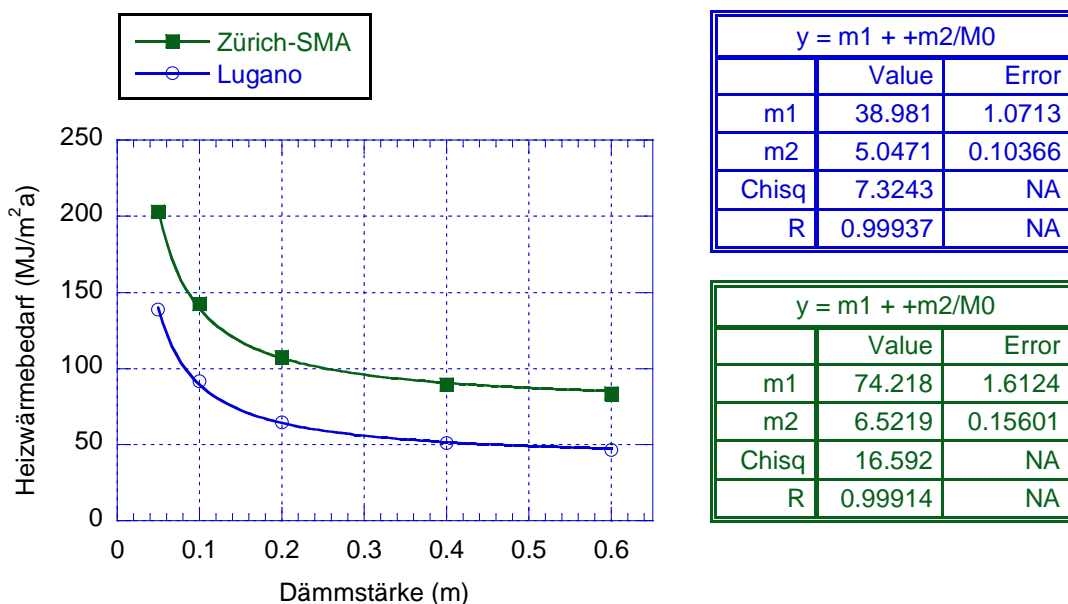


Fig. 3: Beispiele für Simulationsresultate (Punkte) und Fits (Linien) bei einem Mehrfamilienhaus in Zürich-SMA und Lugano

Die Simulationen wurden mit einem fiktiven Dämmstoff, welcher eine Referenzwärmeleitfähigkeit von $\lambda_{ref} = 0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aufweist, durchgeführt. Besitzt der effektive Dämmstoff

eine abweichende Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} und/oder weist bereits die Unterkonstruktion einen nicht vernachlässigbaren thermischen Widerstand R_{UK} auf (vgl. Tab. 12), so kann die effektive Dämmstärke x_{eff} wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{x}{\lambda_{ref}} = \frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + R_{UK} \quad \text{m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (4)$$

x	Dämmstärke bei Referenzwärmeleitfähigkeit in der Simulation	m
λ_{ref}	Referenzwärmeleitfähigkeit, $\lambda_{ref} = 0.036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	W/(m·K)
x_{eff}	effektive Dämmstärke	m
λ_{eff}	effektive Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
R_{UK}	thermischer Widerstand der Unterkonstruktion	m ² ·K/W

Dabei wird angenommen, dass bei Wärmedämmungen mit demselben thermischen Widerstand derselbe Heizwärmebedarf entsteht. Die effektive Dämmstärke x_{eff} beträgt nun:

$$x_{eff} = \lambda_{eff} \cdot \left(\frac{x}{\lambda_{ref}} - R_{UK} \right) \quad \text{m} \quad (5)$$

Die Wahl von konstanten Grössen wie Wärmebrückenverlustfaktor und thermisch relevantem Luftwechsel beeinflusst vor allem den Koeffizienten A_i der Fitfunktion (Gl. 3), jedoch den Koeffizienten B_i fast nicht. Wärmebrückenverlustfaktor und thermisch relevanter Luftwechsel sind deshalb kaum bedeutsam hinsichtlich der optimalen Dämmstärke (siehe Gl. 31), beeinflussen jedoch den minimalen totalen ökologischen Aufwand (siehe Gl. 34).

Bei bekannter Dämmstärke x_{eff} kann mit dem Zusammenhang

$$\frac{1}{U_{eff}} = \frac{1}{h_{int}} + R_{MW} + R_{UK} + \frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + \frac{1}{h_{ext}} \quad \text{m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (6)$$

der Wärmedurchgangskoeffizient wie folgt bestimmt werden:

$$U_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + R_{MW} + R_{UK} + \frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (7)$$

h_{int}	Wärmeübergangskoeffizient innen, $h_{int} = 7.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_{ext}	Wärmeübergangskoeffizient aussen, $h_{ext} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
R_{MW}	thermischer Widerstand des Mauerwerks in der Simulation, $R_{MW} = 0.37 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Vereinfachend wird angenommen, dass das Mauerwerk in der Fassade denselben thermischen Widerstand wie die Betondecke beim Dach aufweist. Insbesondere bei höheren Dämmstärken ist der Einfluss dieser Grössen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten relativ gering (Bemerkung: $R_{MW} = 0.37 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ entspricht etwa verputztem Mauerwerk aus 15 cm Backstein oder 1.3 cm Dämmstoff mit $\lambda_{ref} = 0.036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

Mit den numerischen Werten für R_{MW} , h_{int} und h_{ext} (siehe oben), kann nun der effektive Wärmedurchgangskoeffizient wie folgt berechnet werden:

$$U_{eff} = \frac{1}{0.54 + R_{UK} + \frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (8)$$

2.5 Ökologischer Aufwand zur Deckung des Heizwärmebedarfs im Betrieb

Aus dem mit Hilfe der Gebäudesimulation berechneten Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Geschossfläche $q_i(x)$ lässt sich nun der ökologische Aufwand im Betrieb berechnen. Der durch den Betrieb verursachte ökologische Aufwand pro Quadratmeter Geschossfläche und Heizperiode beträgt:

$$q_{HW,i,j}(x) = \frac{\alpha_j}{JAZ} \cdot q_i(x) \quad \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ UBP}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \quad (9)$$

<i>JAZ</i>	Jahresarbeitszahl	-
<i>j</i>	Art des Aufwandes, wobei $j \in \{\text{Primärenergie}, \text{Treibhauspotenzial}, \text{UBP}\}$	
α	spezifischer ökologischer Aufwand zur Bereitstellung der elektrischen oder thermischen Energie:	
	Primärenergie	MJ/MJ
	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/MJ
	Umweltbelastungspunkte	UBP/MJ

$q_i(x)$ gemäss Gl. 3 bezieht sich auf die Stufe Nutzenergie bzw. Nutzwärme. Für verschiedene Brennstoffe kann der spezifische ökologische Aufwand bezogen auf die Nutzwärme der Referenz [Eco10] entnommen werden.

Im Falle von Wärmepumpen ist die Jahresarbeitszahl *JAZ* relevant. Die Jahresarbeitszahl *JAZ* bezeichnet das Verhältnis zwischen der während eines Jahres abgegebenen Heizwärme (Nutzwärme) und der aufgenommenen elektrischen Energie. Somit kann aus der Nutzwärme die erforderliche elektrische Endenergie berechnet werden.

Wärmequelle	Spezifischer ökologischer Aufwand (Nutzwärme)		
	α		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/MJ	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/MJ	Umwelt- belastungspunkte UBP/MJ
Heizkessel Heizöl EL ¹	1.41E+00	9.47E-02	5.24E+01
Heizkessel Erdgas ²	1.32E+00	7.77E-02	3.80E+01
Heizkessel Holzsnitzel ³	1.08E-01	6.36E-03	3.75E+01
Heizkessel Biogas ⁴	4.39E-01	6.19E-02	4.10E+01

Tab. 5: Spezifischer ökologischer Aufwand (bezogen auf die Nutzwärme) für die betrachteten Wärmequellen (Daten aus [Eco10])

Unter Verwendung der Fitfunktion gemäss Gl. 3, entsteht für den ökologischen Aufwand pro Quadratmeter Geschossfläche und Heizperiode:

$$q_{HW,i,j}(x) = \frac{\alpha_j}{JAZ} \cdot \left(A_i + B_i \cdot \frac{1}{x} \right) \quad \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ UBP}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \quad (10)$$

¹ Nutzwärme, Heizöl EL, ab Heizkessel 10 kW, nicht-modulierend (CH)

² Nutzwärme, Erdgas, ab Heizkessel Geb. nicht-mod. < 100 kW (RER)

³ Nutzwärme, ab Schnitzelheizung 50kW, Wald-HS, Holzmix (CH)

⁴ Basierend auf ecoinvent, siehe Anhang A

Für Wärmequellen, die auf Verbrennung basieren, existieren Angaben zum ökologischen Aufwand bezogen auf die Nutzwärme (Tab. 5). In diesen Fällen muss die Jahresarbeitszahl $JAZ = 1$ verwendet werden, da die Wirkungsgrade bereits berücksichtigt sind. Die Daten aus [Eco10] in Tab. 6 beinhalten auch den ökologischen Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Heizkessel, jedoch nicht den ökologischen Aufwand für das Wärmeverteilungssystem (vgl. Kap. 2.6.2).

Im Falle von Wärmepumpen, werden unterschiedliche Jahresarbeitszahlen betrachtet. Typische Werte für Jahresarbeitszahlen von heutigen Elektrowärmepumpen sind gemäss [SIA380/1]: Luft/Wasser $JAZ = 2.8$, Erdsonden $JAZ = 3.9$ und Grundwasser $JAZ = 3.4$.

Der ökologische Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen wird in Kap. 2.6.2 behandelt.

Tab. 6 beruht ebenfalls auf Daten aus [Eco10] und zeigt den ökologischen Aufwand zur Bereitstellung von elektrischer Endenergie in Abhängigkeit der Art der Stromproduktion.

Stromproduktion	Spezifischer ökologischer Aufwand (elektrische Endenergie)		
	α		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/MJ	Treibhaus- potenzial kg CO ₂ e/MJ	Umwelt- belastungspunkte UBP/MJ
CH-Verbrauchermix ⁵	2.63E+00	4.13E-02	1.27E+02
UCTE-Mix ⁶	3.32E+00	1.65E-01	1.79E+02
Wasserenergie ⁴	3.49E-02	3.52E-03	1.73E+01
Kernenenergie ⁴	4.07E+00	4.52E-03	1.58E+02
PV vom Netz ⁴	3.38E-01	2.25E-02	4.59E+01
Windenergie ⁴	1.01E-01	7.56E-03	2.44E+01
Energiestrategie 2050 (2020) ⁴	1.76E+00	1.55E-02	8.48E+01
Energiestrategie 2050 (2035) ⁴	7.39E-01	4.45E-02	4.80E+01
Energiestrategie 2050 (2050) ⁴	4.14E-01	3.81E-02	4.27E+01

Tab. 6: Spezifischer ökologischer Aufwand, bezogen auf die Endenergie, in Abhängigkeit der Art der Stromproduktion (Daten aus bzw. basierend auf [Eco10])

⁵ Strom, Niederspannung, ab Netz (CH)

⁶ Strom, Niederspannung, Produktion UCTE, ab Netz (UCTE)

2.6 Ökologischer Aufwand für Gebäudekomponenten

2.6.1 Wärmedämmung

Im Folgenden wird die Herstellung und – nach Ende der Lebensdauer – die Entsorgung der Wärmedämmung sowie der Unterkonstruktion (Dübel, Latten, Schrauben, Platten) betrachtet. Sowie vorhandene Schichten, wie z.B. Aussen- und Innenputz sowie das Mauerwerk, werden nicht bilanziert. Dieser ökologische Aufwand beträgt pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr sowie in Abhängigkeit der effektiven Dämmstärke:

$$q_{WD,i,j,k}(x_{eff}) = q_{DS,i,j,k}(x_{eff}) + q_{UK,i,j,k}(x_{eff})$$

MJ/(m²·a), kg CO₂e/(m²·a), UBP/(m²·a) (11)

Der Aufwand für den Dämmstoff alleine beträgt:

$$q_{DS,i,j,k}(x_{eff}) = \frac{\gamma_i}{n} \cdot \beta_{jk} \cdot \rho_k \cdot x_{eff}$$

(12)

i Fallnummer

j Art des Aufwandes, wobei $j \in \{\text{Primärenergie, Treibhauspotenzial, UBP}\}$

k Material der Wärmedämmung, wobei $k \in \{\text{EPS, Steinwolle, ...}\}$

UK Unterkonstruktion

DS Dämmstoff

<i>β</i> spezifischer ökologischer Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Wärmedämmung:	Primärenergie	MJ/kg
	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/kg
	Umweltbelastungspunkte	UBP/kg

<i>γ</i> Verhältnis zwischen ‚opaker Fassaden- und Dachfläche‘ und Geschossfläche	-
---	---

<i>ρ</i> Dichte des Wärmedämmstoffs	kg/m ³
-------------------------------------	-------------------

<i>n</i> Lebensdauer der Wärmedämmung (Anzahl Jahre)	a
--	---

Aufgrund der Quellen [HEV13, SIA2032, Nut13, Leb13] kann für die Wärmedämmung eine Lebensdauer von etwa 30 bis 50 Jahren angenommen werden. Unterhalt, Renovationszyklen und -arten sowie allfällige zukünftige Recyclingtechnologien können grundsätzlich den ökologischen Aufwand für die Wärmedämmung erheblich beeinflussen.

Der ökologische Aufwand für die Unterkonstruktion beträgt:

$$q_{UK,i,j,k}(x_{eff}) = \frac{\gamma_i}{n} \cdot (\delta_{jk} + \varepsilon_{jk} \cdot x_{eff})$$

(13)

δ Koeffizient, welcher den konstanten (dämmstärkenunabhängigen) ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt

Primärenergie	MJ/m ²
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m ²
Umweltbelastungspunkte	UBP/m ²

ε Koeffizient, welcher den variablen (dämmstärkenabhängigen) ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt

Primärenergie	MJ/m ³
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m ³
Umweltbelastungspunkte	UBP/m ³

Der ökologische Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Wärmedämmung, bestehend aus Dämmstoff und Unterkonstruktion, beträgt somit pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr:

$$q_{WD,i,j,k}(x_{eff}) = \frac{Y_i}{n} \cdot [\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot x_{eff}] \tag{14}$$

Tabelle 7 zeigt den spezifischen ökologischen Aufwand, bezogen auf die Masse, in Abhängigkeit des Wärmedämmstoffes.

Wärmedämmstoff	Spezifischer ökologischer Aufwand (Herstellung und Entsorgung)		
	β		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/kg	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/kg	Umweltbelastungspunkte UBP/kg
Glaswolle ⁷	4.58E+01	1.51E+00	2.24E+03
Steinwolle ⁸	1.54E+01	1.06E+00	1.97E+03
Polystyrol expandiert (EPS) ⁹	1.05E+02	7.36E+00	5.22E+03
Polyurethan (PUR/PIR) ¹⁰	1.01E+02	6.79E+00	6.10E+03
Zellulosefasern (eingebblasen) ¹¹	6.96E+00	3.65E-01	1.17E+03
VIP nur Paneele ¹²	1.15E+00	6.15E-01	2.32E+02
VIP mit PUR Montagestreifen ¹³	7.50E+00	1.01E+00	6.04E+02

Tab. 7: Spezifischer ökologischer Aufwand, bezogen auf die Masse, in Abhängigkeit der Wärmedämmstoffes (Daten aus bzw. basierend insbesondere auf [Eco10])

Tab. 8 zeigt die verwendeten physikalischen Kennwerte der Wärmedämmstoffe. In der Referenz [SIA279] wird eine Bandbreite von Werten für die Dichte bzw. die Wärmeleitfähigkeit angegeben. Die Angaben in Tab. 8 entsprechen vorwiegend Herstellerangaben, wobei Werte für sehr oft eingesetzte, typische Produkte gewählt wurden. Der Fokus liegt hier auf den häufig verwendeten und kostengünstigen Wärmedämmverbundsystemen (vgl. Kap. 2.9 bzw. Anhang C für hinterlüftete Fassaden).

⁷ Glaswolle, ab Werk (CH) + Entsorgung, Gebäude, Mineralwolle, in Beseitigung (CH)
⁸ Steinwolle lose (Flumroc 2009) basierend auf [Eco10] (siehe Anhang A) + Entsorgung, Gebäude, Mineralwolle, in Beseitigung (CH)
⁹ Polystyrolplatte expandiert, ab Werk (RER) + Entsorgung, Gebäude, EPS-Isolation flammgeschützt, in Beseitigung (CH)
¹⁰ Polyurethan, Schaum fest, ab Werk (RER) + Entsorgung, Gebäude, PUR-Schaum, in Beseitigung (CH)
¹¹ Zellulosefasern (eingebblasen) (isofloc 2006) basierend auf [Eco10] (siehe Anhang A) + Entsorgung, Papier, 11.2% Wasser, in Kehrverbrennung (CH)
¹² VIP basierend auf [Sch03] und [Eco10] + Entsorgung, Inertstoff, 5% Wasser, in Inertstoffdeponie (CH)
¹³ VIP basierend auf [Sch03] und [Eco10] + Entsorgung, Inertstoff, 5% Wasser, in Inertstoffdeponie (CH) mit 30% (flächenmässig) PUR Anteil und entsprechender Entsorgung

In den Tabellen 9 und 10 sind die konstanten (dämmstärkenunabhängigen) bzw. variablen (dämmstärkenabhängigen) ökologischen Aufwände für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion ersichtlich. In Anhang B ist die Modellierung der Befestigung der Dämmmaterialien dokumentiert.

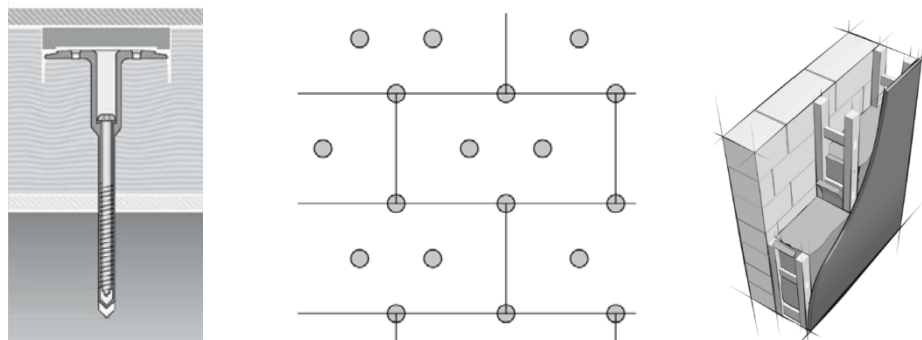


Fig. 4: Dübel (links Längsschnitt und Mitte Fassadenansicht) zur Befestigung von Dämmplatten (EPS, PUR, Steinwolle, Glaswolle) sowie Unterkonstruktion für Dämmung aus Zelluloseflocken (rechts) gemäss Hersteller (siehe Anhang B)

Wärmedämmstoff	Dichte kg/m ³	Wärmeleitfähigkeit W/(m·K)
Glaswolle (ISOVER ISOCOMPACT 035, verputzt)	80	0.035
Steinwolle (H165 Flumroc-Dämmplatte COMPACT, verputzt)	90	0.035
Polystyrol expandiert (EPS Swisspor Lambda White 031)	16	0.031
Polyurethan (PUR, Puren, Porenotherm)	30	0.026
Zellulosefasern (eingebblasen)	50	0.044
VIP (nur Paneel)	190	0.008
VIP (mit PUR-Montagestreifen, 30%)	142	0.0137

Tab. 8: Dichte und Wärmeleitfähigkeiten der Dämmstoffe (Herstellerangaben bzw. [SIA279, Ste08, Sch03])

Die bei Zellulosefasern und VIP erforderlichen Unterkonstruktionen weisen bereits nicht vernachlässigbare thermische Widerstände auf (Tab. 11).

Gemäss Gl. 5 kann aus der Dämmstärke bei Referenzwärmeleitfähigkeit (ohne Unterkonstruktion) die effektive Dämmstärke (mit allfälliger Unterkonstruktion) wie folgt berechnet werden:

$$x_{eff} = \lambda_{eff} \cdot \left(\frac{x}{\lambda_{ref}} - R_{UK} \right) \quad \text{m} \quad (15)$$

Aus den Gleichungen 14 und 15 entsteht somit der ökologische Aufwand in Funktion der Referenzdämmstärke x:

$$q_{WD,i,j,k}(x) = \frac{\gamma_i}{n} \cdot \left[\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot \lambda_{eff} \cdot \left(\frac{x}{\lambda_{ref}} - R_{UK} \right) \right] \quad (16)$$

Bemerkung: In Anhang C ist die Analyse von Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden dokumentiert. Es gilt zu beachten, dass die physikalischen Eigenschaften der Dämmstoffe je nach Verwendung – Wärmedämmverbundsystem oder hinterlüftete Fassade – ebenfalls variieren können (siehe Anhang C). Das Thema wird in Kap. 2.9 ausgeführt.

Komponente	Koeffizient, welcher den dämmstärkenunabhängigen ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt (bezogen auf einen m ² Fassadenfläche)		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/m ²	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/m ²	Umweltbelastungspunkte UBP/m ²
Glas- und Steinwolle, EPS, PUR (Dübel)	2.51E+00	2.31E-01	1.50E+02
Zellulosefaserdämmung (Unterkonstruktion und Abschlussplatte)	1.06E+02	8.17E+00	2.42E+04
VIP (Aussenseite 15 mm Fermacell und 5 mm XPS, Innenseite 15 mm XPS, Variotec Fassadendämmung)	2.38E+02	2.34E+01	1.80E+04

Tab. 9: Konstanter ökologischer Aufwand für die Produktion und Entsorgung der Unterkonstruktion der Wärmedämmung (Dokumentation in Anhang B)

Komponente	Koeffizient, welcher den dämmstärkenabhängigen ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt (bezogen auf einen m ² Fassadenfläche)		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/(m ² ·m)	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/(m ² ·m)	Umweltbelastungspunkte UBP/(m ² ·m)
Glas- und Steinwolle, EPS, PUR (Dübel)	5.71E+01	3.57E+00	4.18E+03
Zellulosefaserdämmung (Unterkonstruktion und Abschlussplatte)	1.31E+01	7.79E-01	6.98E+03
VIP	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Tab. 10: Variabler ökologischer Aufwand für die Produktion und Entsorgung der Unterkonstruktion der Wärmedämmung (Dokumentation in Anhang B)

	Thermischer Widerstand der Unterkonstruktion R_{UK} $m^2 \cdot K/W$
Zellulosefasern: 60 mm Pavatex-Diffutherm mit $\lambda = 0.043 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	1.40
VIP: Aussenseite 15 mm Fermacell und 5 mm XPS, Innenseite 15 mm XPS beidseitige, $\lambda_{XPS} = 0.031 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $\lambda_{FC} = 0.32 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0.69
Glas- und Steinwolle, EPS, PUR	0

Tab. 11: Thermische Widerstände der Unterkonstruktionen

2.6.2 Heizungsanlage

Auch bei der Herstellung und Entsorgung der Heizungsanlage wird ein ökologischer Aufwand verursacht. Dieser Aufwand ist tendenziell umso grösser, je grösser der Leistungsbedarf pro Quadratmeter Geschossfläche bzw. je geringer die Dämmstärke ist. Diese Abhängigkeit von der Dämmstärke wurde modelliert (siehe Gl. 19), konnte jedoch – aufgrund der fehlenden Datengrundlage – nicht mit den entsprechenden Daten gefüllt werden. Somit wurde dieser Effekt vernachlässigt.

Die Art der Wärmeverteilung kann grundsätzlich vom Leistungsbedarf pro Quadratmeter abhängig sein. D.h., in Niedrigenergiebauten (Minergie-P, Passivhaus) mit einer spezifischen Heizleistung von $<10 \text{ W}/\text{m}^2$ ist eine Luftheizung möglich, bei Bauten mit höheren spezifischen Heizleistungen sind Fussboden- und Radiatorenheizungen üblich. Luftbeheizte Gebäude sind in der Schweiz (noch) kaum verbreitet.

Der ökologische Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Heizungsanlage (Wärmeverteilung und ev. Wärmepumpe) beträgt pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr:

$$q_{HA,i,j,p}(x) = q_{WP,i,j}(x) + q_{WV,j,p}(x) \quad (17)$$

WP Wärmepumpe

WV Wärmeverteilung (Radiatoren-, Fussboden- oder Luftheizung)

Unter Verwendung von Gleichung 3, welche den Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr in Funktion der Dämmstärke beschreibt, entsteht für den ökologischen Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Wärmepumpen:

$$q_{WP,i,j}(x) = \zeta_j \cdot \left(A_i + B_i \cdot \frac{1}{x} \right) \quad \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ UBP}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \quad (18)$$

Falls keine Wärmepumpe vorhanden ist (Heizöl, Erdgas, Holz, Biogas), so gilt $\zeta = 0$ und damit auch $q_{WP}(x) = 0$.

Den ökologischen Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen zeigt Tab. 12.

Komponente	Spezifischer ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen		
	ζ		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/MJ	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/MJ	Umwelt- belastungspunkte UBP/MJ
Luft/Wasser Wärmepumpe	8.56E-03	1.87E-03	2.43E+00
Erdsonde Wärmepumpe	1.97E-02	1.97E-03	2.40E+00

Tab. 12: Spezifischer ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen (Daten basierend auf [Eco10]), bezogen auf Nutzwärme

Der ökologische Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Wärmeverteilung der Heizungsanlage beträgt:

$$q_{WV,j,p}(x) = \frac{1}{m} \cdot \left(C_{pj} + D_{pj} \cdot \frac{1}{x} \right) \quad \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}), \text{ UBPs}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \quad (19)$$

j Art des Aufwandes, wobei $j \in \{\text{Primärenergie}, \text{Treibhauspotenzial}, \text{UBP}\}$

p Wärmeverteilungssystem, wobei $p \in \{\text{Radiatorenheizung}, \text{Fussbodenheiz.}, \text{Luftheiz.}\}$

C Koeffizient (Tab. 13), welcher den ökologischer Aufwand der Heizungsanlage (Wärmeverteilung) charakterisiert:

Primärenergie	MJ/m ²
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m ²
Umweltbelastungspunkte	UBP/m ²

D Koeffizient, welcher den ökologischer Aufwand der Heizungsanlage (Wärmeverteilung) charakterisiert (hier: $D = 0$):

Primärenergie	MJ/m
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ e/m
Umweltbelastungspunkte	UBP/m

m Lebensdauer der Heizungsanlage (Wärmeverteilung, Anzahl Jahre) a

Wegen der fehlenden Datengrundlage wird in dieser Studie in allen Fällen $D = 0$ angenommen. Somit ist kein Einfluss auf die optimale Dämmstärke vorhanden. Der totale ökologische Aufwand wird jedoch beeinflusst. Aufgrund der Referenzen [HEV13, Nut13, Bau13, SIA2032] kann die Lebensdauer des Wärmeverteilungsnetzes einer Heizungsanlage mit etwa 40 Jahren angenommen werden.

In der Referenz [Prim08] wird der ökologischer Aufwand für die Wärmeverteilung pro Quadratmeter Geschossfläche in Abhängigkeit der Art der Wärmeverteilung – Radiatorenheizung, Fussbodenheizung oder Luftheizung – quantifiziert (Tab. 13). Der Aufwand für die Wärmeerzeuger (Heizkessel) ist in den Ökobilanzdaten für die Wärmequellen (Tab. 5) bereits berücksichtigt.

Der ökologische Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Heizungsanlage (Wärmeverteilung und ev. Wärmepumpe) beträgt pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr:

$$q_{HA,j,p}(x) = \zeta \cdot \left(A_i + B_i \cdot \frac{1}{x} \right) + \frac{1}{m} \cdot \left(C_{pj} + D_{pj} \cdot \frac{1}{x} \right)$$

MJ/(m²·a), kg CO₂e/(m²·a), UBP/(m²·a) (20)

Komponente für Wärmeverteilung	Spezifischer ökologischer Aufwand (Herstellung und Entsorgung, bezogen auf einen Quadratmeter Geschossfläche)		
	C		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/m ²	Treibhauspotenzial kg CO ₂ e/m ²	Umwelt- belastungspunkte UBP/m ²
Radiatorenheizung	1.49E+02	9.00E+00	1.34E+04
Fussbodenheizung	1.28E+02	8.57E+00	8.39E+03
Luftheizung	3.00E+01	1.72E+00	2.70E+03

Tab. 13: Spezifischer ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Heizungsanlagen (Daten aus [Prim08])

2.7 Totaler ökologischer Aufwand

Während des gesamten Lebenszykluses entsteht ein ökologischer Aufwand infolge des Heizwärmebedarfs sowie ein ökologischer Aufwand für die Herstellung und Entsorgung von Wärmedämmung und Heizungsanlage. Der totale ökologische Aufwand pro Quadratmeter Geschossfläche und Jahr, in Funktion der Dämmstärke x , ist die Summe dieser drei Terme und beträgt somit:

$$q_{tot,i,j,k,p}(x) = q_{HW,i,j}(x) + q_{WD,i,j,k}(x) + q_{HA,j,p}(x)$$

MJ/(m²·a), kg CO₂e/(m²·a), UBP/(m²·a) (21)

Unter Verwendung der Gleichungen 10, 16 und 20 entsteht der totale ökologische Aufwand:

$$q_{tot,i,j,k,p}(x) = \frac{\alpha_j}{JAZ} \cdot \left(A_i + \frac{B_i}{x} \right) + \frac{\gamma_i}{n} \cdot \left[\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot \lambda_{eff} \cdot \left(\frac{x}{\lambda_{ref}} - R_{UK} \right) \right]$$

$$+ \zeta \cdot \left(A_i + \frac{B_i}{x} \right) + \frac{1}{m} \cdot \left(C_{jp} + \frac{D_{jp}}{x} \right)$$

(22)

Der totale ökologische Aufwand soll minimal sein. Am Ort der Extremalstelle (Minimum) muss deshalb gelten:

$$\frac{d}{dx} \cdot q_{tot,i,j,k,p} \Big|_{x=x_{opt}} = 0$$

(23)

Die Ableitung von Gleichung 22 führt zu:

$$\frac{d}{dx} \cdot q_{tot,i,j,k,p}(x) = \frac{\gamma_i}{n} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{ref}} - \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m} \right) \cdot \frac{1}{x^2}$$

(24)

Für die optimale Dämmstärke x_{opt} gilt:

$$0 = \frac{\gamma_i}{n} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{ref}} - \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m} \right) \cdot \frac{1}{x_{opt}^2}$$

(25)

Durch Umformen entsteht

$$\left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m}\right) \cdot \frac{1}{x_{opt}^2} = \frac{\gamma_i}{n} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{ref}} \quad (26)$$

bzw.

$$\frac{\alpha_j \cdot B_i \cdot m + JAZ \cdot m \cdot \zeta \cdot B_i + JAZ \cdot D_{jp}}{JAZ \cdot m} \cdot \frac{1}{x_{opt}^2} = \frac{\gamma_i \cdot \lambda_{eff} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk})}{n \cdot \lambda_{ref}} \quad (27)$$

Für die optimale Dämmstärke gilt deshalb:

$$x_{opt} = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda_{ref} \cdot (\alpha_j \cdot B_i \cdot m + JAZ \cdot m \cdot \zeta \cdot B_i + JAZ \cdot D_{jp})}{JAZ \cdot m \cdot \gamma_i \cdot \lambda_{eff} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk})}} \quad (28)$$

Die optimale effektive Dämmstärke kann, unter Verwendung der Beziehung

$$x_{opt} = \frac{\lambda_{ref}}{\lambda_{eff}} \cdot x_{eff,opt} + \lambda_{ref} \cdot R_{UK} \quad (29)$$

wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\lambda_{ref}}{\lambda_{eff}} \cdot x_{eff,opt} + \lambda_{ref} \cdot R_{UK} = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda_{ref} \cdot (\alpha_j \cdot B_i \cdot m + JAZ \cdot m \cdot \zeta \cdot B_i + JAZ \cdot D_{jp})}{JAZ \cdot m \cdot \gamma_i \cdot \lambda_{eff} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk})}} \quad (30)$$

bzw.

$$x_{eff,opt,i,j,k,p} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{ref}} \left(\sqrt{\frac{n \cdot \lambda_{ref} \cdot (\alpha_j \cdot B_i \cdot m + JAZ \cdot m \cdot \zeta \cdot B_i + JAZ \cdot D_{jp})}{JAZ \cdot m \cdot \gamma_i \cdot \lambda_{eff} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk})}} - \lambda_{ref} \cdot R_{UK} \right) \quad (31)$$

Unter Verwendung von (Gl. 22) sowie

$$x = \lambda_{ref} \cdot \left(\frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + R_{UK} \right) \quad (32)$$

entsteht für den totalen ökologischen Aufwand in Funktion der Dämmstärke x_{eff} :

$$q_{tot,i,j,k,p}(x_{eff}) = \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_{ref} \cdot \left(\frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + R_{UK}\right)} + \frac{\gamma_i}{n} \cdot [\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot x_{eff}] + \frac{\alpha_j \cdot A_i}{JAZ} + \zeta \cdot A_i + \frac{C_{jp}}{m} \quad (33)$$

Somit beträgt der minimale totale ökologische Aufwand:

$$q_{tot,min,i,j,k,p} = \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_{ref} \cdot \left(\frac{x_{eff,opt}}{\lambda_{eff}} + R_{UK}\right)} + \frac{\gamma_i}{n} \cdot [\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot x_{eff,opt}] + \frac{\alpha_j \cdot A_i}{JAZ} + \zeta \cdot A_i + \frac{C_{jp}}{m} \quad (34)$$

Die Tabelle 14 zeigt zusammenfassend die hergeleiteten Formeln.

