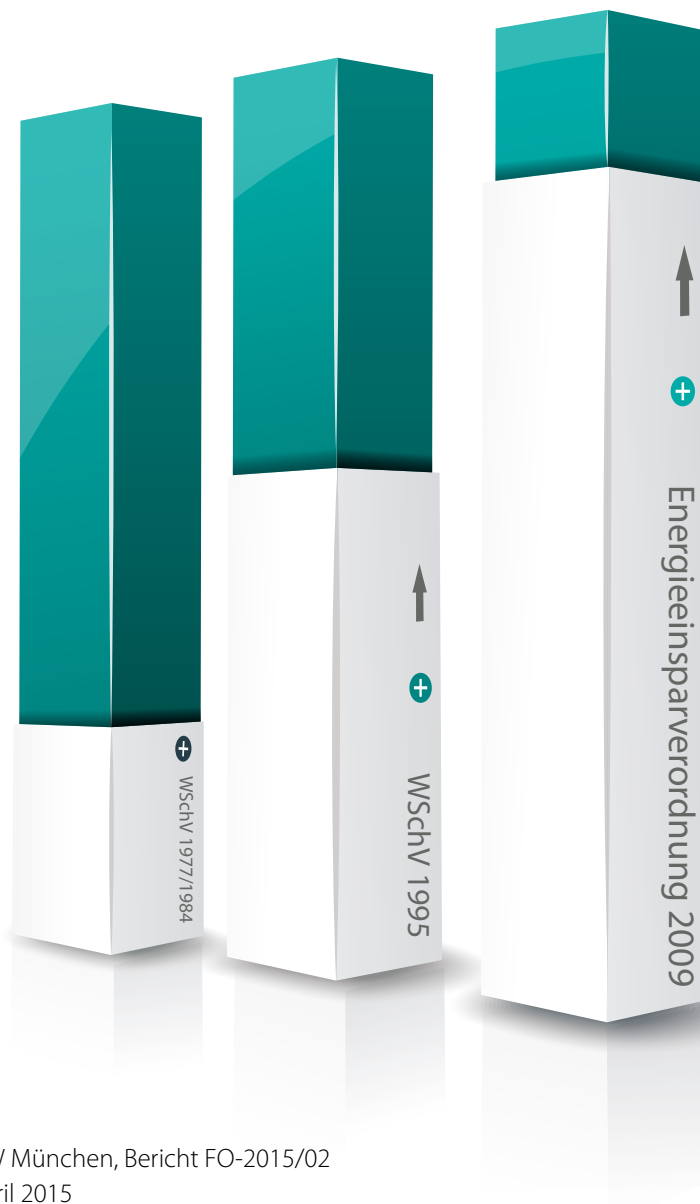


Studie

Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm
Dipl.-Ing. (FH) Christine Mayer
Dipl.-Ing. Christoph Sprengard



FIW Bericht FO-2015/02

Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm
Dipl.-Ing. (FH) Christine Mayer
Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Die Untersuchungen wurden durchgeführt im Auftrag des
Gesamtverbands Dämmstoffindustrie (GDI) e.V., Berlin

Eine – auch auszugsweise – Veröffentlichung des Berichts ist nur mit einer schriftlichen
Genehmigung des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. München erlaubt.

Gräfelfing, den 16. April 2015

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und
Bauteilen. Forschung, Entwicklung und Beratung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes.

Telefon: 089 85800-0 | Fax: 089 85800-40
Lochhamer Schlag 4 | 82166 Gräfelfing
info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de
Geschäftsführender Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Einleitung	6
2 Energiepreis- und Zinsentwicklung in Deutschland	8
2.1 Energiepreisentwicklung.....	8
2.2 Realzinsentwicklung.....	9
2.3 Nutzungsdauer	10
3 Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für wärmedämmende Maßnahmen	11
3.1 Investitionskosten: Sowieso-Kosten und energiebedingte Kosten	11
3.2 Definition und Ermittlung des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses	11
3.3 Ermittlung der Heizenergieeinsparungen	12
3.4 Beispiel: Dämmung einer Außenwand mit einem Wärmedämmverbundsystem.....	14
4 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit energetischer Maßnahmen	18
4.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung	18
4.2 Kapitalwert- und Annuitätenmethode	18
4.3 Sensitivitätsanalyse	20
5 Anwendungsbeispiele	24
5.1 Energetische Modernisierung einzelner Bauteile von Wohngebäuden.....	24
5.2 Anwendungsbeispiel: Einfamilienhaus aus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979 (Vollsanierung).....	31
Literaturverzeichnis	34
Abbildungsverzeichnis	35
Tabellenverzeichnis	37

Zusammenfassung

Lohnt es sich, ein Gebäude energetisch zu sanieren, zum Beispiel die Außenwand nachträglich zu dämmen? Können die Kosten der Sanierungsmaßnahme über eine Reduzierung der Heizkosten im Laufe der Zeit wieder eingespielt werden? In der Öffentlichkeit wird zum Teil heftig über den Sinn energetischer Sanierungsmaßnahmen diskutiert, denn Industrie, Wohnungswirtschaft, Eigentümer und Wissenschaftler kommen in dieser Frage zu recht unterschiedlichen Ergebnissen.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Rentabilität einer energetischen Sanierungsmaßnahme von vielen verschiedenen Faktoren abhängt: Das Außen- und Innenklima und der energetische Zustand der Bauteile vor und nach der Sanierung sind genauso entscheidend wie die tatsächlichen Sanierungskosten, Kreditkosten und Laufzeiten sowie die beabsichtigte Nutzungsdauer. Neben diesen projektspezifischen Faktoren sind zudem unstete Parameter wie Energiepreis und Energiepreissteigerung sowie Realzinsentwicklung wichtig. All diese Faktoren müssen in eine Wirtschaftlichkeitsbewertung zwingend einfließen und so genau wie möglich bestimmt sein. Allgemeingültige Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen zu treffen, ist daher äußerst schwierig.

Um dennoch zu einer realistischen Aussage zu gelangen, wurde eine sogenannte Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Diese wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse zeigt, welche Eckdaten in 95 Prozent aller Fälle zutreffen. Die Sensitivität bestimmter Eingabedaten und die Unsicherheiten von Wirtschaftlichkeitsberechnungen für energetische Sanierungsmaßnahmen werden dabei ermittelt und nicht, wie sonst üblich, ausgespart oder isoliert betrachtet. Die Studie kommt zu dem Schluss: Wärmedämmung rechnet sich.

Angabe der Amortisationszeit in Zeiträumen

Aufgrund des starken Einflusses unsicherer Randbedingungen, wie beispielsweise der Energiepreisentwicklung, sollte die Amortisationszeit von energetischen Maßnahmen zukünftig in Zeiträumen angegeben werden. Dies ist natürlich nur unter den derzeit geltenden Randbedingungen gültig. Diese sind:

- Genauigkeit der Berechnung für die energetische Einsparung: ± 20 Prozent
- Realzins: 0 bis 3 Prozent
- Ausgangsenergiepreis: 0,06 bis 0,16 Euro pro Kilowattstunde
- Jährliche Energiepreissteigerung: 2,5 bis 7,5 Prozent

Tabelle Fazit: Durchschnittliche Amortisationszeiten unterschiedlicher Dämmmaßnahmen

Bauteil	Typischer Ausgangs-U-Wert [W/(m ² K)]	Amortisationszeit [a]	
		Mittelwert	Bereich mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit
Außenwand WDVS (EPS und MF): Energiebedingte Kosten	1,4	6	4 bis 10
Kellerdecke, Dämmung von unten mit Bekleidung	1,3	8	6 bis 13
ohne Bekleidung	1,3	6	6 bis 10
Steildach (Sanierung von außen inkl. kompletter Neueindeckung) energiebedingte Kosten	0,9	6	6 bis 16
Flachdach: energiebedingte Kosten	0,9	6	6 bis 13
Oberste Geschoßdecke begehbar	0,9	6	6 bis 16
nicht begehbar	0,9	2	2 bis 5

1 Einleitung

Das Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi/BMU, 2010) sieht einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 vor. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, soll der Wärmebedarf von Gebäuden bis 2020 um 20 Prozent und der Primärenergiebedarf bis 2050 um 80 Prozent gegenüber 2008 gesenkt werden. Dazu soll die Sanierungsrate von jährlich 1 Prozent auf 2 Prozent erhöht werden. Die energetische Sanierung des Gebäudebestands wird in dem Energiekonzept beschrieben als „wichtigste Maßnahme, um den Verbrauch an fossilen Energieträgern nachhaltig zu mindern und die Abhängigkeit von Energieimporten zu reduzieren“ (ebd., 27).

Um sich dem Umfang dieser Zielsetzungen bewusst zu werden, ist der Gebäudebestand in Deutschland genauer zu betrachten. Etwa 70 Prozent der insgesamt 18,2 Millionen Wohngebäude in Deutschland wurden vor 1979 errichtet (Bigalke, 2012). Gemäß einer Untersuchung des Instituts Wohnen und Umwelt (Diefenbach, 2010) liegt der Modernisierungsfortschritt dieser Bestandsgebäude bei circa 25 bis 30 Prozent. In Deutschland sind also an knapp neun Millionen Altbauten noch keine oder nur geringfügige Verbesserungen des Wärmeschutzes durchgeführt worden. Zusammenfassend muss man feststellen, dass jedes zweite Wohngebäude in Deutschland über einen unzureichenden Wärmeschutz verfügt.

In Tabelle 1 sind die prozentualen Anteile der gedämmten Bauteilflächen an der jeweils insgesamt vorhandenen Bauteilfläche entsprechend den Angaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, 2012) zusammengefasst. Der Anteil gedämmter Außenwandflächen beträgt bei Ein- und Zweifamilienhäusern etwa 35 Prozent. Beim überwiegenden Teil der Gebäudealtersklassen vor 1979 befindet sich das energetische Niveau auf einem vor der Wärmeschutzverordnung von 1977 üblichen Standard (Loga/Diefenbach/Born, 2011). Sanierungen, die einen besseren energetischen Standard aufweisen, sind in diesen Altersklassen selten. Die Gebäudealtersklassen ab 1979 haben zwar größtenteils einen Standard, der der Wärmeschutzverordnung von 1977 oder 1984 entspricht; Modernisierungen, die eine bessere energetische Effizienz erreichen, sind in diesen Gebäudealtersklassen aber ebenfalls selten.

Tabelle 1: Prozentualer Anteil der gedämmten Bauteilfläche an der jeweiligen gesamten Bauteilfläche

	Anteil der gedämmten Bauteilfläche an der gesamten Bauteilfläche [%]		
	Außenwand	Dach/Obergeschossdecke	Fußboden/Kellerdecke
Altbau mit Baujahr bis 1978	27,8	61,9	19,9
Baujahr 1979 bis 2004	49,7	88,9	59,2
Neubau ab 2005	64,0	98,2	85,3
Insgesamt	35,8	71,2	33,8

Die Dämmung der obersten Geschossdecke oder des Daches der älteren deutschen Wohngebäude ist mit über 60 Prozent bei den Wohngebäuden bis Baujahr 1978 bereits weit fortgeschritten. Insgesamt sind fast zwei Drittel aller Dachflächen gedämmt, jedoch nicht unbedingt auf einem heutzutage sinnvollen energetischen Standard. Diese hohe Quote ist überwiegend durch die nachträgliche Dämmung erreicht worden. Die Dämmung der Gebäude nach unten, zur Bodenplatte oder Kellerdecke, ist erst bei knapp 20 Prozent der älteren Wohngebäude realisiert worden. Wie bei der Dämmung der obersten Geschossdecke oder des Daches ist die Dämmquote nur in den jüngeren Altbauten (Baujahr 1969 bis 1978) erhöht, was wiederum mit der bereits bei der Errichtung eingebrachten Dämmung begründet werden kann.

Für die Sanierung der Gebäude – und somit für die Umsetzung der zuvor erwähnten geforderten Sanierungsraten – ist letztendlich der Gebäudeeigentümer verantwortlich. Dieser muss entscheiden, wann und in welchem Umfang die Instandsetzungen oder energetischen Sanierungen am Gebäude durchgeführt werden. In den zunehmend negativen Berichterstattungen der Medien wird die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit von Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle jedoch immer wieder angezweifelt.

Zur Frage nach der Rentabilität für den Gebäudeeigentümer bei der Umsetzung der politischen Zielsetzungen trifft das Energiekonzept (BMWi/BMU, 2010, 27) folgende Aussage: „Dies ist nicht zum Nulltarif zu haben, sondern erfordert erhebliche Investitionen, die aber langfristig auch zu einer Kostenersparnis führen.“

Ob wärmedämmende Maßnahmen an der Gebäudehülle wirtschaftlich sinnvoll sind und mit welcher Genauigkeit eine Aussage dazu angesichts der gegebenen Unsicherheiten überhaupt möglich ist, soll in dieser Studie untersucht werden.

2 Energiepreis- und Zinsentwicklung in Deutschland

2.1 Energiepreisentwicklung

Sanierungsmaßnahmen zur Senkung des Heizwärmebedarfs helfen nicht nur, die energetischen Einsparziele zu erreichen, sondern reduzieren auch die Energiekosten für die Gebäudebewohner. Um die Energiekosten über den gesamten Lebenszyklus der Dämmmaßnahme zu berücksichtigen, ist die Betrachtung der Energiepreisentwicklung von großer Bedeutung. Mithilfe von Abschätzungen und Annahmen zur jährlichen Energiepreisteigerung können die Energieeinsparungen dann in Kosteneinsparungen umgerechnet werden. Wie sich der Energiepreis tatsächlich entwickeln wird, ist angesichts der langen Betrachtungszeiträume allerdings sehr unsicher.

