

Wirtschaftliche Dämmschichtdicken sind nur für mittlere Verhältnisse sinnvoll. Zur sicheren Einhaltung z.B. eines Temperaturabfalls sind Grenzbedingungen zu berücksichtigen.

Die Berücksichtigung aller Grenzwerte kann mitunter zu sehr großen Dämmschichtdicken führen. In diesen Fällen ist zu prüfen, ob es sinnvoll ist, für alle Werte Grenzbedingungen anzusetzen.

6.1.2 Wahl des Dämmstoffes

Der Dämmstoff wird nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgewählt.

Auswahlkriterien können sein:

- Wärmeleitfähigkeit
- Anwendungsgrenztemperatur
- Wasserdampfdurchlässigkeit
- hydrophobe Eigenschaften
- Strömungswiderstand
- Brandverhalten
- mechanische Eigenschaften
- Schwingungsverhalten
- akustische Eigenschaften
- Anteil organischer Bestandteile z.B. bei Luftzerlegungsanlagen
- Schimmelfestigkeit in Feuchträumen
- Korrosionsverhalten, z.B. geringer Gehalt an wasserlöslichen Chloridionen in Verbindung mit nicht rostenden austenitischen Stählen
- Lagerfähigkeit
- Transportierbarkeit
- Verarbeitbarkeit
- Alterungsbeständigkeit
- Kosten des eingesetzten Materials
- Entsorgung/Recycling

6.2 Ermittlung von Dämmschichtdicken beim Wärmeschutz

In die nachstehenden Gleichungen ist die Betriebswärmeleitfähigkeit λ_B nach Abschnitt 4.2.1.1c einzusetzen.

6.2.1 Ermittlung von Dämmschichtdicken nach technischen Gesichtspunkten

In Abschnitt 4.2 sind Grundformeln angegeben, die sich nur für die ebene Wand, nicht aber für die Rohrleitung nach der gesuchten Dämmschichtdicke auflösen lassen. Für diese gibt es folgende Möglichkeiten:

- iterative Lösung der entsprechenden Gleichungen, z.B. mit Tabellenkalkulationsprogrammen

Economic insulation layer thicknesses are only useful with regard to mean conditions. For the assured compliance, e.g. with a temperature drop, boundary conditions shall be used.

Taking all limit values into account may occasionally lead to very large insulation layer thicknesses. In such cases it shall be examined whether it is appropriate to set boundary conditions for all quantities.

6.1.2 Selection of the insulation material

The insulation material is selected according to technical and economical considerations.

Selection criteria may include the following:

- thermal conductivity
- maximum service temperature
- water vapour permeability
- hydrophobic properties
- flow resistance
- fire behaviour
- mechanical properties
- vibration behaviour
- acoustical properties
- proportion of organic constituents, e.g. for air-separation plants
- resistance to mould in areas exposed to moisture
- corrosion behaviour, e.g. low content of water-soluble chloride ions in combination with stainless austenitic steels
- suitability for storage
- transportability
- handling properties
- ageing stability
- cost of the material used
- disposal/recycling

6.2 Determination of insulation layer thicknesses for thermal protection

In the equations given below, the operational thermal conductivity λ_B according to Section 4.2.1.1c shall be used.

6.2.1 Determination of insulation layer thicknesses on the basis of technical considerations

Basic formulae are given in Section 4.2 which can be solved for the desired insulation layer thickness for a plane wall only, but not for a pipe. The following options are available for these:

- iterative solving of the corresponding equations, e.g. with spreadsheet analysis

- systematisches Durchrechnen für mehrere handelsübliche Dämmschichtdicken
- Verwendung der Diagramme B4, B5 und B6, die unter der Voraussetzung gelten, dass der innere Wärmeübergangswiderstand vernachlässigbar ist
- Wenn sowohl der innere als auch der äußere Wärmeübergangswiderstand vernachlässigt werden können, lassen sich die Wärmeleitungsgleichungen für die Rohrdämmungen nach dem Außendurchmesser d_a auflösen.

Nachstehende Gleichungen gelten bei **nicht** vernachlässigbarem innerem Wärmeübergangswiderstand.

Im Allgemeinen kann jedoch der innere Wärmeübergangswiderstand bei Flüssigkeiten und strömenden Dämpfen vernachlässigt werden, sodass $1/\alpha_i$ gleich Null gesetzt werden kann.

- systematic calculation of several commercial insulation layer thicknesses
- the use of diagrams from Diagram B4, B5, and B6 which apply on condition that the internal surface resistance of heat transfer is negligible
- if both the inner and the outer surface heat transfer resistances are negligible, the thermal conductivity equations for pipe insulations can be solved using the external diameter d_a .

The equations below apply where the internal resistance of heat transfer is **not** negligible.

Generally, this heat transfer resistance can be neglected with liquids and flowing vapours, so that $1/\alpha_i$ can be set as zero.