Ökologisch optimale Dämmstärke:

$$x_{eff,opt,i,j,k,p} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{ref}} \left(\sqrt{\frac{n \cdot \lambda_{ref} \cdot (\alpha_j \cdot B_i \cdot m + JAZ \cdot m \cdot \zeta \cdot B_i + JAZ \cdot D_{jp})}{JAZ \cdot m \cdot \gamma_i \cdot \lambda_{eff} \cdot (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk})}} - \lambda_{ref} \cdot R_{UK} \right) \quad \text{m}$$

Ökologisch optimaler Wärmedurchgangskoeffizient:

$$U_{eff,opt,i,j,k,p} = \frac{1}{0.54 + R_{UK} + \frac{x_{eff,opt,i,j,k,p}}{\lambda_{eff}}} \quad \text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Minimaler totaler ökologischer Aufwand:

$$q_{tot,min,i,j,k,p} = \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m} \right) \cdot \frac{1}{\lambda_{ref} \cdot \left(\frac{x_{eff,opt}}{\lambda_{eff}} + R_{UK} \right)} + \frac{\gamma_i}{n} \cdot [\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot x_{eff,opt}] + \frac{\alpha_j \cdot A_i}{JAZ} + \zeta \cdot A_i + \frac{c_{jp}}{m}$$

MJ/(m²·a), kg CO₂e/(m²·a), UBP/(m²·a)

Totaler ökologischer Aufwand in Funktion der Dämmstärke x_{eff} :

$$q_{tot,i,j,k,p}(x_{eff}) = \left(\frac{\alpha_j \cdot B_i}{JAZ} + \zeta \cdot B_i + \frac{D_{jp}}{m} \right) \cdot \frac{1}{\lambda_{ref} \cdot \left(\frac{x_{eff}}{\lambda_{eff}} + R_{UK} \right)} + \frac{\gamma_i}{n} \cdot [\delta_{jk} + (\beta_{jk} \cdot \rho_k + \varepsilon_{jk}) \cdot x_{eff}] + \frac{\alpha_j \cdot A_i}{JAZ} + \zeta \cdot A_i + \frac{c_{jp}}{m}$$

MJ/(m²·a), kg CO₂e/(m²·a), UBP/(m²·a)

Tab. 14: Zusammenstellung der resultierenden Zusammenhänge

2.8 Sensitivitätsanalyse

Zahlreiche Parameter eines Gebäudes beeinflussen den Heizwärmebedarf. Welcher Parameter den Heizwärmebedarf wie beeinflusst, ist weitgehend bekannt. Wie beeinflussen die verschiedenen Gebäudeparameter jedoch die optimale Dämmstärke? Die Sensitivität der optimalen Dämmstärke bezüglich der Variation der Eingabeparameter wurde untersucht. Ausgehend von den Werten eines Referenzfalles, wurden die Gebäudeparameter variiert (Tab. 15).

Der Begriff Fensterlaibungsbeschattung (Tab. 15, Fig. 5) bezeichnet den Schattenwurf, welcher vor allem bei höheren Dämmstärken zu reduzierten solaren Gewinne durch Fenster führt, falls die Verglasungen bezüglich der Fassadenoberfläche zurückversetzt sind. Diese Fensterlaibungsbeschattung kann im Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE modelliert werden.

<i>Eingabeparameter</i>	<i>Referenzfall</i>	<i>Änderungen</i>	
Ausrichtung der Fassade mit dem grössten Glasanteil	Süd	West, Ost, Nord	
Luftwechsel ($m^3/(h \cdot m^2)$)	0.7	0.5	0.9
Personenanzahl (m^2/P)	50	40	60
Geräte und Beleuchtung (W/m^2)	11.4	7.3	12.4
Wärmebrücken (W/K)	54	34	125
Geschosshöhe (m)	2.5	2.3	2.9
Raumtemperatur ($^{\circ}C$)	21	20	23
Verschattung durch Nachbargebäude	Agglomeration	Stadt	Freie Lage
Verglasungsqualität:			
Wärmedurchgangskoeffizient (W/m^2K)	1.7	0.4	2.9
Gesamtenergiedurchlassgrad (-)	0.61	0.47	0.77
Glasanteil:			
Nordfassade (%)	11	3	13
Ostfassade (%)	15	3	32
Südfassade (%)	41	35	66
Westfassade (%)	25	11	39
Aussenwand	massiv	leicht	
Standort	Zürich	Lugano	Davos
Fensteranschlag (Fensterlaibungsbeschattung)	aussen	innen	

Tab. 15: Gebäudeparameter beim Referenzfall und Variation (vgl. [WvG13])

Eine Sensitivitätsanalyse (Fig. 5) zeigte, dass viele Gebäudeparameter, welche den Heizwärmebedarf beeinflussen, nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die optimale Dämmstärke haben. Diese Grössen wurden deshalb in den folgenden Parameterstudien nicht mehr variiert. Als wichtigste Gebäudeparameter hinsichtlich der optimalen Dämmstärke wurden der Standort, die Raumtemperatur und die Fensterlaibungsbeschattung ermittelt.

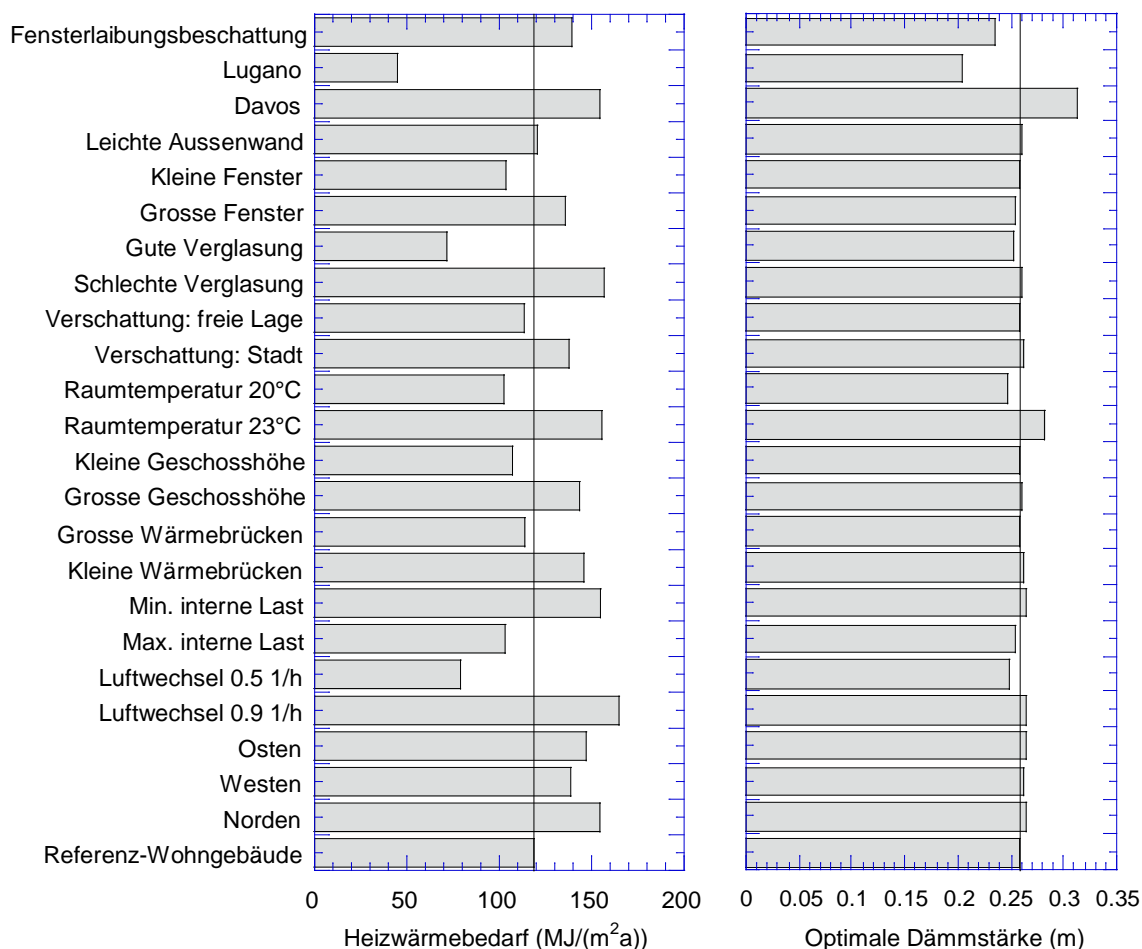


Fig. 5: Sensitivität der Eingabeparameter bezüglich Heizwärmebedarf und optimaler Dämmstärke (Indikator: UBP, vgl. [WvG13])

2.9 Vereinfachende Annahmen

Modelle sind vereinfachte Abbildungen der Realität. D.h., sie bilden die Realität nur unvollständig ab, können jedoch oft sehr hilfreich sein, um die relevanten Zusammenhänge besser zu verstehen. In diesem Kapitel sollen einige der vereinfachenden Annahmen des Modells für die Bestimmung der ökologisch optimalen Dämmstärke diskutiert werden.

Im Modell wird – wie in der Gebäudesimulation üblich – der instationäre Wärmedurchgang eindimensional berechnet. Die Verluste durch Wärmebrücken werden ausschliesslich durch einen globalen Verlustkoeffizienten abgebildet. Dementsprechend werden z.B. mehrdimensionale Wärmeflüsse bei Innendämmungen oder Fensterlaibungsdämmungen nicht (explizit) modelliert.

Wird eine Aussenwand innen gedämmt, so entstehen Wärmebrücken. Die zusätzlichen Verluste durch die Wärmebrücken sind abhängig von Konstruktion und Materialien. In allgemeiner Form sind diese Zusatzverluste kaum quantifizierbar. In der vorliegenden Arbeit werden deshalb nur die – aus bauphysikalischer Sicht sinnvollen – Aussendämmungen betrachtet. Innendämmungen sollten nur ausnahmsweise und bei sehr triftigen Gründen, wie z.B. aus Gründen des Denkmalschutzes, angewandt werden.

Insbesondere bei Sanierungen können die Fensterlaibungsdämmungen thermische Schwachstellen darstellen. Falls die Fenster bündig oder nahe bei der Ebene der Fassadenoberfläche gesetzt werden, entstehen keine oder nur relativ unbedeutende zusätzliche Verluste infolge geringer Fensterlaibungsdämmung. Fensterlaibungsdämmungen als thermische Schwachstellen werden hier nicht in Abhängigkeit der Dämmstärke betrachtet.

Im beschriebenen Modell wird vereinfachend eine lineare Zunahme des ökologischen Aufwandes in Funktion der Dämmstärke angenommen (siehe auch Fig. 1). In der Praxis ist es grundsätzlich denkbar, dass bei höheren Dämmstärken das Fassadensystem bzw. die Konstruktion verändert wird (z.B. Wechsel zu hinterlüfteter Konstruktion oder zu einem Dämmstoff mit eventuell höherer Festigkeit). Dies hat eine Diskontinuität und somit einen un stetigen Kurvenverlauf zur Folge. Die optimale Dämmstärke kann (Fig. 6), aber muss nicht unbedingt, dadurch verschoben werden.

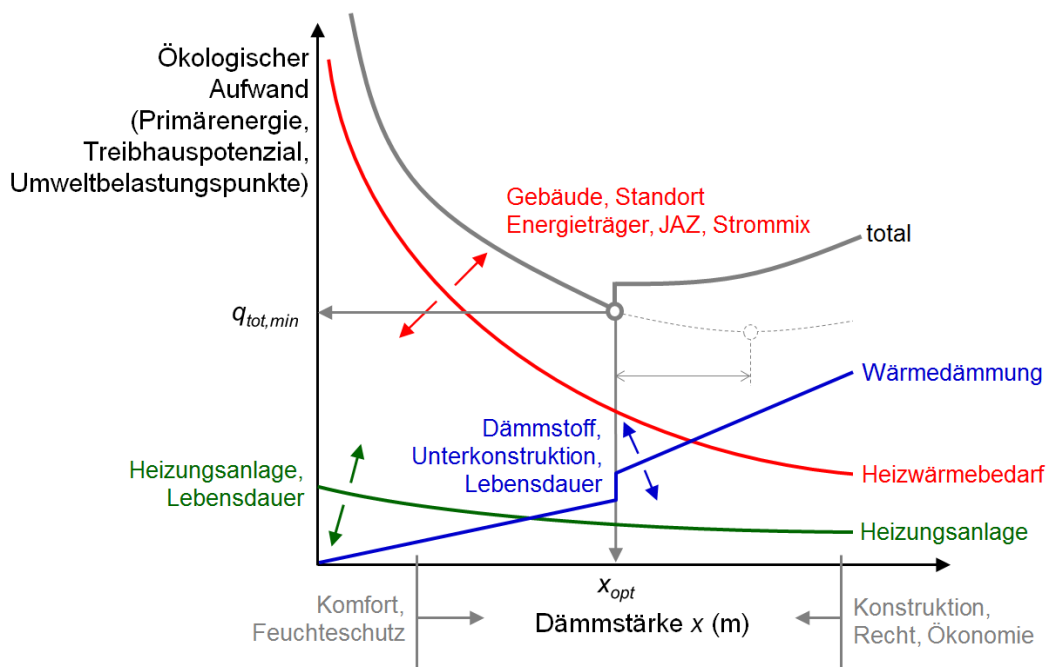


Fig. 6: Unstetiger Verlauf des ökologischen Aufwandes bei einem Wechsel des Fassadensystems sowie mögliche Verschiebung der ökologisch optimalen Dämmstärke

Gemäss Angaben von Fassadenplanern ist die Wahl des Fassadensystems nicht eine Frage der Dämmstärke. Im Allgemeinen wird aufgrund von wirtschaftlichen, qualitativen und/oder architektonischen Gründen das Fassadensystem gewählt. Sowohl bei Wärmedämmverbundsystemen als auch bei hinterlüfteten Fassaden sind grundsätzlich keine fixen maximalen Dämmstärken erkennbar. Die Hersteller orientieren sich an den Kundenbedürfnissen bzw. an den behördlichen Vorgaben. Grössere Dämmstärken als etwa 20 cm sind heute in der Schweiz noch kaum verbreitet und deshalb konnten keine statistisch gut abgestützten Daten gefunden werden.

Der Vorteil von Wärmedämmverbundsystemen liegt insbesondere in den tieferen Kosten. Hinterlüftete Fassaden weisen gewisse qualitative Vorteile auf und ermöglichen die Verwendung einer Vielfalt von Bekleidungsplatten (Faserzement, Stein, Metall, Holz, Glas, Photovoltaik etc.).

In Anhang C wird der ökologische Aufwand für Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden analysiert und im Vergleich zu den Unterkonstruktionen von Wärmedämmverbundsystemen dargestellt. Es zeigt sich, dass gewisse Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden einen relativ hohen (Konsolen mit GFK-Profilen), andere jedoch einen bescheidenen (Distanzschrauben) ökologischen Aufwand verursachen. Zudem ist zu bemerken, dass bei gewissen Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle), falls sie hinterlüftet eingesetzt werden, typischerweise Materialien mit geringeren Dichten – dies ist ökologisch vorteilhafter – eingesetzt werden. Somit kann der Wechsel von einem Wärmedämmverbundsystem zu einem hinterlüfteten Fassadensystem sowohl einen Sprung zu einem ökologisch höheren als auch einen Sprung zu einem ökologisch tieferen Aufwand bedeuten. Eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten ist denkbar.

Eine Unstetigkeit ist grundsätzlich auch bei der Kurve für den ökologischen Aufwand der Heizungsanlage denkbar, falls bei erhöhter Dämmung, und somit reduziertem Heizleistungsbedarf, von einer Bodenheizung zu einer Luftheizung gewechselt wird (Fig. 7). Letztere verursacht einen kleineren ökologischen Aufwand.

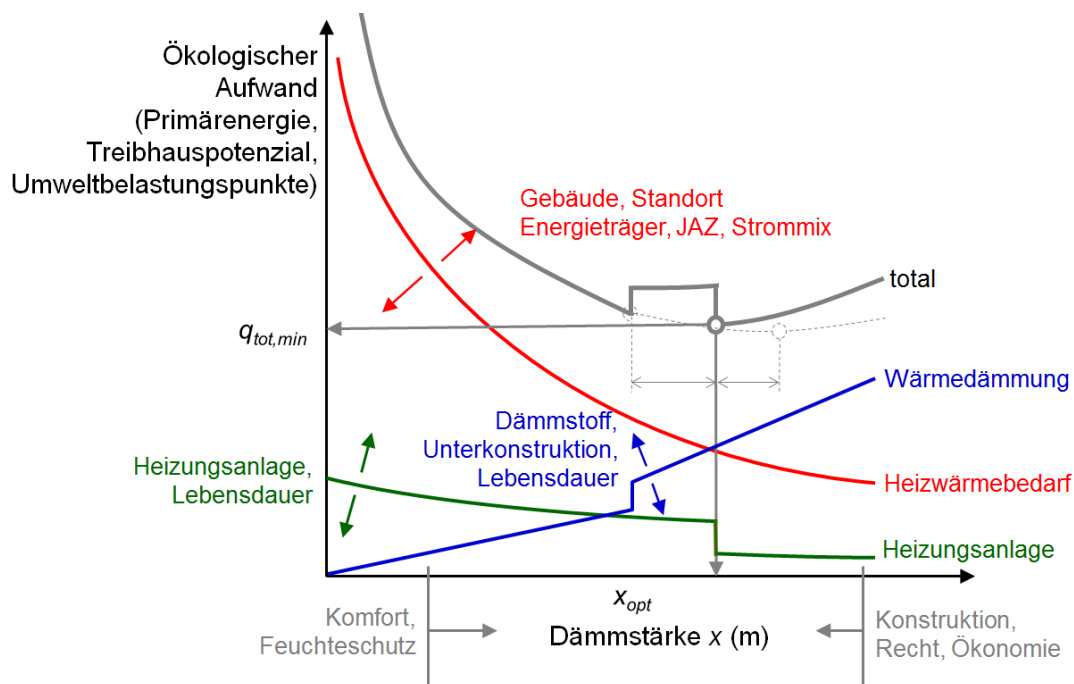


Fig. 7: Unstetiger Verlauf des ökologischen Aufwandes bei einem Wechsel des Fassadensystems und der Heizungsanlage sowie mögliche Verschiebung der ökologisch optimalen Dämmstärke

Die Annahme von Systemwechseln bei einer bestimmten Dämmstärke, führt zu sehr objektspezifischen und somit wenig allgemeingültigen Aussagen, sei es bei der Wärmedämmung oder bei der Heizungsanlage, und stünde zudem auch im Widerspruch zur Ceteris-Paribus-Annahme (siehe Kap. 2.4). Da in dieser Studie nicht objektspezifische sondern generische Aussagen beabsichtigt sind, werden in den folgenden Parameterstudien (siehe Kap. 3) ausschliesslich stetige Kurvenverläufe für den ökologischen Aufwand angenommen.

Gewisse Arten der Stromproduktion zeigen eine relativ starke saisonale Abhängigkeit. So wird z.B. in PV-Anlagen im Sommer deutlich mehr Strom produziert als im Winter, aber auch

Wind- und Wasserenergie zeigen saisonale Charakteristiken. Bei Wärmepumpenheizungen entsteht die Nachfrage im Winter. In der vorliegenden Studie wurden optimale Dämmstärken ausschliesslich mit Mixen von Stromproduktionen ermittelt (z.B. CH-Verbrauchermix oder UCTE-Mix), womit diese Problematik tendenziell entschärft wird.

2.10 Kriterien Feuchteschutz und thermischer Komfort

Gemäss SIA 180 [SIA180] darf der Wärmedurchgangskoeffizient aus der Sicht des Feuchteschutzes sowie des thermischen Komforts höchstens $0.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ betragen. Damit soll sichergestellt werden, dass weder Kondensat noch Schimmelpilz an den inneren Oberflächen der Gebäudehülle auftritt sowie der Infrarotstrahlungsaustausch zwischen Menschen und Raumumschliessungsflächen nicht zu Diskomfort führt. Bei einem Dämmstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0.036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ beträgt die minimale Dämmstärke zur Erfüllung dieses Kriteriums knapp 9 cm.

2.11 Kriterien Konstruktion und Recht

Aus konstruktiver und eventuell rechtlicher Sicht sollen die Dämmstärken nicht zu gross sein. Diese Kriterien können jedoch – in allgemeiner Form – nicht präzise formuliert werden.

Bei Neubauten, wie auch bei weitergehenden Umbauten, werden die minimalen Dämmstärken ausserdem durch die kantonalen Energiegesetze festgelegt, welche in der Form der Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) innerhalb der Schweiz harmonisiert sind.

Fig. 1 zeigt die Begrenzung des möglichen Bereiches der optimalen Dämmstärke durch die Kriterien Feuchteschutz, Komfort und Recht (links, in Richtung kleinere Dämmstärken) sowie Konstruktion, Recht und Ökonomie (rechts, in Richtung grössere Dämmstärken). Der ökonomische Aspekt wird in Kap. 4 betrachtet.

2.12 Unsicherheit der Resultate

In Referenz [WvG14] wurde die Unsicherheit der ermittelten ökologisch optimalen Dämmstärke mit Hilfe einer Monte-Carlo-Methode untersucht. Bei den Eingabedaten wurde dabei zwischen uniformer, normaler und logarithmisch-normaler Verteilung der Unsicherheit unterschieden. Für die physikalischen Grössen (z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs) sowie die Gebäudesimulationsdaten (Koeffizienten A und B) konnten aufgrund von Literaturangaben oder Abschätzungen Annahmen getroffen werden. Bei den Ökobilanzresultaten [Eco10] war dies jedoch nicht möglich, weil in der verwendeten Ökobilanzdatenbank keine Angaben bezüglich Unsicherheiten vorliegen. Die Bestimmung von Unsicherheiten wäre hier selber von grossen Unsicherheiten geprägt. Deshalb wurde die totale Unsicherheit der ermittelten optimalen Dämmstärken in Abhängigkeit von angenommenen Unsicherheiten der Ökobilanzdaten berechnet und dargestellt (Fig. 8). Aufgrund der insbesondere bei den Ökobilanzdaten angenommenen logarithmisch-normal verteilten Unsicherheiten der Eingabedaten, ergibt sich auch bei den Ausgabedaten eine asymmetrische Verteilung. Es scheint sehr wahrscheinlich, dass die totale Unsicherheit der berechneten ökologisch optimalen Dämm-

stärke insbesondere durch die Unsicherheit der Ökobilanzdaten bestimmt wird. Die durchgeführte Monte-Carlo-Analyse ist in [WvG14] detailliert beschrieben.

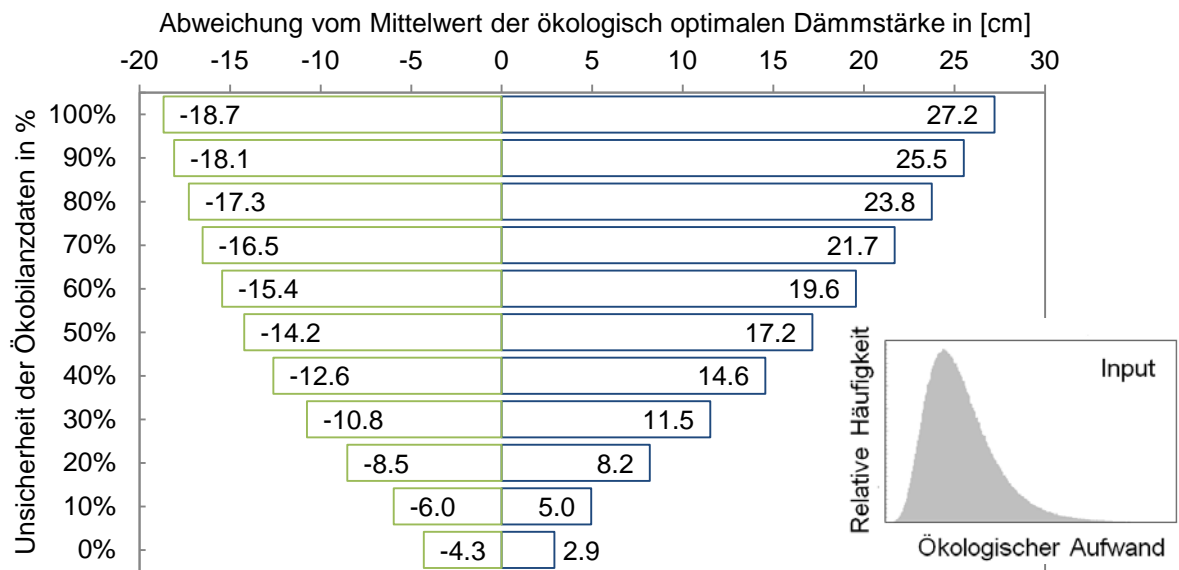


Fig. 8: Unsicherheit der ökologisch optimalen Dämmstärke (Konfidenzniveau 95%) in Abhängigkeit der Unsicherheit der Ökobilanzdaten [WvG14] (Indikator: UBP)

3. Resultate

3.1 Parameterstudien (One-factor-at-a-time) Neubau und Altbau

Ausgehend von den Referenzfällen Neubau (Erdsonden-Wärmepumpe) und Altbau (Ölkessel), siehe Tabellen 16 und 17, wurden Parameterstudien gemäss dem Prinzip ‚One-factor-at-a-time‘ durchgeführt.

Die Figuren 9 bis 11 zeigen für den Referenzfall Neubau die Beiträge der drei Komponenten Wärmedämmung, Heizungsanlage und Heizwärmebedarf an den totalen ökologischen Aufwand, wobei zwischen den drei Umweltindikatoren Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkte unterschieden wurde.

Die Parameterstudien Neubau (Erdsonden-Wärmepumpe) und Altbau (Ölkessel) sind in den Figuren 12 bis 20 bzw. 21 bis 28 dokumentiert. Auf jeder Seite sind für eine Variation die Auswirkungen auf die Indikatoren Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkte dargestellt.

Die Figur 29 zeigt einen direkten Vergleich zwischen den Referenzfällen Neubau (Erdsonden-Wärmepumpe) und Altbau (Ölkessel).

