



*PASSIV
HAUS
INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist*

Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand 2005

Mai 2005

Studie im Auftrag des
Gesamtverbands der Dämmstoffindustrie GDI, Berlin

Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm- Maßnahmen im Gebäudebestand 2005

Studie im Auftrag des
Gesamtverbands der Dämmstoffindustrie GDI, Berlin

Autoren: Oliver Kah, Passivhaus Institut
Wolfgang Feist, Passivhaus Institut
und der technische Ausschuss des Gesamtverbands der
Dämmstoffindustrie

Auftragnehmer: Passivhaus Institut
Rheinstr. 44/46
64283 Darmstadt
www.passiv.de

Darmstadt, Mai 2005

1	Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmmaßnahmen.....	5
2	Einleitung: Ökonomie, Klimaschutz und Behaglichkeit	7
3	Bewertungsmethodik von Energiespar-Maßnahmen	8
3.1	Methodik	9
3.2	Realzins	9
3.3	Investitionskosten	10
3.4	Kopplungsprinzip: Ohnehin-Maßnahme	10
3.5	Restwert der Investition nach Ablauf der Kalkulationsdauer	11
3.6	Energiepreis – Wärmepreis.....	13
3.7	Spezifischer Wärmeverlust durch ein Bauteil.....	14
3.8	Jährlicher Gewinn.....	14
3.9	Wirtschaftlich gebotener – zukunftsweisender Wärmedurchgangskoeffizient..	15
3.10	Äquivalentpreis der eingesparten Energie	16
3.11	Abhängigkeit vom Ausgangswärmedurchgangskoeffizient.....	17
3.12	Weitere Nutzen von Wärmeschutz-Maßnahmen.....	17
3.13	Gegenüberstellung Wärmedurchlasswiderstand „R-Wert“ – Dämmstärke...20	
4	Untersuchte Wärmeschutz-Maßnahmen und ihre Wirtschaftlichkeit 2005	22
4.1	Schnelleinstieg in die Berechnungstabellen.....	22
4.2	Wärmedämm-Maßnahmen an der Außenwand	26
4.2.1	Wärmedämmverbundsystem bei Neuanstrich der Außenfassade	26
4.2.2	Wärmedämmverbundsystem bei Außenputzerneuerung	29
4.2.3	Wärmedämm-Maßnahme mit einer Vorhangfassade.....	32
4.2.4	Innendämmung einer Außenwand (Anlass: neue Tapete)	35
4.2.5	Innendämmung einer Außenwand (Erneuerung des Innenputzes).....	38
4.3	Wärmedämm-Maßnahmen am Steildach	41
4.3.1	Auf- und Zwischensparrendämmung bei Neueindeckung	41
4.3.2	Aufsparrendämmung bei einer Erneuerung der Dacheindeckung	42
4.3.3	Zwischen- und Untersparrendämmung bei Erneuerung der Dach- Innenverkleidung	47
4.4	Wärmedämm-Maßnahmen am Flachdach.....	50

4.4.1	Zusätzliche Wärmedämmung unter der neuen Dachabdichtung	50
4.4.2	Zusätzliche Wärmedämmung auf der neuen Dachabdichtung – Plusdach	50
4.5	Wärmedämm-Maßnahmen an der obersten Geschossdecke	56
4.5.1	Begehbare Wärmedämmung auf der Geschossdecke	56
4.5.2	Nicht begehbare Wärmedämmung auf der Geschossdecke	56
4.6	Wärmedämm-Maßnahmen im beheizten Keller	62
4.6.1	Innendämmung einer Kelleraußenwand	62
4.7	Wärmedämm-Maßnahmen im unbeheizten Keller	65
4.7.1	Dämmung der Kellerdecke von unten	65
4.8	Wärmedämmung von Rohrleitungen	68
5	Zusammenfassung	74
6	Literatur	78

1 Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von Wärmedämmmaßnahmen

Der Gebäudebestand in Deutschland ist nahezu vollständig in Zeiten gebaut worden, in denen Heizenergie um ein Vielfaches billiger war als heute. Die gebaute Substanz unterliegt andererseits ständigen Veränderungen – zu denen ohnehin erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen und die Modernisierung nicht mehr zeitgemäßer Gebäude gehören. Jede dieser Maßnahmen im Bestand bietet die Möglichkeit, den wärmetechnisch unzureichenden Zustand an die Erfordernisse der Zukunft anzupassen.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen wird ausschließlich einzelwirtschaftlich aus Sicht des Investors behandelt. Gegenüber einer früheren Studie [Feist 1998] haben sich die Randbedingungen grundlegend geändert: So muss heute von einem deutlich höheren zu erwartenden mittleren Energiepreis über die Nutzungsdauer der Maßnahmen ausgegangen werden; diese Studie rechnet mit durchschnittlich 5,5 Cent/kWh. Außerdem kann die werterhaltende und dauerhafte Wirksamkeit von Wärmeschutzmaßnahmen heute als gesichert gelten, weshalb korrekt eine Lebenszyklusbetrachtung verwendet werden muss. Um Spekulationen über weit in die Ferne führende Energiepreis- und Zinsprognosen zu vermeiden, wurde der Betrachtungszeitraum auf 20 Jahre begrenzt, jedoch der sicher bestimmbare Restwert der geschaffenen Substanz einbezogen.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich klare Schlussfolgerungen:

- Eine Verbesserung des Wärmeschutzes von Bauteilen der Gebäudehülle in den Beständen in Deutschland ist heute zu jedem der untersuchten Anlässe einzelwirtschaftlich rentabel, wenn das Bauteil nicht bereits gut wärmegeklämt ist; z.B. immer dann, wenn ohnehin ein Gerüst an einer Außenfassade gestellt wird, um diese Fassade zu streichen oder wenn ein Dach neu eingedeckt oder ausgebaut wird.
- Die Verbesserung des Wärmeschutzes rechnet sich allein auf Basis der dadurch eingesparten Energiekosten. Weitere Vorteile, wie eine verbesserte Behaglichkeit, der verbesserte Schutz der Bausubstanz, die Wertsteigerung, die Sicherheit gegenüber Risiken des internationalen Energiemarktes und der Beitrag zum Klimaschutz sind eine zusätzliche Zugabe.
- Gegenüber den Anforderungen der gültigen [EnEV] ist die Wirtschaftlichkeit so umfassend verbessert, dass unter den heutigen Randbedingungen die beste baupraktisch verfügbaren Wärmeschutzmaßnahmen auch ökonomisch optimal sind (vgl. Tabelle). Vor diesem Hintergrund lautet die Empfehlung: „Wenn schon, denn schon“ – es sollte in keinem Fall an der Dämmqualität gespart werden.
- Als Maß für die Wirtschaftlichkeit werden die jährlichen Kapitalkosten (Zins und Tilgung) der Wärmeschutz-Maßnahmen auf die eingesparte Energie

bezogen; so wird ein Preis für die eingesparte Kilowattstunde (kWh) bestimmt. Bei allen untersuchten Einzelmaßnahmen lag der Preis für die eingesparte kWh mit 1 bis 3,5 Cent/kWh für einen zukunftsweisenden Wärmeschutz deutlich unter dem derzeitigen Endenergiebezugspreis von 4,5 Cent/kWh (vgl. Tabelle 1).

Energieeffizienz durch verbesserten Wärmeschutz ist damit heute eine der rentabelsten „Energiequellen“ überhaupt, diese Maßnahmen sind sogar deutlich günstiger in den Gestehungskosten als der Einkauf herkömmlicher Brennstoffe. Die Wertschöpfung für Wärmeschutzmaßnahmen erfolgt zudem fast ausschließlich im Inland, und dort wieder im mittelständischen Handwerk; die hier angesiedelten Betriebe haben eine sehr hohe Arbeitsplatzintensität, so dass eine konsequente Mobilisierung der hier dargestellten wirtschaftlichen Potentiale eine bedeutende Beschäftigungswirkung hat.

Vor dem Hintergrund dieser umfassenden Win-Win-Situation ist eine tatkräftige Initiative zur Verbesserung sowohl der Rate als auch der Qualität der Umsetzung dringend zu empfehlen.

Tabelle 1: Ergebnisse zu den wirtschaftlichen Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand. Eine Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn der Preis der eingesparten Energie günstiger als der Energiebezugspreis ist (der Energiepreis für Öl/Gas liegt derzeit bei 4,5 Cent/kWh, April 2005).

Maßnahme		geboten		zukunftsweisend	
		U-Wert	Äquivalentpreis der eingesparten kWh	U-Wert	Äquivalentpreis der eingesparten kWh
		W/(m ² K)	Cent/kWh	W/(m ² K)	Cent/kWh
Steildach	Unter- & Zwischensparrendämmung	(0.16)	2.0	(0.16)	2.0
	Aufsparrendämmung	0.16	1.7	0.11	2.0
	Auf- und Zwischensparrendämmung	0.15	1.9	0.10	2.1
Flachdach	Zusätzl. Wärmedämmung in Warmdachaufbau	0.18	3.2	0.12	3.5
	Plusdach (Umkehrdach auf Dachabdichtung)	0.22	2.9	0.16	3.3
oberste Geschossdecke	Wärmedämmung (nicht begehbar)	0.14	0.7	0.12	0.9
	Wärmedämmung (begehbar)	0.14	1.6	0.12	1.7
Außenwand	Wärmedämm-Verbundsystem (Putzerneuerung)	0.17	1.3	0.13	1.6
	Wärmedämm-Verbundsystem (Neuanstrich)	0.17	2.3	0.13	2.5
	Vorhangfassade mit zusätzlicher Dämmung (Erneuerung der Schalung)	0.18	2.0	0.13	2.3
	Innendämmung mit Luftdichtung (Neue Tapete)	(0.28)	2.0	(0.28)	2.0
	Innendämmung mit Luftdichtung (Erneuerung von Innenputz)	(0.28)	1.0	(0.28)	1.0
Kellerwand	Innendämmung mit Luftdichtung (Erneuerung von Innenputz)	(0.27)	2.5	(0.27)	2.5
Kellerdecke	Dämmung von unten	(0.27)	2.5	(0.27)	2.5
Wärmevertei- und Warmwasserleitungen		1)		1)	
nachträgliche Dämmung		100% x DN	0.9	200% x DN	1.5

Bei den in Klammern dargestellten U-Werten sind die Dämmstärken im Innenraum aus baupraktischen Gründe beschränkt. Die wirtschaftlichen U-Werte liegen bei noch besseren Werten.

1) Dicke der Dämmschale bezogen auf den Leitungsdurchmesser DN

2 Einleitung: Ökonomie, Klimaschutz und Behaglichkeit

Es ist ein erklärtes Ziel der Bundesregierung, den Ausstoß von klimaschädlichen Stoffen in die Erdatmosphäre bedeutend zu reduzieren. Mit Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls der Klimaschutzkonvention gelten erstmals völkerrechtlich verbindliche Ziele für die Verringerung des Ausstoßes klimaschädlicher Treibhausgase bis 2012. Die Bundesregierung hat sich darin verpflichtet, die Treibhausgas-Emissionen bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 um 21 Prozent bezogen auf 1990 zu senken. Für einen maßgeblichen Teil, nämlich das Kohlendioxid (CO₂), ist eine Verringerung über eine wesentliche Mengenabnahme der in Verbrennungsprozessen eingesetzten fossilen Energieträger zu erreichen.

Ein bedeutender Anteil des Energieeinsatzes in Deutschland wird in Gebäuden für Niedertemperaturwärme, insbesondere für Heizzwecke verwendet. Überwiegend sind es fossile Brennstoffe, die in Heizkesseln in Niedertemperaturwärme umgesetzt werden. Wenngleich auch eine Zunahme dieses Energieeinsatzes durch Neubauten begrenzt werden muss, findet doch der bedeutende Teil des Verbrauchs im Gebäudebestand statt. Eine Reduzierung der Brennstoffmenge und damit verbunden der CO₂ Emissionen ist nur möglich, wenn sachliche Veränderungen an den maßgeblichen Komponenten des Gebäudebestands durchgeführt werden.

Hierzu ist es zunächst wichtig, zweierlei zu erkennen:

- Auch die Gebäude im Bestand sind keine statisch unveränderlichen Objekte. Ständig wird ein bedeutender Teil renoviert, modernisiert und umgebaut. Praktisch alle der Witterung ausgesetzten Bauteile und haustechnischen Komponenten müssen von Zeit zu Zeit ohnehin ausgewechselt werden.
- Bauliche und heiztechnische Verbesserungsmaßnahmen erfordern in der Regel Investitionskosten; diese Kosten müssen in einem vernünftigen Verhältnis zu den eingesparten Energiekosten stehen, wenn die Maßnahmen allgemein Akzeptanz finden sollen.

Zusätzliche Wärmeschutz-Maßnahmen sind ein bedeutender Hebel zu Verbesserung der energetischen Effizienz von Bestandsgebäuden (vgl. [Ebel 1990]) Aus Gründen der Versorgungssicherheit und des Klimaschutzes wurden von der Bundesregierung bauordnungsrechtliche Maßnahmen auf der Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes [EnEG] vorgeschrieben. Dieses Gesetz bietet die Grundlage für Anforderungen an den Wärmeschutz bei Änderungen an bestehenden Gebäuden. Nur wirtschaftlich vertretbare und nach dem Stand der Technik ausführbare Maßnahmen dürfen von den Eigentümern gefordert werden. Die Anforderungen an den Wärmeschutz sind in der Energieeinsparverordnung [EnEV] festgelegt. Die

Wirtschaftlichkeit dieser Anforderungen wurde in [Deters 1999], [Feist 1997], [Feist 1998], [Maas 2000] untersucht. Aufgabe dieser Studie war es, auf Basis von aktuellen Baukostendaten und Energiepreisen die Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen erneut zu überprüfen. Besonders vor dem Hintergrund der gegenüber 2002 deutlich höheren aktuellen Energiekosten erhält diese Untersuchung an Bedeutung. Auch wenn die Tagespreise für Rohöl von sehr vielen Einflüssen abhängen und schwer vorhersehbar sind, so werden mittelfristig die Energiepreise kaum sinken. Energieeffizienz-Maßnahmen machen unabhängiger von diesen Entwicklungen. Neben dem energetischen Aspekt sind Wärmeschutz-Maßnahmen aber auch immer eine Investition in eine bessere thermische Behaglichkeit und führen zu einer Wertsteigerung der wärmetechnisch sanierten Gebäude.

3 Bewertungsmethodik von Energiespar-Maßnahmen

Aufgabe dieser Studie war die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen an Bestandsgebäuden. Die mit den Wärmeschutz-Maßnahmen verbundenen Investitionskosten müssen in einem vernünftigen Verhältnis zur Energieeinsparung stehen. Die weiteren Vorteile neben der Energieeinsparung werden in dieser rein monetären Bewertung nicht berücksichtigt.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienz-Maßnahmen wird ausschließlich einzelwirtschaftlich behandelt, d.h. aus Sicht des Investors. Gemeinwirtschaftliche Aspekte bleiben außer Betracht, genauso wie ökonomisch schwer fassbare Kriterien, wie z.B. eine höhere thermische Behaglichkeit. In die einzelwirtschaftliche Analyse gehen die folgenden Parameter ein:

- die Investitionskosten (das sind alle Kosten, die für wärmetechnische Sanierung des Bauteils erforderlich sind),
- etwaige Wartungs- oder Instandhaltungskosten (bei Wärmeschutz-Maßnahmen sind keine zusätzlichen Wartungskosten zu berücksichtigen, da ein erhöhter Wärmeschutz keine zusätzlichen Wartungs- oder Betriebskosten nach sich zieht),
- Energiekosten (angesetzt wird ein erwarteter mittlerer Preis über den Kalkulationszeitraum)
- und der Betrachtungszeitraum.

Investitionskostenrechnungen verfolgen das Ziel, Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einer Investitionsentscheidung zu machen. Bei Energieeffizienz-Maßnahmen an Gebäuden ist es wichtig vor Augen zu haben, dass **Investitionen in Energieeffizienz** immer und ausschließlich **Alternativen zum Energiebezug** sind. Mit der

Sicherheit eines bestehenden Gebäudes stehen immer Investitionsmittel zum Hypothekenzinsfuß zur Verfügung. Rentabel ist damit eine Effizienz-Maßnahme dann, wenn sie nicht teurer ist als die Alternative Energiebezug.

Das wirtschaftliche Optimum ergibt sich mit der Maßnahmenkombination, welche die Energiedienstleistung im Vergleich zu anderen Alternativen mit insgesamt geringsten Kosten erbringt. Bei den hier untersuchten Wärmedämm-Maßnahmen bestehen die Alternativen in den unterschiedlichen Wärmedurchlasswiderständen der aufgetragenen Wärmedämmung.

3.1 Methodik

In der Studie wird die Annuitätenmethode verwendet. Bei dieser dynamischen Methode wird ein auf den Bezugszeitpunkt t_0 bezogenen Betrag K auf nominal gleich hohe jährliche Raten über die Nutzungsdauer n umgerechnet. Die jährlichen Kapitalkosten werden als Annuität bezeichnet. Praktisch ist dieses Vorgehen, wenn bei gleichbleibenden Betriebskosten (Energiekosten, Wartung, etc.) nur die Annuität der Investition ermittelt werden muss, die dann zu den Betriebskosten addiert wird. Anschaulich entsprechen die Annuitäten den jährlichen Raten, die für Zins und Tilgung an die Bank gezahlt werden. Diese Methode wird traditionell bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen bzgl. der Wärmeversorgung verwendet (vgl. [VDI 2067]).

Gemäß der Annuitätenmethode ergeben sich die jährlichen Kapitalkosten K_i für eine Investition I über die Nutzungsdauer der Maßnahme als Produkt aus dem Annuitätsfaktor a und der Investition. Berechnet werden hiermit die jährlichen konstanten Raten über die Nutzungsdauer.

jährliche Kapitalkosten : $K_i = a \cdot I$

Annuitätsfaktor : $a = \frac{p}{1 - (1 + p)^{-n}}$

Kalkulationszins : p

Nutzungsdauer : n

Den Kosten für die Energiesparmaßnahme (Kapitalkosten sowie gegebenenfalls Zusatzkosten, z.B. Wartungskosten oder Hilfsenergie) stehen die eingesparten Energiekosten gegenüber. Die Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn die eingesparten Energiekosten höher sind als die Kosten der Energiesparmaßnahme (vgl. Abschnitt 3.8).

3.2 Realzins

Für den wirtschaftlichen Vergleich ist es vorteilhaft mit realen Preisen und Zinssätzen zu rechnen; die schwankende Teuerungsrate wird in diesem Fall herausgerechnet.

Der Realzins ergibt sich aus Inflationsrate i und nominalem Zins p_{nominal} zu:

$$\text{Realzins: } p_{\text{real}} = \frac{1 + p_{\text{nominal}}}{1 + i} - 1$$

Bei heutigen effektiven Hypothekenzinssätzen um 5% bei 20 Jahren Laufzeit und einer Teuerungsrate um 1,5% ergibt sich ein **Realzins von 3,5%**. Mit diesem Realzins wird im weiteren gerechnet.

3.3 Investitionskosten

Bei den untersuchten Maßnahmen umfassen die Investitionskosten die Planung, Anschaffung, Installation und Inbetriebnahme. Bei einer Fassaden-Dämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem sind das z.B. die Kosten zum Baustellen einrichten, Gerüst stellen, Wärmedämmung aufdübeln, Armierungsputz und Außenputz aufbringen. Die Investitionskosten I werden dabei auf die Flächeneinheit des Bauteils bezogen. Da es sich um Endkunden handelt, werden alle Kosten inkl. Mehrwertsteuer verwendet. Die Kostendaten wurden 2004 aktualisiert.

Besonders vorteilhaft ist eine Investition dann durchzuführen, wenn **ohnehin** eine Teilerneuerung des entsprechenden Bauteils ansteht. Die Energieeinsparmaßnahme kann in diesem Fall mit der ohnehin anstehenden Instandsetzung gekoppelt werden und die der Effizienzmaßnahme zuzurechnenden Investitionskosten reduzieren sich (**Kopplungsprinzip**).

3.4 Kopplungsprinzip: Ohnehin-Maßnahme

In den meisten Fällen empfiehlt es sich, eine Energieeinspar-Maßnahme dann durchzuführen, wenn ohnehin Arbeiten am betreffenden Bauteil durchgeführt werden. Viele Energieeffizienz-Maßnahmen werden erst durch die Kopplung mit einer ohnehin fälligen baulichen Investition wirtschaftlich. Bleiben wir weiter beim Beispiel der Fassaden-Dämmung mit einem Wärmedämmverbundsystem. Bei verputzten Fassaden steht in Zeiträumen zwischen 30 bis 50 Jahren eine Erneuerung des Außenputzes an. Wird die ohnehin fällige Putzerneuerung genutzt, um zusätzlich ein Wärmedämmverbundsystem anzubringen, so sind die zusätzlichen Investitionskosten für die Energieeffizienzmaßnahme deutlich geringer. Dieser Umstand wurde bereits in der Wärmeschutzverordnung von 1995 und in der 2000 in Kraft getretenen Energieeinsparverordnung berücksichtigt und führte zur Aufnahme von **bedingten Anforderungen** bei Änderungen an den Außenbauteilen (vgl. Energieeinsparverordnung 2001, § 8 und Anhang 3 Nr. 1 bis 5).

In den Dokumentationen zu den untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen (vgl. Abschnitt 4) werden die baulichen Investitionskosten der Ohnehin-Maßnahme daher ausgewiesen. Die **Investitionskosten der bedingten Energiespar-Maßnahme**

ergeben sich aus den baulichen Investitionskosten der Wärmeschutz-Maßnahmen abzüglich der etwaigen Ohnehin-Kosten. Der Zusatz „bedingte“ Energiespar-Maßnahme rührt daher, dass bei bestimmten Instandsetzungstatbeständen für die erneuerte Komponente ein verbesserter Wärmeschutz gefordert wird, wenn dieser unter diesen Umständen wirtschaftlich vertretbar zu erreichen ist.

3.5 Restwert der Investition nach Ablauf der Kalkulationsdauer

Aussagen zur Entwicklung der Energiepreise und Zinssätze werden mit zunehmendem Zeiträumen immer unsicherer. Laufzeiten von Hypothekendarlehen von 20 Jahren sind durchaus üblich. Die Lebensdauern von einzelnen Bauteilen können allerdings deutlich länger sein. In den folgenden Berechnungsbeispielen wurde generell mit einer **Kalkulationsdauer von 20 Jahren** gerechnet. Für diese Zeiträume besteht eine gewisse Sicherheit, um Aussagen zu Energiepreisen und Zinsentwicklung machen zu können. Doch kann auch die Zeit danach noch sinnvoll mit dem Konzept des Restwerts berücksichtigt werden. Nach Ablauf der Kalkulationsdauer kann das Bauteil noch weiter genutzt werden. Nach Ende des Betrachtungszeitraums hat die Investition deshalb noch einen Restwert. Dieser Restwert kann mit finanzmathematischen Methoden bestimmt werden. Diesen bleibenden Wert kann und muss man bei der Bewertung einbeziehen. Z.B. entsprechen 50 Jahre Nutzung einer Investition I jährlich konstant wiederkehrenden Kosten von

jährliche konstante Kapitalkosten über z.B. 50 Jahre : $K_i = a(50\text{Jahre}) \cdot I$,

also dem Produkt aus dem Annuitätsfaktor a (für 50 Jahre) und der Investition.

Diese jährlich konstanten Kosten können mit dem Barwertfaktor B auf den Anfangszeitpunkt rückgezinst werden. Der Faktor berücksichtigt die Abzinsung der jährlichen konstanten Kosten auf einen Anfangszeitpunkt.

$$\text{Barwertfaktor : } B = \frac{(1 - (1 + p)^{-n})}{p}$$

Mit dem Barwertfaktor ist es nun möglich, den Barwert zu berechnen, der während der Kalkulationsdauer anfällt. Dafür werden die jährlich konstanten Kosten mit dem Barwertfaktor multipliziert. Der Barwert K_0 , der innerhalb des Betrachtungszeitraums anfällt, kann berechnet werden mit:

$$\text{Barwert im Betrachtungszeitraum : } K_0 = a(50\text{Jahre}) \cdot B(20\text{Jahre}) \cdot I$$

Der Restwert der Investition nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 20 Jahren ergibt sich dann als Differenz aus dem Barwert der Gesamtinvestition und dem

Barwert der Investition über den Zeitraum der ersten 20 Jahren. Der Restwert R bei z.B. einer Lebensdauer von 50 Jahren ist daher:

$$\text{Restwert: } R = (1 - a(50\text{Jahre}) \cdot B(20\text{Jahre}) \cdot I = 39,4\% \cdot I$$

Tabelle 2 zeigt für verschiedene Zinssätze und Lebensdauern den Restwert der Investition I nach Ablauf der Kalkulationsdauer von 20 Jahren.

Tabelle 2: Restwert einer Investition nach der Kalkulationsdauer von 20 Jahren

Lebensdauer \ Realzins	30 Jahre	40 Jahre	50 Jahre
3,0%	24%	36%	42%
3,5%	23%	33%	39%
4,0%	21%	31%	37%

Welche Lebensdauer ist nun für die untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen anzusetzen? Beispielweise kann eine ohnehin fällige Erneuerung der Dachabdichtung an einem Flachdach mit einer Wärmeschutz-Maßnahme gekoppelt werden. Dabei wird, nachdem die alte Dachabdichtung abgetragen ist, zusätzlich Wärmedämmung eingelegt und es werden gegebenenfalls Anpassungsarbeiten aufgrund der Erhöhung der wasserführenden Schicht (z.B. an der Attika) durchgeführt. Eine alte vorhandene Wärmedämmung kann im Dachaufbau verbleiben, selbst wenn diese durchnässt ist (vgl. [Spilker 2003]). Der übliche Erneuerungszyklus von Dachabdichtungen liegt im Bereich von 30 Jahren. Die Wärmedämmung kann aber im Dachaufbau verbleiben: die anzusetzende Lebensdauer der Wärmeschutz-Maßnahme ist also länger als die der Dachabdichtung. Aus der langjährigen Erfahrung mit Dämmstoffen wird generell von hohen Lebensdauern ausgegangen. Gutachten belegen, dass die untersuchten Wärmedämmstoffe auch nach 18 bzw. 31 Jahren keine messbaren Änderungen aufweisen (vgl. [Riechle 1984], [Wolf 1986]). Die 1986 nach 31 Jahren untersuchte Wärmedämmung in einem Flachdach ist inzwischen 50 Jahre ohne Funktionseinschränkung im Dachaufbau. Für gebräuchliche Dämmstoffe werden in der Normung und bei europäisch technischen Zulassungen Lebensdauern von 50 Jahren angenommen (vgl. [Hamann 1999], [EN ISO 10456], [EOTA]). **In dieser Untersuchung wird für reine Wärmeschutz-Maßnahmen eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt, sofern am Bauteil anfallende Instandsetzungsarbeiten mit kürzeren Erneuerungszyklen die Wärmeschutz-Maßnahme nicht betreffen.** Nach Ablauf des Kalkulationszeitraums von 20 Jahren hat die Wärmeschutz-

Maßnahme daher noch einen Restwert (Gegenwartswert) von 39,4% (vgl. Tabelle 2) der ursprünglichen Investition. Die Tatsache, dass Dämmmaßnahmen an opaken Bauteilen langlebige Werte darstellen, ist in früheren Untersuchungen meist nicht angemessen berücksichtigt worden. Dies ist für die Maßnahmen nicht nur für das hier ausschließlich betrachtete monetäre Kriterium wichtig, sondern auch für die Vorsorge – sowohl des Einzelnen zur Sicherstellung gesunder und behaglicher Wohnverhältnisse, als auch der Gesellschaft zu Klimaschutz und zur Begrenzung volkswirtschaftlicher Risiken.