6.2.1.1 Bestimmung der Dämmschichtdicke zur Einhaltung einer vorgegebenen Wärmestromdichte

Für einen ebenen Ausschnitt ohne anlagenbedingte und ohne unregelmäßige dämmtechnisch bedingte Wärmebrücken folgt für die ebene Wand mit Gleichung (53) und Gleichung (54) aus Abschnitt 4.2.3.1

$$s = \lambda_B \cdot \left(\frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{q} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a} \right) \text{ in m} \tag{144}$$

Für einen ebenen Ausschnitt mit gedämmten, anlagenbedingten Wärmebrücken (Versteifungselemente) gemäß Abschnitt 5.1.3.3 ergibt sich die Dämmschichtdicke wie folgt:

$$s = \lambda_B \cdot \left(Z \cdot \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{q} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a} \right) \text{ in m} \tag{144a}$$

mit / with

$$Z = \frac{\bar{k}_P}{k_P} \tag{145}$$

In diesem Fall sind in \bar{k}_P nach Gleichung (98) nur gedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen, die hinter dem Ummantelungsblech liegen.

Ist für eine Rohrleitung oder eine zylindrische Behälterwand die Wärmestromdichte an der Oberfläche der Dämmung vorgegeben, so folgt mit Gleichung (57) und Gleichung (58) aus Abschnitt 4.2.3.2 sowie mit

$$q = \frac{q_{1,R}}{\pi \cdot d_a} \text{ in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \tag{146}$$

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{q \cdot d_a} \tag{147}$$

6.2.1.1 Determination of insulation layer thickness to comply with a given density of heat flow rate

For a flat section without plant-related and irregular insulation-related thermal bridges it follows for the plane wall using Equation (53) and Equation (54) from Section 4.2.3.1

For a flat section with insulated plant-related thermal bridges (reinforcing elements) according Section 5.1.3.3 the insulation layer thickness is obtained as follows:

In this case, \bar{k}_P according to Equation (98) shall only include insulated, plant-related thermal bridges which are positioned behind the cladding.

If the density of heat flow rate on the surface of the insulation is specified for a pipe or a cylindrical vessel wall, it follows, with Equation (57) and Equation (58) from Section 4.2.3.2 and with

Ist für eine Rohrleitung der Wärmeverlust pro m Rohrlänge $q_{1,R}$ vorgegeben, so folgt analog zu Gleichung (147)

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = \frac{\pi \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{q_{1,R}} \quad (147a)$$

Die Lösung kann für $1/\alpha_i = 0$ auch mit Anhang B4 oder Anhang B5 erfolgen.

If the heat loss per m of pipe is given for a pipe, it follows analogous to Equation (147) for $q_{1,R}$

The solution can also be obtained from Annex B4 or Annex B5 for $1/\alpha_i = 0$.

6.2.1.2 Bestimmung der Dämmschichtdicke zur Einhaltung eines Gesamtwärmeverlustes

Ist der Gesamtwärmeverlust vorgegeben, so müssen die anlagenbedingten und unregelmäßig dämmtechnisch bedingten Wärmebrücken durch den Faktor Z beachtet werden. Für die ebene Wand ergibt sich dann aus Gleichung (9), Gleichung (53) und Gleichung (54)

$$s = \lambda_B \cdot \left(Z \cdot \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\frac{\dot{Q}_{ges}}{A_{ges}}} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a} \right) \text{ in m} \quad (148)$$

$$Z = \frac{k'_p}{k_p} \quad (148a)$$

Hierbei ist Z nach Gleichung (148a) zu ermitteln, wobei in diesem Fall in k'_p nach Gleichung (82) gedämmte und ungedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen sind.

In vorstehenden Gleichungen ist A die Oberfläche der Wand.

Bei Rohrleitungen ist der Gesamtwärmeverlust

$$\dot{Q}_{ges} = q_{1,R} \cdot l \cdot Z \text{ in W} \quad (149)$$

Es gilt dann mit Gleichung (13), Gleichung (57) und Gleichung (58)

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = Z \cdot \frac{l \cdot \pi \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\dot{Q}_{ges}} \quad (150)$$

$$Z = \frac{k'_{1,R}}{k_{1,R}} \quad (150a)$$

Die gesuchte Dämmschichtdicke kann mit Anhang B5 bei $1/\alpha_i = 0$ ermittelt werden, wenn $q_{1,R}$ durch $\frac{\dot{Q}_{ges}}{l \cdot Z}$ ersetzt wird.

Here, Z shall be calculated using Equation (148a), where in this case in k'_p according to Equation (82) insulated and non-insulated plant-related thermal bridges shall be included.

In the equations above A is the surface of the wall.

In case of pipes the total heat loss is

It then follows with Equation (13), Equation (57) and Equation (58)

The required insulation layer thickness can be determined using Annex B5 with $1/\alpha_i = 0$, if $q_{1,R}$ can be replaced by $\frac{\dot{Q}_{ges}}{l \cdot Z}$.

6.2.1.3 Bestimmung der Dämmschichtdicke zur Einhaltung einer vorgegebenen mittleren Oberflächentemperatur

Für die ebene Wand ohne anlagenbedingte und ohne unregelmäßige dämmtechnisch bedingte Wärmebrü-

6.2.1.3 Determination of the insulation layer thickness to comply with a preset mean surface temperature

For the plane wall without plant-related and insulation-related irregular thermal bridges, the follow-

cken gilt nach Gleichung (9), Gleichung (53) und Gleichung (54)

ing applies in accordance with Equation (9), Equation (53) and Equation (54)

$$s = \lambda_B \left[\frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\alpha_a \cdot (\vartheta_a - \vartheta_L)} - \frac{1}{\alpha_a} - \frac{1}{\alpha_i} \right] \text{ in m} \tag{151}$$

Für einen ebenen Ausschnitt mit gedämmten, anlagenbedingten Wärmebrücken (Versteifungselementen) gemäß Abschnitt 5.1.3.3 ergibt sich die Dämmschichtdicke wie folgt:

For a plane section with insulated, plant-related thermal bridges (reinforcing elements) according to Section 5.1.3.3 the insulation layer thickness is obtained as follows:

$$s = \lambda_B \left[Z \cdot \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\alpha_a \cdot (\vartheta_a - \vartheta_L)} - \frac{1}{\alpha_a} - \frac{1}{\alpha_i} \right] \text{ in m} \tag{152}$$

mit Z nach Gleichung (145).

with Z according to Equation (145).

