

---

# Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden

---

Wolfgang Heße

# Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden

Tatsächliche Versorgungsverhältnisse und  
Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Wolfgang Heße  
Energieeffizienz Sachsen e. V.  
Dresden, Deutschland

ISBN 978-3-658-27570-9                      ISBN 978-3-658-27571-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27571-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020, korrigierte Publikation 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Vorwort

Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme von Wärmeversorgungsanlagen sind die tatsächlichen Versorgungsverhältnisse in der Regel nicht bekannt. Die Bemessung der Heizkessel, der Fernwärmeübergabestationen oder anderer Techniken zur Bereitstellung von Wärmeenergie wie beispielsweise Solaranlagen, Wärmepumpen oder Kraft-Wärme-Koppelungs-Anlagen erfolgt in der Regel auf der Grundlage der im Rahmen der Heizlastberechnung ermittelten Norm-Heizlast nach DIN EN 12 831 [1]. Dafür sind Vorgaben und Annahmen zur Wärmeversorgung zu treffen, welche sich oft als zu „üppig“ herausstellen. Entsprechend werden die Einstellungen der Heizkurven und der Umwälzpumpen vorgenommen. Die Energieeffizienz kann durch eine Anpassung der Einstellungen an die tatsächlichen Versorgungsverhältnisse verbessert werden.

Die Aufwendungen für die Verbesserung der Energieeffizienz sollen mit der eingesparten Energie vergolten werden. Folgende Schätzung kann das Einsparpotenzial veranschaulichen. Für ein Gebäude mit einer Nennwärmeleistung von 100 kW und Vollbenutzungsstunden für Heizung in Höhe von 1600 h/a ergibt sich ein Jahreswärmeverbrauch von 160.000 kWh/a. Es werden ein Einsparpotenzial von 10 % und ein Wärmepreis von 6 Ct/kWh angesetzt. Damit erhält man ein Einsparpotenzial in Höhe von 960 €/a. Dieser Betrag bildet die Grundlage für die Vergütung der Aufwendungen zur Verbesserung der Energieeffizienz.

Um eine auskömmliche Vergütung zu erreichen, sind effiziente Werkzeuge sowohl zur Analyse der Versorgungsverhältnisse als auch zur Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz notwendig. Dies erfordert in vielen Fällen Vereinfachungen der Zusammenhänge. Die Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge bei der Wärmeversorgung von Gebäuden ist Ziel dieses Buches. Dabei geht es um die Betrachtung vorhandener Wärmeversorgungsanlagen und deren Komponenten.

Das Buch richtet sich vor allem an Ingenieure, welche auf dem Gebiet der Beurteilung und Verbesserung der Energieeffizienz bei der Wärmeversorgung von Gebäuden tätig sind. Auch für Energetiker in Kommunen und Betrieben sowie für Auszubildende der Technischen Gebäudeausrüstung sollten die im Buch dargestellten Zusammenhänge von Interesse sein.

Der Autor ist seit 1980 auf dem Gebiet der Optimierung von Wärmeversorgungsanlagen tätig und hat bei der Bearbeitung des Buches umfangreiche Hilfe und Unterstützung erfahren. Dafür möchte er sich an dieser Stelle bedanken.

Für die Anregung zu dieser Veröffentlichung und die fachliche Begleitung gilt mein Dank Herrn PD Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rähler danke ich für die Bearbeitung des regelungstechnischen Teils sowie seine fachliche Unterstützung. Meine Kollegen vom Verein Energieeffizienz Sachsen e. V. Herr Dr.-Ing. Stefan Gnüchtel, Herr Dr.-Ing. Christian Heße, Herr Andreas Kuhl und Herr Michael Seeger haben mich bei der Erarbeitung von Makros zur Auswertung von Messdaten sowie bei der Entwicklung zugeschnittener Messtechnik und bei deren Einsatz tatkräftig unterstützt, und mein ehemaliger Kollege Herr Olaf Bartmuß hat mir bei der Parametrierung von Reglern geholfen. Dafür danke ich Ihnen herzlich.