3.6 Energiepreis – Wärmepreis

Die Energiekosteneinsparung ist ein wesentlicher Nutzen der Wärmedämmmaßnahmen – und in dieser Studie der einzige Nutzen, der monetär berücksichtigt wird. Der angenommene mittlere Energiepreis über den Kalkulationszeitraum hat hierauf einen entscheidenden Einfluss. Die Tagespreise für Heizöl hängen von sehr vielen Einflüssen ab und sind schwer vorhersehbar. Der Heizölpreis schwankte 2004 zwischen 3,4 und 5,3 Cent/kWh (vgl. [TECSON]). Unbestritten ist allerdings, dass mittelfristig die mittleren Energiepreise kaum sinken werden. Für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren wurde ein nur moderater Preisanstieg zugrundegelegt. Als finanzmathematischer Mittelwert über die kommenden 20 Jahre wurde ein Endenergiepreis von 5,5 Cent angenommen (vgl. [Feist 2005]). Der mittlere zukünftige Endenergiepreis ist allerdings noch nicht Kalkulationsgrundlage für die Wirtschaftlichkeit bei Wärmeschutzmaßnahmen, da bei der Wärmeerzeugung und Verteilung Wärme verloren geht und noch zusätzlich Hilfsenergie aufzubringen ist. Die neuen Energiekosten nach der Durchführung der Wärmeschutzmaßnahme ergeben sich deshalb als Produkt aus der berechneten Heizwärmeeinsparung und dem zukünftigen Wärmepreis. Der Wärmepreis berücksichtigt den Jahresnutzungsgrad der Heizungsanlage und den Hilfsenergiebedarf.

Für diese Studie wurde ein zukünftiger Brennstoffpreis für Erdgas oder Heizöl von 5,5 Cent/kWh im Mittel über den Kalkulationszeitraum beim Endverbraucher vereinbart.

Die Kosten der Wärmebereitstellung im Gebäude (inkl. der Verluste bei Wärmeerzeugung und Verteilung) ergeben sich mit einem marginalen Jahresnutzungsgrad der Heizungsanlage (vgl. [Feist 1998]) von 90% zu $5,5 \text{ Cent/kWh} / 90\% = 6,1 \text{ Cent/kWh}$ (im Mittel über den Kalkulationszeitraum). Ein Heizsystem benötigt zusätzlich noch elektrische Hilfsenergie, die mit 2% des Wärmebedarfs berücksichtigt wird. Der zukünftige Wärmepreis erhöht sich hierdurch um 0,34 Cent/kWh (bei einem mittleren Strompreis im Betrachtungszeitraum von 17 Cent/kWh). Damit ergibt sich der folgende **Ansatz für den mittleren Wärmepreis im Kalkulationszeitraum:**

$$P_{\text{Wärme}} = 5,5 \text{ Cent/kWh} / 90\% + 0,34 \text{ Cent/kWh} = \mathbf{6,4 \text{ Cent/kWh.}}$$

In den Berechnungsblättern wird auf Basis der Endenergie gerechnet. Um auch hier den Hilfsenergieanteil zu berücksichtigen, wird dieser in einem geänderten **mittleren Endenergiepreis unter Einbeziehung der Hilfsenergie** umgerechnet:

$$P_{\text{End}} = P_{\text{Wärme}} \times 90\% = \mathbf{5,8 \text{ Cent/kWh.}}$$

3.7 Spezifischer Wärmeverlust durch ein Bauteil

Der spezifische Wärmeverlust q_L in der Heizzeit bezogen auf die Flächeneinheit des Bauteils berechnet sich gemäß :

$$\text{Spezifischer Wärmeverlust : } q_L = U_{\text{Bauteil}} \cdot f_{\text{Bauteil}} \cdot G_t$$

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient : } U_{\text{Bauteil}}$$

$$\text{Reduktionsfaktor : } f_{\text{Bauteil}}$$

$$\text{Heizgradstunden : } G_t$$

Für Wärmeschutz-Maßnahmen an Außenbauteilen wurde mit einem Heizgradstunden-Wert von 78 kWh/a gerechnet. Dies entspricht einem mittleren Wert für deutsches Klima in bestehenden Gebäuden. Die solare Absorption an dunklen Dachoberflächen verringert die Heizgradstunden an Dachkonstruktionen geringfügig gegenüber der Außenwand. Angenommen wurde hier ein G_t -Wert von 74 kWh/a. Bei Maßnahmen an Bauteilen gegen einen unbeheizten Keller oder gegen Erdreich wurde mit einem Reduktionsfaktor von 0,5 gerechnet. Gegenüber dem Ausgangsbauerteil ergibt sich die auf die Bauteilfläche bezogene Heizwärmeeinsparung zu:

$$\text{Spezifische Heizwärmeeinsparung : } q_{\text{ein}} = q_{L,\text{alt}} - q_{L,\text{neu}} = (U_{\text{Bauteil,alt}} - U_{\text{Bauteil,neu}}) \cdot f_{\text{Bauteil}} \cdot G_t$$

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient : } U_{\text{Bauteil}}$$

$$\text{Reduktionsfaktor : } f_{\text{Bauteil}}$$

$$\text{Heizgradstunden : } G_t$$

3.8 Jährlicher Gewinn

Der jährliche Gewinn gibt Aufschluss darüber, ob eine Investition wirtschaftlich ist. Ist dieser positiv, so ist die Maßnahme rentabel. Der annuitätische Gewinn berechnet sich aus der jährlichen Energiekosteneinsparung abzüglich der jährlichen Kapitalkosten und gegebenenfalls zusätzlicher Wartungskosten. Wie bereits erläutert, werden nach der Annuitätenmethode sowohl Energiekosten als auch Kapitalkosten auf jährlich konstante Beträge umgelegt. Bezüglich der Wartungskosten sind bei Wärmeschutz-Maßnahmen keine zusätzlichen Kosten zu berücksichtigen, da ein erhöhter Wärmeschutz keine zusätzlichen Wartungs- oder Betriebskosten bei den Bauteilen nach sich zieht. Auf Grund der durch den besseren Wärmeschutz reduzierten Wahrscheinlichkeit für feuchtebedingte Bauschäden werden diese Kosten sogar eher

verringert; wir sehen aber von einer Monetarisierung dieses Begleitnutzens bewusst ab. Die Alternative mit dem höchsten jährlichen Gewinn zeigt die optimale Wärmeschutz-Maßnahme an.

Die jährliche Energiekosteneinsparung errechnet sich zu:

$$\text{jährliche Energiekosteneinsparung : } E_s = q_{\text{ein}} \cdot P_{\text{Wärme}} = \frac{q_{\text{ein}} \cdot P_{\text{End}}}{\eta}$$

spezifische Heizwärmeeinsparung : q_{ein}

Wärmepreis : $P_{\text{Wärme}}$

mittl. Energiepreis inkl. Hilfsenergieanteil : P_{End}

Jahresnutzungsgrad : η

Die jährlichen Kapitalkosten sind:

jährliche Kapitalkosten : $K_i = a(20\text{Jahre}) \cdot (I - R)$

Annuitätsfaktor für Kalkulationsdauer : $a(20\text{Jahre})$

Investition : I

Restwert der Investition I nach Ablauf der Kalkulationsdauer(20Jahre) : R

Damit kann der annuitätische Gewinn bestimmt werden zu:

$$\text{jährlicher Gewinn : } G = E_s - K_i = q_{\text{ein}} \cdot P_{\text{Wärme}} - a(20\text{Jahre}) \cdot (I - R)$$

3.9 Wirtschaftlich gebotener – zukunftsweisender Wärmedurchgangskoeffizient

Für eine Reihe von Außenbauteilen wird jeweils die Wärmeschutz-Maßnahme bestimmt, die den jährlichen Gewinn des Investors maximiert. Die zugehörigen Gewinnkurven sind üblicherweise im Bereich des Optimums sehr flach, daher kann von einem ganzen Bereich wirtschaftlich sinnvoller Maßnahmen gesprochen werden. Diesem Umstand wird dadurch Rechnung getragen, dass jeweils zwei Wärmedurchgangskoeffizienten angegeben werden: ein wirtschaftlich gebotener Mindestwert und ein zukunftsweisender Zielwert. Der **wirtschaftlich gebotene Mindestwert** liegt im mathematisch bestimmten Kostenoptimum; der **zukunftsweisende U-Wert** berücksichtigt den flachen Verlauf des Optimums und sorgt für zukünftige Entwicklungen vor. Der Gesamtbarwert für Investition und Energiekosten weicht in diesem Fall maximal 1,5% vom Optimum ab. Bei nahezu gleichem Gewinn erzielt der Investor zusätzliche Versorgungssicherheit und erhöht die thermische Behaglichkeit. Dies ist gerade vor dem Hintergrund der langen Erneuerungszyklen wichtig.

Aber auch der Staat profitiert mit der Vorgabe von Zielwerten. Bei nahezu unverändertem Gewinn für den Eigentümer wird die Abhängigkeit von Energieimporten reduziert und die Folgekosten durch vermiedene CO₂-Emissionen gesenkt. An das

Erreichen von eingeführten Zielwerten können öffentliche Förderprogramme gekoppelt werden.

3.10 Äquivalentpreis der eingesparten Energie

Besonders anschaulich zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Energieeinspar-Maßnahme ist der „Preis der eingesparten Energie“. Bei Energiespar-Maßnahmen wird zwar keine Energie erzeugt, aber es wird Endenergie nicht mehr benötigt. Damit wirkt die Energieeffizienz-Maßnahme in der Bilanz doch wie eine Energiequelle. Mit den Kosten für eine „eingesparte Kilowattstunde“ ist ein transparenter Vergleich zu einer alternativen Dienstleistung Energiebezug möglich. Eine Maßnahme ist genau dann wirtschaftlich, wenn der Äquivalentpreis für die eingesparte Kilowattstunde Energie geringer ist als der zukünftige über die Kalkulationsdauer gemittelte Preis für die bezogene Kilowattstunde Endenergie.

Zur Berechnung des Äquivalentpreises der eingesparten Energie werden die durch die Sparmaßnahme entstehenden zusätzlichen Investitionskosten I auf jährliche reale Kapitalkosten umgelegt, die über die Nutzungsdauer der Maßnahme konstant sind (vgl. Abschnitt 3.1). Zu den Kapitalkosten können gegebenenfalls noch Wartungskosten und Betriebskosten für Hilfsenergie hinzu kommen. Im Fall der untersuchten Wärmeschutz Maßnahmen müssen keine weiteren Wartungskosten oder Betriebskosten berücksichtigt werden, da die Verbesserung des Wärmeschutzes keine zusätzlichen Wartungs- oder Betriebskosten nach sich zieht. Zur Ermittlung des Äquivalentpreises der eingesparten Energie werden die im Kalkulationszeitraum konstanten jährlichen Kapitalkosten gemäß Abschnitt 3.8 bestimmt und auf die erzielte Heizenergieeinsparung q_{end} bezogen.

$$\begin{aligned} \text{Spezifische Heizenergieeinsparung : } q_{\text{end}} &= (q_{L,\text{alt}} - q_{L,\text{neu}}) / \eta = \\ &= (U_{\text{Bauteil,alt}} - U_{\text{Bauteil,neu}}) \cdot f_{\text{Bauteil}} \cdot G_t / \eta \end{aligned}$$

marginaler Jahresnutzungsgrad (vgl. [Feist 1998]): η (wird mit 90% angenommen)

Wärmedurchgangskoeffizient : U_{Bauteil}

Reduktionsfaktor : f_{Bauteil}

Heizgradstunden : G_t

Äquivalentpreis der eingesparten Energie : $P_{\text{ein}} = a(20\text{Jahre}) \cdot (I - R) / q_{\text{end}}$

Annuitätsfaktor für Kalkulationsdauer : $a(20\text{Jahre})$

Investition : I

Restwert der Investition I nach Ablauf der Kalkulationsdauer(20Jahre) : R

Durch die Berechnung der Gestehungskosten von Einsparenergie wird ein direkter Vergleich dieses Äquivalentpreises mit den Marktpreisen für Gas oder Öl möglich. Weitere Vorteile dieser Bewertung bestehen darin, dass in den Äquivalentpreis der eingesparten Energie die unsichere zukünftige Energiepreisentwicklung nicht eingeht

und dass damit ganz unterschiedliche Maßnahmen aus verschiedenen Bereichen verglichen werden können.

3.11 Abhängigkeit vom Ausgangswärmedurchgangskoeffizient

Neben den bereits genannten Randbedingungen wie z.B. dem mittleren zukünftigen Endenergiepreis ist bei den untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen auch der U-Wert des alten Bauteils von Einfluss. Zu verschiedenen Wärmedurchgangskoeffizienten des alten Bauteils ergibt sich zwar immer der gleiche optimale U-Wert des sanierten Bauteils, allerdings bei unterschiedlichen jährlichen Gewinnen und zu unterschiedlichen Kosten der eingesparten Energie. Diagramme in Abschnitt 4 zeigen die ökonomische Abhängigkeit der Wärmeschutz-Maßnahmen von den Ausgangswärmedurchgangskoeffizienten. Die Tendenz ist dabei eindeutig: besonders rentabel ist die Wärmedämmung von wenig gedämmten Bauteilen mit den üblichen U-Werten alter Bauteile; dagegen kann es vorkommen, dass sich eine zusätzliche Wärmedämmung auf Bauteile mit bereits niedrigen U-Werten nicht mehr lohnt.

Daher muss gelten: wenn eine Wärmeschutz-Maßnahme durchgeführt wird, dann sollte diese auch konsequent mit wirtschaftlich optimaler Wärmedämmung ausgeführt werden. Eine spätere Nachrüstung ist regelmäßig nicht mehr rentabel und damit für eine weitere Energieeinsparung verloren, da jede Maßnahme mit vergleichsweise hohen festen Grundkosten verbunden ist (Wenn man z.B. gerade das Dach erneuert hat, deckt man es nicht wieder ab, um den Wärmeschutz noch einmal zu verbessern).

3.12 Weitere Nutzen von Wärmeschutz-Maßnahmen

Die Wirtschaftlichkeit von Wärmeschutz-Maßnahmen wird in dieser Studie ausschließlich einzelwirtschaftlich aus Sicht des Investors behandelt. In die Analyse gehen die Investitionskosten der Maßnahmen, etwaige Wartungs- und Instandhaltungskosten, die Energiekosten und der Betrachtungszeitraum ein. Weitere monetär nur schwer fassbare Aspekte für den Investor und auch Vorteile für die Gemeinschaft wurden hier nicht berücksichtigt, sind aber für Investitionsentscheidungen oft von großer Wichtigkeit. Hierzu zählen z.B.:

- Behaglichkeitsgesichtspunkte: ein verbesserter Wärmeschutz sorgt für behaglichere und gesündere Wohnverhältnisse. Der Wärmeschutz in Dachwohnungen steigert z.B. wesentlich den winterlichen und den sommerlichen Komfort (vgl. [Kah 2005]).
- Wertsteigerung: ein verbesserter Wärmeschutz schützt die Bausubstanz und führt zu einer Wertsteigerung des Objekts.
- Vermietbarkeit: Die Vermietbarkeit von Mietwohnraum wird erhöht (vgl. [Greifenhagen 2003], [Braun 2005]). Mietspiegel weisen inzwischen auch

Zuschläge auf die Kaltmiete für wärmetechnisch sanierten Mietraum aus (in Darmstadt beträgt dieser 37 Cent/(m² Wohnfläche und Monat); vgl. [Mietspiegel DA 2003]).

- Schallschutz: Wärmeschutz-Maßnahmen und damit verbundene Nacharbeiten der Luftdichtheit erhöhen den Schallschutz.
- Versorgungssicherheit: Ein verringerter Energiebedarf macht unabhängiger von zukünftigen Energiepreisentwicklungen und ein etwaiger Umstieg auf nachhaltige Energiequellen wird dadurch erst möglich.
- Umweltkriterien: mit der Reduzierung des Energiebedarfs werden z.B. auch CO₂-Emissionen verringert.
- Beschäftigungsimpulse durch Energieeffizienz-Maßnahmen: Die Alternative zur Dienstleistung Energiebezug, die vor allem zu Rohstoffimporten führt, sind Investitionen in Energieeffizienz. Eine verstärkte Sanierungsaktivität kommt gerade der mittelständischen Bauwirtschaft und dem Handwerk zugute. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau führt für Ihre CO₂-Minderungsprogramme im Altbau- und im Neubaubereich deutliche Beschäftigungseffekte an. In einem Ausblick bis zum Jahr 2010 wird die Anzahl der geschaffenen bzw. erhaltenen Arbeitsplätze auf 20.000 bis 30.000 beziffert ([KFW 2003]).

Diese ebenfalls bedeutenden Gesichtspunkte sind einer ökonomischen Betrachtung nur schwer zugänglich und werden in aller Regel bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht berücksichtigt. Auch in der vorliegenden Untersuchungen wurde eine solche Monetarisierung nicht vorgenommen.

Volkswirtschaftliche Kriterien müssen nicht immer im Einklang mit der betriebswirtschaftlichen Rechnung stehen. Ein Versuch kann darin bestehen, „**externe Kosten**“ mit in die Kalkulation einzufügen. Als Beispiel für die Berücksichtigung von externen Kosten kann hier ein Verfahren des Landes Bremen aufgeführt werden (vgl. [Glasneck 1993]). Bei der Bewertung von öffentlichen Investitionen wurde die Vermeidung von CO₂-Emissionen mit 50€/t CO₂) mit einbezogen. Solange aber der Gesetzgeber diese Internalisierung nicht durch entsprechende Steuern oder Abgaben betriebswirtschaftlich kalkulierbar macht, kann eine breite Berücksichtigung externer Kosten nicht erwartet werden. Daher wurde auch in dieser Studie kein Zuschlag für externe Kosten kalkuliert.

Eine **besondere Problematik** in Altbauten stellt der **Schimmelbefall** dar. Der Pilzbefall kann zu schwerwiegenden Schäden an der Bausubstanz führen. Damit Pilzsporen auskeimen und Myzele wachsen können, muss ausreichend Feuchtigkeit vorhanden sein. Neuere Untersuchungen zeigen, dass Pilzwachstum auch bereits vor einer Tauwasserbildung auftreten kann (vgl. z.B. [Sedlbauer 2002]). Auskeimen

und Wachstum kann schon bei ausreichend viel kapillar gebundenem Wasser vorkommen. In [Feist 2004] wird eine minimal zulässige Oberflächentemperatur unter Standardbedingungen (Raumluftfeuchtigkeit 50%, Raumlufthtemperatur 20°C, Außentemperatur 5°C) von 12,6°C hergeleitet. D.h. auf Oberflächen mit „biologisch gut verwertbaren Substraten“ wie Tapeten, Gipskarton usw. kann mit Oberflächentemperaturen oberhalb von 12,6°C Schimmelpilzbefall sicher vermieden werden. Auf kapillar aktiven Oberflächen liegt damit die kritische Oberflächentemperatur deutlich über der Tauwasserbildungstemperatur von 9,3°C. In der Fläche sind gedämmte Außenbauteile hinsichtlich dieser Bedingung immer unkritisch.

Die Verhältnisse ändern sich aber deutlich, wenn Möbel vor Außenwänden oder sogar vor Außenwandkanten stehen. Abbildung 1 zeigt die minimale Oberflächentemperatur in einer Außenwandkante hinter einem Schrank. Ein wirklich guter Wärmeschutz hilft auch in dieser Situation, Pilzbefall dauerhaft zu vermeiden; mit R-Werten oberhalb von 2,5 (m²K)/W kann im dargestellten Fall auch auf Tapeten ein Schimmelwachstum verhindert werden.

Weiterhin gilt: Bei Bestandsgebäuden wird häufig erst mit einer Wärmedämm-Maßnahme die Wohnfläche im Außenwandbereich voll nutzbar [Frohner 2005]; eine hohe Behaglichkeit stellt sich erst dann ein und erst bei gutem Wärmeschutz kann die Außenwand gefahrlos als Stellfläche für Möbel genutzt werden.

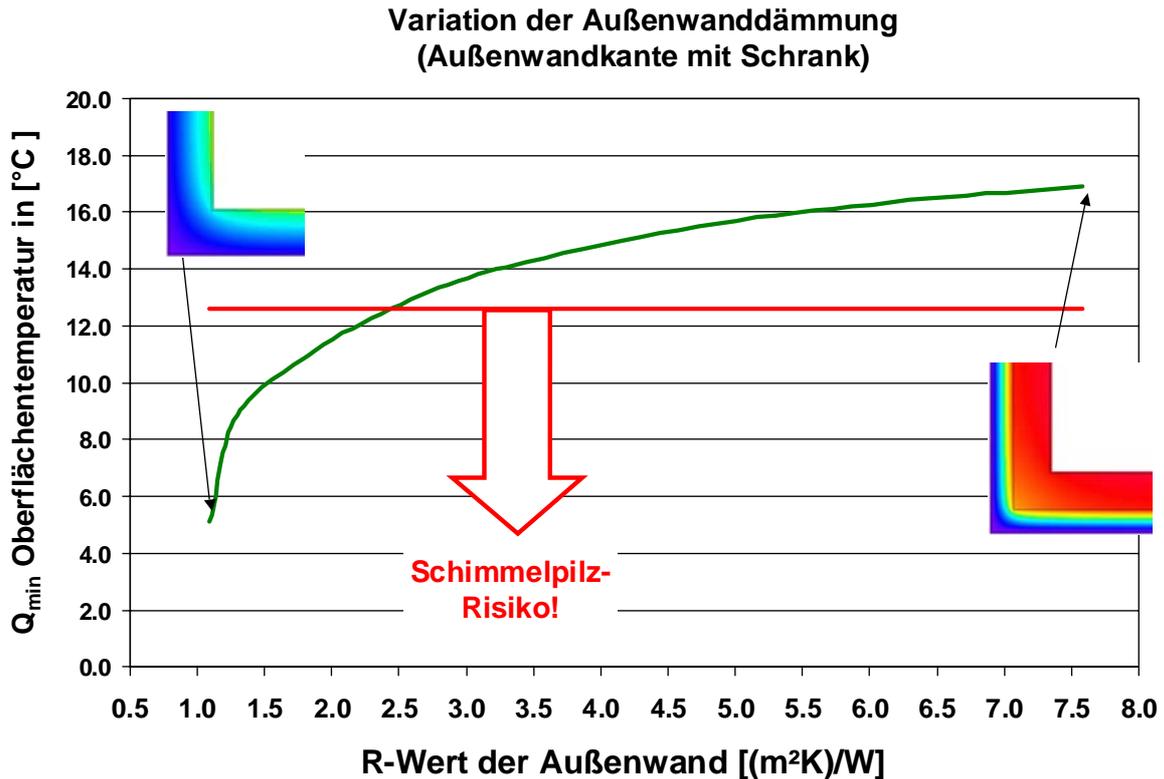


Abbildung 1: Abhängigkeit der Oberflächentemperatur in einer Außenwandkante hinter einem Schrank von der Wärmedämmung der Außenwand (nach [AK24]).

3.13 Gegenüberstellung Wärmedurchlasswiderstand „R-Wert“ – Dämmstärke

Zu den Energiespar-Maßnahmen in Abschnitt 4 wurde jeweils der Wärmedurchlasswiderstand (R-Wert) der zusätzlichen Wärmedämmung dokumentiert.

$$R = \frac{d}{\lambda} ; d : \text{Dämmdicke}; \lambda : \text{Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit}$$

Für viele Leser ist möglicherweise die Dicke einer Dämmschicht anschaulicher. In Abbildung 2 sind für gängige Wärmeleitfähigkeiten von Dämmstoffen zu den R-Werten jeweils die zugehörigen Dämmstärken angegeben.

