

# Dynamisches Ersatzmodell für Bauteile

## Berechnung der raumseitigen Oberflächentemperatur

Für die dynamische Berechnung des Wärmetransports durch Bauteile im Raum gibt es eine ganze Reihe von Ersatzmodellen, da analytische Lösungen der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung nur für Spezialfälle existieren. Hier soll ein weiteres Ersatzmodell vorgestellt werden, welches auf Basis der Summenzeitkonstante sowohl eine anschauliche Bewertung der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen erlaubt, als auch Parameter für eine dynamische Simulation liefert.



Für den sommerlichen Wärmeschutznachweis muss nach DIN 4108-2 [1] im Sonneneintragsverfahren die Schwere der Bauart bekannt sein. Zur Berechnung der Bauart darf die wirksame Wärmekapazität auch nach DIN EN ISO 13786 [2] für eine Tagesperiode bestimmt werden. In dieser Norm gibt es aber einige Einschränkungen:

- Die DIN EN ISO 13786 gilt nur für sinusförmige Temperaturschwingungen.
- Bestimmte Stoffe, wie z.B. Holz oder Porenbeton werden im vereinfachten Verfahren nach Anhang C eventuell überbewertet.
- Es wird nur die Wärmekapazität auf der Seite des betrachteten Raumes berechnet.
- Gemäß nationalem Vorwort sind die in dieser Norm beschriebenen „dynamisch-thermischen Kenngrößen“ für eine thermische Gebäudesimulation nicht anwendbar.

In diesem Beitrag soll eine Alternative aufgezeigt werden, für die allerdings auch gilt:

- Die Aktionsgrößen außen- und raumseitige Temperatur eines Bauteils sind innerhalb eines Zeitschrittes konstant. Für das Außenklima entspricht das auch den Stundenmitteilungen der Meteorologen.
- Für die Anwendung auf ebene Bauteile mit homogenen Stoffschichten wird von eindimensionaler Wärmeleitung ausgegangen. Das hier vorgestellte Verfahren lässt sich auch auf mehrdimensionale Wärmebrücken anwenden, wofür es aber noch an einer Validierung mangelt.
- Das hier vorgestellte Verfahren ist nicht auf periodische Vorgänge angewiesen, wodurch es auch als Grundlage für eine thermische Gebäudesimulation geeignet ist. In der Erweiterung des Verfahrens kann die dynamische Heiz- und Kühllast bzw. die Ist-Raumtemperatur bei Unterdimensionierung der technischen Anlage auch für nicht-adiabate Räume instationär berechnet werden. Mit Unterdimensionierung ist auch gemeint, dass gar keine Heiz- oder Kühlanlage in Betrieb ist, bzw., dass sie nicht nach der Raumtemperatur (Raumluft- oder operative Temperatur) geregelt wird.

### Das SZK-Verfahren für Bauteile

Das Simulationsverfahren mit der Summenzeitkonstante (SZK) wurde bereits in [3] angewendet. Dort wurde aber die Summenzeitkonstante für Aktionen eingesetzt, die sich auf den gesamten Raum beziehen. Inzwischen ist die Erkenntnis gereift, dass man das SZK-Verfahren auf die einzelnen Bauteile eines Raumes ansetzen sollte.

Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist daher die Berechnung der raumseitigen Oberflächentemperatur eines Bauteils. Im stationären Fall gilt

$$T_{si} = (1 - f_{Rsi}) \cdot T_e + f_{Rsi} \cdot T_i \quad (1)$$

$T_{si}$  raumseitige Oberflächentemperatur in °C

$T_e$  Außentemperatur in °C

$T_i$  Innentemperatur in °C

$f_{Rsi}$  dimensionsloser Temperaturfaktor an der Innenoberfläche nach DIN EN ISO 10211 [4]

Der  $f_{Rsi}$ -Wert ist im Zusammenhang mit Wärmebrückenberechnungen bekannt, kann aber auch für ebene Bauteile verwendet werden. Dafür gilt die Gleichung

$$f_{Rsi} = 1 - U \cdot R_{si} \quad (2)$$

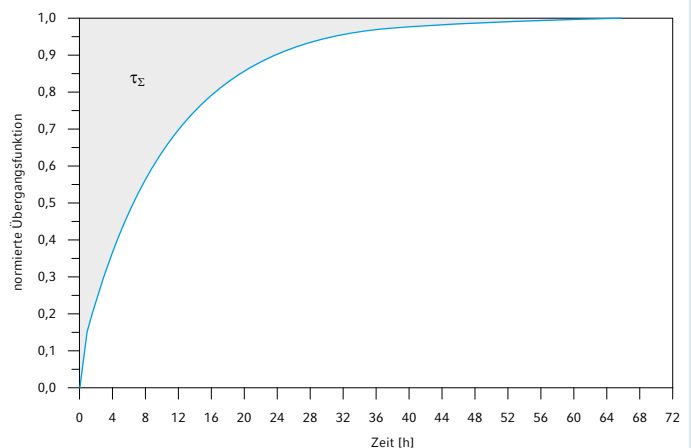
$U$  Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2 \cdot K)$

$R_{si}$  Wärmeübergangswiderstand innen in  $m^2 \cdot K/W$

Aus den beiden Faktoren vor der Außen- und Innentemperatur ist zu erkennen, dass es zwei Übertragungsfunktionen mit unterschiedlichen stationären

