

Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens



Teil 1: Theoretische Grundlagen und deren Anwendung auf die Berechnung von Raumtemperaturen

L. Rouvel, F. Zimmermann

Im **nachfolgenden Teil 1** werden die mathematischen Grundlagen eines regelungstechnischen Modells für die Berechnung instationärer thermischer Belastungen und Raumtemperaturen aufgezeigt. Auf diesen Grundlagen aufbauend, wird eine Methode beschrieben, die es erlaubt, Raumtemperaturen oder thermische Lasten mit geringem Aufwand zu berechnen und damit die Ergebnisse von Simulationen nachzuprüfen. Die Verwendung eines regelungstechnischen Modells erlaubt auch den Einsatz dieser Methode bei der Programmierung von DDC-Anlagen und macht die Verwendung von ungenauen Approximationen zur Beschreibung des thermischen Antwortverhaltens von Räumen überflüssig. Es wird gezeigt, dass das thermische Raumverhalten mit jeweils zwei Kenngrößen für jede Belastungsart (strahlend bzw. konvektiv) und eine Raumkenngröße vollständig beschrieben werden kann.

Im **Teil 2** werden Beispiele für die Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei unterschiedlichen Belastungsfällen und Raumtypen erläutert. Dabei wird ein Vergleich von Ergebnissen nach der vorgeschlagenen Methode mit denen von GEBSIMU, TRNSYS, DOE-2 und BLAST und den Ergebnissen mit einem Schaltkreis-Analyse-Verfahren durchgeführt.

Im **Teil 3** wird eine Möglichkeit beschrieben, Gewichtungsfaktoren, wie sie in der VDI 2078 verwendet werden, mit der vorgeschlagenen Methode zu bestimmen. Auf die besondere Problematik bei der Verwendung der Methode mit Gewichtungsfunktionen wird dabei eingegangen

Allgemeines

Räume dienen dem Aufenthalt von Menschen und sollen deshalb Raumtemperaturen aufweisen, die dem Wohlbefinden der Menschen förderlich sind. Dabei bieten die Raumumschließungsflächen Schutz vor unerwünschten Einflüssen des Außenklimas. Dieser Schutz darf sich aber nicht nur auf die Vermeidung unerwünschter Wärmeverluste während der Heizperiode beziehen, sondern ebenso notwendig ist ein sommerlicher Wärmeschutz, um eine unangenehme Aufwärmung von Räumen in einer Schönwetterperiode zu vermeiden, was eine korrekte Berechnung der möglichen Raumtemperaturen bei einem Verzicht auf Klimatisierung, voraussetzt. Diese analytische Beurteilung der Bauweise, aber auch die allgemeine planerische Forderung, Klimaanlage nur so groß wie unbedingt nötig zu dimensionieren, verlangen ein Rechenverfahren für das thermisch-dynamische Raumverhalten mit einem möglichst geringen rechnerischen Aufwand. Da solche Berechnungen schon in der baulichen Entwurfsphase angestellt werden sollten ist es besonders wichtig,

über Kenngrößen zu verfügen, die das Raumverhalten möglichst exakt definieren. Speicherkennzahlen für einzelne Baustoffe wie sie z.B. mit dem S_{24} - Wert [1] verwendet werden, sind dabei völlig ungeeignet, da sie die Kombination von Wandschichten und deren Reihenfolge nicht berücksichtigen. Geeignete Kenngrößen hingegen können in baulichen Richtlinien als Maßstab für eine vernünftige Bauweise dienen. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen mit den üblichen Simulationsprogrammen ist es natürlich möglich, diese Berechnungen durchzuführen, jedoch ist der Aufwand relativ hoch, was i.d.R. dazu führt, dass diese Berechnungen erst angestellt werden, wenn der Baukörper festliegt und es nur noch um die Größe der Klimaanlage geht. Auch aus regelungstechnischer Sicht wäre es wünschenswert, das thermisch-dynamische Raumverhalten bei der analytischen Behandlung von Regelvorgängen zu erfassen. Und nicht zuletzt besteht auch ein Bedarf, die Ergebnisse von Computersimulationen zu überprüfen, woran z.Zt. bei der Erstellung der VDI 6020 (Gebäude- u. Anlagensimulation) gearbeitet wird.

Ein Verfahren mit Kenngrößen, nämlich Gewichtsfaktoren und Durchgriff, zur Beschreibung des Raumverhaltens verwendet die VDI 2078. Allerdings sind die in diesem Verfahren verwendeten Gewichtsfunktionen nur für bestimmte Typräume und Randbedingungen gültig und es gibt kein standardisiertes Verfahren zur Berechnung dieser Gewichtsfunktionen, nicht zuletzt wegen der Manipulation dieser Funktionen über den sogenannten „Durchgriff“. Außerdem bringt der Einsatz von Gewichtsfunktionen noch gravierende Nachteile mit sich, auf die im Teil 3 dieser Arbeit näher eingegangen wird. Alle anderen bekannten Verfahren, wie z.B. Differenzenverfahren, Fourier-Analyse, Finite-Elemente-Verfahren etc., eignen sich noch weniger dazu, Kenngrößen für das thermische Raumverhalten zu ermitteln. Auch eine weitere Katalogisierung von Gewichtsfunktionen bietet keinen sinnvollen Ausweg, da deren Umfang bei Berücksichtigung aller Randbedingungen einen beträchtlichen Umfang annehmen würde, der trotzdem wegen der baulichen Innovation immer veraltet wäre.

Grundlagen und Lösungsweg

Die Berechnung sommerlicher Raumtemperaturen wie auch die Nachprüfung von Simulationsergebnissen verlangen ein Rechenverfahren für beliebige Baukonstruktionen, Belastungsfälle und Randbedingungen welches schrittweise manuell nachvollziehbar ist und damit eine Nachprüfung ermöglicht.

Boeke und Zimmermann [2] haben schon 1969 vorgeschlagen, eine Raumkonstante Z zu verwenden, um das Raumverhalten zu beschreiben. Der Reziprokwert der vorgeschlagenen Raumkonstanten

$$\frac{1}{Z} = \frac{S_W \cdot c_{pW} \cdot \rho_W}{\alpha_W} \quad (1)$$

mit:

S_W Dicke der Wand in m

$c_{pW} \cdot \rho_W$ Wärmespeicherzahl der Wand in $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$

α_W Wärmeübergangskoeffizient in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

ist, wie wir heute wissen, nichts anderes als die Zeitkonstante $T = (R_\alpha + R_{\lambda W}) \cdot C_W$, mit dem Wärmeleitwiderstand $R_{\lambda W} = 0$, eines Verzögerungsgliedes erster Ordnung. Eine mehrschichtige Wand würde jedoch bereits zu einem Verzögerungsglied n-ter Ordnung mit unterschiedlichen Zeitkonstanten führen. Boeke und Zimmermann haben diese Schwierigkeit durch die Vernachlässigung des Temperaturgradienten im Material umgangen. Zur Anpassung an die realen Verhältnisse wurden Korrekturfaktoren verwendet.

Rouvel hat 1972 ein analoges und digitales Rechenverfahren hergeleitet [11] in dem für die jeweilige Wand ein Ersatzmodell mit $T_E = (R_\alpha + R_E) \cdot C_E$ berechnet wurde. Die Berechnung des Ersatzmodells diente der Vereinfachung des Rechenverfahrens. Dieses Ersatzmodell ermöglicht es, wie noch gezeigt wird, die Wand ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust als Verzögerungsglied 1. Ordnung zu behandeln.