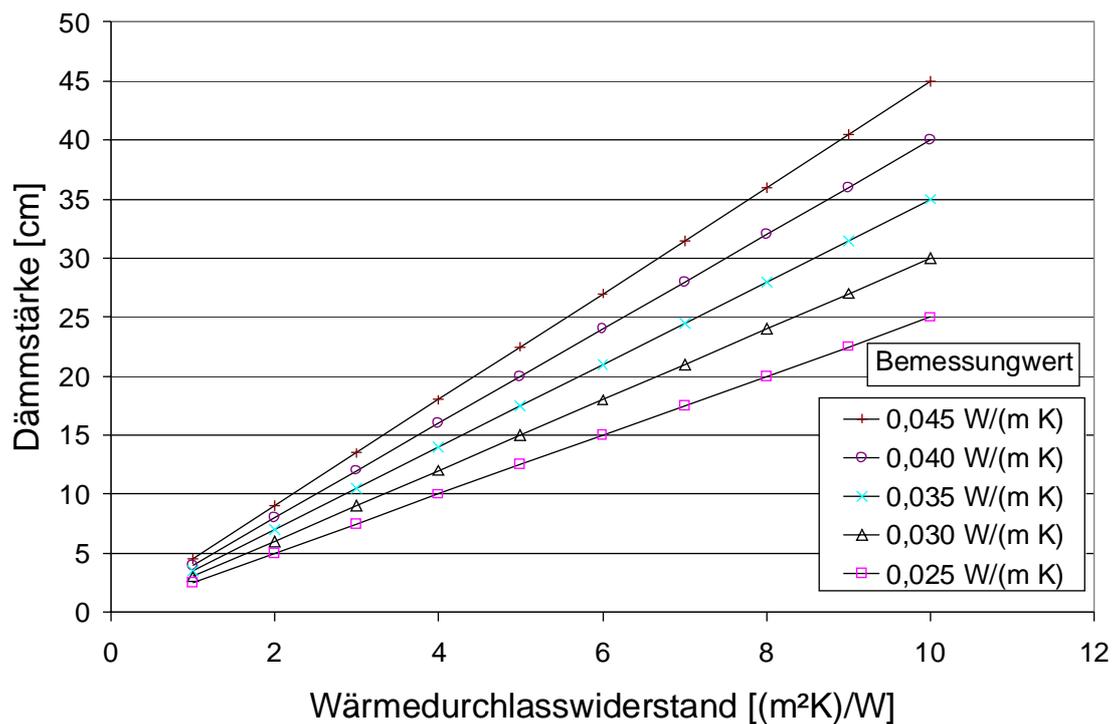


Abbildung 2: Resultierende Dämmstärke für Wärmedämmstoffe mit unterschiedlichen Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von den R-Werten.

4 Untersuchte Wärmeschutz-Maßnahmen und ihre Wirtschaftlichkeit 2005

4.1 Schnelleinstieg in die Berechnungstabellen

Die wesentlichen Ergebnisse zu jeder Energieeinspar-Maßnahme dokumentiert eine Berechnungstabelle. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick zu den Rechengängen, ohne die Berechnungsmethodik zu erklären (vgl. dazu Abschnitt 3).

Im Kopf der Berechnungstabellen zu den Wärmeschutz-Maßnahmen sind jeweils die wesentlichen Randbedingungen angegeben (vgl. Abbildung 3). Aus dem **Realzins** und der **Kalkulationsdauer** der Kostenrechnung von 20 Jahren ergibt sich die **Annuität**. Mit dem Annuitätsfaktor wird eine Investition auf jährlich gleiche Raten (z.B. für Zinsen und Tilgung) über die Kalkulationsdauer zum Realzins bestimmt.

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	78	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Abbildung 3: Kopf der Berechnungstabelle

In der Tabelle im Mittelteil des Berechnungsblatts sind jeweils das alte Bauteil und die drei Sanierungsvarianten dargestellt. In der ersten Spalte steht das alte Bauteil. Die weiteren Spalten zeigen eine ohnehin fällige Maßnahme am Bauteil (im Beispiel die Außenputzerneuerung der Außenwand) und zusätzliche Wärmedämm-Maßnahmen (vgl. Abbildung 4). Als wesentliches Ergebnis wird ausgehend vom U-Wert des alten Bauteils der wirtschaftlich optimale U-Wert bestimmt. Der **wirtschaftlich gebotene U-Wert** stellt dabei das mathematische Kostenoptimum dar und bringt dem Investor den größten jährlichen Gewinn. Der **zukunftsweisende U-Wert** liegt innerhalb des flachverlaufenden kostenoptimalen Bereichs. Dieser Zielwert für den Wärmeschutz reduziert die Risiken bzgl. Versorgungssicherheit und gegenüber steigenden Energiekosten und erhöht nahezu kostenneutral den Nutzen für den Klimaschutz. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der alten Bauteile sind typische Werte des Gebäudebestands. Als weitere Ergebnisse sind in den Spalten drei und vier die R-Werte der jeweiligen Wärmedämm-Maßnahme dargestellt, die sich mit Hilfe von Abbildung 2 leicht in jeweilige Dämmstärken umsetzen lassen.

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Putzerneuerung

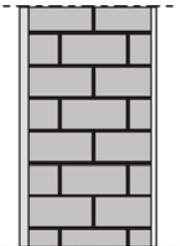
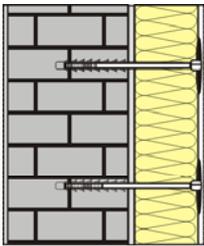
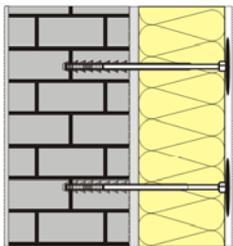
Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
verputzte Außenwand	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Putzerneuerung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,17 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,16 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,13 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,29 m²K/W
			

Abbildung 4: Tabelle mit den wesentlichen Ergebnissen und schematischer Darstellung der Aufbauten des alten Bauteils und der drei Sanierungsvarianten

Neben der Heizenergieeinsparung führen die Wärmedämm-Maßnahmen zu einer deutlichen Verbesserung der Behaglichkeit (vgl. Abbildung 5). Unterhalb der Aufbauten werden die raumseitigen **Oberflächentemperaturen** des alten Bauteils und der sanierten Varianten des Bauteils angezeigt (berechnet unter stationären Bedingungen).

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14.5 °C	19.3 °C	19.5 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch

Abbildung 5: Wärmeschutz-Maßnahmen führen auch zu einer deutlichen Verbesserung des thermischen Komforts

Nach den Komfortparametern beginnt die eigentliche Kostenrechnung mit den **baulichen Investitionskosten** (vgl. Abbildung 6). Dies sind die Investitionskosten der gesamten Maßnahme. Beim Beispiel der Wärmedämmung einer verputzten Außenwand mit einem Wärmedämm-Systems sind das die Kosten zum Baustellen einrichten, Gerüst stellen, Wärmedämmung aufdübeln, Armierungsputz und Außenputz aufbringen. Die Investition bezieht sich jeweils auf einen Quadratmeter Bauteilfläche. Die Ohnehin-Maßnahme ist bei diesem Beispiel eine Erneuerung des

Außenputzes, die durchschnittlich Investitionen von 40 €/m² erforderlich macht. Bei Kopplung einer Wärmeschutz-Maßnahme mit einer ohnehin fälligen Instandsetzung am Bauteil reduzieren sich die Investitionskosten der bedingten Energieeinspar-Maßnahme um den Betrag der Ohnehin-Kosten: im Beispiel um 40 €/m².

Die Kostenrechnung wird über einen Kalkulationszeitraum von 20 Jahren durchgeführt. Die Nutzungsdauer von Gebäuden liegt regelmäßig weit über dieser Zeit und die **Lebensdauer** der Maßnahmen auch. Nach Ablauf der 20 Jahre hat die Wärmeschutz-Maßnahme noch einen **Restwert**, der in der Kostenrechnung berücksichtigt wird. Der Restwert wird durch Rückzinsen der zukünftigen Nutzung nach Ablauf der Kalkulationsdauer auf die Gegenwart berechnet. Eine zukünftige Nutzung hat durch den Einfluss der Zinsen einen geringeren Wert, daher ist der Restwert geringer als das bloße Verhältnis der Lebensdauer des Bauteils zum Kalkulationszeitraum. Beispielsweise ergibt sich für ein Bauteil mit einem durchschnittlichen Lebenszyklus von 50 Jahren nach Ablauf der Kalkulationsdauer noch ein Restwert von 39% der ursprünglichen Investition. In allen Berechnungen wird für die Wärmeschutz-Maßnahmen eine einheitliche Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt. Wenn am Flachdach z. B. eine neue Abdichtung aufgebracht wird, so muss nicht notwendigerweise auch die Wärmedämmung erneuert werden. In der Regel wird eine zusätzliche Dämmschicht eingebaut, die alten Dämmschichten verbleiben im Gebäude. Mit den Investitionskosten der Energieeinsparmaßnahme wird der Restwert ermittelt und dargestellt: **Restwert der bedingten Energiesparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum.**

Die während der Kalkulationsdauer von 20 Jahren anzusetzenden Kosten der Energiesparmaßnahme (**Kosten der Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts**) ergeben sich daraus. Mit dem Zinssatz von 3,5% und der Laufdauer von 20 Jahren werden in der folgenden Zeile die **annuitätischen Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme** berechnet: diese ergeben sich durch Umlegen der Investitionskosten der Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts auf jährlich konstante Raten – rechnerisch aus dem Produkt mit dem **Annuitätsfaktor**.

Mit der Wärmeschutzmaßnahme ergibt sich gegenüber dem alten Bauteil bzw. der Sanierung ohne Wärmeschutz-Maßnahme eine Heizenergieeinsparung. Mit dieser Energieeinsparung und dem erwarteten mittleren Energiebezugspreis (inkl. Hilfsenergieanteil; vgl. Abschnitt 3.6) im Betrachtungszeitraum ergibt sich die, auf die Bauteilfläche bezogene, **jährliche Heizkosteneinsparung**. Mit der Wärmeschutz-Maßnahme kann der Investor einen **jährlichen Gewinn** erzielen, nämlich wenn die jährlichen Heizkosteneinsparung größer als die annuitätischen Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme sind.

	Ohnehin Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
Bauliche Investitionskosten:	40 €/m²	73 €/m²	81 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen	33 €/m²		41 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :	39%		39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :	13 €/m ²		16 €/m ²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :	20 €/m²		25 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :	1,40 €/(m ² a)		1,73 €/(m ² a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):	6,19 €(m²a)		6,41 €(m²a)
jährlicher Gewinn:	4,79 €(m²a)		4,69 €(m²a)

Abbildung 6: Kostenrechnung der Wärmeschutz-Maßnahme

Durch die Wärmeschutzmaßnahme werden gegenüber dem alten Bauteil die Wärmeverluste verringert. Die **erzielte Heizenergieeinsparung** wird in der ersten Zeile von Abbildung 7 berechnet. Werden die jährlichen Kapitalkosten auf die jährliche Heizenergieeinsparung bezogen, so können die **Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie** bestimmt werden. Damit ist ein transparenter Vergleich zu der alternativen Dienstleistung Energiebezug (z.B. aus Brennstoff) möglich. Zum Vergleich sind darunter die heutigen und die zu erwartenden mittleren zukünftigen Bezugskosten für eine kWh Endenergie angegeben. Neben der Komfortverbesserung und der Heizkosteneinsparung werden durch Wärmeschutzmaßnahmen aber auch externe Kosten verringert. Die gewinnbringenden Wärmeschutzmaßnahmen leisten mit der **Reduzierung der CO₂-Emissionen** zusätzlich, volkswirtschaftlich kostenneutral, einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz.

Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :	107,4 kWh/(m²a)	111,4 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :	88%	91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :	1,3 Cent/kWh	1,6 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :	4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :	5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :	5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):	33 kg/(m²a)	35 kg/(m²a)

Abbildung 7: Erzielte Heizenergieeinsparung, Kosten der eingesparten kWh Endenergie und Reduzierung der CO₂-Emissionen.

4.2 Wärmedämm-Maßnahmen an der Außenwand

4.2.1 Wärmedämmverbundsystem bei Neuanstrich der Außenfassade

Tabelle 3 dokumentiert die gekoppelte Ausführung einer Wärmedämm-Maßnahme von außen an einer Außenwand. Hier wird der Fall eines fälligen Neuanstrichs der Fassade behandelt. Dargestellt ist ein typischer Fall einer Außenwandsanierung mit einem Wärmedämmverbundsystem. Die Wärmedämmung wird auf den alten Putz des Mauerwerks (im Beispiel 240 mm Hochlochziegel) gedübelt. Mit der wirtschaftlich gebotenen Maßnahme wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Wand von 1,41 auf 0,17 W/(m²K) verbessert. Die durchschnittlichen Gesamtkosten dieser Wärmeschutz-Maßnahme belaufen sich auf 73 €/m². Für den zukunftsweisenden Wärmeschutz (U_{Wand} : 0,13 W/(m²K)) liegen die Investitionen 8 €/m² höher. Die durchschnittlichen Kosten der Ohnehin-Maßnahme belaufen sich auf 20 €/m². Den Investitionen stehen Energieeinsparungen von 107 bzw. 111 kWh/(m²a) gegenüber. Sofern der alte Außenputz noch trägt, ist häufig das Aufkleben der Wärmedämmung ausreichend; dies sollte (z.B. durch Abrissversuche) geprüft werden, da sich damit die Kosten für die Maßnahme nochmals reduzieren können. Die energiebedingten Mehrinvestitionen beinhalten in diesem Kopplungsfall auch den Neuperputz (als ohnehin fällig ist nur der Neuanstrich angenommen). Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauern von Wärmeschutz-Maßnahme und des Außenputzes wird der Restwert der Mehrinvestition nach diesen Schichten unterschieden (vgl. Tabelle 3).

Bereits durch Kopplung mit einem ohnehin notwendigen Neuanstrich der Außenfassade sind beide Maßnahmen im wirtschaftlichen Bereich (vgl. Abbildung 8). Die Kosten für eine eingesparte Kilowattstunde Endenergie liegen zwischen 2,3 und 2,5 Cent/kWh und damit deutlich unter dem heutigen Endenergiebezugspreis (Heizöl/Ergas) von 4,5 Cent/kWh.

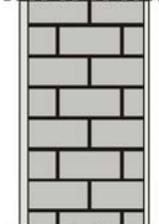
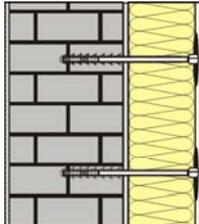
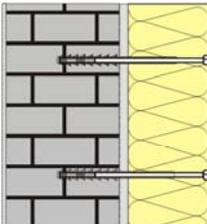
Abbildung 9 zeigt die Abhängigkeit des äquivalenten Energiepreises vom ursprünglichen Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand. Gedämmt wird jeweils bis zum wirtschaftlich gebotenen U-Wert. Noch bis zu Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,80 W/(m²K) ergeben sich Kosten für eine eingesparte Kilowattstunde unter dem heutigen Bezugspreis (bzw. bis 0,65 W/(m²K) für den mittleren zukünftigen Energiepreis). Damit erweist sich bereits die Kopplung mit der Maßnahme Neuanstrich der Außenfassade als für den überwiegenden Teil des Gebäudestands interessant, nämlich für alle Gebäude vor dem Inkrafttreten der 1. Wärmeschutzverordnung von 1977.

Tabelle 3: Wärmedämmverbundsystem gekoppelt an Maßnahme Neuanstrich

Energiesparmaßnahme: Außenwand; Wärmedämm-Verbundsystem

Realzins:	3,50%	Heizgradstunden:	78	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	Mittlere Energiekosten:	0,055	€/kWh
		Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Neuanstrich Außenfassade

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
verputzte Außenwand	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Neuanstrich Außenfassade	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,17 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,16 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,13 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,29 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14,5 °C	19,3 °C	19,5 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	20 €/m²	73 €/m²	81 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen davon Kosten für Außenputz mit geringerer Lebensdauer:		53 €/m² 17 €/m²	61 €/m² 17 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer : Restwert des Außenputzes bei 30 Jahren Lebensdauer :		39% 23%	39% 23%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum:		18 €/m²	21 €/m²
bedingte Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts:		35 €/m²	39 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme : jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		2,45 €/(m²a) 6,19 €/(m²a)	2,78 €/(m²a) 6,41 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		3,74 €/(m²a)	3,64 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt : Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		107,4 kWh/(m²a) 88%	111,4 kWh/(m²a) 91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,3 Cent/kWh	2,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme:		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		33 kg/(m²a)	35 kg/(m²a)

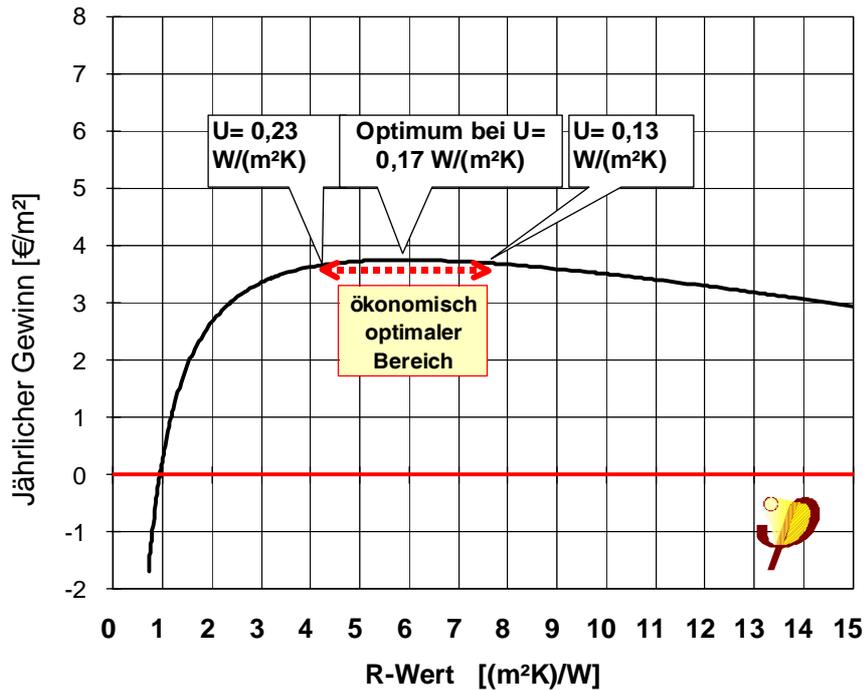


Abbildung 8: Mittlerer jährlicher Gewinn durch ein Wärmedämmverbundsystem (Ohnehin-Maßnahme: Neuanstrich) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

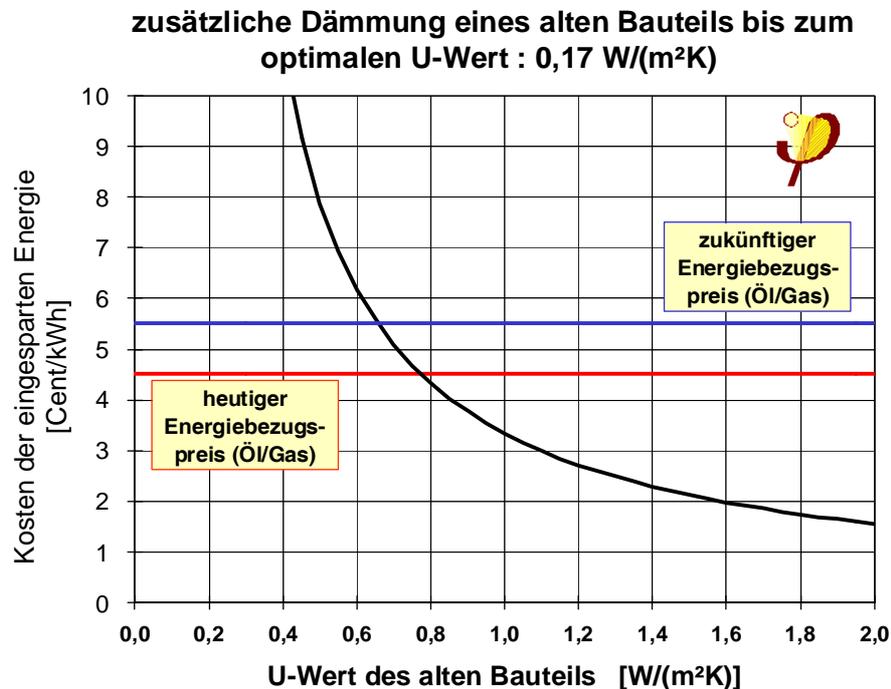


Abbildung 9: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmverbundsystem bei Neuanstrich).

4.2.2 Wärmedämmverbundsystem bei Außenputzerneuerung

Die Verhältnisse werden nochmals günstiger, wenn ohnehin eine Außenputzerneuerung fällig ist (vgl. Tabelle 3). Die Ohnehin-Kosten der Putzerneuerung belaufen sich dabei auf durchschnittlich 40 €/m². Die Maßnahmen Gerüst einrichten, alten Putz abschlagen und entsorgen und neuen Außenputz aufbringen wurden hierbei zugrundegelegt.

Im energetischen Sanierungsfall kann das Wärmedämmverbundsystems direkt auf den alten Putz aufgebracht werden und dient gleichzeitig als neuer Putzträger für den Außenputz. Wenn diese Wärmeschutz-Maßnahme mit der turnusgemäßen Außenputzerneuerung zusammenfällt, ist die energiebedingte Mehrinvestition gering. Die Kosten der eingesparten Energie liegen mit 1,3 (wirtschaftlich gebotene Maßnahme) bzw. 1,6 Cent/kWh (zukunftsweisende Maßnahme) deutlich unter den aktuellen und erst recht unter den zukünftigen Energiebezugspreisen.

Neben der Energieeinsparung verbessert die wärmetechnische Sanierung der Außenwand auch die Behaglichkeit im Raum. Die Oberflächentemperatur liegt im gedämmten Fall über 19°C auch im strengen Winter (Annahme außen: -10°C). Das Temperaturniveau wird gleichmäßiger und Spannungen aufgrund von Temperaturunterschieden im Bauteil werden geringer. Auch die kritische Situation in der Außenwandkante mit Schrank stellt kein Problem mehr dar (vgl. Abschnitt 3.12). Mit dem verbesserten Wärmeschutz liegen auch Außenwandoberflächentemperaturen hinter Möbeln im sicheren Bereich. Schimmelpilzwachstum ist somit kein Thema mehr.

In Abbildung 10 ist der jährliche Gewinn für diesen Fall dargestellt. Das sind die jährlich eingesparten Energiekosten abzüglich der Kapitalkosten für die Wärmeschutzmaßnahme. Das Optimum verläuft auch hier flach. Der ökonomisch sinnvolle Bereich liegt bei U-Werten zwischen 0,17 und 0,13 W/(m²K). Bei nahezu gleichem Gewinn kann auch ein höherer neuer R-Wert des Bauteils gewählt werden. Dies macht unabhängiger von Energiekostenschwankungen und reduziert nebenbei die CO₂-Emissionen.

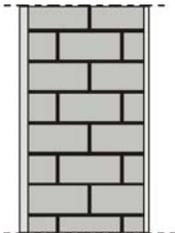
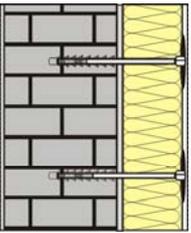
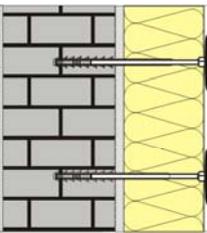
Abbildung 11 zeigt für dieses Beispiel den Zusammenhang zwischen den Kosten der eingesparten Energie und dem ursprünglichen U-Wert der Außenwand. Eine Verbesserung der Wärmedämmung, wenn der Außenputz ohnehin erneuert werden muss, lohnt sich bis zu ursprünglichen U-Werten von 0,50 W/(m²K) bei heutigen Energiekosten bzw. von 0,40 W/(m²K) zu den mittleren zukünftigen Energiepreisen. Wirtschaftlich sinnvoll ist diese Maßnahme daher für nahezu alle Gebäude mit verputzter Fassade vor dem Geltungszeitraum der Wärmeschutzverordnung von 1995.

Tabelle 4: Wärmedämmverbundsystem gekoppelt an Maßnahme Putzerneuerung

Energiesparmaßnahme: Außenwand; Wärmedämm-Verbundsystem

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	78	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Putzerneuerung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
verputzte Außenwand	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Putzerneuerung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Wärmedämm-Verbundsystem
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,17 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,16 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,13 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,29 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14,5 °C	19,3 °C	19,5 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	40 €/m²	73 €/m²	81 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme :		33 €/m²	41 €/m²
= Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen			
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		13 €/m²	16 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		20 €/m²	25 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		1,40 €/(m²a)	1,73 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		6,19 €/(m²a)	6,41 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		4,79 €/(m²a)	4,69 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		107,4 kWh/(m²a)	111,4 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		88%	91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		1,3 Cent/kWh	1,6 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		33 kg/(m²a)	35 kg/(m²a)

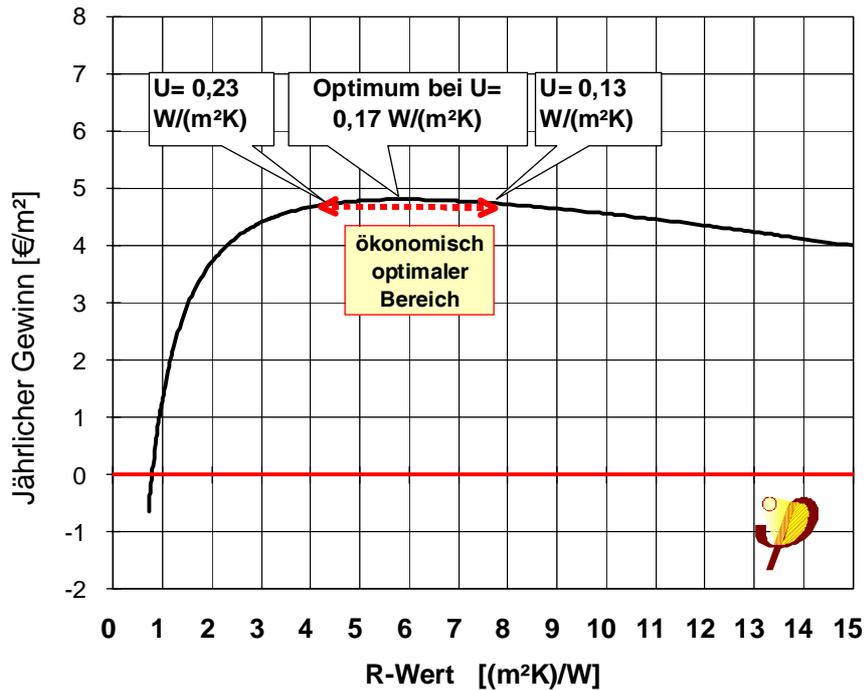


Abbildung 10: Mittlerer jährlicher Gewinn durch ein Wärmedämmverbundsystem (Ohnehin-Maßnahme: Putzerneuerung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand

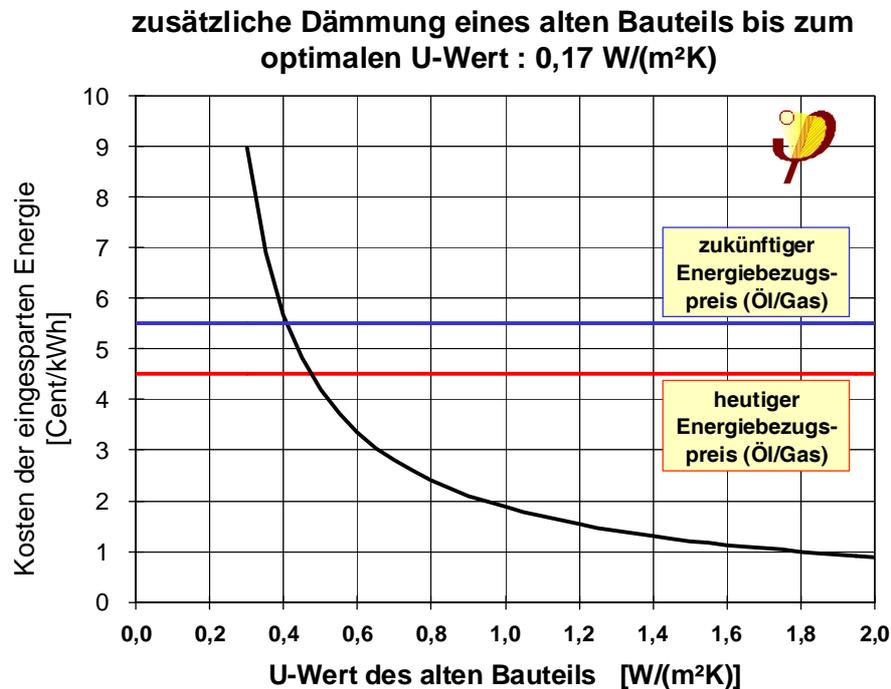


Abbildung 11: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmverbundsystem bei Außenputzerneuerung).