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

Tab. 16: Daten des Referenzfalles Neubau (Erdsonden-Wärmepumpe) für die Parameterstudie (One-factor-at-a-time)

Gebäudetyp	MFH-6
Standort	Zürich
Heizungsanlage	Heizkessel
Energieträger	Heizöl
Wärmeverteilsystem	Radiatorenheizung
Dämmung	EPS
Lebensdauer des Wärmeverteilungssystems der Heizungsanlage	30 Jahre
Lebensdauer der Wärmedämmung	40 Jahre
Fensteranschlag	innen
Innenraumtemperatur	21°C

Tab. 17: Daten des Referenzfalles Altbau (Ölkessel) für die Parameterstudie (One-factor-at-a-time)

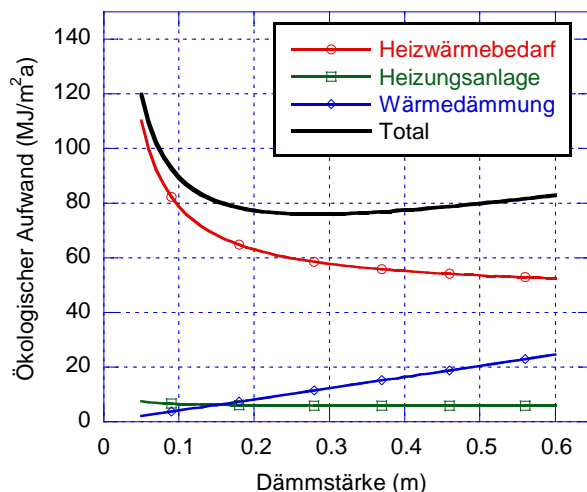


Fig. 9: Ökologischer Aufwand (Primärenergie) in Funktion der Dämmstärke, aufgeteilt nach Komponenten (Referenzfall Neubau)

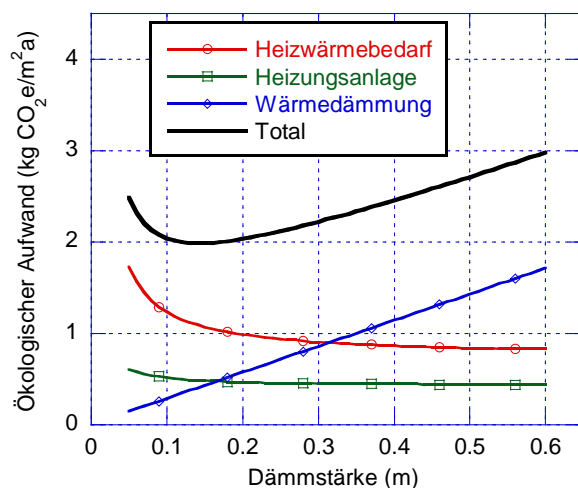


Fig. 10: Ökologischer Aufwand (Treibhauspotenzial) in Funktion der Dämmstärke, aufgeteilt nach Komponenten (Referenzfall Neubau)

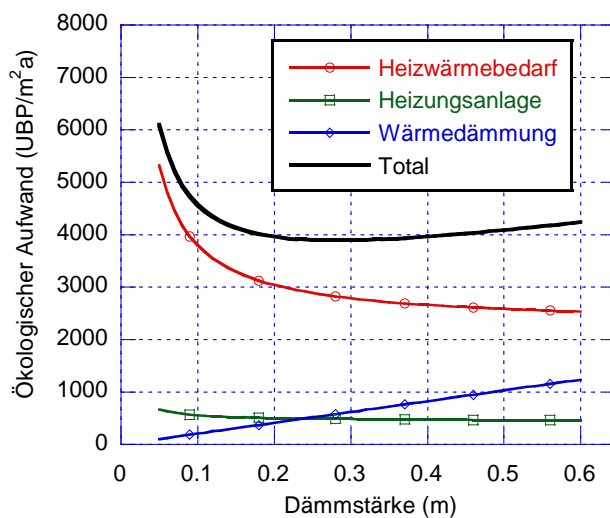


Fig. 11: Ökologischer Aufwand (Umweltbelastungspunkte) in Funktion der Dämmstärke, aufgeteilt nach Komponenten (Referenzfall Neubau)

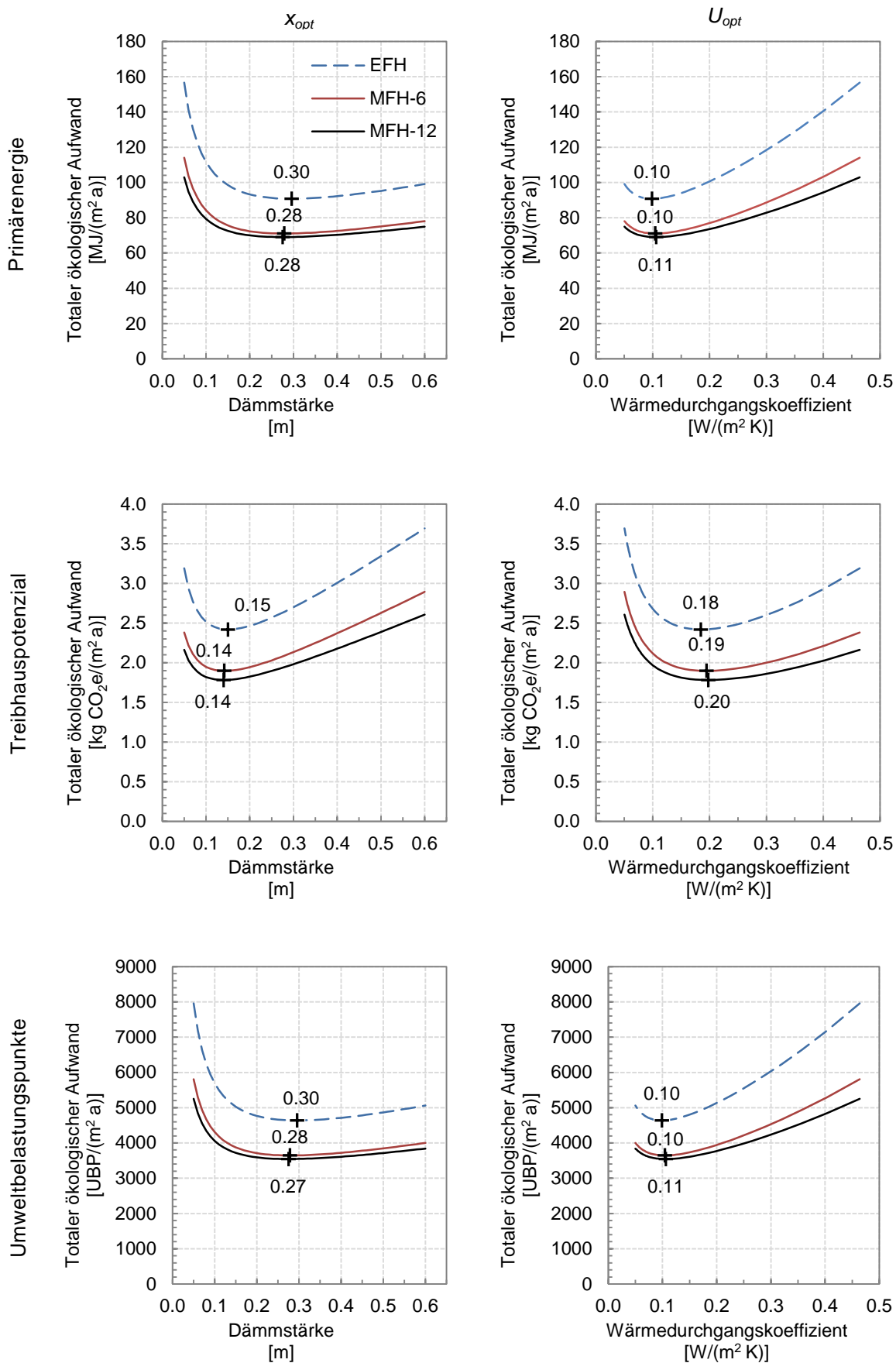


Fig. 12: Einfluss des Gebäudetyps (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

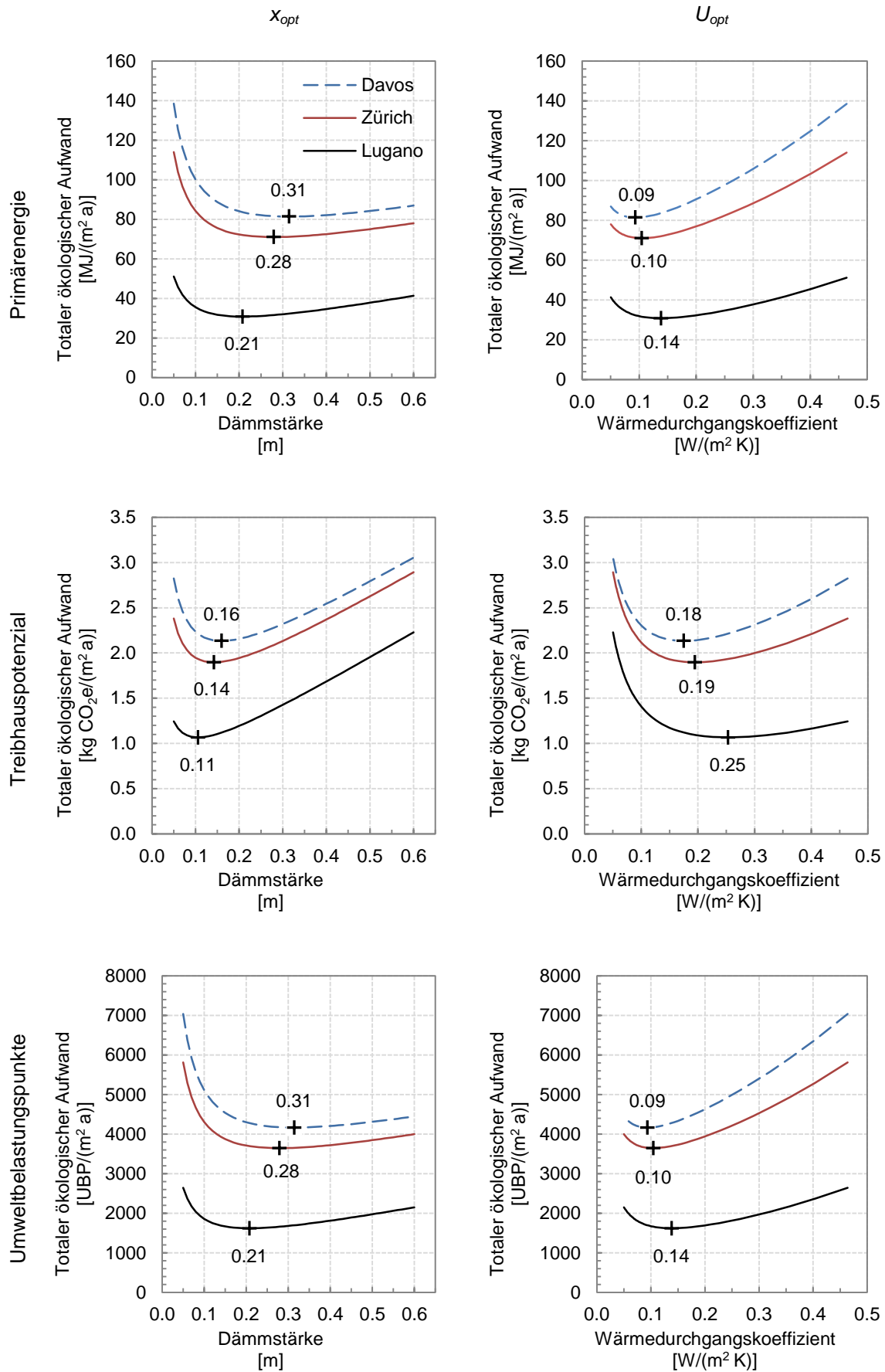


Fig. 13: Einfluss des Standortes (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

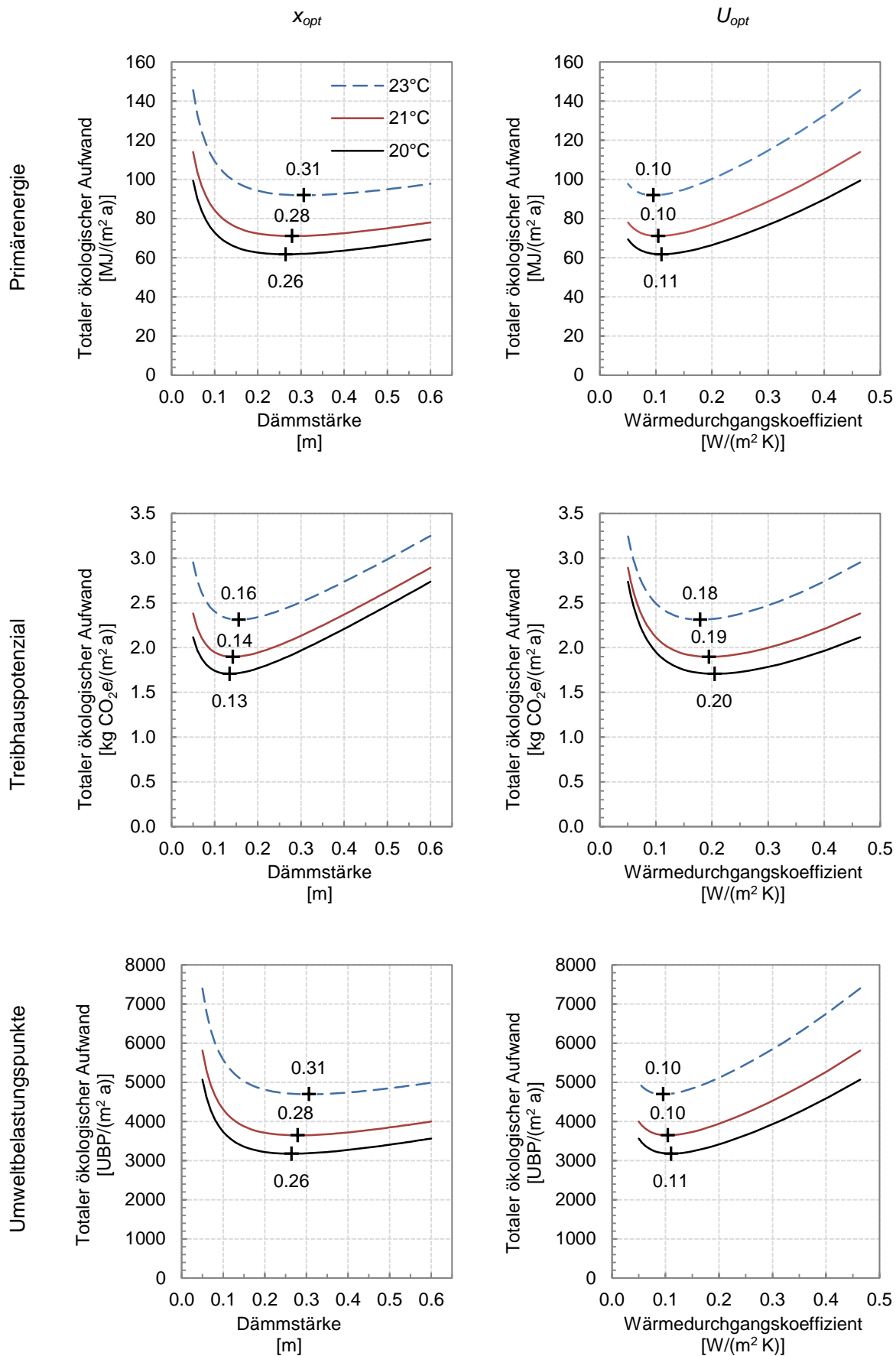


Fig. 14: Einfluss der Innenraumtemperatur (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

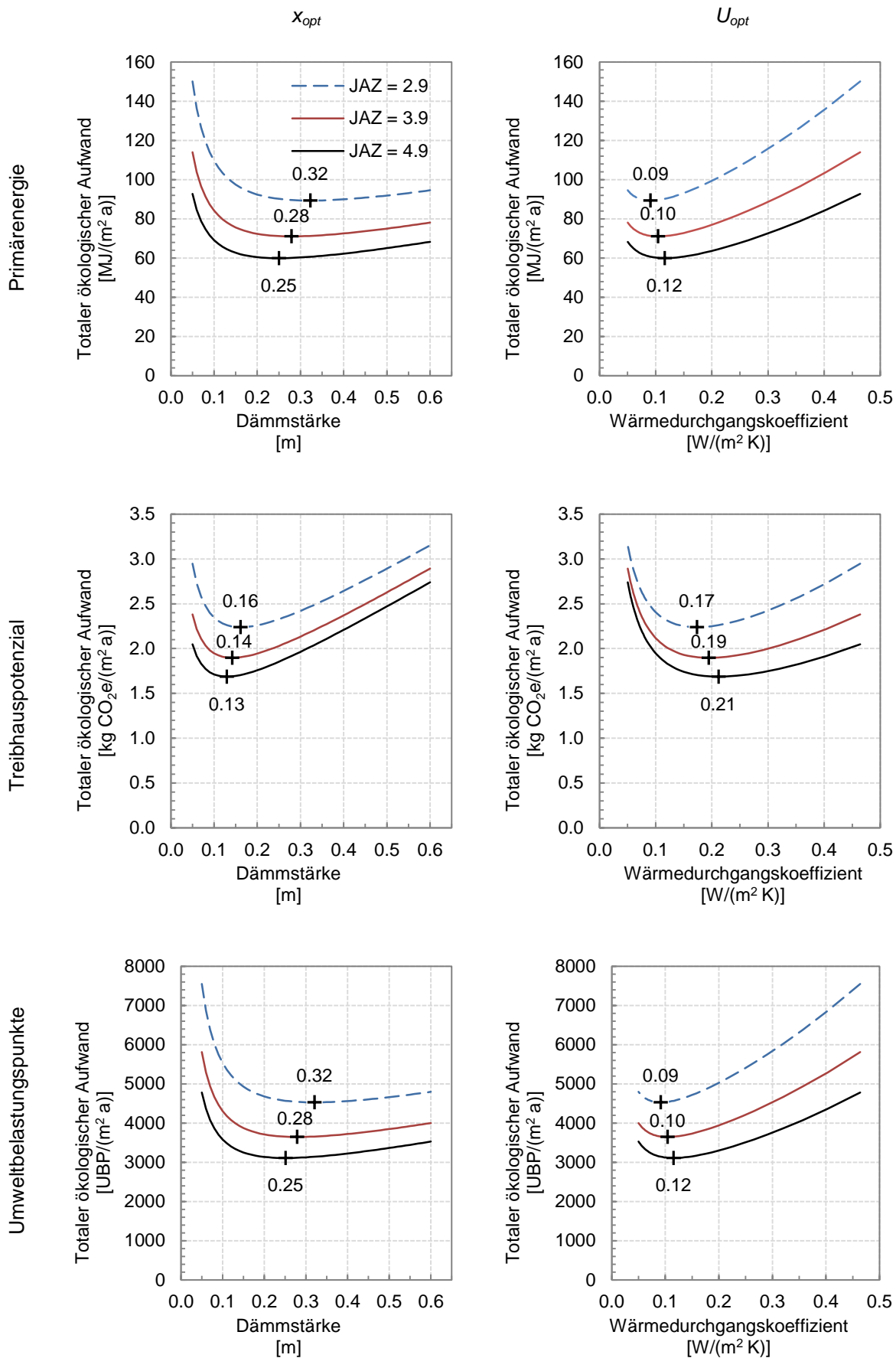


Fig. 15: Einfluss der Jahresarbeitszahl (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

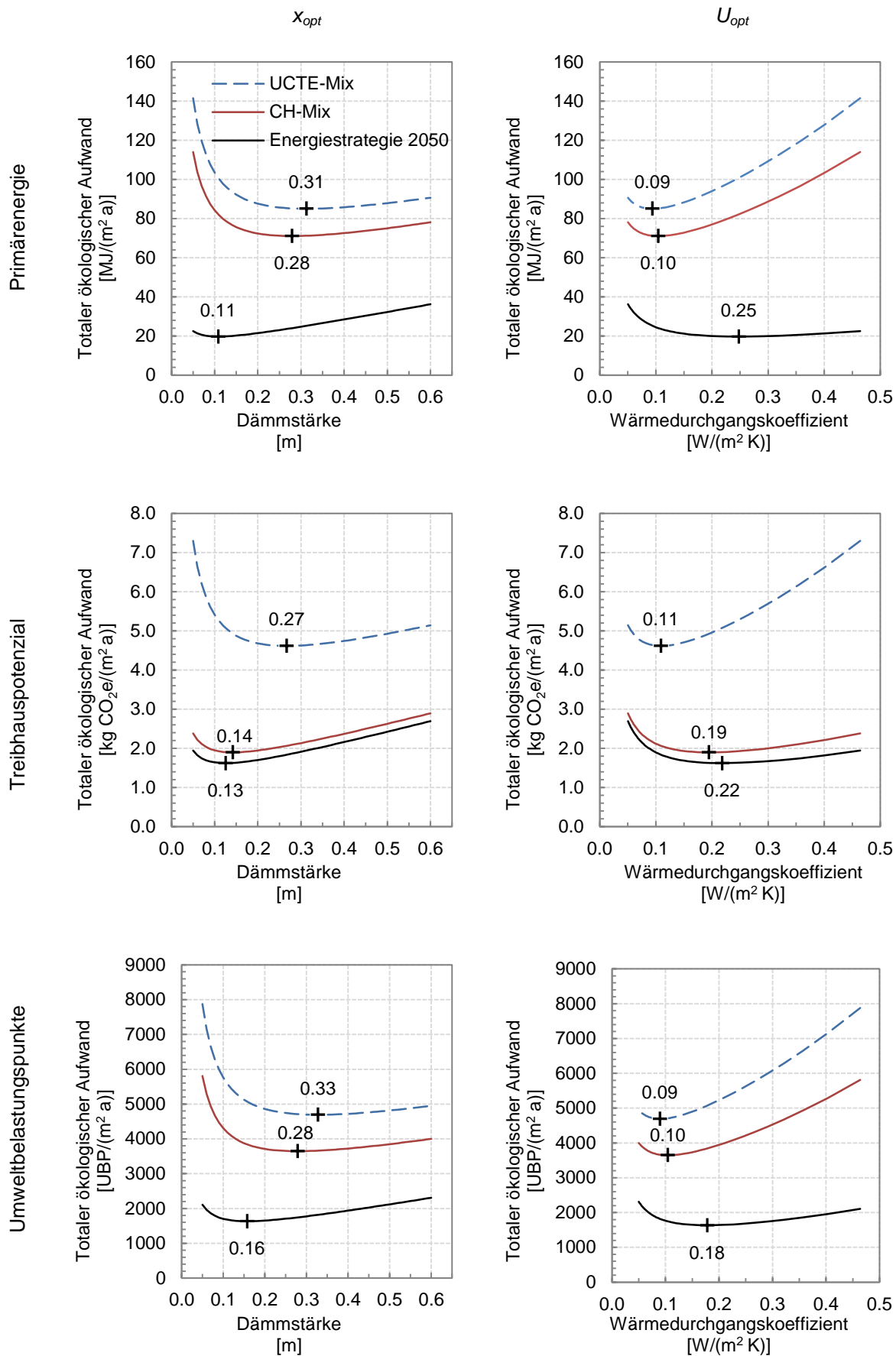


Fig. 16: Einfluss des Strommixes (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

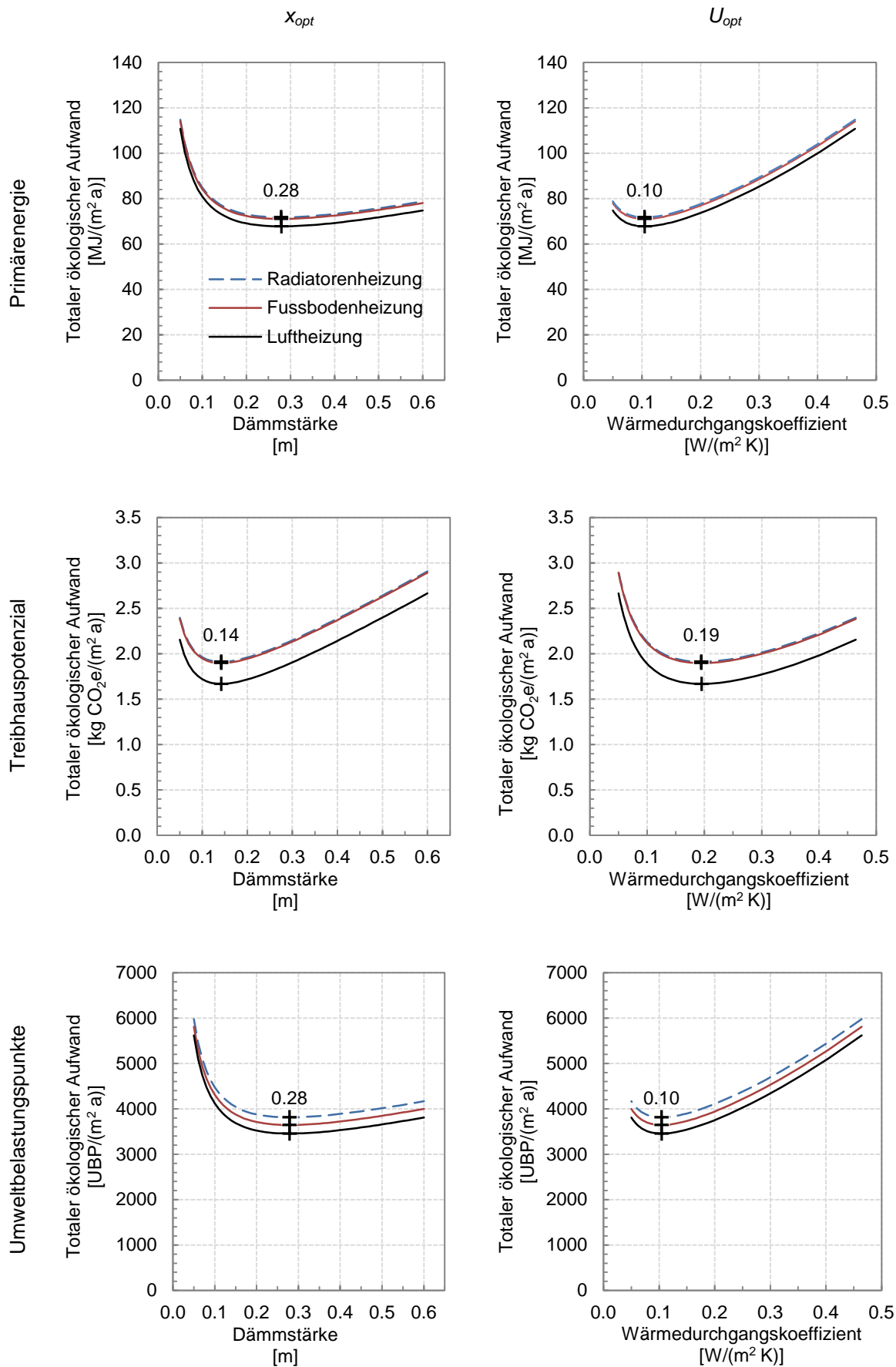


Fig. 17: Einfluss des Wärmeverteilsystems (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

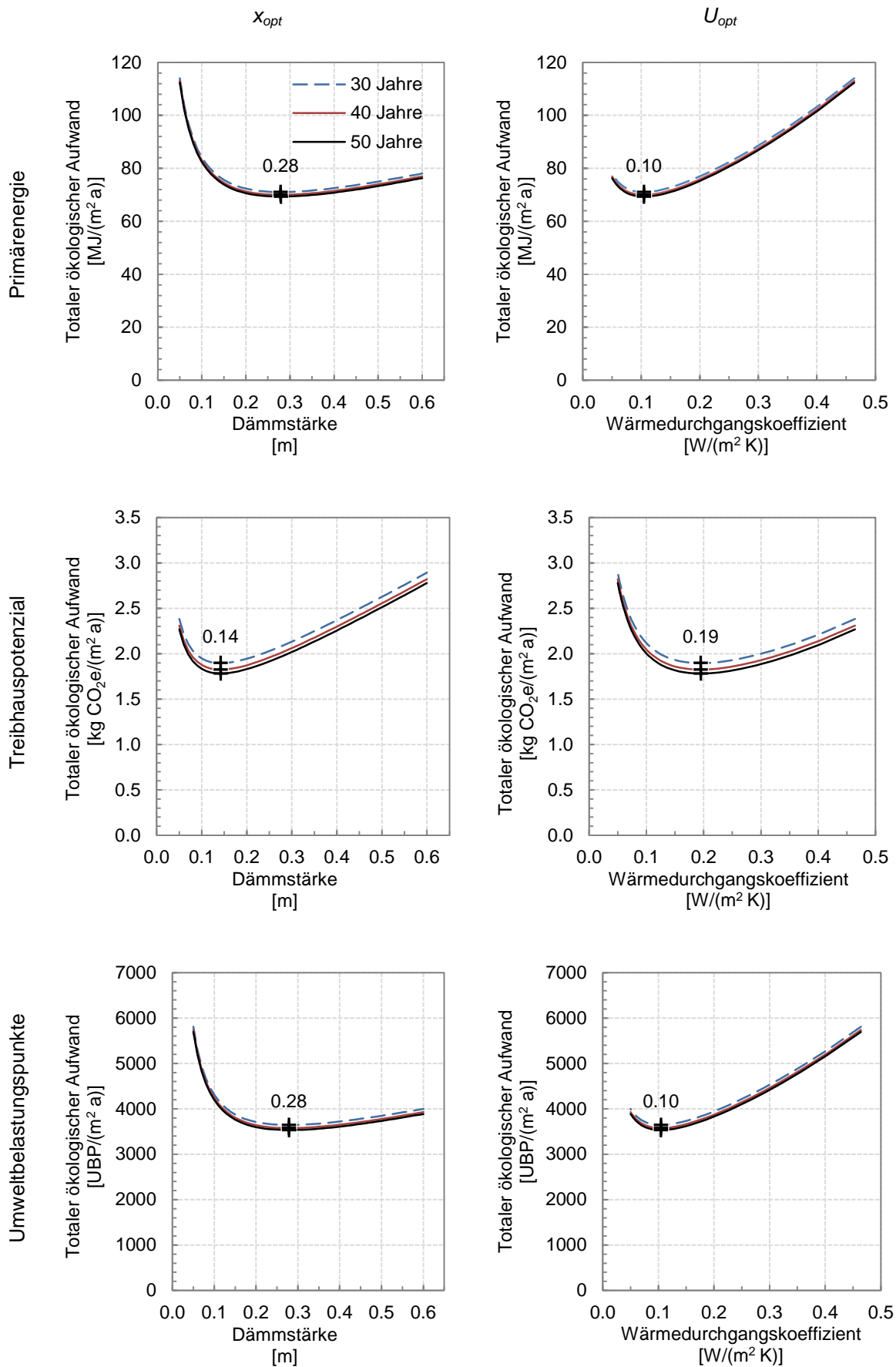


Fig. 18: Einfluss der Lebensdauer des Wärmeverteilsystems (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

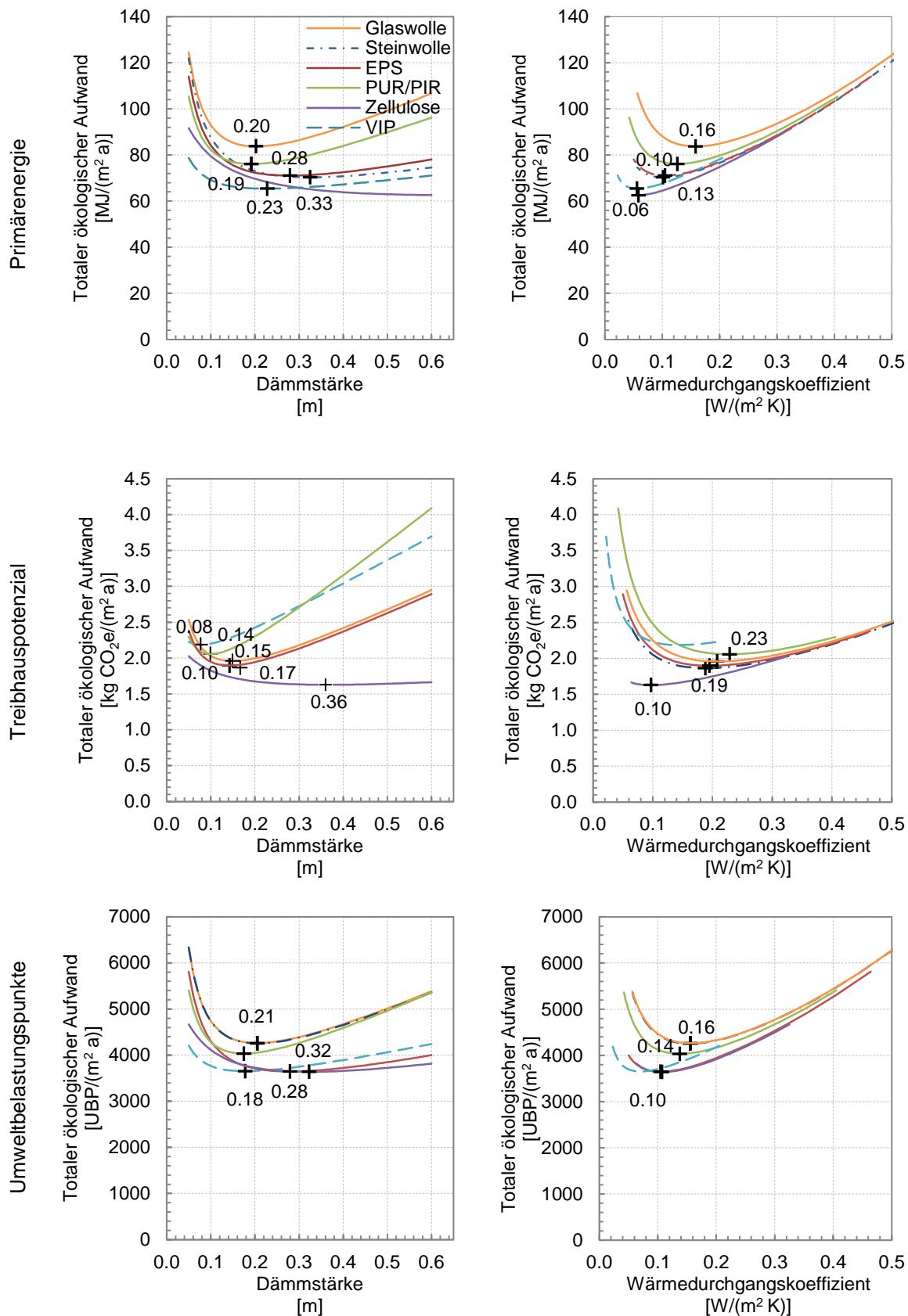


Fig. 19: Einfluss des Dämmstoffes (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)¹⁴