In Abbildung 1 sind die jährlichen Energieausgaben eines privaten Haushalts in Deutschland für den Zeitraum 1996 bis 2012 (BMWi, 2014) dargestellt. Erkennbar ist ein deutlicher Aufwärtstrend. Vergleicht man die aktuellen Energiekosten für Raumwärme aus dem Jahr 2012 mit denen aus dem Jahr 1996, so ist eine Preissteigerung von knapp 50 Prozent zu verzeichnen.

Abbildung 1: Entwicklung der Energiekosten eines privaten Haushalts in Deutschland (BMWi, 2014)

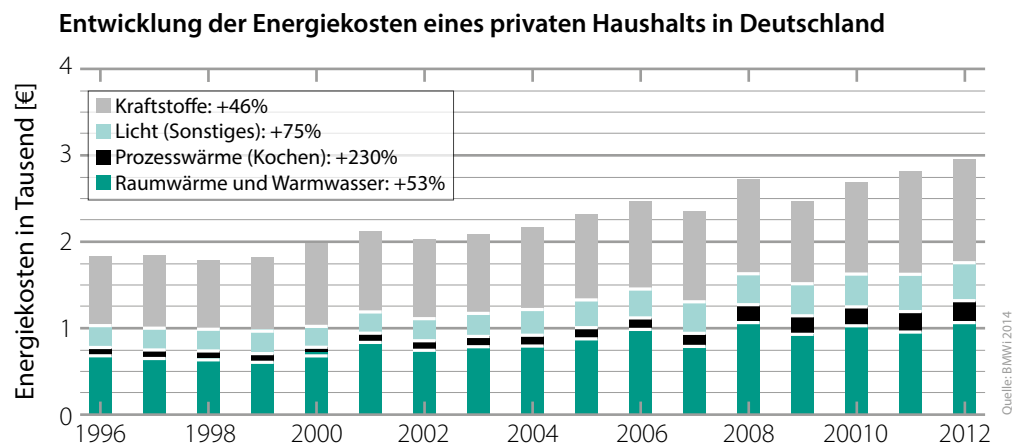
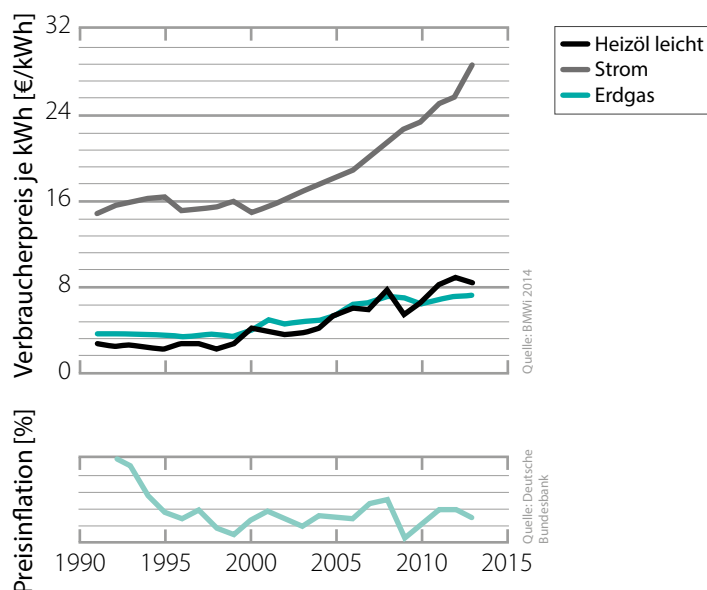


Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Verbraucherpreise der Haushalte für eine Kilowattstunde Energie von 1990 bis heute. In dieser Zeit haben sich die Preise für Strom und Erdgas mehr als verdoppelt, für Heizöl sogar verdreifacht.

Betrachtet man den Verlauf der Preissteigerung, so fällt auf, dass die Verbraucherpreise bis zum Jahr 2000 relativ stabil waren. Erst dann setzte eine relativ konstante und deutliche Erhöhung der Energiepreise ein. Aktuell ist vor allem beim Ölpreis ein Abwärtstrend zu beobachten. Im Jahr 2014 zahlte man bis Ende September nahezu konstant 80 Euro pro 100 Liter; seit September aber ist der Preis stetig gefallen, im Januar 2015 lag er bei 55 Euro pro 100 Liter. Das hat natürlich kurzfristig Auswirkungen auf die Amortisation von Sanierungsmaßnahmen. Trotz derzeit niedriger Preise soll im Folgenden von einem durchschnittlichen Energiepreis von 0,08 Euro pro Kilowattstunde ausgegangen werden.

Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Verbraucherpreise privater Haushalte für Energie (BMWi, 2014) im Vergleich zur Entwicklung des Verbraucherindex im selben Zeitraum (Quelle: Deutsche Bundesbank)

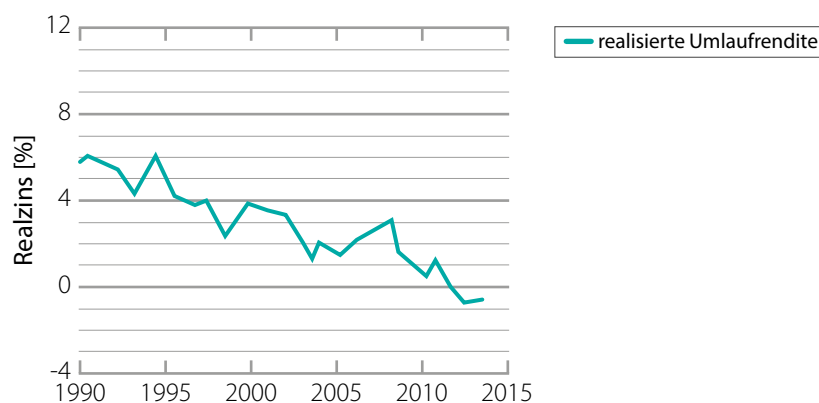


2.2 Realzinsentwicklung

Für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden muss der Hausbesitzer in der Regel relativ große Investitionen tätigen. Welche Zinserträge wären dagegen zu erwarten, wenn der Eigentümer dieses Geld auf einer Bank anlegen würde? Dies kann mithilfe der Umlaufrendite bewertet werden.

Die Umlaufrendite ist die durchschnittliche Rendite aller im Umlauf befindlichen inländischen festverzinslichen Bundeswertpapiere mit einer Laufzeit von mindestens 3 und maximal 30 Jahren. Ein dafür immer wieder verwendetes Konzept ist der sogenannte Realzins. Hierbei wird eine Inflationsrate vom nominalen Zins abgezogen, um eine inflationsbereinigte Bewertung zu ermöglichen. Wie stark der Realzins schwanken kann, zeigt sich anhand der Zinszyklen mit Aufschwung- und Abschwungphasen, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Mit der Finanzkrise 2008 rutschte der Realzins in Deutschland auf ein Niveau von unter zwei Prozent pro Jahr. Seit einigen Monaten liegt dieser sogar im negativen Bereich.

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der realisierten Umlaufrendite



2.3 Nutzungsdauer

Je länger der betrachtete Zeitraum ist, desto unsicherer werden die Aussagen zur Entwicklung der Energiepreise und Zinssätze. Die üblichen Lebensdauern von Dämmmaßnahmen beziehungsweise die Sanierungszyklen liegen mit rund 30 bis 60 Jahren (Tabelle 2) deutlich über der typischen Laufzeit von Hypothekendarlehen von 10 bis 20 Jahren. Aufgrund der langjährigen Erfahrung mit Dämmstoffen wird generell von einer hohen Lebensdauer ausgegangen. Gutachten bestätigen, dass bei ordnungsgemäß verlegten Dämmstoffen auch nach mehreren Jahrzehnten keine messbaren Änderungen vorliegen. Aus diesem Grund werden für gebräuchliche Dämmstoffe in der Normung und bei der Erteilung einer europäischen technischen Zulassung Lebensdauern von 50 Jahren angesetzt.

Tabelle 2: Nutzungsdauer von Dämmmaßnahmen an bestimmten Bauteilen nach Fouad (2010) und eigenen Abschätzungen

Bauteil	Bereich [a]	Durchschnitt [a]
Wärmedämmung (im Flachdach/ Warmdach)	30–60	45
Steildach	40–60	50
Umkehrdach	40–60	50
Decke, Fußboden	30–100	65
Außenwand hinter Bekleidung	30–60	45
Wärmedämmverbundsystem	30–50	40
Kerndämmung	30–60	45
Unter der tragenden Gründungsplatte	50–100	75
Perimeterdämmung	30–100	65
Dämmung für die technische Gebäudeausrüstung	5–25	15

3 Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für wärmedämmende Maßnahmen

Energiesparende Maßnahmen kosten Geld. Kosten werden zum Hindernis für eine energetische Sanierung, wenn den Eigentümern oder Investoren die finanziellen Möglichkeiten dazu fehlen. Die entscheidende Frage bei allen energiesparenden Maßnahmen lautet, ob sich die im Moment der Bauerstellung oder Sanierung aufzubringenden Mehrkosten durch eine Reduzierung der Brennstoffkosten im Laufe des Nutzungszeitraums des Gebäudes wieder einspielen lassen.

Wie bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen allgemein, so sind auch hier die zu berücksichtigenden Kostengruppen zu definieren. Diese bilden die Grundlage für die Berechnung einer ökonomischen Kenngröße, die, je nach Kalkulationsmethode, die Wirtschaftlichkeit der energiesparenden Maßnahme beschreibt. So resultieren aus der Investition im Laufe der Nutzungsdauer ständig anfallende Einnahmen- und Ausgabenströme, die zu einer Amortisation der getätigten Investitionen führen sollen.

Als Basis für eine Wirtschaftlichkeitsbeurteilung einer Investition in eine Dämmmaßnahme sind die Bau- und Materialkosten eine entscheidende Größe. Diese können bei konkreten Vorhaben über das Einholen verschiedener Angebote abgeschätzt werden.

3.1 Investitionskosten: Sowieso-Kosten und energiebedingte Kosten

Bei der Kostenbetrachtung einer energetischen Sanierung muss man zwischen den sogenannten Sowieso-Kosten und den energiebedingten Kosten unterscheiden. Immer dann, wenn eine „Sowieso-Maßnahme“ ansteht, also wenn die Fassade in die Jahre gekommen ist, das Dach einen Schaden hat oder die Fenster ausgetauscht werden müssen, sollte zusammen mit den notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen auch eine energetische Sanierung erfolgen. Man spricht auch vom Kopplungsprinzip.

Von den Vollkosten der Sanierung zieht man die Sowieso-Kosten, also die Kosten für die Instandsetzung, ab und erhält dann die energiebedingten Mehrkosten als Teilkosten. Ein einfaches Beispiel: Bei verputzten Fassaden sind in der Regel in einem Zeitraum von 30 und 50 Jahren Instandsetzungsarbeiten in größerem Umfang, etwa die Erneuerung des Außenputzes, notwendig. Wenn eine Fassade zur Sanierung ansteht, dann entstehen Sowieso-Kosten beispielsweise für das Gerüst, die Malerarbeiten und den Putz. Die Mehrkosten für die Dämmung und die sich daraus ableitenden Nebenarbeiten ergeben die energiebedingten Mehrkosten. Diese Mehrkosten können den erzielbaren Einsparungen an Heizenergie gegenübergestellt werden.

3.2 Definition und Ermittlung des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses

Eine Erhöhung der Wärmedurchlasswiderstände beziehungsweise ein Herabsetzen des Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile führt in erster Linie zu einer Reduktion des Heizenergieverbrauchs, wodurch die jährlich anfallenden Betriebskosten eines Gebäudes gesenkt werden können. Dies lässt sich mit dem

Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis (MNV) beschreiben. Darunter versteht man in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Mehrkosten infolge eines verbesserten Wärmeschutzes (energiebedingte Mehrkosten) zur jährlichen Heizenergieeinsparung. Das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis beschreibt also die energiebedingten Kosten pro jährlich eingesparte Kilowattstunde Heizenergie. Je kleiner das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis, desto effektiver beziehungsweise wirtschaftlicher ist eine Dämmmaßnahme.

$$MNV = \frac{\text{Mehrkosten für die energetische Maßnahme [€/m}^2\text{]}}{\text{Heizenergieeinsparung [} \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}} \text{]}}$$

3.3 Ermittlung der Heizenergieeinsparungen

Die zu erwartenden Heizenergie- und somit Kosteneinsparungen durch eine Sanierungsmaßnahme können überschlägig mithilfe der Gradtagzahl berechnet werden. Die jährliche Gradtagzahl wird durch Aufsummierung der Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Raumtemperatur ermittelt und in der Einheit Kelvin * Tage [Kd] angegeben. Dabei werden jedoch nur die Tage berücksichtigt, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt. Die Heizgrenztemperatur wird abhängig vom energetischen Zustand des Gebäudes gewählt. Bei einem energetisch guten Gebäude (zum Beispiel einem Passivhaus) wird eine Heizgrenztemperatur von circa zehn Grad Celsius angenommen. Das bedeutet, dass erst ab einer mittleren Tagestemperatur der Außenluft von unter zehn Grad Celsius geheizt werden muss. Bei einem unsanierten Bestandsgebäude liegt die Heizgrenztemperatur bei 15 Grad Celsius. Um die spezifischen klimatischen Bedingungen einer Region zu berücksichtigen, gibt es regional unterschiedliche Kennwerte für die Gradtagzahl. Des Weiteren muss eine Annahme zur Raumtemperatur getroffen werden. Raumtemperatur und Heizgrenztemperatur werden mit der Gradtagzahl angegeben (zum Beispiel steht „G20/15“ für 20 Grad Celsius Raumtemperatur und 15 Grad Celsius Heizgrenztemperatur).

