

Ökologisch optimale Dämmstärke hinterlüfteter Fassaden



Verfasser: Dr. Hans-Jörg Althaus, Lifecycle Consulting Althaus
Auftraggeber: Martin Bohnenblust / Daniel Schild, St. Gobain-Isover SA
Datum: 03.03.2016
Version: Final

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Zusammenfassung.....	3
1 Executive Summary	5
2 Glossar und Definitionen.....	6
3 Ausgangslage und Auftrag	8
4 Untersuchtes Gebäude und Varianten.....	9
5 Ökobilanzdaten.....	11
5.1 Wärmebereitstellung.....	11
5.2 Dämmstoffe.....	12
5.3 GFK- Unterkonstruktion:	12
5.4 Holz-Unterkonstruktion.....	13
6 Ergebnisse und Diskussion.....	15
6.1 Optimale Dämmstärken	15
6.1.1 Standort	16
6.1.2 Heizsystem	18
6.1.3 Strombereitstellung.....	20
6.1.4 Unterkonstruktion	22
6.1.5 Dämmprodukt.....	24
6.1.6 Innentemperatur	26
6.2 Ökobilanzergebnisse Unterkonstruktionen	28
7 Schlussfolgerung und Empfehlung	29
8 Literaturverzeichnis	30
9 Anhang.....	31
9.1 Berechnung der Ökobilanzdaten der Strombereitstellung in den Szenarien „Energiesstrategie 2020“ und „Energiesstrategie 2050“	31
9.2 Berechnung der Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung der Wärmepumpensysteme sowie für den Kühlmittelbedarf und -verlust im Betrieb	31

1 Zusammenfassung

Diese Studie untersucht, wie dick die Dämmung mit Isover Glaswollprodukten in einer hinterlüfteten Fassade sein soll, damit die ökologischen Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes minimal sind. Die Methode und die Gebäudekennwerte wurden aus einer Studie, die im Auftrag des BFE erstellt wurde (Wohlgemuth et al. 2015), übernommen. Betrachtet wird ein 6-Familienhaus an den Standorten Zürich, Davos und Lugano, dessen Fassade mit Isover PB F 030 oder mit Isover PB F EXTRA 032 gedämmt ist. Für die Unterkonstruktion der vorgehängten Fassade wird neben einer thermisch getrennten GFK Konstruktion auch eine Holzlattung betrachtet. Für die Beheizung des Gebäudes werden unterschiedliche Heizsysteme (Wärmepumpen und Kessel) mit jeweils unterschiedlichen Energieträgern (verschiedene Strommixe bzw. Gas und Heizöl) untersucht. Der Nutzereinfluss wird durch unterschiedliche Innentemperaturvarianten ebenfalls untersucht.

Die absolute Höhe des ökologischen Aufwands hängt vor allem vom Standort, vom Heizsystem und dem Energieträger ab. Wichtig dafür ist auch die Innenraumtemperatur. Die Wahl der Unterkonstruktion hat einen geringeren, und die Wahl des spezifischen Dämmproduktes praktisch keinen Einfluss. Die tiefsten Werte werden mit Erdsonden-Wärmepumpen erreicht, die mit Strom aus Wasserkraft betrieben werden. Natürlich führen auch eine reduzierte Innenraumtemperatur oder ein Standort mit mildem Winter zu tieferen absoluten Umweltbelastungen.

Die Resultate zeigen weiter, dass die ökologisch optimale Dämmstärke deutlich von den Faktoren Standort, Heizsystem und Energieträger abhängt. Die Wahl der Raumtemperatur und des spezifischen Dämmprodukts sind weniger entscheidend und die Wahl der Unterkonstruktion verschiebt das Optimum praktisch nicht. Die Optima liegen je nach Variante und Umweltindikator zwischen etwa 10 cm (Zürich, Erdsonden-Wärmepumpe, Wasserkraft, kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar) und fast 70 cm (Zürich, Ölheizung, Treibhauspotenzial). Trotzdem kann man verallgemeinernd sagen, dass bei einer Wahl der Dämmstärke zwischen 25 und 30 cm in allen betrachteten Varianten der ökologische Aufwand sehr nahe beim jeweiligen Optimum liegt. Das kommt daher, dass, wie Abbildung 1 beispielhaft zeigt, die Optima in annähernd horizontalen Bereichen der Kurven liegen, die den ökologischen Aufwand gegen die Dämmstärke darstellen. In den meisten Fällen führen Dämmstärken unter 25 cm zu einem deutlichen Anstieg der Umweltbelastung. Nur wenn der Heizwärmebedarf klimatisch bedingt tief ist (z.B. in Lugano) und / oder mit einer Erdsonden-Wärmepumpe bereitgestellt wird, die mit nachhaltig erzeugtem Strom betrieben wird, steigt die Umweltbelastung erst bei tieferen Dämmstärken steiler an. Dämmstärken über dem optimalen Wert führen hingegen zu annähernd den gleichen Umweltauswirkungen, die auch beim Optimum verursacht werden. Mit anderen Worten: aus ökologischer Sicht kann man mit Isover-PB F 030 und PB F EXTRA 032 praktisch nicht zu viel dämmen, wohl aber zu wenig.

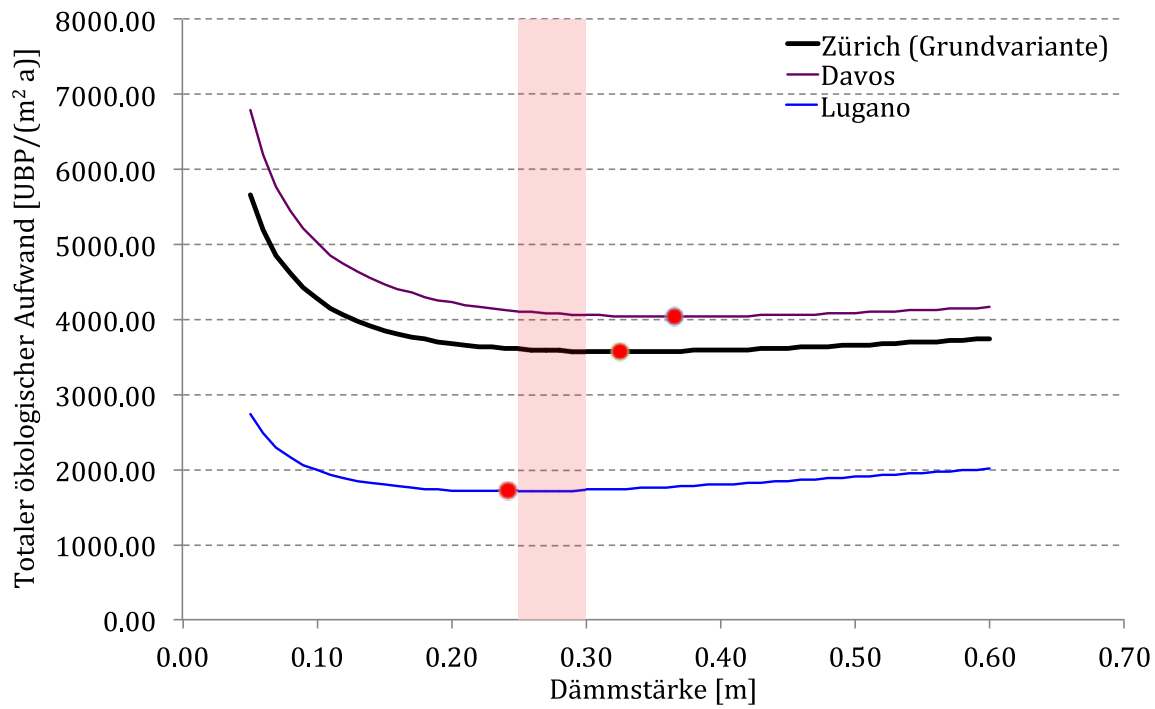


Abbildung 1: Ökologischer Aufwand (gemessen in Umweltbelastungspunkten) in Abhängigkeit der Dämmstärke an verschiedenen Standorten. Die roten Punkte markieren die jeweiligen Optima.

1 Executive Summary

The aim of this study is to determine how thick the insulation layer in a ventilated façade using Isover glass wool products should be in order to achieve the lowest possible environmental impact from the entire life cycle of the building. The methodology and the characteristics of the building including all relevant parameters are taken from a recently published study that looked at the optimal insulation layer thickness in compact façades (Wohlgemuth et al. 2015). The study looks at a 6-family building located in Zurich, Davos or Lugano, with ventilated façades using Isover PB F 030 or Isover PB F EXTRA 032 glass wool. The substructure of the façade was either a thermally separated aluminium / glass fibre construction or wooden battens. The building is heated either by a heat pump system (geothermal probe and air/water) using various electricity sources (Swiss consumption mix, European production mix, hydro power and two future sustainable energy production scenarios) or by an oil or gas boiler. The user's influence is looked at by changing the room temperature to lower (20 °C) or higher (23 °C) values. The absolute values of the environmental impacts are mainly determined by the location of the building and by the heating system and energy source. Also the room temperature has a relevant impact. The choice of the substructure has little influence and the insulation product has no influence at all. The lowest values are achieved in locations with warm winters and with buildings equipped with geothermal probe heat pumps run with hydropower.

The optimal insulation layer thickness depends mainly on the location, the heating system and the energy source for heating. The choices of the room temperature and of the specific insulation product used are less relevant and the substructure has no relevant influence on this optimum. Optimal layer thickness also varies with the environmental indicator and lies between 10 cm (Zurich, geothermal probe heat pump, hydro power, cumulative energy demand non-renewable) and almost 70 cm (Zurich, oil boiler, global warming potential).

Despite this wide range, results show that with insulation layer thicknesses between 25 cm and 30 cm, environmental impacts are pretty close to the optimal values in all scenarios and with all environmental indicators. This is the case since the "environmental impact" versus "insulation layer thickness" curves are almost horizontal around the optimal insulation thickness. Figure 1 (Abbildung 1 in the German summary) shows how these curves typically look like using the example of ecological scarcity points (UBP) versus insulation layer thickness for the different locations. For most scenarios, the environmental impact starts to rise considerably at insulation layer thicknesses below 25 cm and the rate of the rise increases with decreasing thickness. Only in scenarios with warm winters (Lugano) and / or with the most environmental friendly heating system (geothermal probe heat pump with hydro power), the impacts rise only at lower thicknesses. On the other hand, insulation thicknesses well above the optimal value lead to almost the same environmental impacts, as the optimal thickness would do. In other words: from an environmental point of view it is almost impossible to use too much Isover PB F 030 or Isover PB F EXTRA 032 glass wool in a ventilated façade. However, it is very well possible to use too little.

2 Glossar und Definitionen

In diesem Bericht werden einige Begriffe und Konzepte verwendet, die einer kurzen Erklärung bedürfen. Diese werden hier gegeben.

Ökobilanz (=Lebenszyklusanalyse = Life Cycle Assessment, LCA): Eine systematische Analyse der direkten und indirekten Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen. Gemäss der ISO-Norm 14'040 / 44 erfolgt die Bilanzierung in 4 Schritten: Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. In der Zieldefinition wird festgelegt, welche Produkte bzw. Dienstleistungen betrachtet werden sollen und was alles berücksichtigt werden muss (Systemabgrenzung). In der Sachbilanz werden die physikalischen Stoff- und Energieflüsse zusammengestellt, die in dem zuvor definierten System vorkommen. Diese Flüsse werden so lange aufgelöst, bis nur noch die Entnahme natürlicher Ressourcen und die Emissionen in die natürliche Umwelt vorkommen. In der Wirkungsabschätzung werden diese Flüsse von der und zur natürlichen Umwelt bewertet. Die Bewertung erfolgt aufgrund der potenziellen Umweltauswirkungen, die im ersten Schritt definiert wurden. Typischerweise werden Beiträge zum Treibhauspotenzial, zur Versauerung oder Überdüngung von Böden und Gewässern, zur Reduktion der Biodiversität oder auch zur Schädigung der menschlichen Gesundheit berechnet. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse analysiert und diskutiert.

Umweltindikator: Ein Kennwert, der eine Aussage über potenzielle Umweltschäden macht. Umweltindikatoren sind das Ergebnis der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz. In diesem Bericht werden die nachstehenden 3 Umweltindikatoren verwendet.

Ökologische Knappheit: Diese vom BAFU entwickelte Methode bewertet sämtliche Schadstoffemissionen und Ressourcenverbräuche, für die sich aus der Schweizer Gesetzgebung Grenzwerte ableiten lassen. Je grösser die Distanz zwischen den effektiven jährlichen Emissionen in der Schweiz und den Emissionen, die gerade noch nicht zu einer Überschreitung des Grenzwertes führen würden, desto mehr Umweltbelastungspunkte (UBP) werden für die Emission des entsprechenden Schadstoffes verbucht. Von dieser Methode gibt es regelmässige Aktualisierungen, die jeweils mit der Jahreszahl gekennzeichnet werden.

Treibhauspotenzial: Dieser Indikator besagt, wie stark ein Produkt oder eine Dienstleistung zum menschengemachten Treibhauseffekt beiträgt. Neben der Emission von Kohlendioxid (CO₂) tragen auch Methan, Lachgas und einige technische Gase (z.B. Schwefelhexafluorid oder halogenierten Kohlenwasserstoffen) zu diesem Effekt bei. Die Beiträge der verschiedenen Emissionen werden umgerechnet in die Menge CO₂, die denselben Effekt hat. Entsprechend wird das Treibhauspotenzial in der Einheit „kg CO₂-Äquivalente“ gemessen. Da einige dieser Emission relativ kurze Lebensdauern haben, ergeben sich unterschiedliche Werte für das Treibhauspotenzial je nach dem welchen Zeithorizont man betrachtet. In dieser Studie werden dafür 100 Jahre gewählt.

Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar: Dieser Indikator addiert alle nicht erneuerbaren Energieträgern, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes benötigt werden. Er entspricht der „Grauen Energie“ gemäss SIA 2032, die auch für den Minergie-Eco Nachweis verwendet wird. Achtung: andere Definitionen von „Grauer Energie“ können zusätzlich den Einsatz an erneuerbaren Energieträgern, wie zum Beispiel Wasserkraft, Wind- und Solarenergie, beinhalten und sind somit nicht vergleichbar mit dem kumulierten Energieaufwand nicht erneuerbar.

Jahresarbeitszahl (JAZ): Die JAZ ist ein Indikator für die Effizienz einer Wärmepumpe. Sie sagt, wie viel Wärmeenergie gewonnen wird pro eingesetzter Menge an elektrischer Energie. Dieses Verhältnis variiert im Laufe eines Jahres, da es nicht nur von der Wärmepumpenanlage selber abhängt, sondern auch vom

Betriebszustand und äusseren Bedingungen wie der Temperatur. Darum wird als JAZ der durchschnittliche Wert über ein Jahr angegeben.

Umweltproduktdeklaration (englisch „environmental product declaration, EPD“): Eine Deklaration der ökologischen Produkteigenschaften anhand von Umweltindikatoren. EPD's basieren auf Ökobilanzen die nach vordefinierten Regeln berechnet und von unabhängigen Experten validiert werden.

Ecoinvent: Eine Datenbank mit mehreren Tausend Datensätzen, die jeweils alle Stoff- und Energieflüsse auflisten, die zur Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung (typischerweise Grundmaterialien und Energiebereitstellung) benötigt werden. Diese Daten dienen als Sachbilanzdaten für Hintergrundprozesse in Ökobilanzen.

KBOB Liste: Die Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB) publiziert eine Reihe von Empfehlungen in unterschiedlichen Bereichen, unter anderem zu „Nachhaltigem Bauen“. In diesem Rahmen wird eine Liste mit Ökobilanzergebnissen publiziert, die grösstenteils direkt der ecoinvent Datenbank (v2.2) entnommen, beziehungsweise auf dieser Basis berechnet wurden. Andere Teile dieser Liste wurden analog der Methode für die Datenerhebung in ecoinvent aktualisiert oder zusätzlich berechnet.

3 Ausgangslage und Auftrag

In einem Projekt, das im BFE-Schlussbericht „Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung“ dokumentiert ist (Wohlgemuth et al 2015), wurden die aus ökologischer und aus ökonomischer Sicht optimalen Dämmstärken für verschiedene Typen von Wohngebäuden an unterschiedlichen Standorten und mit unterschiedlichen Wärmedämmmaterialien berechnet. Dabei wurden im Bereich der Fassade vor allem verputzte Aussenwärmedämmungen (Kompaktfassaden) betrachtet. Die Berechnungen basieren auf Ökobilanzergebnissen¹ aus der ecoinvent¹ v2.2 Datenbank (ecoinvent centre 2007) für die verschiedenen Energiebereitstellungspfade, Dämmstoffe und Befestigungssysteme. Diese Daten repräsentieren nicht spezifische Produkte sondern stehen für einen Durchschnitt der am Markt erhältlichen Produkte einer Klasse (z.B. Glaswolle, EPS, etc.). Die Studie benutzt 3 verschiedene Umweltindikatoren¹:

- Ökologische Knappheit¹
- Treibhauspotenzial¹
- Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar¹

Wohlgemuth et al 2015 verwendet für die Ökologische Knappheit Resultate der Version von 2006 (Frischknecht et al. 2009), weist diese aber fälschlicherweise als Version von 2013 (Frischknecht et al. 2013) aus.

Die Saint-Gobain Isover AG ist interessiert an einer analogen Untersuchung für ein spezifisches Dämmprodukt in einer hinterlüfteten Fassade und erteilte dem Autor im Dezember 2015 den Auftrag, eine entsprechende Studie durchzuführen. Diese Studie benutzt dieselbe Rechenmethode und eines der Beispielgebäude aus Wohlgemuth et al 2015. Trotzdem sind die Resultate nur bedingt vergleichbar mit den Resultaten von Wohlgemuth et al 2015, da einige wichtige Unterschiede bestehen:

- Die vorliegende Studie verwendet die aktuelleren Ökobilanzdaten aus der KBOB-Liste¹ (KBOB 2014)
- Die KBOB-Liste¹ verwendet die neuste Version der Ökologischen Knappheit (Frischknecht et al. 2013)
- Die vorliegende Studie verwendet Ökobilanzergebnisse für spezifische Isover-Produkte, die aus einer unabhängig erstellten und verifizierten Umweltproduktedeklaration¹ (environmental product declaration EPD) stammen.
- Die vorliegende Studie untersucht hinterlüftete Fassaden, die erfahrungsgemäss weniger wartungsintensiv sind als Kompaktfassaden. Der Unterhalt der Fassade (Reinigung, regelmässige Anstriche,...) wird in beiden Studien nicht berücksichtigt.

Aufgrund dieser Unterschiede wird auf einen Vergleich der Ergebnisse mit denen aus Wohlgemuth et al. 2015 verzichtet.

¹ siehe Glossar

4 Untersuchtes Gebäude und Varianten

Ein neues 6-Familienhaus, das mit Isover Fassadendämmplatten PB F 030 gedämmt ist, wird als Referenzgebäude gewählt. Die Gebäudeparameter werden aus Wohlgemuth et al. 2015 übernommen und sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der Heizenergiebedarf dieses Gebäudes in Abhängigkeit des Standortes und der Wärmedämmung wird ebenfalls aus Wohlgemuth et al. 2015 übernommen. Zur Grundvariante werden verschiedene Varianten berechnet, bei denen jeweils ein relevanter Parameter (Standort, Heizungsanlage, Energieträger, Dämmprodukt, Unterkonstruktion der hinterlüfteten Fassade, Innenraumtemperatur) verändert wird. Tabelle 2 stellt sämtliche Varianten zusammen. Alle Varianten werden mit Fussbodenheizung und innen angeschlagenen Fenstern berechnet. Die Lebensdauern für die Wärmedämmung und für das Wärmeverteilnetz des Heizsystems werden in Anlehnung an den Referenzfall der zugrunde liegenden Studie in allen Varianten mit 40 bzw. 30 Jahren angenommen. 40 Jahre Lebensdauern dürften für Kompaktfassaden realistisch, für hinterlüftete Fassaden aber eher zu kurz angesetzt sein. Die 30 Jahre Lebensdauer für eine Fussbodenheizung scheinen ebenfalls eher zu kurz. In Wohlgemuth et al. 2015 wurde aber gezeigt, dass der Einfluss dieser Lebensdauerannahme nur zu geringen Veränderungen in den Resultaten führt, was diese konservative Annahme erlaubt.


Gebäudetyp		Mehrfamilienhaus MFH-6	
		Fensterfläche N	11%
		Fensterfläche O	15%
		Fensterfläche S	41%
		Fensterfläche W	25%
Anzahl Wohneinheiten	6	Gedämmte Hüllfläche	599.3 m ²
Gebäude Länge	27.6 m	Widerstand Mauerwerk	0.54 m ² K/W
Gebäude Breite	9 m	Geschossfläche	745.2 m ²
Gebäude Höhe	8.2 m	Gamma	0.94

Tabelle 1: Referenzgebäude mit Gebäudeparametern (Wohlgemuth et al. 2015).

Varianten- bezeichnung	Stand- ort	Heizungs- anlage	Energieträger	Dämm- produkt	Unter- konstruktion	Innen- tempe- ratur
Grundvariante	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Davos	Davos	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Lugano	Lugano	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Luft / Wasser WP	Zürich	Luft / Wasser Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Ölheizung	Zürich	Heizkessel	Heizöl	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Gasheizung	Zürich	Heizkessel	Erdgas	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
UCTE-Strom	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	UCTE Produktionsmix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Wasserkraft	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	Wasserkraft, CH	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Energiestrategie 2020	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	Mix Energiestrategie 2020	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Energiestrategie 2050	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	Mix Energiestrategie 2050	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
Holz-UK	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	Holz	21°C
PB F EXTRA 032	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F EXTRA 032	GFK, wärme- brückenfrei	21°C
20 °C	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	20°C
23 °C	Zürich	Erdsonde Wärmepumpe	CH Verbrauchermix	PB F 030	GFK, wärme- brückenfrei	23°C

Tabelle 2: In dieser Studie untersuchte Varianten. Die Grundvariante dient in den Vergleichen jeweils als Referenz.

5 Ökobilanzdaten

Die Ökobilanzdaten für die Wärmebereitstellung und die Unterkonstruktionen werden für dieses Projekt auf Basis der KBOB-Liste² (KBOB 2014) berechnet. Diese Liste basiert grundsätzlich auf der ecoinvent Datenbank² Version 2.2, beinhaltet aber einige Aktualisierungen.

5.1 Wärmebereitstellung

Die Ökobilanzdaten für Heizsysteme und Energiebereitstellung werden direkt aus der KBOB-Liste (KBOB 2014) entnommen oder auf Basis dieser Daten berechnet. Tabelle 3 zeigt die verwendeten Daten zur Energiebereitstellung. Die Daten zur Strombereitstellung in 2020 und 2050 wurden aufgrund des in Wohlgemuth et al. 2015 angenommenen Technologiemieses sowie der Daten für die Strombereitstellung mit diesen Technologien gemäss (KBOB 2014) berechnet. Die Details zu dieser Berechnung finden sich im Anhang.

		Wärmebereitstellung mit:		Strombereitstellung mit:				
		Heizöl	Erdgas	CH Verbraucher-mix	UCTE	Wasser-energie	Energiestra- tegie 2020	Energiestra- tegie 2050
Ökologische Knappheit 2013	UBP / MJ	66.0	41.9	106	152	12.3	63.9	37.1
Treibhaus- potenzial (100a)	kg CO ₂ -Eq / MJ	0.0887	0.0691	0.0385	0.145	0.00350	0.0159	0.0686
Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ / MJ	1.29	1.16	2.69	2.88	0.0298	1.81	0.388

Tabelle 3: Ökobilanzdaten für die Energiebereitstellung pro MJ (KBOB 2014 / eigene Berechnung im Anhang)

Für die Wärmebereitstellung mit Heizkesseln ist die Herstellung und Entsorgung der Kessel sowie deren Wirkungsgrade bereits in den Ökobilanzdaten enthalten. Allerdings ist die Infrastruktur zur Wärmeverteilung im Haus noch nicht enthalten. Entsprechend wird eine Fussbodenheizung noch separat berücksichtigt (Tabelle 4).

		Fussboden- heizung
Ökologische Knappheit 2013	UBP / m ²	4500
Treibhauspotenzial (100a)	kg CO ₂ -Eq / m ²	5.54
Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ / m ²	83.5

Tabelle 4: Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung der Fussbodenheizung pro m² Energiebezugsfläche (KBOB 2014)

Bei der Wärmebereitstellung mit Wärmepumpen werden neben dem - unter Berücksichtigung der Jahresarbeitszahl³ (JAZ) - zum Betrieb nötigen Strom auch die Herstellung und Entsorgung der Fussbodenheizung (Tabelle 4) und der Wärmepumpe (Tabelle 5) bilanziert. Im Falle einer Erdsonde-Wärmepumpe werden zudem

² siehe Glossar

³ siehe Glossar

150 m Erdsonden berücksichtigt. Bei beiden Wärmepumpentypen werden auch die Produktion und Emission von Kältemittel (R-134a) berücksichtigt. Die entsprechenden Mengen wurden aus ecoinvent v2.2 übernommen

		Luft/Wasser Wärmepumpe	Erdsonde Wärmepumpe
Ökologische Knappheit 2013	UBP / MJ	6.88	5.72
Treibhauspotenzial (100a)	kg CO ₂ -Eq / MJ	0.00946	0.00708
Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ / MJ	0.0266	0.036
Jahresarbeitszahl (JAZ)	-	2.8	3.9
Kältemittelbedarf /-emission	kg / MJ	4.00E-6	2.50E-6

Tabelle 5: Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung sowie JAZ der Wärmepumpensystemen pro MJ bereitgestellte Wärmeenergie. Berechnung und Datengrundlage im Anhang.

5.2 Dämmstoffe

Daten für die Herstellung und Entsorgung des Dämmmaterials werden aus der extern verifizierten Umweltproduktdeklaration^{4,5} (EPD) für unkaschierte Glaswolle mit Bindemittel Phenolharz von Isover übernommen. Es werden die Werte aus Tabelle 6 verwendet. Da diese Werte pro kg Dämmmaterial gelten, können beide Produktvarianten (PB F 030 und PB F EXTRA 032) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichten mit denselben Daten berechnet werden.