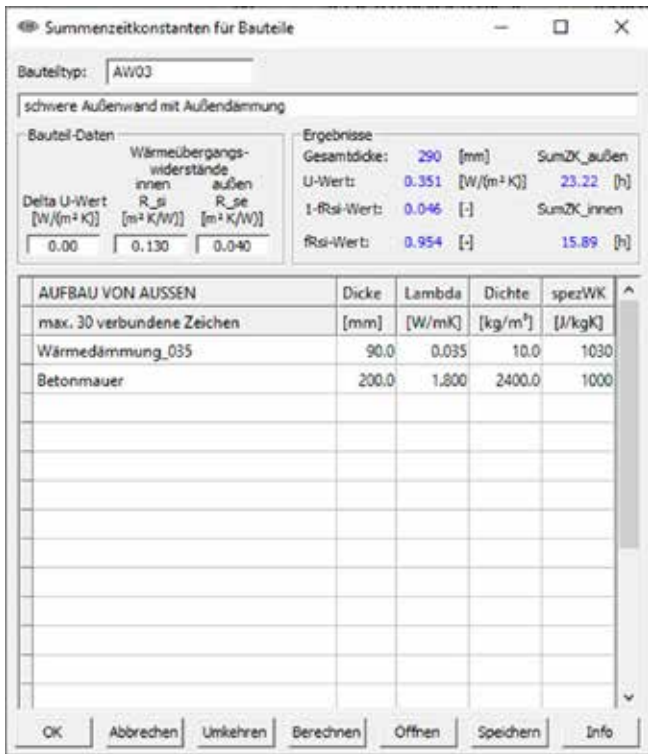
Dipl.-Ing. Norbert Nadler  
CSE Nadler, 16515 Oranienburg,  
[www.cse-nadler.de](http://www.cse-nadler.de)

### 1 Auf den stationären Endwert



normierte Übergangsfunktion zur numerischen Berechnung der Summenzeitkonstante  $\tau_{\Sigma}$

2 Tool zur Berechnung



der Summenzeitkonstanten von ebenen Bauteilen

Endwerten geben muss. Für den instationären Fall erhält man im Laplace-Bereich

$$T_{si}(s) = G_e(s) \cdot T_e(s) + G_i(s) \cdot T_i(s) \tag{3}$$

$G_e(s)$  Übertragungsfunktion der Aktion Außentemperatur in -  
 $G_i(s)$  Übertragungsfunktion der Aktion Innentemperatur in -  
 s Laplace-Operator

mit der Grenzwertforderung bei  $t \rightarrow \infty$  (entspricht  $s \rightarrow 0$ )

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_e(s) = 1 - f_{Rsi} \quad ; \quad \lim_{s \rightarrow 0} G_i(s) = f_{Rsi} \tag{4}$$

zur Sicherstellung des stationären Verhaltens. Damit entspricht auch der Mittelwert von periodischen Vorgängen dem stationären Ergebnis.

Den  $f_{Rsi}$ -Wert für Wärmebrücken kann man den Wärmebrücken-katalogen entnehmen oder mit einem Wärmebrückenprogramm berechnen. Nach DIN 4108-2 [1] muss er seit 2003 für Neubauten mindestens 0,70 für Außenbauteile betragen. Das müsste auch für ebene Bauteile gelten, wodurch ein Mindestwert festliegt. Wird diese Anforderung befolgt, geht nach Glg. (1) die außenseitige Temperatur zu maximal 30 % auf das stationäre Verhalten bzw. auf den zeitlichen Mittelwert der raumseitigen Oberflächentemperatur ein. Bei den heutigen Anforderungen an den U-Wert

von Außenwänden wird der  $f_{Rsi}$ -Wert in der Größenordnung von 0,97 liegen. Dementsprechend verringert sich der Einfluss der Außentemperatur, wobei allerdings auch eine höhere Amplitude gegenüber der Innentemperatur zu bewerten ist.

Glg. (3) ist auch für Innenbauteile anwendbar, wenn anstelle der Außentemperatur die Nachbarraumtemperatur eingesetzt wird. Wird der Nachbarraum symmetrisch belastet und ist gleichartig wie der betrachtete Raum aufgebaut, ist in erster Näherung  $T_e(s) = T_i(s)$  zu setzen. Somit können auch sogenannte „adiabate Räume“ modelliert werden.

Für die beiden Übertragungsfunktionen  $G(s)$  soll eine Approximation durch ein Ersatzmodell erfolgen, welches möglichst einfache Gleichungen besitzt und die Bedingung in Glg. (4) erfüllt. Beim Verfahren mit der Summenzeitkonstante wird einfach jede Übertragungsfunktion durch ein Speicherglied 1. Ordnung ersetzt und für die Zeitkonstante die Summenzeitkonstante  $\tau_{\Sigma}$  eingetragen. Ein Speicherglied 1. Ordnung wird mathematisch durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten abgebildet. Für die Simulation ergeben sich daraus für jeden Zeitschritt  $k$  die einfachen Formeln

$$T_{si,e,k} = A_{0,e} \cdot T_{e,k} + b_{1,e} \cdot T_{si,e,k-1} \tag{5}$$

$$T_{si,i,k} = A_{0,i} \cdot T_{i,k} + b_{1,i} \cdot T_{si,i,k-1}$$

$$T_{si,k} = T_{si,e,k} + T_{si,i,k}$$

- $T_{si,e,k}$  Teilreaktion der raumseitigen Oberflächentemperatur auf die Aktion Außentemperatur bzw. Nachbarraumtemperatur zum Zeitschritt  $k$  in °C
- $T_{si,i,k}$  Teilreaktion der raumseitigen Oberflächentemperatur auf die Aktion Innentemperatur zum Zeitschritt  $k$  in °C
- $T_{si,k}$  Gesamtreaktion der raumseitigen Oberflächentemperatur auf die beiden Aktionen zum Zeitschritt  $k$  in °C
- $k$  lfd. Nummer des Zeitschritts, beginnend bei 1