Um den Transmissionswärmeverlust eines Gebäudes abzuschätzen, multipliziert man die Gradtagzahl mit dem Wärmestrom der Gebäudehülle in Watt pro Kelvin. Bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs sind solare und innere Wärmegewinne separat zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden die zu erwartenden Heizenergieeinsparungen im Vergleich zum unsanierten Zustand ($U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) in Abhängigkeit von dem nach der Sanierung erzielten U-Wert aufgetragen. Um die klimatischen Unterschiede innerhalb Deutschlands und deren Einfluss auf das Einsparpotenzial darzustellen, werden die Berechnungen mit den in Tabelle 3 dargestellten Gradtagzahlen durchgeführt.

Tabelle 3: Gradtagzahlen für Deutschland im Überblick

	Ort	Jahresmitteltemperatur [°C]	Gradtagzahl G20/15 [Kd]
Minimalvariante (warmes Klima)	Rheinstetten	10,8	3.213
Maximalvariante (kaltes Klima)	Fichtelberg	3,4	5.996
Langjähriges Mittel in Deutschland			3.546

Zudem wird als Vergleich eine Variante mit dem Heizperiodenverfahren berechnet. Dieses ist definiert mit einer Innentemperatur von 19 Grad Celsius sowie einer Heizgrenztemperatur von 10 Grad Celsius ($G19/10 = 2.900 \text{ Kd}$).

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dieser Berechnung dargestellt. Die Bandbreite der Heizenergieeinsparungen liegt bei der Sanierung einer Außenwand ($U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) auf Niveau der Energieeinsparverordnung ($U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) zwischen 80 und 170 Kilowattstunden pro Quadratmeter. Die Relevanz der gewählten Berechnungsmethode und der Gradtagzahl für die Abschätzung von Energieeinsparungen wird dabei deutlich. Dies wirkt sich auf das jeweilige Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis aus. Abbildung 5 zeigt die Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisse, die sich bei einer gemäß Energieeinsparverordnung sanierten Außenwand in Abhängigkeit von den Investitionsmehrkosten ergeben.

Um die Energie- und damit auch die Kosteneinsparungen einer Sanierungsmaßnahme nicht überzubewerten, wird für die nachfolgenden Berechnungen das Heizperiodenverfahren genutzt.

Abbildung 4: Heizenergieeinsparungen in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr in Abhängigkeit vom erzielten U-Wert (Annahme: U-Wert im Bestand = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

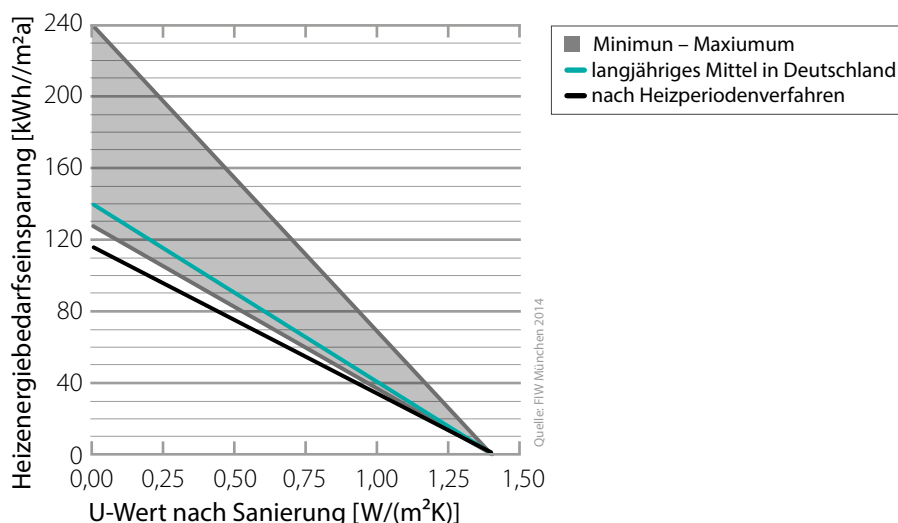
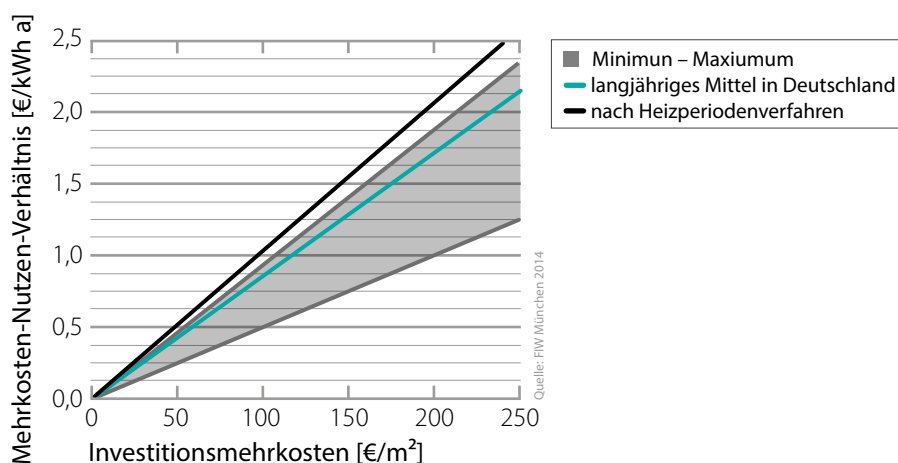


Abbildung 5: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis als Funktion der Investitionsmehrkosten für die unterschiedlichen Klimaannahmen (Annahme: U-Wert im Bestand = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; U-Wert nach Sanierung = $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)



3.4 Beispiel: Dämmung einer Außenwand mit einem Wärmedämmverbundsystem

Natürlich sind die vorgestellten Einsparpotenziale mit Kosten für die hierfür notwendigen Maßnahmen verbunden. Die Angaben für Kosten der energetischen Sanierung sind nicht eindeutig und unterscheiden sich erheblich in den verschiedenen vorliegenden Studien. Diese Unterschiede sind zum Teil sachlich bedingt. Exakte Kostenangaben können sich immer nur auf ein konkretes Gebäude beziehen.

Eine Studie des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung hat repräsentative Kosten für Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand auf der Basis gewerksbezogener Kostenfeststellungen von über 500 abgerechneten Wohngebäudesanierungen ermittelt (Hinz, 2012). Dabei wurde – neben den Dämmmaßnahmen an der opaken Gebäudehülle – auch der Ersatz der Gebäudetechnik betrachtet. Zur Auswertung wurden durch Regressionsanalyse verschiedene Kostenfunktionen entwickelt, mit denen die zu erwartenden Vollkosten sowie die energiebedingten Mehrkosten einer Sanierungsmaßnahme unter Einfluss der Dämmstärke ermittelt werden können. Die energiebedingten Mehrkosten sind dabei derjenige Anteil an den Vollkosten, der ausschließlich auf die Dämmmaßnahme zurückzuführen ist. Darin enthalten sind zum Beispiel das Dämmmaterial sowie der Arbeitsaufwand zum Anbringen der Dämmung. Die nachträgliche Dämmung einer Außenwand mit einem Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol (Anzahl Kostenfeststellungen: 205) und aus Mineralfaser (Anzahl Kostenfeststellungen: 33) wurde in der Studie statistisch ausgewertet.

In Abbildung 6 sind diese spezifischen Bruttokosten in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke für ein Wärmedämmverbundsystem dargestellt. Dabei kann man erkennen, dass der „Sockel“ der ohnehin erforderlichen Sanierungsmaßnahmen bei circa 70 Euro pro Quadratmeter liegt und unabhängig von der Art des Dämmstoffs ist. Die energiebedingten Mehrkosten durch den Dämmstoff und die dadurch erforderlichen Nebenkosten steigen mit der Dämmstoffstärke an und sind abhängig vom Dämmstoff.

Abbildung 6: Aufteilung der spezifischen Bruttokosten für ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke (nach Hinz, 2012)

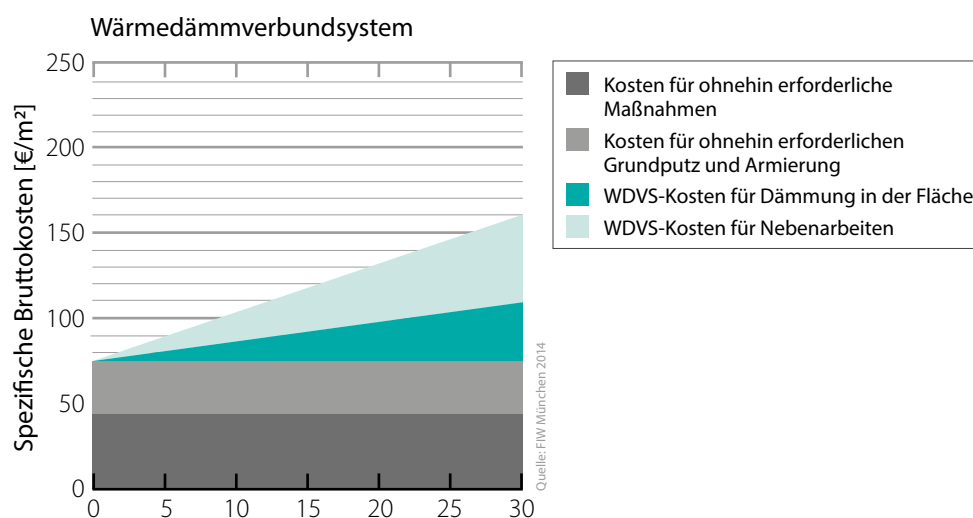


Tabelle 4 zeigt, wie die Bruttovollkosten für ein geklebtes und gegebenenfalls gedübeltes Wärmedämmverbundsystem schwanken. Erfasst sind alle spezifischen Vollkosten für Wärmedämmverbundsysteme mit allen Systemkomponenten sowie alle relevanten Nebenkosten, wie zum Beispiel für die Baustelleneinrichtung sowie für die Demontage alter und die Montage neuer Außenfensterbänke. Nicht enthalten sind dagegen die Kosten für das Gerüst.

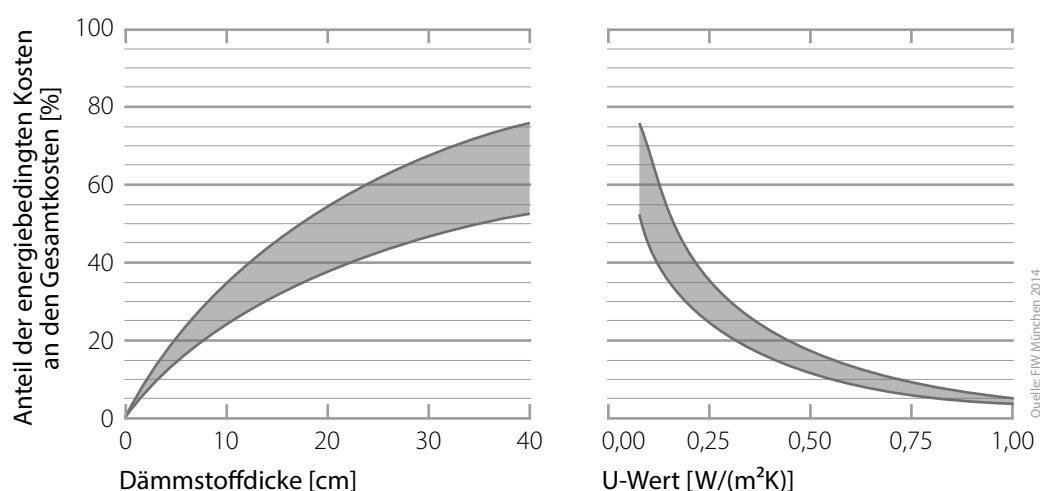
Tabelle 4: Baupreise einer nachträglichen Dämmung der Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem, geklebt und gegebenenfalls gedübelt, $U_{AW} \approx 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf Basis der Daten von Hinz (2012)

Positionen	€/m ²	
	von	bis
Wärmedämmverbundsystem aus Polystyrol-Hartschaum-Platten, geklebt, mit mineralischem Oberputz. Armierungsschicht mit Glasfasergewebe ausführen. EPS, WLG 035, WAP, B1, 140 mm	90	150
Wärmedämmverbundsystem aus Mineralwolleplatten, geklebt, mit mineralischem Oberputz. Glasfasergewebe in mineralischen Armierungsputz einarbeiten und Oberfläche planspachteln. MW, WLG 040, WAP-zh, A1, 160 mm	100	160

Anteil der energiebedingten Mehrkosten an den Gesamtkosten

Basierend auf den Kostenentwicklungen aus Abbildung 6 und dem Kostenspektrum aus Tabelle 4 lassen sich die relativen Anteile der energiebedingten Mehrkosten an den Gesamtkosten ableiten. In Abbildung 7 sind sie für eine Bestandsfassade mit einem U-Wert von 1,4 Watt pro Quadratmeter und Kelvin in Abhängigkeit von der Dämmstoffstärke sowie vom U-Wert nach Sanierung der Konstruktion dargestellt. Deutlich wird: Mit größer werdender Dämmstoffdicke beziehungsweise kleinerem U-Wert steigen die anteiligen energiebedingten Kosten auf 50 bis 80 Prozent an. Im üblichen Dämmbereich von 10 bis 20 Zentimetern beziehungsweise bei einem anzustrebenden U-Wert nach Sanierung von 0,24 Watt pro Quadratmeter und Kelvin liegt der Anteil der energiebedingten Mehrkosten bei etwa 30 bis 40 Prozent.

