

Thermische Gebäudesimulation

GEBSIMU



Test- und Validierungsbeispiele der DIN EN 15265

zum instationären thermischen Verhalten
von Räumen und Gebäuden

- ***GEBSIMU*** n-Kapazitäten-Modell (n-K-Modell) nach Rouvel
(Referenzverfahren für die Validierung nach VDI 6020)
- ***GEBSIMU*** 2-Kapazitäten-Modell (2-K-Modell) gemäß VDI 6007-1
(nach Rouvel und Zimmermann)

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorbemerkung	1
2.	Kurzbeschreibung der Prüfbeispiele.....	3
3.	Validierung.....	5
4.	Literaturverzeichnis	7

DIN EN 15265 : 2007-11 ist zum April 2018 zurückgezogen worden.

Die Normen **DIN EN 15255** : 2007-11 und **DIN EN 15265** : 2007-11 sowie
DIN EN ISO 13791 : 2012-08 und DIN EN ISO 13792 : 2012-08
sind zum April 2018 zurückgezogen worden und durch
DIN EN ISO 52016-1 : 2018-04 und DIN EN ISO 52017-1 : 2018-04
ersetzt worden.

1 Vorbemerkung

Da die analytischen Methoden für sehr viele Probleme der instationären Wärmeleitvorgänge entweder unzulässige Vereinfachungen oder einen hohen Rechen- bzw. Programmieraufwand erfordern, entwickelte *Beuken* [1] 1936 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 partiellen 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:

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

Die partielle Differentialgleichung tritt in ähnlicher Form bei der Beschreibung der Vorgänge auf elektrischen Übertragungsleitungen auf:

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

Unter Vernachlässigung von L' und G' ergibt sich die Potentialgleichung für das idealisierte Kabel, die ein Analogon zur Wärmegleichung ist:

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

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

Zur praktischen Anwendbarkeit der Analogie zwischen der Gleichung für das idealisierte Kabel und der Wärmeleitgleichung wurde von *Beuken* eine Ersatzschaltung aus diskreten RC-Gliedern aufgebaut. Die Spannung u ist dabei analog der Temperatur ϑ und der elektrische Strom i ist 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 (Pi-Schaltung) der jeweiligen Scheibe konzentriert und mit diskreten Bauelementen nachgebildet.

Brockmeier [2] entwickelte diese Methode weiter und konnte den Aufbau einer kabelnachbildenden RC-Kette aufgrund einer Fehlerbetrachtung in ihrer Genauigkeit beschreiben.

Euser [3] und Bovy [4] zeigten, dass mit Hilfe eines Beuken-Modells die Temperaturschwankungen und die erforderliche Kühlleistung für einen Raum nachgebildet werden können.

Nach *Köhne* und *Woelk* [5] besteht die prinzipielle Möglichkeit, aus dem Beuken-Modell analytische Rechenvorschriften abzuleiten, um das wärmetechnische Verhalten von Wänden und Räumen bei dynamischer Wärmebelastung zu beschreiben.

Das Beuken-Modell kann vom Grundsatz her das instationäre thermische Gebäudeverhalten in beliebiger Genauigkeit nachbilden. Dem sind jedoch in der praktischen Umsetzung als elektrisches Analogiemodell auf Grund der Toleranzen der elektrischen Bauteile, der Übergangswiderstände zwischen den elektrischen Bauteilen usw. Grenzen gesetzt.

Bei einer rechnerischen Umsetzung des Beuken-Modells sind diese Restriktionen nicht mehr gegeben. Dazu eignet sich das anfangs der 70er Jahre an der University of Berkeley, Kalifornien, USA, entwickelte Simulationsprogramm *SPICE* (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) zur Schaltkreisanalyse insbesondere für Integrierte Schaltungen. Der Firma MicroSim gelang es im Jahre 1985, *SPICE* auf den PC zu exportieren (*PSPICE*) [10]. Dadurch lässt sich das Beuken-Modell mit einem PC digital berechnen. Das Programm *PSPICE* analysiert sowohl analoge als auch digitale, lineare und nicht-lineare Schaltkreise zuverlässig und - falls erforderlich - in Nanosekundenschritten. Daher eignet sich das **Beuken-Modell in Kombination mit *PSPICE*** insbesondere als **Prüf- bzw. Eichinstrument** für Berechnungsverfahren.