In diesem Fall sind in \bar{k}_p nur gedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen, die hinter dem Ummantelungsblech liegen.

In this case, only insulated, plant-related thermal bridges, which are behind the casing, shall be included in \bar{k}_p .

Für Rohrleitungen folgt analog aus Gleichung (45), Gleichung (57) und Gleichung (58)

For pipes it follows analogously from Equations (45), (57) and (58)

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = \frac{\vartheta_M - \vartheta_L}{\alpha_a \cdot d_a \cdot (\vartheta_a - \vartheta_L)} \text{ in } \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \tag{153}$$

Die Lösung kann iterativ oder mit $1/\alpha_i = 0$ auch nach Anhang B6 erfolgen.

The solution can be obtained iteratively or with $1/\alpha_i = 0$ from Annex B6.

Die Berechnung einer mittleren Dämmschichtdicke zur Einhaltung einer mittleren Oberflächentemperatur ist bei Systemen mit anlagenbedingten und unregelmäßigen dämmtechnisch bedingten Wärmebrücken nicht zweckmäßig, da beispielsweise an Stützkonstruktionen, bedingt durch die Wärmebrückenwirkung, höhere Temperaturen auftreten.

The calculation of mean insulation layer thicknesses to comply with a specified mean surface temperature is not advisable for systems with plant-related and irregular insulation-related thermal bridges, since at support constructions, caused by the thermal bridge effect, higher temperatures will occur.

Die Berechnung einer Dämmschichtdicke zur Einhaltung einer maximalen Oberflächentemperatur ist mit diesem Verfahren nicht möglich. Um eine hinreichende Genauigkeit zu erreichen, sind dreidimensionale Berechnungsverfahren zu verwenden.

The calculation of an insulation layer thickness to comply with a maximum surface temperature is not possible with this method. To achieve a satisfactory precision, three-dimensional calculation methods shall be used.

Fragen der Gewährleistung werden in der Richtlinie VDI 2055 Blatt 3 behandelt.

Questions of guarantee are being dealt with in guideline VDI 2055 Part 3.

6.2.1.4 Bestimmung der Dämmschichtdicke eines Behälters bei vorgegebenem Temperaturabfall während einer vorgegebenen Zeit

6.2.1.4 Determination of insulation layer thickness of a vessel at a given temperature drop over a given time period

Aus Gleichung (107) und Gleichung (108) folgt

It follows from Equation (107) and Equation (108) that

$$s = \lambda_B \cdot \left[\frac{Z \cdot A_m \cdot t}{(m_M \cdot c_{p,M} + m_{Beh} \cdot c_{Beh}) \cdot \ln \Theta} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a} \right] \text{ in m} \tag{154}$$

mit / with

$$\Theta = \frac{\vartheta_{M,0} - \vartheta_L}{\vartheta_{M,t} - \vartheta_L} \tag{155}$$

Gleichung (154) gilt dann, wenn ein Energieaustausch nur über den Wärmeverlust erfolgt.

Wiederum ist Z nach Gleichung (148a) einzusetzen, wobei in diesem Fall in k'_p gedämmte und ungedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen sind.

Näherungsweise kann die Dämmschichtdicke über den spezifischen Wärmeverlust berechnet werden.

$$q' = \frac{Q_{\text{ges}}}{A_{\text{ges}} \cdot t} \text{ in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (156)$$

Mit ihm ergibt sich für $1/\alpha_i = 0$ die Gleichung

$$s = \lambda_B \cdot \left[Z \cdot \frac{\vartheta_{M,m} - \vartheta_L}{q'} - \frac{1}{\alpha_a} \right] \text{ in m} \quad (157)$$

wobei für $\vartheta_{M,m}$ der Mittelwert aus Anfangs- und Endtemperatur einzusetzen ist.

Equation (154) applies where an energy exchange only occurs through heat loss.

Again, Z according to Equation (148a) shall be used, but in this case insulated and non-insulated plant-related thermal bridges must be included in k'_p .

The insulation layer thickness can be determined approximately by means of the specific heat loss.

With this, the next equation gives at $1/\alpha_i = 0$

where the mean value of the initial and the final temperature shall be used as $\vartheta_{M,m}$.

6.2.1.5 Bestimmung der Dämmschichtdicke für ein Rohr mit einem maximal zulässigen Temperaturabfall des Mediums über eine vorgegebene Länge

Aus Gleichung (13), Gleichung (57), Gleichung (58), Gleichung (114) und Gleichung (115) und mit Z nach Gleichung (148a)

folgt

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = \frac{Z \cdot \pi \cdot l}{\dot{m}_M \cdot c_{p,M} \cdot \ln \Theta} \quad (158)$$

mit / with

$$\Theta = \frac{\vartheta_{M,A} - \vartheta_L}{\vartheta_{M,E} - \vartheta_L} \quad (159)$$

Wiederum ist Z nach Gleichung (150a) einzusetzen, wobei in diesem Fall in $k'_{i,R}$ gedämmte und ungedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen sind.