Ständige und sachkundige Begleiter der Manuskriptbearbeitung waren meine Vereinskollegen Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittmann und Herr Prof. Dr.-Ing. Frank Gabriel sowie mein ehemaliger Kollege Herr Dr.-Ing. Roland Krannich. Ihnen danke ich für die hilfreiche Unterstützung.

Von Firmen-Mitarbeitern wurde mir ebenfalls Hilfe und Unterstützung gewährt. Mein Dank gilt Herrn Mathias Peterzelt von Grundfos®, Herrn Dr.-Ing. Gunter Herklotz von Rineta®, Herrn Frank Bendix von Viessmann® und Herrn Alf Bauer von Wilo®.

Viele Messungen wurden in Gebäuden der Dresdner Wohnungsgenossenschaften Aufbau Dresden eG und Johannstadt eG durchgeführt. Für die Erlaubnis dazu und die Unterstützung danke ich den Vorständen Herrn Dr. Hans-Peter Klengel und Herrn Alrik Mutze sowie dem Bauleiter Herr Aron Nagetusch und der Sachbearbeiterin Haustechnik Frau Ute Schoenig.

Ebenfalls danke ich dem Springer-Verlag und Herrn Dr. Daniel Fröhlich vom Lektorat Energie- und Umwelttechnik für die Hilfe und die Unterstützung sowie meiner Frau Monika Heße für ihre Hilfe bei der Bearbeitung vieler Bilder und vor allem für ihr Verständnis, gemeinsame Stunden dem Werden dieses Buches zurückzustellen.

Trotz der sorgfältigen Bearbeitung des Buches lassen sich Fehler oder Unklarheiten manchmal nicht vermeiden. Diesbezügliche Anmerkungen oder Anregungen zur Ergänzung des Buches werden dankbar aufgenommen. Sie können an [w.hesse@energieeffizienz-sachsen.org](mailto:w.hesse@energieeffizienz-sachsen.org) gerichtet werden.

---

## Literatur

[1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: DIN EN 12831: *Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*, 2003

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
<b>2</b>	<b>Verbrauchs-Kosten-Darstellungen</b>	5
<b>3</b>	<b>Meteorologische Grundlagen</b>	11
3.1	Außentemperatur	11
3.1.1	Jahresdauerlinie der Außentemperatur	13
3.1.2	Gradtagszahl und Klimafaktor	14
3.2	Globalstrahlung	15
<b>4</b>	<b>Beurteilung des Wärmeverbrauchs von Gebäuden</b>	19
4.1	Verbrauchserfassung – Wärmezähler als Informationsquelle	19
4.2	Teillastverhalten als Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur	23
4.3	Teillastverhalten – Beurteilung der Energieeffizienz	30
4.4	Normierung des Wärmeverbrauchs	31
4.5	Bemessung von Wärmezählern	33
<b>5</b>	<b>Heizungsanlagen</b>	39
5.1	Ein- und Zweirohr-Systeme	39
5.2	Heizkurve	41
5.2.1	Theoretische Heizkurve	41
5.2.2	Praktische Implementierung von Heizkurven	48
5.3	Umwälzpumpen	54
5.3.1	Pumpentypen und Regelungsarten	54
5.3.2	Pumpenwirkungsgrad/Abhängigkeit von Volumenstrom und Förderhöhe	57