Damit ergibt sich die Ersatzschaltung für einen Raum als eine Parallelschaltung von Verzögerungsgliedern 1. Ordnung mit der Übertragungsfunktion [4]:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_0}{1 + a_1 s} = \frac{K}{1 + T s} \quad (2)$$

bzw. der Übergangsfunktion

$$y(t) = y(\infty) \cdot (1 - e^{-t/T}) = K \cdot u_0 \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (3)$$

mit der Ausgangsfunktion $y(t)$, dem Verstärkungsfaktor K und der Sprunghöhe u_0 . Die Verzögerungsglieder kann man aber nach den Rechenregeln für Reihen- und Parallelschaltung zusammenfassen. Zumindest ist, wie noch gezeigt wird, die Zusammenfassung in Form einer für den Raum charakteristischen Zeitkonstanten T ($T = 1/Z$) möglich. Dabei ist nach der Art der Wärmequelle (Strahlung oder Konvektion) zu unterscheiden und eine von Wärmeleitung und Wärmeübergang abhängige Vorhaltezeit zu berücksichtigen. Für ein Proportional-Differential-Element mit Verzögerung 1. Ordnung und Vorhaltezeit gilt nach [3]:

$$y(t) = K \cdot u_0 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{T_V}{T_1} \right) \cdot e^{-t/T_1} \right] \quad \text{für } T_V/T_1 < 1 \quad (4)$$

Benötigt werden hierfür die Vorhaltezeit T_V , die Zeitkonstante T_1 und das Produkt $K \cdot u_0$, letzteres ist nichts anderes als der Wert der Ausgangsfunktion $y(\infty)$, also z.B. die Temperatur des Raumes im eingeschwungenen Zustand. Vorhaltezeit und Zeitkonstante werden später noch eingehend erläutert.

Es läßt sich durch entsprechende Umformung leicht zeigen, dass $y(t)/K \cdot u_0$ mit dem von Boeke und Zimmermann [2] angegebenen Kühllastfaktor k identisch ist:

$$k_{L_1} = 1 - e^{-Z(t_x - t_e)} \quad \text{für } t_e \leq t_x \leq t_a \quad \text{und} \quad (5)$$

$$k_{L_2} = [1 - e^{-Z \cdot T_L}] \cdot e^{-Z(t_x - t_e - t_a)} \quad \text{für } t_x > t_a \quad (6)$$

mit:

$T_L = (t_a - t_e) = \text{Lastperiode}$

$e = \text{Lastbeginn}$

$a = \text{Lastende}$

$Z = 1/T_1$

Der Einschaltzeitpunkt t_e wird dabei lediglich um die Vorhaltezeit vorverlegt $t_e = t_e - t_v$. Damit ist das gewünschte Ziel erreicht, das thermische Antwortverhalten eines Raumes mit drei Kenngrößen - Zeitkonstante, Vorhaltezeit und Verstärkungsfaktor - zu beschreiben. Die stundenweise Berechnung kann manuell, mit einem Taschenrechner oder einer Tabellenkalkulation erfolgen und erfüllt damit das Kriterium der Nachprüfbarkeit. Die Parameter der Übergangsfunktion lassen sich, wie nachstehend gezeigt wird, auf einfache Weise berechnen oder auf dem Wege der experimentellen Systemanalyse mittels eines Schaltkreis-Analyse-Programms (Analogrechner- Simulation) bestimmen.

Herleitung einer vereinfachten „elektrischen“ Ersatzschaltung für einen beliebigen Raum, um die erforderlichen Kenngrößen für die Bewertung bzw. Berechnung ermitteln zu können.

Beuken-Modell

Da die analytischen Methoden für sehr viele Probleme der instationären Wärmeleitvorgänge entweder unzulässige Vereinfachungen oder einen hohen Rechen- bzw. Programmieraufwand erfordern, entwickelte *Beuken* [5] ein elektrisches Analogiemodell, mit dem praktisch alle Probleme der Wärmeleitung in festen Stoffen gelöst werden können.

Die Grundlage des „Beuken-Modells“ beruht auf der Übereinstimmung der Differentialgleichung der Wärmeleitung und der Vorgänge in einem idealisierten elektrischen Kabel.

Die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung in einer homogenen oder einer aus homogenen Schichten aufgebauten ebenen Wand wird bei eindimensionalem Wärmefluß durch die Wärmeleitgleichung beschrieben:

$$\frac{\partial \vartheta(t, x)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(t, x)}{\partial x^2} \quad (7)$$

Die Stoffwerte λ , c und ρ können in dem für Räume vorkommenden Temperaturbereich als temperaturunabhängig angesetzt werden. Sie sind auch innerhalb einer Wandschicht ortsunabhängig.

Die Differentialgleichung (7) tritt in ähnlicher Form bei der Beschreibung der Vorgänge auf elektrischen Übertragungsleitungen auf:

$$\frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} = L' C' \cdot \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} + (L' G' + R' C') \cdot \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} + R' G' \cdot u(t, x) \quad (8)$$

Unter Vernachlässigung von L' und G' ergibt sich die Potentialgleichung für das idealisierte Kabel, die ein Analogon zur Wärmeleitungsgleichung (7) ist

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = \frac{1}{R' C'} \cdot \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} \quad (9)$$

Diese Übereinstimmung wurde von *Beuken* benutzt, um ein elektrisches Analogmodell für Wärmeleitvorgänge zu entwickeln.

Zur praktischen Anwendbarkeit der Analogie zwischen der Gl. (9) des idealisierten Kabels und der Wärmeleitungsgleichung (7) wurde von *Beuken* eine Ersatzschaltung aus diskreten RC-Gliedern aufgebaut, **Bild 1**. Die Spannung u ist dabei analog der Temperatur ϑ und der elektrische Strom i analog dem Wärmestrom q .

Das Kabel - oder analog die Wand - wird in dünne Scheiben unterteilt. Der Widerstands- und Kapazitätsbelag (Speicherfähigkeitsbelag) jeder Scheibe wird dabei entweder in der Mitte (T-Schaltung) oder an den Rändern (Π -Schaltung) der jeweiligen Scheibe konzentriert und mit diskreten Bauelementen nachgebildet.

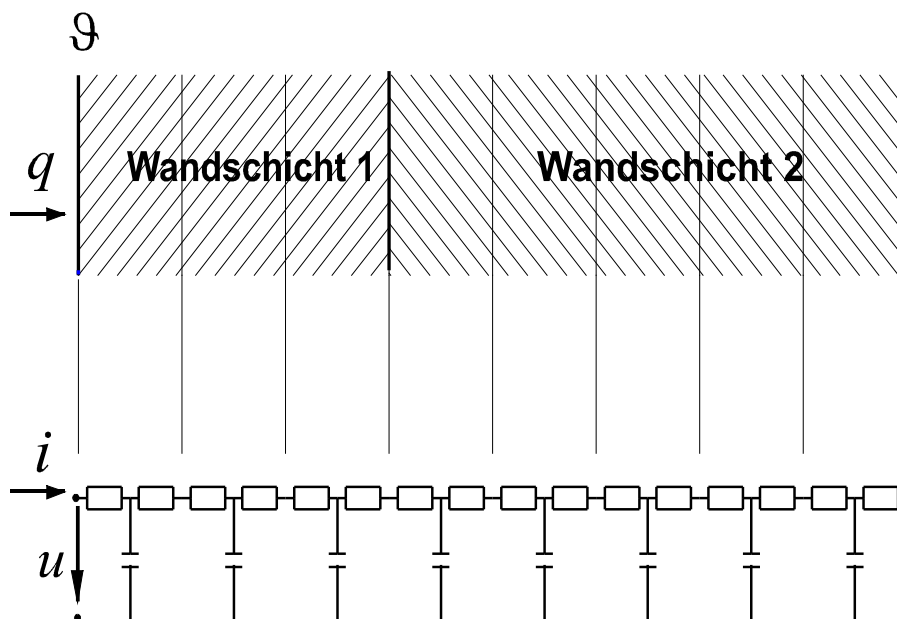


Bild 1: Schema eines Beuken-Modells für eine Wand mit eindimensionalem Wärmefluss

Brockmeier [6] entwickelte diese Methode weiter und konnte den Aufbau einer kabelnachbildenden RC-Kette aufgrund einer Fehlerbetrachtung in ihrer Genauigkeit beschreiben.

Das Beuken-Analogon in T-Schaltung ist für eine Wandscheibe der Dicke Δx in **Bild 2** dargestellt, wobei der elektrische Strom i und der Wärmestrom q auf eine Flächeneinheit bezogen sind.