Mit $1/\alpha_i = 0$ und $\vartheta_{M,m} = 0,5 \cdot (\vartheta_{M,A} + \vartheta_{M,E})$ ergibt sich die Näherungsgleichung

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = \frac{Z \cdot \pi \cdot l \cdot (\vartheta_{M,m} - \vartheta_L)}{\dot{m}_M \cdot c_{p,M} \cdot (\vartheta_{M,A} - \vartheta_{M,E})} \quad (160)$$

Die Lösung kann auch mit Anhang B5 erfolgen, wenn für $q_{i,R}$ der Wert

$$q_{i,R} = \frac{\dot{m}_M \cdot c_{p,M} \cdot (\vartheta_{M,A} - \vartheta_{M,E})}{l \cdot Z} \text{ in } \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad (161)$$

eingesetzt wird. Gleichung (161) ergibt eine Rechengröße, die nur in Verbindung mit Anhang B5 zur Ermittlung der Dämmschichtdicke s gilt.

6.2.1.5 Determination of insulation layer thickness for a pipe at a maximum permissible temperature drop in the medium over a preset length

It follows from Equation (13), Equation (57), Equation (58), Equation (114) and Equation (115) and with Z according to Equation (148a)

Again, Z according to Equation (150a) shall be used, but in this case insulated and non-insulated plant-related thermal bridges shall be included in $k'_{i,R}$.

With $1/\alpha_i = 0$ and $\vartheta_{M,m} = 0,5 \cdot (\vartheta_{M,A} + \vartheta_{M,E})$ the approximation equation gives

The solution can also be obtained from Annex B5, if for $q_{i,R}$ the value

is used. Equation (161) renders a calculation value which can only be used within the context of Annex B5 to obtain the insulation layer thickness s .

6.2.1.6 Bestimmung der Dämmschichtdicke zur Begrenzung der Kondensatmenge in einem Rohr

Zur Ermittlung einer Dämmschichtdicke zur Begrenzung der ausfallenden Kondensatmenge \dot{m}_k teilt man die Rohrleitung in zwei Bereiche: den Bereich, in dem die Temperatur bis zur Satttdampf-temperatur abfällt, und den Bereich, in dem der Dampf kondensiert und die Temperatur konstant bleibt.

Da die Größe der entsprechenden Bereiche nicht bekannt ist, müssen sie zunächst geschätzt werden.

Mit den Gleichungen in Abschnitt 5.2.2.2 können Wärmeverlust und Temperaturabfall im ersten Bereich als Funktion der Dämmschichtdicke ermittelt werden.

Für den Bereich mit konstanter Temperatur ist der Wärmeverlust mit der Gleichung (113) aus Abschnitt 5.2.2.1 berechenbar. Dabei ist die mittlere Temperatur identisch mit der Kondensationstemperatur.

Es gilt mit

$$\dot{Q} = \dot{m}_k \cdot \Delta h_v \text{ in W} \tag{162}$$

die Gleichung

$$\frac{1}{2 \cdot \lambda_B} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} = Z \cdot \frac{l \cdot \pi \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\dot{m}_k \cdot \Delta h_v} \tag{163}$$

wobei l die Länge des Rohrabschnittes mit konstanter Temperatur ist.

Die Größe Z ist nach Gleichung (150a) einzusetzen, wobei in diesem Fall in $k'_{1,R}$ gedämmte und ungedämmte anlagenbedingte Wärmebrücken einzubeziehen sind.

Diese Gleichung kann auch mit Anhang B5 für $1/\alpha_i = 0$ gelöst werden, wenn für $q_{1,R}$ der Wert nach Gleichung (164) eingesetzt wird:

$$q_{1,R} = \frac{\dot{m}_k \cdot \Delta h_v}{Z \cdot l} \text{ in } \frac{\text{W}}{\text{m}} \tag{164}$$

Für $1/\alpha_i = 0$ und $1/\alpha_a = 0$ kann auch die Gleichung

$$s = 0,5 \cdot d_i \cdot (e^\varepsilon - 1) \text{ in m} \tag{165}$$

mit / with

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_B \cdot Z \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\dot{m}_k \cdot \Delta h_v} \cdot l \tag{166}$$

verwendet werden.

Gleichung (162) und Gleichung (166) gelten sinngemäß auch für die Bestimmung der Dämmschichtdicke bei Verdampfungsvorgängen.

Unabhängig davon, ob eine nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ermittelte Dämmschichtdicke größer ist, stellt sich hier ein zusätzliches wirtschaft-

6.2.1.6 Determination of insulation layer thickness for limiting the quantity of condensate in a pipe

To determine the insulation layer thickness for limiting the quantity of condensate \dot{m}_k , the pipe is divided into two sections: the section in which the temperature falls to the saturated vapour temperature, and the section in which the vapour condenses and the temperature remains constant.

As the sizes of the sections concerned are unknown, they must initially be estimated.

Using the equations in Section 5.2.2.2, heat loss and temperature drop in the first section can be determined as a function of the insulation layer thickness.