		Herstellung	Entsorgung	Total
Ökologische Knappheit 2013	UBP / kg	1348	27	1375
Treibhauspotenzial (100a)	kg CO ₂ -Eq / kg	0.862	0.016	0.878
Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ / kg	19.1	0.35	19.4

Tabelle 6: Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung von unkaschierter Isover-Glaswolle pro kg Material

5.3 GFK- Unterkonstruktion:

Die GFK-Unterkonstruktion⁶ besteht aus 0.4 Fixpunkt-Konsolen sowie aus 1.2 Gleitpunkt-Konsolen pro m² Fassadenfläche. Weiter werden pro m² Fassade 1.25 Laufmeter L-Profile und 0.65 Laufmeter T-Profile benötigt. Alle diese Teile bestehen aus Aluminium und wiegen zusammen 1.356 kg pro m² Fassadenfläche. Pro Konsole wird jeweils eine Schraube zur Befestigung an der Fassade benötigt. Wir gehen von 6 cm langen Stahlschrauben mit 8 mm Durchmesser aus. Zur Befestigung der GFK Platten an den Konsolen und Profilen werden Niete benötigt. Bei den Fixpunkt-Konsolen sind es pro Konsole 6 Niete à 16 mm Länge und bei den Gleitpunkt-Konsolen sind es 2 à 16 mm und 2 à 20 mm. Der Durchmesser der Niete beträgt 4.8 mm. Unter der Annahme, dass jede Niete einen Edelstahlstift von 3 mm Durchmesser und 4 cm Länge enthält, werden der Stahl- und der Aluminiumbedarf für die Niete berechnet. Damit die Vernietungen an den Gleitpunkt-Konsolen ein gewisses Spiel zulassen, werden hier

⁴ Siehe Glossar

⁵ Deklarationsnummer SGI_EPD_2014_01 vom 1.8.2014

⁶ basierend auf Typ WDK Phonix, Wagner System AG

Unterlagscheiben aus Edelstahl benötigt. Diese sind 1 mm dick und haben einen Durchmesser von 20 mm. Da davon ausgegangen wird, dass das Loch in die Scheibe gestanzt wird, berechnen wir für die Ökobilanz den Edelstahlbedarf für die volle Scheibe. Total braucht diese Unterkonstruktion unabhängig von der Dämmstärke 1.359 kg Aluminium, 0.038 kg Stahl und 0.032 kg Edelstahl pro m² Fassadenfläche.

Der Abstand zwischen den Konsolen und den Profilen wird von GFK-Platten gehalten. Die Länge dieser Platten – und somit auch deren Masse - hängt also von der Dämmstärke ab. Pro m² Fassadenfläche und mm Dämmstärke werden 0.0009647 kg GFK-Platten benötigt.

Zur Berechnung der Ökobilanzergebnisse werden die Materialkennwerte inkl. Entsorgung und Blech- bzw. Profilwalzen aus KBOB 2014 verwendet. Die resultierenden Ökobilanzdaten sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

	Ökologische Knappheit 2013	Treibhauspotenzial (100a)	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar
	UBP / m ²	kg CO ₂ -Eq / m ²	MJ / m ²
Total DämmstärkenUNabhängig	18852	16.0	225
	UBP / m ² * m	kg CO ₂ -Eq / m ² * m	MJ / m ² * m
Total Dämmstärkenabhängig	6664	5.04	72.9

Tabelle 7: Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung der GFK-Unterkonstruktion., aufgeteilt in einen konstanten (DämmstärkenUNabhängigen) und einen variablen (dämmstärkenabhängigen) Teil. Die Werte beziehen sich auf einen m² Fassadenfläche bzw. einen m² Fassadenfläche und einen m Dämmstärke.

5.4 Holz-Unterkonstruktion

Für die Holzunterkonstruktion bis 100 mm Dämmstärke gehen wir von einer Horizontallattung mit 0.65 m Achsabstand aus. Die Breite der Latten wird mit 0.06 m angenommen. Bei Dämmstärken zwischen 100 mm und 320 mm wird zuerst eine Vertikallattung mit Achsabstand 1.3 m und Lattendicken von 0.06 m bis 0.2 m bilanziert. Darauf kommt eine Horizontallattung mit Achsabstand 0.65 m und Lattendicken von 0.06 m bis 0.12 m. Für Dämmstärken über 320 mm wird von einer 3-lagigen Holzunterkonstruktion ausgegangen. Auf eine Horizontallattung mit Achsabstand 1.3 m und Lattendicke 0.12 m folgt eine Vertikallattung mit Achsabstand 1.3 m und Lattendicke von 0.12 m bis 0.2 m. Darauf kommt wieder eine Horizontallattung mit Achsabstand 0.65 m und Lattendicken von 0.1 m bis 0.12 m. Abbildung 2 zeigt das resultierende Volumen der Holzunterkonstruktion in Abhängigkeit der Dämmstärke. Für die Berechnung der optimalen Dämmstärke wird dieser Zusammenhang mit Hilfe einer linearen Regression in einen dämmstärkenunabhängigen (0.00285 m³) und einen dämmstärkenabhängigen (0.0000534 m³/mm) Teil des Volumens aufgeteilt. So lässt sich zum Beispiel für eine Dämmstärke von 200 mm das Holzvolumen von $0.0028 + 200 \cdot 0.0000534 = 0.0135$ m³ berechnen. Zur Berechnung der Holzmasse wird von einer Trockendichte von 450 kg/m³ und einem Wassergehalt von 20% ausgegangen.

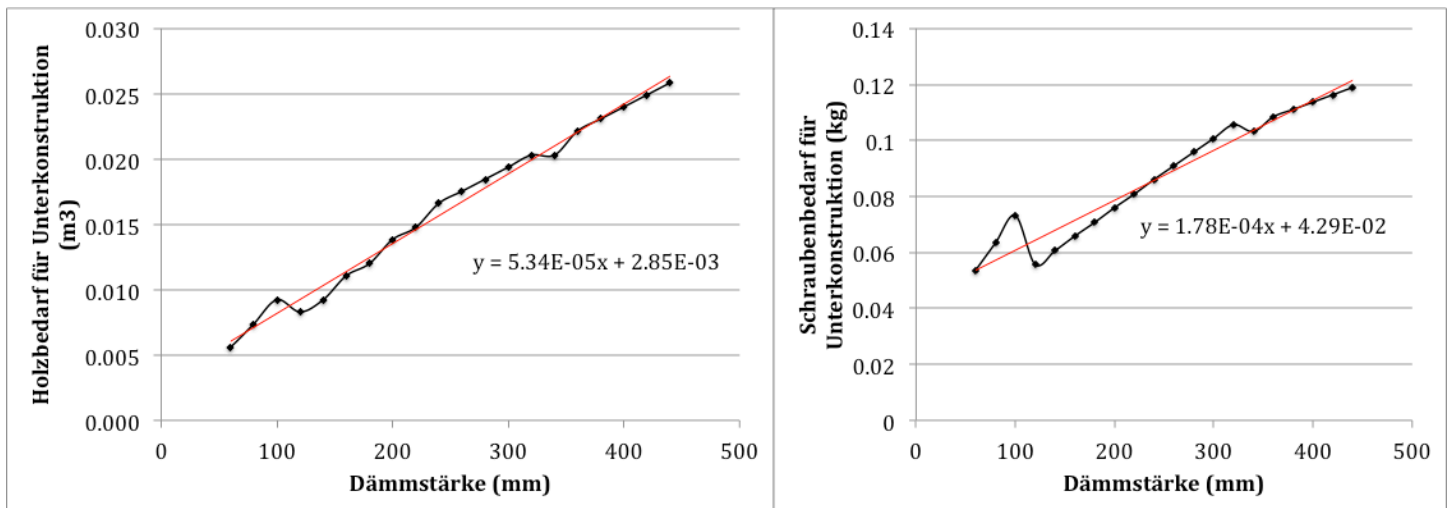


Abbildung 2: Materialbedarf der Holzunterkonstruktion in Abhängigkeit der Dämmstärke. Ermittelte Werte (schwarz) und lineare Regressionen (rot). Die Sprünge in der Funktion rühren daher, dass zwischen 100 und 120 mm bzw. zwischen 320 und 340 mm eine zusätzliche Lage an Latten hinzukommt.

Zur Befestigung der Holzunterkonstruktion werden Stahlschrauben benötigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Schrauben 6 mm Durchmesser haben und jeweils 5 cm länger sind als die Lattendicke. Weiter wird angenommen, dass die erste Lage der Lattung mit Schrauben im Abstand von 70 cm auf die Mauer befestigt wird. Die zweite und dritte Lage wird jeweils an den Kreuzungspunkten auf die darunterliegende Lattung geschraubt. Analog zum Holzbedarf wird auch der Stahlbedarf für Schrauben mit Hilfe einer linearen Regression in einen dämmstärkenunabhängigen (0.0429 kg) und einen dämmstärkenabhängigen (0.000178 kg/mm) Teil aufgeteilt. Zur Berechnung der Ökobilanzergebnisse werden die Kennwerte aus KBOB 2014 für Holz (Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, rau) und Stahl (Stahlprofil, blank) benutzt. Die Entsorgung der Materialien ist bereits darin berücksichtigt. Die resultierenden Ökobilanzdaten sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

	Ökologische Knappheit 2013	Treibhauspotenzial (100a)	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar
	UBP / m²	kg CO ₂ -Eq / m²	MJ / m²
Total DämmstärkenUNabhängig	528	0.169	3.38
	UBP / m² * m	kg CO ₂ -Eq / m² * m	MJ / m² * m
Total Dämmstärkenabhängig	9261	2.72	55.6

Tabelle 8: Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung der Holz-Unterkonstruktion, aufgeteilt in einen konstanten (DämmstärkenUNabhängigen) und einen variablen (dämmstärkenabhängigen) Teil. Die Werte beziehen sich auf einen m² Fassadenfläche bzw. einen m² Fassadenfläche und einen m Dämmstärke.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Optimale Dämmstärken

Die optimale Dämmstärke hängt nicht nur von der betrachteten Variante ab. Sie ist auch für jede einzelne Variante unterschiedlich in Abhängigkeit vom betrachteten Umweltindikator. In dieser Studie ergeben sich Werte zwischen etwa 10 cm (Variante Wasserkraft / kumulierter Energieaufwand) und 66 cm (Variante Ölheizung / Treibhauspotenzial). Die entsprechenden Wand-U-Werte liegen zwischen 0.26 W/m²K und 0.04 W/m²K. Sämtliche Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Variantenbezeichnung	Ökologische Knappheit 2013		Treibhauspotenzial (100a)		Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	
	Opt. Dämmstärke	Opt. U-Wert	Opt. Dämmstärke	Opt. U-Wert	Opt. Dämmstärke	Opt. U-Wert
	m	W/m ² K	m	W/m ² K	m	W/m ² K
Grundvariante	0.325	0.088	0.289	0.098	0.412	0.070
Davos	0.366	0.079	0.325	0.088	0.463	0.063
Lugano	0.241	0.116	0.215	0.130	0.306	0.093
Luft / Wasser WP	0.379	0.076	0.338	0.085	0.480	0.060
Ölheizung	0.460	0.063	0.661	0.044	0.549	0.053
Gasheizung	0.367	0.078	0.583	0.050	0.520	0.056
UCTE-Strom	0.379	0.076	0.467	0.062	0.425	0.068
Wasserkraft	0.169	0.162	0.198	0.140	0.101	0.256
Energiestrategie 2020	0.266	0.106	0.234	0.120	0.341	0.084
Energiestrategie 2050	0.221	0.126	0.349	0.082	0.178	0.155
Holz-UK	0.318	0.090	0.298	0.095	0.416	0.069
PB F EXTRA 032	0.378	0.081	0.335	0.091	0.480	0.064
20 °C	0.199	0.161	0.173	0.182	0.207	0.155
23 °C	0.308	0.093	0.274	0.104	0.390	0.074

Tabelle 9: Zusammenstellung der optimalen Dämmstärken und der dazugehörigen U-Werte.

Abbildung 5 bis Abbildung 20 zeigen die Kurven von Umweltindikator versus Dämmstärke (Linien) mit ihren jeweiligen Optima (rote Punkte) in allen Varianten und für alle Indikatoren. Die Optima liegen jeweils in einem sehr flachen Bereich der Kurve. Das bedeutet, dass die sich Umweltbelastung im Bereich des Optimums nicht sehr stark verändert, wenn die Dämmstärke etwas geringer oder etwas höher wird. Praktisch alle Kurven zeigen auch eine deutliche Asymmetrie. Bei geringen Dämmstärken sind sie relativ steil während sie bei grossen Dämmstärken praktisch waagrecht verlaufen. Das bedeutet, dass zu geringe Dämmstärken die ökologische Qualität eines Gebäudes deutlich verschlechtern während eine zu grosse Dämmstärke praktisch keine negativen ökologischen Auswirkungen nach sich zieht.

6.1.1 Standort

Die Varianten mit den unterschiedlichen Standorten (Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5) zeigen, dass die absoluten Werte des ökologischen Aufwandes stark vom Gebäudestandort abhängen. So verursacht der Bau, Betrieb und Rückbau eines Gebäudes in Lugano eine nur etwa halb so grosse Umweltauswirkung wie ein Gebäude in Zürich. Obwohl im Winter in Davos deutlich tiefere Temperaturen herrschen als in Zürich, liegen die Umweltauswirkungen dort nur relativ wenig höher. Das hat damit zu tun, dass Davos im Winter mehr Sonne kriegt und dass damit die solaren Gewinne im Davoser Haus viel höher ausfallen. Berücksichtigt man den flachen Verlauf der Kurven, kann unabhängig vom Standort und vom Umweltindikator eine Dämmstärke von 25 bis 30 cm als optimal empfohlen werden (rötlich hinterlegter Bereich). Praktisch jede Dämmstärke über 30 cm führt zu ähnlichen Umweltauswirkungen, Dämmstärken unter 20 cm hingegen führen zu einer Verschlechterung.