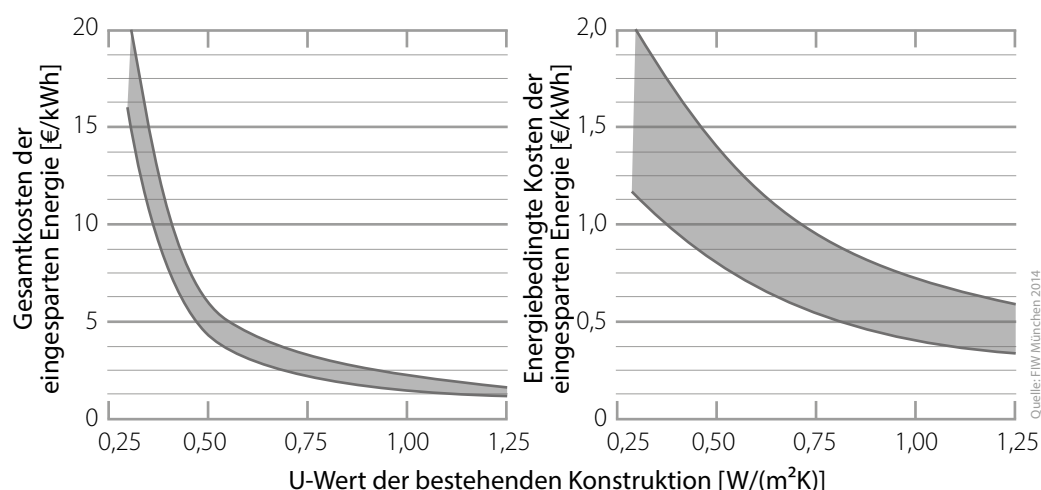
Abbildung 7: Anteil der energiebedingten Kosten für ein Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke (links) sowie vom U-Wert (rechts) (Annahme: U-Wert der Bestandsfassade = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)



Abhängigkeit des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses vom energetischen Zustand im Bestand

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der Gesamtkosten sowie der energiebedingten Kosten pro eingesparte Energie einer nachträglichen Fassadendämmung auf Niveau der Energieeinsparverordnung in Abhängigkeit vom U-Wert des bestehenden Bauteils. Mit zunehmendem Wärmeschutz der bestehenden Außenwand nehmen die Gesamtkosten der eingesparten Energie deutlich zu (linke Grafik). Hier dominieren die Sowieso-Kosten. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,8 bis 1,2 Watt pro Quadratmeter und Kelvin liegen die Gesamtkosten pro eingesparte Energie bei rund 2 bis 3 Euro pro Kilowattstunde. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,4 Watt pro Quadratmeter und Kelvin steigen diese Kosten auf fast 10 Euro pro Kilowattstunde. Die rein energiebedingten Mehrkosten pro eingesparte Energie bei einer typischen Außenwand im Bestand (Ausgangs-U-Wert zwischen 0,8 und 1,2 Watt pro Quadratmeter und Kelvin) betragen bei Sanierung gemäß den Anforderungen der Energieeinsparverordnung etwa 0,30 bis 0,70 Euro pro Kilowattstunde (rechte Grafik).

Abbildung 8: Verlauf der Gesamtkosten sowie der energiebedingten Kosten pro eingesparte Energie einer nachträglichen Fassadendämmung in Abhängigkeit vom U-Wert des bestehenden Bauteils. Saniert wird entsprechend den Anforderungen der Energieeinsparverordnung.



Abhängigkeit des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses vom energetischen Zustand nach Sanierung

Weiterführend soll nun untersucht werden, wie der energetische Zustand der Außenwand nach Sanierung die Gesamtkosten und das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis beeinflusst. Grundlegend sind die zuvor erläuterten Herangehensweisen zur Ermittlung des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses einer Dämmmaßnahme. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Dämmstoffstärke und U-Wert betrachtet. Der energetische Zustand der Bestandswand wird mit $U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf und das Spektrum des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses einer Fassadendämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem. Das Spektrum ergibt sich aus den in Tabelle 4 aufgeführten Preisspannen der Sanierungsmaßnahmen.

In Abbildung 10 ist der Verlauf des Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisses für die beiden Sanierungsvarianten in Abhängigkeit vom erzielten U-Wert nach Sanierung dargestellt. Beide steigen ab einem U-Wert von etwa 0,4 Watt pro Quadratmeter und Kelvin stark an. Vergleicht man die ermittelten Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisse der beiden Sanierungsmaßnahmen für einen erzielten U-Wert nach Sanierung auf Niveau der Energieeinsparverordnung ($U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), so erhält man ein Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis zwischen 0,35 und 0,55 Euro pro Kilowattstunde und Jahr.

Abbildung 9: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für ein Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke

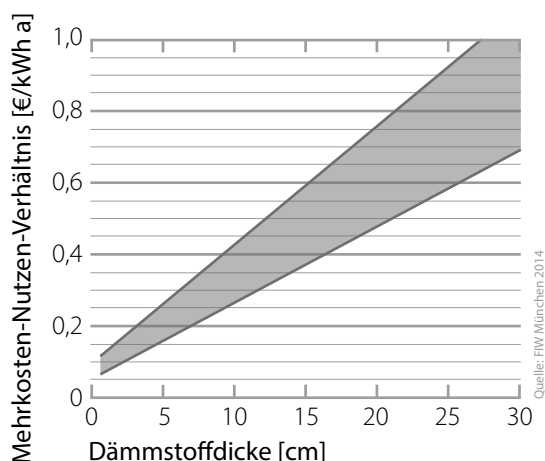
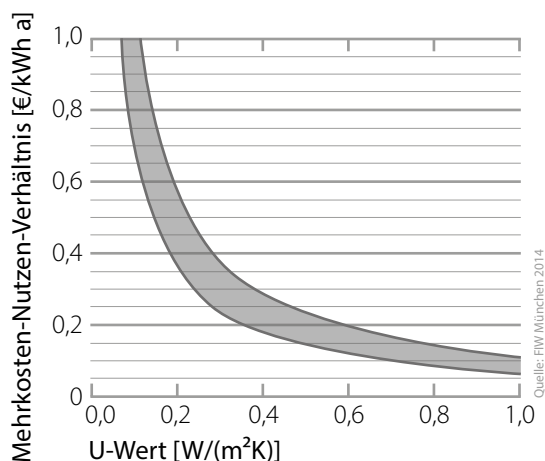


Abbildung 10: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für ein Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle oder EPS-Dämmung in Abhängigkeit vom erzielten U-Wert



4 Ermittlung der Wirtschaftlichkeit energetischer Maßnahmen

4.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Prinzipiell können die Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in statische und dynamische Verfahren aufgeteilt werden. Statische Methoden berücksichtigen den Faktor Zeit bei der Bewertung nicht. Dagegen wird bei den dynamischen Methoden der Einfluss von Zinsen und Zinseszinsen über den Betrachtungszeitraum mit eingerechnet.

Natürlich können die verschiedenen Kalkulationsmethoden noch weiter variiert werden. Beispielsweise lassen sich zeitlich veränderliche Faktoren wie unterschiedliche Lebensdauern mancher Bauteile berücksichtigen oder die verschiedenen Methoden miteinander kombinieren.

In dieser Studie werden die Kapitalwert- und Annuitätenmethode angewendet.

4.2 Kapitalwert- und Annuitätenmethode

Zur Ermittlung des Kapitalwertes werden alle Ein- und Auszahlungen innerhalb des relevanten Zeitraums und unter Berücksichtigung der Verzinsung betrachtet und mit der anfänglichen Investition gegengerechnet. Mit dieser Methode lässt sich beurteilen, ob und nach wie vielen Jahren eine Investition wirtschaftlich vorteilhafter ist gegenüber einer Anlage mit jeweiligem Zinsfuß. Zu beachten ist, dass bei der Kapitalwertmethode nicht der Endwert, sondern der Barwert der Investition beurteilt wird.

Um mit dieser Methode die Amortisationszeit zu berechnen, werden die Kapitalwerte aller Zahlungen einer Investition durch Diskontierung (Abzinsung) zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt und gegengerechnet.

$$n_A = \frac{\ln \frac{1}{1 - \frac{K}{k} (q - \gamma)}}{\ln \frac{q}{\gamma}}$$

n_A	Amortisationszeit in Jahren
K	Investition in Euro
k	jährliche Rückflüsse bzw. jährliche Einsparungen in Euro
i	jährlicher Zinssatz in Prozent
j	jährliche Energiepreissteigerung in Prozent
q	$1 + i$
γ	$1 + j$

Die Weiterführung ist die sogenannte Annuitätenmethode. Dabei werden alle anfallenden Zahlungen einer Investition unter Berücksichtigung der Verzinsung auf mittlere Jahreskosten über den Betrachtungszeitraum umgelegt. Als weiterer Schritt kann der annuitätische Gewinn ermittelt werden, indem man die annuitätischen Erlöse, beispielsweise durch Heizkosteneinsparungen, von den annuitätischen Kosten subtrahiert.

Einfluss des Energiepreises und der Energiepreissteigerung auf die Amortisationszeit

Die nach der oben genannten Formel errechneten Amortisationszeiten für verschiedene Ausgangsenergiepreise sowie Preissteigerungen sind in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis in Abbildung 5 als Nomogramm gezeichnet. In Abbildung 12 ist der Einfluss der Energiepreissteigerung und des zum Investitionszeitpunkt gegebenen Energiepreises auf die Amortisationszeit dargestellt. Dabei wurden drei unterschiedliche Investitionen pro Quadratmeter einer Dämmmaßnahme untersucht, die alle zur gleichen Energieeinsparung führen. Aus den Abbildungen ist der Einfluss der Energiepreissteigerung auf die Amortisationszeit deutlich zu erkennen.

Außerdem kann man feststellen, dass mit höheren Ausgangsenergiepreisen der Einfluss der Energiepreissteigerung abnimmt. Umgekehrt sind bei niedrigen Ausgangsenergiepreisen deutliche Unterschiede in den Amortisationszeiten in Abhängigkeit von der Energiepreissteigerung zu erkennen. Bei höherem Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis, also bei hohen Investitionskosten, gewinnt die Energiepreissteigerung einen größeren Einfluss als bei niedrigem Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis, also bei geringen Investitionskosten.

Bei einem Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis von beispielsweise 0,30 Euro pro Kilowattstunde und Jahr und einem aktuellen Energiepreis von 0,08 Euro pro Kilowattstunde hat die Energiepreissteigerung kaum Einfluss auf die errechnete Amortisationszeit. Bei einem hohen Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis von 0,90 Euro pro Kilowattstunde und gleichem aktuellem Energiepreis verringert eine Energiepreissteigerung von jährlich 7,5 Prozent die Amortisationszeit um circa die Hälfte im Vergleich zu der Berechnung ohne Preissteigerung.

Neben dem Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis und dem aktuellen Energiepreis hat auch die Nutzungsdauer einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Sanierungsmaßnahme. Je länger die Nutzungsdauer einer Maßnahme, desto länger können die erzielten Einsparungen zur Deckung der Investition verwendet beziehungsweise die jährlichen Renditen erzielt werden.