For the section with constant temperature, the heat loss can be calculated using Equation (113) from Section 5.2.2.1. The average temperature is identical to the condensation temperature here.

With

the Equation

applies, where l is the length of the portion of pipe with constant temperature.

The value Z shall be included according to Equation (150a), but in this case insulated and non-insulated plant-related thermal bridges shall be included in $k'_{1,R}$.

For $1/\alpha_i = 0$, this equation can also be solved with Annex B5, if for $q_{1,R}$ the value of Equation (164) is used:

For $1/\alpha_i = 0$ and $1/\alpha_a = 0$ the equation

may be used alternatively.

Equation (162) and Equation (166) apply correspondingly also for the determination of insulation layer thicknesses for vaporisation processes.

Regardless of whether an insulation layer thickness determined according to economic considerations is greater, an additional economic problem arises here.

liches Problem. Im Allgemeinen liegt das Optimum für vorgegebenen Kondensatausfall nicht bei einer gleichen Dämmschichtdicke für beide Teilstrecken, sondern bei einer etwas höheren für den heißen, überhitzten Teil, und einer entsprechend niedrigeren für den Sattdampfteil.

In general, the optimum insulation layer thickness for given quantities of condensate is not the same for the two partial lengths; the thickness for the hot, superheated part is somewhat greater, while that for the saturated vapour part is correspondingly smaller.

6.2.2 Bestimmung der Dämmschichtdicke nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten

6.2.2 Determination of insulation layer thickness on the basis of economic considerations

6.2.2.1 Grundsätzliches zu den Rechenverfahren

6.2.2.1 Principles on the calculation methods

Dämmungen mindern mit zunehmender Dämmschichtdicke zunehmend die Wärmeverluste des Objektes und damit die vom Wärmepreis abhängigen Kosten. Dagegen steigen die Investitionen und die Kosten z.B. für Abschreibung, Verzinsung und Wartung mit zunehmenden Dämmaufwendungen. Die Summe beider Kosten erreicht bei einer bestimmten Dämmschichtdicke ein Minimum. Diese wird als *wirtschaftliche Dämmschichtdicke* bezeichnet. Werden Energiepreissteigerungen, z.B. aus erhöhten Kosten für Exploration, Verknappung, Verarbeitung, Transport und Umweltschutz prognostiziert, ergeben sich höhere wirtschaftliche Dämmschichtdicken als bei konstanten Energiepreisen (siehe Bild 35).

Insulations reduce the heat losses from the object, and that increasingly so with increasing insulation layer thickness, and hence the costs which are dependent on the heating price. On the other hand, the investments and expenditure, e.g. for depreciation, interest rate and maintenance increase as the insulation effort is expanded. The sum of the two cost flows reaches a minimum in a particular insulation layer thickness. This value is designated the *economic insulation layer thickness*. In case rising energy prices are forecast, e.g. resulting from rising costs for exploration, shortage, processing, transport and environment protection, the consequence are higher economic insulation layer thicknesses than with constant energy prices (see Figure 35).

6.2.2.2 Berechnungsgrundlagen

6.2.2.2 Calculation basis

Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe der Wärmeverlustkosten und der Investitionskosten über die gesamte Nutzungsdauer unter Berücksichtigung der Verzinsung. Sie werden in den folgenden Berechnungsgleichungen stets auf ein Betriebsjahr bezogen.

Total costs are derived from the total heat loss costs and investment costs over the entire operational period, taking interest rates into account. In the examples below, they are always related to one year of operation.

Es gilt für eine ebene Dämmung

For a plane insulation applies

$$K_{ges} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q \cdot f \cdot W \cdot \beta + b \cdot J_P \quad \text{in } \text{€}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \quad (167)$$

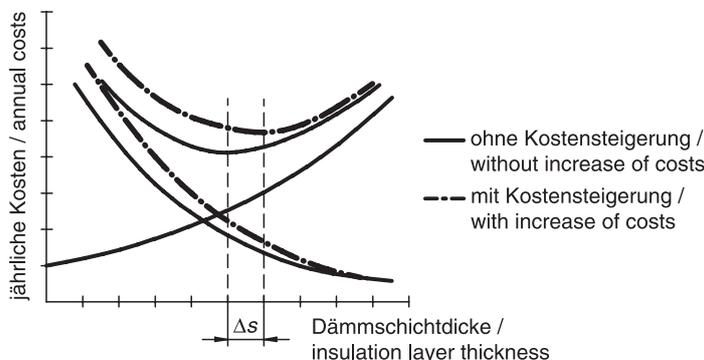


Bild 35. Gegenüberstellung der wirtschaftlichen Dämmschichtdicken bei konstanten und steigenden Energiepreisen

Figure 35. Comparison of the economic insulation layer thicknesses at constant and at rising energy prices

Anmerkung: Da die Funktion der Gesamtkosten im Bereich des Minimums sehr flach ist und ggf. Sprünge aufweist, hängt das Ergebnis sehr sensibel von einer genauen Berechnung ab (siehe Abschnitt 6.2.2.3).