4.2.3 Wärmedämm-Maßnahme mit einer Vorhangfassade

Muss die Schalung einer Vorhangfassade ohnehin erneuert werden, so ist dies der richtige Zeitpunkt um die Fassade zu dämmen. Die ohnehin fälligen Investitionskosten für eine Erneuerung der Verschalung belaufen sich auf durchschnittlich 60 €/m². Die Wärmeschutzmaßnahme erfordert zusätzliche Investitionskosten von 49 €/m² für den wirtschaftlichen gebotenen Wärmeschutz und von 59 €/m² für einen zukunftsweisenden. Gegenüber der Ohnehin-Maßnahme (Gerüststellen, alte Schalung entfernen, neue Unterkonstruktionen aufbringen), umfasst die Mehrinvestition Kosten für das Einbringen der Wärmedämmung, das Anbringen einer verlängerten Unterkonstruktion und Anpassungsarbeiten an Fensterlaibungen usw.

Abbildung 13 zeigt, dass mit der gekoppelten Ausführung des Wärmeschutzes (durch den Tatbestand einer Erneuerung der Schalung) die Zusatzaufwendungen dann wirtschaftlich sind (zum angesetzten mittleren zukünftigen Energiepreis), wenn der ursprüngliche Wärmedurchgangskoeffizient der Vorhangfassade größer als 0,60 W/(m²K) war. Davon kann ausgegangen werden, wenn die vorhandenen Dämmstoffdicken kleiner gleich 5 cm waren.

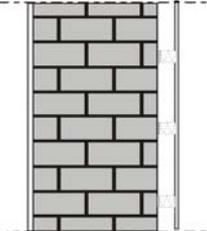
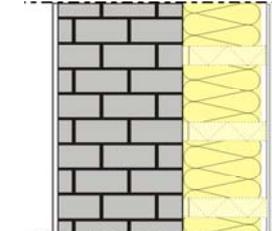
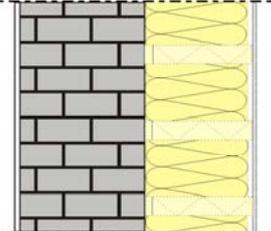
Abbildung 12 zeigt den Verlauf des jährlichen Gewinns für diese Energiespar-Maßnahme. Der Verlauf der Gewinnkurve im Bereich des Optimums ist aber so flach, dass U-Werte des Bauteils zwischen 0,18 bis 0,13 W/(m²a) als wirtschaftlich gleichwertig angesehen werden können. Wegen der verbesserten Behaglichkeit und der Umweltentlastung ist bei annähernd gleichem Gewinn ein möglichst guter Wärmeschutz empfehlenswert: Der empfohlene zukunftsweisende U-Wert liegt bei dieser Maßnahme bei 0,13 W/(m²a).

Tabelle 5: Wärmedämmung einer Vorhangfassade gekoppelt

Energiesparmaßnahme: Außenwand; Unterkonstruktion & Wärmedämmung

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	78	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Erneuerung der Vorhangfassade

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmte Vorhangfassade	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Erneuerung der Vorhangfassade	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Unterkonstruktion & Wärmedämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Unterkonstruktion & Wärmedämmung
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,18 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 4,70 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,13 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,05 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14,5 °C	19,3 °C	19,5 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	60 €/m²	109 €/m²	119 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		49 €/m²	59 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		19 €/m²	23 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		30 €/m²	36 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,09 €/(m²a)	2,52 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		6,12 €/(m²a)	6,39 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		4,03 €/(m²a)	3,88 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		106,2 kWh/(m²a)	111,0 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		87%	91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,0 Cent/kWh	2,3 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme:		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,50 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		33 kg/(m²a)	34 kg/(m²a)

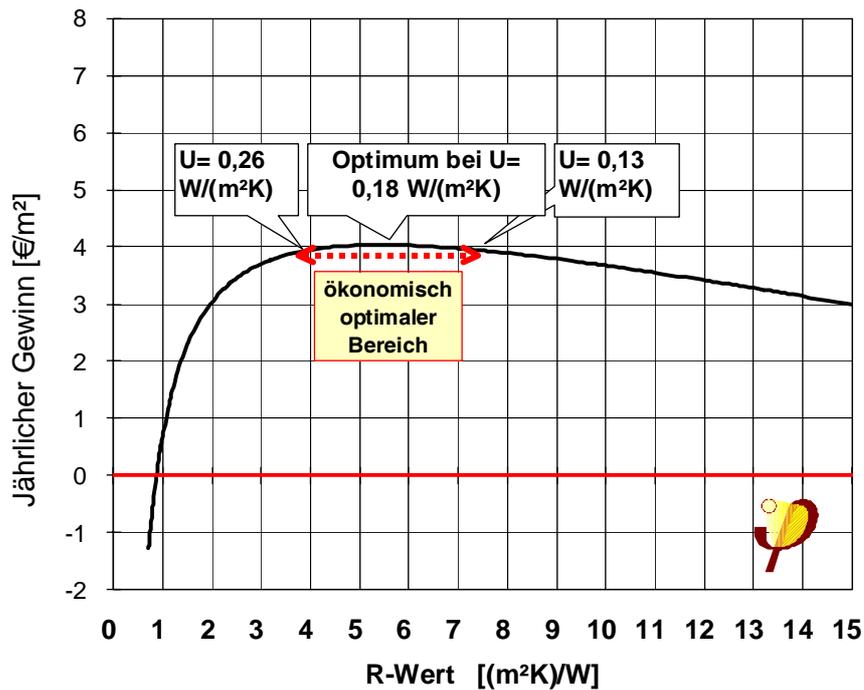


Abbildung 12: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Wärmedämmung einer Vorhangfassade (Ohnehin-Maßnahme: Erneuerung d. Vorhangfassade) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand

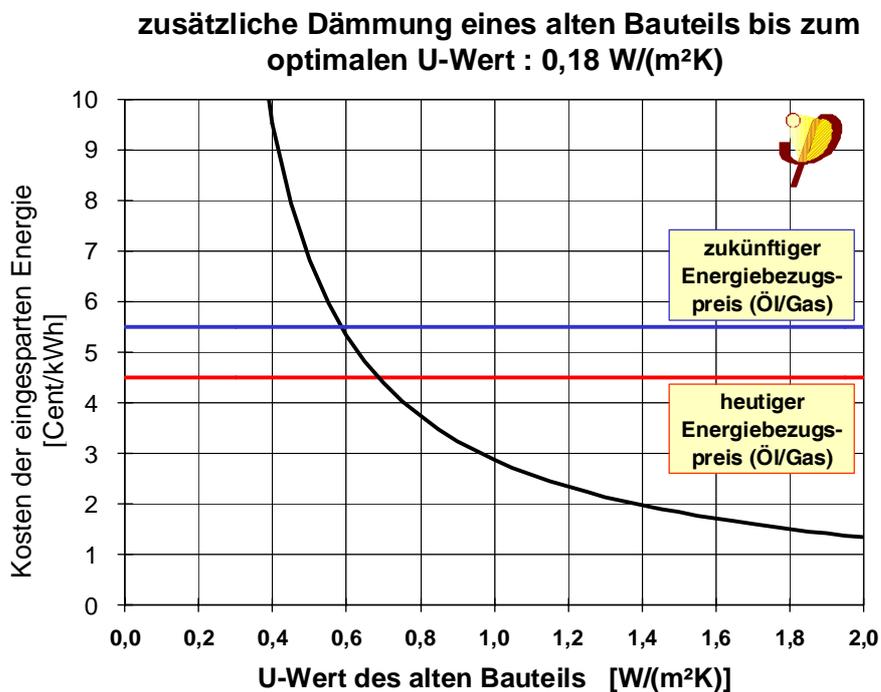


Abbildung 13: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmung einer Vorhangfassade bei Erneuerung d. Vorhangfassade)

4.2.4 Innendämmung einer Außenwand (Anlass: neue Tapete)

Auch eine Innendämmung einer Außenwand ist durch Kombination mit einer ohnehin fälligen Renovierung oder einer Erneuerung des Innenputzes als wirtschaftliche Wärmeschutz-Maßnahme geeignet. Meist ist aber eine Wärmedämmung von außen vorzuziehen: die erzielbaren Energieeinsparungen sind höher (weniger Wärmebrücken) und die Außendämmung ist bauphysikalisch günstiger. Wenn innerhalb eines überschaubaren Zeitraums eine Außendämmung durchgeführt werden kann, dann sollte dieser vor der Innendämmung Vorzug gegeben werden. Wenn allerdings eine Außendämmung nicht möglich ist, so ist die Ausführung einer Innendämmung besser als keine Wärmedämmung. Entscheidend ist die bauphysikalisch korrekte Ausführung, insbesondere der luftdichte Anschluss auf der Raumseite (vgl. [AK 32]).

Werden ohnehin die Tapeten erneuert, so ist dies ein guter Zeitpunkt für eine Innendämm-Maßnahme (Investitionskosten der Ohnehin-Maßnahme 7 €/m²). Die Kosten für die Innendämmung einschließlich neuer Innenschale, Tapete und Anstrich liegen bei 35 €/m² (Festkosten) zuzüglich 2,8 €/(m²K/W) je Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstands R um 1 m²K/W. Wegen der auftretenden Wärmebrücken und des mit der Innendämmung verbundenen Raumverlusts kann im allgemeinen keine höhere Dämmstoffstärke als 10 cm realisiert werden (mit dem Bemessungswert von 0,035 W/(m K) ergibt sich hierfür ein R-Wert von 2,86 (m²K)/W). Die Investitionskosten belaufen sich dann für diese Wärmedämm-Maßnahme auf 43 €/m².

Zur Berechnung der Wärmeverluste und zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahme wurde die Dämmwirkung auf die gesamte Außenwand (einschließlich typischer Wärmebrücken an den Anschlüssen Außenwand / Geschossdecke und Außenwand / Innenwand) berücksichtigt. Der resultierende ΔU_{WB} -Wert liegt bei typischen Gebäudegrundrissen bei +0,24 W/(m²K). Ausgewiesen sind im Tabellenblatt die nominalen (ungestörten) U- und R-Werte (vgl. Tabelle 6). Die Heizenergieeinsparung wurde mit den effektiven U-Werten (d.h. inkl. von ΔU_{WB}) berechnet. Aus baupraktischen Gründen ist die empfohlene Dämmstärke bei dieser Maßnahme begrenzt; die rein wirtschaftliche Betrachtung würde auf bessere U-Werte als angegeben führen (vgl. Abbildung 14). Für diese Maßnahme wird, da die Kostenrechnung nicht maßgeblich ist, nur ein empfohlener Dämmstandard angeführt.

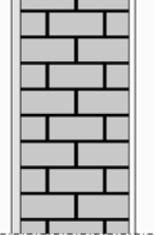
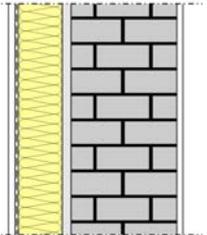
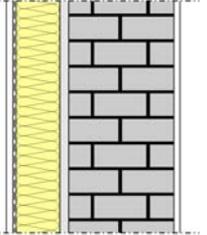
Die Maßnahme ist im Vergleich zur Alternative Energiebezug sehr günstig – der Preis für eine eingesparte kWh liegt bei 2 Cent/kWh). Im Kopplungsfall ist die Innendämmung rentabel bei heutigen Endenergiebezugspreisen, wenn der U-Wert des alten Bauteils größer 0,85 W/(m²K) ist (vgl. Abbildung 15). In der Praxis werden Innendämm-Maßnahmen hauptsächlich an ungedämmten Außenwänden durchgeführt, an denen eine Außendämmung nicht möglich ist (die U-Werte liegen hier regelmäßig über 1 W/(m²K)).

Tabelle 6: Innendämmung einer Außenwand gekoppelt an neue Tapete

Energiesparmaßnahme: Außenwand; Innendämmung mit Luftdichtung

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	78	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : neue Tapete

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung:	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung:
Außenwand mit Tapete	neue Tapete	Innendämmung mit Luftdichtung	Innendämmung mit Luftdichtung
U-Wert des alten Bauteils	U-Wert des alten Bauteils	wirtschaftlich gebotener U-Wert	zukunftsweisender U-Wert
1,41 W/(m²K)	1,41 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)	0,28 W/(m²K)
		R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 2,86 m²K/W	R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 2,86 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14,5 °C	18,0 °C	18,0 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	7 €/m²	43 €/m²	43 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme :		36 €/m²	36 €/m²
= Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen			
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		14 €/m²	14 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		22 €/m²	22 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		1,53 €/(m²a)	1,53 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.) ¹ :		4,44 €/(m²a)	4,44 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		2,90 €/(m²a)	2,90 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt¹ :		77,1 kWh/(m²a)	77,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil¹ :		63%	63%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie¹ :		2,0 Cent/kWh	2,0 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		24 kg/(m²a)	24 kg/(m²a)

Anmerkung: 1) Zur Berechnung wurde ein effektiver U-Wert verwendet, der typische Wärmebrückenverluste berücksichtigt.

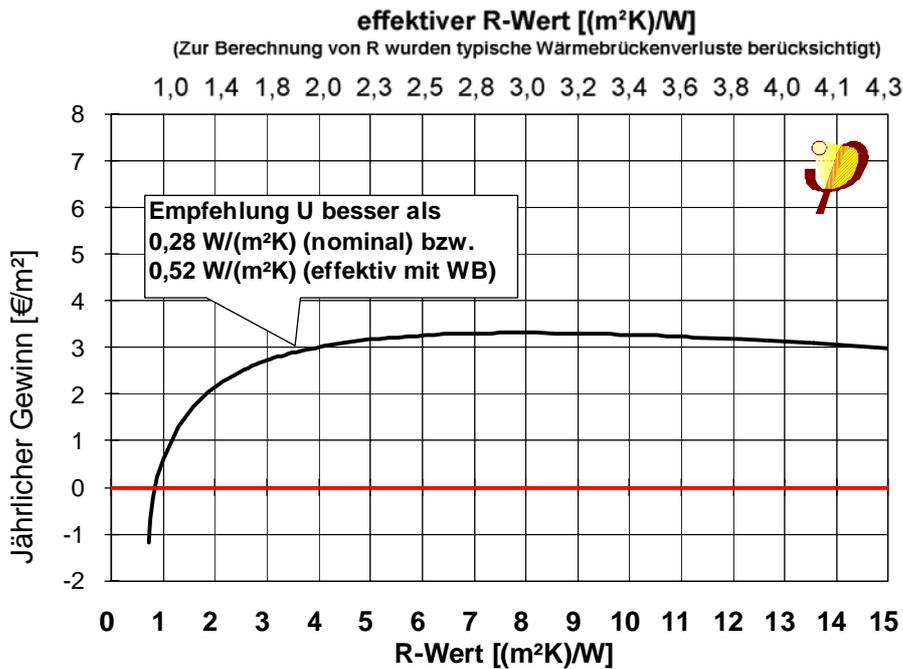


Abbildung 14: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Innendämmung einer Außenwand (Ohnehin-Maßnahme: neue Tapete) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand

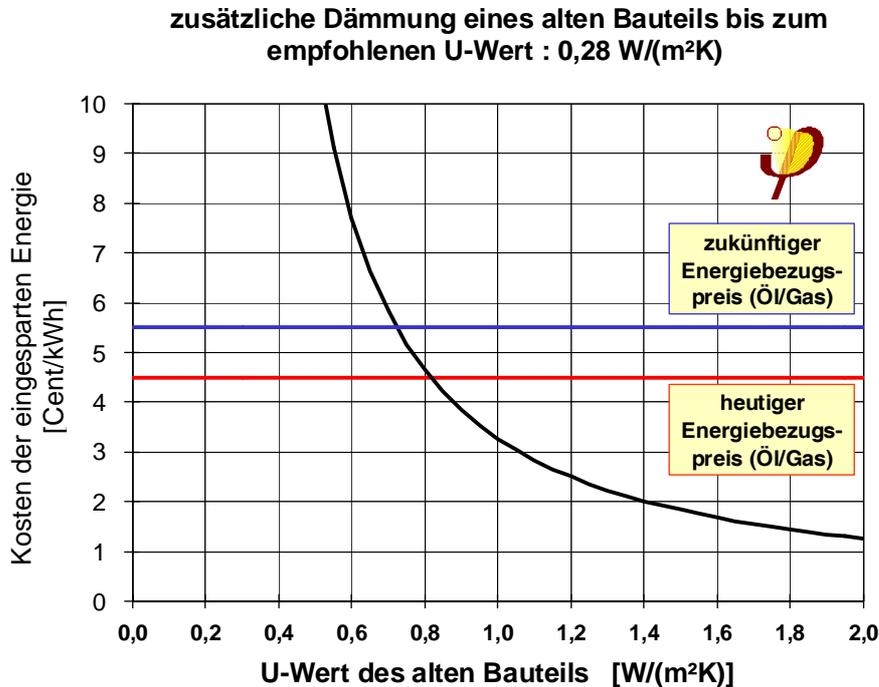


Abbildung 15: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Innendämmung bei Erneuerung der Tapeten).

4.2.5 Innendämmung einer Außenwand (Erneuerung des Innenputzes)

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Maßnahme Innendämmung gekoppelt mit einer ohnehin fälligen Erneuerung und Ausbesserung des Innenputzes. Die Innendämmung und die innere Beplankung kann direkt auf den alten Putz aufgebracht werden. Die baulichen Investitionskosten der Ohnehin-Maßnahme „Erneuerung des Innenputzes“ liegen mit durchschnittlich 25 €/m² höher als im Fall zuvor, gehören allerdings auch zu seltener auftretenden Maßnahmen. Auch bei dieser Innendämm-Maßnahme sind die Dämmstärken aus baupraktischen Gründen begrenzt. Die dynamische Kostenrechnung führt auf höhere optimale R-Werte. Der empfohlenen U-Wert liegt wie bei der Maßnahme zuvor bei 0,28 W/(m²K). Die Wirtschaftlichkeit ist in diesem Fall bei heutigen Endenergiepreisen noch für U-Werten des alten Bauteils von 0,55 W/(m²K) gegeben (vgl. Abbildung 17). Gegenüber der Kopplung mit der Renovierungsmaßnahme neue Tapete liegt der jährliche Gewinn dieser Maßnahme nochmals höher. Aufgetragen ist der jährliche Gewinn (vgl. Abbildung 16) wiederum über dem R-Wert. Über der oberen x-Achse ist zusätzlich der effektive R-Wert inkl. einschließlich Wärmebrücken aufgetragen. Innendämm-Maßnahmen führen einerseits zu einem „Raumverlust“, andererseits werden mit der Dämm-Maßnahme Bereiche in der Nähe der Außenwand regelmäßig erst nutzbar (vgl. Abschnitt 3.12), weil

- Erst nach der Dämm-Maßnahme in Außenwandnähe eine tolerierbar geringe Strahlungstemperatursymmetrie vorliegt,
- Erst nach der Dämmmaßnahme die innere Oberflächentemperatur hoch genug ist, um beim Stellen eines Schrankes an der Außenwand Schimmelpilzbildung auszuschließen.

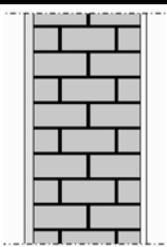
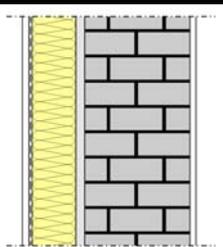
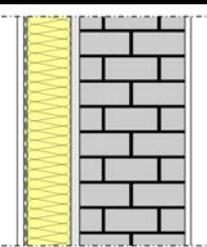
Von einem „Raumverlust“ durch Innendämmung kann daher eigentlich nicht die Rede sein – im Gegenteil, durch die Dämmung wird der Raum in der Nähe der Außenwand erst nutzbar. Mit einer Außendämmung ist der Raumgewinn noch größer.

Tabelle 7: Innendämmung einer Außenwand gekoppelt an Ausbesserung von Innenputz und neue Tapeten

Energiesparmaßnahme: Außenwand; Innendämmung mit Luftdichtung

Realzins: 3,50% p.a. Heizgradstunden: 78 kWh/a
 Kalkulationsdauer: 20 Jahre diff. Jahresnutzungsgrad: 90%
 Annuität: 7,0% p.a. Mittlerer Energiepreis: 0,055 €/kWh
 Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil: 0,058 €/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Ausbesserung von Innenputz, neue Tapete

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung:	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung:
Außenwand mit Tapete	Ausbesserung von Innenputz, neue Tapete	Innendämmung mit Luftdichtung	Innendämmung mit Luftdichtung
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,28 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 2,86 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,28 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 2,86 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	14,5 °C	18,0 °C	18,0 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	25 €/m²	43 €/m²	43 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		18 €/m²	18 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum:		7 €/m²	7 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		11 €/m²	11 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		0,77 €/(m²a)	0,77 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.) ¹ :		4,44 €/(m²a)	4,44 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		3,67 €/(m²a)	3,67 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt¹:		77,1 kWh/(m²a)	77,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil¹:		63%	63%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie¹:		1,0 Cent/kWh	1,0 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen bei (Öl-Heizung):		24 kg/(m²a)	24 kg/(m²a)

Anmerkung: 1) Zur Berechnung wurde ein effektiver U-Wert verwendet, der typische Wärmebrückenverluste berücksichtigt.

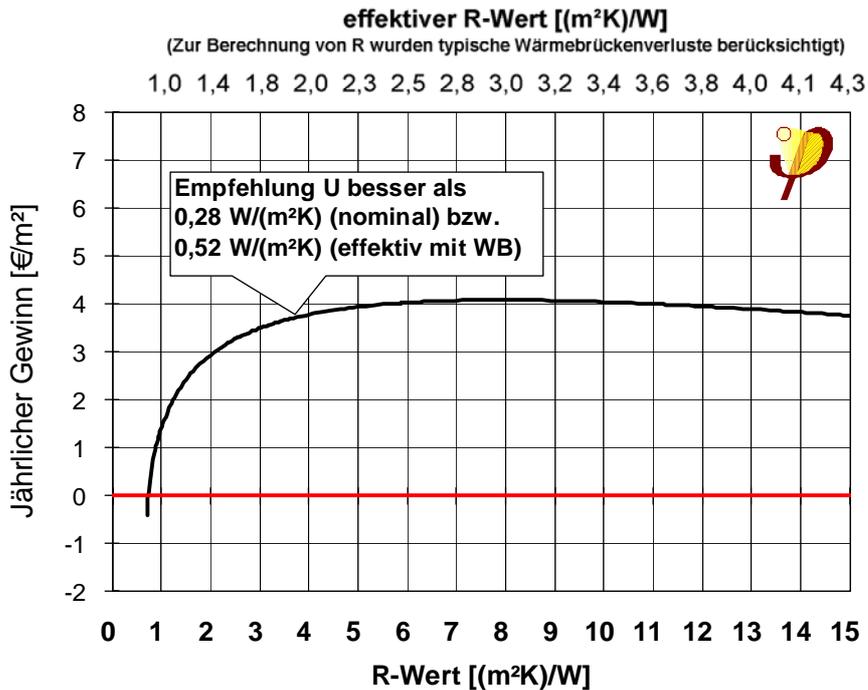


Abbildung 16: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Innendämmung einer Außenwand (Ohnehin-Maßnahme: Ausbesserung von Innenputz) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand

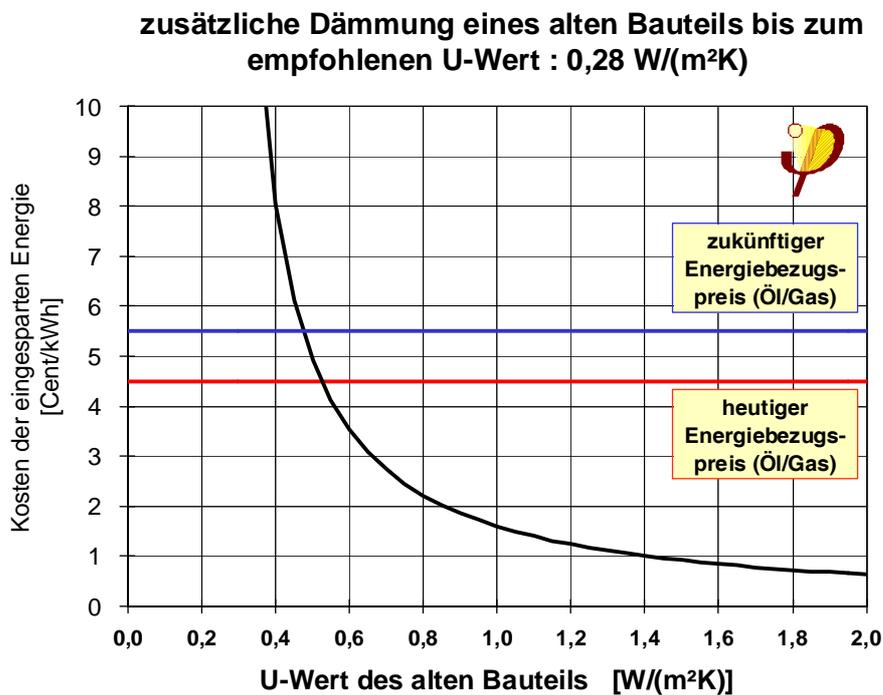


Abbildung 17: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Innendämmung bei Ausbesserung d. Innenputzes).

