



OPTIMIERUNG VON WÄRMEDÄMMUNG

Prof. Dr. Friedrich Reinmuth,
Fachhochschule Münster Abt. Steinfurt

Zahlenwerte für die Höhe der bisher »gesicherten« oder »vermuteten« Energievorräte, das wahrscheinliche Jahr, wann sich die wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte erschöpfen, oder die zu erwartende Aufheizung der Erdatmosphäre hält sich der Verfasser für nicht kompetent. Ihm erscheint ein Streit, ob beispielsweise Erdöl für noch 20 oder 50 Jahre ausreicht, oder ob die Wälder in Mitteleuropa zu 60 oder 80 % krank sind, bei der genannten Situation als dilantantisch, ja grotesk.

Es ist bekannt, daß mehr als 40 % allen End-Energieverbrauches der BRD auf den Bereich Haushalte und Kleinverbraucher entfallen. Darin enthalten sind nur etwa 4 %, die in Lüftungs- und Klimaanlage verbraucht werden [1]. Der überwiegende Teil also entfällt auf den Bereich Raumheizung, wo Energie über die Gebäudehüllflächen als Transmissionswärme und mit der warmen Abluft der natürlichen Fugenlüftung diffus an die Umwelt abgegeben wird. Der überwiegend mangelhafte Zustand der nicht-transparenten Flächen (insbesondere Dachflächen, Außenwände, Kellerdecken/UG-Wände) der Hochbauten, ist das noch größte Einzelpotential zur Energieeinsparung.

Mit der Novellierung der Wärmeschutzverordnung, gültig seit 1.1.84, schreibt das Gesetz für Neu- und Umbauten Maximalwerte von Wärmedurchgangskoeffizienten vor. In aller Praxis liegen diese Werte der Ausführung neuer Gebäude zugrunde. Ob die so ausgeführten k-Werte wirtschaftlich optimal sind, ist damit nicht nachgewiesen. Rechnungen, wie sie im folgenden durchgeführt werden, zeigen, daß wirtschaftlich optimierte Dächer und Außenwände wesentlich niedrigere k-Zahlen aufweisen. Für den großen Bereich der bestehenden Gebäude gibt es derzeit noch keine Vorschriften.

Berechnungsverfahren

Das im Folgenden gezeigte Berechnungsverfahren ermittelt diejenige Dämmdicke von Außenbauteilen, die zu minimalen Jahresgesamtkosten

führt. Diese werden in entscheidendem Maße beeinflusst von den

- notwendigen Investitionen für die Wärmedämmung
- möglichen Investitionseinsparungen bei der Heizzentrale und der Wärmeverteilung
- möglichen Einsparungen an laufenden Energiekosten.

Bei der Wahl der optimalen Wärmedämmdicke sind die Jahresgesamtkosten aus Investition und laufendem Betrieb minimal.

Es werden zunächst die von der Wärmedämmdicke abhängigen Jahresgesamtkosten formuliert, diese nach der Dämmdicke differenziert und die Gleichung zu Null gesetzt. Die Dämmdicke, welche dieser Gleichung genügt, entspricht zu gleicher Zeit der kostenoptimalen Wärmedämmdicke. Das so beschriebene mathematische Verfahren zur Ermittlung des Minimums einer Kurve erlaubt es auch, alle die Kosten, welche von der Variablen (in diesem Falle die Dämmdicke) unabhängig sind, außer Betracht zu lassen. So können beispielsweise die absoluten Grundkosten einer Heizungsanlage (welche ja in jedem Falle notwendig ist) in der Berechnung ausgeklammert bleiben.

In diese gehen ein lediglich die durch die zusätzliche und zur Entscheidung anstehende Wärmedämmung verursachten Mehr- oder Minderkosten der Heizungsanlage (Anlagendifferenzkosten). Etwas anderes sind die Kosten der Dämmmaßnahme selbst zu beurteilen: Auch diese setzen sich aus zwei Anteilen zusammen, den von der Dämmdicke unabhängigen Grundkosten und den von der Materialdicke abhängigen zusätzlichen Kosten:

- in dem Falle, daß eine zusätzliche Dämmung (z. B. bei Umbauten von Gebäuden, bei denen dann die Wärmeschutzverordnung einzuhalten ist) in jedem Fall aufgebracht wird, können die entstehenden Grundkosten der Wärmedämmung gleichfalls außer Betracht bleiben.