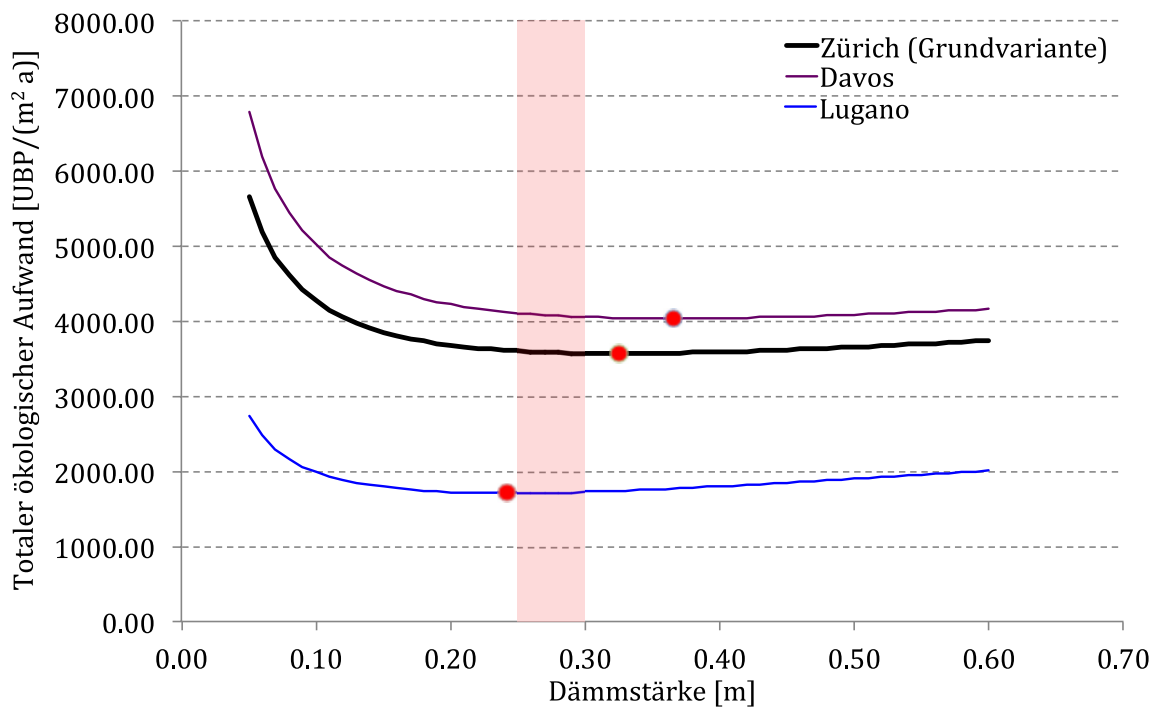


Abbildung 3: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 3 Standorte.

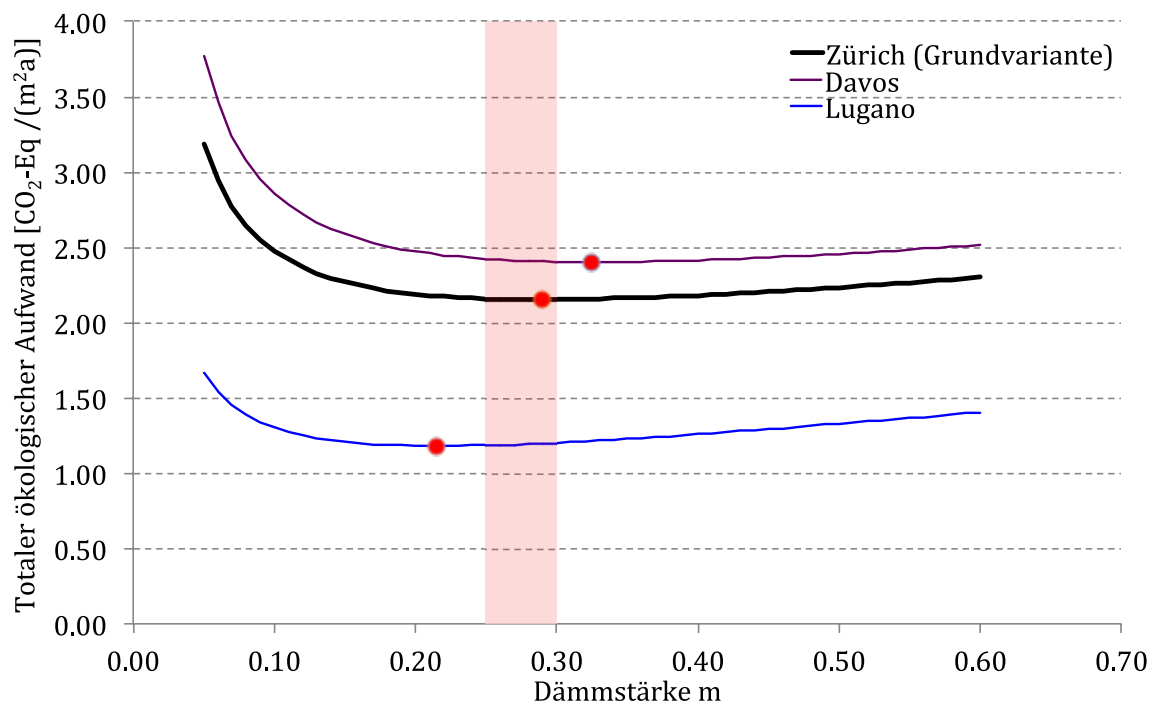


Abbildung 4: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 3 Standorte.

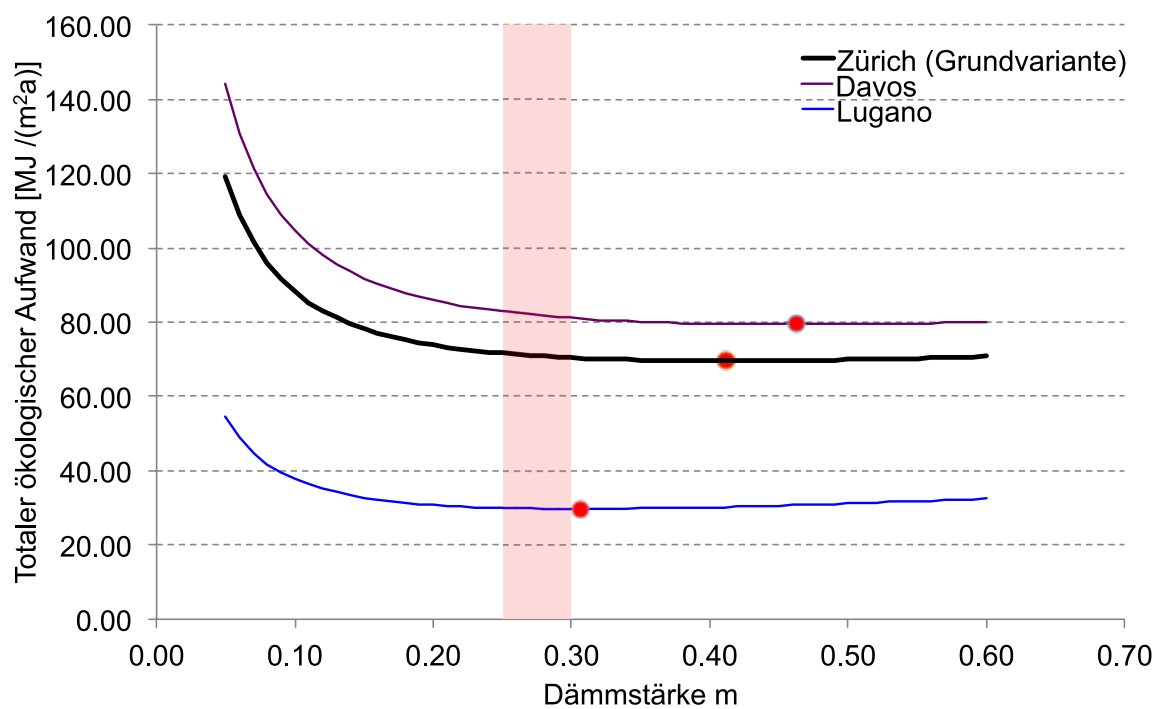


Abbildung 5: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 3 Standorte.

6.1.2 Heizsystem

Die Varianten mit den unterschiedlichen Heizsystemen (Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8) zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede in den absoluten Werten der potenziellen Umweltauswirkungen. Öl- und Gasheizungen liegen bezüglich kumuliertem Energieaufwand und Treibhauspotenzial deutlich höher als die beiden Wärmepumpenvarianten (mit Schweizer Strommix). Bezüglich UBP hingegen wird die Gasheizung besser als die Luft/Wasser-Wärmepumpe. Das liegt daran, dass dieser Indikator die durch den Schweizer Strommix anfallenden radioaktiven Abfälle relativ stark gewichtet, was von den beiden anderen Indikatoren gar nicht berücksichtigt wird. Das verringert generell den Abstand zwischen Heizkessel und Wärmepumpenheizungen. Durch die tiefere JAZ der Luft/Wasser-Wärmepumpe wird diese so umweltbelastender als die Gasheizung.

In diesen Vergleichen liegen die Optima der verschiedenen Indikatoren deutlich auseinander. Doch auch diese Kurven sind im Bereich der Optima so flach, dass praktisch jede Dämmstärke über 30 cm zu ähnlichen totalen Umweltbelastungen führt. Werte unter 25 cm hingegen führen zu höheren totalen ökologischen Aufwänden.

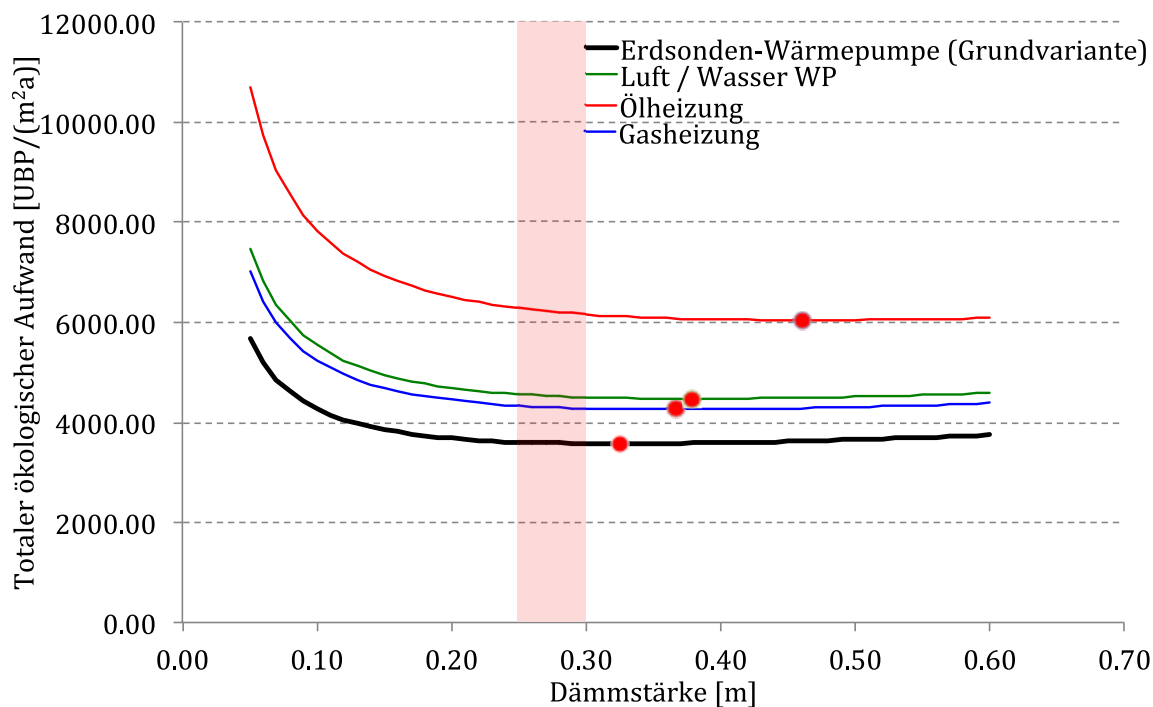


Abbildung 6: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 4 Heizsysteme.