Die Konstanten  $A$  und  $b$  errechnen sich aus dem  $f_{Rsi}$ -Wert und den beiden Summenzeitkonstanten  $\tau_{\Sigma}$  sowie der gewählten Simulationszeitschrittweite  $\Delta\tau$ .

$$b_{1,act} = e^{-\frac{\Delta\tau}{\tau_{\Sigma,act}}} \quad ; \quad a_{0,act} = 1 - b_{1,act} \quad ; \quad A_{0,e} = (1 - f_{Rsi}) \cdot a_{0,e} \quad ; \quad A_{0,i} = f_{Rsi} \cdot a_{0,i} \tag{6}$$

- $\tau_{\Sigma,act}$  Summenzeitkonstante für die Aktion act in h
- Index act Aktion act = e (Außentemperatur) oder act = i (Innentemperatur)
- $\Delta\tau$  Simulationszeitschrittweite in h
- $b_{1,act}$  Gewichtungsfaktor für zurückliegende Reaktion der Aktion act in -
- $a_{0,act}$  normierter Gewichtungsfaktor für aktuelle Aktion act in -
- $A_{0,e}$  und  $A_{0,i}$  denormierte Gewichtungsfaktoren der Aktionen e bzw. i in -

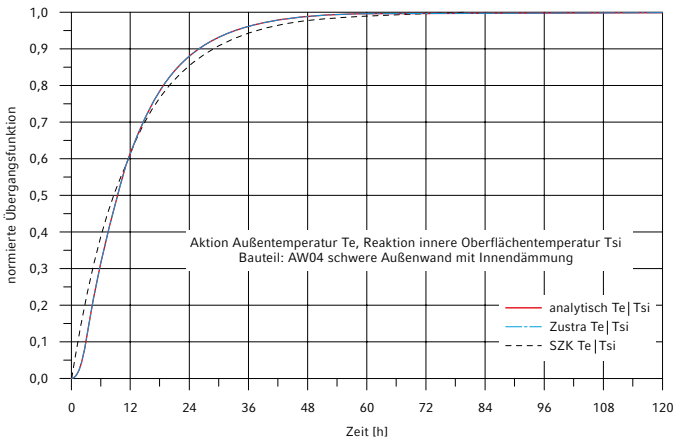
**Berechnung der Summenzeitkonstante**

Die Summenzeitkonstante stellt die Summe aller Zeitkonstanten im System dar und kann für ebene Bauteile analytisch aus der sog. Kettenmatrix (VDI 6007-1 [5]) oder durch numerische Integration

**Tabelle 1: Summenzeitkonstanten und Stationärwerte für das Ersatzmodell**

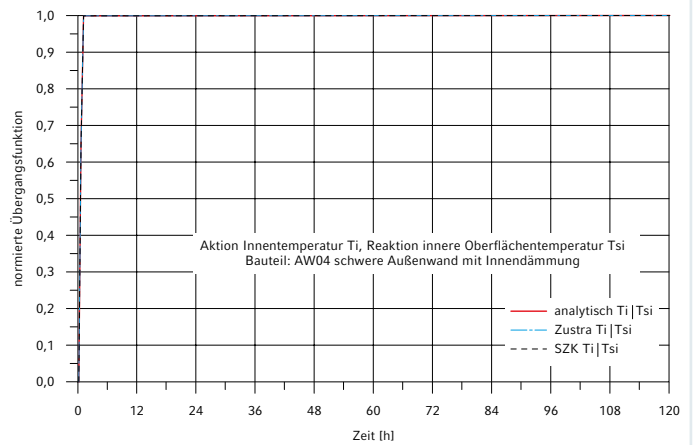
Aufbau von außen	U [W/m <sup>2</sup> K]	Zeitkonstanten und Stationärwerte			
		$\tau_{\Sigma,e}$ [h]	$1-f_{Rsi}$ [-]	$\tau_{\Sigma,i}$ [h]	$f_{Rsi}$ [-]
AW01: schwere Außenwand 200 mm Betonmauer	3,557	7,92	0,462	4,15	0,538
AW02: extrem leichte Außenwand 90 mm Wärmedämmung_035	0,365	0,12	0,047	0,01	0,953
AW03: schwere Außenwand mit Außendämmung 90 mm Wärmedämmung_035 200 mm Betonmauer	0,351	23,22	0,046	15,89	0,954
AW04: schwere Außenwand mit Innendämmung 200 mm Betonmauer 90 mm Wärmedämmung_035	0,351	12,40	0,046	0,03	0,954
AW05: sehr leichte Außenwand 1 mm Stahlblech 90 mm Wärmedämmung_035 1 mm Stahlblech	0,365	0,28	0,047	0,13	0,953
AW06: leichte Außenwand 12 mm Fassadenplatte 30 mm Luftraum 80 mm Wärmedämmung_035 80 mm Beton_2000	0,368	7,06	0,048	5,39	0,952
AW07: Ytong-Außenwand 300 mm Ytong-Porenbeton	1,851	14,69	0,241	4,86	0,759
AW08: Ytong-Außenwand mit Außendämmung 10 mm Kunstharzputz 50 mm Polystyrol-Partikelschaum 300 mm Ytong-Porenbeton 8 mm Gipsputz	0,225	22,55	0,029	1,79	0,971
AW09: Ytong-Außenwand mit Innendämmung 20 mm Normalmörtel_NM 300 mm Ytong-Porenbeton 45 mm Polystyrol-Partikelschaum 12,5 mm Gipskartonplatte	0,229	22,01	0,030	1,00	0,970
AW10: Kalksandstein-Außenwand mit Außendämmung 10 mm Außenputz 200 mm PS-Hartschaum 175 mm Kalksandstein-Mauerwerk RDK 1,8 10 mm Gipsputz	0,164	20,95	0,021	10,72	0,979
DA01: Dach 50 mm Dachziegel_Ton 35 mm Luftschicht 4 mm Polyäthylen-Folien 200 mm Dämmung_und_Ständer 2 mm Kraftpapier_PE-beschichtet 25 mm Gipskartonplatten	0,259	6,97	0,026	0,78	0,974
FB01: Bodenplatte KG gegen Erdreich 500 mm Erde 450 mm Beton_armiert_mit_2%_Stahl 10 mm Bitumendachbahnen_DIN52128 100 mm Dämmebene_2-lagig_WLG032 20 mm Dämmebene_2-lagig_WLG040 65 mm Zementestrich 10 mm Fliesenbelag	0,228	186,75	0,030	5,74	0,970
IW01: Ständerwerk 25 mm Gipskartonplatten 60 mm Dämmung_und_Ständer 35 mm Luftschicht 25 mm Gipskartonplatten	0,608	2,61	0,079	0,77	0,921
IW02: Kalksandstein-Innenwand 10 mm Gipsputz 115 mm KS-Mauerwerk,RDK_1,8 10 mm Gipsputz	2,471	6,05	0,321	3,08	0,679