¹⁴ Anmerkung zur optimalen Dämmstärke bezüglich Primärenergie mit Zellulose: liegt ausserhalb des dargestellten Bereichs. $x_{opt} = 0.67 \text{ m}$, $U_{opt} = 0.06 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

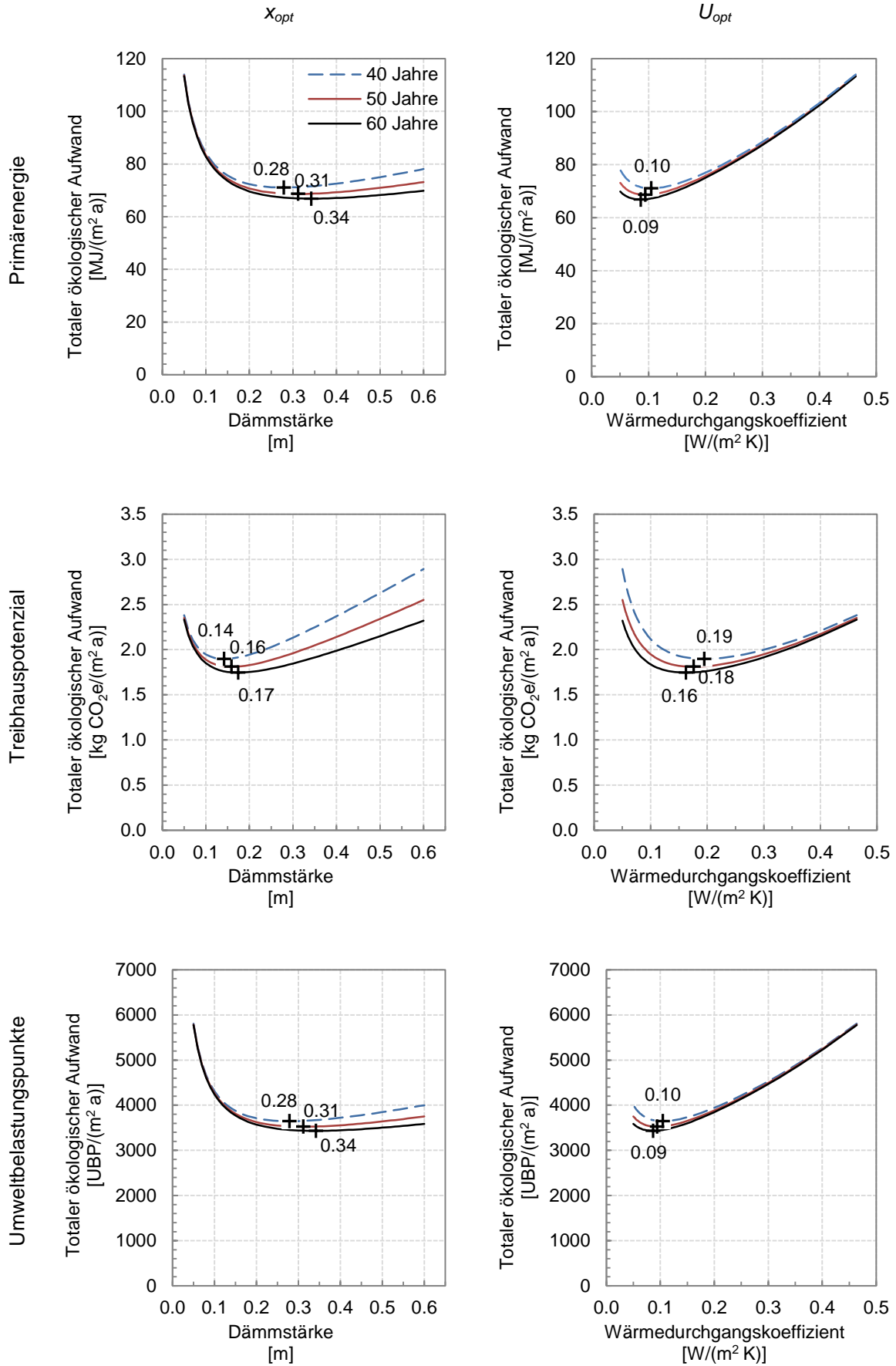


Fig. 20: Einfluss der Lebensdauer der Wärmedämmung (Referenzfall Neubau, WP JAZ=3.9)

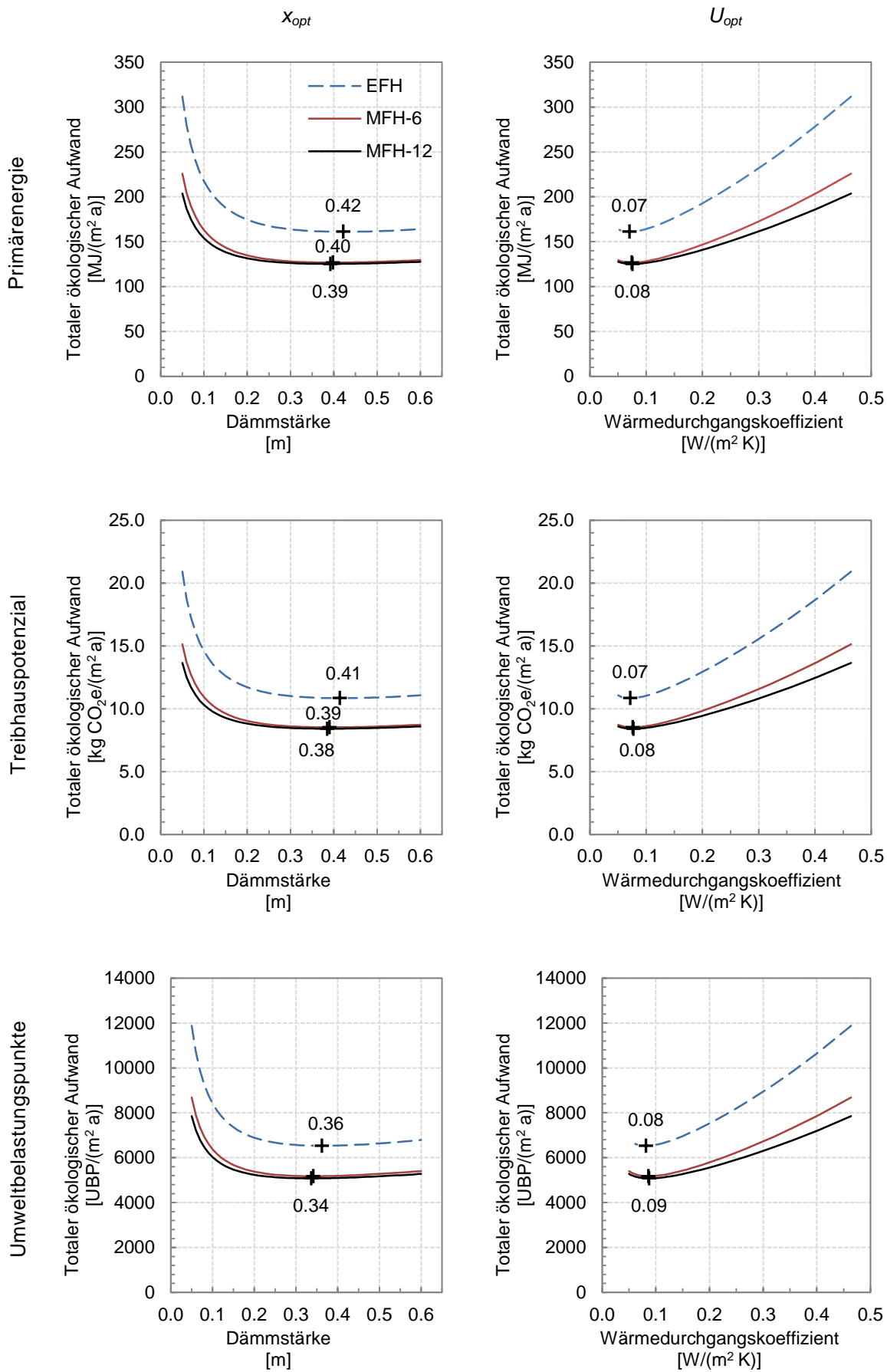


Fig. 21: Einfluss des Gebäudetyps (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

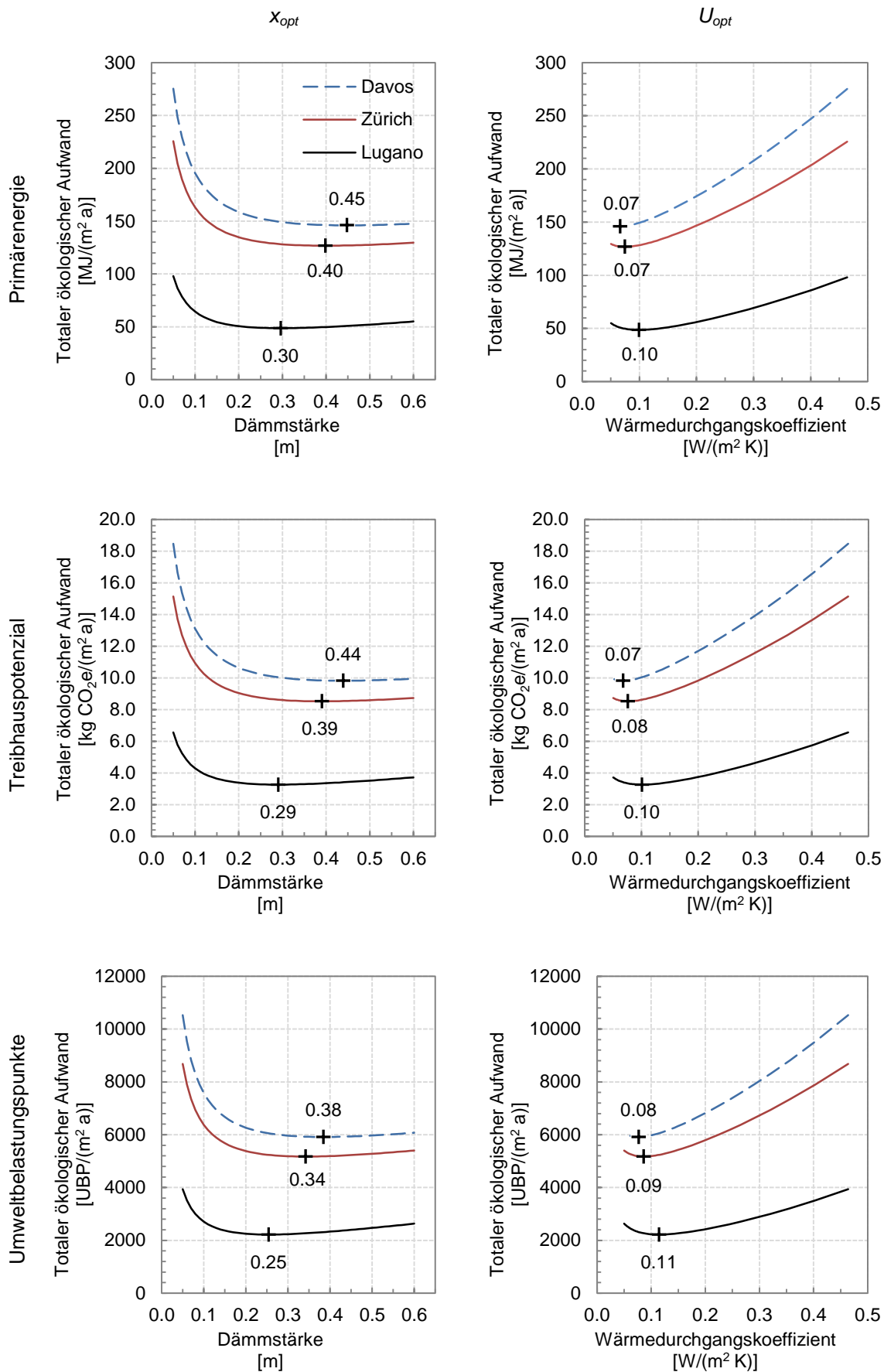


Fig. 22: Einfluss des Standortes (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

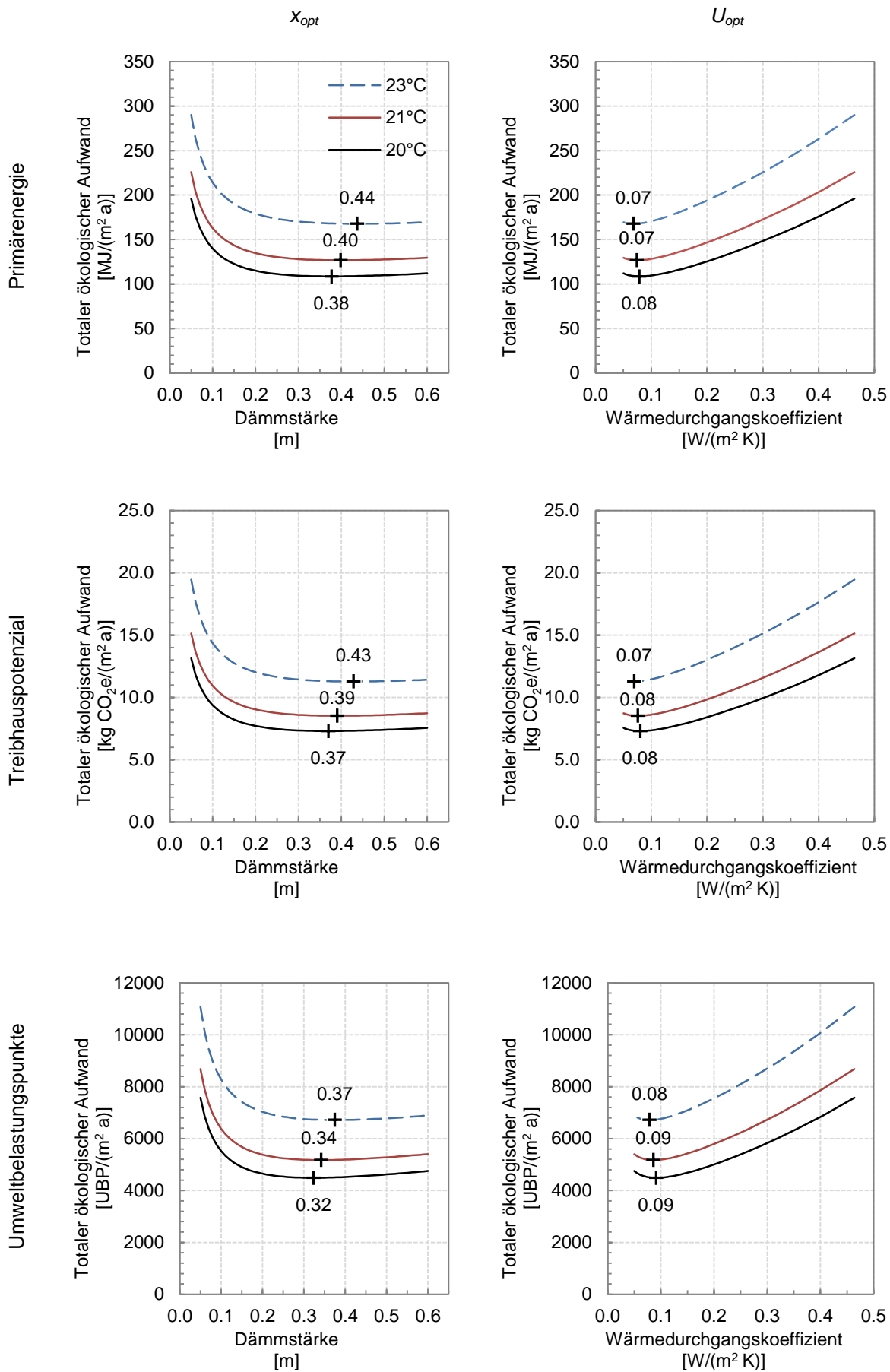


Fig. 23: Einfluss der Innenraumtemperatur (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

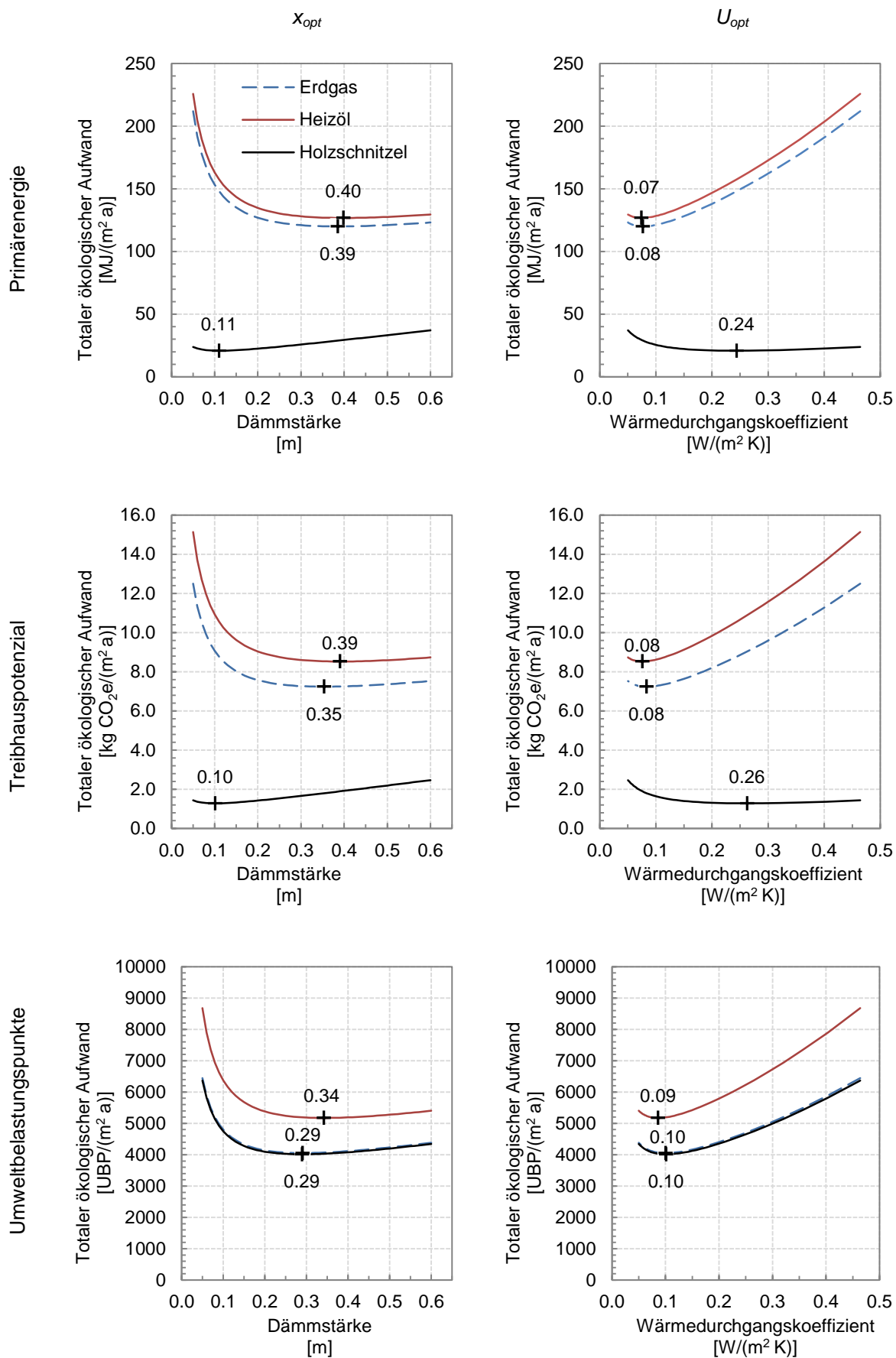


Fig. 24: Einfluss des Energieträgers (Referenzfall Altbau, Heizkessel)

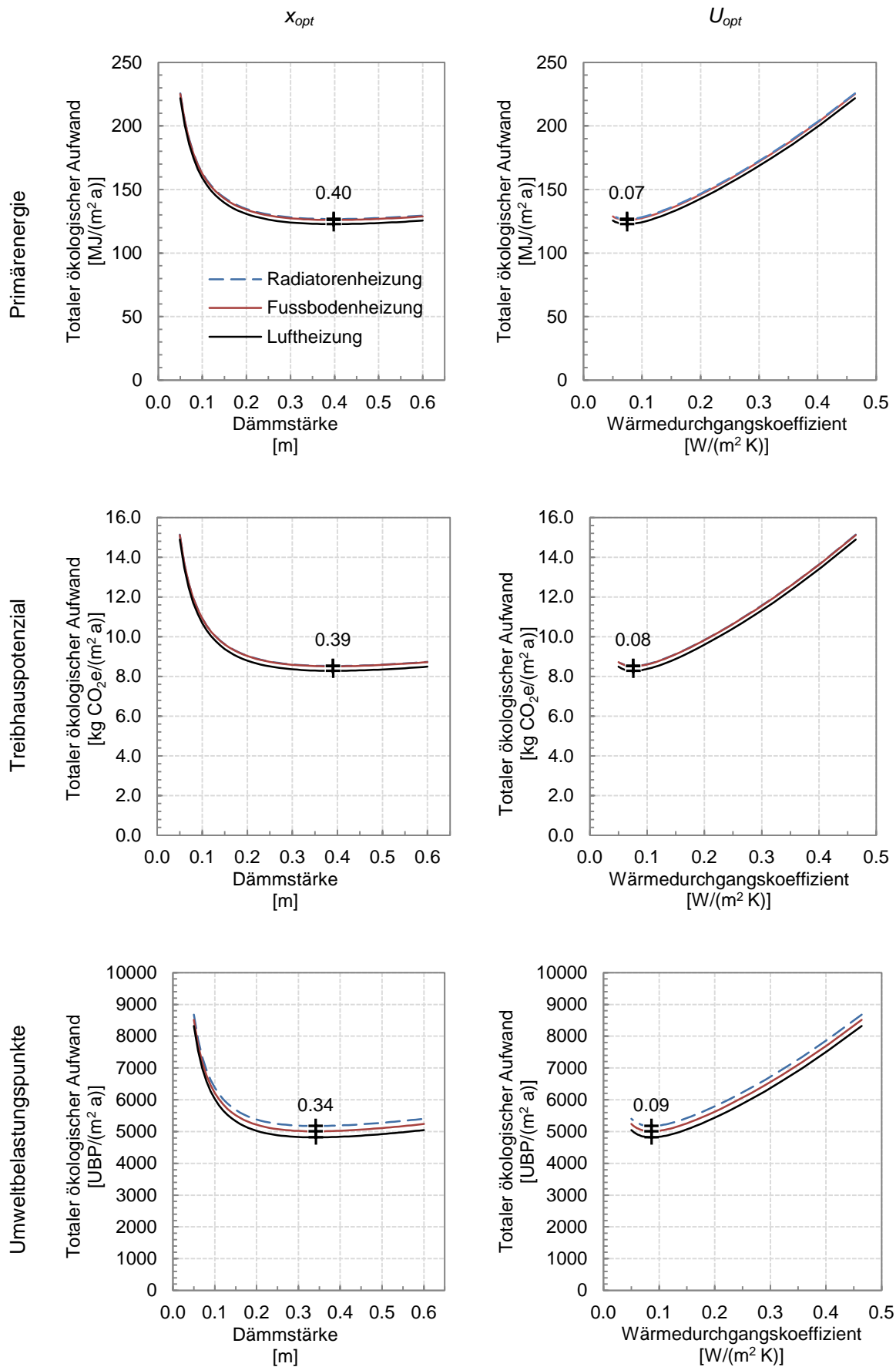


Fig. 25: Einfluss des Wärmeverteilsystems (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

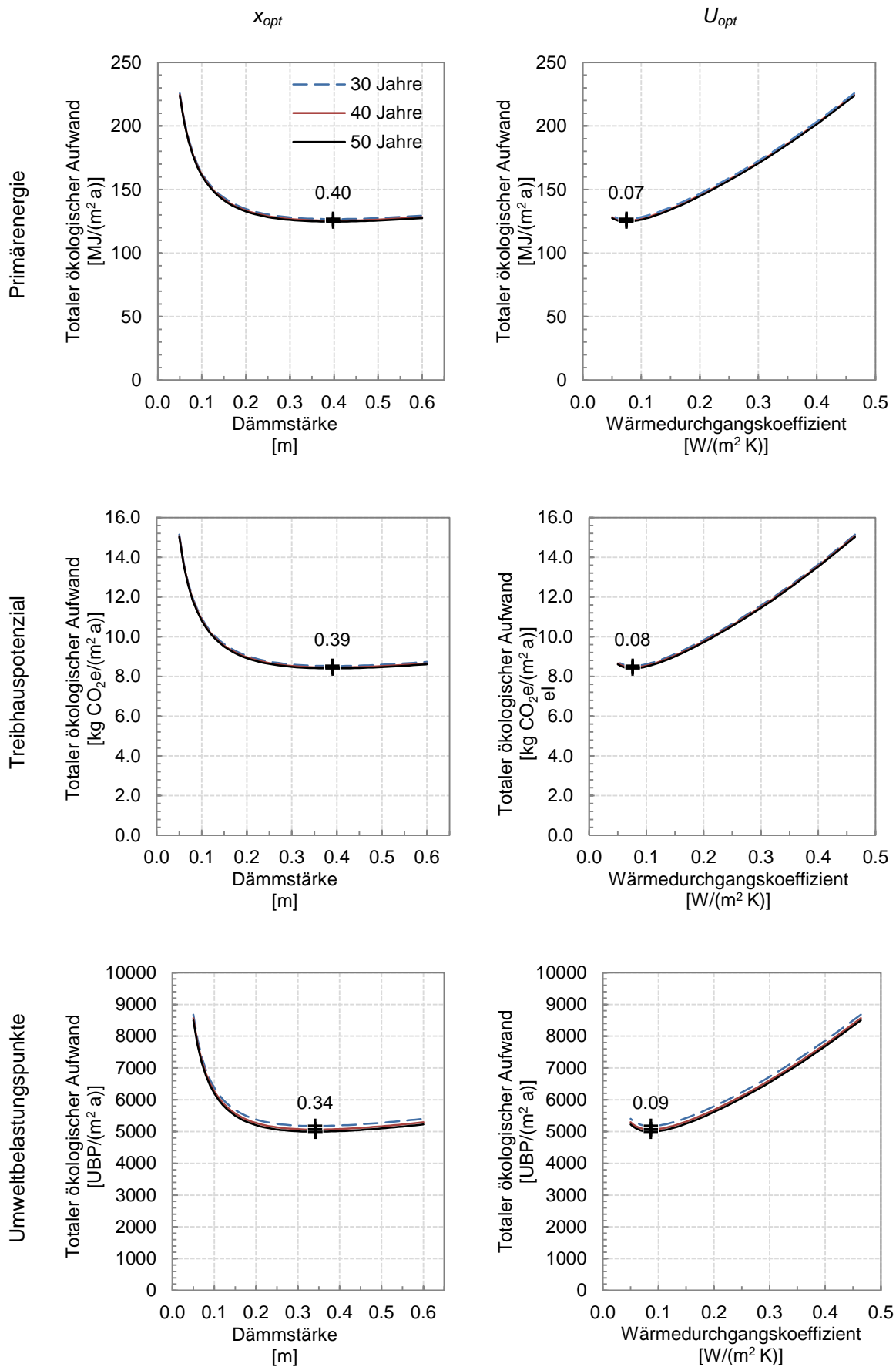


Fig. 26: Einfluss der Lebensdauer des Wärmeverteilsystems (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

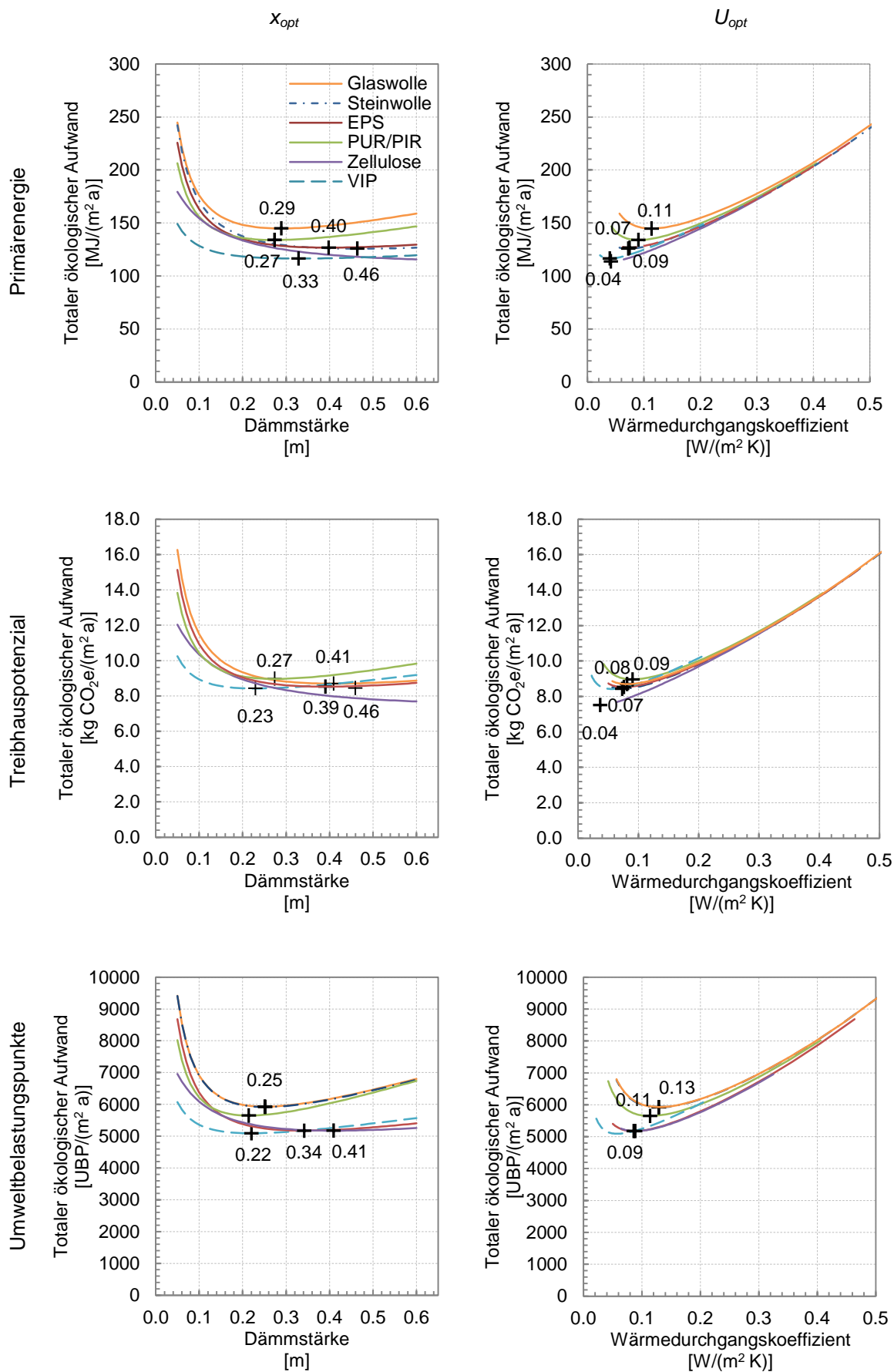


Fig. 27: Einfluss des Dämmstoffes (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