Soll und kann bei Altbauten über die Maßnahme prinzipiell entschieden werden, so daß bei unvoreingenommener Einstellung gleichfalls die Null-Lösung (keine Dämmung) möglich ist, so müssen die absoluten Kosten der Dämmmaßnahmen in die Rechnung eingehen.

Die von der Dämmmaßnahme beeinflussten Gesamtkosten setzen sich aus 3 Anteilen zusammen, siehe Bild 1.

Den Jahres-Festkosten $K_1(d)$ der Dämmmaßnahme selbst. Auf den m^2 gedämmter Außenwand bezogen:

$$K_1(d) = (J_{D_0} + k_D \cdot d / \lambda_D) \cdot a_D \text{ in } \frac{\text{DM}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$$

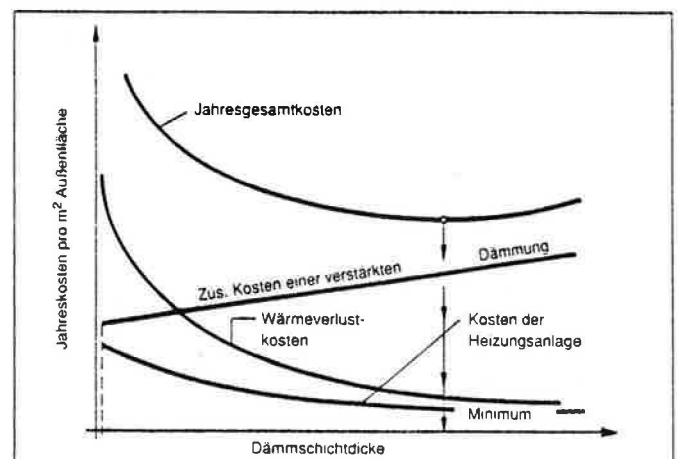
J_{D_0} = Grundanteil der Investition der Wärmedämmung ca. 80,- DM/m² bei Preisbasis 1988 für zusätzlich aufgebrachte Außenwanddämmung

k_D = spezifische Zuwachskosten des Wärmedämmstoffes = Differenzkosten in DM/m² je m²K/W, z. B. 8,0 entsprechend Zuwachskosten von 2,- DM pro m² und 1 cm Dämmdicke

d = Dicke Wärmedämmung in m

λ_D = Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials in W/mK, z. B. = 0,040 für Polystyrol oder mineralische Faserdämmstoffe der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040

Bild 1: Abhängigkeit der Jahresgesamtkosten einer Wärmedämmung von der Dämmschichtdicke





a_D = Annuitätsfaktor für Investitionen der Dämmmaßnahme, z. B. = 0,093 bei einem Zinsfuß von 9 % und einer Nutzungsdauer der Dämmung von 40 Jahren. Ein Zuschlag für Instandhaltung und Wartung ist hierin nicht berücksichtigt.

Den Jahres-Festkosten $K_2(d)$ der Heizungsanlage (Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung). Auch diese setzen sich aus zwei Teilen zusammen, einem von der Dämmmaßnahme unabhängigen Grundanteil und einem mit ansteigender Dämmdicke abfallenden Differenzbeitrag. Beide Anteile sind stark abhängig von der absoluten Leistungshöhe der untersuchten Anlage. Auf die Entscheidung hinsichtlich der optimalen Dämmdicke hat dabei die Höhe des Grundbeitrages keinen Einfluß: Die Heizungsanlage wird ohnehin benötigt. Die folgende Berechnung wird deshalb nur mit den Differenzkosten $K_2 \text{ zus.}(d)$ = Kosteneinsparung der Heizungsanlage fortgeführt. Auf den m^2 zu dämmender Außenwand bezogen, ergibt sich:

$$K_2 \text{ zus.}(d) = -\Delta k_A \cdot (t_i - t_a) \cdot z \cdot k_H \cdot a_H$$