5.4	Hydraulischer Abgleich	61
5.4.1	Vorbemerkungen	61
5.4.2	Wärmeleistung von Heizflächen in Abhängigkeit vom Massestrom	63
5.4.3	Betriebsführung und hydraulischer Abgleich	64
5.4.4	Fazit zum hydraulischen Abgleich	65
<b>6</b>	<b>Trinkwasser-Erwärmungsanlagen</b>	<b>67</b>
6.1	Energetische Betrachtungen	67
6.1.1	Vorbemerkungen	67
6.1.2	Fernwärmeversorgung	67
6.1.3	Wärmeversorgung mit Gaskessel	70
6.2	Systeme der Trinkwarmwasser-Bereitung (TWWB)	71
6.2.1	Speicher-System	71
6.2.2	Speicher-Lade-System	72
6.2.3	Gepuffertes Durchfluss-System	74
6.3	Bemessungsempfehlungen für die Trinkwarmwasser-Bereitung	75
6.3.1	Bedarfskennzahl und Trinkwarmwasservolumenstrom	75
6.3.2	Bemessungsempfehlungen für Wohngebäude	78
<b>7</b>	<b>Regelungseinrichtungen</b>	<b>87</b>
7.1	Vorbemerkungen	87
7.2	Regelkreis und Regelstrecke	88
7.2.1	Regelkreis	88
7.2.2	Regelstrecke	89
7.3	Regeleinrichtung	94
7.3.1	Grundstruktur	94
7.3.2	Reglertypen	94
7.3.3	Stetige Regler	96
7.3.4	Zweipunkt-Regler mit Proportional-Regelstrecken	105
7.3.5	Dreipunkt-Regler	108
7.3.6	Stetig-ähnliche Regelungen	109
7.4	Regelgüte	110
7.4.1	Allgemeine Bemerkungen und Definitionen	110
7.4.2	Nichtlinearität und ihre Wirkungen	113
7.4.3	Störgrößen	118
7.5	Messtechnische Ermittlung der Einstellgrößen für einen PI-Regler	123
<b>8</b>	<b>Verbesserung der Energieeffizienz</b>	<b>129</b>
8.1	Umwälzpumpen	131
8.2	Heizkurven	134
8.3	Regelgüte	139
8.4	Verbrauchs-Controlling	141

---

<b>9</b>	<b>Energieeffizienz ausgewählter Anlagentechniken</b> .....	143
9.1	Gas-Brennwert-Kessel mit thermischer Solaranlage .....	143
9.2	Hydraulische Weiche .....	147
9.3	Fernwärme-Kompaktstation .....	149
9.4	Elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpe .....	151
9.5	Blockheizkraftwerk .....	153
9.6	Thermische Solaranlage .....	162
<b>Erratum zu: Heizungsanlagen</b> .....		E1
<b>Literatur</b> .....		165
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....		167



---

# Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

---

## Abkürzungen

<i>AP</i>	Arbeitspunkt
<i>BHKW</i>	Blockheizkraftwerk
<i>COP</i>	Leistungskoeffizient für Wärmepumpen (coefficient of performance)
<i>FW</i>	Fernwärme
<i>KPS</i>	Fernwärme-Kompaktstation
<i>prim</i>	Primärseite eines Wärmeübertragers
<i>SCOP</i>	Arbeitskoeffizient für Wärmepumpen (seasonal coefficient of performance)
<i>sek</i>	Sekundärseite eines Wärmeübertragers
<i>TWWB</i>	Trinkwarmwasserbereitung
<i>VRK</i>	Vorregelkreis

---

## Formelzeichen und Indizes

Die Formelzeichen und Indizes werden getrennt für Wärme- und Regelungstechnik angegeben, weil es sich um unterschiedliche physikalische Bereiche handelt.

## Wärmetechnik

<i>a</i>	Koeffizient in Gl. 4.7 zur Berechnung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur
<i>A</i>	Fläche allgemein
<i>AP</i>	Arbeitspreis
<i>A<sub>WF</sub></i>	Wohnfläche
<i>b</i>	Koeffizient in Gl. 4.7 zur Berechnung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur
<i>c<sub>p</sub></i>	spezifische Wärmekapazität