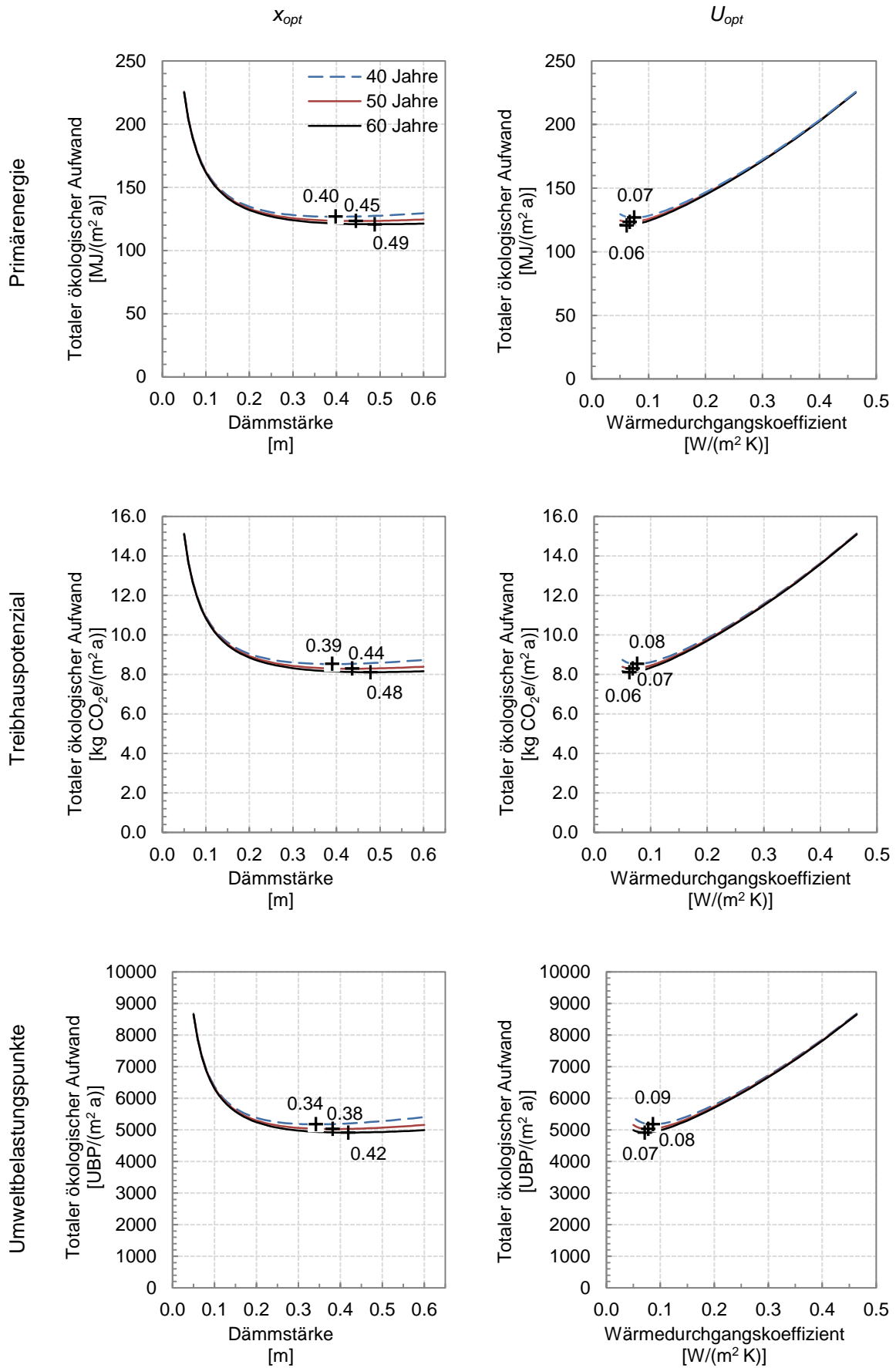


Fig. 28: Einfluss der Lebensdauer der Wärmedämmung (Referenzfall Altbau, Ölkessel)

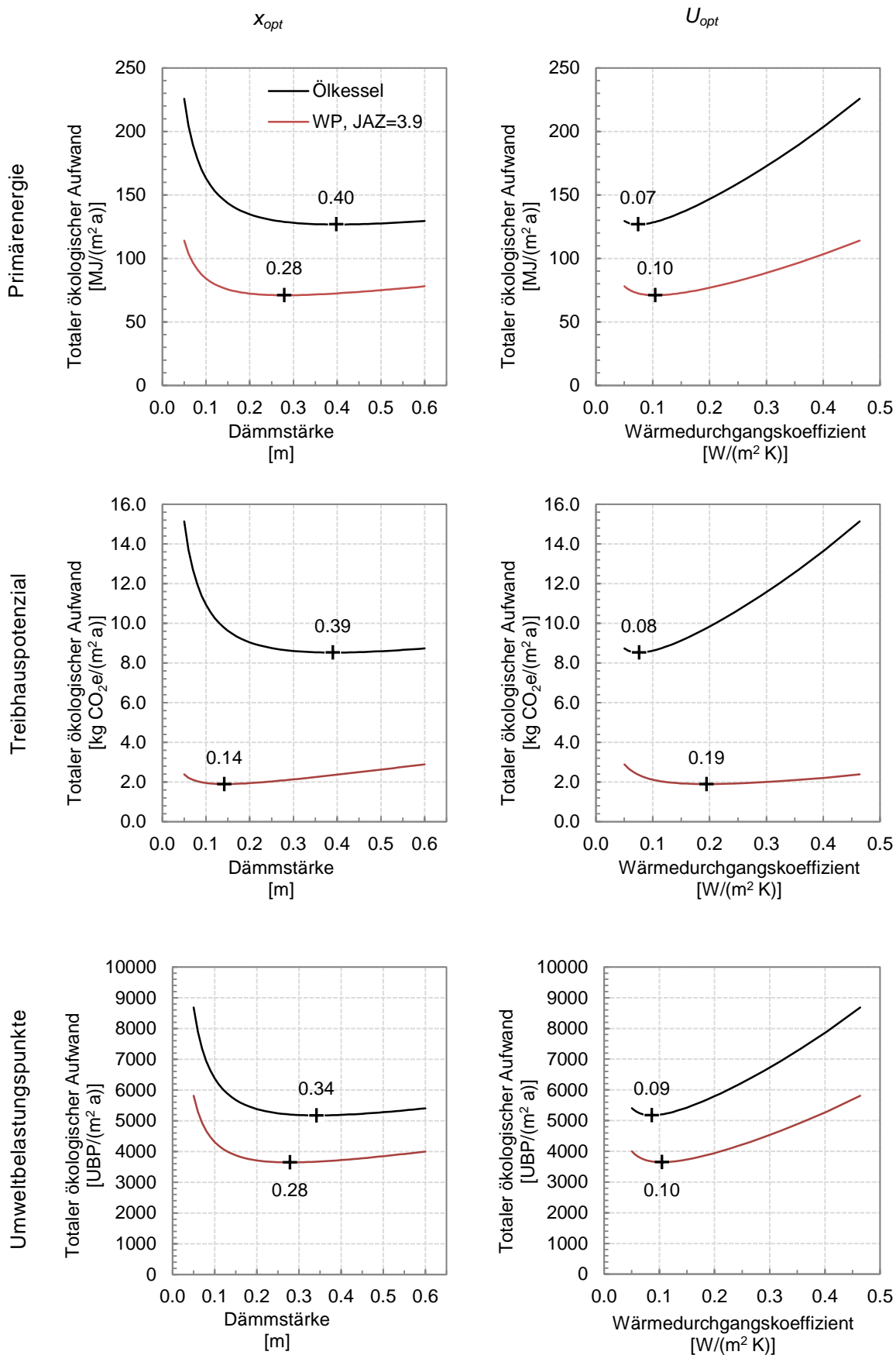


Fig. 29: Vergleich Neubau/Altbau (siehe auch Parameterstudien) zeigt den Einfluss des Energieträgers (Ölkessel bzw. Wärmepumpe mit JAZ=3.9)

3.2 Vergleich mit Normen und behördlichen Vorgaben

Die in dieser Studie gefundenen optimalen Dämmstärken bzw. Wärmedurchgangskoeffizienten werden im Folgenden mit den normativen bzw. behördlichen Vorgaben verglichen. Die aktuell geltenden Grenz- und Zielwerten der SIA-Norm 380/1 (2009) bzw. die zur Zeit (Januar 2015) gültigen Vorgaben gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) für opake Bauteile gegen Aussenklima, ergeben das folgende Bild:

- SIA-Norm 380/1 (2009)
 - Neubau, Dach: Grenzwert $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. Zielwert $0.09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Neubau, Wand: Grenzwert $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. Zielwert $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Umbau und Umnutzung, Dach & Wand: Grenzwert $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. Zielwert $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- MuKE (2008) [MuK08]
 - Neubau, Dach & Wand mit Wärmebrückennachweis: Grenzwert $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Neubau, Dach & Wand ohne Wärmebrückennachweis: Grenzwert $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
 - Umbau und Umnutzung, Dach & Wand: Grenzwert $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Sowohl die SIA-Norm 380/1 als auch die MuKE sind gegenwärtig in Überarbeitung.

Minergie ist ein in der Schweiz verbreiteter Baustandard für neue und modernisierte Gebäude [Min15]. Die Marke wird von der Wirtschaft, den Kantonen und dem Bund gemeinsam getragen. Die Vorgaben zur Erreichung des Standards werden insbesondere mit Hilfe des geschossflächenbezogenen Energiebedarfs formuliert. Bauteilanforderungen werden nur anhand sogenannter Minergie-Module formuliert, wobei bei Neubauten mindestens ein U-Wert von $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden muss.

Die Tabelle 18 zeigt die im Modell der ökologisch optimalen Dämmstärke gewählten Eingabeparameter für den Vergleich mit den normativen bzw. behördlichen Vorgaben. Die Innenraumtemperatur wurde 20°C gesetzt, da die U-Werte in den Normen für diese Temperatur angegeben werden.

Gebäudetyp	MFH-6
Standort	Zürich, Davos oder Lugano
Heizungsanlage	Heizkessel oder Wärmepumpe (JAZ=3.9)
Energieträger	Heizöl, Erdgas, Holzschnitzel oder CH-Strommix
Wärmeverteilsystem	Radiatorenheizung
Dämmung	EPS
Lebensdauer des Wärmeverteilungssystems der Heizungsanlage	30 Jahre
Lebensdauer der Wärmedämmung	40 Jahre
Fensteranschlag	innen
Innenraumtemperatur	20°C

Tab. 18: Im Modell der ökologisch optimalen Dämmstärke gewählten Eingabeparameter für den Vergleich mit den normativen bzw. behördlichen Vorgaben.

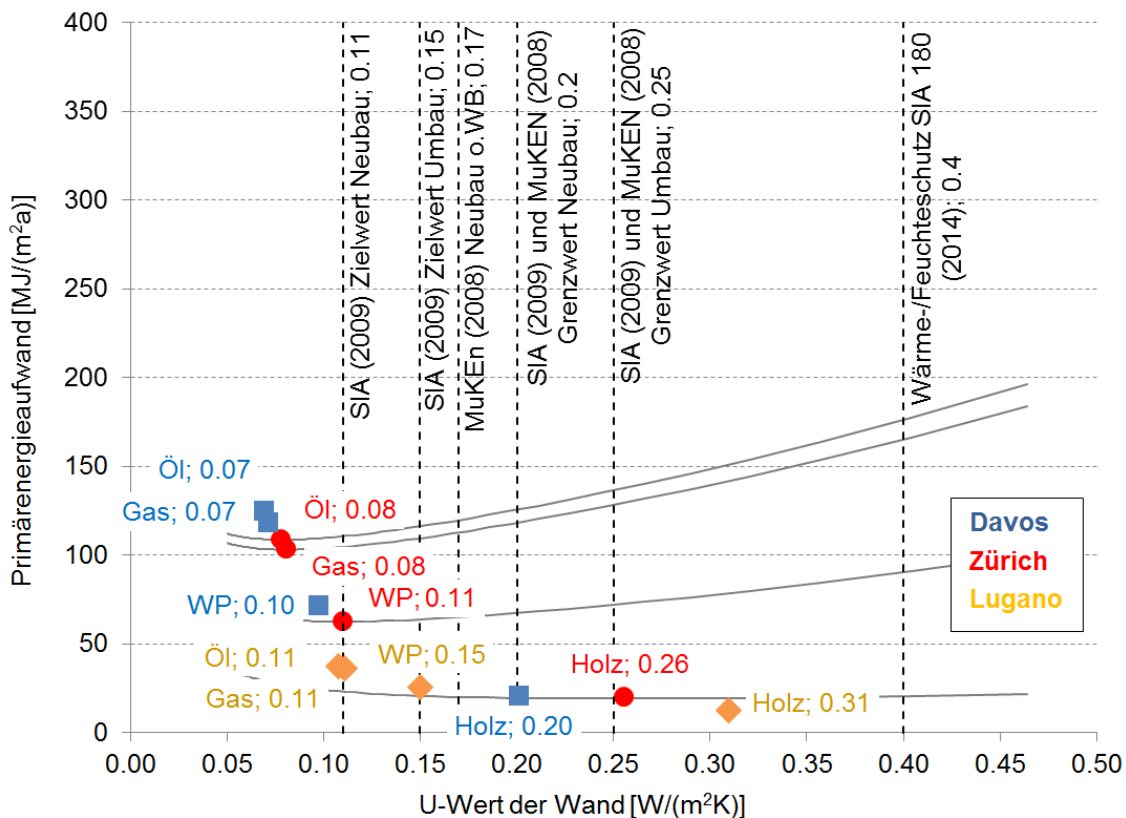


Fig. 30: Vergleich der optimalen Dämmstärken bezüglich des Umweltindikators Primärenergie mit normativen bzw. behördlichen Vorgaben

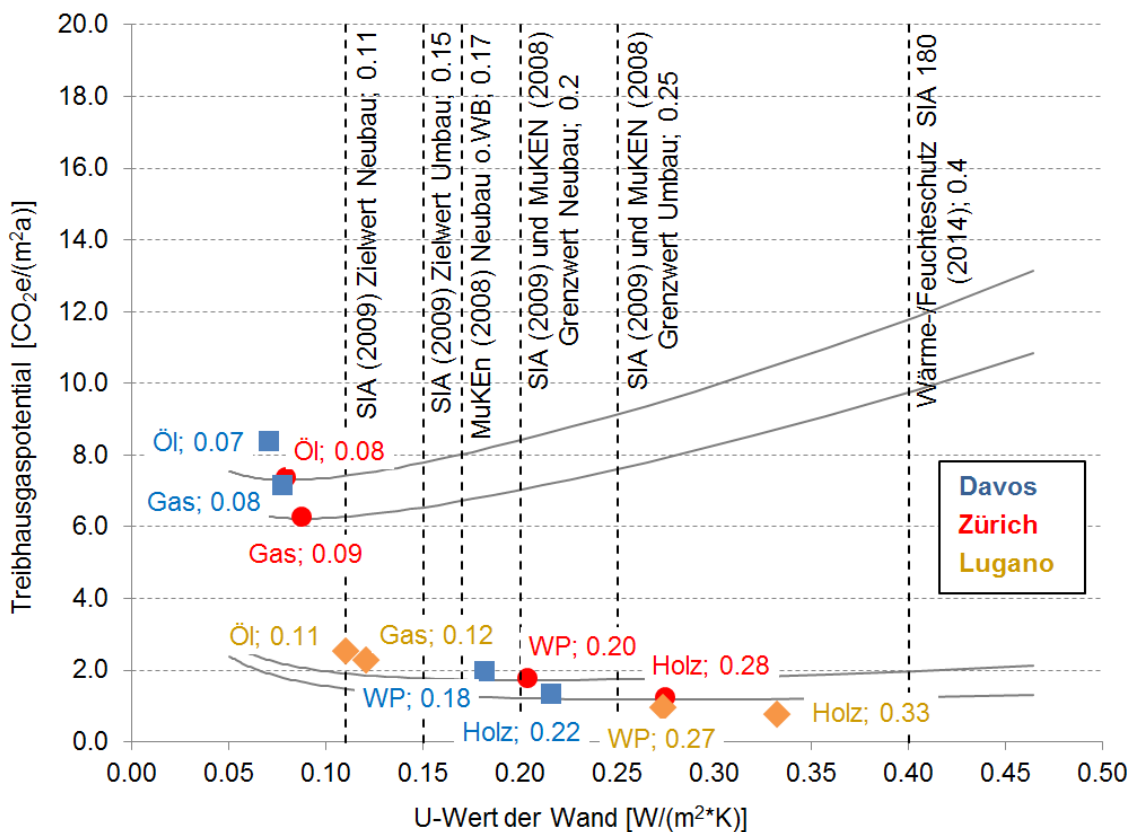


Fig. 31: Vergleich der optimalen Dämmstärken bezüglich des Umweltindikators Treibhauspotenzial mit normativen bzw. behördlichen Vorgaben

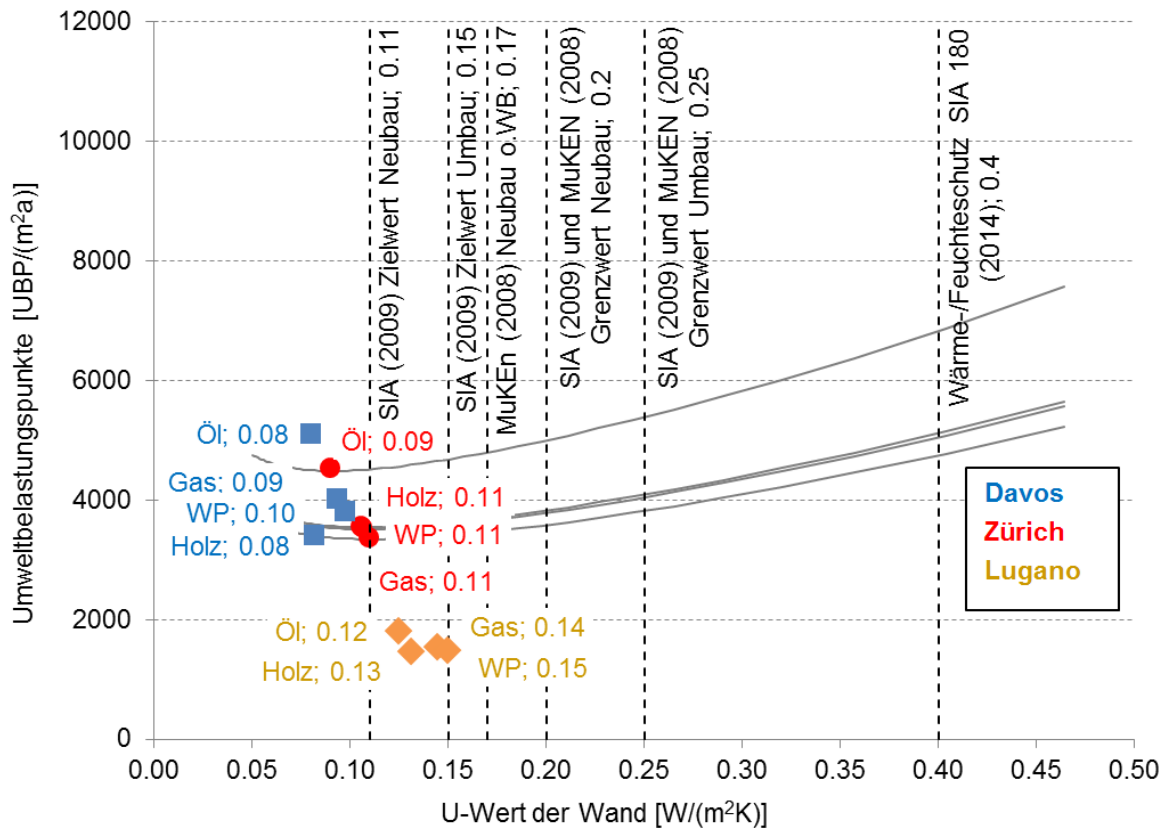


Fig. 32: Vergleich der optimalen Dämmstärken bezüglich des Umweltindikators Umweltbelastungspunkte mit normativen bzw. behördlichen Vorgaben

4. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

4.1 Einleitung

Das ökologische Optimum für die Dämmdicke von Gebäuden zu kennen ist ein wichtiger Schritt hin zum nachhaltigen Gebäude. Damit die dabei entwickelten Erkenntnisse umgesetzt werden können, ist es nötig, die gefundenen Dämmstärken ökonomisch zu bewerten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für einen Investor immer zwei Dimensionen relevant sind: Einerseits gilt es, die Lebenszykluskosten zu betrachten, andererseits spielt die Höhe der Investitionen eine Rolle. Auf Grund des Investor-Nutzer-Dilemmas [Wik15] hat der Investor oft einen Anreiz, weniger zu dämmen, als bei einer gesamthaften Lebenszykluskostenbetrachtung optimal wäre. Gesetzliche und normative Grenzwerte schränken diesen Anreiz ein. Deshalb spielen regulative Vorgaben auch in dieser Diskussion eine Rolle.

In einer Gesamtbetrachtung geht es deshalb um die Kombination der ökologischen und der ökonomischen Dimensionen. D.h. um die Frage, wo das ökonomische Optimum im Bezug zum ökologischen Optimum liegt, beziehungsweise inwieweit sich eine Vergrößerung der Dämmstärke vom ökonomischen Optimum hin zum ökologischen Optimum realisieren und finanzieren lässt. Diese Frage lässt sich naturgemäss nicht objektiv beurteilen, ohne den Umweltgütern einen Preis zu geben. Solange Umweltgüter keinen Preis erhalten, ist der einzige Anreiz für einen Investor das Engagement für eine bessere Umwelt oder das Einhalten von Grenzwerten. Erhalten Umweltschäden einen Preis, verschiebt sich das ökonomische Optimum in Richtung ökologischem Optimum. Im Idealfall liegen ökonomisches und ökologisches Optimum nahe beieinander. In diesem Fall kann der Investor einen klaren Entscheid fällen.

Eine Methodik, die es erlaubt, das ökonomische Optimum in vergleichbarer Art zu bestimmen, wie das ökologische Optimum, wurde entwickelt. Anschliessend wurde der ökologische und der ökonomische Aufwand – bzw. die ökologischen und ökonomischen Kosten – in Funktion der Dämmstärke in Parameterdarstellung miteinander kombiniert. Aus der resultierenden Parameterkurve können Informationen über die ökonomischen wie auch der ökologischen Kosten abgelesen werden. Insbesondere interessiert dabei die Lage der beiden Optima sowie der Kurvenverlauf dazwischen.

4.2 Methodik

Die Bestimmung der ökonomisch optimalen Dämmstärke kann grundsätzlich mit einem ähnlichen Ansatz erfolgen, wie die Bestimmung des ökologischen Optimums (vgl. Fig. 1). Die verwendete Methodik soll hier nur skizziert werden. Für eine detaillierte Herleitung wird auf [Woh15] verwiesen.

Die Gesamtkosten für die Beheizung von Wohngebäuden setzen sich aus den Kosten für die Wärmedämmung der Gebäudehülle, den Kosten für das Heizsystem und den Energiekosten zusammen.

- Die Kosten für das Fassadensystem $K_F(x)$ sind abhängig vom gewählten Dämmstoff und der Dämmstärke x .
- Die Kosten für das Heizsystem $K_H(x)$ sind abhängig von der Heizleistung des Wärmeerzeugers (diese ist wiederum abhängig von der Dämmstärke x), von der Art

des gewählten Wärmeerzeugers und von der Art des gewählten Wärmeabgabesystems.

- Die Energiekosten $K_E(x)$ beschreiben die Kosten zur Deckung des Heizwärmebedarfs im Betrieb. Diese sind abhängig vom Heizwärmebedarf (dieser ist abhängig von der Dämmstärke x) und vom gewählten Energieträger.

Die Gesamtkosten in Abhängigkeit der Dämmstärke ergeben sich aus der Summe der drei Komponenten:

$$K_G(x) = K_F(x) + K_H(x) + K_E(x) \quad (35)$$

Die Gesamtkosten werden als Funktion der Dämmstärke x beschrieben. Die ökonomisch optimale Dämmstärke entspricht dem Extremalwert (Minimum) der Funktion, welcher wie folgt bestimmt werden kann:

$$\frac{d}{dx} \cdot K_G|_{x=x_{opt}} = 0 \quad (36)$$

Exemplarisch zeigt die Figur 33 die Kurvenverläufe der drei Komponenten sowie die Funktion der Gesamtkosten.

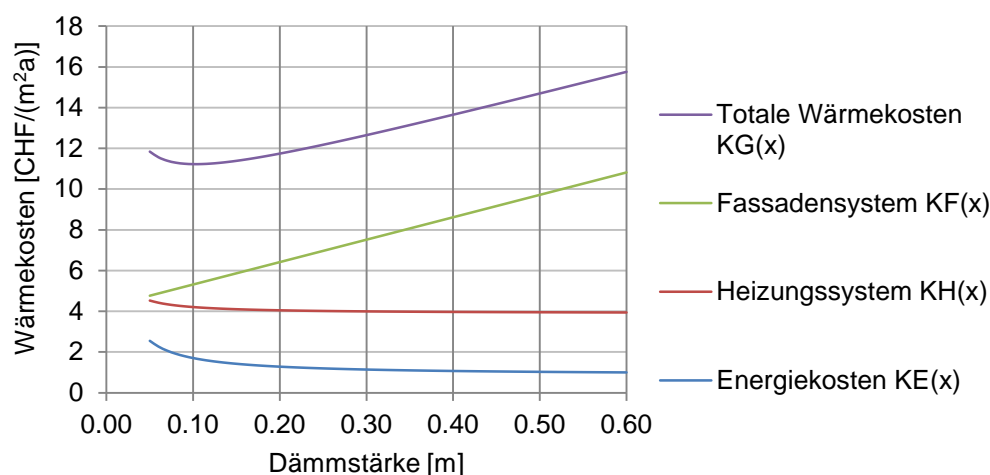


Fig. 33: Beispiel für die drei Kostenkomponenten und die Gesamtkosten in Funktion der Dämmstärke

Die ökonomische Berechnung erfolgt dynamisch, wobei innerhalb der Betrachtungsperiode alle Ausgaben und Einnahmen, mit Hilfe eines angenommenen Kapitalzinssatzes, vom Zahlungszeitpunkt auf einen Referenzzeitpunkt diskontiert werden. Dadurch erhält man den Kapitalwert (= Barwert) der Investition, der mit einem Annuitätsfaktor multipliziert wird, um einen jährlich gleichen Zahlungsbetrag zu erhalten.

Alle Berechnungen wurden teuerungsbereinigt durchgeführt. Die Inflation wurde mit 2 % p.a.¹⁵ angenommen Für die Berechnung der Annuitäten wurde im Referenzfall ein Realzinssatz¹⁶ von 3.5 % p.a. gewählt. Der Realzinssatz beschreibt den um die Inflation bereinigten Zinssatz.

¹⁵ Vgl. SIA 480:2004, Anhang C: Standardwerte für die wirtschaftlichen Eingabegrößen; C.2.3

¹⁶ Vgl. SIA 480:2004, Anhang C: Standardwerte für die wirtschaftlichen Eingabegrößen; C.2.1. Der Kalkulationszinssatz ist die wichtigste Grösse für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Er soll dem marktüblichen Zinssatz für die Verzinsung des im Projekt gebundenen Kapitals entsprechen. Er berücksichtigt die Bonität des Schuldners und/oder das Risiko des Projekts. C.2.4 Als Kalkulationszinssatz i gilt ein Realzinssatz von 3.0 – 3.5%.

Die Betrachtung wurde für ein Betriebsjahr und pro Quadratmeter Geschossfläche durchgeführt, wobei die unterschiedlichen Lebensdauern von Fassadensystem und Heizungsanlage berücksichtigt werden.

Die Lebenszykluskosten wurden betrachtet, welche sich aus den Investitions-, Unterhalts- und Entsorgungs- bzw. Rückbaukosten zusammensetzen.

Es wurde der sehr häufige Fall einer Dämmung mit EPS angenommen. Wird anstelle von EPS ein anderes Dämmmaterial verwendet, sind die Mehrkosten, welche dadurch entstehen, die Folge einer zusätzlichen Qualitätsanforderung, wie z.B. Entflammbarkeit o.ä. Die Mehrkosten sollten also nicht auf die Energieeinsparung abgewälzt werden.

Die Kostenkennwerte für die Dämmungen, aber auch diejenigen für die Heizsysteme, wurden durch eine Umfrage bei ausführenden Firmen sowie mit Hilfe von Regression und Mittelwertbildung bestimmt [Woh15].

4.3 Resultate

4.3.1 Ökonomisches Optimum und Sensitivitätsanalyse

Als Referenzfall wurde das gleiche Gebäude, das für die Berechnung der ökologischen Optima verwendet wurde, gewählt. Tabelle 19 zeigt die verwendeten Parameter.