Note: Since the function of the total costs is very flat in the vicinity of the minimum and may contain steps, the result is very sensitive to an exact calculation (see Section 6.2.2.3).

und für eine Rohrdämmung

$$K_{L,ges} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q_{1,R} \cdot f \cdot W \cdot \beta + b \cdot J_{1,R} \quad \text{in } \text{€}/(\text{m} \cdot \text{a}) \quad (168)$$

wobei K_{ges} bzw. $K_{1,ges}$ ein Minimum werden soll.

and for a pipe insulation

where K_{ges} respectively $K_{1,ges}$ is required to become a minimum.

Dabei ist

where

K_{ges} Gesamtkosten für ebene Dämmung in €/m²
 $K_{1,ges}$ Gesamtkosten für Rohrdämmung in €/m
 J_p Investitionskosten für ebene Dämmung in €/m²
 $J_{1,R}$ Investitionskosten für Rohrdämmung in €/m
 q Wärmeverlust einer ebenen Dämmung in W/m²
 $q_{1,R}$ Wärmeverlust einer Rohrleitung in W/m
 W aktueller Wärmepreis in €/GJ
 β Jahresnutzungsdauer in h/a
 b Kapitaldienstfaktor in 1/a
 f Preisänderungsfaktor zur Berücksichtigung von Energiepreisänderungen

K_{ges} total costs for plane insulation, in €/m²
 $K_{1,ges}$ total costs for pipe insulation, in €/m
 J_p investment costs for plane insulation, in €/m²
 $J_{1,R}$ investment costs for pipe insulation, in €/m
 q heat loss of a plane insulation, in W/m²
 $q_{1,R}$ heat loss of a pipe, in W/m
 W actual heat cost, in €/GJ
 β annual operation time, in h/a
 b capital service factor, in 1/a
 f factor for price change to take energy price changes into account

Die Ausdrücke $3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q \cdot W \cdot \beta$ und $3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q_{1,R} \cdot W \cdot \beta$ in Gleichung (167) bzw. Gleichung (168) stellen die Wärmeverlustkosten dar.

The terms $3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q \cdot W \cdot \beta$ and $3,6 \cdot 10^{-6} \cdot q_{1,R} \cdot W \cdot \beta$ in Equation (167) respectively Equation (168) constitute the heat loss cost.

Dabei wird die Wärmestromdichte für die ebene Wand gemäß Gleichung (53) mit k_p nach Gleichung (54) bzw. der Wärmestrom je Meter Rohr gemäß Gleichung (57) mit $k_{1,R}$ nach Gleichung (58) ermittelt.

The density of heat flow rate for the plane wall is determined according to Equation (53) with k_p as given in Equation (54) respectively the heat flow rate per m of pipe according to Equation (57) with $k_{1,R}$ as given in Equation (58).

Zur Berechnung von k_p bzw. $k_{1,R}$ ist die Betriebswärmeleitfähigkeit λ_B zu verwenden.

For the calculation of k_p respectively $k_{1,R}$ the operational thermal conductivity λ_B shall be used.

Die wirtschaftliche Betrachtungsweise für einzelne Abschnitte, z.B. Rohrleitungen, Bögen, Armaturen, führt unter Umständen zu unterschiedlichen Dämmschichtdicken (siehe dazu *AGI Q 156-1*, [38; 39]). Man führt jedoch z.B. aus logistischen und Kostengründen die unterschiedlichen Dämmschichtdicken nicht aus und legt die Dämmschichtdicke der ungestörten Rohrleitung zugrunde.

The economic approach with respect to the individual sections, e.g. pipes, elbows, appliances, may lead to varying insulation layer thicknesses (see also *AGI Q 156-1* [38; 39]). The varying insulation layer thicknesses, however, are generally not implemented for e.g. logistical and cost reasons, and the insulation layer thickness of the undisturbed pipe is used instead.

Kapitaldienstfaktor

Capital service factor

Der Kapitaldienstfaktor b enthält die Abschreibung oder Tilgung $1/n$ (n erwartete Nutzungsdauer in Jahren), Verzinsung z , Wartung r und Gemeinkosten g in Prozent und ist definiert als

The capital service factor b contains depreciation or repayment $1/n$ (n expected service life in years), interest rate z , maintenance r and general cost g per cent are defined as

$$b = \frac{\text{jährliche fixe Kosten}}{\text{Investition für die Dämmung}} \quad \text{in } 1/\text{a} \quad (169)$$

Zur Ermittlung des Kapitaldienstfaktors werden unterschiedliche Ansätze herangezogen. Die Werte werden in diesen Formeln in 1/a eingesetzt und beziehen sich auf die Investition für die Dämmung.

For the determination of the capital service factor different approaches are used. The values are inserted into these formulae in 1/a and they relate to the investment for the insulation.

In der Praxis werden z.B. angewendet:

In practice, for example, the following are used:

a) Addition

a) Addition

$$b_1 = \frac{1}{n} + \frac{1}{100} \cdot (z + r + g) \text{ in l/a} \tag{170}$$

Dabei ist

where

n erwartete Nutzungsdauer in a

n expected service life, in a

b) wie a), jedoch wird statt des vollen Zinssatzes nur

b) as a), however, instead of the full interest rate only

$$\frac{z+1}{2} \text{ in \% / a}$$

$$\frac{z+1}{2} \text{ in \% / a}$$

eingesetzt, um der Tilgung während der Nutzungsdauer Rechnung zu tragen

is inserted to take the repayment over the service life into account:

$$b_2 = \frac{1}{n} + \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{z+1}{2} + r + g \right) \text{ in l/a} \tag{171}$$

c) Annuität

c) Annuity

$$b_3 = \frac{z/100}{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{z}{100}} \right)^n} + \frac{r+g}{100} \text{ in l/a} \tag{172}$$

Der Zinssatz z kann jeweils sowohl ein firmeninterner Zinssatz als auch ein externer Zinssatz sein.