Abbildung 11: Verlauf der Amortisationszeit in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis in Euro pro Kilowattstunde und Jahr für verschiedene Energiepreise und Energiepreissteigerungen (Annahme: U-Wert Bestand = 1,4 W/(m²K); U-Wert nach Sanierung = 0,24 W/(m²K))

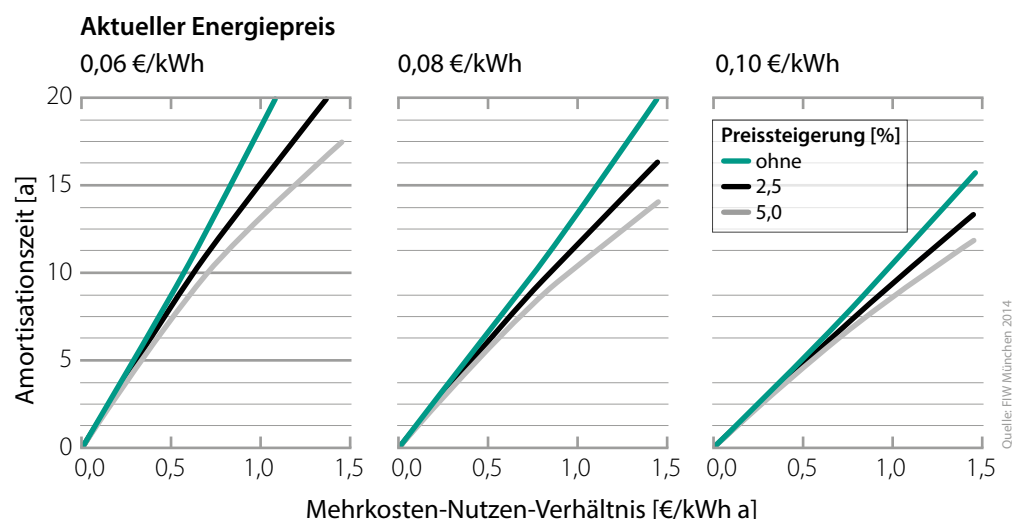
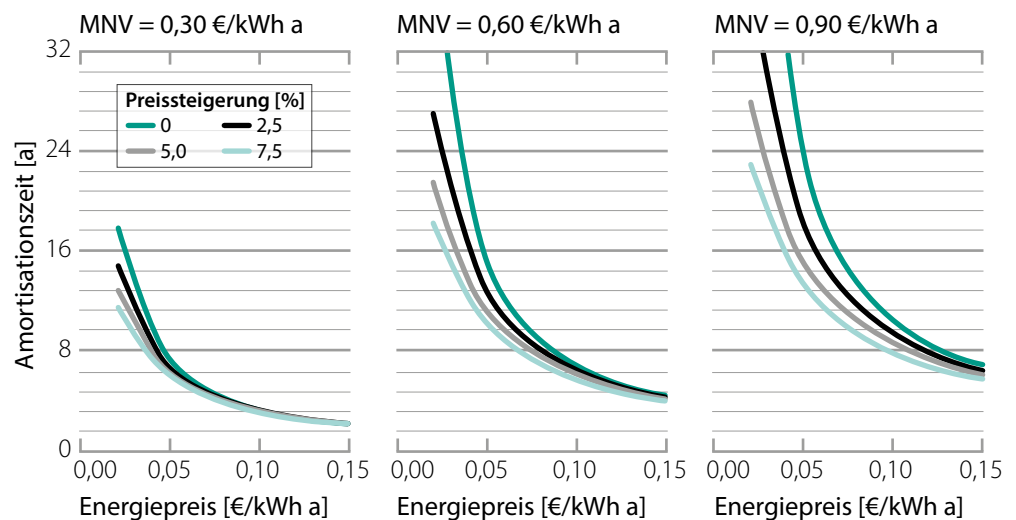


Abbildung 12: Verlauf der Amortisationszeit in Abhängigkeit vom Energiepreis in Euro pro Kilowattstunde und Jahr und von der Energiepreissteigerung in Prozent für verschieden hohe Investitionen (Annahme: U-Wert Bestand = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; U-Wert nach Sanierung = $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)



4.3 Sensitivitätsanalyse

Wie zuvor in den Diagrammen beispielhaft dargestellt, sind die Kennwerte zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer energetischen Maßnahme abhängig von folgenden Faktoren:

- » Art der Kostenbetrachtung: Vollkosten oder energiebedingte Kosten
- » Erzielte Einsparung:
 - Zugrunde gelegter Energiepreis und zukünftige Entwicklung
 - Klimatische Randbedingungen
 - Nutzerverhalten
- » Entwicklung der Finanzmärkte
- » Lebensdauer der durchgeführten Maßnahmen

Aussagen über die Wirtschaftlichkeit verschiedener Sanierungsmaßnahmen, die heute aus Kreisen der Industrie, der Wohnungswirtschaft, der Eigentümer, aber auch der Wissenschaft angegeben werden, weisen zum Teil erhebliche Unterschiede auf. Neben den klimatischen, bauphysikalischen, geometrischen und ökonomischen Parametern werden die Ergebnisse auch durch die gewählte Kalkulationsmethode selbst beeinflusst. Je nach Berechnungsansatz gelangt man zu unterschiedlichen Aussagen über die Amortisation einer energiesparenden Maßnahme.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzmaßnahme wird in dieser Studie ausschließlich einzelwirtschaftlich, also aus Sicht eines Investors behandelt. Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen vom Bauphysiker nicht steuerbaren Einflussparameter auf die Amortisation untersucht.

Die nachfolgenden Berechnungen in diesem Kapitel basieren auf dem oben bereits beschriebenen Beispiel – der Sanierung einer Außenwand mit einem Wärmedämmverbundsystem entsprechend der Energieeinsparverordnung (Ausgangs-U-Wert = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Differenzielle Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden soll mithilfe einer differenziellen Sensitivitätsanalyse der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Amortisationszeit einer Dämmmaßnahme untersucht werden. Dadurch soll ermittelt werden, wie empfindlich das Ergebnis einer zunächst auf der Basis quasi sicherer Daten aufgestellten Wirtschaftlichkeitsberechnung reagiert, wenn einzelne Eingabedaten variiert werden. In Tabelle 5 sind die Parameter mit den untersuchten Minimal- und Maximalwerten angegeben.

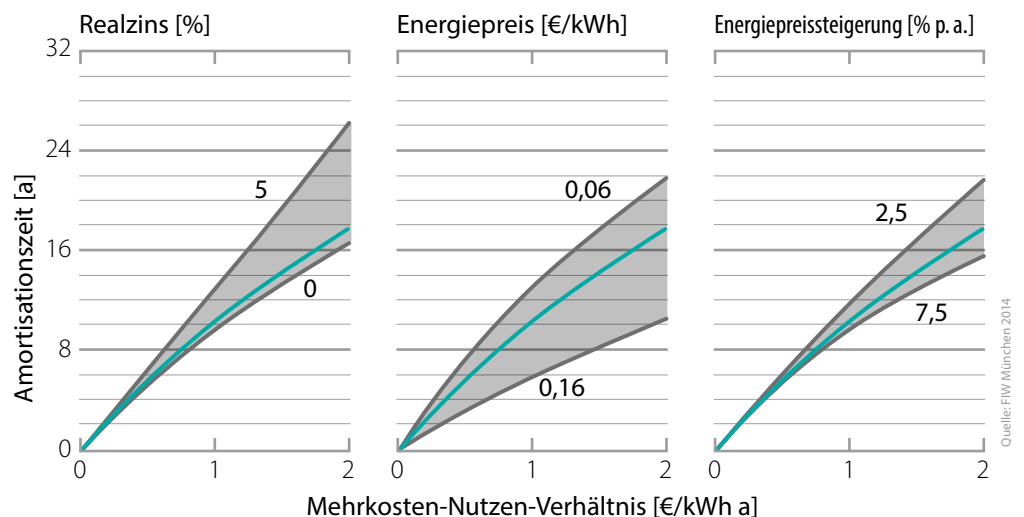
Tabelle 5: Untersuchte Bandbreite verschiedener Parameter für die Sensitivitätsanalyse

Parameter	Einheit	Minimalwert	Mittel	Maximalwert
Jährliche Heizenergieeinsparung durch Dämmung des Bauteils	kWh/m ²	68,00	85,00	102,00
Kalkulationszins	%	6,0	2,0	1,0
Inflationsrate	%	1,0	1,0	1,0
Realzins	%	5,0	1,0	0,0
Ausgangsenergiepreis	€/kWh	0,06	0,08	0,16
Energiepreissteigerung	%	2,5	5,0	7,5

Abbildung 13 zeigt die mögliche Bandbreite durch Ansetzen der definierten Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Parameter auf die Amortisationszeit in Abhängigkeit von den Investitionskosten. Die blaue Kurve stellt dabei jeweils das Ergebnis mit Ansetzen der Mittelwerte aller Parameter dar. Bei den einzelnen Verläufen wurde jeweils nur der betrachtete Parameter geändert, für die anderen wurden die definierten Mittelwerte angesetzt.

Deutlich wird, dass vor allem der Realzins und die Energiepreissteigerung einen großen Einfluss auf die Amortisationszeit einer Investition besitzen. Außerdem liegt bei diesen Parametern der angesetzte Mittelwert im unteren beziehungsweise oberen Bereich der Ergebnisspanne. Diese Parameter sollten demnach besonders gewissenhaft gewählt werden, um ein realistisches Ergebnis zu erhalten.

Abbildung 13: Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Amortisationszeit unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten und in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis



Monte-Carlo-Analyse oder wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse

Die bisher behandelten Ansätze erlauben es grundsätzlich, sich ein Bild von Art und Umfang der damit verbundenen Unsicherheiten zu machen. Aufschluss darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit die untersuchten Parameterveränderungen auftreten können, liefert eine Sensitivitätsanalyse hingegen nicht. Auch bleibt offen, welche Konsequenzen aus der Sensitivität im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeitsbewertung bei energetischen Sanierungsmaßnahmen zu ziehen sind. Für derartige Fälle können stochastische Simulationsverfahren eine Lösungshilfe darstellen. Diese Technik wird Monte-Carlo-Analyse oder wahrscheinlichkeitsgestützte Analyse genannt. Hierbei werden mögliche Kombinationen der unsicheren Parameterwerte durch künstliche Zufallsexperimente generiert. Die Zuverlässigkeit der Analyse steigt mit der Anzahl der wiederholten Berechnungsläufe.

Um den Einfluss auf die Amortisationszeit unter Berücksichtigung aller in Tabelle 5 aufgeführten Parameter und ihrer Bandbreite zu beachten, wurde eine solche Monte-Carlo-Simulation für die Amortisationszeit in Abhängigkeit von den Investitionskosten durchgeführt. Die Simulation erfolgte dabei mehrere Tausend Mal, wobei bei jeder Simulation der Kennwert jedes Parameters durch Zufall aus der zuvor definierten Bandbreite gewählt wurde.

Als Resultat erhält man wiederum eine Ergebnisbandbreite, dargestellt in Abbildung 14, die durch Anwenden eines Konfidenzintervalls von 95 Prozent ermittelt wurde. Das bedeutet, dass 95 Prozent aller Simulationsergebnisse innerhalb dieser Bandbreite liegen. Offensichtliche Ausreißer werden so ausgeschlossen. Außerdem wurde der Einfluss der Investitionskosten auf die Amortisationszeit unter Ansetzen aller in Tabelle 5 definierten Minimalwerte als Worst-Case-Szenario ermittelt und dargestellt. Dieses Szenario verläuft deutlich steiler, weil durch die zufällige Auswahl aus der Parameterbandbreite bei der Monte-Carlo-Simulation die gleichzeitige Auswahl aller Worst-Case-Fälle sehr unwahrscheinlich ist. Im Gegenzug wurde durch Ansetzen aller Maximalwerte ein Best-Case-Szenario modelliert, das deutlich unterhalb des Konfidenzintervalls der Monte-Carlo-Analyse verläuft. Die Verteilung der relativen Häufigkeit ist für das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis von 0,25 bis 1,50 Euro pro Kilowattstunde und Jahr in Abbildung 15 dargestellt.

Abbildung 14: Einfluss aller Parameter nach Tabelle 5 auf die Amortisationszeit mit Angabe des Konfidenzintervalls der Monte-Carlo-Analyse und Darstellung des Worst-Case-Szenarios und des Best-Case-Szenarios in Abhängigkeit von den Investitionskosten in Euro pro Quadratmeter. Die orangefarbene Linie zeigt die mittlere Amortisationszeit.

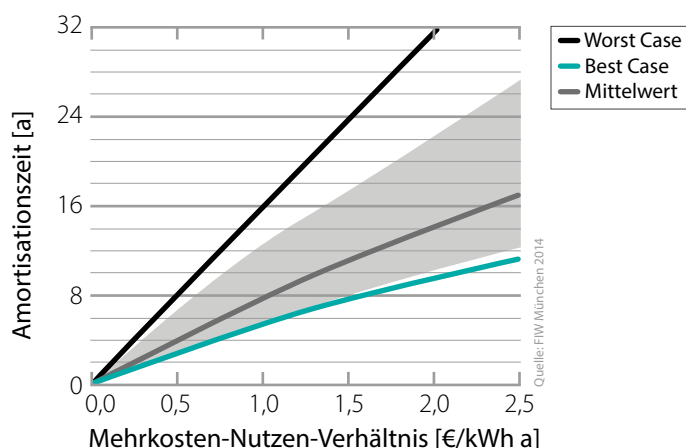
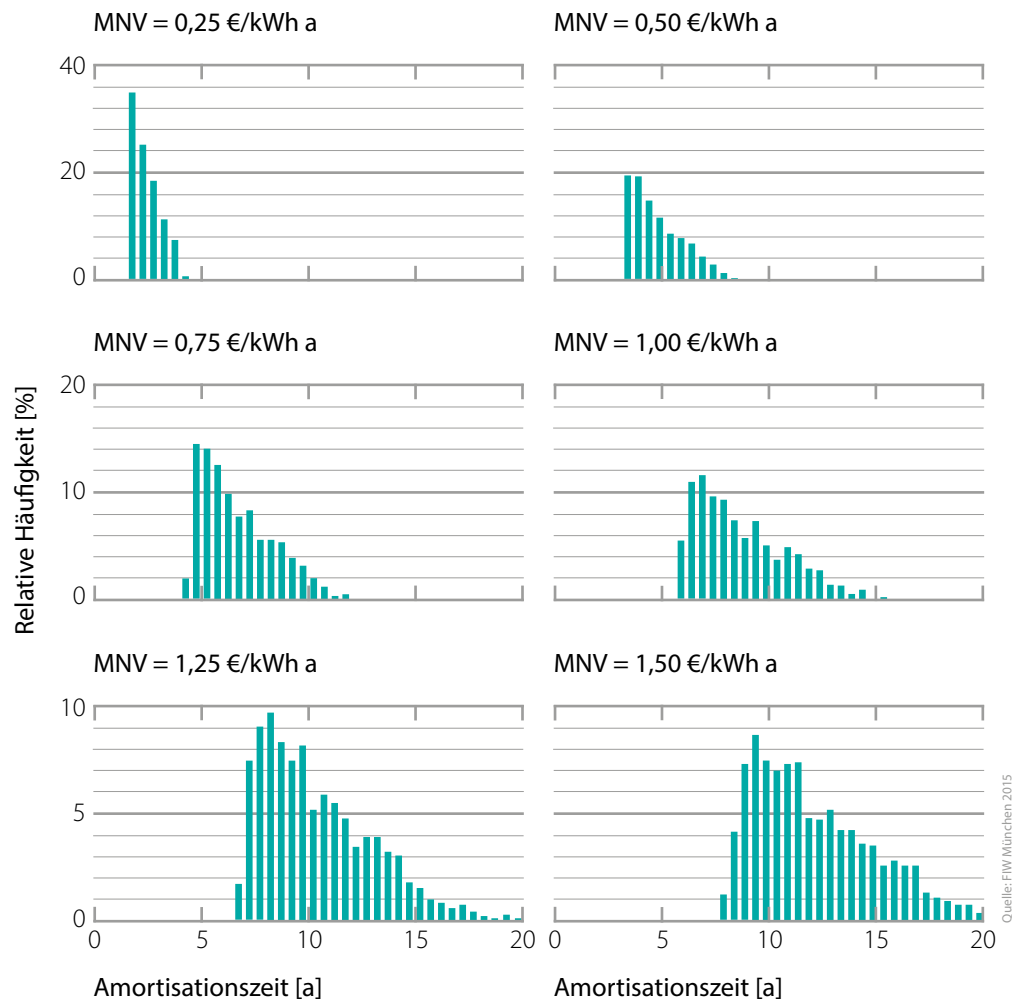