Gebäudetyp	MFH-6
Standort	Zürich
Dämmung	EPS
Lebensdauer des Wärmeerzeugers (Heizungsanlage)	20 Jahre
Lebensdauer der Erdsonden	50 Jahre
Lebensdauer der Fussbodenheizung	30 Jahre
Lebensdauer der Wärmedämmung	40 Jahre
Fensteranschlag	innen
Innenraumtemperatur	21°C
Zinssatz	3.5%
Heizungssystem Altbau (kein neuer Wärmeerzeuger)	Alter Heizökessel ($\eta = 0.8$) kein neues Wärmeabgabesystem Heizölpreis: 0.1027 CHF/kWh
Referenz-Heizungssystem Sanierung (neuer Heizökessel)	Heizökessel ($\eta = 0.9$) Radiatoren Sanierung Heizölpreis: 0.1027 CHF/kWh
Referenz-Heizungssystem Neubau	Wärmepumpe, JAZ = 3.9 Fussbodenheizung Strompreis: 0.21 CHF/kWh

Tab. 19: Definition der Referenzfälle für die Kostenparameterstudie

Die Kosten der Heizsysteme wurden für den Neubaufall und den Sanierungsfall erhoben. Als Referenz wurde beim Neubau der Einbau einer Erdsonden-Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3.9 angenommen und bei der Sanierung wurde als Referenz von einem Heizökessel-Ersatz ausgegangen. Zum Vergleich wird hier auch noch der Fall dargestellt,

bei dem kein neuer Wärmeerzeuger gekauft wird. In diesem Fall (genannt Altbau) wurde ein alter Heizkessel als Referenz angenommen.

Im Rahmen der Masterarbeit von Daniela Wohlgemuth [Woh15] wurden insgesamt 30 Parametervariationen untersucht. Im Folgenden sollen einige Resultate dargestellt werden.

Die Figur 34 zeigt die Ergebnisse für die definierten Referenzfälle. Wird ein Ölkessel als Heizungssystem eingesetzt, so liegt die ökologisch optimale Dämmstärke bei 0.13 m ($U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Das Optimum wird durch den Heizkesslersatz nicht verändert. Wird als Heizsystem eine Erdsonden-Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3.9 verwendet, ergibt sich ein ökonomisches Optimum von 0.13 m ($U = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

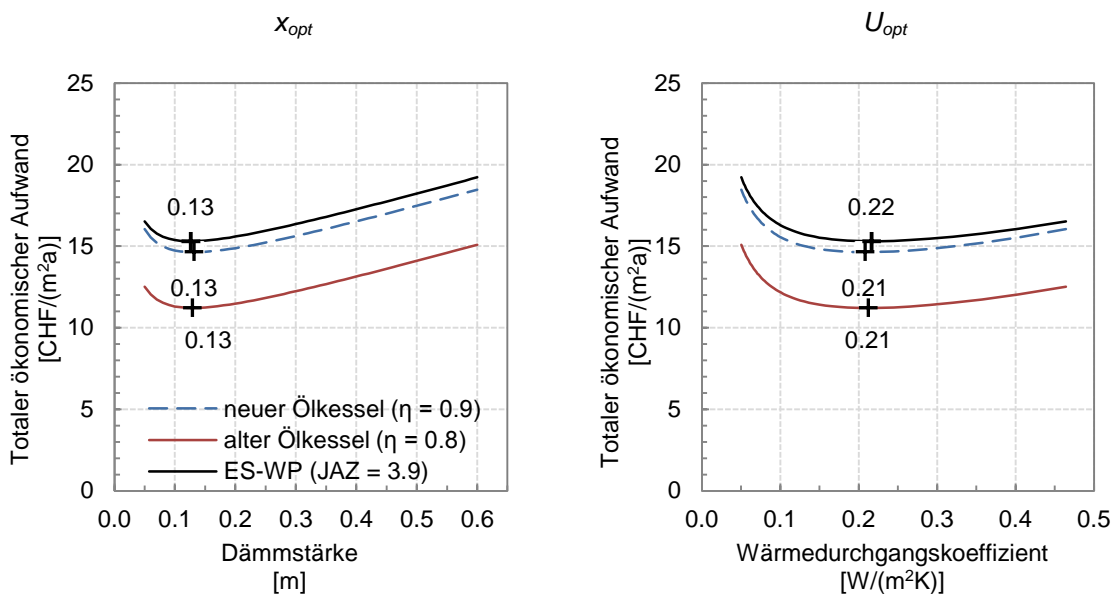


Fig. 34: Ökonomische Optima für die Referenzfälle

Die Figur 35 zeigt den Einfluss der Lebensdauer des Fassadensystems. Die ökonomisch optimale Dämmstärke steigt mit zunehmender Fassadenlebensdauer an.

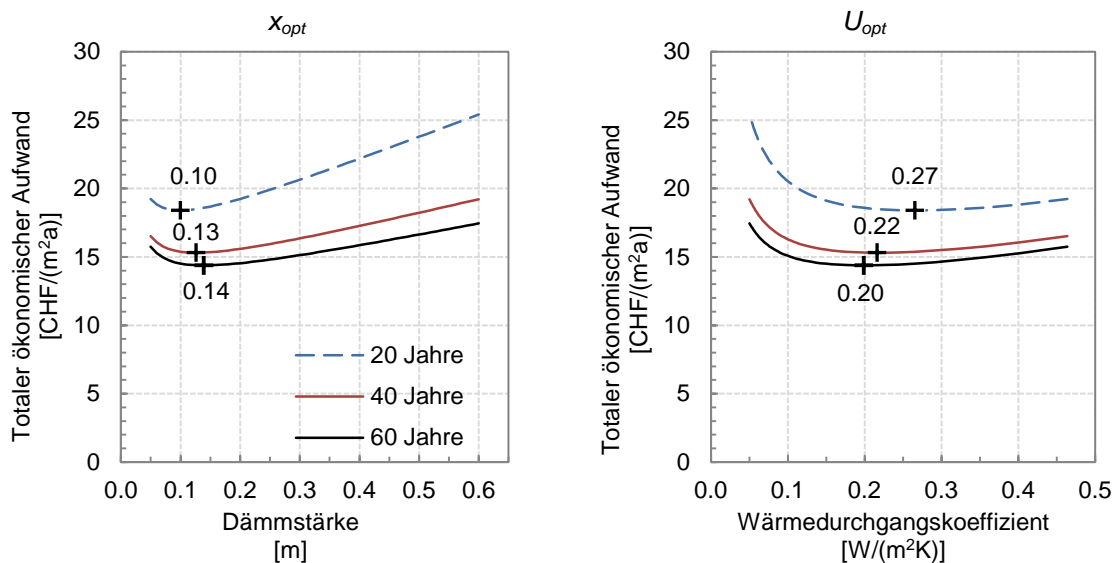


Fig. 35: Einfluss der Lebensdauer des Fassadensystems bei Wohnbau mit Erdsonden-Wärmepumpe (JAZ = 3.9) und Fussbodenheizung

Die Figur 36 zeigt den Einfluss des Gebäudetyps. Die ökonomischen Optima von EFH und MFH unterscheiden sich nur geringfügig.

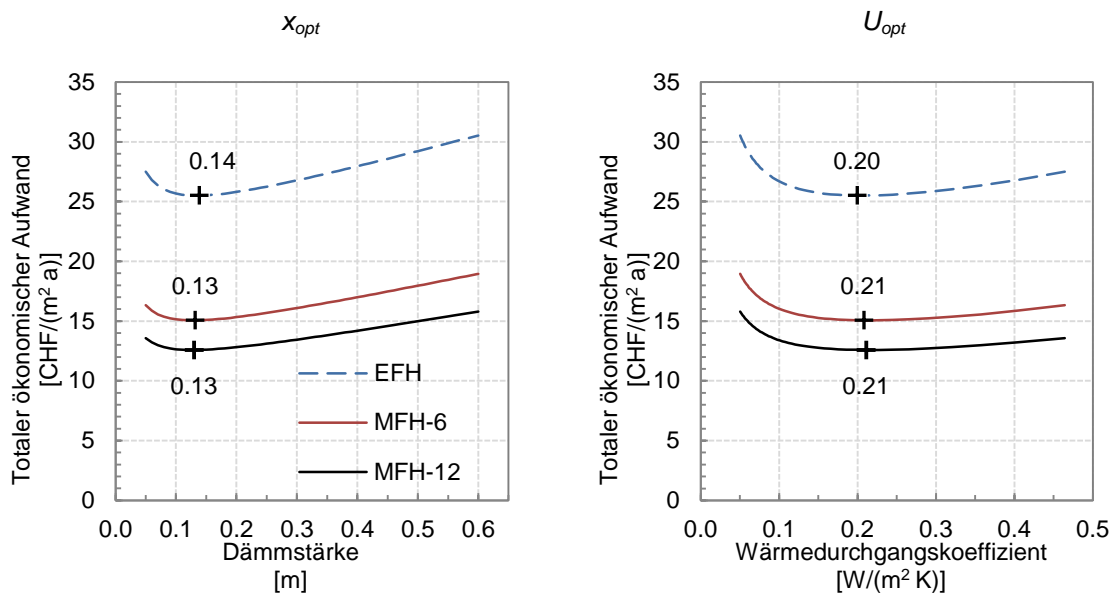


Fig. 36: Einfluss des Gebäudetyps mit neuem Öl-Brennwertkessel ($\eta = 0.9$) und neuen Radiatoren

Aufgrund des dramatischen Zerfalls der Heizölpreise im Jahre 2015 wurde zusätzlich ein Szenario mit einem langdauernden Tiefpreis berechnet. Als Ausgangsbasis wurden 0.103 CHF/kWh angenommen. Die ökonomisch optimale Dämmstärke sinkt beim Tiefpreisszenario um 2 cm, bei einer Verdoppelung des Heizölpreises steigt sie um 5 cm (Fig. 37).

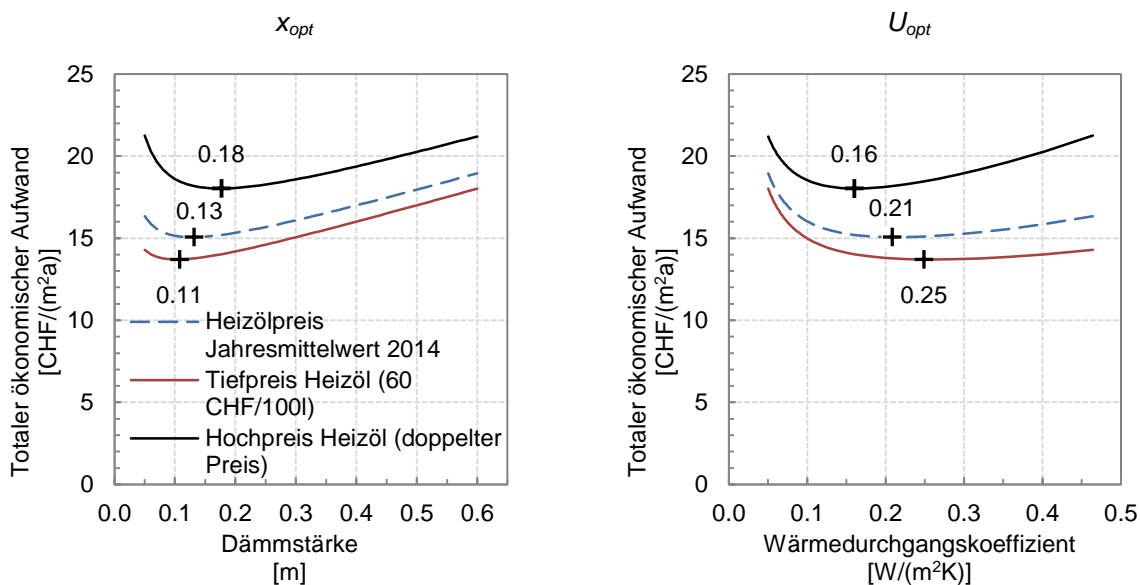


Fig. 37: Einfluss des Heizölpreises bei neuem Öl-Brennwertkessel ($\eta = 0.9$) und neuen Radiatoren, Heizölpreis Jahresmittelwert 2014 = 0.103 CHF/kWh, doppelter Ölpreis = 0.205 CHF/kWh

Die Figur 38 zeigt den Einfluss der Strompreisentwicklung auf das ökonomische Optimum bei einer Beheizung mit einer Erdsonden-Wärmepumpe. In diesem Szenario wurde von einem gleichmässig steigenden Strompreis während 20 Jahren ausgegangen. Für die Berechnung des Optimums wurde der Mittelwert des zukünftigen Strompreises verwendet.

Der Strompreis setzt sich zusammen aus dem Energiepreis, den Netzaufgaben und den Steuern. Für den Energiepreis wird eine Steigerung von 3% oder 5% pro Jahr, für die Netzkosten eine Steigerung von 2% pro Jahr angenommen. Die Steuern wurden nicht erhöht. So steigt der mittlere Strompreis bei einer 3%-Steigerung von 0.21 CHF/kWh auf 0.26 CHF/kWh bzw. auf 0.31 CHF/kWh bei einer 5%-Steigerung des Energiepreises. Das Optimum ist wenig sensitiv bezüglich des Strompreises.

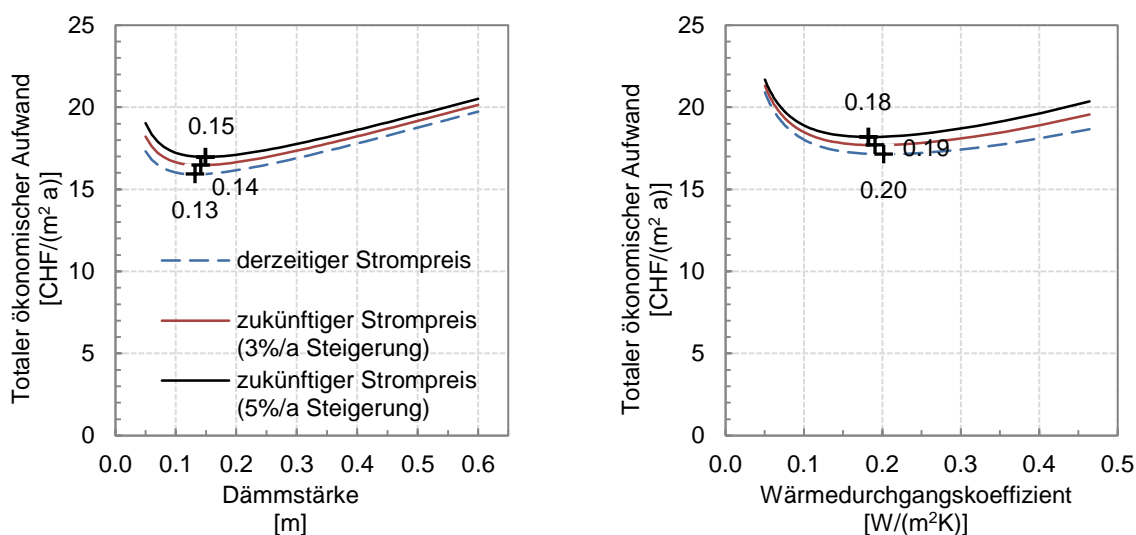


Fig. 38: Einfluss der Strompreisentwicklung (Erdsonden-Wärmepumpe (JAZ = 3.9) und Fussbodenheizung), Strompreis Durchschnittswert 0.21 CHF/kWh

Figur 39 zeigt den Einfluss des Zinssatzes auf die Lage des Optimums.

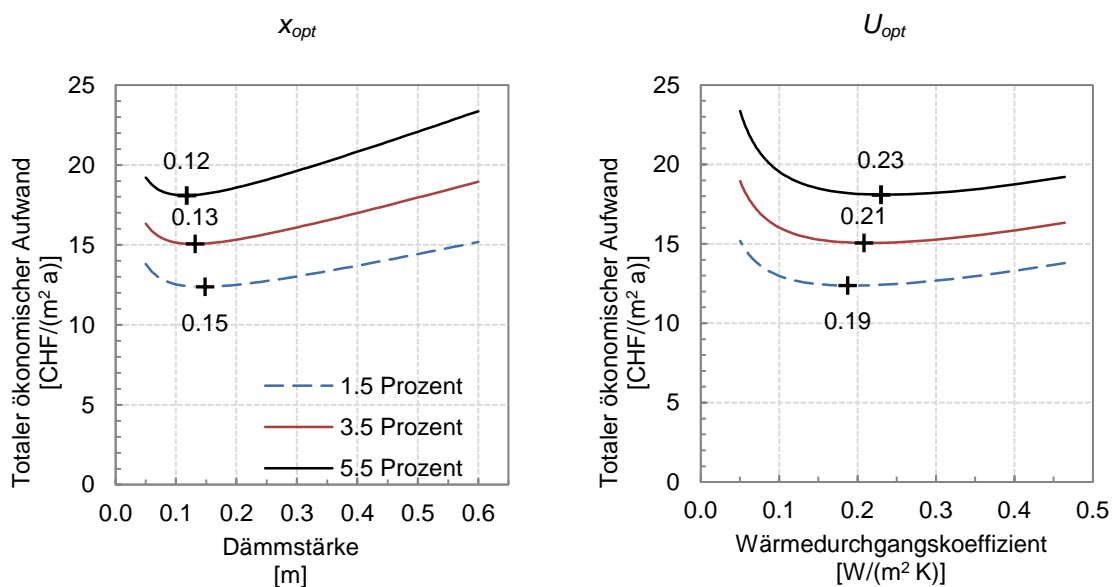


Fig. 39: Einfluss Kalkulationszinssatz bei Wohnbau mit neuem Öl-Brennwertkessel ($\eta = 0.9$) und neuen Radiatoren

4.3.2 Ökologisch-ökonomische Betrachtung mit Schwerpunkt „Treibhausgase“

Um ein besseres Verständnis der Verhältnisse erhalten zu können, wurden die Resultate des Studienteils "ökonomische Optimierung" mit den Resultaten des Teiles "ökologische Optimierung" in einer Kurve vereinigt. Dazu wird jeder Dämmstärke bzw. jedem U -Wert einer Dämmung sowohl ein Wert auf der monetären Kostenachse wie auch ein Wert bezüglich der ökologischen Kosten, gemessen in Treibhauspotenzial zugeordnet (Bemerkung: Es gilt zu beachten, dass bei Verwendung der beiden anderen Umweltindikatoren andere Kurvenverläufe entstehen würden).

Beim Zusammenführen der beiden Optimierungskurven entsteht eine schlaufenförmige Parameterkurve, wobei hier die ökologische Wertung in der x -Achse und die ökonomische Wertung in der y -Achse aufgetragen wurde. Interessant ist das qualitative Studium der Kurve (Fig. 40).

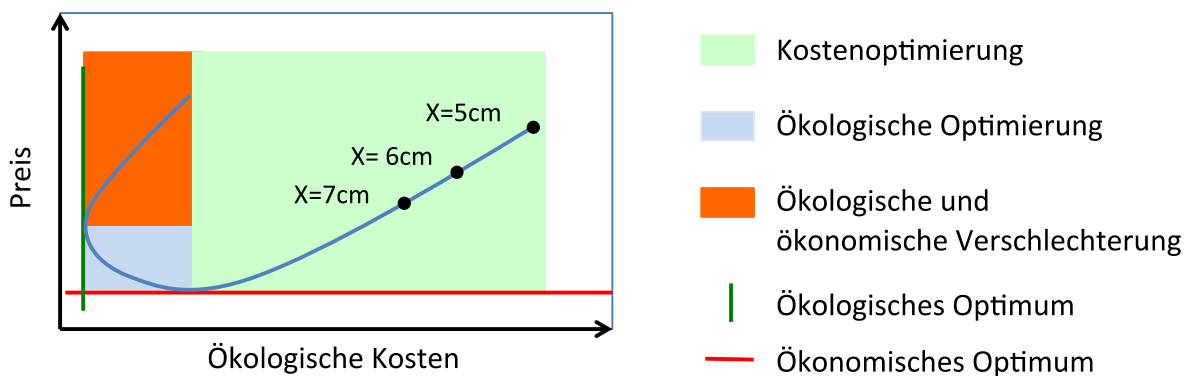


Fig. 40: Qualitative Darstellung Parameterkurve zur Beschreibung der ökologischen und ökonomischen Kosten

Die hier verwendete Parameterdarstellung beschreibt die Entwicklung der ökonomischen und ökologischen Kosten in einer Grafik (Fig. 40). Beginnend mit einer kleinen Dämmstärke wird der Parameter „Dämmstärke“ erhöht und es werden jedem Punkt ökologische sowie ökonomische Kosten zugeordnet. Die Kurve illustriert das ökonomische Optimum (rote Tangente, horizontal) und das ökologische Optimum (grüne Tangente, vertikal).

Mit wachsender Dämmstärke nehmen zuerst sowohl die ökonomischen wie auch die ökologischen Kosten ab (grün hinterlegter Bereich der Kurve). Nach dem Überschreiten des ökonomischen Optimums (Minimum) sinken die ökologischen Kosten weiter, wobei jedoch ökonomische Mehrkosten entstehen (blauer Bereich). Je steiler die Kurve wird, desto kleiner ist der ökologische Nutzen pro investiertem Franken. Nach dem Überschreiten des ökologischen Optimums (senkrechte Tangente) steigen sowohl die ökologischen, wie auch die ökonomischen Kosten an (orange hinterlegt). Fallen ökonomisches und ökologisches Optimum zusammen, erhält die Grafik die Form einer Pfeilspitze (vgl. Fig. 43).

Die in Figur 41 gezeigten Kurven beziehen sich auf das oben eingeführte Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten beim Einsatz eines Heizölkessels. Ökonomisches und ökologisches Optimum liegen in diesem Fall weit auseinander.

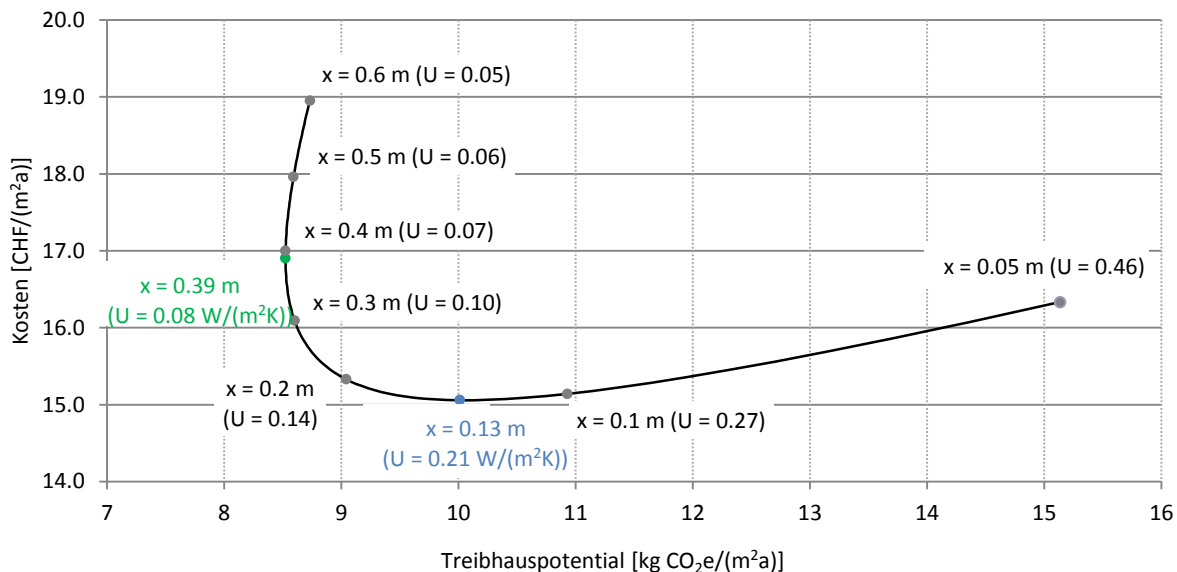


Fig. 41: Ökonomisch-ökologische Parameterkurve bei einem Heizölkessel ($\eta = 0.9$)

Die Figur 42 zeigt die Parameterkurve für eine Wärmepumpe und den europäischen Strommix und Figur 43 für eine Wärmepumpe und den schweizerischen Strommix. Ökonomisches und ökologisches Optimum liegen bei der Verwendung des CH-Verbrauchermixes nahe beieinander.

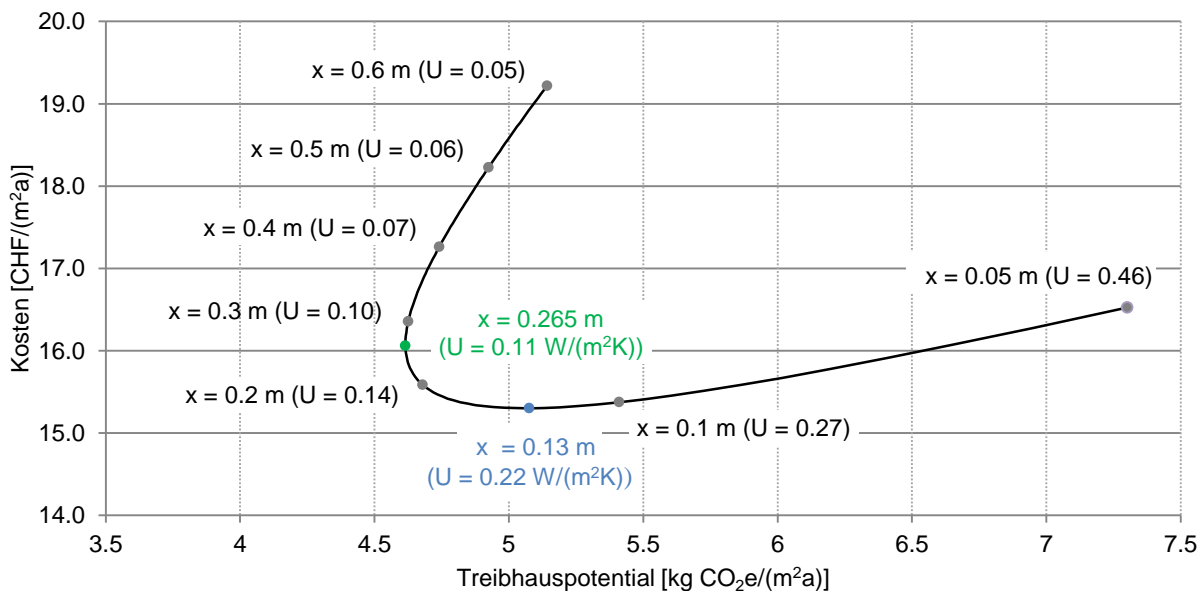


Fig. 42: Ökonomisch-ökologische Parameterkurve bei einer Wärmepumpe und dem europäischen Strommix ($JAZ = 3.9$, UCTE-Mix)

Naheliegenderweise wird ein Investor das ökonomische Optimum anstreben. Mit Blick auf mögliche Nebennutzen – wie Marketing, Vermeidung von Reputationsrisiken und Steuern sowie Komfort-Steigerung – wird er sich überlegen, die Dämmstärke auch über das ökonomische Optimum hinaus zu vergrößern. Dabei kann der Kurvenabschnitt im blauen Bereich (Fig. 40) in zwei Teile eingeteilt werden. Der erste Abschnitt (flache Kurve) kann als "easy

wins" bezeichnet werden. Im zweiten Abschnitt (steile Steigung), wenn sich die Kurve dem ökologischen Optimum nähert, ist der ökologische Gewinn nur noch sehr klein, während die Kosten steil ansteigen.

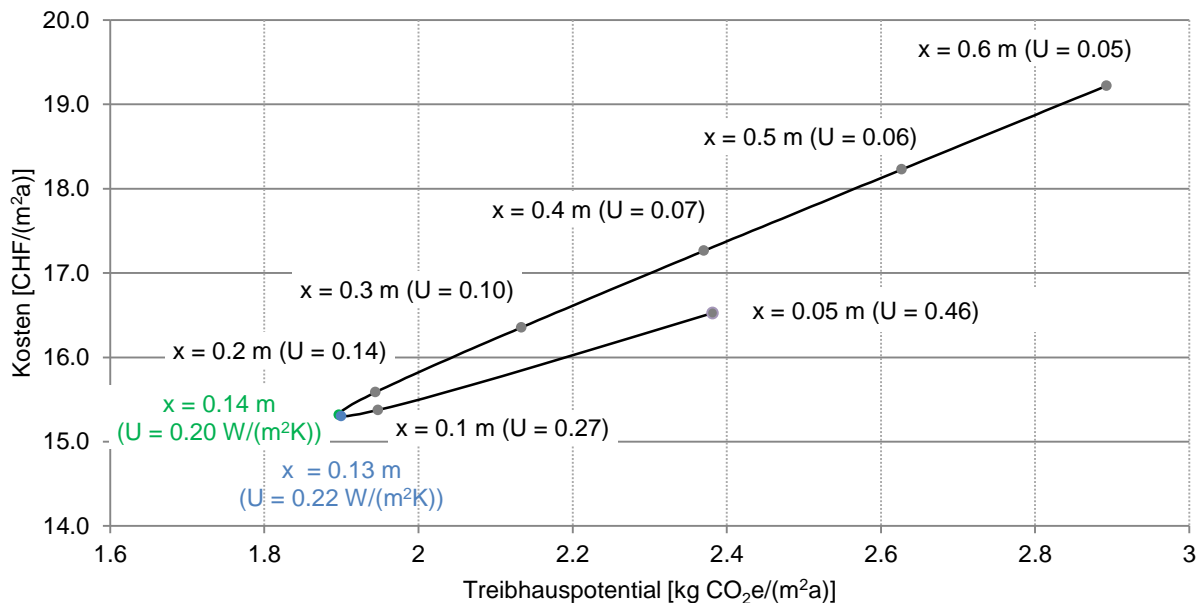


Fig. 43: Ökonomisch-ökologische Parameterkurve bei einer Wärmepumpe und dem schweizerischen Strommix (JAZ = 3.9, CH-Verbrauchermix)

Die Figur 44 zeigt die relative Veränderung von Umweltindikatoren und Kosten bei Abweichung vom Optimum und unterschiedlichen Energieträgern. Als jeweilige Bezugsgrösse zur Berechnung der relativen Veränderung wurde der Wert beim Optimum des betrachteten Indikators bzw. der Kosten angenommen.