### 3 Normierte Übergangsfunktion $T_e|T_{si}$



(Aktion  $T_e$ , Reaktion  $T_{si}$ ) für AW04

### 4 Normierte Übergangsfunktion $T_i|T_{si}$



(Aktion  $T_i$ , Reaktion  $T_{si}$ ) für AW04

der normierten Übergangsfunktion errechnet werden (Fläche oberhalb der normierten Übergangsfunktion, Bild 1). Dadurch wird die insgesamt gespeicherte Wärme bei diesem Vorgang berücksichtigt.

Eine Übergangsfunktion  $h(t)$  erhält man aus einem höherwertigen Simulationsprogramm bzw. 2D- oder 3D instationären Wärmebrückenprogramm, wenn die Aktionsgröße (hier  $T_i$  oder  $T_e$ ) zum Zeitpunkt  $t = 0$  von 0 auf 1 gesetzt wird und dann konstant bleibt. Alle anderen Aktionsgrößen werden dabei zu Null gesetzt. Die Normierung ergibt sich aus dem Bezug auf den stationären Endwert bei  $t \rightarrow \infty$  und dem etwaigen „Durchgriff“ bei  $t = 0$  (Reaktion ohne Zeitverzug bei speicherlosen Bauteilen).

$$h_n(t) = \frac{h(t) - h(0)}{h(\infty) - h(0)} \quad (7)$$

- $h(t)$  Übergangsfunktion abhängig von der Zeit in °C
- $h(0)$  Anfangswert der Übergangsfunktion bei  $t = 0$  (Durchgriff) in °C
- $h(\infty)$  stationärer Endwert der Übergangsfunktion in °C
- $h_n(t)$  normierte Übergangsfunktion in -
- $t$  Zeit

Das SZK-Verfahren ist also wertetreu bezüglich dem stationären Verhalten und der Gesamtwärmespeicherung bei dynamischen Vorgängen. Es berücksichtigt auch eine außenseitige Aktion, die Einfluss auf die raumseitige Oberflächentemperatur nimmt. Für die Berechnung der beiden Summenzeitkonstanten von ebenen Bauteilen kann das kostenlose Tool „SZKBauteile.zip“ [6] verwendet werden (Bild 2). Ein Beispiel für die Simulation in der Datei „AW08\_Ytong-Außenwand mit Außendämmung.xlsx“ in [6] enthalten. Hierin findet sich auch der Vergleich mit dem Simulationsmodell Zustra (s.u.) und kann als Vorlage für eine Validierung mit weiteren Modellen verwendet werden. Die Schichtaufbaudaten der Bauteile in Tabelle 1 sind ebenfalls in [6] aufgeführt.

#### Beispiele für ebene Bauteile

In den folgenden Beispielen für ebene Bauteile wird das grundsätzliche dynamische Verhalten untersucht, welches sich durch Variation einiger Parameter, z.B. die Wirkung der Anordnung einer Wärmedämmung, ergibt. Die Beispiele sollen Hinweise auf die Größenordnung der Summenzeitkonstante geben und

einen Vergleich des Ersatzmodells mit analytisch und numerisch ermittelten Ergebnissen vornehmen.

#### Übergangsfunktionen

Die auf den stationären Endwert normierte Übergangsfunktion kennzeichnet grafisch das dynamische Verhalten und ist in Bild 3 und 4 für eine Außenwand mit Innendämmung und für beide Aktionsgrößen dargestellt.