Abbildung 15: Relative Verteilung der errechneten Amortisationszeit für verschiedene Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisse



5 Anwendungsbeispiele

5.1 Energetische Modernisierung einzelner Bauteile von Wohngebäuden

Da eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Dämmmaßnahme grundsätzlich vom Bauteilalter, vom energetischen Zustand und von vielen anderen Randbedingungen abhängig ist, erscheint eine Verallgemeinerung äußerst schwierig. In einer 2012 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung veröffentlichten Studie (Hinz, 2012) wird systematisch der Zusammenhang zwischen den effizienzrelevanten Eigenschaften der Bauteile eines Wohngebäudes und den dadurch begründeten Kosten untersucht und parametrisiert dargestellt. Für vergleichbare Konstruktionen wird zudem die Streuung der Kosten untersucht. Die Datenbasis der Studie beruht im Wesentlichen auf Kostenfeststellungen aus dem KfW-Gebäudemodernisierungsprogramm „Energieeffizient Sanieren“ ab dem Jahr 2007 und damit auf aktuellen Projekten aus einem bundesweiten Breitenförderprogramm.

Tabelle 6: Kostenfunktionen (brutto) für energiesparende Maßnahmen im Wohngebäudebestand. Die Ermittlung der energiebedingten Mehrkosten bei der Dämmung von Bauteilen erfolgt unter der Prämisse, dass die Maßnahmen im Zuge einer ohnehin anstehenden baulichen Instandsetzung realisiert werden (Hinz, 2012).

Bauteil	Energiebedingter Anteil	Sowieso-Kosten
	€/m ² pro cm Dämmung	€/m ²
Außenwand WDVS (PS und MF): Vollkosten	2,43	87,35
Außenwand WDVS (PS und MF): energiebedingte Mehrkosten	2,43	15,00
Kellerdecke, Dämmung von unten, mit Bekleidung: Vollkosten	1,40	42,50
Kellerdecke, Dämmung von unten, ohne Bekleidung: Vollkosten	1,04	26,50
Steildach ¹ : Vollkosten	2,70	172,80
Steildach ¹ : energiebedingte Mehrkosten	2,21	22,00
Flachdach: Vollkosten	0,64	158,60
Flachdach: energiebedingte Mehrkosten	1,51	15,10
Oberste Geschossdecke (begehbar): Vollkosten	1,92	26,00
Oberste Geschossdecke (nicht begehbar): Vollkosten	1,17	0,21

¹ Sanierung von außen inklusive kompletter Neueindeckung

Tabelle 6 zeigt die Kostenfunktionen (brutto) für energiesparende Maßnahmen an der opaken Gebäudehülle im Wohngebäudebestand nach Hinz (2012). Die Ermittlung der energiebedingten Mehrkosten bei der Dämmung von Bauteilen erfolgt unter der Prämisse, dass die Maßnahmen im Zuge einer ohnehin anstehenden

baulichen Instandsetzung realisiert werden. Um die Kosten der Maßnahmen bei unterschiedlichen Dämmstoffen vergleichen zu können, werden die von 0,35 Watt pro Quadratmeter und Kelvin abweichenden Wärmeleitfähigkeiten der Dämmstoffe auf den Wert von 0,035 Watt pro Quadratmeter und Kelvin umgerechnet. Mit der so ermittelten äquivalenten Dämmstoffdicke können die Sanierungskosten berechnet werden.

Zur Abschätzung der energetischen Einsparung muss der energetische Zustand der Bauteile berücksichtigt werden. Allgemeingültige Aussagen über den derzeitigen energetischen Zustand der Gebäudehülle für den deutschen Wohngebäudebestand zu treffen, ist schwierig. Die Angaben diesbezüglich schwanken stark. Die umfangreichste Studie hierzu hat die ARGE Kiel (Walberg et al., 2011) durchgeführt. Dabei wurden im Vorfeld verschiedene energetische Standards festgelegt, denen die verschiedenen Ausführungen zugeordnet wurden. Die verwendeten energetischen Standards orientieren sich an der Entwicklung von energetischen Anforderungen an Wohngebäude und wurden aufgrund ihrer Eindeutigkeit über die Standards von Wärmeschutzverordnungen definiert:

- » Standard vor Wärmeschutzverordnung 1977 (vor WSchV 1977)
- » Standard nach Wärmeschutzverordnung 1977/1984 (nach WSchV 1977/1984)
- » Standard nach Wärmeschutzverordnung 1995 (nach WSchV 1995)

Den Ist-Zuständen der Bauteile können die typischen U-Werte entsprechend den Mindeststandards der betrachteten Novellierungen der einschlägigen Verordnungen und typischen Werten für unsanierte Bestandsbauteile zugeordnet werden. Tabelle 7 zeigt die angesetzten U-Werte der betrachteten Bauteile entsprechend den energetischen Zuständen.

Tabelle 7: Typische Mindest-U-Werte [$W/(m^2K)$] der Bauteile entsprechend dem energetischen Zustand

Bauteil	Vor WSchV 1977	WSchV 1977/1984	WSchV 1995	Energieeinsparverordnung 2009
Dach/Oberste Geschossdecke	0,90	0,35	0,30	0,24
Wand	1,40	0,60	0,40	0,24
Unterer Gebäudeabschluss	1,30	0,55	0,50	0,30

Für die folgenden Anwendungsbeispiele werden die Eingabedaten zur wahrscheinlichkeitsgestützten Berechnung der Amortisationszeit entsprechend Tabelle 8 variiert.

Tabelle 8: Schwankungsbereich der Eingangsgröße zur Berechnung der Amortisationszeit

Eingangsgröße	Schwankung
Genauigkeit der Berechnung für die energetische Einsparung	± 20 %
Schwankung der Investitionskosten	± 25 %
Realzins	0 bis 3 %
Ausgangsenergiepreis	0,06 bis 0,16 €/kWh
Jährliche Energiepreissteigerung	2,5 bis 7,5 %

Außenwand – nachträgliche Dämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem

Wird eine Fassade im Zuge einer ohnehin anstehenden umfassenden Instandsetzung mit einem Wärmedämmverbundsystem gedämmt, dann entstehen mit jedem Zentimeter Dämmstoff energiebedingte Kosten von 2,43 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6). Diese setzen sich aus den Kosten für Sockelschienen, Dämmstoff, Montageplatten, Verdübelung, eventuelle Vergrößerung von Dachüberständen und weitere energiebedingte Nebenarbeiten zusammen.

Für systemgerechte Fensterbänke mit unterschiedlichen Ausladungen und eventuell erforderliche Brandschutzausbildungen betragen die Kosten circa 7 Euro pro Quadratmeter Bauteil. Diese Kosten sind ebenfalls energiebedingte Mehrkosten. Hinzu kommen weitere Fixkosten von etwa 8 Euro pro Quadratmeter Bauteil für zum Beispiel das Verkleben und gegebenenfalls für das Ausschäumen von Fugen und Schleifen des Dämmstoffs, sodass mit Fixkosten von etwa 15 Euro pro Quadratmeter für das Wärmedämmverbundsystem gerechnet werden muss.

Für das Beispiel Außenwanddämmung ($U = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) mit einem Wärmedämmverbundsystem entsprechend den Anforderungen der Energieeinsparverordnung ergibt sich aus der Kostenfunktion ein durchschnittlicher Vollkostenpreis von 120 Euro pro Quadratmeter. Der energiebedingte Anteil beträgt etwa 47 Euro pro Quadratmeter. Unter diesen Annahmen ergibt sich ein Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis von 0,67 Euro pro Kilowattstunde und Jahr. Bei Schwankung der Investitionskosten um 25 Prozent, also 90 beziehungsweise 150 Euro pro Quadratmeter, verändert sich – bei prozentual konstantem energiebedingtem Anteil – das Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis auf 0,49 Euro beziehungsweise 0,82 Euro pro Kilowattstunde und Jahr. Daraus ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Amortisationszeiten. Für den stochastischen Ansatz sind sowohl die zu erwartenden Mittelwerte als auch die oberen und unteren Grenzen des Konfidenzintervalls von 95 Prozent angegeben. Das bedeutet, dass 95 Prozent aller Simulationsergebnisse innerhalb dieser Grenzen liegen. Offensichtliche Ausreißer werden so ausgeschlossen.

Tabelle 9: Errechnetes Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis und resultierende Amortisationszeiten in Abhängigkeit von den Investitionskosten bei Annahme eines energiebedingten Anteils von circa 40 Prozent auf Basis der Ergebnisse aus Tabelle 4 (Annahme: U-Wert Bestand = $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; U-Wert nach Sanierung = $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)

Investitionskosten [€/m ²]	Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis [€/kWh a]	Amortisationszeit [a]			
		Deterministischer Ansatz	Stochastischer Ansatz		
			Mittelwert	Bereich mit 95 % Wahrscheinlichkeit	
90	0,49	5,7	4,8	3	8
120	0,67	7,3	6,1	4	10
150	0,82	8,9	7,4	5	12

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 8 getroffenen realistischen Annahmen für die Variation der Eingabeparameter ergibt sich der in Abbildung 16 dargestellte Schwankungsbereich der Amortisationszeit in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Deutlich zu erkennen ist, dass mit besserem energetischem Zustand der Ausgangswand die Amortisationszeit exponentiell steigt. In Tabelle 10 sind für die drei energetischen Ausgangszustände die entsprechenden Amortisationsbereiche angegeben.

Abbildung 16: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Außenwandsanierung mit einem Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Die Kosten werden entsprechend Tabelle 6 ermittelt und können um 25 Prozent nach oben und unten abweichen. Ansonsten gelten für die Berechnung die Annahmen aus Tabelle 8.

Außenwand: energiebedingte Mehrkosten

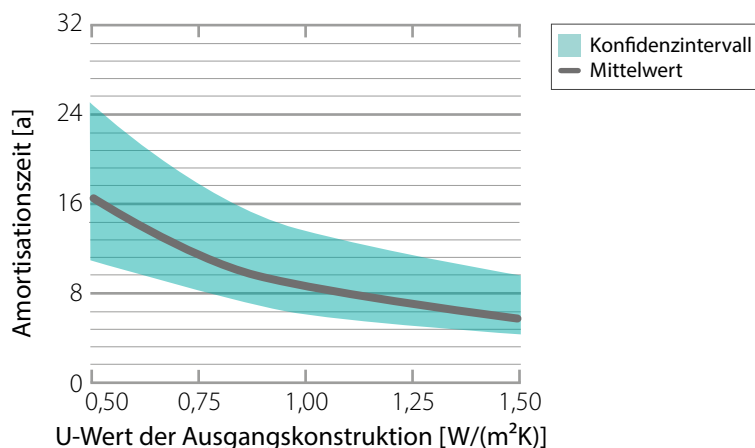


Tabelle 10: Bereich der Amortisationszeit für die Sanierung einer Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem für drei unterschiedliche Ausgangs-U-Werte

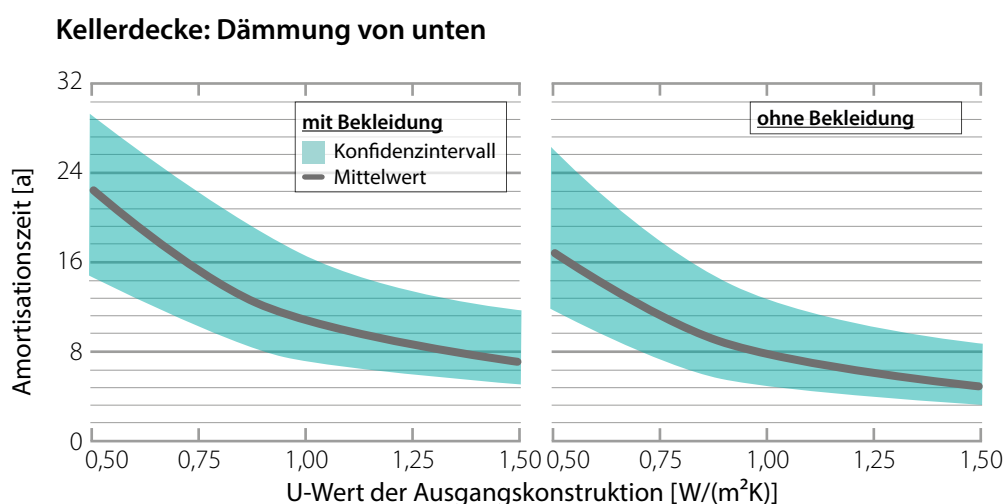
	Investitionskosten		Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis [€/kWh a]	Amortisationszeit [a]		
	Vollkosten [€/m²]	Energiebedingter Anteil [€/m²]		Mittelwert	Bereich mit 95 % Wahrscheinlichkeit	
Vor WSchV 1977	120	47	0,67	6,1	4	10
WSchV 1977/1984	109	37	1,70	13,7	9	22
WSchV 1995	101	30	3,06	21,6	14	29