in $\frac{\text{DM}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$

Δk_A = Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten aufgrund der Dämmmaßnahme = $k_1 - k_2$ in $\text{W/m}^2\text{K}$, $k_1 = 1/R_1$ mit R_1 = Wärmedurchgangswiderstand der ungedämmten Wand (einschl. der Übergangswiderstände außen und innen), $k_2 = 1/(R_1 + d/\lambda_D)$

t_i = Norminnentemperatur

t_a = Normaußentemperatur am Auslegungstag

z = Zuschlagsfaktor nach DIN 4701 zur Berücksichtigung von kalten Außenwänden und Himmelsrichtungen

k_H = spezifische Zuwachskosten der Heizungsanlage in DM/W , z. B. = 0,25

a_H = Annuitätsfaktor für Investitionen der Heizungsanlage, z. B. = 0,13 bei einem Zinsfuß von 9 %, einer Nutzungsdauer der Heizungsanlage von 20 Jahren, und unter Berücksichtigung erhöhter Instandhaltungs- und Wartungskosten von 2 % p. a.

Bei Entscheidungen hinsichtlich der nachträglichen Dämmung bestehender Gebäude müssen Festkostenanteile aus der Heizungsanlage dann außer Betracht

bleiben, wenn diese unverändert weiterbetrieben wird. Vielfach ist bei schlechtem Jahresnutzungsgrad des Kessels dessen Ersatz jedoch höchst wirtschaftlich und sinnvoll den **Jahresenergiekosten $K_3(d)$** . Auch hier muß nur der von der Wärmedämmung beeinflusste Anteil $K_3 \text{ zus.}(d)$, welcher einer Kosteneinsparung entspricht, in die Betrachtung einbezogen werden. Für 1 m^2 Dämmfläche gilt:

$$K_3 \text{ zus.}(d) = -\Delta k_A [z_z \cdot (t_{im} - t_2) - z' \cdot (t_{im} - t_{im,s}) + z_s \cdot (t_{im} - t_s)] \cdot (24/1000) \cdot f \cdot (1/\eta_{ges}) \cdot k_B$$

in $\text{DM/m}^2\text{a}$

z_z = Zahl der Heiztage in der Heizzeit eines Jahres (VDI 2067)

z' = Zahl der Heiztage mit abgesenkter Temperatur

z_s = Zahl der Heiztage im Sommer (VDI 2067)

t_{im} = Mittlere Gebäudeinnentemperatur während der Heizzeit in der Hauptnutzungszeit des Gebäudes

$t_{im,s}$ = Mittl. Gebäudeinnentemperatur bei Temperaturabsenkung

t_2 = Mittlere Außentemperatur während der Heizzeit (VDI 2067)

t_s = Mittlere Außentemperatur im Sommer (VDI 2067)

f = Korrekturfaktor in Anlehnung an VDI 2067 zur Berücksichtigung freier Wärmequellen Anteil der künstlich erzeugten Wärme am gesamten Wärmebedarf des untersuchten Bauteils), sowie einiger Einflüsse wie Teilbeheizung oder teilweise erhöhter Raumtemperaturen und Regelfähigkeit der Anlage.

Es ist zu berücksichtigen, daß die in VDI-Richtlinie 2067 angegebenen Werte sich auf ein ganzes Haus beziehen, z. B. f_0 , welcher den Einfluß der freien Wärmequellen berücksichtigt, $f = 0,78$ für alle Gebäudefassungsflächen. Da dieser ganz wesentlich von Sonneneinstrahlung durch Fenster beeinflusst wird, kann für die zu untersuchenden Außenwände nur mit $f = 0,9$ bis $1,0$ gerechnet werden, siehe [2].

h_{ges} = Jahresnutzungsgrad der Heizungs- und Wärmeverteilungsanlage = $\eta_a \cdot \eta_v$, nach VDI 2067 zur Berücksichtigung des Wir-

kungsgrades der Wärmeerzeugung, der Betriebsbereitschaftszeit und der Verluste während Betriebsstillständen. Praktische Werte liegen bei 0,7 bis 0,8.

k_B = spezifische, auf den Heizwert H_u bezogene Brennstoffkosten in DM/kWh .