4.3 Wärmedämm-Maßnahmen am Steildach

Für den nachträglichen Wärmeschutz im geneigten Dach stehen verschiedene Alternativen zur Verfügung:

- **Zwischensparrendämmung:** Die Wärmedämmung wird zwischen den Sparren von oben (z.B. bei einer Neueindeckung) oder von unten (z.B. wenn eine Dach-Innenverkleidung angebracht oder erneuert wird). Die Dämmstärke ist hierbei auf die Sparrenhöhe begrenzt.
- **Aufsparrendämmung:** Die zusätzliche Dämmlage wird über den Sparren z.B. auf einer Holzschalung angebracht. Die Konterlattung, Dachlattung und Eindeckung werden auf der Wärmedämmung angebracht. Für eine Aufsparrendämmung werden auch fertige Systeme angeboten.
- **Untersparrendämmung:** Eine zusätzliche Untersparrendämmung kann z.B. durch Aufnageln einer Dämmstoff-Gipskartonverbundplatte auf die Sparren erreicht werden. Alternativ kann unter den Sparren eine zusätzliche Lattung aufgebracht, ausgedämmt und anschließend verkleidet werden.

Untersucht wurde eine für Bestandsgebäude typische Steildachkonstruktion mit 14 cm Sparrenhöhe (der Holzanteil in der Sparrenebene beträgt 15% (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 9). Bei der Zwischensparrendämmung steht nur der begrenzte Raum zwischen den Sparren für Dämmstoff zur Verfügung. Mit der Ausdämmung des Sparrenzwischenraums bleibt man im dokumentierten Fall hinter dem wirtschaftlich sinnvollen Dämmniveau zurück. Daher wurden die untersuchten Zwischensparrendämm-Maßnahmen mit einer Unter- bzw. Aufsparrendämmung kombiniert.

4.3.1 Auf- und Zwischensparrendämmung bei Neueindeckung

Tabelle 8 dokumentiert die Maßnahme Auf- und Zwischensparrendämmung gekoppelt mit einer ohnehin notwendigen Erneuerung der Dacheindeckung. Eine Erneuerung der Eindeckung ist eine aufwendige Maßnahme, bei der Gerüst gestellt, die alte Dachhaut abgetragen und entsorgt, eine Unterspannbahn verlegt, Dachlattung und gegebenenfalls Konterlattung aufgenagelt und Nacharbeiten ausgeführt werden müssen. Diese Kosten fallen für eine Instandsetzung ohnehin an; sie ändern sich nicht, wenn zeitgleich zwischen den Sparren Wärmedämmung eingebracht wird.

Wird die Dacheindeckung erneuert, so kann der Sparrenzwischenraum ausgedämmt werden. Auf den Sparren wird zusätzlich noch eine Dämmschicht aufgebracht. Konterlattung und Dachlattung werden durch die Dämmlage aufgenagelt. Die Mehrinvestition für die Wärmeschutz-Maßnahme liegt bei 53 €/m² für die wirtschaftlich gebotene Maßnahme (U-Wert 0,15 W/(m²K)). Der Verlauf im Optimum der Gewinnkurve verläuft aber so flach, dass ein erhöhter Wärmeschutz bei nahezu

gleichbleibendem Gewinn erzielt werden kann (vgl. Abbildung 18). Wegen des verbesserten Komforts und der Umweltentlastung ist bei nahezu gleichem Gewinn der zukunftsweisende U-Wert von $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ empfehlenswert; dieser wird mit Mehrinvestitionen gegenüber der Ohnehin-Maßnahme von 60 €/m^2 erzielt.

Mit ursprünglichen U-Werten bis zu $0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist die gekoppelte Maßnahme zu den mittleren zukünftigen Energiebezugspreisen noch wirtschaftlich (vgl. Abbildung 19). Bezogen auf die untersuchte Dachkonstruktion sind das ursprüngliche Dächer mit bis zu 6 cm Wärmedämmung.

4.3.2 Aufsparrendämmung bei einer Erneuerung der Dacheindeckung

In Tabelle 9 ist die Maßnahme Aufsparrendämmung bei ohnehin notwendiger Erneuerung der Dacheindeckung dargestellt. Wie oben beschrieben, ist die Erneuerung des Dachbelags eine aufwendige Maßnahme. Eine zusätzliche Aufsparrendämmung zur gleichen Zeit ändert diese Kosten nicht. Die Mehrinvestition für die Aufsparren-Dämmung, Auflegen und Befestigen der Wärmedämmung (z.B. Befestigung der Wärmedämmung mit Nägeln oder Schrauben in der Dachschalung), liegen bei 48 €/m^2 für den wirtschaftlich gebotenen bzw. 57 €/m^2 für den zukunftsweisenden Wärmeschutz.

Abbildung 20 zeigt den jährlichen Gewinn bei gekoppelter Durchführung dieser Wärmeschutz-Maßnahme. Beim Tatbestand der Neueindeckung ist diese Maßnahme bis zu U-Werten des alten Dachaufbaus von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zu den mittleren zukünftigen Energiebezugspreisen wirtschaftlich (vgl. Abbildung 21).

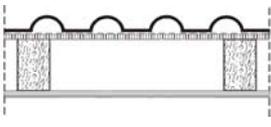
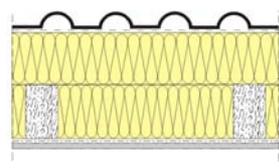
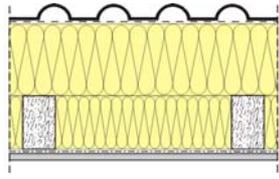
Die **Auf- und Zwischensparrendämmung** als auch die **reine Aufsparrendämmung** sind in gekoppelter Ausführung mit Preisen der eingesparten Kilowattstunde um 2 Cent/kWh wirtschaftlich sehr günstige Maßnahmen.

Tabelle 8: Auf- und Zwischensparrendämmung gekoppelt an Maßnahme Neueindeckung

Energiesparmaßnahme: Dach; Auf- und Zwischensparrendämmung

Realzins:	3,50% p.a.	Heizgradstunden:	74	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0% p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
		Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Neueindeckung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmtes Dach	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Neueindeckung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Auf- und Zwischensparrendämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Auf- und Zwischensparrendämmung
U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,15 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 6,18 m²K/W	zukunftsweisen U-Wert 0,10 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 9,12 m²K/W
			

Anmerkung: U-Werte bei 15% Holzanteil und 14 cm Sparrenhöhe

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	13,8 °C	19,4 °C	19,6 °C
Behaglichkeit Winter	gering	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	70 €/m²	123 €/m²	130 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme :		53 €/m²	60 €/m²
= Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen			
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energiesparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum:		21 €/m²	24 €/m²
bedingte Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts:		32 €/m²	36 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,28 €/m²a	2,56 €/m²a
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		6,88 €/m²a	7,09 €/m²a
jährlicher Gewinn:		4,60 €/m²a	4,53 €/m²a
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		119,5 kWh/(m²a)	123,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		91%	94%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		1,9 Cent/kWh	2,1 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		37 kg/(m²a)	38 kg/(m²a)

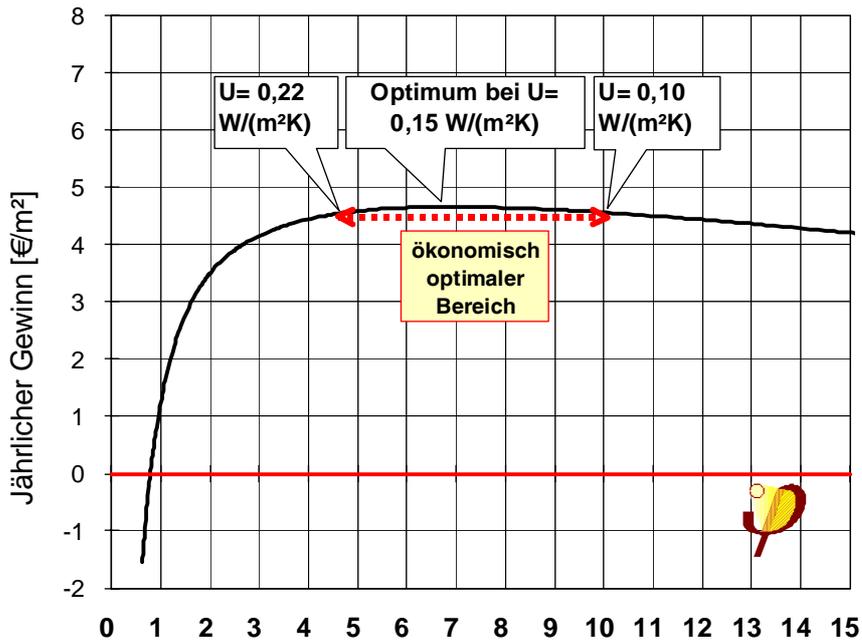


Abbildung 18: Mittlerer jährlicher Gewinn durch eine Auf- und Zwischensparrendämmung (Ohnehin-Maßnahme: Neueindeckung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

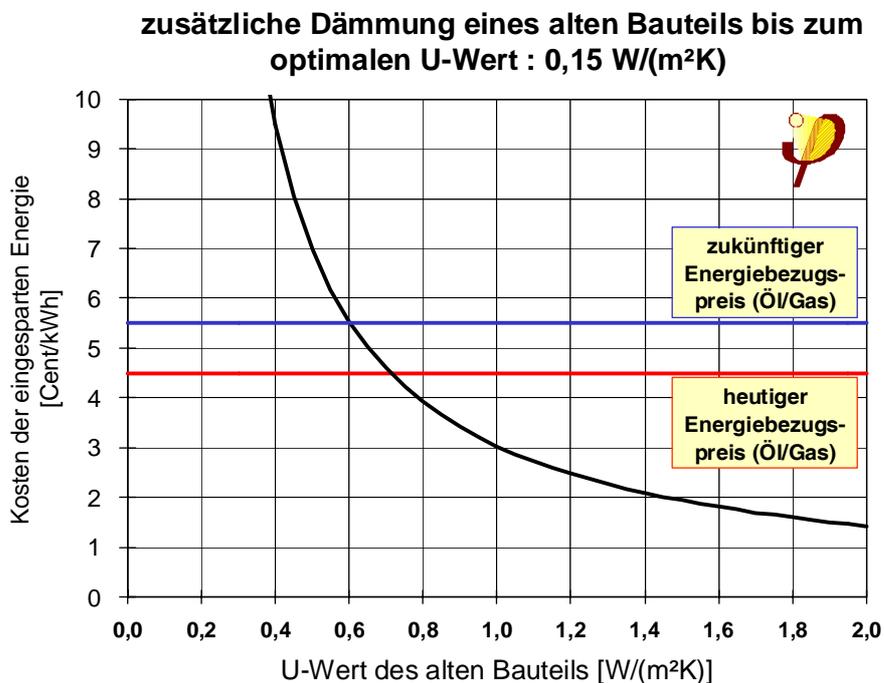


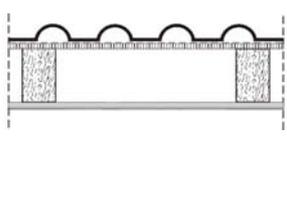
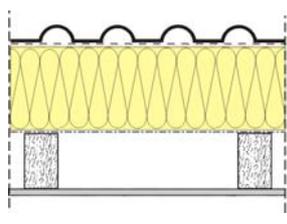
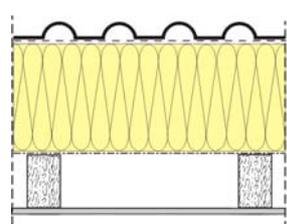
Abbildung 19: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Auf- und Zwischensparrendämmung bei Neueindeckung).

Tabelle 9: Aufsparrendämmung gekoppelt an Maßnahme Neueindeckung

Energiesparmaßnahme: Dach; Aufsparrendämmung (von oben)

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	74	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Neueindeckung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmtes Dach	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Neueindeckung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Aufsparrendämmung (von oben)	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Aufsparrendämmung (von oben)
U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,16 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,67 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,11 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 8,88 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	13,8 °C	19,4 °C	19,6 °C
Behaglichkeit Winter	gering	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	70 €/m²	118 €/m²	127 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		48 €/m²	57 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		19 €/m²	23 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		29 €/m²	35 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,05 €/(m²a)	2,44 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		6,83 €/(m²a)	7,08 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		4,78 €/(m²a)	4,64 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		118,5 kWh/(m²a)	122,9 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		90%	93%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		1,7 Cent/kWh	2,0 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		37 kg/(m²a)	38 kg/(m²a)

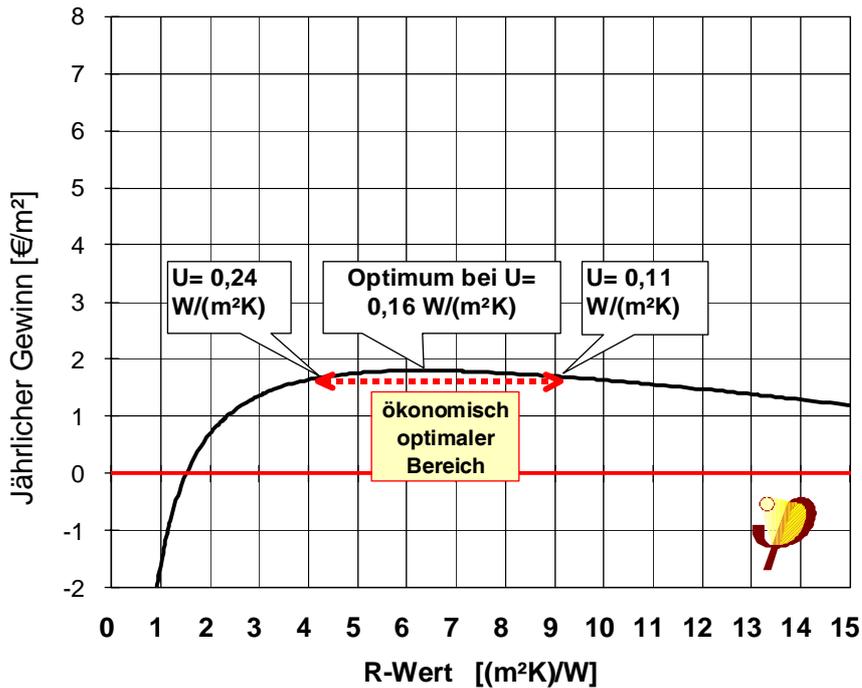


Abbildung 20: Mittlerer jährlicher Gewinn durch eine Aufsparrendämmung (Ohnehin-Maßnahme: Neueindeckung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

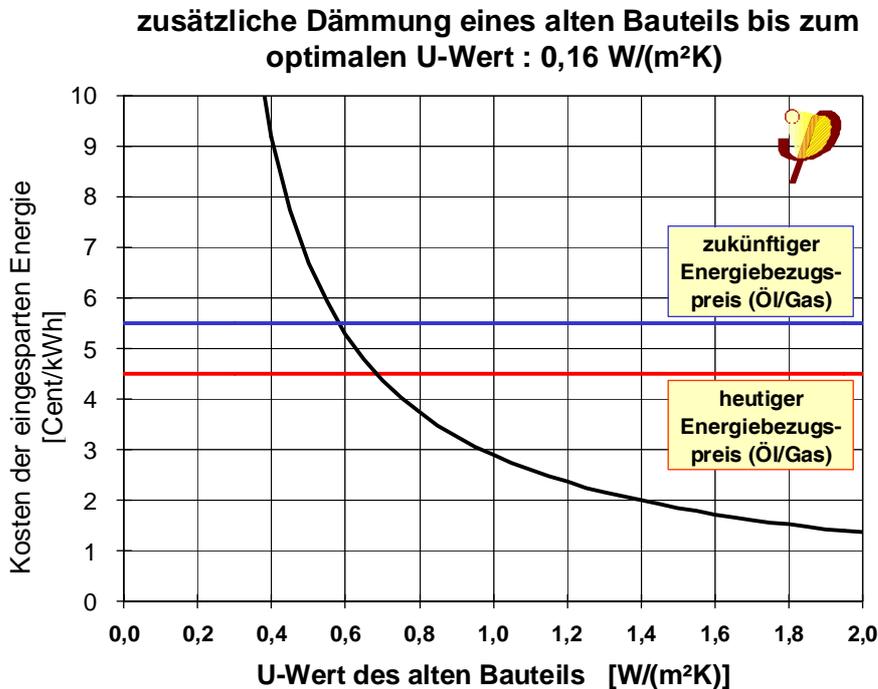


Abbildung 21: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Aufsparrendämmung bei Neueindeckung).

4.3.3 Zwischen- und Untersparrendämmung bei Erneuerung der Dach-Innenverkleidung

Wird die Dach-Innenverkleidung erneuert bzw. erstmalig aufgrund des Dachausbaus angebracht, so ist dies ebenfalls der richtige Zeitpunkt für eine Wärmedämm-Maßnahme. Tabelle 10 dokumentiert die Wärmeschutz-Maßnahme Zwischen- und Untersparrendämmung gekoppelt mit der Ohnehin-Maßnahme „Erneuerung der Dach-Innenverkleidung“. Die Ohnehin-Maßnahme umfasst hierbei das Abnehmen der bestehenden Beplankung, die Anbringung neuer Tapete und den Neuanstrich (zu baulichen Investitionskosten von 20 €/m²).

Bei diesem Tatbestand ist der Hohlraum zwischen alter Innenverkleidung und Dacheindeckung zugänglich: Wärmedämmung kann daher mit geringem Aufwand zwischen die Sparren eingebracht werden. Dieser Zwischenraum ist bei Bestandsgebäuden häufig nicht ausreichend, daher wird zusätzlich Dämmstoff von innen aufgebracht. Hier kann entweder eine Dämmstoff-Gipskartonverbundplatte von innen aufgenagelt werden oder es wird unter den Sparren eine zusätzlichen Lattung aufgebracht und ausgedämmt. Die Dämmstärken sind bei der Untersparrendämmung durch den Raumverlust und durch konstruktive Grenzen eingeschränkt, in den Berechnungen wurde die Untersparrendämmung auf 10 cm begrenzt. Die Mehrkosten dieser Maßnahme belaufen sich auf 55 €/m².

Abbildung 22 zeigt den jährlichen Gewinn, der mit der Mehrinvestition in die Energieeinspar-Maßnahme erzielt werden kann. Durch die Begrenzung der Dämmstärke wird das wirtschaftliche Optimum nicht ganz erreicht. Es wird daher ein baupraktisches Optimum für den U-Wert bestimmt (der wirtschaftlich gebotene U-Wert und der zukunftsweisender U-Wert fallen zusammen). Die Maßnahme ist mit einem Preis der eingesparten Energie von 2 Cent/kWh sehr rentabel.

Die Zusatzaufwendungen für die Wärmeschutzmaßnahme sind wirtschaftlich zum angenommenen Endenergiepreis, wenn der ursprüngliche Wärmedurchgangskoeffizient des betreffenden Daches größer als 0,65 W/(m²K) war (vgl. Abbildung 23).

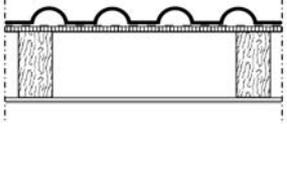
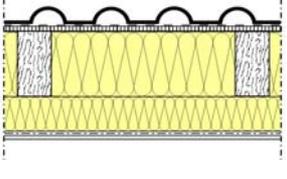
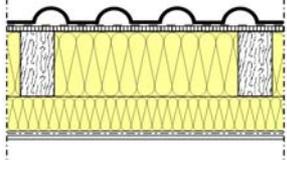
Anmerkung: Von zentraler Bedeutung bei der Erneuerung der Innenverkleidung ist die luftdichte Ausführung der Anschlüsse. Erst eine sorgfältige Ausführung bringt komfortable Wohnbarkeit (keine Zugerscheinungen), macht den Wärmeschutz wirksam und hält das Bauteil schadensfrei.

Tabelle 10: Unter- und Zwischensparrendämmung gekoppelt an Maßnahme neue Dach-Innenverkleidung

Energiesparmaßnahme: Dach; Unter- & Zwischensparrendämmung

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	74	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Neue Dach-Innenverkleidung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmtes Dach	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Neue Dach-Innenverkleidung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Unter- & Zwischensparrendämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Unter- & Zwischensparrendämmung
U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,60 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,16 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,47 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,16 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,47 m²K/W
			

Anmerkung: U-Werte bei 15% Holzanteil und 14 cm Sparrenhöhe

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	13,8 °C	19,4 °C	19,4 °C
Behaglichkeit Winter	gering	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	gering	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	20 €/m²	75 €/m²	75 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme :		55 €/m²	55 €/m²
= Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen			
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		22 €/m²	22 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		34 €/m²	34 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,36 €/m²a	2,36 €/m²a
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		6,80 €/m²a	6,80 €/m²a
jährlicher Gewinn:		4,44 €/m²a	4,44 €/m²a
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		118,1 kWh/(m²a)	118,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		90%	90%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,0 Cent/kWh	2,0 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		37 kg/(m²a)	37 kg/(m²a)

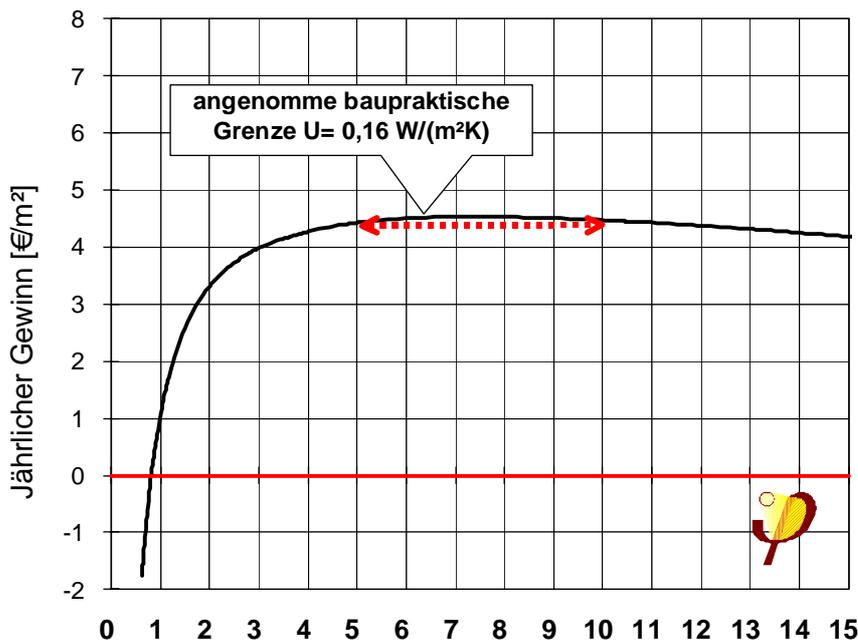


Abbildung 22: Mittlerer jährlicher Gewinn durch eine Unter- und Zwischensparrendämmung (Ohnehin-Maßnahme: neue Dach-Innenverkleidung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

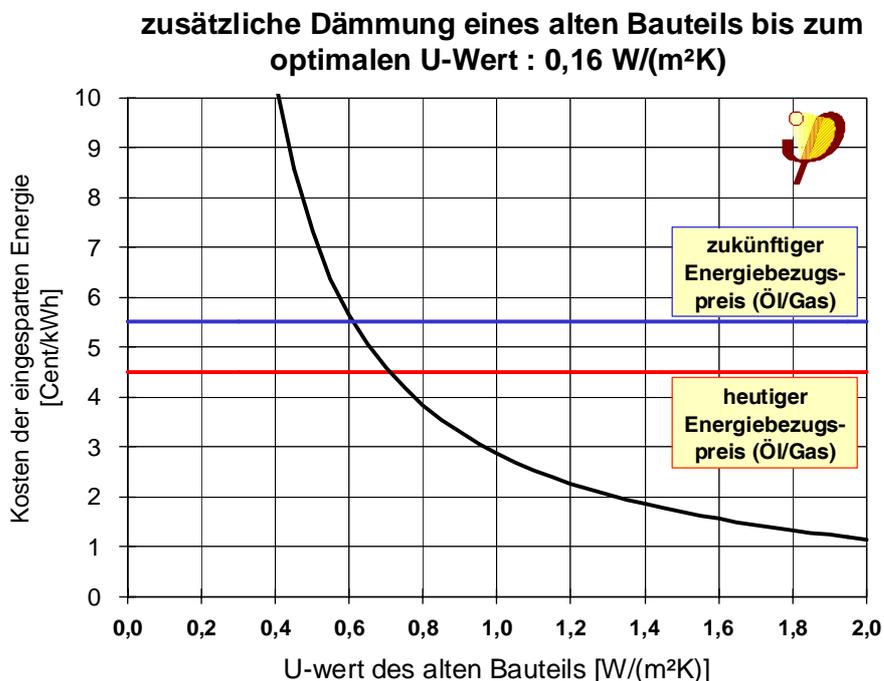


Abbildung 23: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Unter- und Zwischensparrendämmung bei Erneuerung der Dach-Innenverkleidung).

4.4 Wärmedämm-Maßnahmen am Flachdach

Wird die Dachabdichtung erneuert, so bietet sich eine Verbesserung des Wärmeschutzes an. Tabelle 11 und Tabelle 12 dokumentieren Dämm-Maßnahmen an einem **unbelüfteten Flachdach**. Die Kosten der Ohnehin-Maßnahme für Gerüst stellen, Kies abtragen, alte Dachabdichtung abtragen, neue Abdichtung aufbringen und Kies aufschütten belaufen sich durchschnittlich auf 50 €/m².