Aufbauend auf diesen Grundlagen hat Rouvel [7] 1972 ein analoges und digitales Rechenverfahren mittels eines elektrischen „Ersatzmodells“ für die Bauteile eines Raumes hergeleitet, das eine analytische Lösung des Berechnungsalgorithmus ermöglicht.

Diese Modellbildung für den Raum wird als

n-Kapazitäten-Modell (n-K-Modell)

(n Bauteile je Raum mit jeweils 1 bis 2 Kapazitäten je Bauteil)

bezeichnet.

Im Programmsystem „**GEBSIMU** Thermische Gebäudesimulation“ ist dies seit den 70-er Jahren für die praktische Anwendung erfolgreich umgesetzt und wird kontinuierlich gepflegt.

Das **n-K-Modell** von Rouvel [7] ist in VDI 6020 **Basis (Referenz) zur Validierung** von Rechenverfahren zur thermischen Gebäudesimulation.

Eine weitere Vereinfachung der Modellbildung – ohne wesentliche Beeinträchtigung der Genauigkeit - beschreiben Rouvel und Zimmermann in [8], [9] und [12] als

2-Kapazitäten-Modell (2-K-Modell)

(2 Kapazitäten für den Raum mit n Bauteilen)

Das **2-K-Modell** von Rouvel und Zimmermann [12] ist in der **VDI 6007-1** [14] als „Raummodell“ eingegangen und ist somit Grundlage für die Berechnung der Kühllasten und der Raumtemperaturen nach **VDI 2078** [13].

Im Programmsystem „**GEBSIMU** Thermische Gebäudesimulation“ sind **beide Modelle** als alternative Berechnungsverfahren enthalten.

Es werden für beide Modelle dieselben Eingabedaten verwendet; es ist nur ein Umschalten für den zu verwendenden Berechnungsalgorithmus

- **n-K-Modell nach Rouvel**
- **2-K-Modell nach Rouvel und Zimmermann**

erforderlich.

2 Kurzbeschreibung der Prüfbeispiele

Mit der Richtlinie DIN EN 15265 (2007:Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs) [18] soll die Bewertung und Validierung der Berechnungsergebnisse eines Simulationsprogrammes für das Heizen, und das Kühlen als Gesamtergebnis über ein gesamtes Jahr bestimmt werden. Der Zeitgang des Heiz- und Kühlbedarfs sowie der Innentemperaturen ist **nicht** Teil der Validierung.

Die Berechnung hat mit einem stark vereinfachten Testreferenzjahr (TRY) zu erfolgen:

- Angaben **nur** zur Außentemperatur, direkte Normalstrahlung, diffuse Himmelsstrahlung auf eine horizontale Fläche;
überflüssige Angabe zur Gesamteinstrahlung auf eine senkrechte Westfläche
- inkonsistente Angaben zu den drei angegebenen Strahlungswerten
- Wetterdatenangaben für Sonnenzeit
- Vorgabe von konstanten Zeitdifferenzen zwischen Sonnenzeit und Uhrzeit über das gesamte Jahr

Die Angaben zum Raum entsprechen weitgehend den Vorgaben in den Richtlinien DIN EN 15255, DIN EN ISO 13791 und DIN EN ISO 13792.

Allerdings gibt es Diskrepanzen für die Angaben der g-Werte von Verglasung und Sonnenschutz.

Auch werden in DIN EN ISO 13792 unterschiedliche Angaben zum Schichtaufbau der Raumflächen in den Tabellen 4 und E2 für dieselben Testbeispiele gemacht.

Weiterhin wird der Strahlungsdurchgang durch die Verglasung bzw. Verglasung incl. Sonnenschutz stark vereinfacht vorgegeben.