The interest rate z may be either a company-internal interest rate or an external interest rate.

Tabelle 5. Kapitaleinstufungsfaktor b_3 mit $r + g = 2 \% / a$
 Table 5. Capital service factor b_3 with $r + g = 2 \% / a$

Zinssatz / Interest rate in %	Erwartete Nutzungsdauer n in Jahren / Expected service life n ; in years						
	1	5	10	15	20	25	30
3	1,050	0,238	0,137	0,104	0,087	0,077	0,071
6	1,080	0,257	0,156	0,123	0,107	0,098	0,093
8	1,100	0,270	0,169	0,137	0,122	0,114	0,109
10	1,120	0,284	0,183	0,151	0,137	0,130	0,126
12	1,140	0,297	0,197	0,167	0,154	0,147	0,144

Preisänderungsfaktor

Der Preisänderungsfaktor f berücksichtigt Energiepreisänderungen. Er wird auch als Dynamisierungsfaktor bezeichnet [37]. Werden konstante Energiepreise angenommen, gilt $f = 1$. Für konstante prozentuale jährliche Preisänderungen ergibt sich durch Anwendung der Barwertmethode nachfolgende Beziehung für die Größe f . Unter Barwert versteht man den Wert künftig fälliger Zahlungen während der erwarteten Nutzungsdauer zum Zeitpunkt der Investition. Bei seiner Berechnung werden alle anfallenden Kosten auf diesen Zeitpunkt abgezinst.

Price variation factor

The factor f for changing prices takes energy price changes into account. It is also called dynamisation factor [37]. In case constant energy prices are assumed, $f = 1$. For constant percentages of annual price changes the use of the cash present value method leads to the following relation for the value f . The cash present value is understood to mean the value of payments, due in future during the expected service life, at the moment of investment. For its calculation all occurring costs are discounted onto this point in time.

In der Literatur wird bei konstanten Energiepreisen der Begriff statisches Verfahren und bei variablen Energiepreisen der Begriff dynamisches Verfahren benutzt.

In the literature, the term static calculation method is used for constant energy prices and the term dynamic calculation method for variable energy prices.

Für den Preisänderungsfaktor gilt:

For the price variation factor applies:

$$f = \frac{S_1}{S_2} \tag{173}$$

$$S_1 = \frac{1 - \left(\frac{1 + p/100}{1 + z/100}\right)^n}{1 - \frac{1 + p/100}{1 + z/100}} \tag{174}$$

Dabei ist

where

p jährliche Preisänderung in %/a

p annual price variation, in %/a

Anmerkung: Für $p = z$ ergibt sich der Grenzwert $S_1 = n$.

Note: For $p = z$ follows a limit $S_1 = n$.

$$S_2 = \frac{1 - \left(\frac{1}{1 + z/100}\right)^n}{1 - \frac{1}{1 + z/100}} \tag{175}$$

$$S_2 = \frac{1 - \left(\frac{1}{1 + z/100}\right)^n}{1 - \frac{1}{1 + z/100}} \tag{175}$$

Anmerkung: Für $z = 0\%$ ergibt sich der Grenzwert $S_2 = n$.

Note: For $z = 0\%$ follows a limit $S_2 = n$.

Die Abhängigkeiten des Preisänderungsfaktors f zeigt Bild 36, berechnet nach Gleichung (173).

The dependences of the factor for price variation f is demonstrated in Figure 36, calculated according to Equation (173).

Wärmeverlustkosten

Heat loss costs

In die Wärmeverlustkosten gehen außer der Wärmestromdichte q oder dem Wärmestrom je Meter Rohrlänge $q_{l,R}$ der Wärmepreis W und die Jahresnutzungsdauer β ein. Bei der Größe β handelt es sich nicht nur um die Volllaststunden; vielmehr werden darunter alle Jahresstunden verstanden, während derer die Anlage, unabhängig vom Durchsatz, unter Betriebstemperatur steht. Wird die Anlage mit verminderter Tem-

In addition to the density of heat flow rate q or the heat flow rate per meter of pipe $q_{l,R}$, the heat price W and the annual operation time β also influence the heat loss costs. The value β does not only comprise full power service hours, but instead all those hours in a year, during which the installation is kept at operating temperature, independent of the output. In case the installation is operated at lowered temperature,