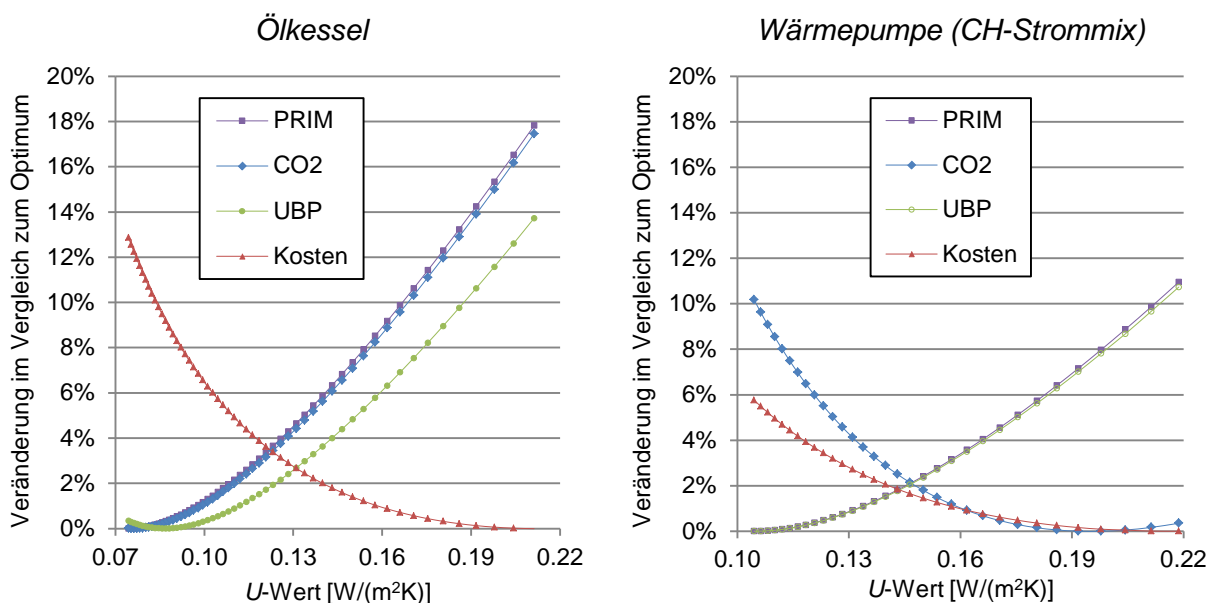


Fig. 44: Relative Veränderung von Umweltindikatoren und Kosten bei Abweichung vom Optimum und unterschiedlichen Energieträgern (Grafik rechts: Kurven für Primärenergie und UBP sind annähernd deckungsgleich)

5. Diskussion

In dieser Studie wurden die optimalen Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung ermittelt, wobei sowohl die Wärmedämmung der Gebäudehülle, die Heizungsanlage als auch der Heizwärmebedarf berücksichtigt wurde. Alle drei Komponenten ergeben relevante absolute Beiträge an den betrachteten totalen ökologischen Aufwand. Bezüglich Wärmedämmung wurde ausschliesslich der aufgrund der unterschiedlichen Dämmstärken entstehende variable ökologische Aufwand betrachtet und minimiert. D.h., sowieso vorhandene Schichten (Innen- und Aussenputz, Mauerwerk etc.) wurden nicht berücksichtigt.

Die Umweltindikatoren Primärenergie, Treibhauspotenzial und Umweltbelastungspunkte wurden als Masse zur Quantifizierung des ökologischen Aufwandes verwendet. Je nach Indikator ergeben sich – naheliegenderweise – unterschiedliche optimale Dämmstärken.

Insbesondere der Einfluss der folgenden Faktoren wurde modelliert und quantitativ aufgezeigt:

- Gebäude: Geometrie, Raumtemperatur
- Standort: Aussenklima
- Wärmedämmung der Gebäudehülle: Dämmstoff (EPS, Steinwolle, Glaswolle, Polyurethan, Zellulose) und Unterkonstruktion (Dübel, Latten, Schrauben, Platten)
- Heizungsanlage: Wärmeerzeuger (Heizkessel oder Wärmepumpe) und Wärmeverteilungssystem (Radiatoren-, Fussboden- oder Luftheizung)
- Energieträger (Heizöl, Erdgas, Holz, Umweltwärme bzw. Elektrizität) und eventuell Stromerzeugung (CH-Verbrauchermix, UCTE-Mix, Energiestrategie 2050)
- Optimierungskriterium (Primärenergie, Treibhauspotenzial, Umweltbelastungspunkte)

Die gefundenen optimalen Dämmstärken sind dabei umso grösser, je

- kälter das Aussenklima
- höher die Innenraumtemperatur
- kleiner das Gebäude (EFH oder MFH)
- „umweltfreundlicher“ die Wärmedämmung
- grösser die Lebensdauer der Wärmedämmung
- kleiner JAZ bei Wärmepumpe
- „schmutziger“ der Energieträger bzw. die Stromproduktion bei Wärmepumpe

Demzufolge kann die optimale Dämmstärke objektspezifisch relativ stark variieren.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass zahlreiche Gebäudeparameter für den Heizwärmebedarf, jedoch nicht für die optimale Dämmstärke, relevant sind. In vielen Fällen zeigt die entwickelte Methode ein erstaunlich robustes Verhalten.

Bezüglich Modellierungsdefizite und Unsicherheiten der Ergebnisse lässt sich etwa das Folgende sagen:

- Aufgrund fehlender Ökobilanzdaten wurde der tendenziell geringere Aufwand für die Heizungsanlage bei höheren Dämmstärken vernachlässigt. Dadurch wird die optimale Dämmstärke eventuell etwas unterschätzt.
- Es wurde angenommen, dass der ökologische Aufwand für die Wärmedämmung linear mit der Dämmstärke zunimmt. Im Falle einer un stetigen oder nichtlinearen Zunahme kann die optimale Dämmstärke sowohl über- als auch unterschätzt werden.
- Aufgrund der Klimaveränderung werden die Mitteltemperaturen in allen Regionen der Schweiz und in allen Jahreszeiten sehr wahrscheinlich steigen [Swi11, Chr06]. Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird in der Schweiz – je nach globaler wirtschaftlicher und demographischer Entwicklung, Klimaschutzmassnahmen etc. – eine Erwärmung um 1.2°C bis 4.8°C gegenüber den Durchschnittswerten der Periode 1980-2009 erwartet. Wärmere Winter führen tendenziell zu kleineren optimalen Dämmstärken.
- Die Unsicherheit der Ergebnisse entsteht sehr wahrscheinlich vor allem aufgrund der – leider unbekannt – Unsicherheiten bei den Ökobilanzdaten. Falls neuere oder zusätzliche Ökobilanzdaten zur Verfügung stünden, könnten bzw. müssten die Berechnungen entsprechend überarbeitet werden. Die entwickelte Methode bliebe jedoch selbstverständlich gültig.

Je nach Kombination von Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieträger bzw. Stromerzeugung bei einem typischen Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich, variieren heute die ökologisch optimalen Wärmedurchgangskoeffizienten in einer Bandbreite von etwa 0.05 W/(m²K) bis etwa 0.2 W/(m²K). Im Vergleich zu Zürich sind in Davos leicht tiefere *U*-Werte, in Lugano etwas höhere *U*-Werte optimal. Der Energieträger zeigt einen erheblichen Einfluss auf das Resultat. Die bei Altbauten immer noch weit verbreiteten Ölheizungen führen in fast allen Fällen zu optimalen *U*-Werten kleiner als 0.1 W/(m²K). Wird bei einer Sanierung der Energieträger nicht gewechselt, so steht diese ökologische Forderung im Widerspruch zu den weniger strengen Vorschriften bei Sanierungen.

Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich, Innentemperatur 21°C, EPS 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 0.28 m bzw. *U* = 0.10 W/(m²K) bestimmt. Falls eine Wärmepumpe mit *JAZ* = 2.9 eingesetzt würde, so ergäbe sich eine optimale Dämmstärke von 0.32 m bzw. *U* = 0.09 W/(m²K). Falls der Strom gemäss den Zielen der ‚Energiestrategie 2050‘ des Bundes produziert würde (Annahme: *JAZ* = 3.9), so entstünde ein Optimum von *U* = 0.18 W/(m²K). Falls dasselbe Gebäude mit Heizöl betrieben würde, so läge das Optimum bei *U* = 0.09 W/(m²K).

Aufgrund der gefundenen Resultate kann insgesamt in ganz grober Näherung gesagt werden, dass oft 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 „zuviel dämmen“ ökologisch weniger schlecht ist, als einige Zentimeter „zuwenig dämmen“. Falls der Kurvenverlauf des ökologischen Aufwandes in Abhängigkeit der Dämmstärke im Bereich des Minimums relativ flach ist, dies ist oft der Fall, so ist die genaue Dämmstärke nicht sehr kritisch.

Die Parameterstudie Neubau 'Erdsonden-Wärmepumpe' (One-factor-at-a-time) zeigt, dass die optimalen Dämmstärken beim Umweltindikator Treibhauspotenzial praktisch durchwegs kleiner sind, als bei den anderen beiden Indikatoren. Die Erklärung dafür liegt insbesondere in der schweizerischen Stromproduktion (vgl. Ökobilanzdaten). Beim CH-Verbrauchermix – im Wesentlichen Wasser- und Kernenergie – wird verhältnismässig wenig Kohlendioxid produziert. Dadurch verschiebt sich die optimale Dämmstärke bezüglich Treibhauspotenzial zu kleineren Werten. Insbesondere die Kernenergie weist jedoch bezüglich der beiden anderen Umweltindikatoren deutlich höhere Werte auf. Somit entstehen bei den Indikatoren Primärenergie und Umweltbelastungspunkte grössere optimale Dämmstärken.

Falls die verschiedenen Umweltindikatoren zu unterschiedlichen Optimapositionen 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 bereits vor dem Optimum relativ flach, so dass der ökologische Grenznutzen in diesem Bereich nur gering ist.

Ebenfalls in der Parameterstudie Neubau 'Erdsonden-Wärmepumpe' (One-factor-at-a-time) ist ersichtlich, dass, verglichen mit einer Stromproduktion gemäss CH-Verbrauchermix, mit dem „schmutzigeren“ UCTE-Mix höhere optimale Dämmstärken entstehen. Im Gegensatz dazu führt der „sauberere“ Strommix gemäss Energiestrategie 2050 zu kleineren optimalen Dämmstärken.

In der Parameterstudie Altbau 'Ölkessel' (One-factor-at-a-time) unterscheiden sich pro Fall die optimalen Dämmstärken bezüglich der drei Umweltindikatoren wesentlich weniger. Generell gilt jedoch, dass bei Heizöl als Energieträger signifikant höhere Dämmstärken ökologisch sinnvoll sind als bei einer Erdsonden-Wärmepumpe und dem CH-Verbrauchermix.

Der Vergleich der in dieser Studie gefundenen optimalen Dämmstärken bzw. Wärmedurchgangskoeffizienten mit den normativen bzw. behördlichen Vorgaben zeigt, dass am Standort Zürich der Bereich der Zielwerte der SIA-Norm 380/1 (2009) in vielen Fällen ganz grob etwa den in dieser Studie ermittelten ökologisch optimalen Dämmstärken entspricht. Aufgrund des typischerweise relativ flachen Optimums ist der genaue Wert oft nicht sehr kritisch.

In dieser Studie wurde aufgezeigt, dass die ökologisch optimalen Dämmstärken von zahlreichen Parametern abhängig sind. Die wichtigen Parameter Gebäudegeometrie, Innentemperatur und Standort werden in der aktuellen SIA-Norm 380/1 (2009) bereits berücksichtigt. Die Parameterstudien zeigen aber auch, dass insbesondere die Parameter Energieträger, Jahresarbeitszahl, Strommix und Dämmstoff ebenfalls bedeutungsvoll für die ökologisch optimalen Dämmstärken sind. Es ist deshalb grundsätzlich prüfenswert, behördliche Vorgaben an Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit weiterer Parameter zu formulieren (vgl. z.B. [Ost11] oder [Rag12]). Nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauern von Gebäudehülle und Heizungsanlage, allenfalls veränderlichem Strommix etc., ist dieser Ansatz jedoch nicht ganz unproblematisch. Heizwärmebedarfsnachweise sollten in der Praxis sehr einfach durchzuführen sein. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Excel-Tool entwickelt, welches die sehr einfache und bequeme Berechnung der ökologisch optimalen Dämmstärken in Abhängigkeit aller modellierter Parameter ermöglicht. Es scheint deshalb grundsätzlich möglich, behördliche Nachweise mit einer Methode durchzuführen, die zusätzliche ökolo-

gisch wichtige Parameter berücksichtigt. Damit könnte in vielen Fällen der ökologische Aufwand der einzelnen Gebäude weiter reduziert werden.

Die in dieser Studie berechneten ökonomisch optimalen Dämmstärken sind mehrheitlich signifikant kleiner als die entsprechenden ökologischen Optima. Für ein Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten in Zürich wurden ökonomischen Optima von $U = 0.21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einem Heizkessel und $U = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei einer Erdsonden-Wärmepumpe ($\text{JAZ} = 3.9$) gefunden. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die ökonomischen Optima wurde aufgezeigt.

Wärmedämmungen sind hocheffiziente Massnahmen zur Reduktion der Umweltbelastung infolge des Beheizens von Wohngebäuden. Einschränkend gilt jedoch, dass hohe Dämmstärken, z.B. solche, die wesentlich über die ökonomischen Optima hinausgehen, nur noch einen relativ geringen ökologischen Zusatznutzen ergeben. Die quantitative Beurteilung der Vermeidungskosten für Umweltschäden ist letztlich eine energie- bzw. umweltpolitische Fragestellung.

Eine Beurteilung, welche sowohl Ökonomie und Ökonomie umfasst, betont deshalb die Bedeutung der ersten etwa 20 cm der Dämmung ($U \approx 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Mit solchen Dämmstärken kann bereits etwa 95% des ökologischen Nutzens erreicht werden, wobei die Kosten, bezogen auf das ökonomische Optimum, nur um etwa 2% ansteigen.

Ein direkter Vergleich zwischen den Resultaten der vorliegenden Studie und denjenigen von [Jak02, Jak10 Ott11] bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Dämmungen, ist nur bedingt möglich. In den Referenzen [Jak02, Jak10 Ott11] wird jeweils die Wirtschaftlichkeit der gesamten Massnahme betrachtet, also die Differenz zwischen der Ausgangssituation und verschiedenen Varianten von Dämmungen. Die vorliegende Studie befasst sich mit der Frage, welche Dämmstärke ökonomisch optimal ist, wenn man sich entschliesst, eine Dämmmassnahme umzusetzen. Es ergibt sich insofern eine Übereinstimmung, als dass alle Studien nachweisen, dass Wärmedämmungen mit $U \approx 0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wirtschaftlich sind, falls sie an Fassaden ausgeführt werden, die so oder so saniert werden müssen.

In Anbetracht des Trends hin zu Wärmepumpen – Stichwort „Elektrifizierung des Gebäudes“ – erfahren sowohl die Art der Stromerzeugung als auch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen eine zentrale Bedeutung hinsichtlich der durch das Beheizen von Gebäuden verursachten Umweltbelastung.

Nicht zuletzt ist deshalb die Frage entscheidend, wie viel erneuerbare Energie im Winter zur Verfügung steht bzw. stehen wird. Bei der Nebausituation mit CH-Verbrauchermix fallen ökonomisches und ökologisches Optimum bezüglich Treibhausgasen bei $0.22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bzw. $0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ annähernd zusammen. Im Gegensatz dazu liegt jedoch das ökologische Optimum bezüglich Umweltbelastungspunkten – aufgrund der Bewertung der Kernenergie – bei $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Wenn es mit der Energiestrategie 2050 gelänge, den Strom aus Kernkraftwerken durch erneuerbare Energien zu ersetzen und den Mehrverbrauch durch die Beheizung mit Wärmepumpen ebenfalls erneuerbar sicherzustellen, wären geringere Dämmungen sinnvoll, als wenn erneuerbare Energie knapp wäre.

Der totale ökologische Aufwand, welcher sowohl die direkte als auch die indirekte Umweltbelastung während des Lebenszykluses beinhaltet, ist letztlich das relevante Mass, um die gesamte Umweltbelastung infolge des Beheizens von Wohngebäuden zu beurteilen. Es muss

das Ziel sein, diese Grösse – nicht nur für ein bestimmtes Gebäude sondern für den ganzen Gebäudepark – zu minimieren.

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:

- Minimierung des Einsatzes 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
- Erhöhung der heutigen Sanierungsrate von nur etwa 1%: Ungedämmte Gebäude verursachen die grössten Umweltbelastungen.
- Umweltfreundliche Stromproduktion: Falls Wärmepumpen eingesetzt werden, ist der ökologische Aufwand zum Beheizen des Gebäudes wesentlich von der Art der Stromproduktion abhängig.

Literatur

- [Bar13] Jérôme Barrau, Manel Ibañeza, Ferran Badia, Impact of the optimization criteria on the determination of the insulation thickness, *Energy and Buildings* 76 (2014) 459–469
- [BAF08] Die Methode der Umweltbelastungspunkte (UBP), Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe, Mai 2008
- [BAF09] Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006, Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen, Bundesamt für Umwelt BAFU, Öbu – Netzwerk für nachhaltiges Wirtschaften, Bern, 2009
- [Bau13] Baunetzwissen, Lebensdauer von Haustechnikkomponenten, Stand 2013-04-05, http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Altbaumodernisierung-Lebensdauer-von-Haustechnikkomponenten_2333439.html
- [Ber14] Bruno Berger, Optimierung der thermischen Gebäudehülle bezüglich der grauen Energie, Masterarbeit MAS in nachhaltigem Bauen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Chur, 2014
- [BFE12] Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2011 nach Verwendungszwecken, Oktober 2012, Bundesamt für Energie, Bern
- [BFS04] Eidgenössische Volkszählung 2000: Gebäude, Wohnungen und Wohnverhältnisse, Bundesamt für Statistik BFS, Neuenburg, 2004
- [BFS11] Bau- und Wohnungswesen 2010, Bundesamt für Statistik BFS, Neuenburg, 2011
- [Boe02] Boermans et. al, The Contribution of Mineral Wool and other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe, Report by ECOFYS, 2002
- [Boe07] Thomas Boermans, Carsten Petersdorff, U-values for better energy performance of buildings, ECOFYS GmbH, Cologne, Germany, 2007
- [Bur10] Peter Burkhalter, Chancen und Herausforderungen beim Ersatzneubau – erste rechtliche Ansätze, *Swiss Real Estate Journal*, September 2010 (No. 1)
- [Chr06] M. Christenson, H. Manz, D. Gyalistras, Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland, *Energy Conversion and Management* 47, 2006
- [Dom07] O. Altan Dombayci, The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings, *Building and Environment* 42 (2007) 3855–3859
- [Eco10] Ecoinvent Datenbank Version 2.2, ecoinvent Centre, Dübendorf, 2010
- [HEL09] HELIOS, Gebäudesimulationsprogramm, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf, 2009
- [HEV13] Hauseigentümergeverband Schweiz, Lebensdauertabelle, <http://www.hev-schweiz.ch/vermieten-verwalten/lebensdauertabelle>, Stand 2013-02-13
- [IDA09] IDA ICE, Gebäudesimulationsprogramm, EQUA Simulation Technology Group, 2009
- [Jak10] M. Jakob, Energetische Gebäudeerneuerungen, Stiftung Klimarappen, 2010
- [Jak02] M. Jakob, Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen bei Wohngebäuden, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2002

- [Kay12] Omer Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 415–425
- [Kay08] O. Kaynakli, A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness, *Renewable Energy* 33 (2008) 1164–1172
- [KBO12] KBOB/eco-bau Empfehlung 2009/1, Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand Juli 2012.
- [Kel09] Daniel Kellenberger, Hans-Joerg Althaus, Relevance of simplifications in LCA of building components, *Building and Environment* 44 (2009) 818–825
- [Leb13] Lebensdauer Bauteile und Bauteilschichten, Schweizer Baucontrolling, Stand 2013-04-05
http://www.swissbauco.com/admin/up/Lebensdauer_Bauteile_und_Bauteilschichten.pdf
- [Man10] Heinrich Manz, Bauphysik II, Skript, Hochschule Luzern, 2010
- [Min14] <http://www.minergie.ch>, Stand 2014-12-27
- [MuK08] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE), Ausgabe 2008, Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, Postfach 658, 7002 Chur
- [Nut13] Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen, Stand 2013-04-05
http://www.nachhaltigesbauen.de/no_cache/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html?cid=790&did=2390&sechash=d8fa1d26
- [Ost11] York Ostermeyer, An de Schryver, and Holger Wallbaum, Optimal insulation thicknesses according to different indicators for Germany, *Towards Life Cycle Sustainability Management, Life Cycle Management (LCM) 2011*, Berlin, Germany (available at: <http://www.lcm2011.org/papers.html>).
- [Ott11] W. Ott, CO₂ – Vermeidungskosten bei der Erneuerung von Wohnbauten, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2011
- [Oze11] Meral Ozel, Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 3854 – 3863
- [Prim08] Alex Primas, Ökologische Bewertung von Gebäudetechnikanlagen für SIA 2032, Schlussbericht 17. Oktober 2008, Rev. 4 (available at: http://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Oekologische_Bewertung_Gebaeudetechnikanlagen_Bericht.pdf)
- [Rag12] Marco Ragonesi, Optimaler Wärmeschutz, *Haustech* 25 (2012) Nr.11, S.72-73
- [Ric10] Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union, 18.6.2010
- [Sch03] Uwe Schonhardt, Armin Binz, Markus Wohler, Ralf Dott, Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP), Institut für Energie, FHBB, Muttenz, 2003
- [Sch12] Sonja Schaffner, Die optimale Dämmstärke eines Wohngebäudes bezogen auf eine Minimierung der Umweltbelastung, Masterthesis im Studiengang ‚MAS Energieingenieur Gebäude‘, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2012
- [ScE12] Schweizerische Eidgenossenschaft, Der Bundesrat, Erste Massnahmen Energiestrategie 2050, 18.4.2012

- (http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/?lang=de&dossier_id=05024 Zugriff am 2013-07-09)
- [Set10] Gianrico Settembrini, Graue Energie – ein Faktor in der Energiebilanz eines Gebäudes, Masterarbeit im MAS EN Bau, FHNW - Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, Muttenz, 2010
- [SIA180] SIA 180, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 2014
- [SIA279] SIA 279, Wärmedämmstoffe, Allgemeine Anforderungen – Nenn- und Bemessungswert des Wärmedurchlasswiderstandes und der Wärmeleitfähigkeit, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2004
- [SIA380/1] SIA 380/1, Thermische Energie im Hochbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2009
- [SIA381/2] SIA Empfehlung 381/2, Klimadaten zur Empfehlung 380/1 «Energie im Hochbau», Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 1991
- [SIA2032] SIA-Merkblatt 2032, Graue Energie von Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2010
- [SIA2040] SIA-Merkblatt 2040, SIA-Effizienzpfad Energie, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich, 2011
- [Spr95] Daniel Spreng, Graue Energie, vdf Hochschulverlag, Zürich, 1995
- [Ste08] Gregor Steinke, Hochleistungswärmedämmung – HLWD Marktübersicht und Anwendungsmöglichkeiten, Energie Apéro Luzern 08
- [Swi11] Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 2011
- [Une03] United Nations Environment Programme (UNEP) – Industry and Environment, Vol. 26, No. 2-3, 2003
- [Von12] Beat Vonlanthen, Direktor Konferenz kantonalen Energiedirektoren, Tagesschau, 22.04.2012, SRF
- [Wik15] Wikipedia, Nutzer-Investor-Dilemma (<http://de.wikipedia.org/wiki/Nutzer-Investor-Dilemma> Zugriff am 2015-01-29).
- [Woh15] Daniela Wohlgemuth, Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden, Ökologische und ökonomische Optimierung, Masterthesis im Studiengang MSE Building Technology, Hochschule Luzern – Technik&Architektur, Horw, 2015.
- [WvG13] Daniela Wohlgemuth, Dimitri von Gunten, Heizwärmebedarf von schweizerischen Wohngebäuden in Abhängigkeit der Dämmstärke, Vertiefungsarbeit 1 (MSE), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2013
- [WvG14] Daniela Wohlgemuth, Dimitri von Gunten, Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung, Vertiefungsarbeit 2 (MSE), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2014 (inkl. Korrigenda)
- [Zey11] Christian Zeyer, Die optimale Dämmstärke, 2011, unveröffentlicht
- [Zhu11] Panyu Zhua, Volker Huckemann, M. Norbert Fisch, The optimum thickness and energy saving potential of external wall insulation in different climate zones of China, Procedia Engineering 21 (2011) 608 – 616

Anhang

Anhang A: Dokumentation der Ökobilanzdaten

Die Tabellen sind wie mathematische Gleichungen zu lesen. Für die Produktion von 1 MJ Wärme ab Heizkessel Biogas braucht man entsprechend: 1.06 MJ Erdgas, in Heizkessel + 0.056 kg CO₂ biogen – 0.056 kg CO₂ fossil – 1.06 MJ Erdgas + 1.06 MJ Methan.

Wärme (Tabelle 6)

1 MJ Wärme ab Heizkessel Biogas

=1.06	MJ	Erdgas, in Heizkessel atm. LowNOx nicht-mod. <100kW	RER
+0.056	kg	Carbon dioxide, biogenic to air unspecified	-
-0.056	kg	Carbon dioxide, fossil to air unspecified	-
-1.06	MJ	Erdgas, Niederdruck, an Abnehmer	CH
+1.06	MJ	Methan, 96 Vol.-%, aus Biogas, Niederdruck, an Abnehmer	CH

Strom (Tabelle 7)

1 MJ Wasserenergie

=(1.13E+00	kWh	Strom, Wasserkraft, ab Kraftwerk	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Kernenenergie

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab Kernkraftwerk	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

PV vom Netz

=(1.13E+00	kWh	Strom, Photovoltaik, ab 3kWp, Flachdach, multi-Si	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Windenergie

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab Windkraftanlage	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Daten für die Elektrizitätsproduktion gemäss Energiestrategie 2050:

Die Modelle basieren auf den folgenden Mixen:

Study:	2020	2035	2050
Elektrizität aus Wasserenergie	0.52111277	0.61214907	0.59356678
Elektrizität aus Kernkraft CH, inkl. Netz	0.26924988	0	0
Elektrizität aus Gaskraftwerken	0.01838053	0.13446789	0.03429079
Elektrizität aus fossilen WKK (allokation Exergie)	0.0204918	0.04638787	0.04639342
Elektrizität aus PV singel-Si, ab Netz	0.00645802	0.06323548	0.14953472
Elektrizität aus Windenergie	0.00807253	0.02504376	0.05728578
Elektrizität aus Biomasse (BHKW allokation Exergie)	0.03129657	0.08157719	0.11892851
Elektrizität aus Kernkraft Europa, inkl. Netz	0.1249379	0.03713875	0

Dabei werden soweit vorhanden die oben beschriebenen Daten verwendet. Die übrigen Werte werden wie folgt berechnet:

Elektrizität aus Gaskraftwerken

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk, beste Technologie	RER
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Elektrizität aus fossilen WKK (allokation Exergie)

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab Mini-BHKW, Allokation Exergie	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Elektrizität aus Biomasse (BHKW allokation Exergie)

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab BHKW mit Zündstrahlmotor, Biogas, Allokation Exergie	CH
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Elektrizität aus Kernkraft Europa, inkl. Netz

=(1.13E+00	kWh	Strom, ab Kernkraftwerk	UCTE
+9.41E-09	km	Übertragungsnetz, Strom, Hochspannung	CH
+3.58E-08	km	Übertragungsnetz, Strom, Mittelspannung	CH
+3.54E-10	km	Übertragungsnetz, Ferntransport	UCTE
+2.94E-07	km	Verteilungsnetz, Strom, Niederspannung	CH
+4.33E-08	kg	Schwefelhexafluorid, flüssig, ab Werk	RER
+5.58E-06	kg	Dinitrogen monoxide to air unspecified	-
+5.02E-06	kg	Ozone to air unspecified	-
+4.33E-08	kg	Sulfur hexafluoride to air unspecified	-)
/3.6			

Dämmstoffe (Tabelle 8)

Steinwolle lose (Flumroc 2009)

=0.089128804	kg	Dolomit, ab Werk	RER
+0.712892984	kg	Basalt, ab Abbau	RER
+0.153661439	kg	Portlandzement, Festigkeitsklasse Z 42.5, ab Werk	CH
+0.098316783	kg	Kalkstein, gemahlen, verpackt, ab Werk	CH
+0.065544522	kg	Bauxiterz, ab Abbau	GLO
+5.634586669	MJ	Steinkohlekoks, ab Werk	RER
+1.066575566	MJ	Erdgas, Hochdruck, an Abnehmer	CH
+5.84151E-05	kg	Sauerstoff, flüssig, ab Werk	RER
+0.047106976	MJ	Diesel, in Baumaschine	GLO
+0.317668193	kWh	Strom, Mittelspannung, zertifizierter Strom, ab Netz	CH
+0.022323088	kg	Phenol, ab Werk	RER
+0.023015815	kg	Formaldehyd, ab Werk	RER
+0.001394511	kg	Harnstoff, als N, ab Regionallager	RER
+0.000724161	kg	Ammoniak, flüssig, ab Regionallager	RER
+0.0014462	kg	Ammoniumbicarbonat, ab Werk	RER
+0.002817977	kg	Schmieröl, ab Werk	RER
+0.0001604	kg	Hexamethyldisilazan, ab Werk	GLO
+0.001208314	kg	Kalk, gelöscht, verpackt, ab Werk	CH
+0.006045229	m3	Water, well, in ground to resource in water	-
+0.1088666	kg	Trinkwasser, ab Hausanschluss	CH
+0.000549405	kg	Aluminium, Produktionsmix, Knetlegierung, ab Werk	RER
+0.000549405	kg	Blech walzen, Aluminium	RER
+0.004098827	kg	Kraftpapier, ungebleicht, ab Werk	RER
+0.000417623	kg	Glaswollematte, ab Werk	CH
+0.000111014	kg	Feuerfeste Steine, Schamottesteine, verpackt, ab Werk	DE
+0.000221436	kg	Feuerfeste Steine, Schamottesteine, verpackt, ab Werk	DE
+0.000460764	kg	Feuerfeste Steine, Schamottesteine, verpackt, ab Werk	DE
+4.42872E-10	unit	Steinwollewerk	CH
+0.096153356	tkm	Transport, Fracht, Schiene	RER
+0.199670328	tkm	Transport, Lkw >28t, Flottendurchschnitt	CH
+0.070515183	tkm	Transport, Fracht, Schiene	RER
+1.70540724	MJ	Heat, waste to air low population density	-
+0.016161195	MJ	Heat, waste to air low population density	-
+1.15721E-05	kg	Particulates, > 10 um to air low population density	-
+0.000173581	kg	Particulates, < 2.5 um to air low population density	-
+7.71471E-06	kg	Particulates, > 2.5 um, and < 10um to air low population density	-

+0.000416531	kg	Ammonia to air low population density	-
+6.29732E-08	kg	Lead to air low population density	-
+1.0127E-08	kg	Cadmium to air low population density	-
+1.93263E-05	kg	Hydrogen chloride to air low population density	-
+5.05365E-09	kg	Chromium to air low population density	-
+1.06206E-07	kg	Hydrogen fluoride to air low population density	-
+3.15853E-05	kg	Formaldehyde to air low population density	-
+0.000211029	kg	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin to air low population density	-
+0.58624327	kg	Carbon dioxide, fossil to air low population density	-
+5.03391E-05	kg	Carbon monoxide, fossil to air low population density	-
+9.55456E-09	kg	Copper to air low population density	-
+9.87041E-05	kg	Phenol to air low population density	-
+0.004625275	kg	Sulfur dioxide to air low population density	-
+0.000983133	kg	Nitrogen oxides to air low population density	-
+2.70449E-08	kg	Zinc to air low population density	-
+0.001757908	kg	Entsorgung, Siedlungsabfall, 22.9% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
+1.07804E-05	kg	Entsorgung, Lösemittelmischung, 16.5% Wasser, in Sonderabfallverbrennung	CH
+2.83199E-05	kg	Entsorgung, Altöl, 10% Wasser, in Sonderabfallverbrennung	CH
+0.000931519	m3	Behandlung, Abwasser, in Abwasserreinigung, Gr.Kl. 3	CH

Zellulosefasern (eingebblasen) (isofloc 2006)

=0.909773975	kg	Altpapier, gemischt, aus Sammlung, für Verarbeitung	CH
+0.045044235	kg	Borsäure, Pulver, wasserfrei, ab Werk	RER
+0.045044235	kg	Borax, Pulver, wasserfrei, ab Werk	RER
+0.007827201	kg	Verpackungsfolie, LDPE, ab Werk	RER
+0.000670843	kg	Verpackungsfolie, LDPE, ab Werk	RER
+0.126898356	kWh	Strom, Niederspannung, ab Netz	CH
+0.008218536	kWh	Strom, Niederspannung, ab Netz	CH
+0.047505787	MJ	Erdgas, in Industrieheizung Low-NOx>100kW	RER
+0.021461603	pkm	Transport, Pkw, Benzin, Flottendurchschnitt	CH
+0.012640289	pkm	Transport, Pkw, Diesel, Flottendurchschnitt	CH
+0.001406663	tkm	Transport, Lieferwagen <3.5t	CH
+1.080728329	tkm	Transport, Frachter Übersee	OCE
+0.519196325	tkm	Transport, Lkw 20-28t, Flottendurchschnitt	CH
+0.00000001	unit	Holzpelletherstellung, Infrastruktur	RER
+0.486420811	MJ	Heat, waste to air unspecified	-
+0.001619455	kg	Entsorgung, Siedlungsabfall, 22.9% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
+0.000785029	kg	Entsorgung, Siedlungsabfall, 22.9% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
+0.007715373	kg	Entsorgung, Polyethylen, 0.4% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

VIP

1 kg VIP inkl. 30% Flächenanteil PUR

=0.063380	kg	Polyurethan, Schaum fest, ab Werk	RER
+0.936620	kg	VIP (kg)	DE

Annahme: 1 m2 besteht aus 0.7 m2 VIP und 0.3 m2 PUR. Dicke jeweils 33 mm, Dichten siehe Tabelle 9.