$f$	Umrechnungsfaktor allgemein
$f_P$	Umrechnungsfaktor Wirkungsgrad Pumpe
$g$	Gravitationsbeschleunigung an der Erdoberfläche
$G$	Gewicht
$GP$	Grundpreis
$G_t$	Gradtagszahl allgemein
$G_{t, 15/20}$	Gradtagszahl für eine Heizgrenztemperatur von 15 °C und eine Raumtemperatur von 20 °C
$H$	Förderhöhe von Pumpen
$H_S$	Brennwert Endenergie
$H_{S,n}$	Brennwert Endenergie im Normzustand
$I_{gl}$	Globalstrahlung
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient
$k_N$	Wärmedurchgangskoeffizient im Normzustand
$k_{VS}$	Durchflussbeiwert
$K_{FW}$	Kosten Fernwärme
$K_{Gas}$	Kosten Erdgas
$m$	Masse
$MP$	Messpreis bei Fernwärmebezug
$\dot{m}$	Massestrom
$\dot{m}_N$	Norm-Massestrom
$n$	Wohnungszahl für die TWWB
$N$	Bedarfskennzahl für die TWWB
$p$	Heizflächenexponent oder Belegungszahl für die TWWB
$P$	Elektroenergie
$P_1$	Leistung Pumpe, richtig wäre $\dot{P}_1$
$P_{1a}$	elektrischer Jahresenergieverbrauch Pumpe
$PGF_{AP}$	Preisgleitfaktor Arbeitspreis für Fernwärme
$PGF_{GP}$	Preisgleitfaktor Grundpreis für Fernwärme
$\dot{P}$	elektrische Leistung
$\dot{P}_{rev}$	reversible Leistung Pumpe
$q$	spezifische Wärmeenergie pro Bezugsfläche
$Q$	Wärmeenergie allgemein
$Q_a$	Jahresenergie
$Q_{a, TWWB}$	Jahresenergie für Trinkwarmwasserbereitung
$Q_{Brennst}$	Brennstoff-Energie
$Q_{End}$	Endenergie
$Q_{Nutz}$	Nutzenergie
$\dot{q}$	spezifische Wärmeleistung pro Bezugsfläche
$\dot{q}^*$	spezifische Nennwärmeleistung
$\dot{Q}$	Wärmeleistung allgemein
$\dot{Q}_{Anschl}$	Anschlussleistung

$\dot{Q}_{\text{heizfrei}}$	Wärmeleistung in der heizfreien Zeit
$\dot{Q}_N$	Normwärmeleistung (auch: Normleistung)
$\dot{Q}^*$	Nennwärmeleistung (auch: Nennleistung)
$SP$	Servicepreis bei Fernwärmebezug
$u_1, u_2$	Zeitfunktionen für die TWWB
$v$	Zapfstellenzahl für die TWWB
$V$	Volumen allgemein
$V_{\text{End}}$	Volumen Endenergie
$VP$	Verbrauchspreis
$\dot{V}$	Volumenstrom allgemein
$\dot{V}_N$	Norm-Volumenstrom
$\dot{V}_{\text{Einsp}}$	Einspeise-Volumenstrom zur Leistungsbegrenzung bei Fernwärmebezug
$\dot{V}_{\text{RBM}}$	Volumenstrom Rücklaufbeimischung
$\dot{V}_{\text{VRK}}$	Volumenstrom Vorregelkreis
$\dot{V}_{\text{TWW}}$	Trinkwarmwasser-Volumenstrom
$\dot{V}_{\text{TWW},5}$	Spitzenwert für den 5-min-Volumenstrom Trinkwarmwasser
$\dot{V}_{\text{TWW},10}$	Spitzenwert für den 10-min-Volumenstrom Trinkwarmwasser
$\dot{V}_{\text{TWZ}}$	Zirkulationswasser-Volumenstrom
$\dot{V}_{\text{Zapf}}$	Zapf-Volumenstrom für die TWWB
$w_v$	Zapfstellenbedarf für die TWWB
$w_{v,N}$	Energiebedarf einer Wannenfüllung für die TWWB
$W_B$	Wärmebedarf der Einheitswohnung für die TWWB
$W_z$	Wärmebedarf während der Bedarfszeit für die TWWB
$z$	Zeitdauer oder Bedarfszeit für die TWWB
$z_{\text{HP}}$	Dauer der Heizperiode
$Z$	Gaszustandszahl
$\Delta$	Differenz allgemein
$\Delta p$	Druckdifferenz bzw. Druckverlust
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
$\Delta\vartheta_m$	mittlere Übertemperatur
$\Delta\vartheta_{m,N}$	mittlere Übertemperatur im Normzustand
$\Delta\vartheta_{\text{wÜ}}$	Grädigkeit eines Wärmeübertragers
$\zeta_{\text{BHKW}}$	Nutzungsgrad eines BHKW
$\zeta_{\text{Kessel}}$	Kesselnutzungsgrad
$\zeta_{\text{Solar}}$	Nutzungsgrad einer thermischen Solaranlage
$\eta$	Wirkungsgrad
$\eta_P$	Pumpen-Wirkungsgrad
$\vartheta$	Temperatur allgemein
$\vartheta_a$	Außentemperatur
$\vartheta_{a,\text{grenz}}$	Heizgrenztemperatur
$\vartheta_{a,m}$	mittlere Außentemperatur