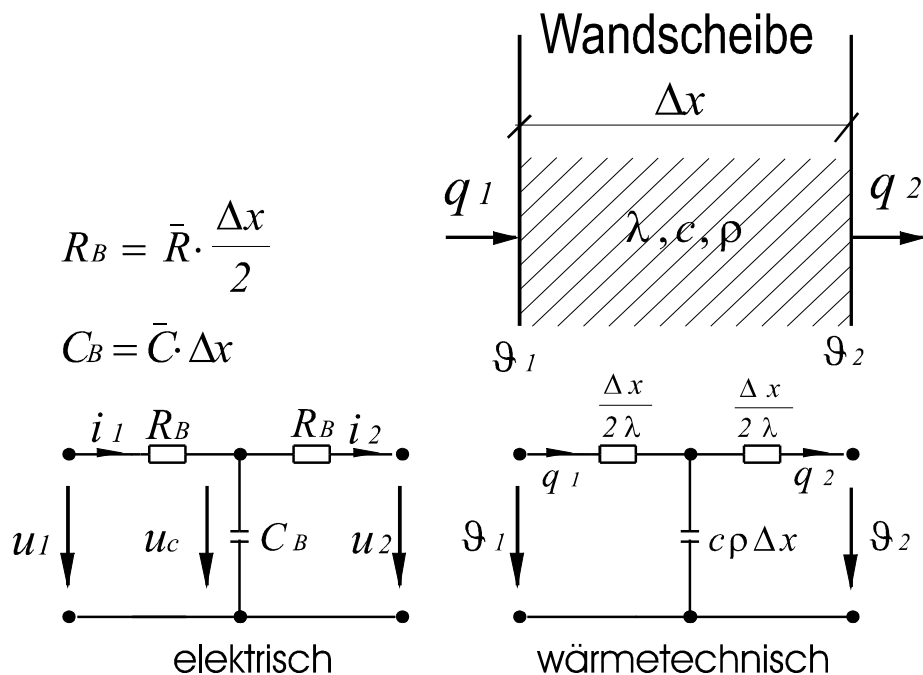


Bild 2: Beuken-Analogon

Die Umrechnung der wärmetechnischen Stoffgrößen in die elektrischen Größen Widerstand R_B und Kapazität C_B bezogen auf eine Flächeneinheit erfolgt für das Beuken-Analogon nach [6]:

$$R_B = \frac{\varepsilon \cdot \Delta x}{\gamma \cdot 2\lambda} \quad \text{in} \quad \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{Glied}} \quad (10)$$

$$C_B = \frac{\gamma}{\eta \cdot \varepsilon} \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta x \quad \text{in} \quad \frac{\text{F}}{\text{m}^2 \cdot \text{Glied}} \quad (11)$$

mit::

$$\eta = \frac{t_{\text{waerme}}}{t_{\text{elektr.}}} \quad \text{in} \quad \frac{\text{s}}{\text{s}} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta u} \quad \text{in} \quad \frac{\text{K}}{\text{V}} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{q}{i} \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{A}} \quad (14)$$

Wie *Euser* [7, 8] zeigte, ist es möglich, mit Hilfe eines Beuken-Modells die Temperaturschwankungen und die erforderliche Kühlleistung für einen Raum nachzubilden. Der große technische und personelle Aufwand, der allein schon zur Erarbeitung grundsätzlicher Problemlösungen erforderlich ist, läßt diese Methode für häufig wiederkehrende, ähnliche Aufgaben, wie das wärmetechnische Verhalten von Räumen, ungeeignet erscheinen.

Übertragung des analogen Beuken-Modells in digitale Rechenweise

Wie bereits *Köhne* und *Woelk* [9] zeigten, besteht die prinzipielle Möglichkeit, aus dem Beuken-Modell analytische Rechenvorschriften abzuleiten, um das wärmetechnische Verhalten von Wänden und Räumen bei dynamischer Wärmebelastung zu beschreiben.

Anfang der 70er Jahre wurde an der University of Berkeley, Kalifornien, USA, das Simulationsprogramm SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) entwickelt, um für elektronische Schaltungen und insbesondere für Integrierte Schaltungen die Plausibilität der Schaltungen bezüglich der gewünschten Eigenschaften vor einem kostspieligen Testaufbau zu überprüfen.

Durch die immens wachsenden Rechenleistungen der Personal Computer gelang es der Firma MicroSim im Jahre 1985, Spice auf den PC zu exportieren (P Spice). Durch die kontinuierlichen Verbesserungen steht damit heute ein Werkzeug zur Verfügung [10], das auch das Beuken-Modell mit einem PC digital berechnen lässt. Dies eignet sich insbesondere als Prüf- bzw. Eichinstrument für vereinfachte Berechnungsverfahren.

Bild 3 zeigt beispielhaft das digitale elektrische Modell für einen Raum am Beispiel des Typraums „schwer“ nach VDI 2078, wobei konvektive und strahlende Innenlasten angenommen sind. Die Strahlungsankopplung der einzelnen Flächen ist aus der Erläuterung zu Bild 3 ersichtlich.

Auf die ausführliche Darstellung der dieser Schaltung hinterlegten Beuken-Analogons für die verschiedenen Wände muss aus Platzgründen verzichtet werden. .

Ersatzmodell für das thermische Verhalten von Wänden

Um einerseits mit relativ kurzen Rechenzeiten und minimalem Speicherbedarf auszukommen und andererseits ausreichende Genauigkeit zu gewährleisten, entwickelte *Rouvel* [11,12] ein Rechenverfahren mittels „elektrischer“ Ersatzmodelle für das thermische Verhalten von Wänden.

In [11,12] sind zwei Modelle für das wärmetechnische Verhalten von mehrschichtigen Wänden hergeleitet:

- a) Ersatzmodell für eine Wand bei Symmetrie von Aufbau und thermischer Belastung
- b) Ersatzmodell für eine Wand bei Unsymmetrie von Aufbau und/oder thermischer Belastung

Da das Modell a nur ein Grenzfall von Modell b ist, wird es hier nicht weiter betrachtet.