Kellerdecke – nachträgliche unterseitige Dämmung

Da Instandsetzungen an der Kellerdecke in der Regel nicht vorgenommen werden müssen, sind die gesamten Kosten der Dämmmaßnahme als energiebedingte Mehrkosten anzusetzen. Die Kostenfunktion hat ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 \approx 0,07$. Damit besteht nur ein sehr geringer unmittelbarer Zusammenhang zwischen der äquivalenten Dämmdicke und den Kosten. Dies bedeutet, dass für die Kosten der Maßnahme offensichtlich andere Faktoren als die Dämmdicke entscheidend sind. Dies könnten zum Beispiel bauliche Gegebenheiten sein. Die Grundkosten für eine nachträgliche unterseitige Dämmung einer Kellerdecke (geklebt, gedübelt und gespachtelt) betragen etwa 26,50 Euro pro Quadratmeter Bauteil. Diese Grundkosten enthalten alle Nebenaufwendungen für zum Beispiel die Demontage und Montage von Deckenleuchten, Aussparungen von Rohrleitungen, das Kürzen von Türen und Verschlüssen oder das Ein- und Ausräumen von Kellern sowie das Kleben und Schleifen der Dämmplatten. Die zuwachsenden Kosten betragen 1,04 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6). Soll der Dämmstoff zum Schutz vor mechanischer Beschädigung zusätzlich armiert werden, entstehen weitere Kosten von 16 Euro pro Quadratmeter Bauteil.

Auf Basis dieser Kostenfunktion ergeben sich die realistischen Amortisationszeiten für den Fall der Dämmung einer Kellerdecke in Abhängigkeit vom Ausgangs-U-Wert entsprechend Abbildung 17. Geht man beim unteren Gebäudeabschluss von einem energetischen Zustand aus, der vor der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung typisch war, so beträgt die mittlere Amortisationszeit bei einer Kellerdeckendämmung von unten mit Bekleidung acht Jahre. Bei Verzicht auf eine Bekleidung reduziert sich die Amortisationszeit auf etwas unter sechs Jahre.

Abbildung 17: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Kellerdeckendämmung von unten mit Bekleidung (oben) oder ohne Bekleidung (unten) in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Die Kosten werden entsprechend Tabelle 6 ermittelt und können um 25 Prozent nach oben und unten abweichen. Ansonsten gelten für die Berechnung die Annahmen aus Tabelle 8.



Steildach – nachträgliche Dämmung von außen zwischen oder auf den Sparren

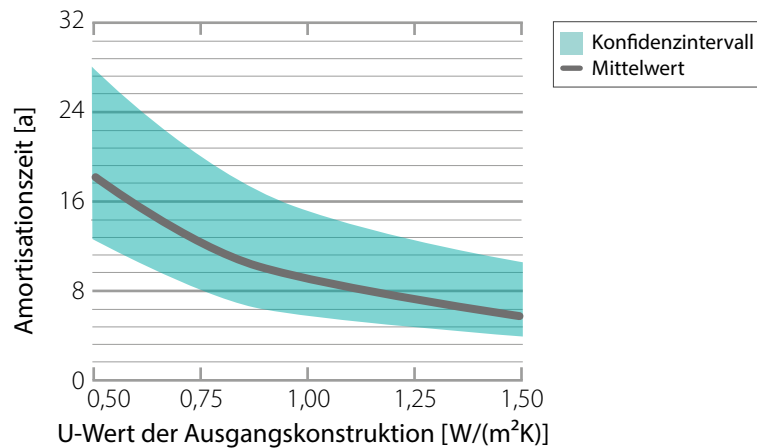
Die Vollkosten für die nachträgliche Dämmung eines Steildaches umfassen alle Kosten, die bei der Abdeckung des Daches, der Entsorgung alter Bauteile, der Dämmung, der Neueindeckung und der Anschluss- und Spenglerarbeiten anfallen. Wird die Wärmedämmung des Daches im Zuge einer ohnehin anstehenden umfassenden Dachsanierung durchgeführt, resultieren energiebedingte Mehrkosten aus der eventuell erforderlichen Aufdopplung der Sparren, den zusätzlichen Trauf- und Ortgangbrettern sowie aus der Dämmung selbst.

Aus der Detailanalyse der entsprechenden Kostenfeststellungen ergeben sich auf die Fläche der Dampfbremse beziehungsweise der Dämmung bezogen durchschnittliche Fixkosten von neun Euro pro Quadratmeter Bauteil für die Luftdichtung/Dampfbremse, von acht Euro pro Quadratmeter Bauteil für die Unterspannbahn/das Unterdach sowie von fünf Euro pro Quadratmeter Bauteil für die Konterlattung. In der Summe sind dies Fixkosten von 22 Euro pro Quadratmeter Bauteil, die im Zuge der Sanierung des Daches ohnehin anfallen. Hinzu kommen die energiebedingten Mehrkosten für eine nachträgliche Dämmung im Steildach von 2,21 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6).

Auf Basis dieser Kostenfunktion ist in Abbildung 18 der Bereich der Amortisationszeiten in Abhängigkeit vom Ausgangs-U-Wert dargestellt. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,9 Watt pro Quadratmeter und Kelvin liegt die Amortisationszeit in der Regel zwischen 6 und 16 Jahren, wobei sich die Maßnahme nach durchschnittlich 10 Jahren amortisiert hat.

Abbildung 18: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle eines Steildaches von außen zwischen oder auf den Sparren in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Die Kosten werden entsprechend Tabelle 6 ermittelt und können um 25 Prozent nach oben und unten abweichen. Ansonsten gelten für die Berechnung die Annahmen aus Tabelle 8.

Steildach: energiebedingte Mehrkosten



Flachdach

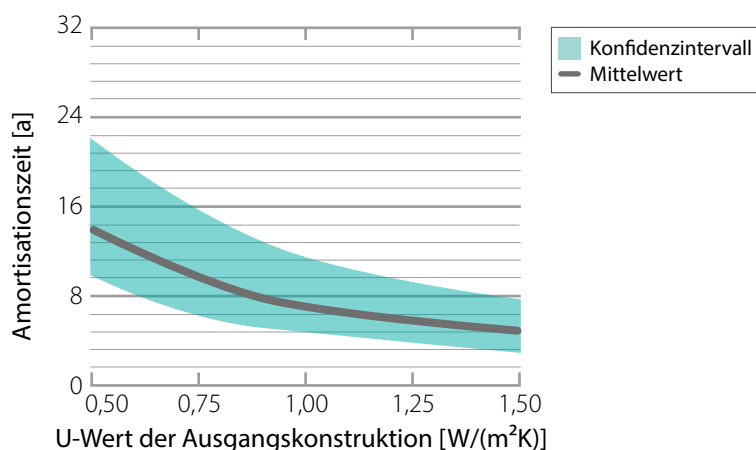
Gemäß den Praxisfällen in der zugrunde liegenden Studie (Hinz, 2012) streuen die Vollkosten für die Instandsetzung eines Flachdaches sehr stark. Es besteht praktisch kein Zusammenhang zwischen der energetischen Qualität des Daches und den Vollkosten. Berücksichtigt wurden zum einen die Kosten für das Abtragen und Entsorgen des alten Daches (inklusive Folien, Bitumenbahnen, Randprofile). Zum anderen gingen alle Kosten für den Aufbau des neuen Daches in die Berechnung ein: Wärmedämmung, neue Dachrandbohlen, Blendrandprofile, Attikaabdeckungen, Dachgullys, Sanitärflüster, Bitumenbahnen oder durchwurzelungsfeste Dachabdichtungen, Folien und Befestigungsmaterial, Schüttungen, Beläge und sonstige erforderliche kleinere Nebenarbeiten im Zuge der Dachsanierung. Zudem wurden die Kosten für die Erneuerung vorhandener Lichtkuppeln erfasst.

Energiebedingte Kosten fallen an für die Gefälledämmung in der Fläche sowie für die Anschlüsse an zum Beispiel Attiken, für angrenzende Bauteile und Schornsteine (Dämmung der Bauteile). Bei einer neuen Wärmedämmung auf der vorhandenen Konstruktion wurden zudem die Kosten für neue Dachrandbohlen oder zum Beispiel für Attikaerhöhungen als energiebedingte Kosten berücksichtigt.

Die zuwachsenden Kosten betragen etwa 1,50 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6). Auf dieser Basis ist in Abbildung 19 der Bereich der Amortisationszeiten in Abhängigkeit vom Ausgangs-U-Wert dargestellt. Betrachtet werden nur die energiebedingten Kosten. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,9 Watt pro Quadratmeter und Kelvin liegt die Amortisationszeit zwischen 5 und 13 Jahren.

Abbildung 19: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Sanierung eines Flachdaches in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Die Kosten werden entsprechend Tabelle 6 ermittelt und können um 25 Prozent nach oben und unten abweichen. Ansonsten gelten für die Berechnung die Annahmen aus Tabelle 8.

Flachdach: energiebedingte Mehrkosten

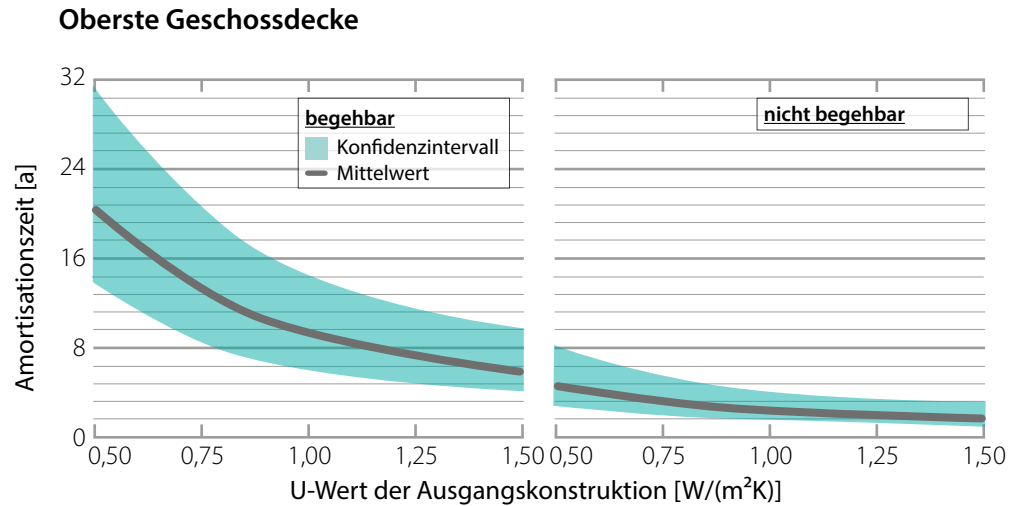


Oberste Geschossdecke

Die nachträgliche Dämmung bisher ungedämmter, nicht begehrbarer, aber zugänglicher oberster Geschossdecken ist in der Energieeinsparverordnung 2009 als Nachrüstungsverpflichtung verankert. Da Instandsetzungen an diesen Bauteilen in der Regel nicht vorgenommen werden müssen, sind die gesamten Kosten für die Maßnahme als energiebedingte Mehrkosten anzusetzen. Für die nachträgliche Dämmung einer nicht begehrbaren obersten Geschossdecke ergeben sich 1,17 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6). Für die nachträgliche Dämmung einer begehrbaren obersten Geschossdecke ergeben sich Fixkosten von 26 Euro pro Quadratmeter Bauteil zuzüglich 1,92 Euro pro Zentimeter Dämmstoff je Quadratmeter Bauteil (vgl. Tabelle 6).

Auf Basis dieser beiden Kostenfunktionen ist in Abbildung 20 der Bereich der Amortisationszeiten in Abhängigkeit vom Ausgangs-U-Wert dargestellt. Das obere Bild zeigt die Werte für den Fall einer begehrbaren Konstruktion, das untere für den Fall einer nicht begehrbaren Konstruktion. Bei einem Ausgangs-U-Wert von 0,9 Watt pro Quadratmeter und Kelvin liegt die Amortisationszeit bei begehrbarer Geschossdecke in der Regel zwischen 6 und 16 Jahren (Mittelwert: 10 Jahre). Die gleiche Maßnahme bei unbegehrbarer Geschossdecke amortisiert sich bereits nach etwa zwei bis fünf Jahren.