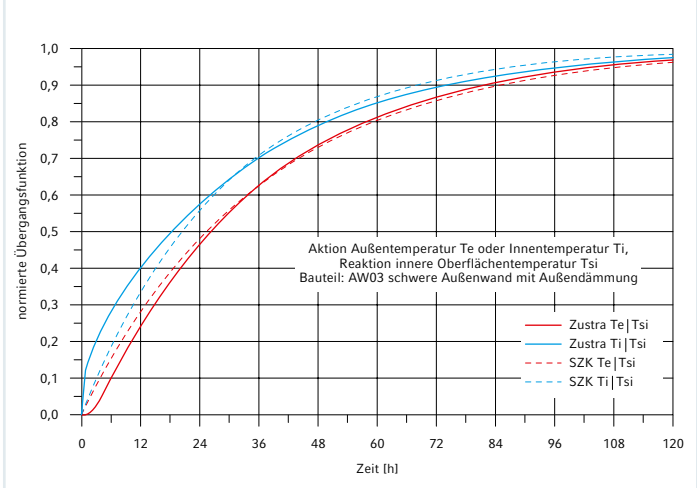
- Die farbigen Linien sind gekennzeichnet durch
  - a) Rote durchgezogene Linie: Analytische Lösung im Laplace-Bereich durch Multiplikation der Kettenmatrizen und numerische Rücktransformation in den Zeitbereich
  - b) Blaue strichpunktierte Linie: berechnet mit Zustandsraummethode (Zustra, halbanalytisches Verfahren aus der Systemtheorie, wird auch für thermische Gebäudesimulationen eingesetzt)
  - c) Grau gestrichelte Linie: berechnet mit Verfahren der Summenzeitkonstante (SZK-Verfahren)

Man erkennt in Bild 3, dass erst nach ca. 60 h der stationäre Zustand erreicht wird. Das liegt weit über einer Tagesperiode. Die schnelle Antwort im Bild 4 stellt keinen Durchgriff dar. Sie resultiert daraus, dass durch die Innendämmung der Wärmespeicher praktisch abgeschnitten wird. Bei allen Beispielen lagen die Linien a) und b) übereinander, was die sehr gute Eignung der Zustandsraummethode auch für Validierungszwecke belegt. Im Fall von Bild 4 liegt a), b) und c) übereinander, was auch weitgehend für alle Leichtbauteile gilt.

Unterschiede in der Speicherwärme bzw. in den Zeitkonstanten für außen und innen sind auch bei einer schweren Außenwand mit Außendämmung und einer einschichtigen 200 mm dicken Betonmauer vorhanden (vgl. Bilder 5 und 6). Die Reaktion auf eine Innentemperaturänderung (blaue Kurven) ist dabei schneller, als auf eine Außentemperaturänderung (rote Kurven).

Aus dem Vergleich Bild 5 mit Bild 6 kann man den Einfluss der Außendämmung ablesen, welche sich massiv auf das Speicherverhalten der raumseitigen Oberflächentemperatur auswirkt. Die Außendämmung verringert bei der Aktion  $T_i$  den Abfluss nach außen, wodurch mehr Wärme gespeichert werden kann. Dagegen

### 5 Normierte Übergangsfunktionen für AW03

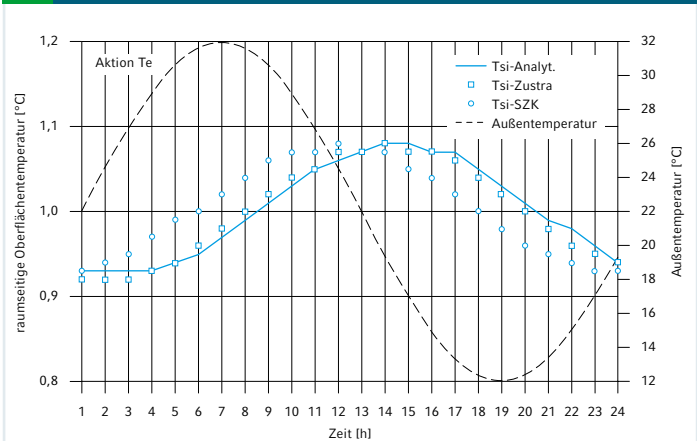


wird bei der Aktion  $T_e$  das Eindringen in das Bauteil verzögert. Das bedeutet für Verfahren, welche die Schichten auf der gegenüberliegenden Seite vernachlässigen (z.B. [2, Abschnitt C.2.4]), dass sie nicht für alle Bauteilaufbauten anwendbar sind.

Die Tabelle 1 enthält weitere Beispiele, aus denen man den Einfluss der Schichtaufbauten auf die Summenzeitkonstanten und auf die Stationärwerte entnehmen kann.

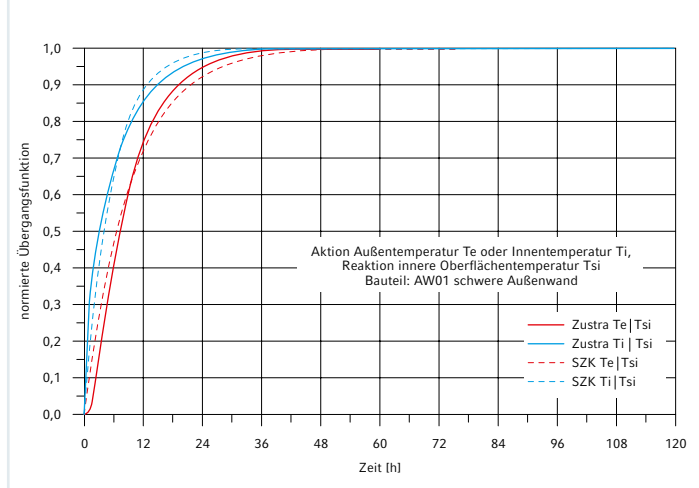
In Außen- und Innentemperatur lässt sich die absorbierte Sonnenstrahlung auf beiden Oberflächen einrechnen, wodurch fiktive Temperaturen für die Berechnung entstehen. Diese werden auch kombinierte oder äquivalente Temperaturen genannt. Je nachdem, ob ein Bauteil von außen verschattet wird oder ob die in den Raum transmittierte Sonnenstrahlung hoch oder gering ist, wirkt sich diese unterschiedlich stark auf die fiktiven Temperaturen aus. Das ist ein grundsätzliches Problem in der DIN EN ISO 13786, wo es darum geht, ob ein Bauteil als schwer oder leicht einzustufen ist. Die Berechnung der Wärmekapazität in dieser Norm geht nur von Schwankungen der Innentemperatur aus. D.h., das Bauteil von außen betrachtet kann eine ganz andere Wärmespeichereigenschaft bezüglich  $T_{si}$  aufweisen (Tabelle 1).