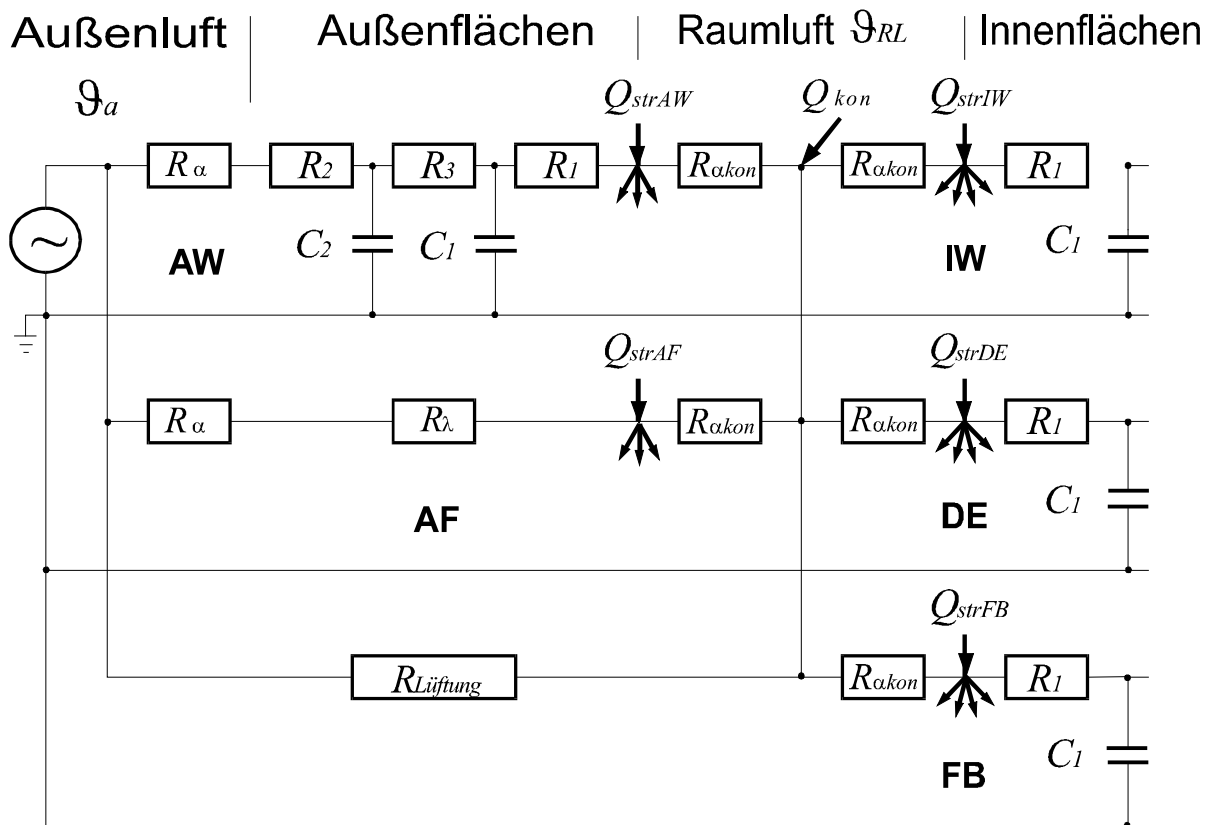
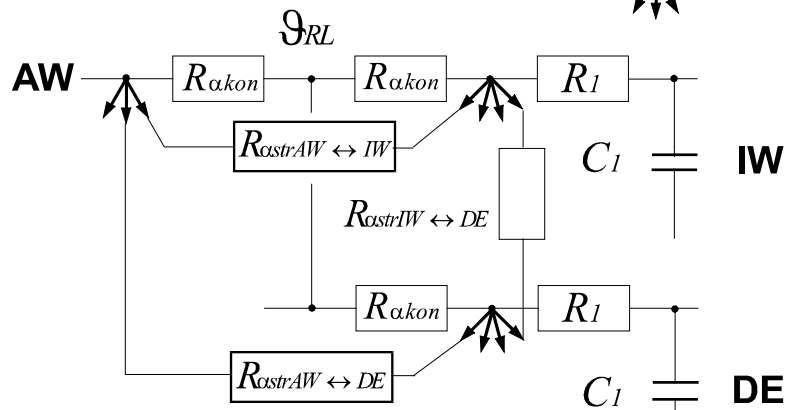


Bild 3: Elektrisches Analogiemodell für einen Raum mit konvektiver und strahlender Innenlast

Erläuterung zu Bild 3: Das Symbol  bedeutet



(wie vorstehend gezeigt) Strahlungsankopplung an die anderen Flächen über den jeweiligen Strahlungsübergangswiderstand.

Das den Berechnungen zugrundeliegende Ersatzmodell für das wärmetechnische Verhalten von Wänden ist in **Bild 4** dargestellt.

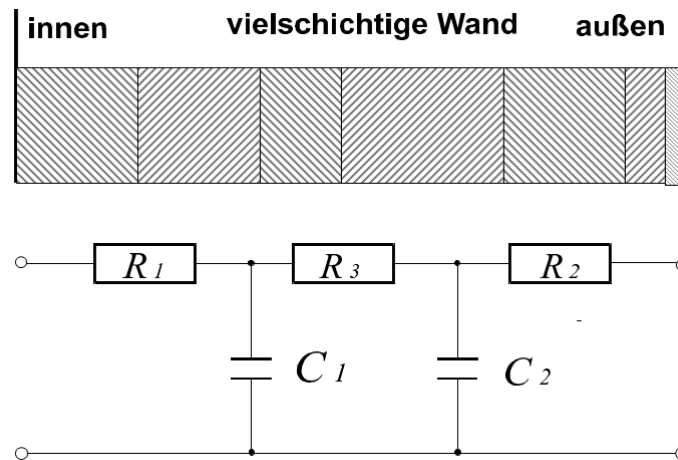


Bild 4: Ersatzmodell für das wärmetechnische Verhalten von Wänden.

Die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 sowie die Kapazitäten C_1 und C_2 des Ersatzmodells lassen sich nach [11,12] mit Hilfe der Matrizenrechnung aus dem Fourieransatz für das wärmetechnische Verhalten von Wänden herleiten.

Das wärmetechnische Verhalten einer homogenen Wandschicht v beliebiger Dicke s läßt sich bei eindimensionalem Wärmefluß in periodischem Fall in Matrixschreibweise schreiben zu:

$$\begin{pmatrix} \underline{g}(x=0) \\ \underline{q}(x=0) \end{pmatrix}_v = \mathbf{A}_v \cdot \begin{pmatrix} \underline{g}(x) \\ \underline{q}(x) \end{pmatrix}_v \quad (15)$$

wobei x die Koordinate in Richtung Wandnormalen ist.

Die Kettenmatrix \mathbf{A}_v für **eine** Wandschicht läßt sich schreiben zu:

$$\mathbf{A}_v = \begin{pmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} \end{pmatrix}_v = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} \underline{a}_{11} & \operatorname{Im} \underline{a}_{11} & \operatorname{Re} \underline{a}_{12} & \operatorname{Im} \underline{a}_{12} \\ -\operatorname{Im} \underline{a}_{11} & \operatorname{Re} \underline{a}_{11} & -\operatorname{Im} \underline{a}_{12} & \operatorname{Re} \underline{a}_{12} \\ \operatorname{Re} \underline{a}_{21} & \operatorname{Im} \underline{a}_{21} & \operatorname{Re} \underline{a}_{22} & \operatorname{Im} \underline{a}_{22} \\ -\operatorname{Im} \underline{a}_{21} & \operatorname{Re} \underline{a}_{21} & -\operatorname{Im} \underline{a}_{22} & \operatorname{Re} \underline{a}_{22} \end{pmatrix}_v \quad (16)$$

Die Elemente der Kettenmatrix für eine Wandschicht v erhält man wie folgt:

$$\operatorname{Re} \underline{a}_{11} = \operatorname{Re} \underline{a}_{22} = \cosh \sqrt{\frac{1}{2} \omega RC} \cdot \cos \sqrt{\frac{1}{2} \omega RC} \quad (17)$$

$$\operatorname{Im} \underline{a}_{11} = \operatorname{Im} \underline{a}_{22} = \sinh \sqrt{\frac{1}{2} \omega RC} \cdot \sin \sqrt{\frac{1}{2} \omega RC} \quad (18)$$

$$\operatorname{Re} \underline{a}_{12} = R \cdot \sqrt{\frac{1}{2\omega RC}} \cdot \left(\cosh \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \cdot \sin \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} + \sinh \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \cdot \cos \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \right) \quad (19)$$

$$\operatorname{Im} \underline{a}_{12} = R \cdot \sqrt{\frac{1}{2\omega RC}} \cdot \left(\cosh \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \cdot \sin \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} - \sinh \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \cdot \cos \sqrt{\frac{1}{2}\omega RC} \right) \quad (20)$$

mit:

R Wärmewiderstand der Wandschicht je Flächeneinheit
in $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$ $R = \frac{s}{\lambda}$

C Wärmekapazität der Wandschicht je Flächeneinheit in
in $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ $C = c \cdot \rho \cdot s$

ω Kreisfrequenz
Für die Herleitung des Ersatzmodells nach Bild4 hat sich die Verwendung einer Periodendauer der Grundschwingung von 7 Tagen als am geeignetsten herausgestellt.
Somit ist $\omega = 10,39 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ zu wählen.

s Dicke der Wandschicht in m

λ Wärmeleitfähigkeit der Wandschicht in $\frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{K}}$

$c \cdot \rho$ Wärmespeicherzahl der Wandschicht in $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$

Die Kettenmatrix $\mathbf{A}_{1,n}$ der Gesamtwand errechnet sich durch Matrizenmultiplikation der Matrizen \mathbf{A}_v der einzelnen Wandschichten ($v = 1, n$) zu:

$$\mathbf{A}_{1,n} = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{A}_3 \cdot \dots \cdot \mathbf{A}_{n-1} \cdot \mathbf{A}_n \quad (21)$$

Die Reihenfolge der einzelnen Wandschichten darf nicht vertauscht werden, da die Matrix $\mathbf{A}_{1,n}$ i.a. nicht richtungssymmetrisch ist.