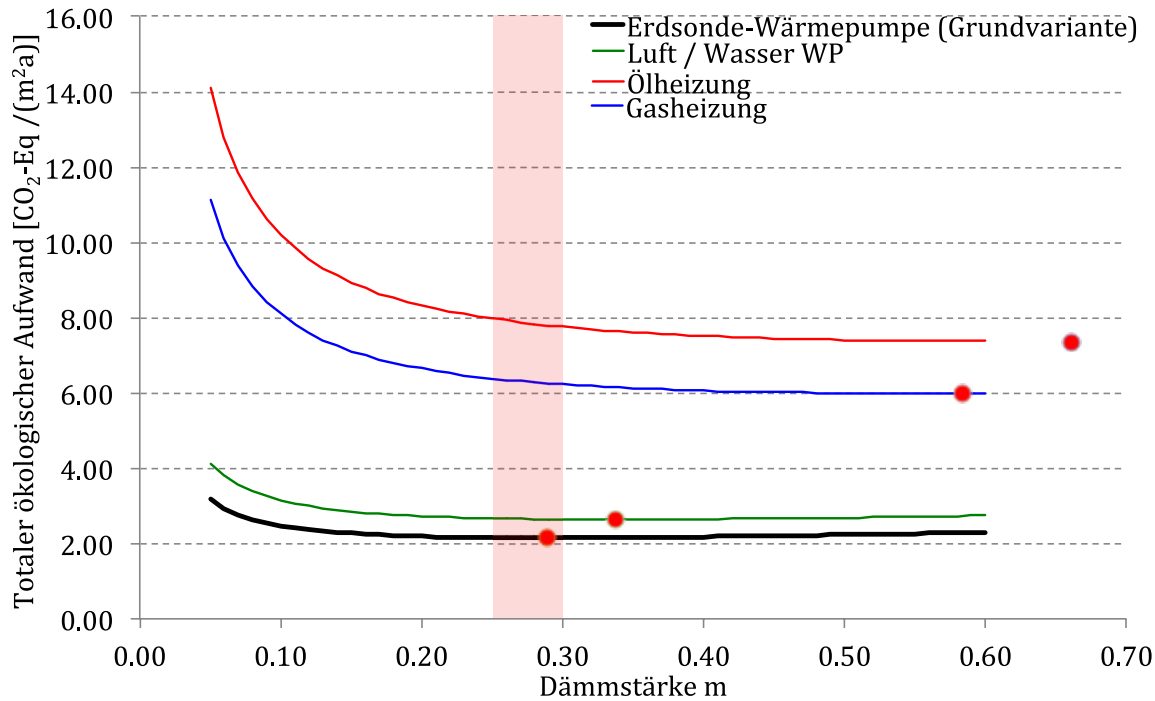


Abbildung 7: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 4 Heizsysteme.

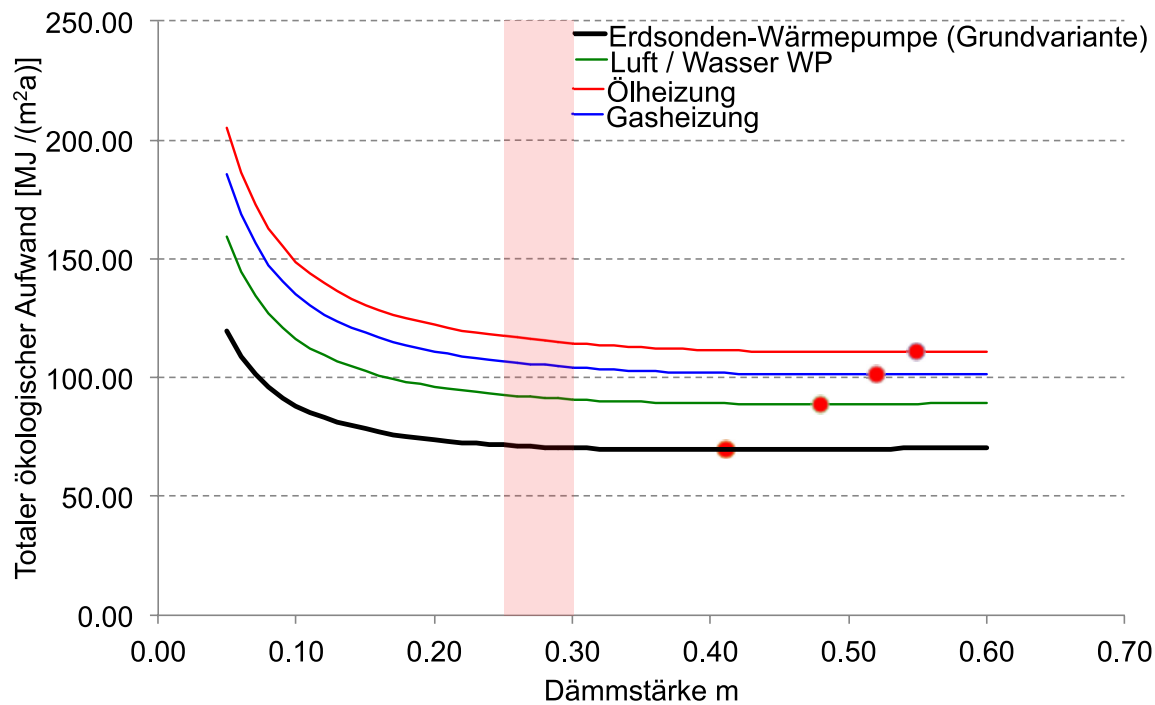


Abbildung 8: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für die 4 Heizsysteme.

6.1.3 Strombereitstellung

Der Strom, mit dem eine Erdsonden-Wärmepumpe betrieben wird, hat einen grossen Einfluss auf die absolute Umweltbelastung des Gebäudes (Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11), aber auch auf die optimale Dämmstärke. Je ökologisch besser der Strom produziert wird, desto tiefer liegt auch die optimale Dämmstärke. Auch in diesem Vergleich sind die Kurven rechts vom Optimum ziemlich flach, so dass über alles auch hier eine Dämmstärke von 25 bis 30 cm als optimal bezeichnet werden kann. Auffällig bei diesen Varianten ist aber, dass mit nachhaltig erzeugtem Strom und einer Erdsonden-Wärmepumpe die Kurven auch gegen kleine Dämmstärken relativ flach verlaufen. In diesen Fällen steigt der ökologische Aufwand erst unter 10 cm Dämmstärke stärker an.

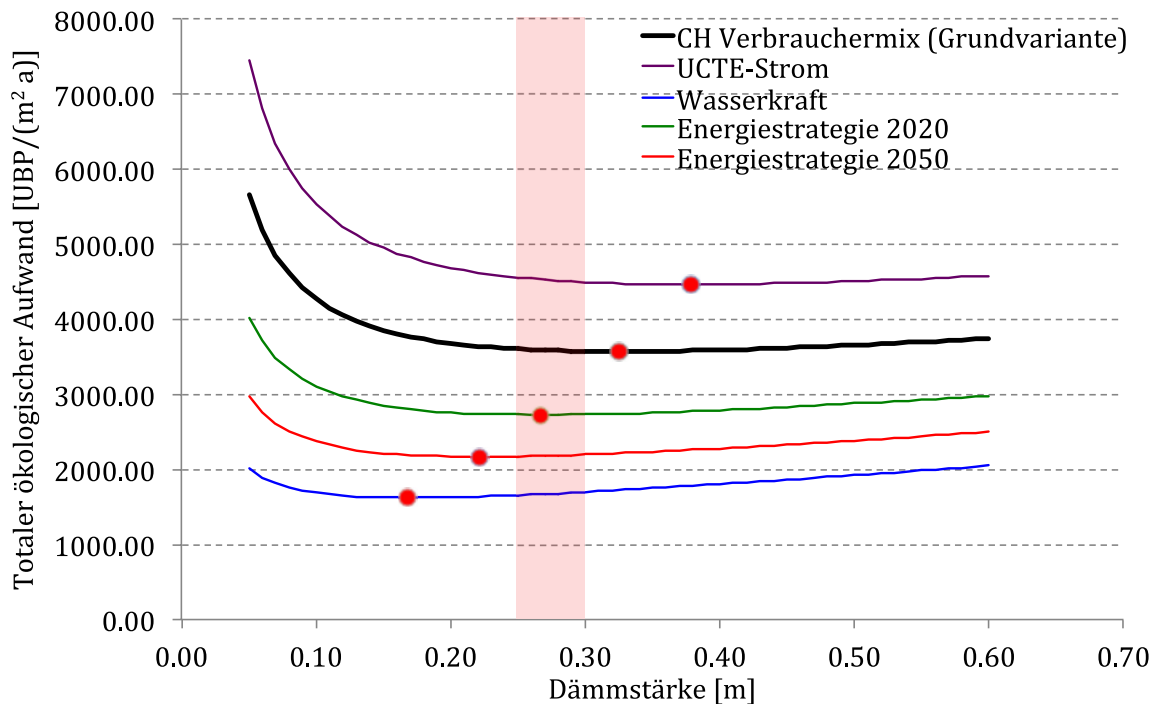


Abbildung 9: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für verschiedene Stromquellen.

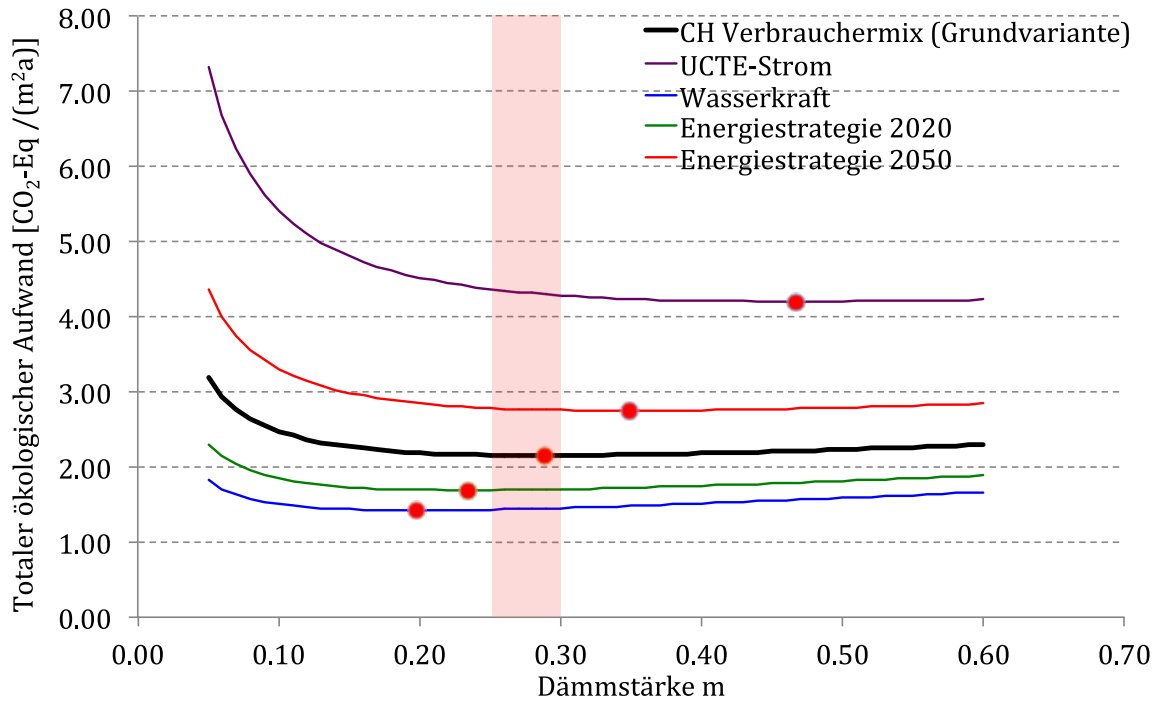


Abbildung 10: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für verschiedene Stromquellen.

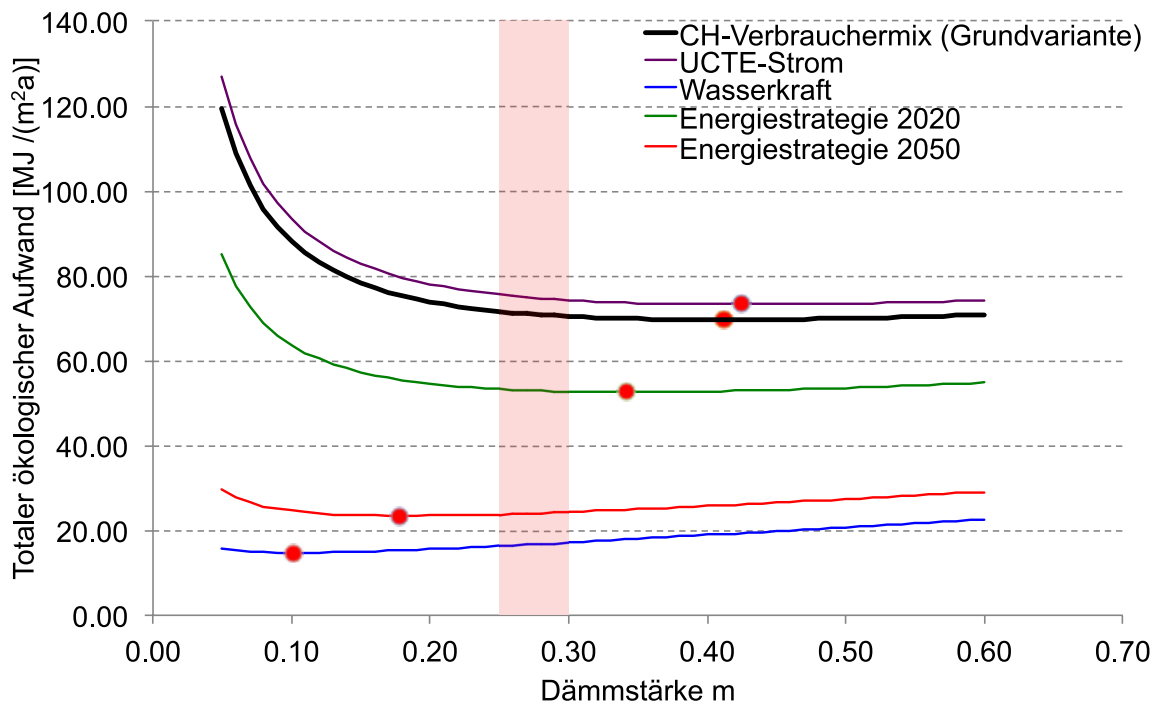


Abbildung 11: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für verschiedene Stromquellen.