$\vartheta_{a, m, HP}$	mittlere Außentemperatur in der Heizperiode
$\vartheta_{a, N}$	Normaußentemperatur
$\vartheta_i$	Raumtemperatur
$\vartheta_R$	Rücklauftemperatur
$\vartheta_{R, Lade}$	Rücklauftemperatur im Ladekreislauf bei Speicher-Lade-Systemen für die TWWB
$\vartheta_{R, Sp}$	Rücklauftemperatur im Speicherkreislauf bei Speicher-Lade-Systemen für die TWWB
$\vartheta_{R, VRK}$	Rücklauftemperatur im Vorregelkreis bei FW-Versorgung
$\vartheta_{TW}$	Trinkwasser-Temperatur
$\vartheta_{TWW}$	Trinkwarmwasser-Temperatur
$\vartheta_{TWZ}$	Zirkulationswasser-Temperatur
$\vartheta_V$	Vorlauftemperatur
$\vartheta_{V, Lade}$	Vorlauftemperatur im Ladekreislauf bei Speicher-Lade-Systemen für die TWWB
$\vartheta_{V, Sp}$	Vorlauftemperatur im Speicherkreislauf bei Speicher-Lade-Systemen für die TWWB
$\vartheta_{V, VRK}$	Vorlauftemperatur im Vorregelkreis bei FW-Versorgung
$\rho$	Dichte
$\varphi$	Heizlastverhältnis

## Regelungstechnik (Abschnitt 7)

$D$	Dämpfungsmaß für Regelschwingung
$K$	Verstärkung allgemein
$K_0$	Regelkreisverstärkung
$K_{0, opt}$	optimale Regelkreisverstärkung
$K_D$	Beiwert für differenzierenden Regleranteil
$K_I$	Beiwert für integrierenden Regleranteil
$K_P$	Beiwert für proportionalen Regleranteil
$K_R$	Verstärkung des Reglers
$K_{R, opt}$	optimale Verstärkung des Reglers
$K_{R, krit}$	kritische Verstärkung des Reglers
$K_S$	Verstärkung der Regelstrecke
$T$	Zeitdauer allgemein
$T_A$	Ausschaltzeitdauer
$T_{an}$	Anregelzeit
$T_B$	Beruhigungszeit, Ausregelzeit
$T_E$	Einschaltzeitdauer
$T_g$	Ausgleichszeit bei einer Sprungantwort
$T_{g, A}$	Ausgleichszeit für Regelgröße, wenn $y = y_1$

---

$T_{g,E}$	Ausgleichszeit für Regelgröße, wenn $y = y_2$
$T_{krit}$	Schwingungsdauer an der Stabilitätsgrenze
$T_L$	Laufzeit eines Stellantriebes
$T_n$	Nachstellzeit eines PID-Reglers
$T_S$	Summenzeit bei einer Sprungantwort
$T_t$	Totzeit bei einer Sprungantwort
$T_u$	Verzugszeit bei einer Sprungantwort
$T_v$	Vorhaltzeit eines PID-Reglers
$T_Z$	Periodendauer pro Schaltzyklus
$X_p$	Proportionalbereich der Regelgröße
$Y_h$	Stellbereich
$e$	Regeldifferenz
$e_{max}$	Maximalwert der Regeldifferenz
$e_{min}$	Minimalwert der Regeldifferenz
$t$	Zeit
$t_1, t_2$	Zeitpunkte
$w$	Führungsgröße
$x$	Regelgröße
$x_B$	Schwankungsbreite der Regelgröße
$x_m$	Mittelwert der Regelgröße
$x_{sd}$	Schaltdifferenz eines Reglers
$y$	Stellgröße
$y_R$	Stellsignal der Regeleinrichtung
$z$	Störgröße
$\Delta x$	Änderung der Regelgröße
$\Delta y$	Änderung der Stellgröße