4.4.1 Zusätzliche Wärmedämmung unter der neuen Dachabdichtung

In Tabelle 11 ist die Maßnahme zusätzliche Wärmedämmung bei einem „Warmdach“ gekoppelt an eine Erneuerung der Dachabdichtung dokumentiert. Mit der Ohnehin-Maßnahme wird die Wärmedämmung freigelegt. In der Regel wird eine zusätzliche Dämmschicht aufgebracht, die alten Dämmschichten verbleiben im Aufbau. Das Fraunhoferinstitut für Bauphysik empfiehlt, die alte Wärmedämmung selbst dann im Dach zu belassen, wenn sie schadensbedingt durchfeuchtet ist (vgl. [Spilker 2003]). Eine Durchfeuchtung ist aber nicht die Regel, sondern nur in Einzelfällen anzutreffen. Die Mehrkosten gegenüber der ohnehin fälligen Maßnahme belaufen sich auf 57 €/m² für den wirtschaftlich gebotenen ($U = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und 66 €/m² für den zukunftsweisenden U-Wert ($U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Abbildung 24 zeigt den jährlichen Gewinn, das ist die jährliche Energiekosteneinsparung abzüglich der jährlichen Kapitalkosten für die Einsparmaßnahme. Der Verlauf der Kostenkurve ist auch hier flach, so dass mit dem zukunftsweisenden U-Wert bei nahezu gleichem Gewinn zusätzliche Versorgungssicherheit erlangt und die Umwelt entlastet wird. Die Maßnahme ist wirtschaftlich zum angenommenen zukünftigen Energiepreis bei U-Werten des alten Dachaufbaus größer $0,70 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. Abbildung 25). Das sind alte Flachdachaufbauten mit bis zu 4 cm Wärmedämmung. Mit Kosten für eine eingesparte kWh Energie zwischen 3,2 und 3,5 Cent/kWh ist auch diese Maßnahmen wirtschaftlich günstig.

4.4.2 Zusätzliche Wärmedämmung auf der neuen Dachabdichtung – Plusdach

Alternativ können auch extrudierte Polystyrol-Hartschaumplatten als zusätzliches Umkehrdach auf die sanierte Dachhaut gelegt und mit Kies gesichert werden. Die Wärmeschutz-Maßnahme „Plusdach“ gekoppelt an eine Erneuerung der Dachabdichtung ist in Tabelle 12 dargestellt. Die Lage der bisherigen wasserabführenden Schicht bleibt dadurch erhalten. Die Dachabdichtung ist durch eine aufgelegte Wärmedämmung vor mechanischen und thermischen Einwirkungen zusätzlich geschützt. Die Mehrkosten gegenüber den Ohnehin-Kosten von 50 €/m² belaufen sich auf 50 €/m² für den wirtschaftlich optimalen ($U = 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) bzw.

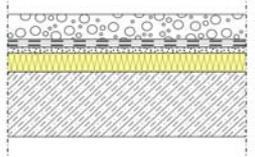
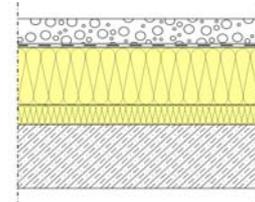
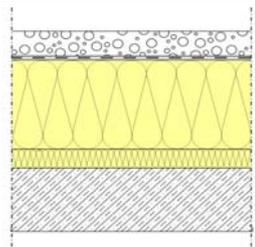
60 €/m² für den zukunftsweisenden Wärmeschutz ($U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Der jährliche Gewinn aufgrund der Wärmeschutz-Maßnahme ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Maßnahme ist bei gekoppelter Ausführung bei U-Wert des alten Flachdachs größer $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ wirtschaftlich (vgl. Abbildung 27). Auch diese Wärmeschutz-Maßnahme ist mit 2,9 Cent/kWh bis 3,3 Cent/kWh für eine eingesparte kWh Energie ökonomisch günstig.

Tabelle 11: Zusätzliche Wärmedämmung bei Warmdach gekoppelt an eine Erneuerung der Dachabdichtung

Energiesparmaßnahme: Flachdach; Zusätzl. Wärmedämmung in Warmdachaufbau

Realzins: 3,50% p.a. Heizgradstunden: 74 kWh/a
 Kalkulationsdauer: 20 Jahre diff. Jahresnutzungsgrad: 90%
 Annuität: 7,0% p.a. Mittlerer Energiepreis: 0,055 €/kWh
 Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil: 0,058 €/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Erneuerung der Dachabdichtung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
Unbelüftetes Flachdach (wenig gedämmt)	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Erneuerung der Dachabdichtung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Zusätzl. Wärmedämmung in Warmdachaufbau	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Zusätzl. Wärmedämmung in Warmdachaufbau
U-Wert des alten Bauteils 1,10 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,10 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,18 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 4,65 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,12 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,14 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	15,7 °C	19,3 °C	19,5 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	50 €/m²	107 €/m²	116 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		57 €/m²	66 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		23 €/m²	26 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		35 €/m²	40 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,43 €/m²a	2,82 €/m²a
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		4,36 €/m²a	4,62 €/m²a
jährlicher Gewinn:		1,92 €/m²a	1,80 €/m²a
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		75,6 kWh/(m²a)	80,2 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		84%	89%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		3,2 Cent/kWh	3,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		23 kg/(m²a)	25 kg/(m²a)

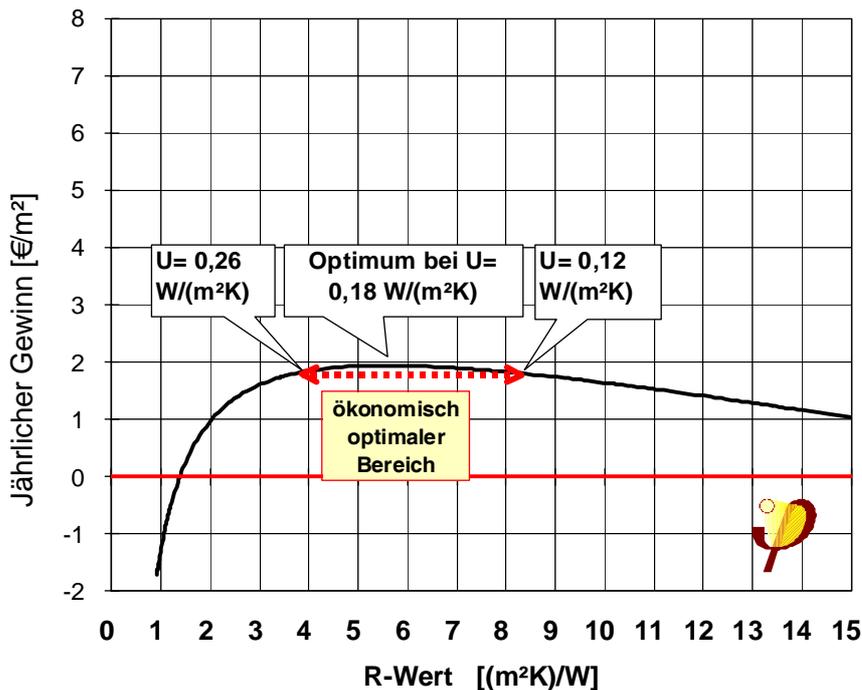


Abbildung 24: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die zusätzliche Wärmedämmung eines unbelüfteten Flachdachs (Ohnehin-Maßnahme: neue Dachabdichtung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

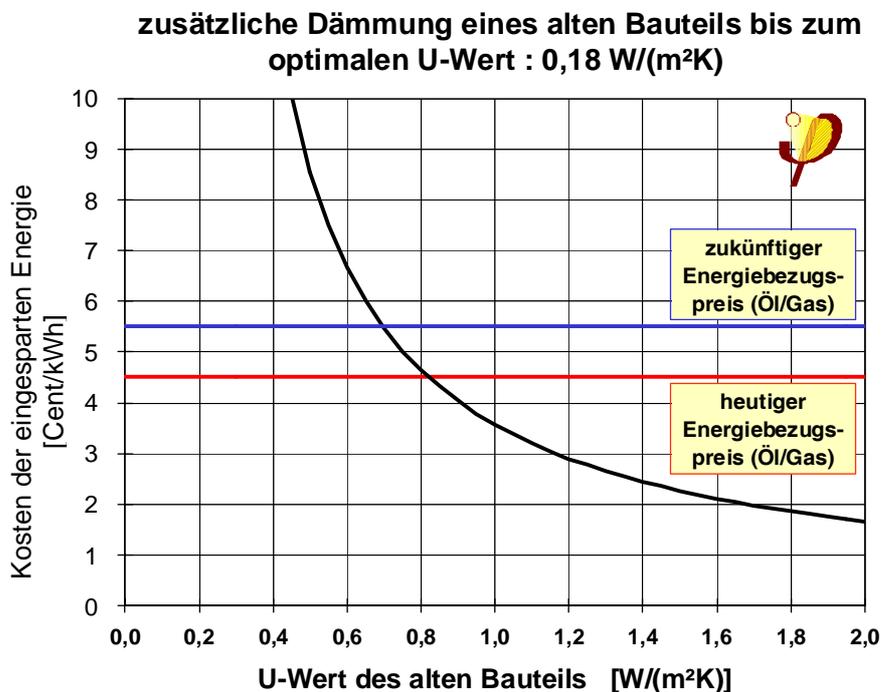


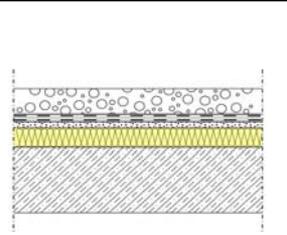
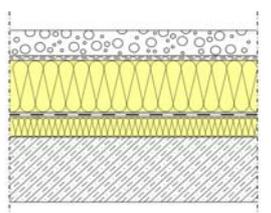
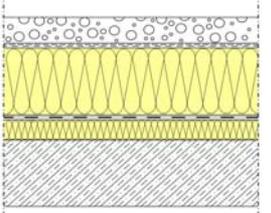
Abbildung 25: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (zusätzliche Wärmedämmung eines unbelüfteten Flachdachs unter der neuen Dachabdichtung).

Tabelle 12: Zusätzliche Wärmedämmung auf der Dachabdichtung - Plusdach gekoppelt an eine Erneuerung der Dachabdichtung

Energiesparmaßnahme: Flachdach; Plusdach (Umkehrdach auf Dachabdichtung)

Realzins:	3,50% p.a.	Heizgradstunden:	74	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0% p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
		Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Erneuerung der Dachabdichtung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung:	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung:
Unbelüftetes Flachdach (wenig gedämmt)	Erneuerung der Dachabdichtung	Plusdach (Umkehrdach auf Dachabdichtung)	Plusdach (Umkehrdach auf Dachabdichtung)
U-Wert des alten Bauteils 1,10 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,10 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,22 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 3,71 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,16 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 5,52 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	15,7 °C	19,2 °C	19,4 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	50 €/m²	100 €/m²	110 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		50 €/m²	60 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		20 €/m²	24 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		30 €/m²	36 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		2,11 €/(m²a)	2,55 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		4,18 €/(m²a)	4,47 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		2,07 €/(m²a)	1,92 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		72,7 kWh/(m²a)	77,6 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		80%	86%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,9 Cent/kWh	3,3 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme:		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		23 kg/(m²a)	24 kg/(m²a)

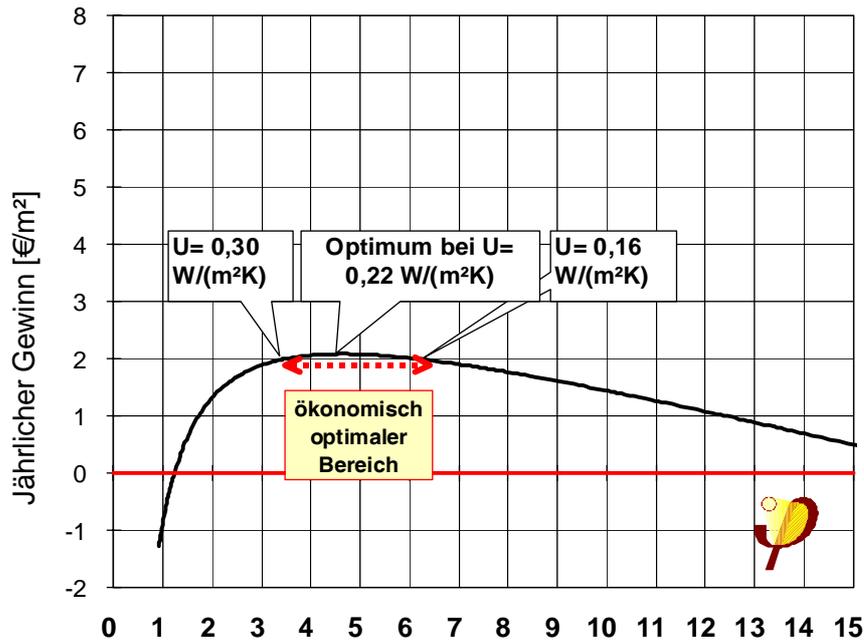


Abbildung 26: Mittlerer jährlicher Gewinn durch ein Plusdach (Ohnehin-Maßnahme: neue Dachabdichtung) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

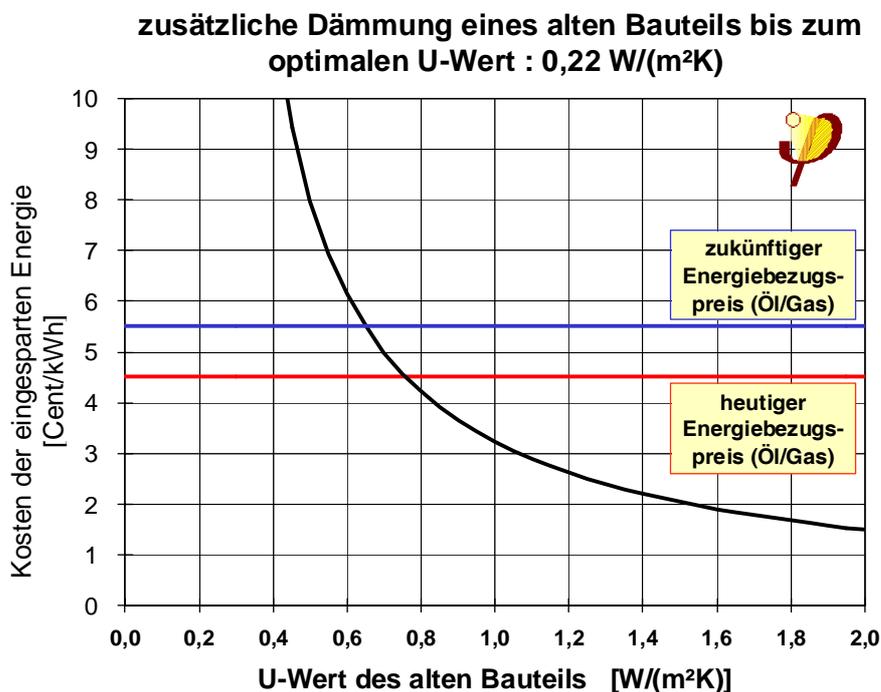


Abbildung 27: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Plusdach bei Erneuerung der Dachabdichtung).

4.5 Wärmedämm-Maßnahmen an der obersten Geschossdecke

Im unbeheizten Spitzboden kann auch auf der obersten Geschossdecke gedämmt werden. Die Wärmedämmung wird hierbei einfach auf die Geschossdecke aufgelegt. Dabei muss entsprechend der späteren Nutzung unterschieden werden, ob die Geschossdecke später begehbar sein muss.

4.5.1 Begehbare Wärmedämmung auf der Geschossdecke

Die Maßnahme begehbare Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke wird in Tabelle 13 beschrieben. Die Investitionskosten umfassen das Auflegen einer Wärmedämmung und einer begehbaren Spannplatte. Die baulichen Investitionen liegen zwischen 35 (wirtschaftlich gebotene Dämmung) und 38 €/m² (zukunftsweisender Dämmstandard). Die Maßnahme kann ungekoppelt von ohnehin anstehenden Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden und ist immer noch sehr wirtschaftlich (die Kosten der eingesparten Energie liegen unter 2 Cent/kWh). Sinnvolle R-Werte der aufgelegten Wärmedämmung liegen zwischen 6,5 (m²K)/W und 7,9 (m²K)/W (vgl. Tabelle 13). Abbildung 28 zeigt den Verlauf des jährlichen Gewinns der Maßnahme. Bei U-Werten der alten Geschossdecke bis zu 0,45 W/(m²K) ist die Maßnahme zum angenommenen zukünftigen Energiepreis noch wirtschaftlich (vgl. Abbildung 29).

Sollte aufgrund der Raumhöhe oder anderer konstruktiver Umstände die Dämmstärke eingeschränkt sein, so sollte mit der höchsten vertretbaren Stärke gedämmt werden.

4.5.2 Nicht begehbare Wärmedämmung auf der Geschossdecke

In zahlreichen Fällen ist auch eine nicht begehbare Ausführung der Wärmedämmung möglich. Tabelle 14 dokumentiert die Maßnahme Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke (nicht begehbar). Die Investitionskosten für das Auflegen der Wärmedämmung liegen bei durchschnittlich 16 €/m² für den wirtschaftlich gebotenen U-Wert und 19 €/m² für den zukunftsweisenden Wärmeschutz. Diese Maßnahme ist ebenfalls unabhängig von weiteren Sanierungsarbeiten durchführbar und nochmals wirtschaftlich attraktiver als die begehbare Ausführung. Die Kosten der eingesparten kWh liegen unter einem Cent. Aufgrund der sehr wirtschaftlichen und einfach durchführbaren Dämm-Maßnahme wurde mit der Energieeinsparverordnung eine Nachrüstpflicht hierfür vorgesehen [EnEV]. Bis zum 31.12.2006 müssen nicht begehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecken von beheizten Räumen gedämmt werden (Höchstwert des Wärmedurchgangskoeffizienten gemäß [EnEV] 0,30 W/(m²K)).

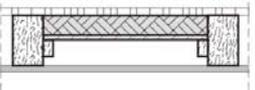
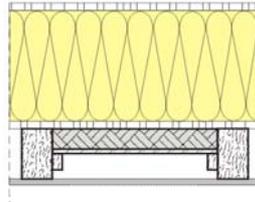
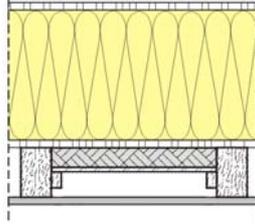
Der in dieser Studie ermittelte wirtschaftlich gebotene U-Wert liegt bei $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, der zukunftsweisende bei $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. Abbildung 30). Die Wärmeschutz-Maßnahme ist sogar noch für bereits gedämmte Dachböden zu heutigen Energiepreisen wirtschaftlich bis zu U-Werten des alten Bauteil von $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. Abbildung 31).

Tabelle 13: Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke (begehbar)

Energiesparmaßnahme: oberste Geschossdecke; Wärmedämmung (begehbar)

Realzins:	3,50%	p.a.	Heizgradstunden:	74	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : keine

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmte Geschossdecke	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung keine	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Wärmedämmung (begehbar)	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Wärmedämmung (begehbar)
U-Wert des alten Bauteils	U-Wert des alten Bauteils	wirtschaftlich gebotener U-Wert	zukunftsweisender U-Wert
1,26 W/(m²K)	1,26 W/(m²K)	0,14 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 6,48 m²K/W	neu 0,12 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,89 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	15,1 °C	19,5 °C	19,6 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	0 €/m²	35 €/m²	38 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		35 €/m²	38 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		14 €/m²	15 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		21 €/m²	23 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		1,48 €/(m²a)	1,61 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		5,32 €/m²	5,42 €/m²
jährlicher Gewinn:		3,83 €/m²	3,81 €/m²
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		92,3 kWh/(m²a)	94,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		89%	91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		1,6 Cent/kWh	1,7 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		29 kg/(m²a)	29 kg/(m²a)

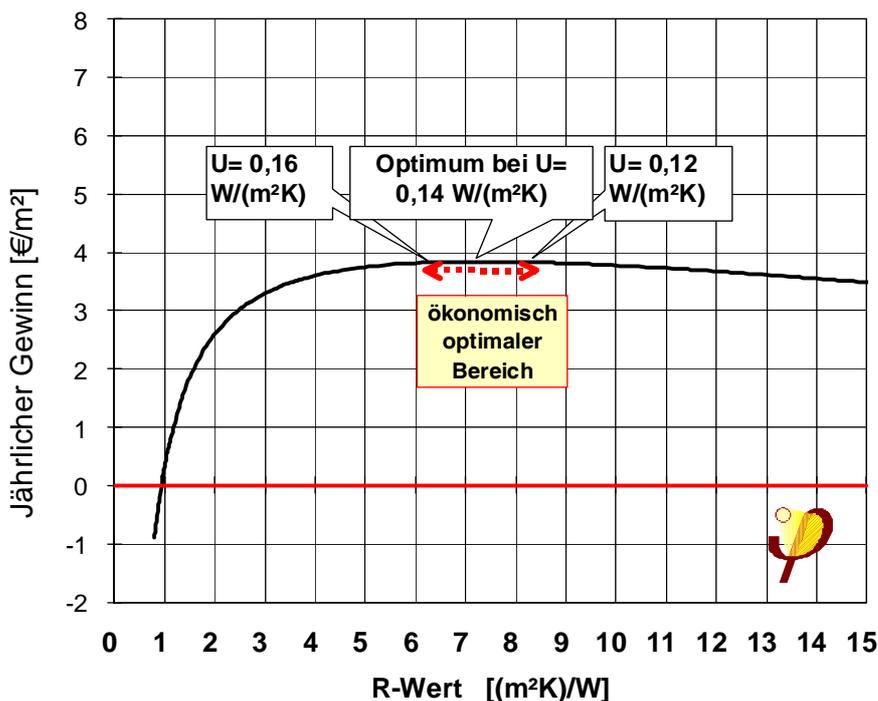


Abbildung 28: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Wärmedämmung (begehbar) einer obersten Geschossdecke in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

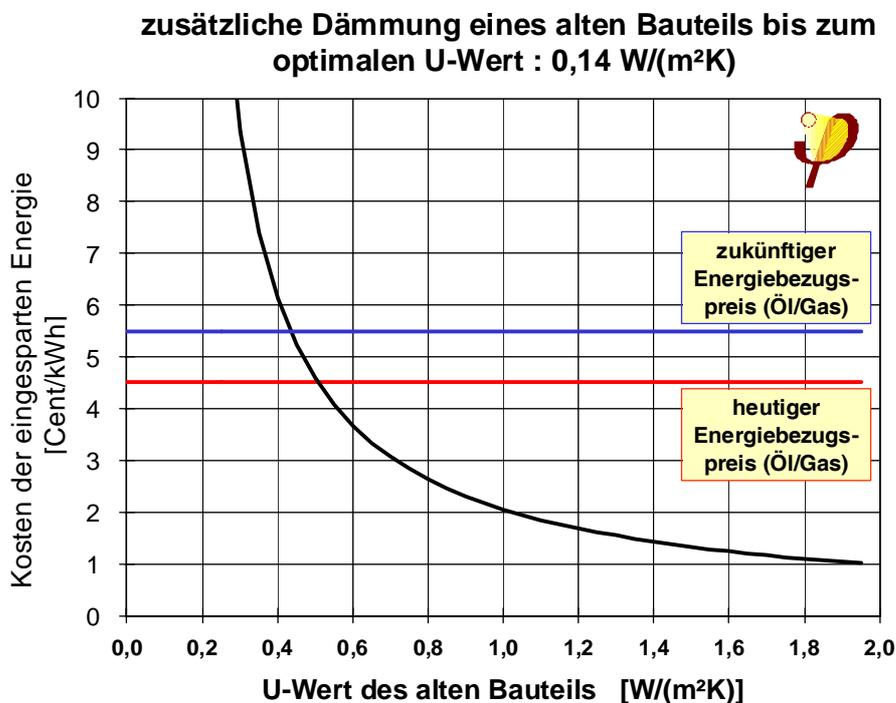


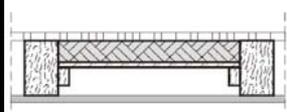
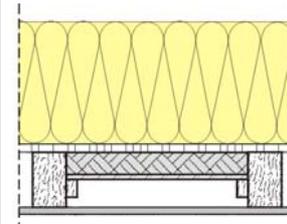
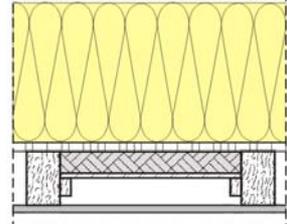
Abbildung 29: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmung (begehbar) einer obersten Geschossdecke).