Mit Hilfe der Elemente der Kettenmatrix $\mathbf{A}_{1,n}$ für die Gesamtwand nach Gleichung (21) lassen sich die Widerstände und Kapazitäten des Ersatzmodells bestimmen zu:

$$R_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{a}_{22} - 1) \cdot \operatorname{Re} \underline{a}_{12} + \operatorname{Im}(\underline{a}_{22} - 1) \cdot \operatorname{Im} \underline{a}_{12}}{\operatorname{Re}(\underline{a}_{22} - 1)^2 + \operatorname{Im}(\underline{a}_{22} - 1)^2} \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{1}{A} \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{a}_{11} - 1) \cdot \operatorname{Re} \underline{a}_{12} + \operatorname{Im}(\underline{a}_{11} - 1) \cdot \operatorname{Im} \underline{a}_{12}}{\operatorname{Re}(\underline{a}_{11} - 1)^2 + \operatorname{Im}(\underline{a}_{11} - 1)^2} \quad (23)$$

$$C_1 = A \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{a}_{22} - 1)^2 + \operatorname{Im}(\underline{a}_{22} - 1)^2}{\omega [\operatorname{Re} \underline{a}_{12} \cdot \operatorname{Im}(\underline{a}_{22} - 1) + \operatorname{Re}(\underline{a}_{22} - 1) \cdot \operatorname{Im} \underline{a}_{12}]} \quad (24)$$

$$C_2 = A \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{a}_{11} - 1)^2 + \operatorname{Im}(\underline{a}_{11} - 1)^2}{\omega [\operatorname{Re} \underline{a}_{12} \cdot \operatorname{Im}(\underline{a}_{11} - 1) + \operatorname{Re}(\underline{a}_{11} - 1) \cdot \operatorname{Im} \underline{a}_{12}]} \quad (25)$$

mit::

A Fläche der Wand in m^2

Der Widerstand R_3 errechnet sich als Differenz zwischen dem Gesamtwärmedurchgangswiderstand einer Wand und der Summe der Ersatzmodellwiderstände R_1 und R_2

$$R_3 = \left(\frac{1}{A} \cdot \sum_{v=1}^n \frac{s_v}{\lambda_v} \right) - R_1 - R_2 \quad (26)$$

Bei der Betrachtung von Innenlasten im Raum läßt sich das Ersatzmodell für den allgemeinen Fall der thermischen Belastung nach Bild 4 noch zu **Bild 5** vereinfachen:

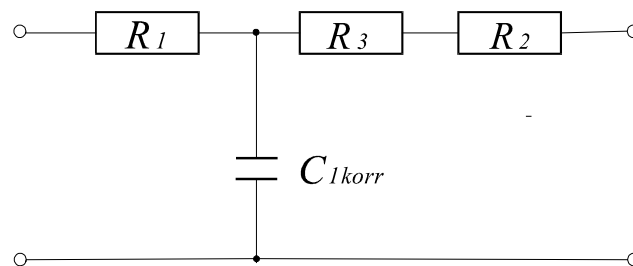


Bild 5: Vereinfachtes Ersatzmodell für das wärmetechnische Verhalten von Wänden bei einseitiger thermischer Belastung

Die korrigierte Wärmespeicherkapazität $C_{1\text{korr}}$ ermittelt sich dabei zu:

$$C_{1\text{korr}} = C_1 + C_2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3} \quad (27)$$

Wärmetechnisches Verhalten von Innenbauteilen bei symmetrischer Wärmebelastung

Bei Innenbauteilen eines Gebäudes wie Innenwänden, innenliegenden Fußböden und Decken kann häufig davon ausgegangen werden, dass in angrenzenden Räumen nahezu die gleichen Temperaturverhältnisse herrschen. Daher kann man hierfür vereinfachend von einer symmetrischen Wärmebelastung von Innenbauteilen ausgehen. Das Ersatzmodell nach Bild 4 kann dadurch entsprechend seiner Herleitung nach [11,12] für Innenbauteile bei symmetrischer Belastung auf ein Modell entsprechend **Bild 6** reduziert werden.

Die Wärmeübergangswiderstände $R_{\alpha_{konv}}$ für Konvektion zwischen der Wandoberfläche und der Raumluft sowie $R_{\alpha_{stra}}$ für Strahlung zwischen den Wandoberflächen ermitteln sich zu:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{A} \quad (28)$$

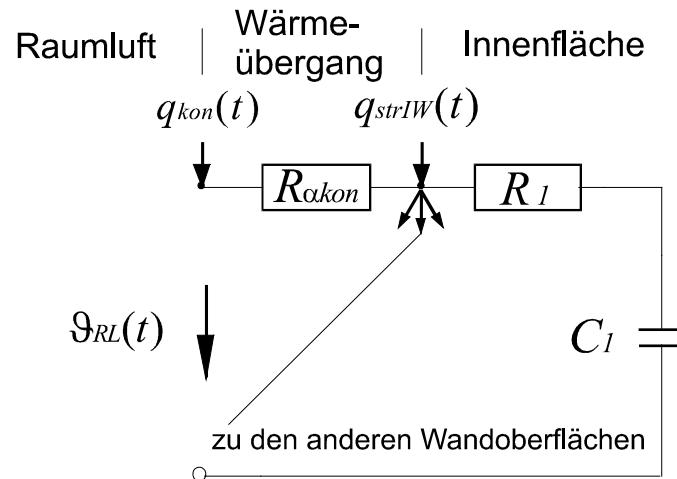


Bild 6: Ersatzmodell für das wärmetechnische Verhalten von Innenbauteilen (z.B. Innenwand) eines Gebäudes bei symmetrischer Wärmebelastung.

Wärmetechnisches Verhalten von Außenbauteilen und Innenbauteilen bei unsymmetrischer Wärmebelastung

Bei Außenbauteilen (und Innenwänden bei unsymmetrischer Belastung) muss außer der Wärmespeicherfunktion des Bauteils auch der Wärmefluß **durch** das Bauteil berücksichtigt werden. Daher ist hierfür das Ersatzmodell analog zu Bild 5 zu berücksichtigen.

Ein Außenfenster ist ein Sonderfall vom Ersatzmodell nach Bild 5 Hierbei ist die Wärmespeicherkapazität $C_{1\text{ kor}}r$ praktisch zu Null zu setzen.

Zwei-Kapazitäten-Modell für einen Raum

Trotz schon erheblicher Vereinfachungen der Schaltung für einen Raum mittels der Ersatzmodelle gegenüber dem Beuken-Modell, lassen sich daraus noch nicht ohne weiteres die drei Kenngrößen für die Berechnung nach dem regelungstechnische Modell ableiten.