### 7 Sinusverlauf von $T_e$ für AW03 bei $T_i = 0\text{ °C}$ .



Maximaler Fehler 0,05 K.

### 6 Normierte Übergangsfunktionen für AW01



#### Sinusverlauf

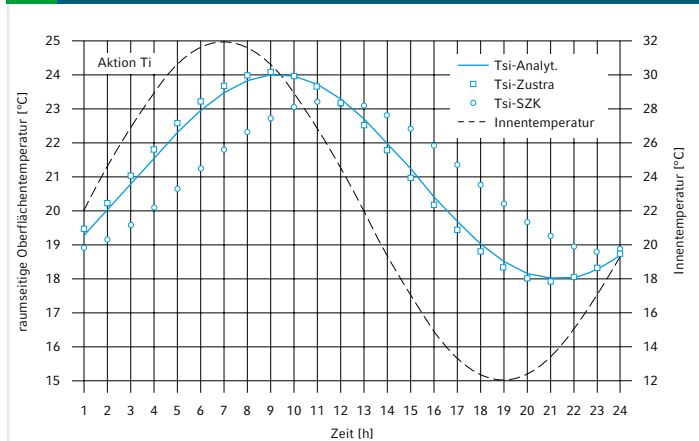
Eine weitere Möglichkeit zur Validierung des Verfahrens ist der Vergleich mit einem Sinusverlauf für Außen- und Innentemperatur. Periodische Vorgänge kann man mit den Kettenmatrizen im eindimensionalen Fall analytisch simulieren. Zusätzlich kommt hier die o.g. Zustandsraummethode (Zustra) in den Bildern 7 und 8 zum Einsatz, um auch dieses Verfahren für die nachfolgende Jahressimulation zu überprüfen. Die durchgezogenen Linien stellen die analytischen Lösungen für periodische Schwingungen dar. Die Quadrat-Symbole der Zustandsraummethode schmiegen sich dem analytischen Verlauf

an. Der Tsi-SZK-Verlauf zeigt eine größere Abweichung vom analytischen Ergebnis, vor allem bei der Aktion Innentemperatur, die allerdings eine sehr große Amplitude aufweist.

#### Simulation

Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse einer Simulation mit vorgegebenen Außen- und Innentemperaturen dargestellt. Für die Außentemperaturen kommen zwei Variationen zur Anwendung. Eine extrem kalte Winterperiode und ein Jahr mit hohen Außentemperaturen. Die Innentemperaturen in der Jahressimulation werden aus der raumseitigen Randbedingung der

### 8 Sinusverlauf von $T_i$ für AW03 bei $T_e = 0\text{ °C}$ ,



Maximaler Fehler 1,71 K.

**Tabelle 2: Abweichungen des SZK-Verfahrens von der Zustandsraummethode für die Bauteile aus Tabelle 1 jeweils für eine Jahressimulation.**

Bauteil	StdAbw [K]	mittlAbw [K]	maxAbw [K]	lfdStdMax [h]	Datum	minAbw [K]	lfdStdMin [h]	Datum
AW01	0,25	0,00	0,85	3131	11.05.	-0,78	4076	19.06.
AW02	0,00	0,00	0,00	1	01.01.	-0,01	179	08.01.
AW03	0,02	0,00	0,09	2858	30.04.	-0,12	2954	04.05.
AW04	0,02	0,00	0,06	2941	03.05.	-0,06	4777	19.07.
AW05	0,00	0,00	0,01	51	03.01.	-0,01	37	02.01.
AW06	0,01	0,00	0,07	7321	02.11.	-0,08	2977	05.05.
AW07	0,20	0,00	0,62	3136	11.05.	-0,55	3099	10.05.
AW08	0,03	0,00	0,18	7273	31.10.	-0,22	3913	13.06.
AW09	0,05	0,00	0,17	7273	31.10.	-0,19	2977	05.05.
AW10	0,02	0,00	0,14	7322	02.11.	-0,14	2954	04.05.
DA01	0,03	0,00	0,12	3132	11.05.	-0,10	2953	04.05.
FB01	0,02	0,00	0,05	2059	27.03.	-0,08	63	03.01.
IW01	0,03	0,00	0,12	3105	10.05.	-0,20	4075	19.06.
IW02	0,12	0,00	0,48	3131	11.05.	-0,48	4652	13.07.

DIN 4108-3 [7, Bild D.1] (Bild 9) gebildet. Innentemperaturen in der Heizzeit werden dadurch automatisch auf konstante 20°C gesetzt.