Tabelle 14: Wärmedämmung auf der obersten Geschossdecke (nicht begehrbar)

Energiesparmaßnahme: oberste Geschossdecke; Wärmedämmung (nicht begehrbar)

Realzins: 3,50% p.a.	Heizgradstunden: 74 kWh/a
Kalkulationsdauer: 20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad: 90%
Annuität: 7,0% p.a.	Mittlerer Energiepreis: 0,055 €/kWh
	Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil: 0,058 €/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : keine

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmte Geschossdecke	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung keine	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Wärmedämmung (nicht begehrbar)	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Wärmedämmung (nicht begehrbar)
U-Wert des alten Bauteils 1,26 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,26 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,14 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 6,48 m²KW	zukunftsweisender U-Wert 0,12 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 7,89 m²KW
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei -10 °C Außenluft:	15,1 °C	19,5 °C	19,6 °C
Behaglichkeit Winter	mittel	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	0 €/m²	16 €/m²	19 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		16 €/m²	19 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		6 €/m²	7 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		10 €/m²	11 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		0,67 €/m²a	0,80 €/m²a
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.):		5,32 €/m²a	5,42 €/m²a
jährlicher Gewinn:		4,64 €/m²a	4,62 €/m²a
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt :		92,3 kWh/(m²a)	94,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil :		89%	91%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		0,7 Cent/kWh	0,9 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		29 kg/(m²a)	29 kg/(m²a)

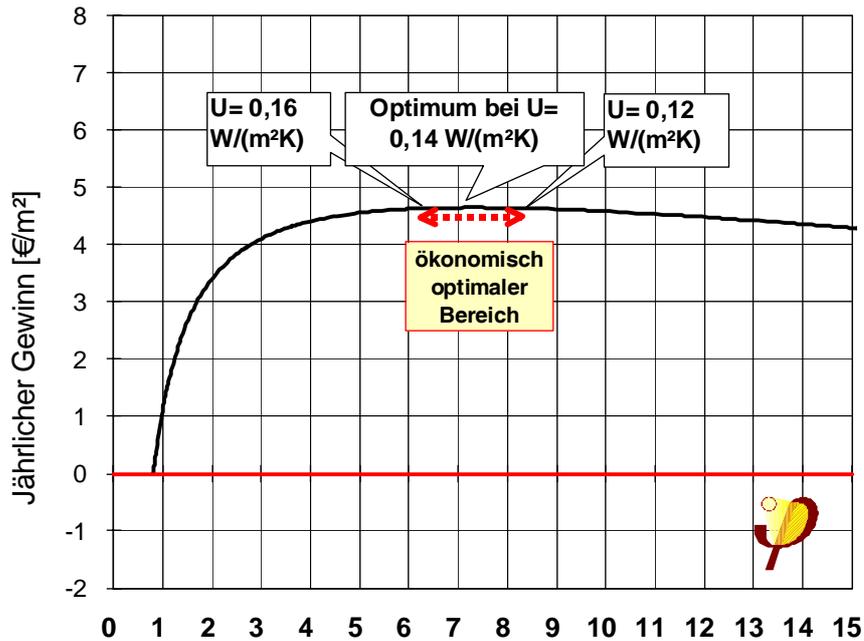


Abbildung 30: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Wärmedämmung (nicht begehrbar) einer obersten Geschossdecke in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

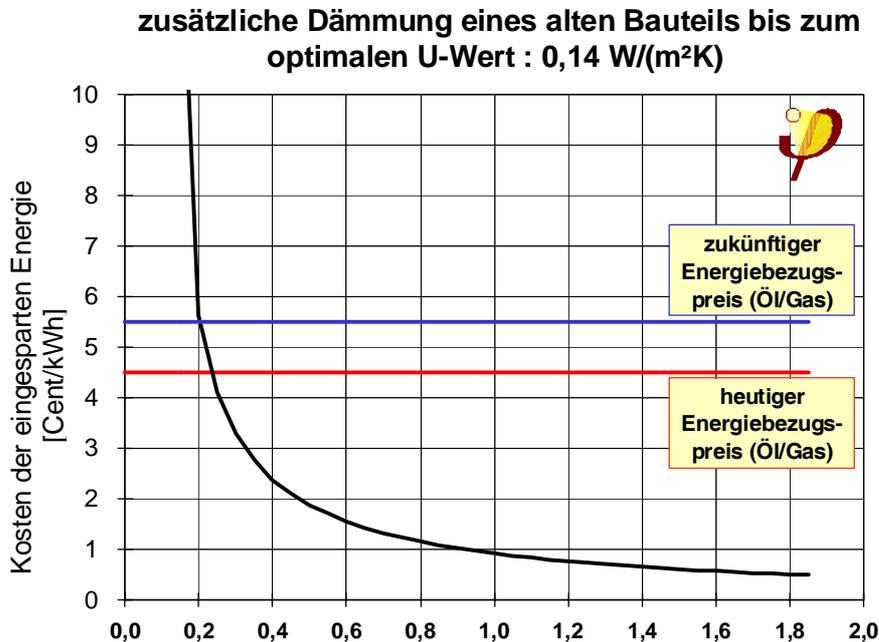


Abbildung 31: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmung (nicht begehrbar) einer obersten Geschossdecke).

4.6 Wärmedämm-Maßnahmen im beheizten Keller

4.6.1 Innendämmung einer Kelleraußenwand

In beheizten Kellerräumen kann eine Innendämmung an eine ohnehin fällige Erneuerung des Innenputzes oder der inneren Beplankung gekoppelt werden. Die Situation ist vergleichbar, wenn im Rahmen einer Umnutzung von Kellerräumen Außenwände erstmalig eine Innenverkleidung erhalten. Tabelle 15 dokumentiert die Maßnahme Innendämmung der Kellerwand gekoppelt an neuen Innenputz. Diese eher seltene Ohnehin-Maßnahme ist bereits mit einem hohen Aufwand verbunden und ist geeignet für die Ankopplung einer Dämmung des betreffenden Bauteils. Die Ohnehin-Kosten betragen hier 25 €/m². Auch bei dieser Innendämm-Maßnahme sind die Dämmstärken aus baupraktischen Gründen begrenzt (Raumverlust und Wärmebrücken). Größere Dämmstärken als 12 cm können daher nicht empfohlen werden. Die baulichen Kosten der Innendämmung mit Dampfsperre (die gleichzeitig Luftdichtung ist) und Beplankung liegen bei 45 €/m². Mit Kosten der eingesparten kWh Energie von 2,5 Cent ist die Maßnahme sehr wirtschaftlich.

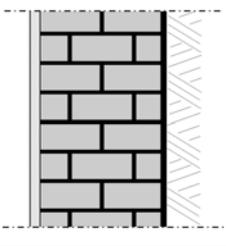
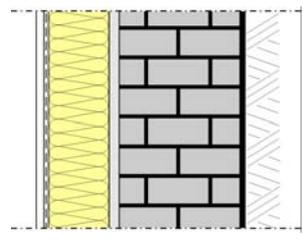
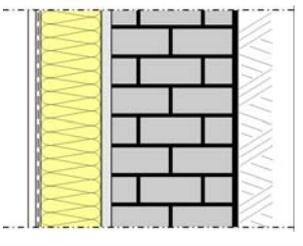
Bei der Kostenrechnung wurden typische Wärmebrücken berücksichtigt. Der Wärmebrückenzuschlag (ΔU_{WB}) liegt bei 0,38 W/(m²K), der Temperaturkorrekturfaktor für Wärmeverluste wurde mit 0,5 angesetzt. Abbildung 32 zeigt den jährlichen Gewinn in Abhängigkeit des neuen R-Werts der Kellerwand. Die Wärmedämm-Maßnahme ist wirtschaftlich für ungedämmte Kellerwände bis zu U-Werten des alten Bauteils von 0,95 W/(m²K) (vgl. Abbildung 33).

Tabelle 15: Innendämmung der Kellerwand gekoppelt an neuen Innenputz

Energiesparmaßnahme: Kellerwand; Innendämmung mit Luftdichtung

Realzins: 3,50% p.a.	Reduktionsfaktor x Heizgradstunden: 39 kWh/a
Kalkulationsdauer: 20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad: 90%
Annuität: 7,0% p.a.	Mittlerer Energiepreis: 0,055 €/kWh
	Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil: 0,058 €/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : Neuer Innenputz / neue Innenverkleidung

Bauteil alt:	Ohnehin Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
ungedämmte Kellerwand	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung Neuer Innenputz / neue Innenverkleidung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Innendämmung mit Luftdichtung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Innendämmung mit Luftdichtung
U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,41 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,27 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 3,00 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,27 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 3,00 m²K/W
			

Alt: Mindest-Empfehlung: Zukunftsweisend:

Oberflächentemp. innen bei 5 °C Erdreichtemp.:	17,3 °C	18,7 °C	18,7 °C
Behaglichkeit Winter	hoch	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	25 €/m²	45 €/m²	45 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		20 €/m²	20 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Wert der bedingten Energiesparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		8 €/m²	8 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		12 €/m²	12 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		0,84 €/(m²a)	0,84 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. künftigem Energiepreis s.u.) ¹ :		1,91 €/(m²a)	1,91 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		1,07 €/(m²a)	1,07 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt¹):		33,1 kWh/(m²a)	33,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil¹):		54%	54%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,5 Cent/kWh	2,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		10 kg/(m²a)	10 kg/(m²a)

Anmerkung: 1) Zur Berechnung wurde ein effektiver U-Wert verwendet, der typische Wärmebrückenverluste berücksichtigt.

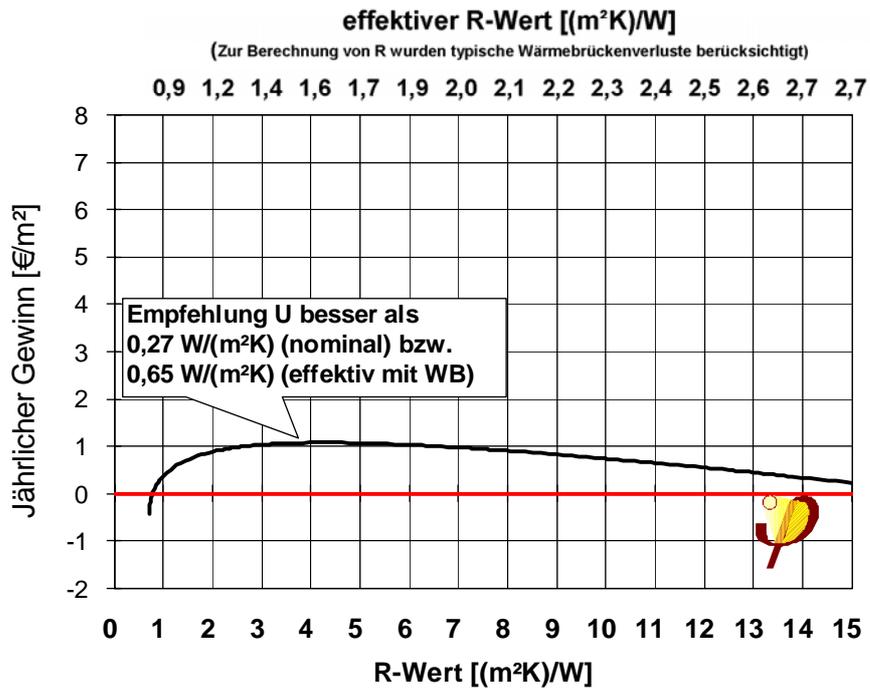


Abbildung 32: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Innendämmung einer Kellerwand (Ohnehin-Maßnahme: neuer Innenputz) in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

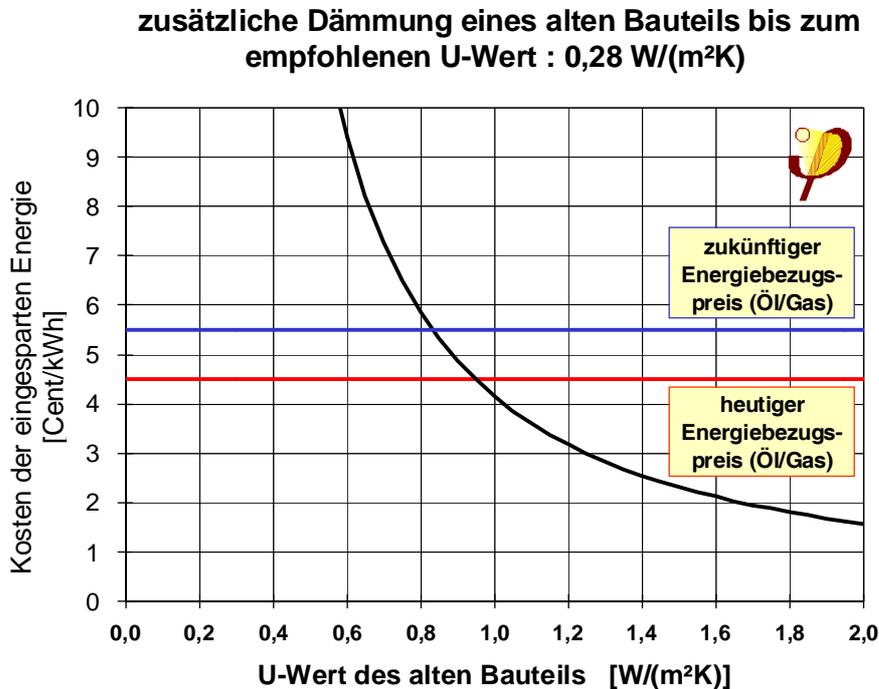


Abbildung 33: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Innendämmung einer Kellerwand bei neuem Innenputz).

4.7 Wärmedämm-Maßnahmen im unbeheizten Keller

4.7.1 Dämmung der Kellerdecke von unten

In unbeheizten Kellern kann der Wärmeschutz bisher ungedämmter Kellerdecken mit einer Wärmedämmung von unten erfolgen. Die nachträgliche Maßnahme Wärmedämmung der Kellerdecke von unten ist in Tabelle 16 dokumentiert. Dabei werden Dämmstoff-Platten von unten angeklebt (gedübelt oder geschraubt). Eine Verkleidung der Wärmedämmung ist in Kellerräumen nicht erforderlich. Die Investitionskosten der Wärmedämm-Maßnahme liegen bei 22 €. Die Maßnahme ist mit 2,5 Cent je eingesparter kWh Endenergie wirtschaftlich günstig.

Aus baupraktischen Gründen (Raumverlust und Wärmebrücken) wurden auch bei dieser Maßnahme die angesetzten maximalen Dämmstärken auf 12 cm begrenzt. Zur Berechnung der Heizenergie-Einsparung wurden typische Wärmebrückenverluste berücksichtigt ($\Delta U_{WB} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und ein Temperaturkorrektur-Faktor von 0,5 angesetzt. Mit der Begrenzung der Dämmstärke ergibt sich ein empfohlener U-Wert von $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; der effektive U-Wert einschließlich ΔU_{WB} liegt bei $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Abbildung 34 zeigt die wirtschaftlich optimale Dämmung über dem R-Wert (über der oberen x-Achse ist zusätzlich der effektive R-Wert inkl. Wärmebrückenverlusten aufgetragen). Wie zu erkennen ist, liegt das wirtschaftliche Optimum bei etwas höheren R-Werten. Die Wärmedämm-Maßnahme ist zu heutigen Energiepreisen wirtschaftlich, so lange der alte U-Wert größer als $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist (vgl. Abbildung 35). Dies ist der Fall bei ungedämmten Kellerdecken und solchen mit geringer Trittschalldämmung (bis 2,5cm).

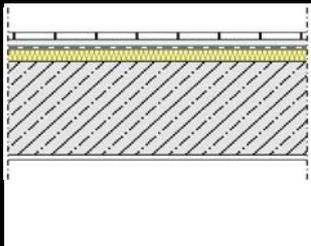
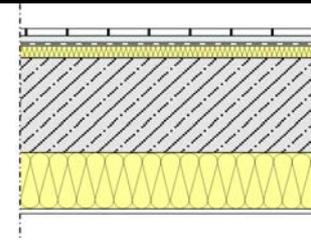
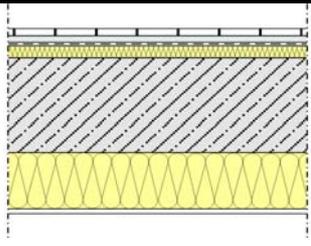
Mit der Wärmedämm-Maßnahme nimmt aber vor allem die Behaglichkeit zu. Die Oberflächentemperatur im empfindlichen Bodenbereich erhöht sich bei den Auslegungsbedingungen (Temperatur im Keller 5°C) von $17,5$ auf $19,0^\circ\text{C}$. Fußbodentemperaturen um 17°C werden als unbehaglich empfunden [Recknagel 2003].

Tabelle 16: Wärmedämmung der Kellerdecke von unten

Energiesparmaßnahme: Dämmung von Kellerdecken; Dämmung v. unten (unverkl.)

Realzins:	3,50%	p.a.	Reduktionsfaktor x Heizgradstunden:	39	kKh/a
Kalkulationsdauer:	20	Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad:	90%	
Annuität:	7,0%	p.a.	Mittlerer Energiepreis:	0,055	€/kWh
			Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil:	0,058	€/kWh

Kopplung an Ohnehin-Maßnahme : keine

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	wirtschaftlich gebotener Wärmeschutz	zukunftsweisender Wärmeschutz
Kellerdecke ungedämmt	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung keine	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindest-Empfehlung: Dämmung v. unten (unverkl.)	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung: Dämmung v. unten (unverkl.)
U-Wert des alten Bauteils 1,30 W/(m²K)	U-Wert des alten Bauteils 1,30 W/(m²K)	wirtschaftlich gebotener U-Wert 0,27 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 3,00 m²K/W	zukunftsweisender U-Wert 0,27 W/(m²K) R-Wert d. zusätzl. Wärmedämmung: 3,00 m²K/W
			

	Alt:	Mindest-Empfehlung:	Zukunftsweisend:
Oberflächentemp. innen bei 5 °C Kellertemp.:	17,5 °C	19,2 °C	19,2 °C
Behaglichkeit Winter	hoch	hoch	hoch
Behaglichkeit Sommer	mittel	hoch	hoch
Tauwasserschutz Kante	mittel	hoch	hoch
Bauliche Investitionskosten:	0 €/m²	22 €/m²	22 €/m²
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme : = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		22 €/m²	22 €/m²
Restwert der Energiesparmaßnahme bei 50 Jahren Lebensdauer :		39%	39%
Restwert der bedingten Energieeinsparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum :		9 €/m²	9 €/m²
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts :		13 €/m²	13 €/m²
Annuitätische Kapitalkosten für die Energiesparmaßnahme :		0,95 €/(m²a)	0,95 €/(m²a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. Energiepreis inkl. HE s.o.) ¹ :		2,19 €/(m²a)	2,19 €/(m²a)
jährlicher Gewinn:		1,25 €/(m²a)	1,25 €/(m²a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt¹ :		38,1 kWh/(m²a)	38,1 kWh/(m²a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil¹ :		68%	68%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie :		2,5 Cent/kWh	2,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas) :		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		12 kg/(m²a)	12 kg/(m²a)

Anmerkung: 1) Zur Berechnung wurde ein effektiver U-Wert verwendet, der typische Wärmebrückenverluste berücksichtigt.

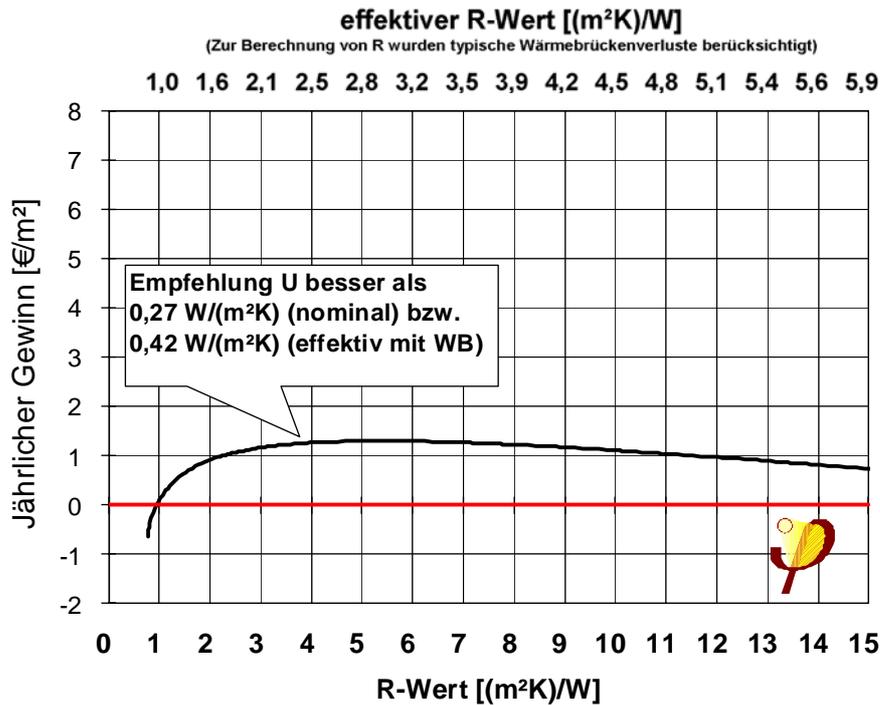


Abbildung 34: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die Wärmedämmung einer Kellerdecke von unten in Abhängigkeit vom erreichten Wärmedurchlasswiderstand.

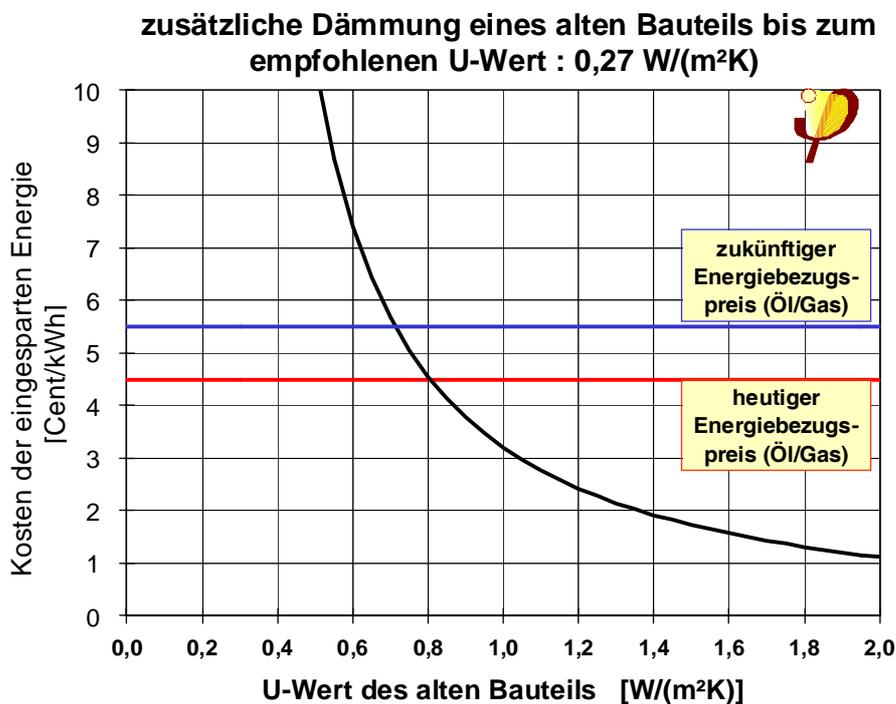


Abbildung 35: Kosten für die eingesparten kWh Energie in Abhängigkeit vom ursprünglichen U-Wert des Bauteils. Ist der Preis für die bezogene Energie höher, so ist die Maßnahme wirtschaftlich (Wärmedämmung einer Kellerdecke von unten).

4.8 Wärmedämmung von Rohrleitungen

In Bestandsgebäuden verlaufen warme Rohrleitungen des Heizungsvorlaufs und Leitungen zur Verteilungen des warmen Brauchwassers häufig im Keller. Diese sind häufig noch nicht oder nur unzureichend gedämmt. Mit der nachträglichen Dämmung der Leitungen kann ein weiteres Energie-Einsparpotential erschlossen werden.

Mit dem längenabhängigen Wärmeverlustkoeffizienten Ψ können die Wärmeverluste \dot{Q}_{Rohr} eines mit einem warmen Medium durchflossenen Rohrleitungsstücks berechnet werden.

$$\dot{Q}_{Rohr} = \Psi \cdot l \cdot (\vartheta_m - \vartheta_R)$$

Ψ : Wärmeverlustkoeffizient

l : Länge der Rohrleitung

ϑ_m = Temperatur des durchfliessenden Medium

ϑ_R = Temperatur des Aufstellungsraums

Die Jahreswärmeverluste Q_{Rohr} einer warmen Rohrleitung sind nun von der Betriebsdauer t , der Mitteltemperatur ϑ_m der Leitung, der mittleren Temperatur ϑ_R des Aufstellraumes, der Länge der Leitung l und dem Ψ -Wert abhängig.

$$Q_{Rohr} = \Psi \cdot l \cdot (\vartheta_m - \vartheta_R) \cdot t = \Psi \cdot l \cdot \Theta$$

t : Betriebsdauer

Θ : Verlustgradstunden

Besonders hoch sind die Verlustgradstunden Θ für warmwasserführende Versorgungs- und Zirkulationsleitungen, die ganzjährig in Betrieb sind. Θ liegt hier zwischen 330 und 460 kWh. Tabelle 17 dokumentiert für unterschiedliche Anwendungen und Betriebszustände im Gebäude die Verlustgradstunden von warmen Rohrleitungen. Deutlich geringer ist Θ und sind damit auch die Rohrleitungsverluste bei einem Niedertemperaturheizungssystem. Bei einer im Keller verlaufenden Heizungsleitung eines Niedertemperatursystems belaufen sich die Verlustgradstunden auf 76 kWh.

Tabelle 17: Verlustgradstunden für Rohrleitungen mit verschiedenen Betriebskennwerten (Quelle: [Feist 1998])

Auslegung	WW+Zirkulation 24h			WW+Zirkulation 18h		
	Wohnraum	Keller	Dach	Wohnraum	Keller	Dach
Temperatur im Raum	20	12	5	20	12	5
spez. Rohrl.verl. kWh/a	329	400	460	246	300	345
Auslegung	Heizung 70/55 ungeregelt			Heizung 70/55 geregelt		
	Wohnraum	Keller	Dach	Wohnraum	Keller	Dach
Temperatur im Raum	20	12	5	20	12	5
spez. Rohrl.verl. kWh/a	14	275	312	7	153	191
Auslegung	Heizung 55/45 ungeregelt			Heizung 55/45 geregelt		
	Wohnraum	Keller	Dach	Wohnraum	Keller	Dach
Temperatur im Raum	20	12	5	20	12	5
spez. Rohrl.verl. kWh/a	10	205	243	5	120	158
Auslegung	Heizung 35/30 ungeregelt			Heizung 35/30 geregelt		
	Wohnraum	Keller	Dach	Wohnraum	Keller	Dach
Temperatur im Raum	20	12	5	20	12	5
spez. Rohrl.verl. kWh/a	4	113	150	2	76	114

Für eine Analyse der wirtschaftlichen Wärmedämm-Maßnahmen wurde eine im Keller verlegte Heizleitung einer Niedertemperaturheizung (Auslegung 35/40) herangezogen. Es wurde also ein eher ungünstiger Fall gewählt ($\Theta = 76$ kWh). Tabelle 19 dokumentiert beispielhaft eine Dämmmaßnahme an dieser Heizungsleitung (DN 20) mit einer alukaschierten Rohrdämmschale. Rohrdämmschalen sind auch für Heimwerker einfach zu handhaben und sind im Baufachhandel in großer Auswahl verfügbar. Für eine gewerbliche Ausführung der Maßnahme wurden durchschnittliche Kosten von 9 €/m (Dämmdicke 100% x DN) bzw. 16 €/m (Dämmdicke 200% x DN) ermittelt.

Obwohl der gewählte Fall zu den ungünstigen zählt (Niedertemperatursystem), sind die Maßnahmen ausgesprochen wirtschaftlich. Die Kosten der eingesparten kWh Energie liegen mit 0,9 (Dämmstärke = 100% DN) bzw. 1,5 Cent/kWh (Dämmstärke =

200% DN) deutlich unter den heutigen Energiebezugspreisen. Alle anderen Fälle (höhere Vorlauftemperatur, Warmwasserleitungen) sind noch weit wirtschaftlicher.