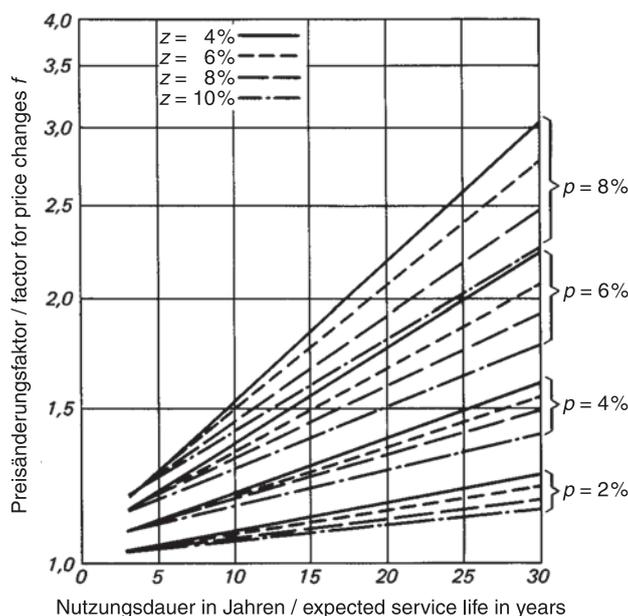


Bild 36. Preisänderungsfaktor f in Abhängigkeit von der erwarteten Nutzungsdauer mit den Parametern Verzinsung z und Preissteigerung p

Figure 36. Factor for price changes f as a function of the expected service life with the parameters interest rate z and price change p

peratur betrieben, so sind diese Stunden nur mit entsprechend geringerer Wertung in Ansatz zu bringen.

Der Wärmepreis enthält feste Kosten, z.B. Kosten für Abschreibung des Wärmeerzeugers, Zinsen, Personal, Reparatur und variable Kosten, z.B. Brennstoff, Strom, Wasser. Näheres zu Wärme- und Kältepreisen sowie zu Voll- und Zuwachskosten siehe [39]. Alle anlagenspezifischen Größen, z.B. Wärmepreis, Benutzungsstunden, sind vom Auftraggeber anzugeben.

Der Wärmepreis hängt nicht nur vom Temperaturniveau, sondern auch von der Art der Wärmeerzeugung ab (z.B. Heizkraft- oder Heizwerk).

Einen Sonderfall bei der Berechnung des Wärmepreises stellen zu Turbinen führende Heißdampfleitungen dar, da bei diesen der Wärmeverlust gleichzeitig einen Verlust an der erzielbaren elektrischen Leistung bedeutet, deren Preis höher ist als der Wärmepreis. Einzelheiten sind [47] zu entnehmen.

Investitionskosten

Im Allgemeinen liegen die Investitionskosten in Form von Tabellen oder Listen (z.B. Angebote der Hersteller und Montageunternehmen, Vorgabe von industriellen Auftraggebern) vor und können so mit Hilfe der EDV auch weiterverarbeitet werden.

Das Bilden von analytische Kostenfunktionen hat in diesem Zusammenhang zwar an Bedeutung verloren, ist aber möglich (für Vergleiche, schnelle Überschlagsrechnungen, Parameterstudien u. a.). Die linearisierte Form (Gleichung (176)) für die ebene Dämmung ist z.B. Grundlage der Abschätzung nach Gleichung (177)

$$J_p = J_{p0} + J_p' \cdot s \quad \text{in } \text{€/m}^2 \quad (176)$$

Dabei ist

J_{p0} Grundkosten in €/m², extrapoliert auf $s = 0$

J_p' Kosten je m Dämmschichtdicke in €/ (m² · m)

s Dämmschichtdicke in m

Die tatsächliche Kostenfunktion $J_p = J_p(s)$ ist nicht linear und hat z.B. beim Übergang zu einer weiteren Dämmstofflage oder bei zusätzlichem Montageaufwand Sprungstellen, siehe Bild 37.

6.2.2.3 Berechnung der wirtschaftlichen Dämmschichtdicke

Dämmungen mit beliebiger Kostenfunktion

Im Allgemeinen muss die wirtschaftliche Dämmschichtdicke mit einem Rechenprogramm ermittelt werden, mit dem die Gesamtkosten für die infrage kommenden Dämmschichtdicken ermittelt und ihr Minimum gesucht wird. Dies gilt insbesondere, wenn

these hours must be calculated with appropriately lower values.

The heat price contains fixed costs, e.g. costs for depreciation of the heat generator, interests, personnel, repair, and variable costs, e.g. fuel, electricity, water. More details to heat and refrigeration prices as well as to total and additional costs see [39]. All plant-related values, e.g. heat price, operating hours, must be stated by the client.

The heat price is not only dependent upon the temperature level, but also upon the method of heat generation (e.g. combined heat and power plant or pure heat generator).

Superheated steam pipes leading to turbines represent a special case in the calculation of the heat cost, as the heat loss simultaneously means a loss of achievable electrical output, the cost of which is greater than the heat cost. More details see [47].

Investment costs

Normally, the investment costs are available in the form of tables or listings (e.g. tenders of manufacturer and contractors, requirements by industrial clients) and may thus also be processed with the aid of EDP.

Analytic cost functions have lost importance in this context, however, they remain a possibility (for comparisons, fast approximate calculations, parameter studies, etc.). The linearization of Equation (176) for a plane insulation is for example the basis for an estimate according to Equation (177)

where

J_{p0} basic costs in €/m², extrapolated to $s = 0$

J_p' costs per m insulation layer thickness, in €/ (m² · m)

s insulation layer thickness, in m

The actual cost function $J_p = J_p(s)$ is not linear and has for example at the transition to an additional layer or with additional mounting expenditure steep rises, see Figure 37.

6.2.2.3 Calculation of the economic insulation layer thickness

Insulations with arbitrary cost function

Generally, the economic insulation layer thickness must be determined with a calculation programme that determines the total costs for the eligible insulation layer thicknesses and seeks their minimum. This applies specifically where e.g. price jumps occur at