In den ersten Tagen der kalten Periode in Bild 10 wirkt noch der Startwert, der auf 0 °C gesetzt wurde. Bei dieser Anlaufrechnung ist ein Vergleich mit den numerisch ermittelten Werten aus der Zustandsraummethode (Tsi-Zustra) erst nach 3-4 Tagen sinnvoll. Der Kurvenvergleich zwischen Tsi-Zustra und Tsi-SZK zeigt, dass das SZK-Verfahren etwas zu schnell auf die Aktion Außentemperatur reagiert, was

man als Phasenfehler bezeichnet. Diese Erscheinung wurde auch in anderen Beispielen beobachtet, sobald die Summenzeitkonstante  $\tau_{\Sigma,e}$  einen hohen Wert annimmt. Trotzdem weisen die Abweichungen nur Werte unter 0,1 K auf.

Bild 11 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse einer Jahressimulation im Bereich 08.06. bis 13.06. In diesem Zeitraum verändert sich auch die Innentemperatur gem. DIN 4108-3 (rot strichpunktierte Linie) mit dem exponentiell gewichteten gleitenden Tagesmittelwert der Außenlufttemperaturen nach DIN EN 15251 [8]. Auch hier

zeigt sich ein Phasenfehler, der aber zu sehr geringen Abweichungen führt. Die betragsmäßig maximale Abweichung liegt im ganzen Jahr bei 0,22 K.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Abweichungen des SZK-Verfahrens von der Zustandsraummethode für die Bauteile aus Tabelle 1. Nur die beiden Bauteile AW01 und AW07 mit den hohen U-Werten weisen eine Standardabweichung größer gleich 0,2 K auf. Alle anderen Bauteile passen sich hervorragend mit einer minimalen Abweichung von -0,22 K bei AW08 an. Die mittlere Abweichung ist aufgrund der o.g. Wertetreue in allen Fällen 0,00 K.

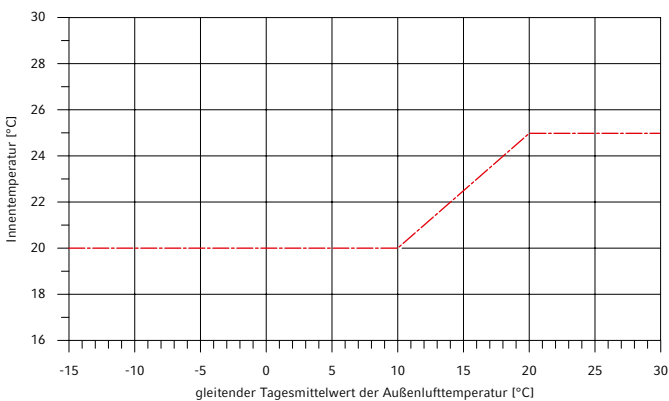
**Ausblick**

Das SZK-Verfahren für einzelne Bauteile lässt sich auf ein Raummodell bestehend aus ebenen Bauteilen erweitern, wenn man die Innentemperatur durch eine thermische Umgebungstemperatur ersetzt. Hierüber wird in einem weiteren Beitrag berichtet. Die thermische Umgebungstemperatur sorgt für die getrennte Berechnung der Konvektion mit Lufttemperatur und des langwelligen Strahlungsaustausches der Raumflächen untereinander mit den raumseitigen Oberflächentemperaturen.

Denkbar ist aber auch, auf die getrennte Strahlungs- und Luftankopplung zu verzichten und weiterhin mit der Innentemperatur unter Einschluss der kurzwelligen Strahlungsabsorption wie oben angegeben zu rechnen. Die Heizlastberechnung nach DIN/TS 12831-1 [9] folgt diesem Ansatz, jedoch ohne kurzwellige Strahlungsabsorption. Begründung hierfür könnte sein, dass durch eine Möblierung des Raumes der Strahlungsaustausch zwischen den raumseitigen Bauteiloberflächen behindert wird und somit nicht in der Planung erfassbar ist. Ob ein solch vereinfachtes Raummodell ausreichend ist, müssten Vergleichsrechnungen mit Simulationsprogrammen beantworten.

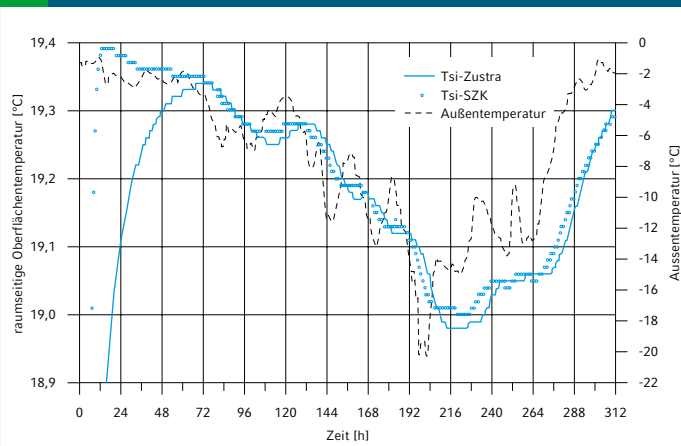
Die Weiterentwicklung des SZK-Verfahrens zu einem Raummodell würde auch dem Nachteil des 2K-Modells der VDI 6007-1 begegnen, dass nur adiabate Räume berechnet werden können. In einem Raummodell nach dem SZK-Verfahren kann nicht nur für jedes einzelne Bauteil eine außenseitige Temperatur angegeben werden, es kann auch ein zusammenhängender Bereich