1 kg VIP

= 0.159490 * 1 m2 VIP(m2)

1 m2 VIP

=4.877	kg	Pyrogene Kieselsäure	DE
+0.914	kg	Siliziumkarbid, ab Werk	RER
+0.301	kg	Kraftpapier, ungebleicht, ab Werk	RER
+1.35E-03	kg	Verpackungsfolie, LDPE, ab Werk	RER
+2.42	m2	Verbundfolie	DE
+0.867	tkm	Transport, Lkw >32t, EURO5	RER
+0.4	kWh	Strom, Mittelspannung, ab Netz	DE
+11.7	MJ	Erdgas, Hochdruck, an Abnehmer	JP
+1.36E-01	kg	Entsorgung, Kunststoffe, Mischung, 15.3% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

1 kg Pyrogene Kieselsäure

=6.60E-02	kg	Wasserstoff ab Methanolyse	-
+2.79	kg	Siliziumtetrachlorid, ab Werk	DE
+3.77891886	m3	Druckluft, durchschnittliche Anlage, >30kW, 6 bar, ab Verteilnetz	RER
+0.24	kg	Natriumhydroxid, 50% in H2O, Produktionsmix, ab Werk	RER
+0.721	tkm	Transport, Fracht, Schiene	RER
+0.161	tkm	Transport, Lkw >32t, EURO5	RER
+4.15	MJ	Erdgas, Hochdruck, an Abnehmer	JP
+1.577	kWh	Strom, Mittelspannung, ab Netz	DE
+1.33E-02	kg	Entsorgung, Inertstoff, 5% Wasser, in Inertstoffdeponie	CH
+5.68	MJ	Heat, waste to air unspecified	-
+6.40E-07	kg	Hydrogen chloride to air low population density	-
+0.23	kg	Carbon dioxide, fossil to air low population density	-

1 m² Verbundfolie

=3	m2	Folie, metallisiert, 30nm Al	DE
+5.52E-02	kg	Verpackungsfolie, LDPE, ab Werk	RER
+7.50E-03	kg	Chemikalien organisch, ab Werk	GLO
+4.67E-01	tkm	Transport, Frachter Übersee	OCE
+3.31E-02	tkm	Transport, Lkw >32t, EURO5	RER
+0.00025903	kWh	Strom, Mittelspannung, ab Netz	DE
+0.017	kg	Carbon dioxide, fossil to air low population density	-
+1.70E-06	kg	Nitrogen oxides to air low population density	-

1 kg Wasserstoff ab Methanolyse

=5.3	kg	Methanol, ab Werk	GLO
+2.98	kg	Trinkwasser, ab Hausanschluss	RER
+1.367	tkm	Transport, Fracht, Schiene	RER
+7.28	kg	Carbon dioxide, fossil to air low population density	-

1 m² Folie, metallisiert, 30nm Al

=1.75E-02	kg	Polypropylen-Granulat, ab Werk	RER
+1.75E-02	kg	Extrudieren, Kunststofffolie	RER
+1.60E-04	kg	Aluminium, Produktionsmix, Knetlegierung, ab Werk	RER
+4.21E-01	tkm	Transport, Frachter Übersee	OCE
+1.48E-02	tkm	Transport, Lkw >32t, EURO5	RER
+0.00259028	kWh	Strom, Mittelspannung, ab Netz	DE
+6.72E-04	kg	Entsorgung, Kunststoffe, Mischung, 15.3% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

Infrastruktur zur Wärmebereitstellung

Luft/Wasser Wärmepumpe pro MJ Wärme:

1.11E-06	unit	Wärmepumpe, Sole-Wasser, 10kW	CH
----------	------	-------------------------------	----

Erdsonde Wärmepumpe pro MJ Wärme

6.94E-07	unit	Wärmepumpe, Sole-Wasser, 10kW	CH
2.78E-07	unit	Erdwärmesonde 150 m	CH

Anhang B: Modellierung der Befestigung der Dämmmaterialien

Die Befestigungen für Glas- und Steinwolle, EPS, PUR und Zellulosefaserdämmung wurden modelliert für eine Dämmstärke von 250 mm. Weiter wurden Datensätze erstellt, mit denen die Lebenszyklusinventare der Dämmmaterialbefestigung pro zusätzlichen mm Dämmstärke abgebildet werden. So kann die Befestigung einer Dämmung von 300 mm modelliert werden als „Befestigung für 250 mm Dämmung“ plus 50 mal „Befestigung pro zusätzlichen mm“.

Glas- und Steinwolle, EPS, PUR (Dübel)

Die Daten für die Befestigung der plattenförmigen, konventionellen Dämmstoffe basieren auf einer Umweltdeklaration der Firma Sto für deren „EJOT“ Produkte¹⁷. Die Deklaration weist in Kap. 2 die prozentualen Anteile an „Grundstoffen“ aus. Tabelle 8.1 stellt zudem die Massen der einzelnen Bestandteile des Befestigungssystems sowie des gesamten Befestigungssystems bei 3 verschiedenen Längen dar. Aus den Anteilen der Grundstoffe und der Gesamtmasse werden zuerst für die 3 gegebenen Längen die in einem Befestigungsdübel verwendeten Massen an Materialien berechnet. Aus den Massen der Teile, die bei unterschiedlichen Längen der Befestigungssysteme unterschiedlich sind (Dübelhülse, Nagel aus Kunststoff und Stahl Schraube) und den Längen der Systeme werden Massen pro mm zusätzlicher Systemlänge berechnet. Da die 3 Systeme mit unterschiedlichen Längen, die in der EPD ausgewiesen sind, in dieser Berechnung jeweils zu denselben Werten pro mm führen, darf davon ausgegangen werden, dass diese Art der Berechnung zulässig ist. Mit diesen Werten pro mm und den (für alle Längen konstanten) Werten pro System werden nun noch Werte für ein Befestigungssystem von 250 mm berechnet. Dazu mussten Annahmen getroffen werden zu den Materialien der einzelnen Bestandteile des Befestigungssystems (siehe Tabelle).

Bestandteil	Masse [kg/250 mm]	Bilanzierte Masse [kg / 250 mm]	Material (Annahme)
Dübelhülse	0.01343083	0.01343083	PE
Rondelle	0.002478	0.002478	PA
Stopfen	3.45E-07	0	-
Umspritzung	0.000002	0	-
Nagel aus Kunststoff	0.0029334	0.0029334	PE
Stahl Schraube	0.02662757	0.02662757	Stahl
Ausgleichsstück	0.000463	0.000463	PP

Mit der zusätzlichen Information aus der EPD, dass pro m² 6-8 Dübel benötigt werden, resultieren die folgenden Lebenszyklusinventardaten (Annahme 7 Dübel):

Befestigungsdübel für 250 mm Dämmstoffplatten (pro m²)

0.186392986	kg	Armierungsstahl, ab Werk	RER
0.186392986	kg	Profil walzen, Stahl	RER
0.017346	kg	Nylon 6, ab Werk	RER
0.114549653	kg	Polyethylen-Granulat, HDPE, ab Werk	RER
0.003241	kg	Polypropylen-Granulat, ab Werk	RER
0.135136653	kg	Extrudieren, Kunststoffrohre	RER
0.155812561	kg	Entsorgung, Kunststoffe, Mischung, 15.3% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
0.186392986	kg	Entsorgung, Stahl, 0% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

¹⁷ Verankerungs- und Befestigungsprodukte für Wärmedämm-Verbundsysteme. Institut Bauen und Umwelt e.V. EPD-EJOT-2011112-D, 2011

Zusatz Befestigungsdübel pro mm zusätzlicher Dämmstoffplattendicke (pro m²)

0.000745572	kg	Armierungsstahl, ab Werk	RER
0.000745572	kg	Profil walzen, Stahl	RER
0.000458199	kg	Polyethylen-Granulat, HDPE, ab Werk	RER
0.000458199	kg	Extrudieren, Kunststoffrohre	RER
0.000528303	kg	Entsorgung, Kunststoffe, Mischung, 15.3% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
0.000745572	kg	Entsorgung, Stahl, 0% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

Zellulosefaserdämmung (Unterkonstruktion und Abschlussplatte)

Als Basis für die Bilanzierung dieses Befestigungssystems wurde das „UPSI F System“¹⁸ verwendet. Bei einem Elementabstand von 62.5 cm, einer Elementbreite von 5,9 cm und einer Elementlänge von 2.94 m berechnet sich ein Bedarf von 0.497 Elementen pro m² Fassadendämmung. Aus den Dimensionen der Elemente und deren Bestandteile lässt sich berechnen, dass bei einer Dämmstärke von 250 mm pro Element für die Träger (hinten und vorne) 0.00917 m³ sowie für die Stege 0.002945 m³ Holz benötigt werden. Daraus ergibt sich ein Holzbedarf von 0,006026 m³ pro m² gedämmte Fassadenfläche. Weiter werden pro m² 12 Schrauben von 8 cm Länge und einem Durchmesser von 6 mm benötigt, deren Masse über das Volumen und die Dichte von Stahl abgeschätzt wird zu 0.2076 kg pro m². Als Abschluss nach vorne wird eine 6 cm dicke Weichfaserplatte (180 kg/m³) eingesetzt, was zu einem Bedarf von 0.06 m³/m² führt. Der darauf angebrachte Verputz wird, analog zu den anderen Dämmsystemen, nicht bilanziert. Zusätzliche Dämmstärke führt in diesem System zu längeren Stegen. Entsprechend wird pro zusätzlicher mm Dämmstärke ein Holzbedarf von einem 250stel des Stegvolumens (0.00001178 m³) bilanziert. Daraus ergeben sich die folgenden Lebenszyklusinventare:

UK und Abschlussplatte für 250 mm Zellulosefaserdämmung (pro m²)

0.207646708	kg	Armierungsstahl, ab Werk	RER
0.207646708	kg	Profil walzen, Stahl	RER
0.006025878	m ³	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20%, ab Werk	RER
0.06	m ³	Faserplatte weich, ab Werk (u=7%)	CH
0.207646708	kg	Entsorgung, Stahl, 0% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
3.904769066	kg	Entsorgung, Holz unbehandelt, 20% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH
21.6	kg	Entsorgung, Gebäude, Spanplatte, in Beseitigung	CH

Zusatz UK pro mm zusätzlicher Zellulosefaserdämmung (pro m²)

0.00001178	m ³	Schnittholz, Nadelholz, sägerau, luftgetrocknet, u=20%, ab Werk	RER
0.00763344	kg	Entsorgung, Holz unbehandelt, 20% Wasser, in Kehrlichtverbrennung	CH

VIP (eingepackt in XPS mit Fermacell Abdeckplatte; Stösse aus PUR)

Als Basis für die Bilanzierung dieses Befestigungssystems wurde angenommen, dass VIP Paneele zum Einsatz als verputztes Dämmsystem wie folgt aufgebaut sind:

¹⁸ http://www.lignotrend.de/uploads/tx_userprodukte/2013-05-13_TD%20Upsi_2013-II_D_k.pdf Zugriff: 02.12.2013

- 15 mm Fermacell Powerpanel
- 5 mm XPS
- VIP (variable Dicke)
- 15 mm XPS

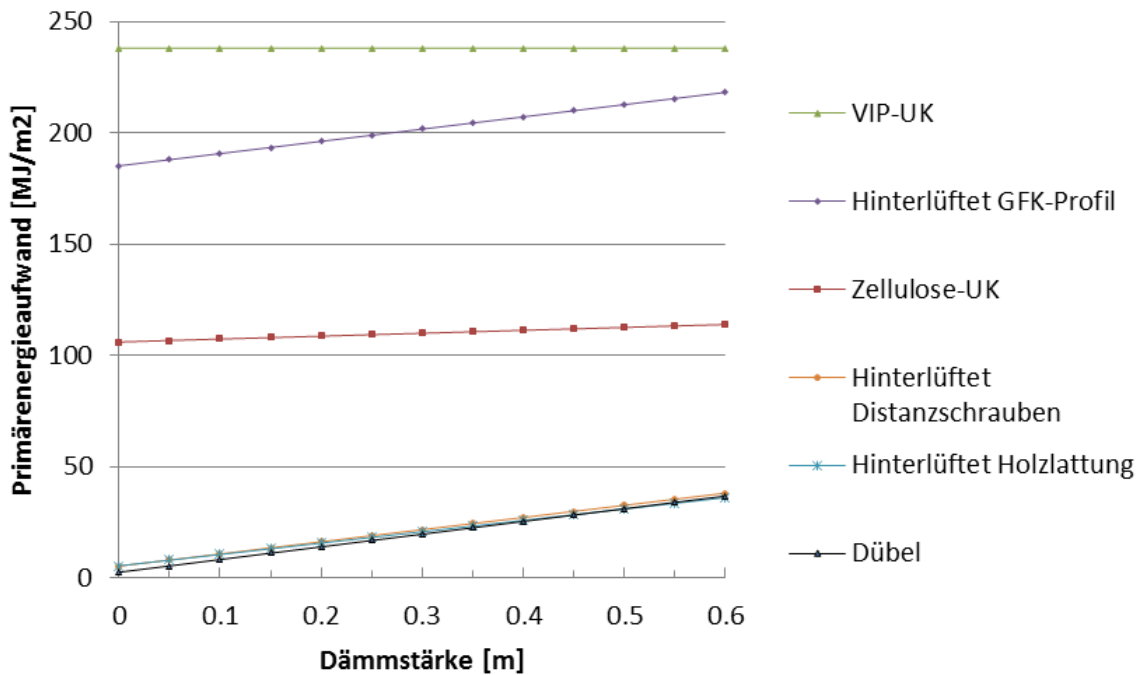
Da VIP Paneele nur in Standardgrößen gehandelt werden und weil für die Montage ein Bereich benötigt wird, durch den das System befestigt werden kann, wird davon ausgegangen, dass 30% der Fläche nicht von VIP Paneelen bzw. der XPS Schichten sondern von PUR-Streifen gedeckt wird. Das bedeutet, dass pro m² montiertes Paneel 0.7 m² XPS und 0.3 m² PUR sowie 1 m² Fermacell (Faserzementplatte) benötigt werden. Die Konstruktion wird mit 12 Schrauben pro m² befestigt. Die Schrauben - 4 mm im Durchmesser und 40 mm lang – wiegen 0.0461 kg/m². Daraus ergeben sich die folgenden Lebenszyklusinventare:

Montage VIP (pro m2)

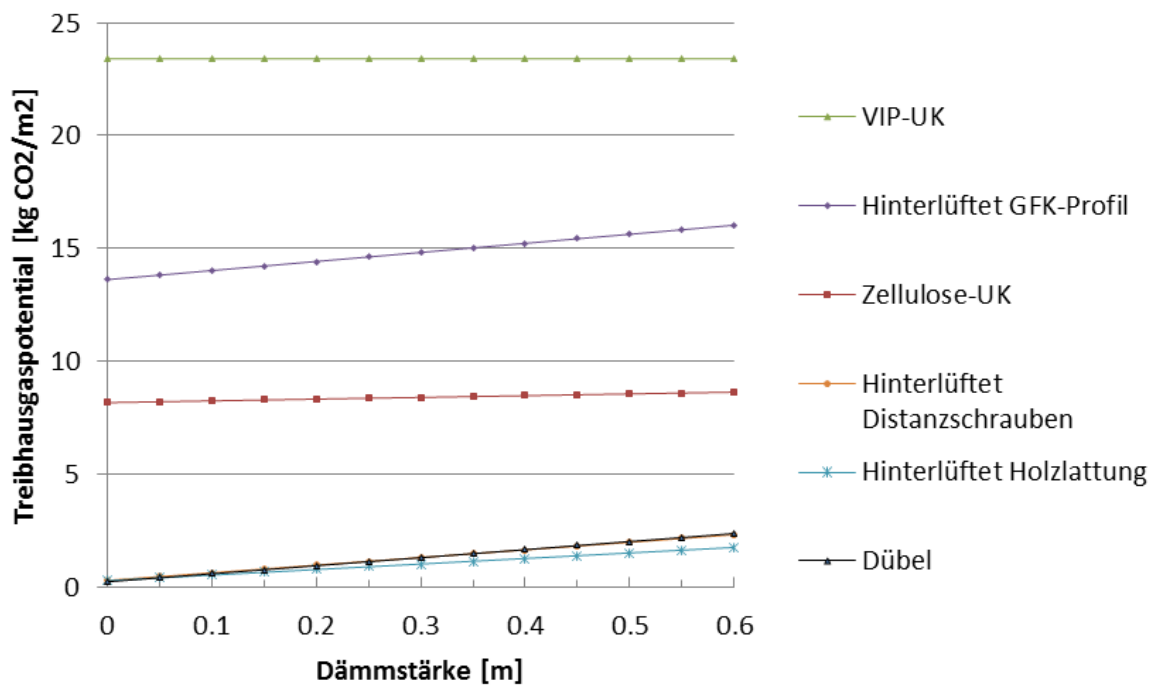
0.392	kg	Polystyrol, extrudiert (XPS), ab Werk	RER
0.046143713	kg	Armierungsstahl, ab Werk	RER
0.046143713	kg	Profil walzen, Stahl	RER
15	kg	Faserzementfassadenplatte, ab Werk	CH
0.18	kg	Polyurethan, Schaum fest, ab Werk	RER
0.18	kg	Entsorgung, Gebäude, PUR-Schaum, in Beseitigung	CH
15	kg	Entsorgung, Inertstoff, 5% Wasser, in Inertstoffdeponie	CH
0.046143713	kg	Entsorgung, Stahl, 0% Wasser, in Kehrichtverbrennung	CH
0.392	kg	Entsorgung, Gebäude, EPS-Isolation flammgeschützt, in Beseitigung	CH

Anhang C: Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden im Vergleich

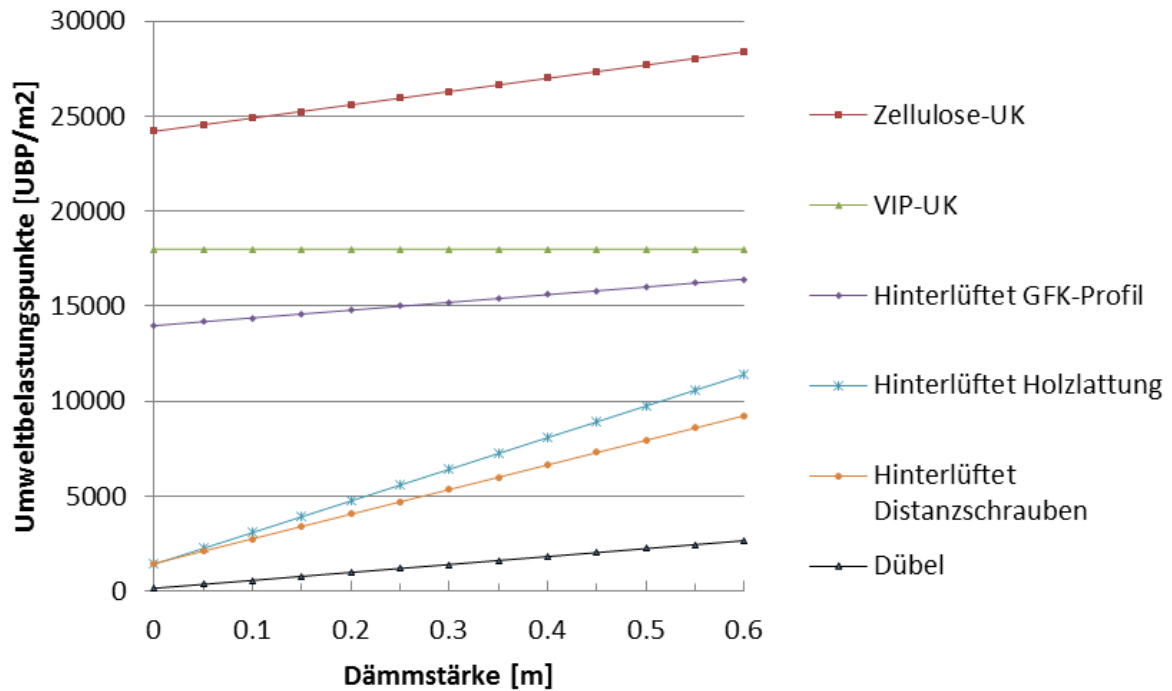
Die Ökobilanzierung von hinterlüfteten Fassaden ist in Referenz [Woh15] dokumentiert.



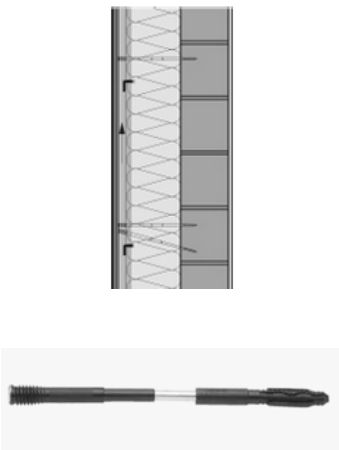
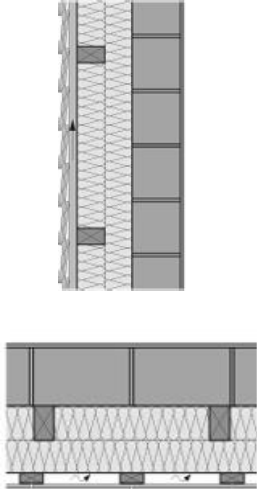
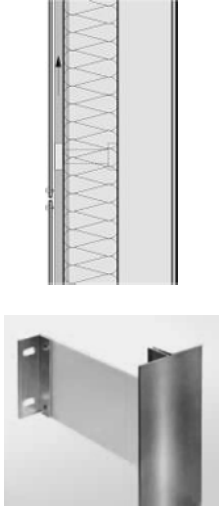
Ökologischer Aufwand (Primärenergie) von drei Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden im Vergleich mit Unterkonstruktionen gemäss Kap. 2.6.1



Ökologischer Aufwand (Treibhauspotenzial) von drei Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden im Vergleich mit Unterkonstruktionen gemäss Kap. 2.6.1



Ökologischer Aufwand (Umweltbelastungspunkte) von drei Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden im Vergleich mit Unterkonstruktionen gemäss Kap. 2.6.1

Distanzschrauben (Dämmstoffe: Glaswolle, Steinwolle, EPS)	Holzlattung, zweilagig (Dämmstoffe: Glaswolle, Steinwolle)	Konsolen mit GFK-Profilen (Dämmstoffe: Glaswolle, Steinwolle)
		

Drei Unterkonstruktion von hinterlüfteten Fassaden: Distanzschrauben, Holzlattung sowie Konsolen mit GFK-Profilen

Komponente	Koeffizient, welcher den dämmstärkenunabhängigen ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt (bezogen auf einen m^2 Fassadenfläche)		
	δ		
	Primärenergie, nicht erneuerbar MJ/m^2	Treibhauspotenzial $kg\ CO_2e/m^2$	Umweltbelastungspunkte UBP/m^2
Hinterlüftete Konstruktion mit Konsolen und GFK-Profilen	1.85E+02	1.36E+01	1.40E+04
Hinterlüftete Konstruktion Holzlattung, zweilagig	5.39E+00	2.84E-01	1.42E+03
Hinterlüftete Konstruktion mit Distanzschrauben (Stahl verzinkt)	5.27E+00	2.96E-01	1.46E+03

Konstanter ökologischer Aufwand für die Produktion und Entsorgung der Unterkonstruktion bei hinterlüfteten Fassaden (Bemerkung: Ohne Fassadenverkleidung bilanziert, analog Bilanzierung bei Wärmedämmverbundsystemen (ohne Deckputz)).

Komponente	Koeffizient, welcher den dämmstärkenabhängigen ökologischen Aufwand für Herstellung und Entsorgung der Unterkonstruktion beschreibt (bezogen auf einen m^2 Fassadenfläche)		
	ε		
	Primärenergie, nicht erneuerbar $MJ/(m^2 \cdot m)$	Treibhauspotenzial $kg\ CO_2e/(m^2 \cdot m)$	Umweltbelastungspunkte $UBP/(m^2 \cdot m)$
Hinterlüftete Konstruktion mit GFK-Profil	5.51E+01	4.02E+00	4.08E+03
Hinterlüftete Konstruktion Holzlattung, zweilagig	5.11E+01	2.45E+00	1.67E+04
Hinterlüftete Konstruktion mit Distanzschrauben (Stahl verzinkt)	5.47E+01	3.37E+00	1.30E+04

Variabler ökologischer Aufwand für die Produktion und Entsorgung der Unterkonstruktion bei hinterlüfteten Fassaden

<i>Dämmstoff für Wärme- dämmverbundsystem</i>	<i>Dichte kg/m³</i>	<i>Wärmeleit- fähigkeit W/(m·K)</i>	<i>Dämmstoff für hinter- lüftete Fassaden</i>	<i>Dichte kg/m³</i>	<i>Wärmeleit- fähigkeit W/(m·K)</i>
Glaswolle (ISOVER ISOCOMPACT 035)	80	0.035	Glaswolle (ISOVER PB F 032)	38	0.032
Steinwolle (H165 Flumroc-Dämmplatte COMPACT)	90	0.035	Steinwolle (Flumroc H125)	60	0.033
Polystyrol expandiert, EPS (Swisspor Lambda White 031)	16	0.031	Polystyrol expandiert, EPS (Swisspor Lambda Vento)	15	0.031

*Dichte und Wärmeleitfähigkeiten von Dämmstoffen für die Anwendung in Wärme-
dämmverbundsystemen bzw. hinterlüfteten Fassaden gemäss Herstellerangaben*

Anhang D: Koeffizienten A und B zur Charakterisierung des Heizwärmebedarfs

Gebäude	Temperatur °C	Fenster-anschlag	Zürich	Davos	Lugano	Bern	Basel	Zermatt	Genf
EFH	20°C	aussen	50.5	47.3	3.3	40.1	35.9	54.8	29.9
		innen	62.9	80.0	13.0	54.0	47.9	82.6	41.8
	21°C	aussen	64.3	64.1	10.4	51.4	48.0	70.5	41.1
		innen	78.1	99.5	22.7	66.7	61.7	101.4	54.1
	23°C	aussen	92.5	95.0	27.5	74.5	73.8	100.3	61.1
		innen	111.3	137.0	46.0	96.6	92.3	136.4	77.3
MFH 6	20°C	aussen	45.0	38.7	2.9	36.1	31.9	42.7	26.3
		innen	51.6	59.7	7.5	43.1	38.2	60.7	31.8
	21°C	aussen	54.8	50.0	6.9	43.5	40.4	52.7	34.2
		innen	63.3	74.0	13.8	53.0	48.7	74.5	41.7
	23°C	aussen	79.3	77.1	20.3	63.3	63.1	77.9	51.9
		innen	90.1	105.1	30.5	75.6	73.7	103.6	61.4
MFH 12	20°C	aussen	50.6	53.5	9.5	42.6	36.7	54.6	33.0
		innen	55.5	71.1	13.7	48.3	41.9	69.4	37.4
	21°C	aussen	60.8	65.7	15.0	51.1	46.1	65.7	41.7
		innen	66.7	85.2	20.4	58.0	52.6	82.8	47.0
	23°C	aussen	85.1	93.2	29.8	71.1	69.1	90.8	59.2
		innen	92.1	114.0	37.1	79.8	76.7	109.8	65.6

Koeffizienten A in MJ/(m²·a)

Gebäude	Temperatur °C	Fenster-anschlag	Zürich	Davos	Lugano	Bern	Basel	Zermatt	Genf
EFH	20°C	aussen	8.23	12.00	4.88	7.52	7.11	11.42	6.22
		innen	7.27	9.72	4.18	6.50	6.20	9.49	5.37
	21°C	aussen	9.01	12.95	5.71	8.40	7.90	12.35	6.81
		innen	7.98	10.53	4.87	7.30	6.89	10.26	5.89
	23°C	aussen	10.73	15.42	7.46	10.47	9.59	14.74	8.55
		innen	9.36	12.52	6.22	8.90	8.25	12.25	7.39
MFH 6	20°C	aussen	5.68	8.27	3.05	5.06	4.88	7.75	4.26
		innen	4.78	6.14	2.46	4.15	4.02	5.96	3.58
	21°C	aussen	6.39	9.15	3.75	5.82	5.60	8.61	4.73
		innen	5.33	6.75	2.94	4.69	4.57	6.52	3.89
	23°C	aussen	7.72	11.03	5.14	7.40	6.89	10.38	5.93
		innen	6.42	8.18	4.03	5.95	5.65	7.86	4.82
MFH 12	20°C	aussen	4.60	6.82	2.56	4.13	3.99	6.36	3.47
		innen	3.78	4.85	1.97	3.30	3.20	4.75	2.85
	21°C	aussen	5.16	7.49	3.10	4.71	4.56	7.02	3.81
		innen	4.24	5.34	2.36	3.72	3.62	5.19	3.09
	23°C	aussen	6.25	8.98	4.24	6.00	5.61	8.46	4.78
		innen	5.15	6.49	3.25	4.71	4.50	6.29	3.82

Koeffizienten B in MJ/(m·a)