Die hinsichtlich der Entscheidung der optimalen Dämmdicke maßgeblichen Gesamtdifferenzkosten ergeben sich zu:

$$K_{ges}(d) = K_1(d) + K_{2zus}(d) + K_{3zus}(d)$$

und mit den obigen Ausdrücken

$$K_{ges}(d) = A_1 + A_2 \cdot d - A_3 \left[1/R_1 - 1/(R_1 + \frac{d}{\lambda_D}) \right]$$

$$A_1 = I_{D0} \cdot a_D$$

$$A_2 = (k_D/\lambda_D) \cdot a_D$$

$$A_3 = (t_i - t_a) \cdot z \cdot k_H \cdot a_H + [z_z \cdot (t_{im} - t_2) - z' \cdot (t_{im} - t_{im,s}) + z_s \cdot (t_{im} - t_s)] \cdot 0,024 \cdot f \cdot (1/\eta_{ges}) \cdot k_B$$

Die Differentiation nach der Kettenregel

$$(d/d_x = d_i/d_u \cdot d_u/d_x \text{ für } f = f(u) \text{ und } u = u(x))$$

ergibt

$$K'_{ges}(d) = A_2 - \frac{A_3}{\lambda_D \cdot (R_1 + \frac{d}{\lambda_D})^2} = 0$$

und wird zu Null gesetzt. Daraus ergibt sich die optimale Dämmdicke:

$$d_{opt} = \frac{A_3 \cdot \lambda_D}{A_2} - R_1 \cdot \lambda_D \text{ in m}$$

Optimale Dämmdicke von Außenwänden und Dächern

Beispiel: Die aus 24 cm Vollziegel ausgeführte Außenwand eines Altbaus soll nachträglich gedämmt werden. Der Einbau einer neuen Heizungsanlage ist danach vorgesehen. Gesucht ist die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Dämmdicke. Wärmeleitkoeffizient der Dämmung 0,04 W/mK (Mineralwolle, Polystyrol). Die für die Berechnung benötigten Grunddaten sind:



- Grundanteil der WD-Investition	80 DM/m ²	
- spez. Zuwachskosten	2 DM/m ²	
	pro cm Dämmdicke	
	= 8 DM/m ²	
	pro m ² K/W	
- Nutzungsdauer		
Wärmedämmung	40 a	
Heizanlage	20 a	
- Zinsfuß für Kapitalverzinsung	9 % p.a.	
- Norminnentemperatur	20 °C	
- Normaußentemperatur DIN 4701:	- 15 °C	
- Zuschlagsfaktor	1,0	
- spez. Zuwachskosten der Heizanlage	0,25 DM/W	
- Heiztage in der Heizzeit	244,2 d/a	} Stuttgart VDI 2067
im Sommer	17,9 d/a	
- mittl. Gebäudeinnentemperatur	22,0 °C	
- mittl. Außentemperatur Heizzeit	+ 6,0 °C	} VDI 2067
Sommer	+ 13,3 °C	
- Korrekturfaktor freie Wärmequellen	0,95	
- Jahres-Nutzungsgrad Heizkessel	0,75	
- Brennstoffkosten	0,06 DM/kWh H _u	
entsprechend einem Heizölpreis von	0,60 DM/l	

Lösung:

Mit $I_{Do} = 80 \text{ DM/m}^2$ und $a_D = 0,093$ wird
 $A_1 = 80 \cdot 0,093 = 7,44 \text{ DM/m}^2 \cdot a$

Mit $k_D = 8,0 \text{ DM} \cdot \text{W/m}^4 \cdot \text{K}$ und
 $\lambda_D = 0,04 \text{ W/mK}$ und $a_D = 0,093$ wird

$$A_2 = \frac{8,0}{0,04} \cdot 0,093 = 18,6 \text{ DM/m}^3 \cdot A$$

Mit $t_i = 20 \text{ °C}$, $t_a = -15 \text{ °C}$, $z = 1,0$,
 $k_H = 0,25 \text{ DM/W}$, $a_H = 0,13 \text{ l/a}$,
 $z_z = 244,2 \text{ d/a}$ (für Stuttgart),
 $t_{im} = 2 \text{ °C}$, $t_z = 6,0 \text{ °C}$, $z' = 0$,
 $z_s = 17,9 \text{ d/a}$, $t_s = 13,3 \text{ °C}$, $f = 0,95$,
 $\eta_{ges} = 0,75$, $k_B = 0,08 \text{ DM/kWh}$
 (angenommen Heizöl EL mit
 10 kWh/l und 0,60 DM/l) wird
 $A_3 = (20 + 15) \cdot 1,0 \cdot 0,25 \cdot 0,13 +$
 $+ [244,2 \cdot (22 - 6,0) + 17,9 \cdot$
 $\cdot (22 - 13,3)] \cdot 0,024 \cdot 0,95 \cdot$
 $\cdot (1/0,75) \cdot 0,06 =$
 $= 8,55 \frac{\text{DM} \cdot \text{K}}{\text{W} \cdot a}$