Hierzu sind weitere Vereinfachungen erforderlich. Dazu werden in ihrer wärmetechnischen Funktion gleichartige Wände zusammengefasst (siehe **Bild 7** für einen Raum mit konvektiven und strahlenden Innenlasten):

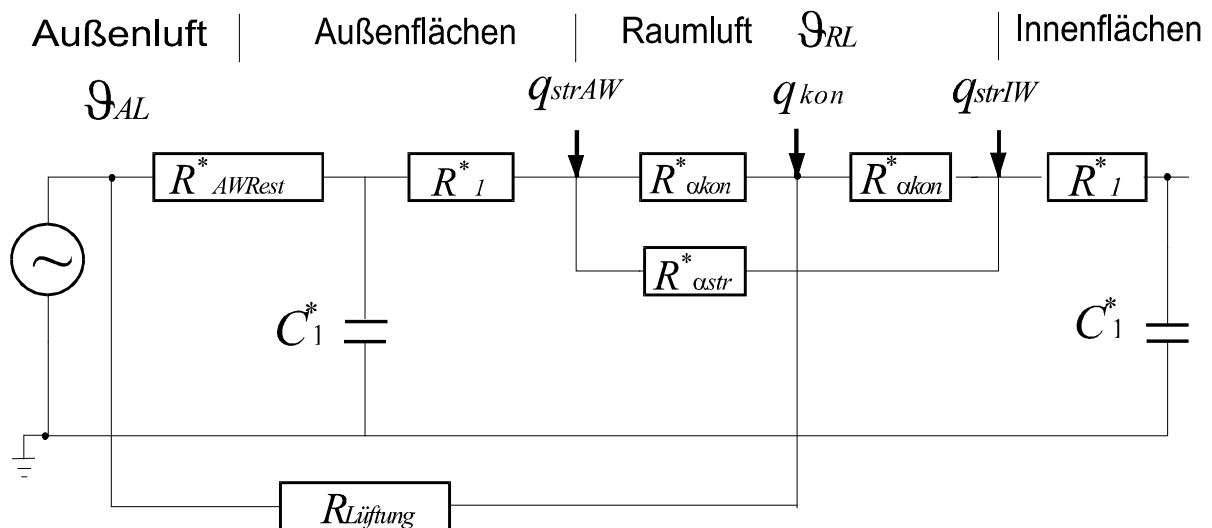


Bild 7: Zwei-Kapazitäten-Modell für einen Raum mit konvektiven und strahlenden Innenlasten.

Die Ersatzmodelle für die einzelnen Modelle lassen sich zusammenfassen in folgende drei Gruppen:

Außenflächen wie Außenwände Dach, Außenfenster usw.

Innenwände, bei denen in den angrenzenden Räumen praktisch **gleiche** Temperaturverhältnisse und Strahlungsverhältnisse herrschen (adiabate Belastung)

Innenwände, die jeweils an Räume mit **anderen** Temperatur- und Strahlungsverhältnissen grenzen. z.B. an Keller angrenzend.

Bei den Raumtypen nach VDI 2078 sind keine Innenwände der Gruppe c enthalten (siehe Bild 7). Erforderlichenfalls ist das Zwei-Kapazitäten-Modell auf ein Dreikapazitäten-Modell zu erweitern.

Für die **Innenflächen**, bei denen eine adiabate Belastung auf die Innen- und Außenseite vorausgesetzt werden kann, lassen sich die Kennwerte der einzelnen Innenwände wie folgt zusammenfassen:

Summation der Wärmespeicherefähigkeit $C_{1\ IW_\mu}^*$ für alle Innenwände IW_μ :

$$C_{1\ IW}^* = \sum_{\mu=1}^m C_{1\ IW_\mu}^* \quad (29)$$

Parallelschaltung der Wärmedurchgangswiderstände $R_{1\ IW_\mu}$ und der konvektiven Wärmeübergangswiderstände $R_{\alpha\ konv\ IW_\mu}$ für alle Innenflächen IW_μ :

$$R_{1\ IW}^* = 1 / \left(\sum_{\mu=1}^m \frac{1}{R_{1\ IW_\mu}} \right) \quad (30)$$

$$R_{\alpha\ konv\ IW}^* = 1 / \left(\sum_{\mu=1}^m \frac{1}{R_{\alpha\ konv\ IW_\mu}} \right) \quad (31)$$

Für die **Außenflächen** lassen sich die Kennwerte für die einzelnen Außenwände und Außenfenster zusammenfassen wie folgt:

Summation der Wärmespeicherfähigkeit $C_{1 AW_v}$ für alle Außenwände AW_v (für die Außenfenster AF_v ist die Wärmespeicherfähigkeit $C_{1 AF_v}$ vernachlässigbar):

$$C_{1 AW}^* = \sum_{v=1}^n C_{1 AW_v} \quad (32)$$

Parallelschaltung der Wärmedurchgangswiderstände $R_{1 AW_v}$ für alle Außenflächen AW_v sowie $R_{1 AF_v}$ für alle Außenfenster AF_v

$$R_{1 AW}^* = 1 / \left(\sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{1 AW_v}} + \sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{1 AF_v}} \right) \quad (33)$$

Anm.: Der Wert $R_{1 AF}$ für Außenfenster ist nicht direkt bei der Herleitung der Ersatzmodelle für Wände festgelegt. In Analogie zu der Ermittlung von $R_{1 AW}$ nach [11,12] ist folgender Wert anzusetzen:

$$R_{1 AF} = R_{AF} / 6 \quad (34)$$

wobei der Wärmedurchgangswiderstand für ein Außenfenster $R_{1 AF}$ **ohne** Wärmeübergangskoeffizienten innen und außen zu ermitteln ist:

$$R_{AF} = \left(\frac{1}{k_{AF}} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_a} \right) \cdot \frac{1}{A_{AF}} \quad (35)$$

Der Wert $R_{Rest AW}^*$ ermittelt sich aus dem Gesamtwärmedurchgangswiderstand $R_{ges AW}^*$ zwischen Raum und Außenluft abzüglich des Widerstandes $R_{1 AW}^*$ und der Parallelschaltung von $R_{\alpha konv AW}^* \parallel R_{\alpha stra AW-IW}^*$:

$$R_{Rest AW}^* = R_{ges AW}^* - R_{1 AW}^* - 1 / \left(\frac{1}{R_{\alpha konv AW}^*} + \frac{1}{R_{\alpha stra AW-IW}^*} \right) \quad (36)$$

$R_{ges AW}^*$ erhält man durch Parallelschaltung der Wärmedurchgangswiderstände $R_{ges AW_v}$ für alle Außenflächen AW_v sowie $R_{ges AF_v}$ für alle Außenfenster AF_v :

$$R_{ges AW}^* = 1 / \left(\sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{ges AW_v}} + \sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{ges AF_v}} \right) \quad (37)$$

Der Gesamtwärmedurchgangswiderstand $R_{ges AW_v}$ für ein Außenbauteil AW_v (Außenwand, Dach, Fenster usw.) errechnet sich zu:

$$R_{ges AW_v} = R_{\alpha au\beta en AW_v} + R_{1 AW_v} + R_{2 AW_v} + R_{3 AW_v} + R_{\alpha konv AW_v} \parallel R_{\alpha stra AW_v-IW_1} \parallel \dots \parallel R_{\alpha stra AW_v-IW_n} \quad (38)$$

Den zusammengefaßten Wärmeübergangswiderstand für Konvektion $R_{\alpha \text{ konv AW}}^*$ erhält man durch Parallelschaltung der Wärmeübergangswiderstände $R_{\alpha \text{ konv AW}_v}$ für alle Außenflächen AW_v sowie $R_{\alpha \text{ konv AF}_v}$ für alle Außenfenster AF_v :

$$R_{\alpha \text{ konv AW}}^* = 1 / \left(\sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{\alpha \text{ konv AW}_v}} + \sum_{v=1}^n \frac{1}{R_{\alpha \text{ konv AF}_v}} \right) \quad (39)$$

Den zusammengefaßten Wärmeübergangswiderstand für **Strahlung zwischen den Außen- und Innenflächen** $R_{\alpha \text{ stra AW-IW}}^*$ erhält man durch Parallelschaltung aller Wärmeübergangswiderstände $R_{\alpha \text{ stra AW}_v \text{-IW}_\mu}$ zwischen den Außenflächen AW_v sowie Außenfenstern AF_v und den Innenflächen IW_μ :

$$R_{\alpha \text{ stra AW-IW}}^* = 1 / \left(\sum_{v=1}^n \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{R_{\alpha \text{ stra AW}_v \text{-IW}_\mu}} + \sum_{v=1}^n \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{R_{\alpha \text{ stra AF}_v \text{-IW}_\mu}} \right) \quad (40)$$

Der **Luftwechsel** zwischen dem Raum und der Außenluft durch Fenster und Undichtigkeiten wird mittels des Wärmewiderstand $R_{\text{Lüftung}}$ beschrieben. $R_{\text{Lüftung}}$ ist in der Regel keine Konstante, sondern z.B. eine Funktion der Tageszeit. Auch kann der Luftwechsel gezielt durch Fensteröffnen erhöht werden, wenn die Raumtemperatur zu hoch wird.

$$R_{\text{Lüftung}} = \frac{1}{\dot{V}_L \cdot c_L \cdot \varrho_L} \quad (41)$$

mit:

\dot{V}_L Außenluftwechsel durch Fenster und Undichtigkeiten
 $c_L \cdot \varrho_L$ spez. Wärme der Luft

Eine weitere Vereinfachung des Zwei-Kapazitäten-Modells zu einem Ein-Kapazitäten-Modell ist **nicht** mehr möglich, da sonst wesentliche Kriterien für den Zeitgang der Raumlufttemperatur bzw. der Kühllasten nicht mehr eingehalten werden können.