Dabei entspricht die Dämmdicke von 100% DN (WLG 035) der Anforderung gemäß der Energieeinsparverordnung (vgl. [EnEV]). Aufgrund der Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme wurde vom Verordnungsgeber auch eine Nachrüstpflicht für diese Dämm-Maßnahme erlassen. Ungedämmte und zugängliche Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen in unbeheizten Räumen müssen demnach bis zum 31.12.2006 gemäß den Anforderungen in Tabelle 18 gedämmt werden (vgl. §9 in [EnEV]).

Auch eine Dämmung mit 200% x DN liegt mit den aktualisierten Energiepreisen noch im Bereich des wirtschaftlichen Optimums (vgl. Abbildung 37). Bei der Warmwasserleitung liegt das wirtschaftliche Optimum sogar bei noch höheren Dämmstärken. Aufgrund der Nachrüstung und der Raumbegrenzung durch bereits vorhandene Befestigungssysteme sprechen allerdings baupraktische Gründe gegen deutlich höhere Dämmstärken als 200% x DN. Bei einer nachträglichen Dämmung führen außerdem die Rohrbefestigungen zu zusätzlichen Wärmeverlusten und reduzieren damit die Wirkung. Bei Neuverlegung hat sich eine Befestigung außerhalb der Dämmschale bewährt.

Tabelle 18: Wärmedämmung von Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen nach EnEV Anhang 5, Tabelle 1

Zeile	Art der Leitungen / Armaturen	Mindestdicke der Dämmschicht, bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(mK)
1	Innendurchmesser bis 22 mm	20 mm
2	Innendurchmesser über 22 mm bis 35 mm	30 mm
3	Innendurchmesser über 35 mm bis 100 mm	gleich Innendurchmesser
4	Innendurchmesser über 100 mm	100 mm
5	Leitungen und Armaturen nach den Zeilen 1 bis 4 in Wand- und Deckendurchdringungen, im Kreuzungsbereich von Leitungen, an Leitungsverbindungsstellen, bei zentralen Leitungsverteilern	½ der Anforderungen der Zeilen 1 bis 4
6	Leitungen von Zentralheizungen nach den Zeilen 1 bis 4, die nach Inkrafttreten dieser Verordnung in Bauteilen zwischen beheizten Räumen verschiedener Nutzer verlegt werden	½ der Anforderungen der Zeilen 1 bis 4
7	Leitungen nach Zeile 6 im Fußbodenaufbau	6 mm

In Abbildung 36 ist die Geometrie und der Isothermenverlauf am Beispiel einer Rohrleitung DN 25 und einer 30 mm Wärmedämmung dargestellt. Die zusätzlichen Wärmeverluste entsprechen den Wärmeverlusten eines gedämmten Rohrstücks mit der 6-fachen Länge der Dämmücke. Bei einer Dämmdicke von $200\% \times \text{DN}$ entspricht der zusätzliche Wärmeverlust der 8-fachen Länge (vgl. [AK28]). Neben den Leitungsrohren dürfen die Armaturen bei nachträglichen Dämm-Maßnahmen nicht vergessen werden. Das Einsparpotential ist beträchtlich (vgl. [AK 24]). Auch hierfür gilt die Nachrüstpflicht bis 31.12.2006 (vgl. §9 in [EnEV])

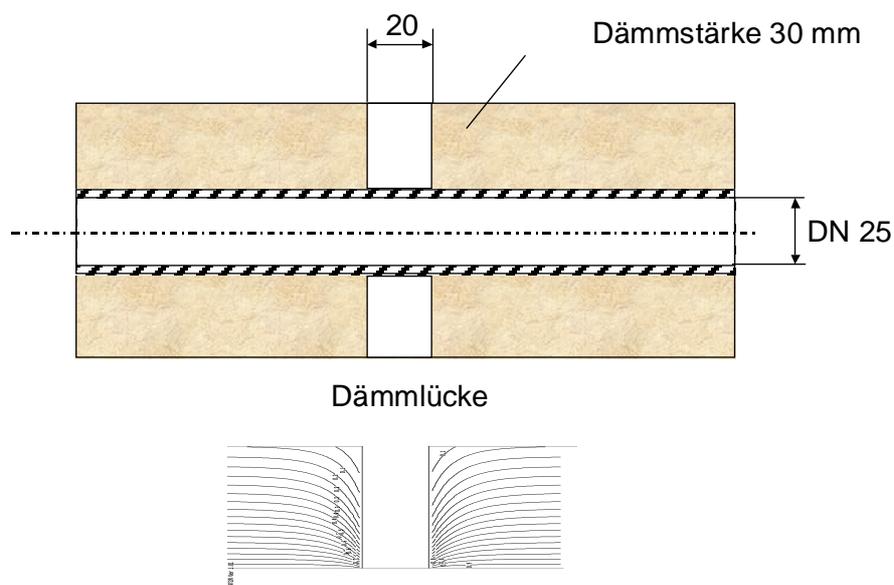


Abbildung 36: Wärmeisolierte Rohrleitung (DN25) mit 30 mm Wärmedämmung und einer Dämmücke von 20 mm (Geometrie und Isothermendarstellung). Quelle: [AK 28].

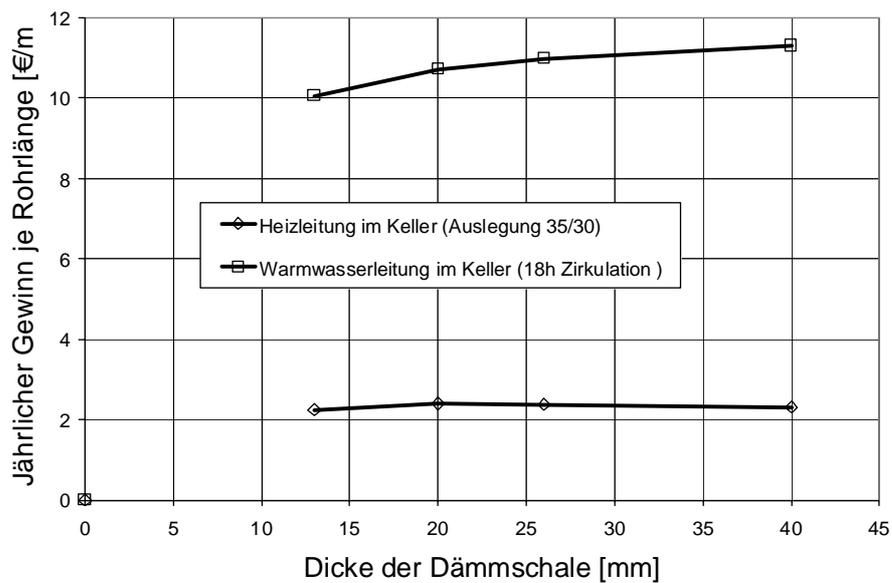


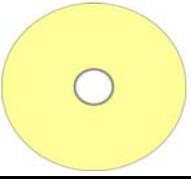
Abbildung 37: Mittlerer jährlicher Gewinn durch die nachträgliche Dämmung einer Rohrleitung DN 20 ($\lambda = 0,35W/(m K)$)

Tabelle 19: Wärmedämmung einer Heizwärmeverteilung im unbeheizten Keller

Energiesparmaßnahme: Heizleitung (35/30 geregelt); Dämmung der Rohrleitung in nichtbeheizten Räumen

Realzins: 3,50%	Verlustgradstunden von Rohrleitung: 76	kKh/a
Kalkulationsdauer: 20 Jahre	diff. Jahresnutzungsgrad: 90%	
Annuität: 7,0%	Mittlere Energiekosten: 0,055	€/kWh
	Mittlere Energiekosten inkl. Hilfsenergieanteil: 0,058	€/kWh

Ungekoppelte Ausführung

Bauteil alt:	Ohnehin-Maßnahme:	Wärmeschutz nach Mindestanforderung	Wärmeschutz zukunftsweisend
	Ohnehin fällige Maßnahme ohne Wärmedämmung	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Mindestanforderung:	Sanierungsmaßnahme mit Wärmedämmung nach Empfehlung:
Rohrleitung ungedämmt	keine	Dämmung der Rohrleitung	Dämmung der Rohrleitung
Ψ-Wert des alten Bauteils 0,73 W/(mK)	Ψ-Wert 0,73 W/(mK)	wirtschaftlich gebotener Ψ-Wert 0,18 W/(mK)	zukunftsweisender Ψ-Wert 0,14 W/(mK)
bei WLG d_N : 20 mm Dämmung: 0 mm	bei WLG d_N : 20 mm Dämmung: 0 mm	bei WLG 0,035 W/mK d_N : 20 mm Dämmung: 20 mm	bei WLG 0,035 W/mK d_N : 20 mm Dämmung: 40 mm
			

	Alt:	Mindestanforderung:	Empfehlung:
Oberflächentemp. Rohrleitung:	35,0 °C	18,0 °C	15,0 °C
bei 35 °C Mediumtemperatur und 12 °C Raumtemperatur			

Bauliche Investitionskosten:	0 €/m	9 €/m	16 €/m
Investitionskosten der bedingten Energiesparmaßnahme = Kosten, die der Energieeinsparung zugerechnet werden müssen		9 €/m	16 €/m
Restwert des Bauteils bei 40 Jahren Lebensdauer:		33%	33%
Restwert der bedingten Energiesparmaßnahme nach dem Kalkulationszeitraum:		3 €/m	5 €/m
Kosten d. Energiesparmaßnahme abzüglich des Restwerts:		6 €/m	11 €/m
Annuitätische Jahreskosten für die Energiesparmaßnahme:		0,42 €/ (m a)	0,75 €/ (m a)
jährliche Heizkosteneinsparung (mit mittl. künftigem Energiepreis s.u.):		2,67 €/ (m a)	2,88 €/ (m a)
jährlicher Gewinn:		2,25 €/ (m a)	2,14 €/ (m a)
Erzielte Heizenergieeinsparung normalbeheizt:		46,3 kWh/(m a)	50,1 kWh/(m a)
Heizenergieeinsparung im Vergleich zum alten Bauteil:		75%	81%
Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie:		0,9 Cent/kWh	1,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas):		4,5 Cent/kWh	4,5 Cent/kWh
zum Vergleich: heutige Bezugskosten für eine kWh Fernwärme:		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
zum Vergleich: künftige Bezugskosten für eine kWh Brennstoff (Öl/Gas):		5,5 Cent/kWh	5,5 Cent/kWh
Reduzierung der CO₂-Emissionen (bei Öl-Heizung):		14 kg/(m a)	16 kg/(m a)

5 Zusammenfassung

Im deutschen Gebäudebestand kann ein bedeutendes Energiesparpotential durch bauliche wie durch anlagentechnische Maßnahmen erschlossen werden. Die in dieser Studie untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen führen neben der Energieeinsparung zu deutlichen Verbesserungen der thermischen Behaglichkeit und zu einer Wertsteigerung der bestehenden Gebäude. Die einzelwirtschaftlich gewinnbringenden Wärmeschutzmaßnahmen leisten mit der Reduzierung der CO₂-Emissionen zusätzlich, volkswirtschaftlich kostenneutral, einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz. Die wirtschaftlich erzielbaren Energieeinsparungen gegenüber einem typischen Bestandsgebäude betragen je nach Außenbauteil bis über 90%.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse in dieser Studie wurde ausschließlich einzelwirtschaftlich, d.h. aus Sicht des Investors behandelt. Externe Kosten des Energieverbrauchs wie z.B. die globale Erwärmung bleiben unberücksichtigt. Ebenso werden ökonomisch schwer quantifizierbare Vorteile, wie z.B. die Komforterrhöhung, die verbesserte Versorgungssicherheit und die Wertsteigerung des wärmetechnisch sanierten Bestandsgebäudes nicht monetär bewertet.

Im Vergleich zu einer 1998 im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Wirtschaft durchgeführten Wirtschaftlichkeitsstudie (vgl. [Feist 1998]), erhöht sich der wirtschaftlich gebotene Wärmeschutz unter den aktuellen ökonomischen Randbedingungen deutlich.

Das Energieeinsparungsgesetz [EnEG] bietet eine Rechtsgrundlage für Anforderungen an den Wärmeschutz bei Änderungen an bestehenden Gebäuden. Nur wirtschaftlich vorteilhafte Maßnahmen dürfen von den Eigentümern gefordert werden. Festgelegt werden die Anforderungen in der Energieeinsparverordnung [EnEV]. Aufgabe dieser Studie war mit aktuellen ökonomischen Randbedingungen Mindestanforderungen an den Wärmeschutz und Zielwerte für den zukünftigen Wärmeschutz zu bestimmen. Die erzielbaren Einspar- und Gewinnpotenziale, bezogen auf die Einzelmaßnahmen, sollten aufgezeigt werden.

Die Studie führt mit den aktualisierten ökonomischen Randbedingungen zu den folgenden Ergebnissen:

- Gegenüber den derzeit gültigen Anforderungen an den Wärmeschutz bei Änderungen an bestehenden Gebäuden (vgl. [EnEV]) sind deutliche weitere Verbesserungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile wirtschaftlich sinnvoll (vgl. Tabelle 20).
- Neben den Mindestanforderungen sollten zusätzlich Zielwerte empfohlen werden. Mit der Vorgabe solcher Zielwerten wird der wirtschaftlich sinnvolle

Bereich für die Baupraxis transparent gemacht. Mit der Vorgabe von Zielwerten durch den Staat bietet sich die Möglichkeit, Förderprogramm an das Erreichen der Zielwerte zu koppeln und dadurch den Nutzen für den Einzelnen und für die Gemeinschaft noch weiter zu erhöhen.

- Bei den untersuchten Einzelmaßnahmen war überwiegend ein hoher Wärmeschutz mit Wärmedurchgangskoeffizienten unter $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ökonomisch geboten. Die Wirtschaftlichkeit ausgezeichneter U-Werte steht damit außer Frage. Allerdings erfordert die sachgerechte Ausführung z.T. noch praxismgerechte Lösungen und spezifische Ratgeber (wie z.B. [AK24], [HMWVL 2001]).
- Neben den einzelwirtschaftlichen Gewinnpotentialen sind weitere Vorteile von Wärmeschutz-Maßnahmen offensichtlich: Komfortgewinn durch gesünderen und thermisch behaglicheren Wohnraum, Wertsteigerung durch zusätzlichen Schutz der Bausubstanz, Versorgungssicherheit bei insgesamt verknappenden Energieressourcen und Umweltschutz durch einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz. Dennoch bestehen oft weiterhin Bedenken bei Baupraktikern und Hauseigentümern. Die offensichtlichen Vorteile sollten verstärkt verbreitet werden; bestehenden Vorurteilen muss entgegengewirkt werden.
- Die Sanierung von Altbauten schafft Arbeitsplätze. Gesamtwirtschaftliche Aspekte wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt, doch führen Mehrinvestitionen in Energieeffizienz auch zu mehr Beschäftigung in der mittelständischen Bauwirtschaft und dem betreffenden Handwerk. In einem Ausblick bis 2010 beziffert die KfW Bankengruppe den Beschäftigungseffekt Ihrer CO₂-Minderungsprogramme bei Neu- und Altbauten auf die Anzahl von 20.000 bis 30.000 erhaltenen bzw. geschaffenen Arbeitsplätzen (vgl. [KfW 2003]).
- CO₂-Minderungskosten: Die in der Studie untersuchten wärmetechnischen Sanierungen sind alle einzelwirtschaftlich rentabel, d.h. die jährliche Energiekosteneinsparung war jeweils größer als die anfallenden Kapitalkosten. Mit der wärmetechnischen Sanierung im Bestand können somit bei negativen CO₂-Minderungskosten die CO₂-Emissionen reduziert werden. Das Reduktionspotential betrug bei den unterschiedlichen Maßnahmen bis zu 37 kg CO₂ je m² Bauteilfläche. Bezogen auf den gesamten Heizenergieverbrauch im Gebäudebestand in Deutschland, der immerhin etwa Drittel des Endenergieverbrauchs ausmacht, sind durch die hier behandelten Maßnahmen Einsparungen von über 50% realisierbar.

- Die Wärmeschutzmaßnahmen sind besonders wirtschaftlich, wenn sie mit einer ohnehin fälligen Instandsetzungsarbeit gekoppelt sind. Dabei sollte mindestens der schon heute wirtschaftlich gebotene U-Wert erreicht werden, da sich die koppelbaren Tatbestände und Erneuerungen von Bauteilen erst in relativ langen Zyklen (20-50 Jahre) wiederholen.
- Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen ist abhängig vom Wärmeschutz des alten Bauteils. Bei bereits vorliegendem mittelmäßigem Wärmeschutz lohnt eine Wärmedämm-Maßnahme manchmal nicht mehr. Daher sollte gelten: Wenn eine wärmetechnische Verbesserung eines Bauteils in Angriff genommen wird, dann sollte diese auch konsequent im jeweils wirtschaftlich und baupraktisch möglichen Standard durchgeführt werden. Eine spätere Nachrüstung auf einen sinnvollen Wärmeschutz ist später regelmäßig nicht mehr wirtschaftlich.
- Mittels der dynamischen Annuitätenmethode wurde der Äquivalentpreis der eingesparten Energie bestimmt. Hierzu werden die jährlichen Kapitalkosten einer Wärmeschutz-Maßnahme auf die eingesparte Energie bezogen; so kann ein Preis für die eingesparte Kilowattstunde bestimmt werden. Damit ist ein transparenter Vergleich zu der alternativen Dienstleistung Energiebezug möglich. Bei allen untersuchten Einzelmaßnahmen lag der Preis für die eingesparte kWh mit 1 bis 3,5 Cent/kWh (für den zukunftsweisenden Wärmeschutz) deutlich unter dem derzeitigen Endenergiebezugspreis von 4,5 Cent/kWh.

Tabelle 20 gibt einen Überblick zu den ausgewählten und untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen. Die wirtschaftlichen Wärmedurchgangskoeffizienten dieser Studie sind zum Vergleich um die derzeitigen Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten gemäß [EnEV] ergänzt. In der Studie wurde mit einem zukünftigen Endenergiebezugspreis (Gas oder Heizöl) von 5,5 Cent/kWh im Mittel über den Kalkulationszeitraum gerechnet (die derzeitigen Preise liegen bei 4,5 Cent/kWh).

Tabelle 20: Überblick zu den untersuchten Wärmeschutz-Maßnahmen. Eine Maßnahme ist wirtschaftlich, wenn der Äquivalentpreis der eingesparten kWh Energie günstiger ist als der Endenergiebezugspreis (der Energiepreis für Öl/Gas liegt derzeit bei 4,5 Cent/kWh, April 2005).

Maßnahme	U-Wert optimal (Studie)	R-Wert optimal (Studie)	Äquivalentpreis der eingesparten kWh	EnEV Höchstwert Altbau	U-Wert zukunftsweisend (Studie)	R-Wert zukunftsweisend (Studie)	Äquivalentpreis der eingesparten kWh
	W/(m²K)	(m²K)/W	Cent/kWh	W/(m²K)	W/(m²K)	(m²K)/W	Cent/kWh
Steldach							
Unter- & Zwischensparrendämmung	(0,16)	5,5	2,0	0,30	(0,16)	5,5	2,0
Aufsparrendämmung	0,16	5,7	1,7	0,30	0,11	8,9	2,0
Auf- und Zwischensparrendämmung	0,15	6,2	1,9	0,30	0,10	9,1	2,1
Flachdach							
Zusätzl. Wärmedämmung in Warmdachaufbau	0,18	4,6	3,2	0,25	0,12	7,1	3,5
Plusdach (Umkehrdach auf Dachabdichtung)	0,22	3,7	2,9	0,25	0,16	5,5	3,3
oberste Geschossdecke							
Wärmedämmung (nicht begehbar)	0,14	6,5	0,7	0,30	0,12	7,9	0,9
Wärmedämmung (begehbar)	0,14	6,5	1,6	0,30	0,12	7,9	1,7
Außenwand							
Wärmedämm-Verbundsystem (Putzerneruerung)	0,17	5,2	1,3	0,35	0,13	7,3	1,6
Wärmedämm-Verbundsystem (Neuanstrich)	0,17	5,2	2,3	- 1)	0,13	7,3	2,5
Vorhangfassade mit zusätzlicher Dämmung (Erneuerung der Schalung)	0,18	4,7	2,0	0,35	0,13	7,0	2,3
Innendämmung mit Luftdichtung (Neue Tapete)	(0,28)	2,9	2,0	- 1)	(0,28)	2,9	2,0
Innendämmung mit Luftdichtung (Erneuerung von Innenputz)	(0,28)	2,9	1,0	0,45	(0,28)	2,9	1,0
Kellerwand							
Innendämmung mit Luftdichtung (Erneuerung von Innenputz)	(0,27)	3,0	2,5	0,50	(0,27)	3,0	2,5
Kellerdecke							
Dämmung von unten	(0,27)	3,0	2,5	0,40	(0,27)	3,0	2,5
Wärmeverteiler- und Warmwasserleitungen							
nachträgliche Dämmung	2)	100% x DN	0,9	2)	2)	200% x DN	1,5

Bei den in Klammern dargestellten U-Werten sind die Dämmstärken im Innenraum aus baupraktischen Gründe beschränkt. Die wirtschaftlichen U-Werte liegen bei geringeren Werten.
 1) Keine Anforderung nach Energieeinsparverordnung [EnEV]
 2) Dicke der Dämmschale bezogen auf den Leitungsdurchmesser DN

Anmerkung:

6 Literatur

- [AK24] Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 24, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [AK28] Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 28, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [AK32] Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten und Innendämmung, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 32, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [Braun 2005] W. Braun und A. Braun: Architektonische und energetische Sanierung einer Großsiedlung; im Tagungsband der 9. Passivhaustagung, Darmstadt 2005.
- [Deters 1999] K. Deters, Überprüfung des Wirtschaftlichkeitsgebotes des EnEG bei den neuen Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 1999 Teil 1 (September 1996, F 772), Institut für Bautechnik Hannover 1999.
- [Ebel 1990] W. Ebel, W. Eicke, W. Feist, Energiesparpotentiale im Gebäudebestand, Herausgeber Hessisches Ministerium für Umwelt, Darmstadt 1990.
- [EnEG] Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden, Bundesgesetzblatt Teil 1, 28. Juli 1976, S.1873-1875.
- [EnEV] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 7.12.2004 Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 64, S. 3147- 3162.
- [EOTA] Assumption of working life of construction products in Guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and Harmonized Standards, Guidance Document 002, EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS 1999.
- [Feist 1997] W. Feist, Überprüfung der bedingten energetischen Anforderungen im Gebäudebestand bei Beibehaltung der gegenwärtigen Rechtsgrundlage der Wärmeschutzverordnung: Studie im Auftrag des BMBau, Passivhaus Institut, Darmstadt 1997.
- [Feist 1998] W. Feist, Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand, Fachinformation PHI-1998/3, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [Feist 2005] W. Feist, Zur Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung bei Dächern, in Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [Frohner 2005] I. Frohner, I. Hámori: Lassen sich die Diskomfortzonen bei Passivhäusern zurückgewinnen? Im Tagungsband der 9. Passivhaustagung, Darmstadt 2005.

- [Glasneck 1993] H. Glasneck, Wirtschaftlichkeit energiesparender Maßnahmen im Gebäudebereich unter Einschluss ökologischer Aspekte, Gesundheitsingenieur 114 (1993) 4, S. 187-198.
- [Greifenhagen 2003] W. Greifenhagen: Innovative Altbaumodernisierung – das Modell Brunckviertel in Ludwigshafen, in [AK24] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 24, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [Hamann 1999] B. Hamann, R.D. Klodt, R. Gellert, T. Pelzers, Langzeitbewährung von PS-Hartschaum der Baustoffklasse B1 bzw. B2 nach DIN 4102. Bauphysik 21 (1999) Heft 1
- [HMWVL 2001] Energie sparen, Heizkosten senken – CO₂-Ausstoß mindern, Ratgeber zur energetischen Gebäudemodernisierung, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden 2001
- [Kah 2005] O. Kah, Die Strahlungsbilanz an der Dachoberfläche und weitere Einflussgrößen der Dachkonstruktion auf das sommerliche und winterliche Verhalten, in Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut, Darmstadt 2005.
- [KfW 2003] KfW Bankengruppe, KfW-Research, Ausgabe 30, Oktober 2003, Frankfurt, www.kfw.de
- [Maas 2000] A. Maas, G. Hauser, Überprüfung des Wirtschaftlichkeitsgebotes des EnEG bei den neuen Anforderungen der Wärmeschutzverordnung 1999 Teil II – Wirtschaftlichkeitsberechnung auf der Grundlage konkreter Konstruktionen und Baukosten (Basisjahr 1996), Forschungsbericht im Auftrag des BMVBW, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2000.
- [Mietspiegel DA 2003] Mietspiegel für Darmstadt 2003, Amt für Wohnungswesen, Stadt Darmstadt, www.darmstadt.de.
- [Recknagel 2003] H. Recknagel, E. Sprenger, E.-R. Schramek, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag, München 2003.
- [Rieche 1984] G. Rieche, Langzeitbewährung von Hartschaumplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS) in Wärmedämmsystemen, Gutachten 536, vom 03.09.1984, Gutachten im Auftrag des Industrieverbands Hartschaum e.V., Heidelberg.
- [Sedlbauer 2002] K. Sedlbauer, Th. Gabrio, M. Krus, Schimmelpilze – Gesundheitsgefährdung und Vorhersage, Gesundheitsingenieur 123 (2002), Heft 6, S. 285ff.
- [Spilker 2003] R. Spilker, R. Oswald, Flachdachsanieierung über durchfeuchteter Dämmschicht, Bauforschung für die Praxis, Band 61, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2003.
- [TECSON] TECSON-DIGITAL, aktuelle Heizölpreise, www.tecson.de.

- [VDI 2067] VDI 2067 Blatt 1, Wirtschaftlichkeit Gebäudetechnischer Anlagen, Beuth-Verlag, Berlin 9/2000.
- [Wolf 1986] G. Wolf, Langzeitbewährung von Styropor, Gutachten über 31 Jahre Styropor im Flachdach, Gutachten Nr. 411/86, vom 07.11.1986, Gutachten im Auftrag des Industrieverbands Hartschaum e.V., Heidelberg.