**9 Innentemperatur in Abhängigkeit**



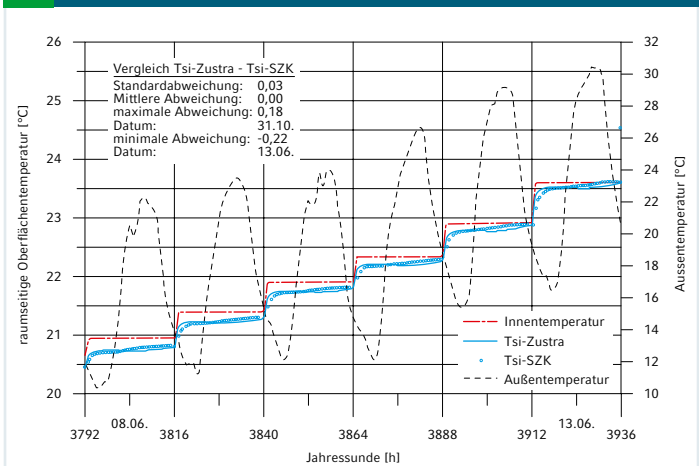
vom gleitenden Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur nach DIN 4108-3 [7, Bild D.1]

## 10 Raumseitige Oberflächentemperatur für AW08



bei  $T_i = 20\text{ °C} = \text{const.}$  und  $T_e$  in Berlin 14.12.-25.12.1969

## 11 Raumseitige Oberflächentemperatur für AW08



bei variabler  $T_i$  und  $T_e$  aus TRY 04\_Sommer (Potsdam)

mit mehreren Räumen in einem Rechenschritt innerhalb eines Zeitschrittes gelöst werden.

Gibt man eine Innentemperatur vor, benötigt man kein Raummodell und es kann ein einzelnes Bauteil bzw. Wärmebrücke dynamisch untersucht werden. Als Anwendung hierfür ist z.B. die Berechnung der erforderlichen Lüftung zur Schimmelpilzvermeidung an erdreichberührten Bauteilen denkbar (Kellerlüftung). Mit der Kenntnis der raumseitigen Oberflächentemperatur zu jedem Zeitschritt, kann der kritische Feuchtegehalt nach DIN/TS 4108-8 [10, Anhang H] berechnet werden. Dieser ist die Voraussetzung für die Ermittlung des erforderlichen Volumenstroms.

### Fazit

Im SZK-Verfahren wird mit nur drei Eingabewerten das dynamische Verhalten eines Bauteils simuliert. Die Beispiele haben gezeigt, dass eine sehr gute Näherung für die raumseitige Oberflächentemperatur von ebenen Bauteilen möglich ist.

Aufgrund der Betrachtung des gesamten Speichervorganges (Bild 1) ist das Verfahren für einen größeren Frequenzbereich geeignet. D.h., das SZK-Verfahren entfaltet seine gute Anpassung besonders bei längeren Zeiträumen mit stark veränderlichen Außenklimadaten, wie z.B. der Simulation mit TRY-Daten.

Die bisherigen Validierungsnormen geben aber meist nur eine kurze Periode mit sinusförmigem Verlauf vor. Deshalb müssen erst neue Validierungsvorgaben entwickelt werden, um das SZK-Verfahren zu etablieren. Diese Vorgaben sollten zunächst die Validierung einzelner Bauteile beinhalten, bevor ganze Räume validiert werden. Damit wird das Kernstück der Simulation, nämlich die Lösung der Wärmeleitungsgleichung, sachgemäß durch Beschränkung der Anzahl der Aktionsgrößen überprüft.

Die Beispiele zeigen auch, dass eine Außendämmung die Wärmespeicherfähigkeit für raumseitige Temperaturschwankungen erhöhen kann. Somit kann die Auswirkung auf den Raum bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes im Prinzip nicht nur anhand der raumseitigen Bauteilschichten beurteilt werden. Für ein solches Verfahren müssten Einschränkungen in der Anwendung definiert werden.

In der Baupraxis kommt es vor, dass die Schichtaufbauten in

einem frühen Planungsstadium noch nicht bekannt sind. Nur die U-Werte der Außenbauteile kann man dem GEG-Nachweis entnehmen. Dabei ist es beim SZK-Verfahren sicherlich zweckdienlich, wenn man bei Vorabberechnungen für die Außenbauteile nur zwei und für die Innenbauteile nur drei Eingabewerte schätzen muss, anstatt sich komplette Schichtaufbauten auszudenken. Da man mit diesen Werten und einem Raummodell schon simulieren kann, könnte die Einschätzung der Bauartschwere ganzer Räume (s. VDI 2078 [11, Abschn. 5.5] und DIN 4108-2 [1, Abschn. 8.3.3]) entfallen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei dieser Art der Einschätzung Räume problematisch sind, bei denen die Bauteile unterschiedliche Wärmespeichereigenschaften aufweisen.

### Literatur

- [1] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth-Verlag.
- [2] DIN EN ISO 13786:2018-04: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag.
- [3] Nadler, N.: C.A.T.S.-Kühllastberechnung. Validierung des Raummodells anhand der neuen VDI 6007-1. tab 12/2012, S. 42-50. Bauverlag BV GmbH.
- [4] DIN EN ISO 10211:2018-03: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen. Beuth-Verlag.
- [5] VDI 6007-1:2015-06. Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Raummodell.
- [6] SZKbauteile.zip auf [www.cse-nadler.de](http://www.cse-nadler.de)
- [7] DIN 4108-3:2018-10: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth-Verlag.
- [8] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Beuth-Verlag.
- [9] DIN/TS 12831-1:2020-04: Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast - Teil 1: Nationale Ergänzungen zur DIN EN 12831-1. Beuth-Verlag.
- [10] DIN/TS 4108-8:2021-??: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden. Beuth-Verlag.
- [11] VDI 2078:1996-07: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln). Beuth-Verlag.