Mit dem Wärmedurchgangswiderstand der ungedämmten Wand

$$R = R_1 + \sum R_{\lambda} + R_2 = 0,13 + 0,25 + 0,04 = 0,42 \text{ m}^2\text{K/W}$$

wobei die einschalige Außenwand mit 24 cm Vollziegel mit $\lambda = 0,96 \text{ W/mK}$ berücksichtigt ist, wird die wirtschaftlich optimale Dämmdicke

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{8,55 \cdot 0,04}{18,6}} - 0,42 \cdot 0,04 = 0,119 \text{ m}$$

Die absolute Höhe der Gesamtdifferenzkosten ergibt sich mit der praktisch ausführbaren Dämmdicke von 12,0 cm zu

$$K_{ges} = 7,44 + 18,6 \cdot 0,12 - 8,55 \cdot [1/0,42 - 1/(0,42 + 0,12/0,04)] = -8,19 \text{ DM/m}^2 a$$

was einer jährlichen Einsparung des gleichen Betrages entspricht. Da dieser Betrag negativ ist, ist gleichzeitig sichergestellt, daß auch die Nulllösung (überhaupt keine Dämmung), für welche die Differenzkosten = 0 sind, ungünstiger ist. Der zugehörige k-Wert der wirtschaftlich optimal gedämmten Wand ergibt sich zu

$$k_{opt} = \frac{1}{R_1 + d/\lambda_D} = \frac{1}{0,42 + 0,12/0,04} = 0,29 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Die in dem o. g. Rechenverfahren enthaltenen Randbedingungen und Einschränkungen sind:

- Energiekostensteigerungen werden nicht berücksichtigt
- Eine mögliche Verkleinerung der Heizkesselanlage aufgrund der Wärmedämmung ist berücksichtigt worden, was natürlich nur bei Neubauten oder Kesselaustausch realisiert werden kann. Ohne diesen Vorteil ergäbe sich die optimale Dämmdicke in obigem Beispiel zu 0,109 m.
- Die durchgeführte Optimierung berücksichtigt lediglich die Auswirkung der Wärmedämmung auf den Wärmehaushalt des Gebäudes. Eine eventuelle weitere Auswirkung auf die Raumbehaglichkeit, oder zusätzlichen Energieeinfluß auf den Stromverbrauch klimatisierter Gebäude bleiben unberücksichtigt.
- Der Energiebedarf zur Herstellung des Wärmedämmstoffes (bei großen

Dicken nicht unerheblich) blieb außer Betracht.

Das gezeigte Rechenverfahren erscheint zunächst aufwendig und wenig praktikabel. Berücksichtigt man jedoch die große Tragweite falscher Dämmscheidungen und deren langer Wirkungsdauer (während der gesamten Nutzung eines Gebäudes fallen ggf. zu hohe Heizkosten an), so erweist sich der notwendige Aufwand als sinnvoll.

Die unter Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten optimierte Dämmdicke ist in aller Regel deutlich größer als die nach Wärmeschutzverordnung vorgeschriebene Dämmung. Dies soll an einem kleinen Zahlenbeispiel verdeutlicht werden:

Für den Neubau eines Wohngebäudes, dessen Grundriß ein Quadrat von 15 x 15 m nicht umschreibt, ist als mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Fassade (Außenwände A_w und Fenster A_F)

$$k_m = \frac{A_w \cdot k_w + A_F \cdot k_F}{A_w + A_F} \leq 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

vorgeschrieben. Nimmt man einen Fensterflächenanteil an der Fassade von 20 % an und unterstellt weiterhin den Einbau von Isolierfenster mit $k_F = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, so ergibt sich aus

$$\frac{0,8 \cdot k_w + 0,2 \cdot k_F}{0,8 + 0,2} = 1,20$$

der Mindestwert des Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand

$$k_w = \frac{1,2 - 0,2 \cdot 3,0}{0,8} = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Die nach WSVO erforderliche, aber auch ausreichende Dämmdicke zu der oben durchgerechneten Ziegelwand ergibt sich aus

$$R_w = \frac{1}{k_w} = R_1 + \frac{d}{\lambda} = 0,42 + \frac{d}{0,04} = \frac{1}{0,75}$$

$$d = \left(\frac{1}{0,75} - 0,42\right) \cdot 0,04 = 0,037 \text{ m}$$

Rund 4 cm Dämmmaterial hätten bei dem untersuchten Altbau ausgereicht, um der WSVO zu genügen. Das Ergebnis der wirtschaftlichen Optimierung ist 12 cm. Der so notwendigen Aufgabe, Energie einzusparen, wird die Wärmeschutzverordnung kaum gerecht.



Berücksichtigung von Energiekostensteigerungen

Der oben gezeigten Formulierung von Jahresgesamtkosten lag das Annuitäten-Verfahren, wie es auch in VDI-Richtlinie 2067 angewendet wird, zugrunde. Bei ihm werden Energiepreise, meist in aktueller Höhe, jedoch als konstant angenommen. Daß dies in der langen Nutzungsdauer von Gebäuden (für die zu untersuchende Wärmedämmung wurden 40 Jahre angesetzt) zutrifft, kann nach aller Erfahrung nicht erwartet werden. Eine weiter gehende Untersuchung der gestellten Aufgabe erfordert deshalb den Einsatz dynamischer Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung. Im vorliegenden Fall soll die Kapitalwertmethode Anwendung finden.

Gesucht ist diejenige Dämmdicke, bei welcher der Kapitalwert aus Ausgaben (Investition der Wärmedämmung minus der Einsparung bei der Heizanlage) und laufenden Einnahmen (Energiekosteneinsparung aufgrund der Wärmedämmmaßnahme) ein Maximum erreicht. Hierzu werden Ausgaben und Einnahmen nochmals wie folgt zusammengestellt:

Ausgaben

$$A_1 = I_{D0} + k_D \cdot d / \lambda_D$$

(Investition der WD-Maßnahme)

$$A_2 = -\Delta k \cdot (t_1 - t_2) \cdot Z \cdot k_H$$

(Einsparung bei Neubau oder Austausch der Heizanlage)

Einnahmen

$$E_0 = \Delta k \cdot [z_z \cdot (t_{im} - t_z) - z' \cdot (t_{im} - t_{im,s}) + z_s \cdot (t_{im} - t_s)] \cdot (24/1000) \cdot f \cdot (1/\eta_{ges}) \cdot k_B$$

(Energiekosteneinsparung bei heutigen Energiekosten)

Der Kapitalwert dieser Einsparung allein berechnet sich beim Zinsfuß i und unter Berücksichtigung der Energiepreissteigerung p , nachschüssige Zahlung vorausgesetzt, zu

$$C_E = \frac{E_0 \cdot (1+p)}{1+i} + \frac{E_0 \cdot (1+p)^2}{(1+i)^2} +$$

für das 1. Jahr 2. Jahr

$$+ \dots + \frac{E_0 \cdot (1+p)^n}{(1+i)^n} + \dots$$

setzt man $q = \frac{1+p}{1+i}$

so erkennt man die geometrische Reihe $q + q^2 + q^3 + \dots + q^n = q \cdot (1 + q + q^2 + \dots + q^{n-1}) = q \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}$

Der Kapitalwert von Investition und Betrieb der Wärmedämmung in der gesamten Nutzungsdauer ergibt sich zu

$$C = -A_1 - A_2 + E_0 \cdot \frac{q \cdot (1 - q^n)}{1 - q}$$

Mit den Konstanten

$$K_1 = k_D / \lambda_D$$

$$K_2 = (t_1 - t_2) \cdot z \cdot k_H$$

$$K_3 = [z_z \cdot (t_{im} - t_z) - z' \cdot (t_{im} - t_{im,s}) + z_s \cdot (t_{im} - t_s)] \cdot (24/1000) \cdot f \cdot (1/\eta_{ges}) \cdot k_B$$

$$K_4 = \frac{q \cdot (1 - q^n)}{1 - q}$$

$$\text{und } \Delta k = k_1 - k_2 = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1 + d/\lambda_D}$$

wird der Kapitalwert

$$C = -I_{D0} - K_1 \cdot d + (K_2 + K_3 \cdot K_4) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1 + d/\lambda_D} \right)$$

Dieser soll maximal sein.