Wenn bei den meisten Prüfbeispielen der Fall "mit Sonnenschutz" vorgegeben ist, bedeutet dies offensichtlich einen geschlossenen Sonnenschutz über 24 Stunden pro Tag.

Dies bedingt einen Eingriff in den Berechnungsablauf eines zu testenden Programms. Die Testergebnisse nach DIN EN 15265 sagen daher nur bedingt etwas über die Ergebnisse bei "standardmäßig" berücksichtigten Berechnungsalgorithmen aus. Die Richtlinien VDI 6020 und VDI 2078 erscheinen hierzu einen geeigneteren Validierungspfad einzuschlagen.

Für alle Testbeispiele gilt:

- Nutzung des Raumes von 8 bis 18 Uhr von Montag bis Freitag
- Sollwert für Heizen: 20 °C
- Sollwert für Kühlen: 26 °C
- Wärme- und Kälteabgabe der Anlage rein konvektiv
- keine Begrenzung der Heiz- und Kühllasten

Die Prüfbeispiele unterteilen sich in 2 Gruppen:

- **Erstprüfung:**
24-Stundenbetrieb der Anlage (auch am Wochenende)

Prüfung 1: Bezugsfall
Prüfung 2: wie Prüfung 1, jedoch geänderte Trägheit der Flächen
Prüfung 3: wie Prüfung 1, jedoch keine inneren Wärmeeinträge
Prüfung 4: wie Prüfung 1, jedoch ohne Sonnenschutz
- **Validierungsprüfung:**
 - ◆ **Heizen und Kühlen nur Mo bis Fr 8 bis 18 Uhr**
sonst wie Prüfung 1 bis 4

Prüfung 5: sonst wie Prüfung 1
Prüfung 6: sonst wie Prüfung 2
Prüfung 7: sonst wie Prüfung 3
Prüfung 8: sonst wie Prüfung 4
 - ◆ **mit Dachfläche anstelle der adiabaten Decke**
Heizen und Kühlen nur Mo bis Fr 8 bis 18 Uhr
sonst wie Prüfung 5 bis 8

Prüfung 9: sonst wie Prüfung 5
Prüfung 10: sonst wie Prüfung 6
Prüfung 11: sonst wie Prüfung 7
Prüfung 12: sonst wie Prüfung 8

3 Validierung

Die Bewertung und Validierung der Berechnungsergebnisse eines Simulationsprogrammes für die Testberechnungen nach DIN EN 15265 erfolgt entsprechend Kapitel 9 (Validierungskriterien und Referenzergebnisse) der DIN EN 15265 wie folgt:

Die Ergebnisse für das Heizen, Q_H , und das Kühlen, Q_C , (angegeben in kWh) werden für das gesamte Jahr bestimmt (das stundenbezogene Muster der berechneten Inentemperaturen ist nicht Teil der Validierung) und durch folgende Berechnung mit den Bezugswerten verglichen:

$$rQ_H = \text{abs}(Q_H - Q_H_ref) / Q_tot_ref$$
$$rQ_C = \text{abs}(Q_C - Q_C_ref) / Q_tot_ref$$

Für die Überprüfung gelten drei Genauigkeitsstufen: A, B, C. Die Validierungsprüfungen sind erfüllt, wenn für jeden der Fälle 5 bis 12 Folgendes gilt:

Stufe A :	$rQH \leq 0,05$ und $rQC \leq 0,05$
Stufe B :	$rQH \leq 0,10$ und $rQC \leq 0,10$
Stufe C :	$rQH \leq 0,15$ und $rQC \leq 0,15$

Aus den Ergebnissen für das **GEBSIMU n-K-Modell** ist eindeutig abzuleiten:

Das **GEBSIMU n-K-Modell** ist entsprechend DIN EN 15265 nach Stufe A validiert.

Aus den Ergebnissen für das **GEBSIMU 2-K-Modell** ist abzuleiten:


Das **GEBSIMU 2-K-Modell** ist entsprechend DIN EN 15265 nach Stufe B validiert.