6.1.4 Unterkonstruktion

Die Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen, dass auch mit einer Holz-Unterkonstruktion jede Dämmstärke über 30 cm zu ähnlichen Umweltauswirkungen führt. Werte unter 20 bis 25 cm hingegen führen zu höheren totalen ökologischen Aufwänden. Die Wahl der Unterkonstruktion hat insgesamt einen untergeordneten Einfluss sowohl auf die absoluten Werte der Umweltindikatoren als auch auf die optimale Dämmstärke. Bei der Interpretation der Unterschiede ist zu beachten, dass die Unsicherheiten von Ökobilanzergebnissen immer relativ hoch sind und im Allgemeinen erst als signifikant gelten, wenn sie grösser als 20% sind. Darüber hinaus wurden alle Materialien und Komponenten des Gebäudes, die nicht mit dem Heizsystem zusammenhängen und unabhängig von der Wahl der Unterkonstruktion identisch sind (Mauern, Fassadenabschluss, Installationen,...), vernachlässigt. Die Umweltauswirkung des realen Gebäudes ist also deutlich höher als die ausgewiesenen Resultate. Damit werden auch die relativen Unterschiede zwischen Holz- und GFK-Unterkonstruktion noch geringer.

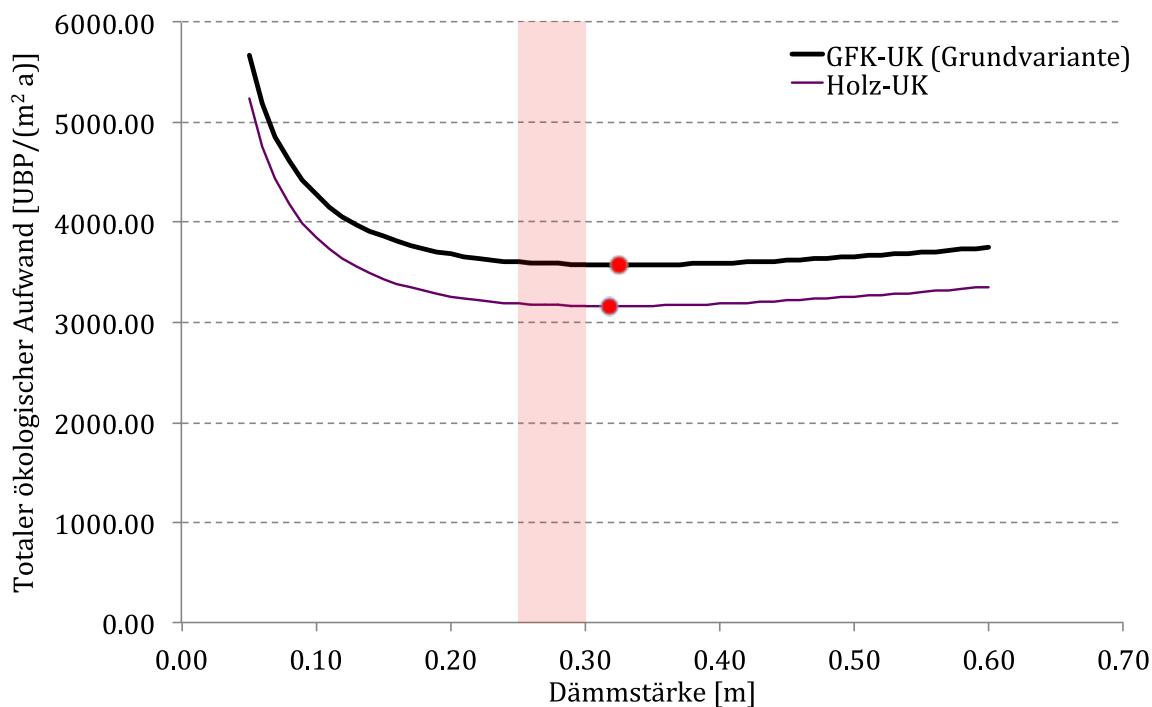


Abbildung 12: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Unterkonstruktionen.

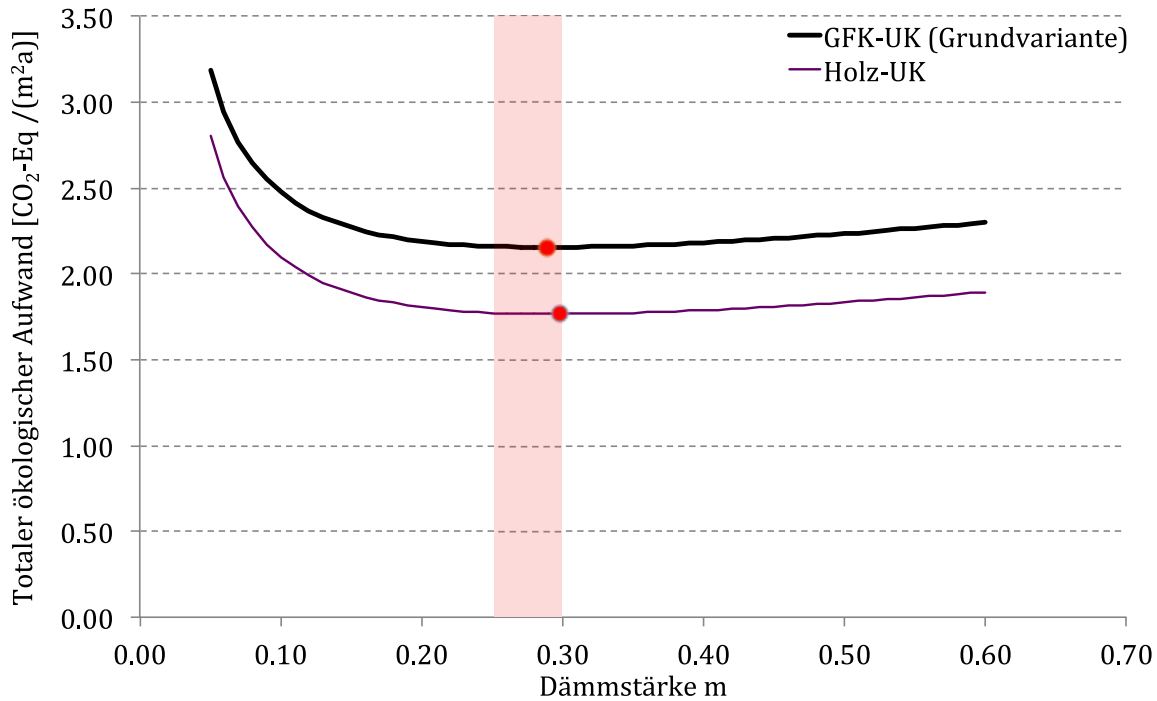


Abbildung 13: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Unterkonstruktionen.

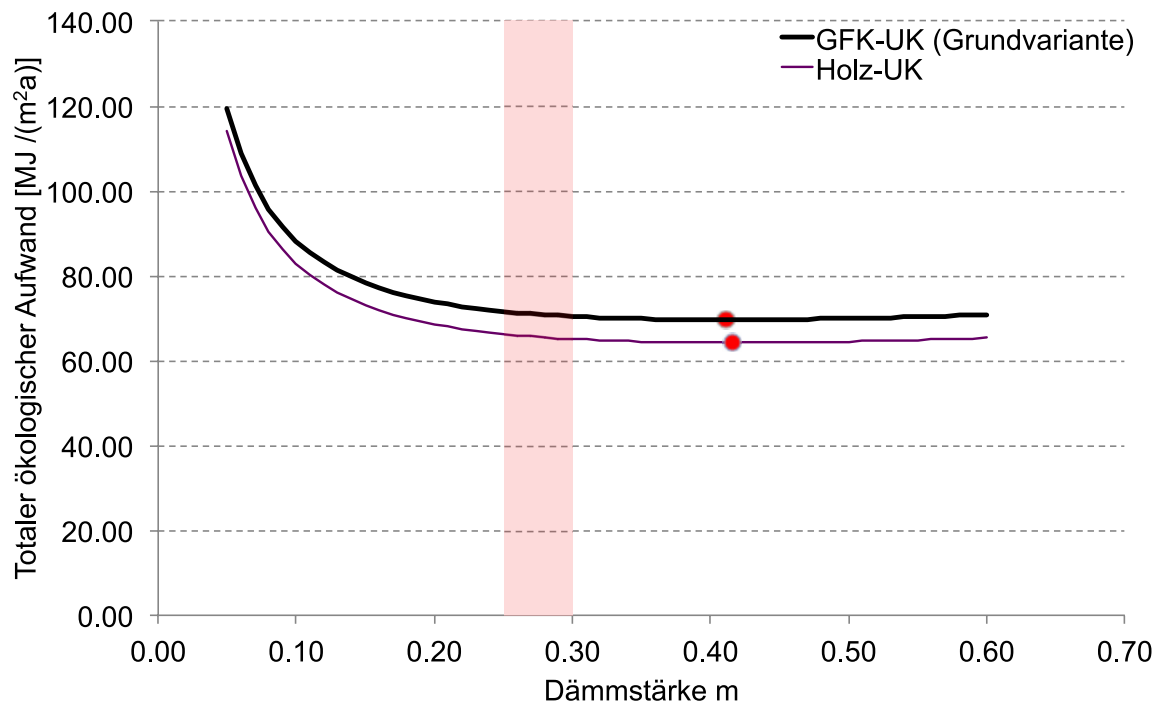


Abbildung 14: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Unterkonstruktionen.

6.1.5 Dämmprodukt

Die Wahl des spezifischen Dämmmaterials hat einen untergeordneten Einfluss auf die optimale Dämmstärke und beeinflusst die absoluten Werte der Umweltindikatoren praktisch gar nicht (Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17). Auch diese Kurven zeigen, dass jede Dämmstärke über 30 cm zu praktisch gleich grossen Umweltauswirkungen führt. Werte unter 25 cm hingegen führen zu höheren totalen ökologischen Aufwänden.

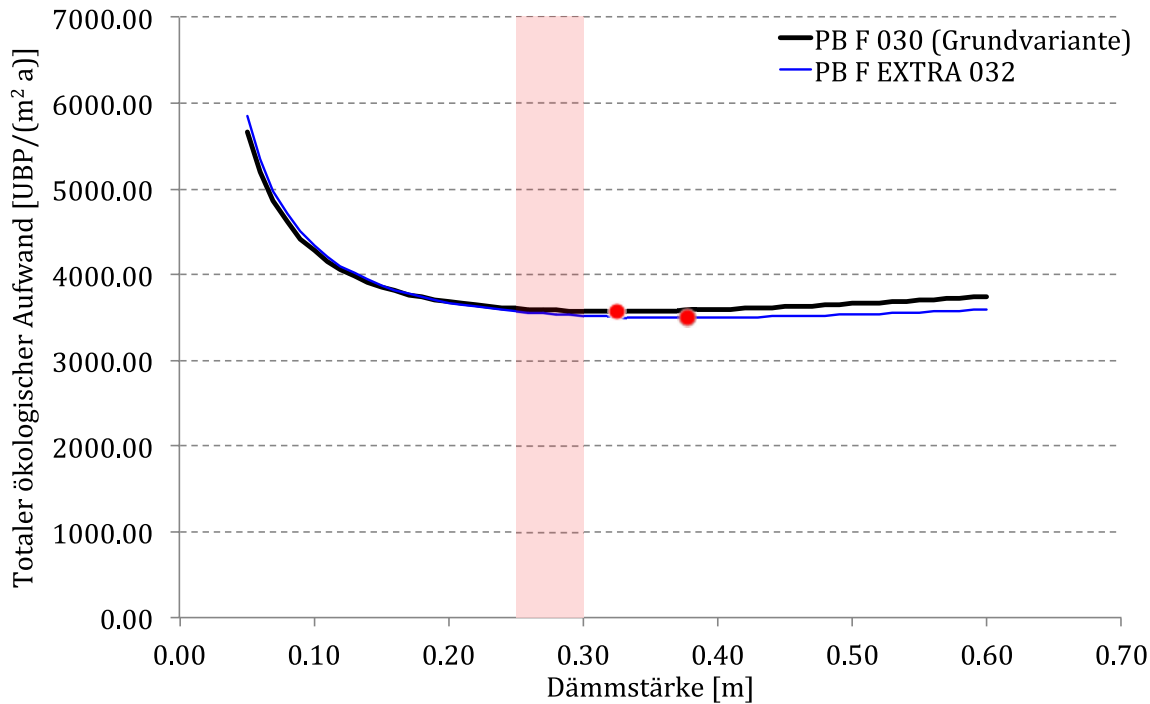


Abbildung 15: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Dämmprodukte.