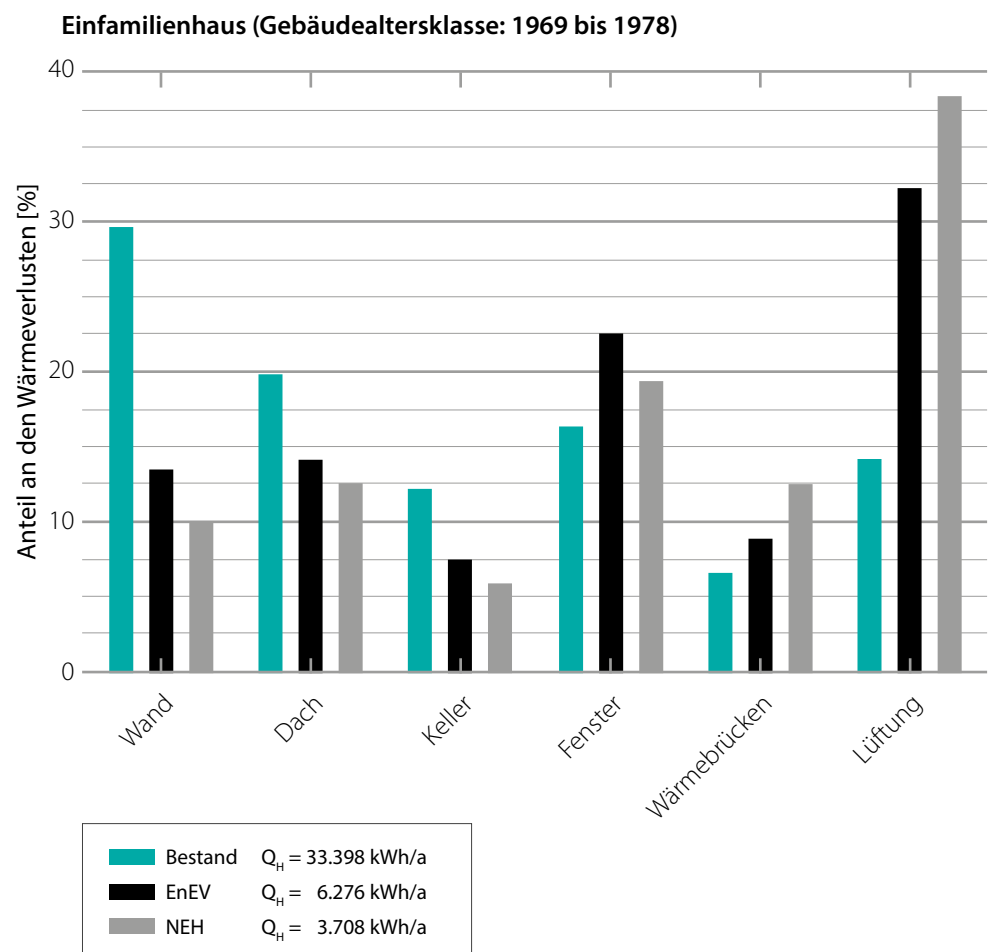
Abbildung 20: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Dämmung der obersten Geschossdecke in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion. Die Kosten werden entsprechend Tabelle 6 ermittelt und können um 25 Prozent nach oben und unten abweichen. Ansonsten gelten für die Berechnung die Annahmen aus Tabelle 8.



5.2 Anwendungsbeispiel: Einfamilienhaus aus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979 (Vollsanierung)

Da eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Dämmmaßnahme grundsätzlich von vielen verschiedenen Randbedingungen abhängig ist – zum Beispiel vom Bauteilalter und vom energetischen Zustand –, ist eine Verallgemeinerung sehr schwierig. Deshalb wurde bei der Wahl der Randbedingungen darauf geachtet, dass diese möglichst repräsentativ für den Gebäudebestand in Deutschland sind. Als Beispiel für eine Gesamtsanierung der Gebäudehülle soll ein typisches Einfamilienhaus aus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979 dienen, dessen energetischer Zustand dem vor der Wärmeschutzverordnung 1977 üblichen entspricht. Als Sanierungsvarianten gelten ein Sanierungsniveau gemäß den Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2014 sowie eine etwas ambitioniertere Variante auf dem Standard eines Niedrigenergiehauses. Die notwendigen Dämmstoffstärken und die korrespondierenden Kosten für die betrachteten Sanierungsvarianten werden unter Annahme einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ ermittelt. Die Kosten der einzelnen Sanierungsvarianten sind mithilfe der Kostenfunktionen gemäß Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hinz, 2012) und in Abhängigkeit von den ermittelten notwendigen Dämmstärken zu berechnen.

Abbildung 21: Relative Anteile der einzelnen Bauteile und der Lüftungswärmeverluste an den gesamten Wärmeverlusten für ein typisches unsaniertes und saniertes Einfamilienhaus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979



In Abbildung 21 sind die relativen Anteile der Wärmeverluste der einzelnen Bauteile über Transmission sowie der Anteil der Wärmebrücken und der Lüftungswärmeverluste an den gesamten Wärmeverlusten dargestellt. Der Anteil der Lüftungswärmeverluste steigt dabei in den beiden Sanierungsvarianten stark an. In Tabelle 11 sind die Eingangsdaten und die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen zusammengefasst.

Tabelle 11: Berechnungsergebnisse der Szenarienuntersuchung für ein beispielhaftes Einfamilienhaus aus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979

		Normalfall	Schwankungsbereich	
			von	bis
Jährlicher Heizwärmebedarf Q_H [kWh/a]	Nur Instandsetzung	33.398	29.693	37.103
	Nach Energieeinsparverordnung	6.276	5.185	7.367
	Nach Niedrigenergiehaus	3.708	2.873	4.542
Sanierungskosten [€]	Nur Instandsetzung	41.032	37.084	48.928
	Nach Energieeinsparverordnung	59.996	54.803	70.384
	Nach Niedrigenergiehaus	67.780	62.211	78.919
Energiebedingte Mehrkosten [€]	Nach Energieeinsparverordnung	18.964	17.719	21.456
	Nach Niedrigenergiehaus	26.748	25.127	29.991
Jährliche Einsparung des Heizwärmebedarfs Q_H [kWh/a]	Nach Energieeinsparverordnung	27.123	24.509	29.737
	Nach Niedrigenergiehaus	29.691	26.820	32.562
Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis [€/kWh a]	Nach Energieeinsparverordnung	0,70		
	Nach Niedrigenergiehaus	0,90		
Amortisationszeit der Gesamtmaßnahme [a]	Nach Energieeinsparverordnung	5,6	4,2	9,2
	Nach Niedrigenergiehaus	7,1	5,2	11,4

Bei einer Gesamtsanierung gemäß Energieeinsparverordnung ergibt sich ein Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis von 0,70 Euro pro Kilowattstunde und Jahr oder aber bei Sanierung nach Standard eines Niedrigenergiehauses von 0,90 Euro pro Kilowattstunde und Jahr. Die Mehrinvestition in die zusätzliche Dämmstärke lohnt sich in diesem Beispiel bereits durchschnittlich nach 6 beziehungsweise 7 Jahren, wobei mit einer 95-Prozent-Wahrscheinlichkeit keine längere Amortisationszeit als 10 beziehungsweise 12 Jahre zu erwarten ist.

Literaturverzeichnis

Bigalke, Uwe (2012): Der dena-Gebäudereport 2012. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.

BMVBS (2012): Wohnen und Bauen in Zahlen 2011/2012. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin.

BMWi/BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.

BMWi (2014): Zahlen und Fakten Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Berlin.

Diefenbach, Nikolaus et al. (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt.

Fouad, Nabil A. (2010): Bauphysik-Kalender 2010. Schwerpunkt: Energetische Sanierung von Gebäuden. Berlin.

Hauser, Gerd (1992): Wer den Gebäudebestand vergißt, kann alle Energiesparziele vergessen. In: Isoliertechnik 18 (1992), H. 5, S. 37; Umwelt & Energie-Report 14 (1993), Nr. 10/11, S. 30.

Hinz, Eberhard (2012): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Berlin/Darmstadt.

Loga, Tobias/Diefenbach, Nikolaus/Born, Ralf (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt.

von Manteuffel, Bernhard/Hermelink, Andreas/Schulze Darup, Burkhard (2014): Preisentwicklung Gebäudeenergieeffizienz – Initialstudie. Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e. V. (DENEFF). Berlin.

Walberg, Dietmar et al. (2011): Wohnungsbau in Deutschland – 2011 – Modernisierung oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“. Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V. (ARGE). Kiel.

Werner, H./Gertis, K. (1979): Zur Wahl von Kalkulationsmethoden bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen. In: Baumaschine + Bautechnik 26, H. 2, S. 65–72.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Energiekosten eines privaten Haushalts in Deutschland (BMWi, 2014).....	8
Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der Verbraucherpreise privater Haushalte für Energie im Vergleich zur Entwicklung des Verbraucherindex im selben Zeitraum.....	9
Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der realisierten Umlaufrendite	9
Abbildung 4: Heizenergieeinsparungen in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr in Abhängigkeit vom erzielten U-Wert.....	13
Abbildung 5: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis als Funktion der Investitionsmehrkosten für die unterschiedlichen Klimaannahmen	13
Abbildung 6: Aufteilung der spezifischen Bruttokosten für ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke.....	14
Abbildung 7: Anteil der energiebedingten Kosten für ein Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke sowie vom U-Wert.....	15
Abbildung 8: Verlauf der Gesamtkosten sowie der energiebedingten Kosten pro eingesparte Energie einer nachträglichen Fassadendämmung in Abhängigkeit vom U-Wert des bestehenden Bauteils.....	16
Abbildung 9: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für ein Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit von der Dämmstoffdicke	17
Abbildung 10: Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis für ein Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle oder EPS-Dämmung in Abhängigkeit vom erzielten U-Wert.....	17
Abbildung 11: Verlauf der Amortisationszeit in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis in Euro pro Kilowattstunde und Jahr für verschiedene Energiepreise und Energiepreissteigerungen.....	19

Abbildung 12: Verlauf der Amortisationszeit in Abhängigkeit vom Energiepreis in Euro pro Kilowattstunde und Jahr und von der Energiepreissteigerung in Prozent für verschieden hohe Investitionen	20
Abbildung 13: Einfluss von verschiedenen Parametern auf die Amortisationszeit unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten und in Abhängigkeit vom Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis.....	21
Abbildung 14: Einfluss aller Parameter nach Tabelle 5 auf die Amortisationszeit mit Angabe des Konfidenzintervalls der Monte-Carlo-Analyse und Darstellung des Worst-Case-Szenarios und des Best-Case-Szenarios in Abhängigkeit von den Investitionskosten in Euro pro Quadratmeter.....	22
Abbildung 15: Relative Verteilung der errechneten Amortisationszeit für verschiedene Mehrkosten-Nutzen-Verhältnisse	23
Abbildung 16: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Außenwandsanierung mit einem Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion	27
Abbildung 17: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Kellerdeckendämmung von unten mit Bekleidung oder ohne Bekleidung in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion.....	28
Abbildung 18: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle eines Steildaches von außen zwischen oder auf den Sparren in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion	29
Abbildung 19: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Sanierung eines Flachdaches in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion.....	30
Abbildung 20: Schwankungsbereich der Amortisationszeit im Falle einer Dämmung der obersten Geschossdecke in Abhängigkeit vom energetischen Zustand der ursprünglichen Konstruktion.....	31
Abbildung 21: Relative Anteile der einzelnen Bauteile und der Lüftungswärmeverluste an den gesamten Wärmeverlusten für ein typisches unsaniertes und saniertes Einfamilienhaus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979.....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle Fazit: Durchschnittliche Amortisationszeiten unterschiedlicher Dämmmaßnahmen.....	5
Tabelle 1: Prozentualer Anteil der gedämmten Bauteilfläche an der jeweiligen gesamten Bauteilfläche	6
Tabelle 2: Nutzungsdauer von Dämmmaßnahmen an bestimmten Bauteilen nach Fouad (2010) und eigenen Abschätzungen.....	10
Tabelle 3: Gradtagzahlen für Deutschland im Überblick.....	12
Tabelle 4: Baupreise einer nachträglichen Dämmung der Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem.....	15
Tabelle 5: Untersuchte Bandbreite verschiedener Parameter für die Sensitivitätsanalyse	21
Tabelle 6: Kostenfunktionen (brutto) für energiesparende Maßnahmen im Wohngebäudebestand.....	24
Tabelle 7: Typische Mindest-U-Werte der Bauteile entsprechend dem energetischen Zustand	25
Tabelle 8: Schwankungsbereich der Eingangsgröße zur Berechnung der Amortisationszeit.....	25
Tabelle 9: Errechnetes Mehrkosten-Nutzen-Verhältnis und resultierende Amortisationszeiten in Abhängigkeit von den Investitionskosten bei Annahme eines energiebedingten Anteils von circa 40 Prozent auf Basis der Ergebnisse aus Tabelle 4	26
Tabelle 10: Bereich der Amortisationszeit für die Sanierung einer Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem für drei unterschiedliche Ausgangs-U-Werte	27
Tabelle 11: Berechnungsergebnisse der Szenarienuntersuchung für ein beispielhaftes Einfamilienhaus aus der Gebäudealtersklasse 1968 bis 1979.....	33

Auftraggeber der Studie

Gesamtverband Dämmstoffindustrie (GDI) e.V.

Friedrichstraße 95, 10117 Berlin

Telefon: 030 20618979-0

E-Mail: info@gdi-daemmstoffe.de

Web: www.gdi-daemmstoffe.de

Verantwortlich:

Marianne Tritz, Geschäftsführerin

Stand: Juni 2015, 2. Auflage

Design: Regina Kramer, www.skaadoosh.de



Gesamtverband
Dämmstoffindustrie e.V.