Im Installations-Setup von **GEBSIMU** sind für **alle** Testbeispiele der VDI 6007-1, der VDI 6020, der VDI 2078, des ASHRAE Standard 140-2017 und der DIN EN ISO 52016-1 die Eingabe- und Ergebnis-Dateien sowohl für das **n-K-Modell** als auch für das **2-K-Modell** enthalten.

Prüfbeispiele 1 bis 12 : Validierung nach DIN EN 15265 (Überblick)

GEEBSIMU n-K-Modell


Prüfung	DIN EN15265			GEEBSIMU n-K-M			GEEBSIMU n-K-M zu DIN EN 15265		Validierung nach DIN EN 15265
	Q_H_ref kWh/a	Q_C_ref kWh/a	Q_tot_ref kWh/a	Q_H kWh/a	Q_C kWh/a	Q_tot kWh/a	rQ_H	rQ_C	
1	748,0	233,8	981,8	765,1	243,3	1008,4	0,02	0,01	✓✓✓
2	722,7	200,5	923,2	724,3	197,8	922,1	0,00	0,00	✓✓✓
3	1368,5	43,0	1411,5	1387,8	51,7	1439,5	0,01	0,01	✓✓✓
4	567,4	1530,9	2098,3	598,9	1574,7	2173,6	0,02	0,02	✓✓✓
5	463,1	201,7	664,8	459,9	209,1	669,0	0,00	0,01	✓✓✓
6	509,8	185,1	694,9	504,3	182,7	687,0	0,01	0,00	✓✓✓
3	1067,4	19,5	1086,9	1098,7	19,3	1118,0	0,03	0,00	✓✓✓
4	313,2	1133,2	1446,4	318,9	1182,5	1501,4	0,00	0,03	✓✓✓
9	747,1	158,3	905,4	745,9	176,7	922,6	0,00	0,02	✓✓✓
10	574,2	192,4	766,6	607,6	200,3	807,9	0,04	0,01	✓✓✓
11	1395,1	14,1	1409,3	1463,4	14,6	1411,6	0,05	0,00	✓✓✓
12	533,5	928,3	1461,8	552,6	1003,7	1556,3	0,01	0,05	✓✓✓
Gesamtbewertung :									✓✓✓

	Validierungskriterien nach DIN EN 15265:	Erläuterung zur Validierung nach DIN EN 15265:
	$rQ_H = \text{abs}(Q_H - Q_{H_ref}) / Q_{tot_ref}$	✓✓✓ Stufe A : $rQ_H \leq 0,05$ und $rQ_C \leq 0,05$
	$rQ_C = \text{abs}(Q_C - Q_{C_ref}) / Q_{tot_ref}$	✓✓ Stufe B : $rQ_H \leq 0,10$ und $rQ_C \leq 0,10$
		✓ Stufe C : $rQ_H \leq 0,15$ und $rQ_C \leq 0,15$
		✗ keine Validierung

Prüfbeispiele 1 bis 12 : Validierung nach DIN EN 15265 (Überblick)

GEEBSIMU 2-K-Modell

Prüfung	DIN EN15265			GEEBSIMU 2-K-M			GEEBSIMU 2-K-M zu DIN EN 15265		Validierung nach DIN EN 15265
	Q_H_ref kWh/a	Q_C_ref kWh/a	Q_tot_ref kWh/a	Q_H kWh/a	Q_C kWh/a	Q_tot kWh/a	rQ_H	rQ_C	
1	748,0	233,8	981,8	751,9	225,1	977,0	0,00	0,01	✓✓✓
2	722,7	200,5	923,2	719,5	187,0	906,5	0,00	0,01	✓✓✓
3	1368,5	43,0	1411,5	1383,1	42,9	1426,0	0,01	0,00	✓✓✓
4	567,4	1530,9	2098,3	576,1	1503,0	2079,1	0,00	0,01	✓✓✓
5	463,1	201,7	664,8	464,2	194,9	659,1	0,00	0,01	✓✓✓
6	509,8	185,1	694,9	526,6	173,9	700,5	0,02	0,02	✓✓✓
3	1067,4	19,5	1086,9	1119,6	15,8	1135,4	0,05	0,00	✓✓✓
4	313,2	1133,2	1446,4	321,2	1125,0	1446,2	0,01	0,01	✓✓✓
9	747,1	158,3	905,4	764,5	165,7	930,2	0,02	0,01	✓✓✓
10	574,2	192,4	766,6	632,9	180,7	813,6	0,08	0,02	✓✓
11	1395,1	14,1	1409,3	1492,5	12,0	1411,6	0,07	0,00	✓✓
12	533,5	928,3	1461,8	581,5	944,0	1525,5	0,03	0,01	✓✓✓
Gesamtbewertung :									✓✓