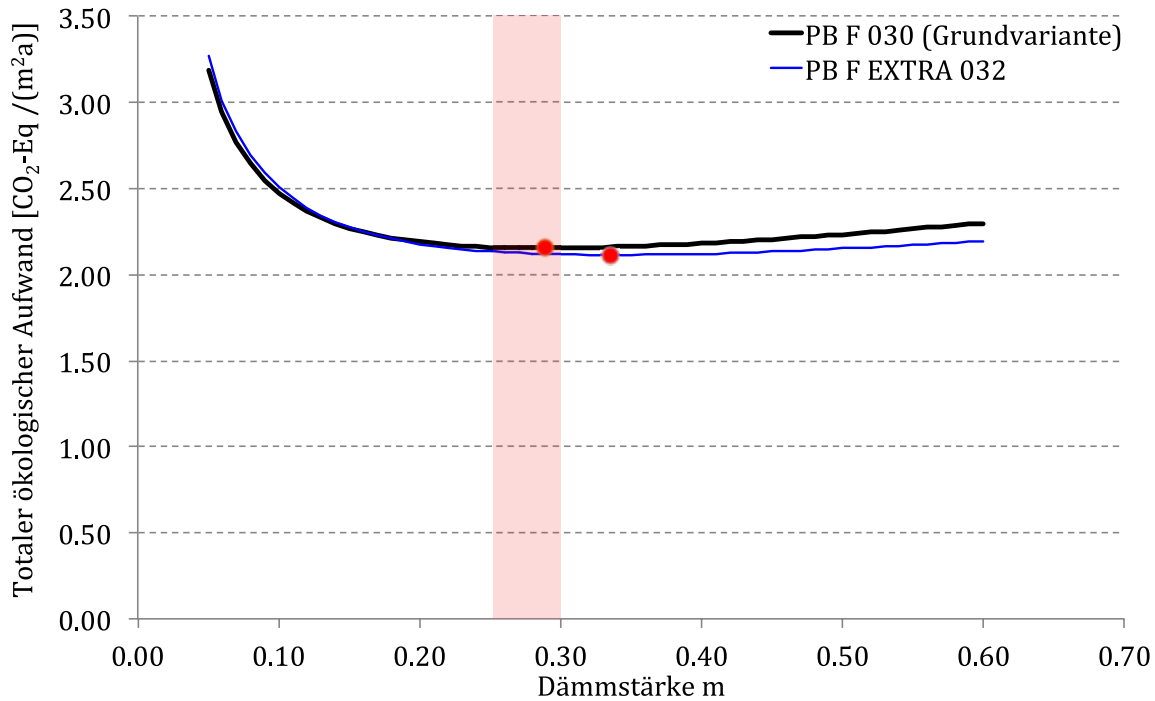


Abbildung 16: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Dämmprodukte.

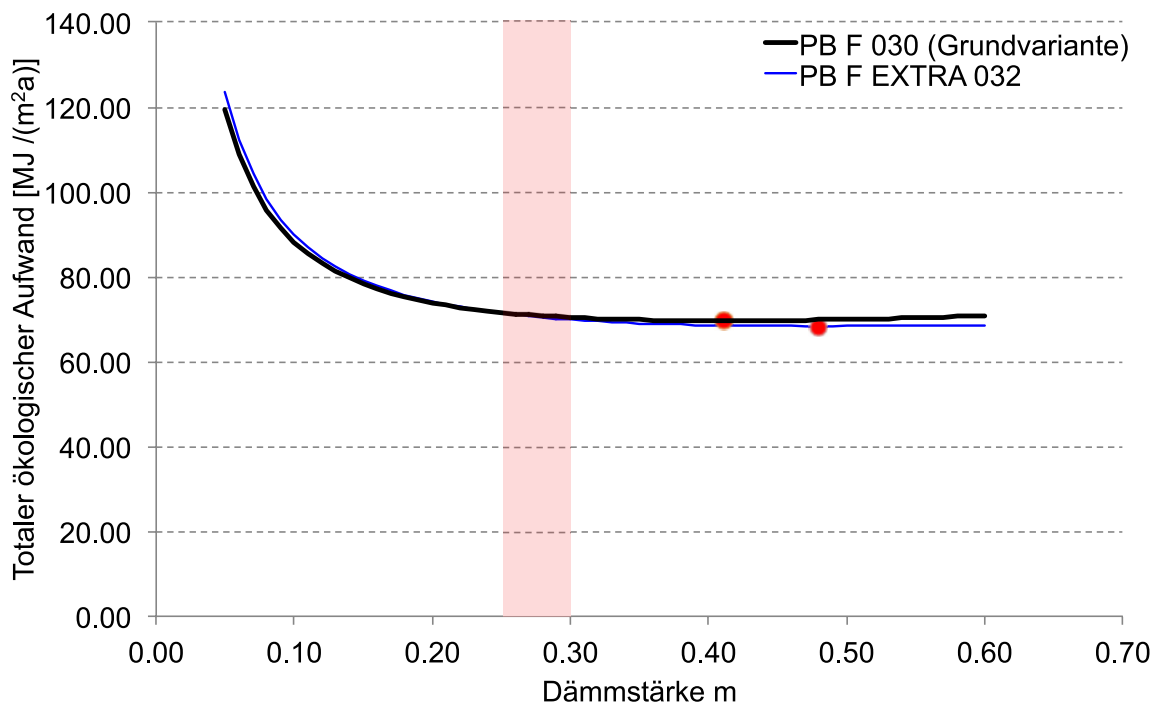


Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Dämmprodukte.

6.1.6 Innentemperatur

Die Varianten mit den unterschiedlichen Innenraumtemperaturen (Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20) zeigen, dass die absoluten Werte des ökologischen Aufwandes deutlich von der Innenraumtemperatur abhängen. So verursacht der Bau, Betrieb und Rückbau eines Gebäudes, das auf 20 °C beheizt wird eine nur etwa zwei Drittel der Umweltauswirkung wie dasselbe Gebäude, das auf 23 °C geheizt wird. Die Optima der Dämmstärken liegen bei allen Raumtemperaturen relativ nahe beieinander. Berücksichtigt man ausserdem den flachen Verlauf der Kurven, kann unabhängig von der Raumtemperatur und vom Umweltindikator eine Dämmstärke von 25 bis 30 cm als optimal empfohlen werden. Praktisch jede Dämmstärke über 30 cm führt zu ähnlichen Umweltauswirkungen, Dämmstärken unter 20 cm hingegen führen zu einer Verschlechterung.

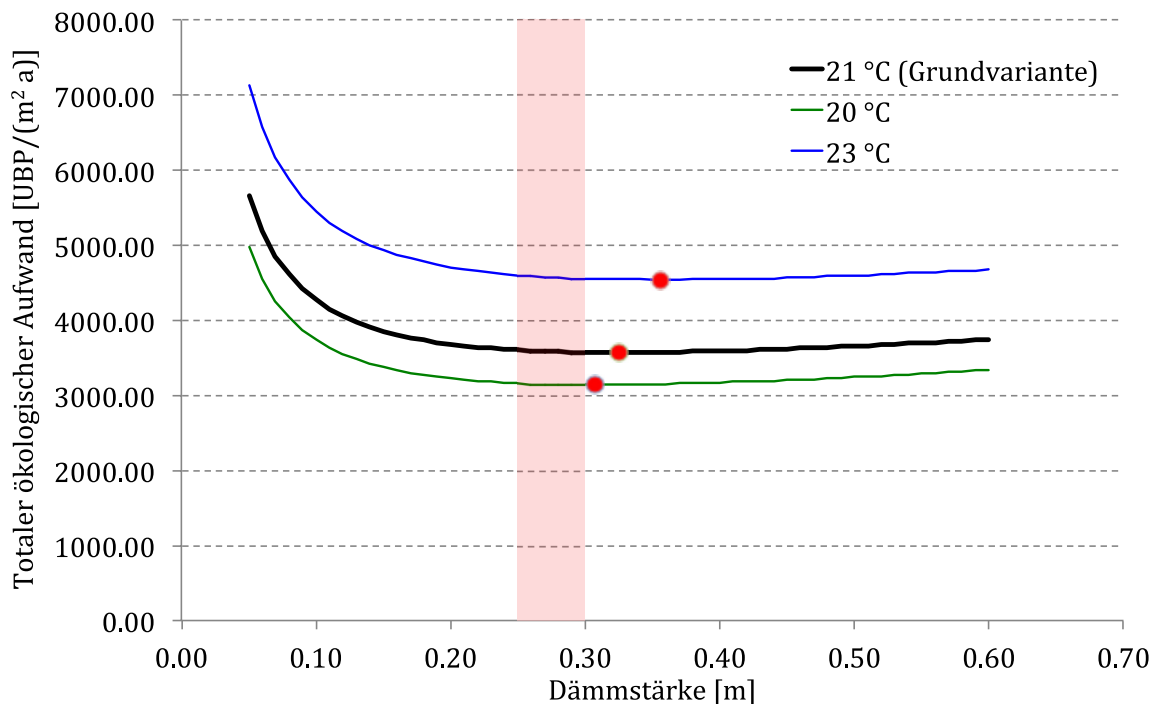


Abbildung 18: Ökologische Knappheit in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Innenraumtemperaturen.

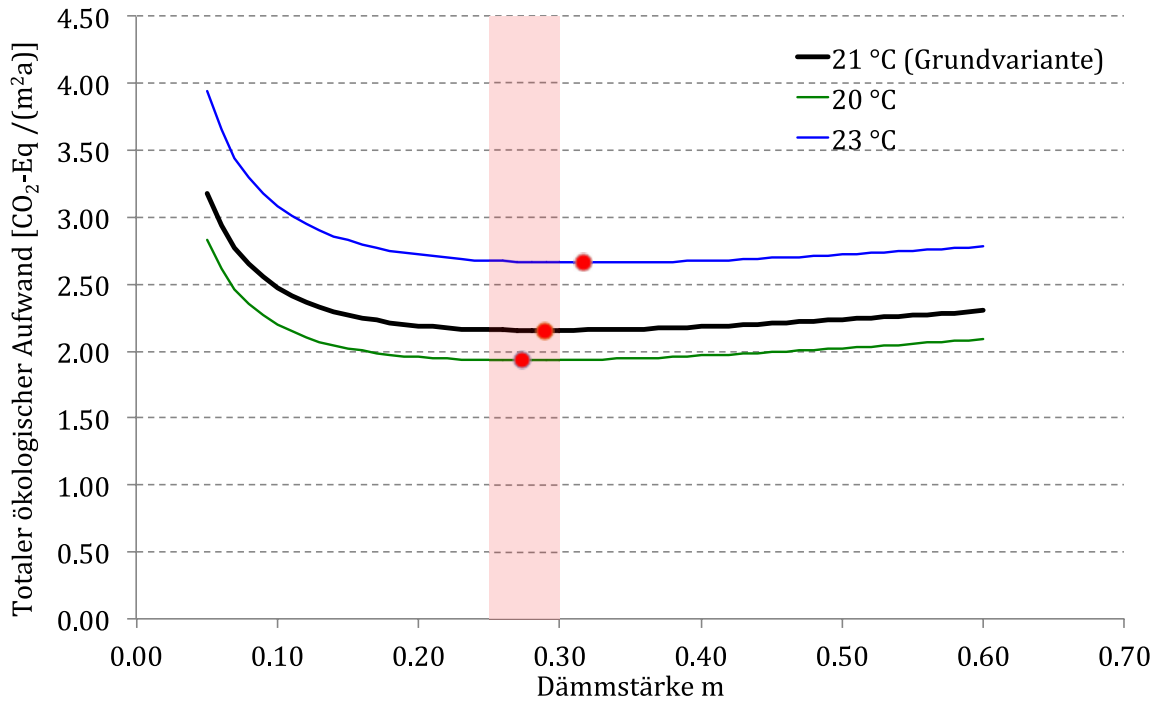


Abbildung 19: Treibhauspotenzial in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Innenraumtemperaturen.

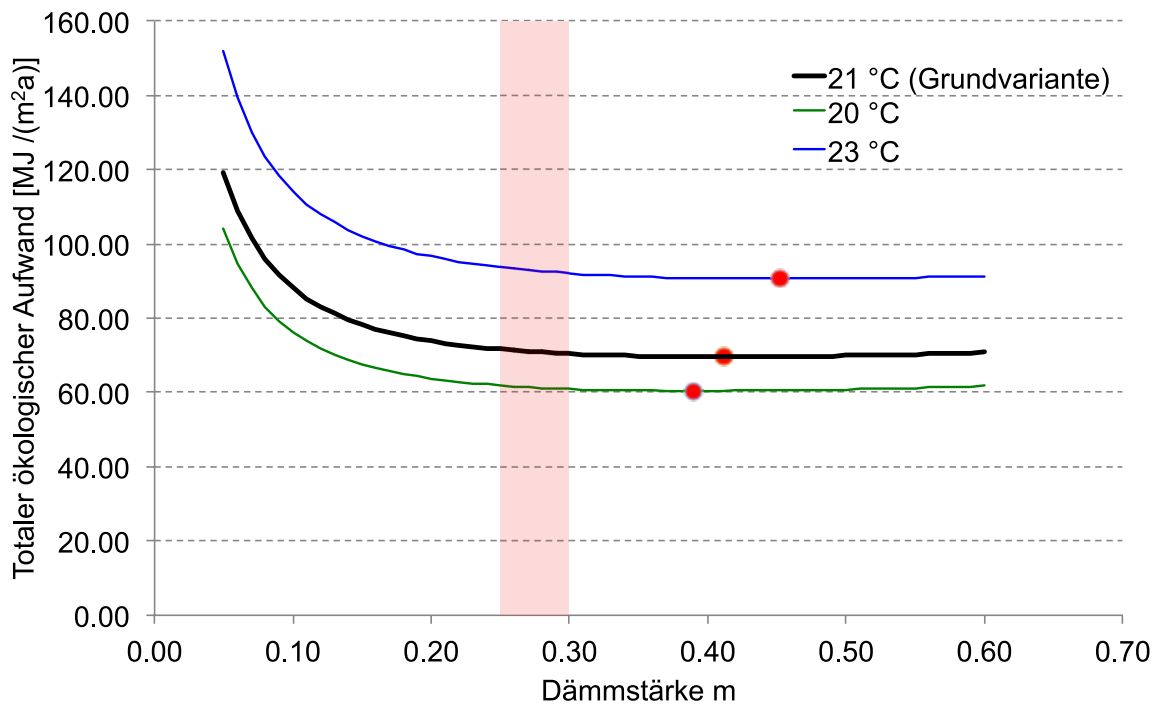


Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit der Dämmstärke für die verschiedenen Innenraumtemperaturen.