So stimmt beispielsweise beim Ein-Kapazitäten-Modell bei strahlender Innenlast der stationäre Endwert der Raumtemperatur bzw. der Kühllast nicht mehr überein.

Ermittlung der Kenngrößen zur Bestimmung des Zeitganges der Raumtemperatur am Beispiel eines Zwei-Kapazitäten-Modells.

Wie bereits eingangs erläutert, benötigt man nach Gleichung (4) folgende Größen:
 die Zeitkonstante T_1
 die Vorhaltezeit T_v
 den Wert der Ausgangsfunktion $y(\infty)$.

Für den hier vorliegenden Fall eines passiven Übertragungsgliedes gilt nach *Isermann* [4] für den Speicherstrom:

$$\Delta Q_{sp}(\infty) = \int_0^{\infty} \dot{Q}_{sp}(t) dt = \Delta \dot{Q}_{e0} \int_0^{\infty} e^{-t/T} dt = \Delta \dot{Q}_{e0} \cdot T \quad (42)$$

d.h. die Fläche über der Übergangsfunktion in **Bild 8** bis zur Asymptote an $y(\infty)$ ist gleich der gespeicherten und die Fläche darunter gleich der wirksam werdenden Energie. Für die Zeitkonstante T folgt dann nach Gleichung (3):

$$A = \int_0^{\infty} [y(\infty) - y(\infty) \cdot (1 - e^{-t/T})] dt = y(\infty) \int_0^{\infty} e^{-t/T} dt = y(\infty) \cdot T \quad (43)$$

In Bild 8 ist für den Typraum S nach VDI 2078 der zeitliche Verlauf der Raumtemperatur $\vartheta_{RL}(t)$ für den Fall einer Innenlast von 500 W konvektiv und zusätzlich 500 W strahlend - jeweils als Sprungfunktion mit unendlicher Dauer angesetzt - dargestellt.

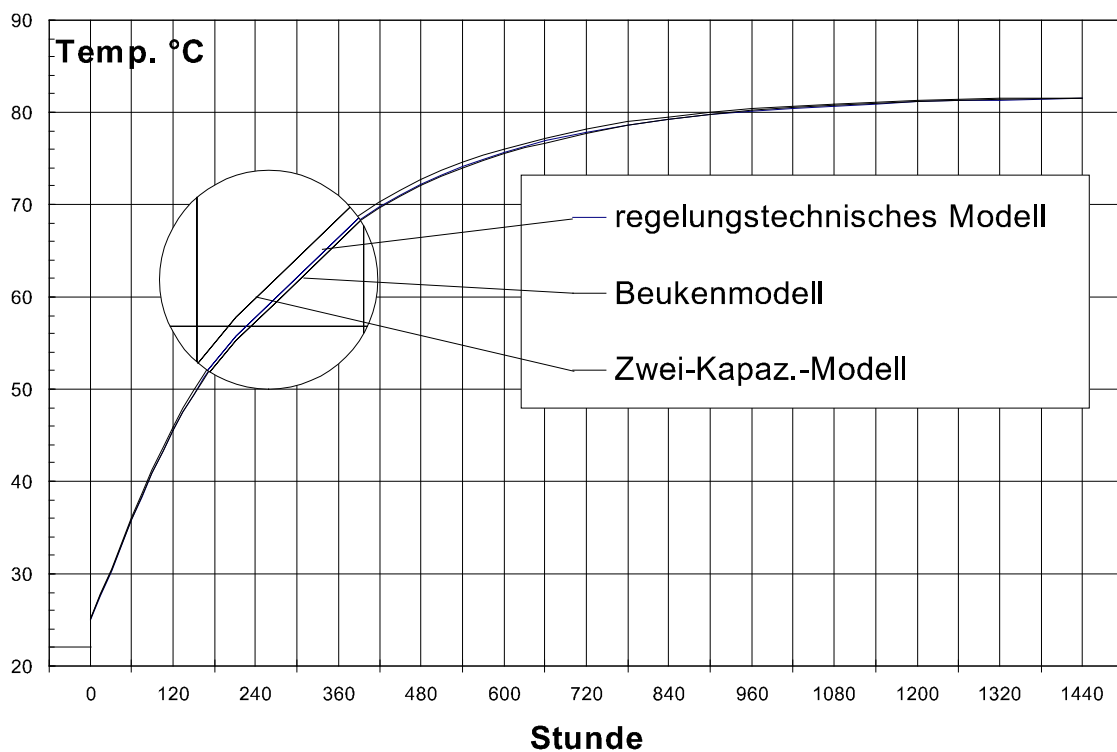


Bild 8: Modellvergleich für den Typraum S nach VDI 2078 von Beuken-Modell und Zwei-Kapazitäten-Modell mit den nach dem regelungstechnischen Modell berechneten Werten

Der Wert für $y(\infty)$ ist in Bild 8 die Temperatur im eingeschwungenen Zustand $\vartheta_{RL}(\infty) = 81,7 \text{ °C}$ vermindert um die Anfangstemperatur von 22 °C . Dieser Endwert läßt sich wärmetechnisch sehr einfach berechnen. Da zum Zeitpunkt $t = \infty$ die im Raum frei werdende Wärmemenge Q gleich der nach außen abgeführten Wärmemenge sein muss, ergibt sich für $\vartheta_{RL}(\infty)$:

$$\vartheta_{RL}(\infty) = Q \cdot \left[1 / \left(\frac{1}{R_{AW ges}^*} + \frac{1}{R_{L\u00fctung}} \right) \right] + \vartheta_{AL} \quad (44)$$

Diese Berechnung muss aus Genauigkeitsgr\u00fcnden f\u00fcr die konvektive und f\u00fcr die strahlende Last getrennt ausgef\u00fchrt werden, da der Gesamtwiderstand $R_{AW ges}^*$ f\u00fcr die beiden Lastarten (siehe Erl\u00e4uterungen zu Gleichung (40)) unterschiedlich ist. Der Endwert f\u00fcr die Temperaturerh\u00f6hung bei einer konvektiven Last von 500 W betr\u00e4gt f\u00fcr den Typraum S 31,05 K und f\u00fcr eine strahlende Last von ebenfalls 500 W ergeben sich 28,65 K. Somit errechnet sich $\vartheta_{RL}(\infty)$ unter Ber\u00fccksichtigung des Anfangszustandes von 22 °C zu $\vartheta_{RL}(\infty) = 81,7$ °C, q.e.d.

Die Zeitkonstante T_1 ergibt sich als Addition der Zeitkonstanten der beiden RC-Glieder nach Bild 8 zu:

$$T_1 = R_{AW Rest}^* \cdot C_{1 AW}^* + R_{AW-IW}^* \cdot C_{1 IW}^* \quad (45)$$

mit:

$$R_{AW-IW}^* = R_{AW Rest}^* + R_{1 AW}^* + 1 / \left(\frac{1}{R_{\alpha konv AW}^* + R_{\alpha konv IW}^*} + \frac{1}{R_{\alpha stra AW-IW}^*} \right) + R_{1 IW}^* \quad (46)$$

Im vorliegenden Beispiel ergibt sich $T_1 = 966550$ Sekunden (11,19 Tage).