	Validierungskriterien nach DIN EN 15265:	Erläuterung zur Validierung nach DIN EN 15265:
	$rQ_H = \text{abs}(Q_H - Q_{H_ref}) / Q_{tot_ref}$	✓✓✓ Stufe A : $rQ_H \leq 0,05$ und $rQ_C \leq 0,05$
	$rQ_C = \text{abs}(Q_C - Q_{C_ref}) / Q_{tot_ref}$	✓✓ Stufe B : $rQ_H \leq 0,10$ und $rQ_C \leq 0,10$
		✓ Stufe C : $rQ_H \leq 0,15$ und $rQ_C \leq 0,15$
		✗ keine Validierung

4 Literaturverzeichnis

- [1] *Beuken, D.L.*: Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen. Dissertation Freiburg 1936.
- [2] *Brockmeier, K.-H.*: Über ein Beukenmodell kleinster Abmessungen. Elektrotechnische Zeitschrift 72 (1951) Heft 17, S. 525/528.
- [3] *Euser, P.*: Thermische Storingsbronnen. Technisch Physische Dienst. TNO-TH, Delft, Leergang 1967.
- [4] *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.
- [5] *Köhne, H. u. G. Wölk.*: Das digitale Beukenmodell - eine Methode zur Berechnung instationärer Wärmeleitvorgänge. Elektrowärme international 27 (1969) Nr. 7, S. 302/308.
- [6] *Rouvel, L., Seifert, C. und Zimmermann, F.*; Die künftige VDI 2078 im Kontext zur europäischen Normung, HLH Bd. 59 (2008) Nr. 8 - August S. 49/54
- [7] *Rouvel, L.*: Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens von Räumen bei dynamischen Wärmelasten
Brennstoff-Wärme-Kraft 24 (1972), Nr. 6, S. 245/262.
- [8] *Rouvel, L., u. F. Zimmermann*: Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens, Teil 1 und Teil 2, Heizung-Lüftung-Haustechnik 48 (1997) Nr. 10 und 12
- [9] *Rouvel, L., u. F. Zimmermann*: Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens, Teil 3, Heizung-Lüftung-Haustechnik 49 (1998) Nr. 1
- [10] *PSPICE*, PC-Version von *SPICE* (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), MicroSim Corporation: Design Center mit *PSPICE* Version 7.1, October 1996.
- [11] *Rouvel, L.*: Raumkonditionierung - Wege zum energetisch optimierten Gebäude
Schriftenreihe der Forschungsstelle für Energiewirtschaft Band 12, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1978

- [12] *Rouvel, L. und Zimmermann, F.*; Berechnung des instationären thermischen Gebäudeverhaltens, LH Bd. 55 (2004) Nr. 3 S. 39/46 und Nr. 4 S. 24/30
- [13] VDI 2078 Juli 1996: Berechnung von Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)
VDI 2078 Juni 2015: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)
- [14] VDI 6007- Blatt 1 Juni 2015: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell
- [15] VDI 6007- Blatt 2 März 2012: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Fenstermodell
- [16] VDI 6007- Blatt 3 Juni 2015: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung
- [17] VDI 6020 Blatt 1 Mai 2001: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation
VDI 6020 derzeit in Überarbeitung: Anforderungen an thermisch energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation
- [18] DIN EN 15265 November 2007: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 15265:2007
zurückgezogen April 2018, ersetzt durch DIN EN ISO 52016-1:2018-04