6.2 Ökobilanzergebnisse Unterkonstruktionen

Abbildung 21 vergleicht die Ökobilanzergebnisse der beiden Unterkonstruktionsvarianten in Abhängigkeit der Dämmstärke.

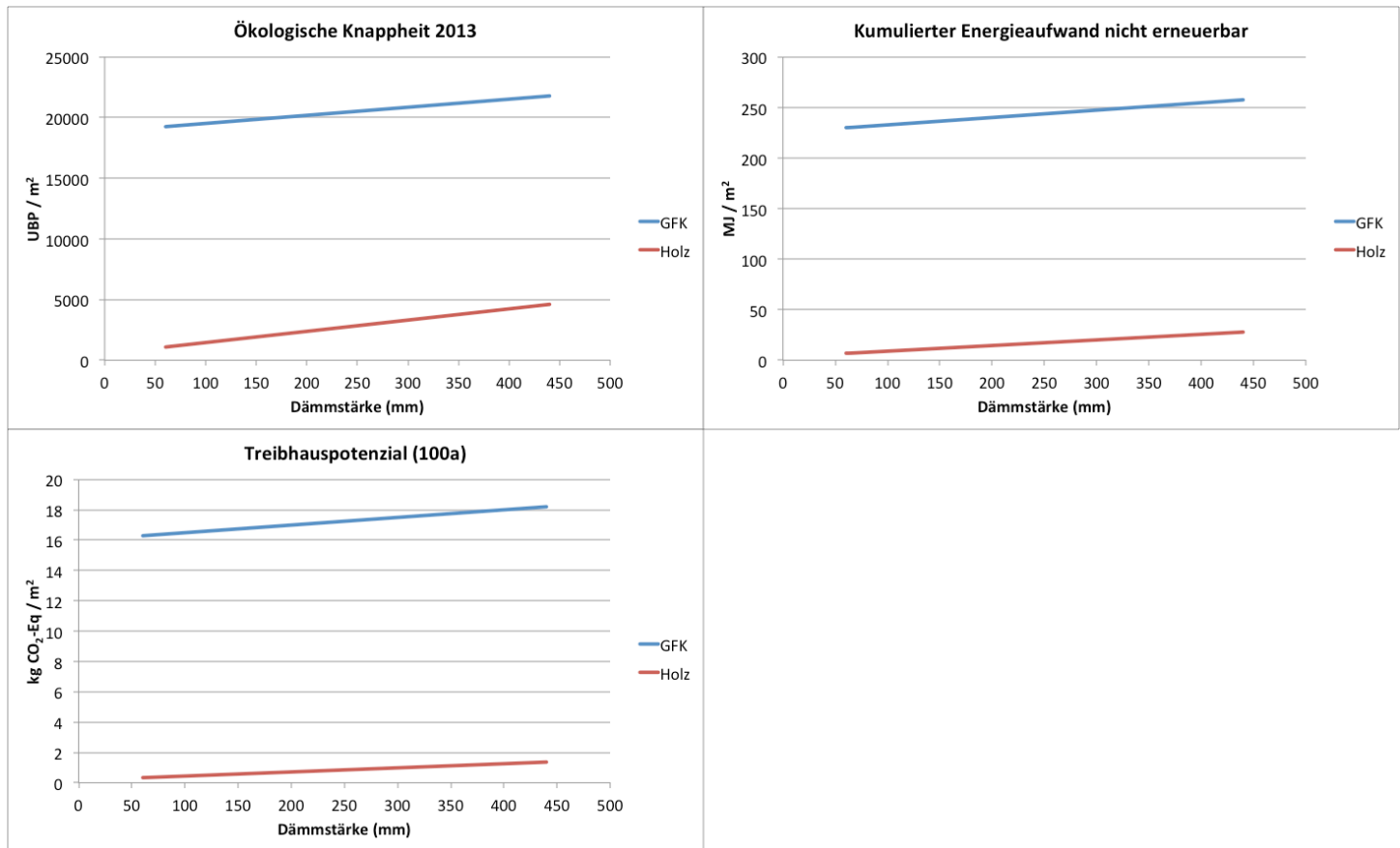


Abbildung 21: Ökobilanzergebnisse der Unterkonstruktionen in Abhängigkeit der Dämmstärke.

Alle Indikatoren sind für die Holz-Unterkonstruktion deutlich tiefer als für die GFK-Variante. Das liegt vor allem am Aluminiumbedarf für die GFK-Unterkonstruktion, der nicht von der Dämmstärke abhängig ist. Diese Ergebnisse sind prinzipiell vergleichbar mit den Resultaten aus Anhang C von Wohlgemuth et al. 2015. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Konstruktionen in der vorliegenden Studie deutlicher als in der Referenz.

Dieser Unterschied bedeutet, dass der absolute ökologische Aufwand einer Fassade mit GFK-UK etwas höher liegt als für eine vergleichbare Fassade mit Holz-UK. Allerdings werden die Unterschiede bei Betrachtung des ganzen Gebäudes deutlich weniger relevant (siehe dazu 6.1.4).

Für die Bestimmung der optimalen Dämmstärke sind nur die dämmstärkenabhängigen Terme – also die Steigungen der Linien in Abbildung 21 – relevant. Eine grössere Steigung führt zu einer tieferen optimalen Dämmstärke. Der Umstand, dass die Geraden für die Holz- und die GFK-Unterkonstruktion in Abbildung 21 fast parallel verlaufen erklärt darum, dass die optimale Dämmstärke in den beiden Varianten bezüglich aller Umweltindikatoren praktisch am selben Ort liegt.

7 Schlussfolgerung und Empfehlung

Die ökologisch optimale Dämmstärke eines 6-Familienhauses mit hinterlüfteter Fassade und Isover-Glaswollendämmung hängt deutlich von den Faktoren Standort, Heizsystem, Energieträger und etwas weniger deutlich vom spezifischen Dämmprodukt und der Innenraumtemperatur ab. Die Wahl der Unterkonstruktion hingegen verschiebt das Optimum praktisch nicht. Verallgemeinernd kann man sagen, dass bei einer Wahl der Dämmstärke zwischen 25 und 30 cm in allen betrachteten Varianten der ökologische Aufwand sehr nahe beim jeweiligen Optimum liegt. Das kommt daher, dass die Optima in sehr flachen (annähernd horizontalen) Bereichen der Kurven liegen, die den ökologischen Aufwand gegen die Dämmstärke darstellen. Nur wenn der Heizwärmebedarf klimatisch bedingt tief ist (z.B. in Lugano) und / oder mit einer Erdsonden-Wärmepumpe bereitgestellt wird, die mit nachhaltig erzeugtem Strom betrieben wird, kann man auch mit Dämmstärken unter 25 cm ein ökologisch optimales Gebäude erreichen. In allen anderen betrachteten Fällen führen Dämmstärken unter 25 cm zu einem deutlichen Anstieg der Umweltbelastung. Dämmstärken über dem optimalen Wert führen hingegen zu annähernd gleichbleibender Umweltauswirkungen. Mit anderen Worten: aus ökologischer Sicht kann man mit den Isover-Produkten praktisch nicht zu viel dämmen, wohl aber zu wenig.

Die Wahl des Heizsystems und des Energieträgers haben auch einen entscheidenden Einfluss auf die absolute Höhe der totalen ökologischen Auswirkungen des Gebäudes. Eine Wärmepumpe mit hoher JAZ ist unter den betrachteten Systemen klar die beste Wahl, vor allem wenn sie mit erneuerbarem Strom betrieben wird.

Die Wahl der Unterkonstruktion (Holz oder GFK) verändert die optimale Dämmstärke kaum und hat auch nur einen geringen Einfluss auf die absolute Höhe der totalen ökologischen Auswirkungen des Gebäudes.

Die Wahl des spezifischen Isover Dämmproduktes (PB F 030 oder PB F EXTRA 032) ist sowohl bezüglich der optimalen Dämmstärke als auch bezüglich der absoluten Lage der ökologischen Auswirkungen des Gebäudes nicht relevant.

Der Nutzer des Gebäudes hat über die Wahl der Innenraumtemperatur einen deutlichen Einfluss auf den absoluten Wert der Umweltauswirkungen des Gebäudes. Die ökologisch optimale Dämmstärke hingegen wird nur mässig von der Innenraumtemperatur beeinflusst.

8 Literaturverzeichnis

- Wohlgemuth D., von Gunten D., Zeyer C., Althaus H.J., Manz H. (2015) Optimale Dämmstärken bei Wohngebäuden bezüglich Minimierung der Umweltbelastung. Bundesamt für Energie, Bern
- KBOB (2014) Ökobilanzen im Baubereich 2009/1:2014. Empfehlungen Nachhaltiges Bauen. KBOB c/o Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern.
- ecoinvent centre 2010. <http://www.ecoinvent.org/database/older-versions/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>
- Frischknecht Rolf, Steiner Roland, Jungbluth Niels 2009: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Bundesamt für Umwelt, Bern: 188 S.
- Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013: Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1330: 256 S.

9 Anhang

9.1 Berechnung der Ökobilanzdaten der Strombereitstellung in den Szenarien „Energiesstrategie 2020“ und „Energiesstrategie 2050“

Die Energiesstrategie 2050 sieht für die Jahre 2020 und 2050 einen Strommix gemäss Tabelle 10 vor. Die in Tabelle 3 ausgewiesenen Umweltindikatoren pro MJ Strom entsprechen den mit den Anteilen gewichteten Summen der jeweiligen Umweltindikatoren aus KBOB 2014 (Tabelle 10).

Bezeichnung in (Wohlgemuth et al 2015)	Anteil in 2020	Anteil in 2050	Bezeichnung in (KBOB 2014)	Ökologische Knappheit 2013	Treibhaus- potenzial (100a)	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar
				UBP / MJ	kg CO ₂ -Eq / MJ	MJ / MJ
Elektrizität aus Wasserenergie	52%	59%	Wasserkraft	12.3	0.0035	0.0298
Elektrizität aus Kernkraft CH, inkl. Netz	27%	0%	Atomkraft	126	0.00655	4.21
Elektrizität aus Gaskraftwerken	2%	3%	Erdgaskombikraft- werk GuD	85.6	0.13	2.22
Elektrizität aus fossilen WKK (allokation Exergie)	2%	5%	Blockheizkraftwerk Gas	122	0.186	2.94
Elektrizität aus PV singel-Si, ab Netz	1%	15%	Photovoltaik	50.7	0.264	0.345
Elektrizität aus Windenergie	1%	6%	Windkraft	20.6	0.00733	0.094
Elektrizität aus Biomasse (BHKW allokation Exergie)	3%	12%	Blockheizkraftwerk Biogas	105	0.114	0.851
Elektrizität aus Kernkraft Europa, inkl. Netz	12%	0%	Atomkraft	126	0.00655	4.21

Tabelle 10: Strommix in den Szenarien der Energiesstrategie 2050 (nach Wohlgemuth et al. 2015) und deren Repräsentation mit Ökobilanzdaten aus (KBOB 2014)

9.2 Berechnung der Ökobilanzdaten für die Herstellung und Entsorgung der Wärmepumpensysteme sowie für den Kühlmittelbedarf und -verlust im Betrieb

Die verwendete Datenbasis (KBOB 2014) gibt die Umweltindikatoren für die Wärmepumpen pro Gerät bzw. pro Gerätemasse an, nicht aber pro MJ bereitgestellte Wärme. Letztere Werte werden aber in dieser Studie benötigt. Sie werden wie folgt berechnet:

Aus ecoinvent v2.2 werden die benötigten Mengen an Wärmepumpen pro MJ bereitgestellte Wärme entnommen. Ebenfalls aus ecoinvent v2.2 stammt die Information zum Bedarf an Erdsonden für die Erdsonden-Wärmepumpe und der Bedarf an Kühlmittel (R 134a), der zu 100% in die Luft emittiert wird. Alle Daten sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

	Luft/Wasser Wärmepumpe	Erdsonde Wärmepumpe	Einheit
# Wärmepumpe	1.11E-06	6.94E-07	Stk./MJ
R134a	4.00E-06	2.50E-06	kg/MJ
Erdsonde à 150 m Länge	0	2.78E-07	Stk / MJ
Emission HFC-134a in Luft	4.00E-06	2.50E-06	kg/MJ

Tabelle 11: Bedarf an Wärmepumpen, Erdsonden und Kühlmittel pro MJ Wärme aus ecoinvent v2.2

Diese Mengen werden mit den Faktoren aus Tabelle 12 multipliziert um die Ökobilanzergebnisse für die Wärmepumpen pro MJ bereitgestellte Wärme zu erhalten

Umweltindikator		Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW	Sole-Wasser- Wärmepumpe 8 kW	Erdsonden, für Sole-Wasser- Wärmepumpe	Luftemission HFC-134a	Production HFC 134a
Ökologische Knappheit 2013	UBP / Einheit	5'550'000	4'240'000	33'900	660	179'500
Treibhauspotenzial (100a)	kg CO ₂ -Eq / Einheit	3'000	2'200	27.8	1'430	103.5
Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ / Einheit	23'900	20'000	465	0	6.61
Einheit		Gerät	pro Gerät	pro m	pro kg	pro kg
Quelle		KBOB 2014	KBOB 2014	KBOB 2014	Frisknecht et al. 2013	ecoinvent v3.2

Tabelle 12: Umweltindikatoren für Wärmepumpen, Erdsonden und Kühlmittel aus KBOB 2014, Frisknecht et al. 2013 und ecoinvent v3.2, cut-off Systemmodell