Die Differentiation nach der Variablen d ergibt

$$C' = -K_1 + (K_2 + K_3 \cdot K_4) \cdot \frac{1}{\lambda_D \cdot (R_1 + d/\lambda_D)^2} = 0$$

Aufgelöst nach d erhält man schließlich die gesuchte, wirtschaftlich optimale Dämmdicke

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{(K_2 + K_3 \cdot K_4) \cdot \lambda_D}{K_1}} - R_1 \cdot \lambda_D \text{ in m}$$

Optimale Dämmdicke unter Berücksichtigung von Energiepreissteigerungen

Beispiel: Es soll der oben durchgerechnete Neubau nochmals untersucht werden, indem Energiepreissteigerungen von wahlweise 3, 6 oder 9 % p. a. Berücksichtigung finden. Die Konstanten sind

$$K_1 = \frac{8,0}{0,04} = 200 \text{ DM/m}^3$$

$$K_2 = (20 + 15) \cdot 1,0 \cdot 0,25 = 8,75 \text{ DM} \cdot \text{K/W}$$

$$K_3 = [244,2 \cdot (22 - 6,0) + 17,9 \cdot (22 - 13,3)] \cdot 0,024 \cdot 0,95 \cdot (1/0,75) \cdot 0,06 = 7,41 \frac{\text{DM} \cdot \text{K}}{\text{W} \cdot \text{a}}$$

$$K_4 = 0,945 \cdot \frac{1 - 0,945^{40}}{1 - 0,945}$$

$$= 15,4 \text{ für } p = 3 \% \text{ p. a.}$$

$$= 23,6 \text{ für } p = 6 \% \text{ p. a.}$$

$$= 40,0 \text{ für } p = 9 \% \text{ p. a.}$$

jeweils beim Kalkulationszinsfuß von 9 % p. a. mit

$$q = \frac{1 + 0,03}{1 + 0,09}$$

$$= 0,945 \text{ für } p = 3 \% \text{ p. a.}$$

$$= 0,972 \text{ für } p = 6 \% \text{ p. a.}$$

$$= 1,000 \text{ für } p = 9 \% \text{ p. a.}$$

Damit errechnet sich die optimale Dämmdicke unter Berücksichtigung von Energiepreissteigerungen

$$d_{opt} = 0,140 \text{ m}$$

bei Energiepreissteigerung

$$3 \% \text{ p. a.}$$

$$= 0,175 \text{ m}$$

$$6 \% \text{ p. a.}$$

$$= 0,230 \text{ m}$$

$$9 \% \text{ p. a.}$$

Der Kapitalwert von Investition und Betrieb einer zusätzlichen Wärmedämmung ist für die oben untersuchten Randbedingungen nochmals in Bild 2 aufgetragen. Eindrucksvoll zeigt sich, wie sich Kurvenmaximum und damit die optimale Dämmdicke verschieben, wenn realistische Energiepreissteigerungen berücksichtigt werden.

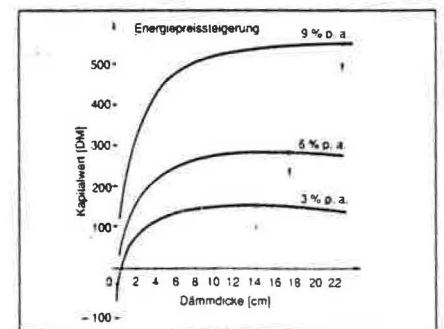


Bild 2: Kapitalwert aus Investition und Betrieb einer zusätzlichen Außenwanddämmung

Literatur

- [1] Recknagel; Sprenger; Hönnmann: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 88/89. Oldenbourg-Verlag 1987
- [2] Rouvel, L.: Raumkonditionierung - Wege zum energetisch optimierten Gebäude. Springer Verlag 1978