Die Vorhaltezeiten f\u00fcr die konvektive und die strahlende Last ergeben sich nach Bild 8, unter Anwendung des Superpositionsprinzips und unter Beachtung der Fl\u00e4chenanteile bzw. Lastanteile zu:

$$T_{V stra} = (A_{AW} \cdot R_{1 AW}^* \cdot C_{1 AW}^* + A_{IW} \cdot R_{1 IW}^* \cdot C_{1 IW}^*) / (A_{AW} + A_{IW}) \quad (47)$$

$$T_{V konv} = (C_{1 AW}^* + C_{1 IW}^*) \cdot R_{ges konv}^* \quad (48)$$

mit:

$$R_{ges konv}^* = 1 / \left(\frac{1}{R_{\alpha konv IW}^* + R_{1 IW}^*} + \frac{1}{R_{\alpha konv AW}^* + R_{1 AW}^*} \right) \quad (49)$$

Die Vorhaltezeiten f\u00fcr das in Bild 8 gezeigte Beispiel ergeben f\u00fcr $T_{V stra} = 7910$ s und f\u00fcr $T_{V konv} = 90750$ s.

F\u00fcr den Raum m\u00fcssen die Vorhaltezeiten im Verh\u00e4ltnis der W\u00e4rmestr\u00f6me gewichtet werden:

$$T_V = \frac{T_{V stra} \cdot Q_{stra} + T_{V konv} \cdot Q_{konv}}{Q_{stra} + Q_{konv}} \quad (50)$$

F\u00fcr T_V ergeben sich 49330 s. Da als konvektive und strahlende Lasten jeweils eine Sprungfunktion von 500 W mit unendlicher Dauer angenommen wurden, also keine st\u00fcndlichen \u00c4nderungen auftreten, kann f\u00fcr diesen Fall auf die Berechnung der

„Vorgeschichte“ verzichten und anstelle der Gleichungen (5) und (6) direkt mit Gleichung (4) der Verlauf der Übergangsfunktion, wie in Bild 8 dargestellt, berechnet werden.

Mit den eingesetzten Zahlenwerten lautet Gleichung (4):

$$y(t) = 59,7 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{49330}{966550} \right) \cdot e^{-t/966550} \right] + 22 \quad t \geq 0 \quad (51)$$

Dabei ist als Offset beispielhaft ein Wert von 22 °C gewählt, da für den Raum ein Anfangszustand angenommen werden muss. Dieser Anfangszustand ist mit der Außentemperatur gleichgesetzt, sodass keine Wärmeströme zum Lastbeginn auftreten.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist ein Sprung vom Ausgangszustand 22 °C auf einen Wert von 25,05 °C vorhanden. Danach beginnt der exponentielle Verlauf bis zum Grenzwert 81,7 °C.

Die Kurven in Bild 8 zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem Beuken-Modell, dem Zwei-Kapazitäten-Modell - beide mit dem Schaltkreisanalyse-Programm (*PSPICE*) berechnet - und den nach dem regelungstechnischen Modell berechneten Werten. An den Anfangs- und Endpunkten stimmen alle drei Verfahren vollständig überein. Die maximale Abweichung gegenüber dem detaillierten Beuken-Modell beträgt beim Zwei-Kapazitäten-Modell 0.7 K und beim regelungstechnischen Modell 0.3 K. Diese Abweichungen treten aber in Bereichen auf, die für praktische Fälle kaum in Betracht kommen.

Zusammenfassung

Das vorgestellte regelungstechnische Modell bietet die Möglichkeit, komplexe Zusammenhänge - wie das thermisch-dynamische Raumverhalten - mit Bleistift und Taschenrechner nach Gleichung (4) für eine Sprungfunktion und nach den Gleichungen (5) und (6) für zeitvariable Funktionen - z.B. in Stundenschritten - zu berechnen. Es ermöglicht damit auch die Verifikation von Ergebnissen von Simulationsprogrammen und den Einsatz als Modell für das Raumverhalten in der Regelungstechnik.

Die vorstehend gezeigten Ergebnisse sind gültig für die Auswirkung von konvektiven und strahlenden Innenlasten im Raum durch innere und äußere Wärmequellen.

Bei den heute nach Wärmeschutzverordnung außen stark wärmegeprägten Außenbauteilen bestehen keine Bedenken, auch die Auswirkungen äußerer Wärmelasten auf die Außenseite von Außenflächen mit diesem Zwei-Kapazitäten-Modell einzubeziehen. Bei Außenwänden mit hoher Speicherkapazität in der äußeren thermischen Wandhälfte müssen hierfür evtl. die Außenwände AW und die Außenfenster AF getrennt betrachtet werden und für die AW zwei Kapazitäten berücksichtigt werden (Dreikapazitäten-Modell).

In Teil 2 dieser Veröffentlichung wird noch ausführlicher auf die Frage der allgemeingültigen Anwendbarkeit dieses Modells eingegangen werden. Es werden zudem Vergleiche mit marktgängigen Simulationsprogrammen und mit VDI 2078 für unterschiedliche Belastungsfälle durchgeführt.

In Teil 3 wird auf die Bestimmung von Gewichtsfunktionen eingegangen, wie sie z.B. in der VDI 2078 benötigt werden. Weiterhin werden einfache Kennwerte zur Beurteilung des sommerlichen Raumklimas hergeleitet.

Literaturverzeichnis

[1] *Eichler, F., u. H. Arndt*: Bauphysikalische Entwurfslehre. VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1982, S. 402

[2] *Boeke, W., u. F. Zimmermann*: Eine manuelle Methode zur Berechnung der Kühllast von Vielraumgebäuden unter Berücksichtigung der Wärmespeicherung. Heizung-Lüftung-Haustechnik 20 (1969) Nr. 11, S. 400/406.

[3] *Lutz/Wend*: Taschenbuch der Regelungstechnik, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 1995

[4] *Isermann, R.*: Identifikation dynamischer Systeme 1, Springer-Verlag, 2. Auflage 1992

[5] *Beuken, D.L.*: Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen. Dissertation Freiburg 1936.

[6] *Brockmeier, K.-H.*: Über ein Beuken-Modell kleinster Abmessungen. Elektrotechnische Zeitschrift 72 (1951) Heft 17, S. 525/528.

[7] *Euser, P.*: Thermische Storingsbronnen. Technisch Physische Dienst. TNO-TH, Delft, Leergang 1967.

[8] *Bovy, A.J.*: Die Entwicklung des Analogieverfahrens zur Lösung nichtstationärer Wärmeprobleme in den letzten zehn Jahren. Ve Congres International d Electrothermie, Wiesbaden 1963, Section 5, Nr. 623.

[9] *Köhne, H. u. G. Wölk.*: Das digitale Beuken-Modell - eine Methode zur Berechnung instationärer Wärmeleitvorgänge. Elektrowärme international 27 (1969) Nr. 7, S. 302/308.

[10] *MicroSim*: Design Center mit Pspice Version 7.1, October 1996.

[11] *Rouvel, L.*: Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten
Brennstoff-Wärme-Kraft 24 (1972), Nr. 6, S. 245/262.

[12] *Rouvel, L.*: Raumkonditionierung - Wege zum energetisch optimierten Gebäude
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1978

veröffentlicht in der HLHH:

Rouvel L., Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch
Zimmermann F.: dynamischen Raumverhaltens

Teil 1: Theoretische Grundlagen und deren Anwendung auf die Berechnung
von Raumtemperaturen
HLH Bd. 48 (1997), Nr. 10, S. 66/75

Teil 2: Vergleich der Berechnungsergebnisse für das regelungstechnische
Modell mit anderen Verfahren am Beispiel sommerlicher
Raumtemperaturen
HLH Bd. 48 (1997), Nr. 12, S. 24/31

Teil 3: Berechnung von Gewichtungsfaktoren für VDI 2078 und alternatives
Verfahren mittels Übergangsfunktionen
HLH Bd. 49 (1998), Nr. 1, S. 18/2

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE

