

Wolfgang Heße

Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden

Tatsächliche Versorgungsverhältnisse
und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung



Springer Vieweg

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 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

Dresden, April 2019

Wolfgang Heße

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einführung** 1
- 2 Verbrauchs-Kosten-Darstellungen** 5
- 3 Meteorologische Grundlagen** 11
 - 3.1 Außentemperatur 11
 - 3.1.1 Jahresdauerlinie der Außentemperatur 13
 - 3.1.2 Gradtagszahl und Klimafaktor 14
 - 3.2 Globalstrahlung 15
- 4 Beurteilung des Wärmeverbrauchs von Gebäuden** 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
- 5 Heizungsanlagen** 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
6	Trinkwasser-Erwärmungsanlagen	67
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
7	Regelungseinrichtungen	87
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
8	Verbesserung der Energieeffizienz	129
8.1	Umwälzpumpen	131
8.2	Heizkurven	134
8.3	Regelgüte	139
8.4	Verbrauchs-Controlling	141

9	Energieeffizienz ausgewählter Anlagentechniken	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
Erratum zu: Heizungsanlagen		E1
Literatur		165
Stichwortverzeichnis		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

a	Koeffizient in Gl. 4.7 zur Berechnung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur
A	Fläche allgemein
AP	Arbeitspreis
A_{WF}	Wohnfläche
b	Koeffizient in Gl. 4.7 zur Berechnung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur
c_p	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_{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_{HP}	Dauer der Heizperiode
Z	Gaszustandszahl
Δ	Differenz allgemein
Δp	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
ζ_{BHKW}	Nutzungsgrad eines BHKW
ζ_{Kessel}	Kesselnutzungsgrad
ζ_{Solar}	Nutzungsgrad einer thermischen Solaranlage
η	Wirkungsgrad
η_P	Pumpen-Wirkungsgrad
ϑ	Temperatur allgemein
ϑ_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
ϑ_i	Raumtemperatur
ϑ_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
ϑ_{TW}	Trinkwasser-Temperatur
ϑ_{TWW}	Trinkwarmwasser-Temperatur
ϑ_{TWZ}	Zirkulationswasser-Temperatur
ϑ_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
ρ	Dichte
φ	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
Δx	Änderung der Regelgröße
Δy	Änderung der Stellgröße

Die häufigste Art der Wärmeübertragung zur Beheizung von Gebäuden erfolgt heute über Heizflächen, welche vom Heizmedium Wasser durchflossen werden. Die Wärmeleistung der Heizflächen wird durch die Vorlauftemperatur und den Volumenstrom bestimmt. Die Vorlauftemperatur wird in der Heizzentrale am Heizungsregler in Abhängigkeit von der Außentemperatur eingestellt. Die Einstellung des Volumenstroms erfolgt an den Heizflächen durch Eingriffe der Thermostatventile, welche eine bestimmte Raumtemperatur gewährleisten sollen. Die Rücklauftemperatur kann als Antwort auf die Einstellungen von Vorlauftemperatur und Volumenstrom angesehen werden.

Abb. 1.1 zeigt das Schema für die Heizwärmeversorgung mit den beiden Zählern für End- und Nutzenergie. Die Zähler für die Endenergien wie Erdgas oder Elektroenergie sind vorhanden, weil damit die Abrechnung des Energielieferers erfolgt. Bei anderen Arten der Endenergie wie Heizöl oder Holzpellets ist eine kontinuierliche Verbrauchserfassung in der Regel nicht möglich. Hierbei muss auf Abrechnungen des Energielieferers zurückgegriffen werden. Der Verbrauch an Nutzenergie wird durch Wärmesähler erfasst.

Als Maß der Verbesserung der Energieeffizienz wird die Verringerung des Endenergieverbrauchs angesehen. Dazu können der Nutzungsgrad der Energieumwandlung ζ

$$\zeta = Q_{\text{Nutz}} / Q_{\text{End}} \quad (1.1)$$

verbessert und der Verbrauch an Nutzenergie bei gleichbleibendem Komfort verringert werden. Zur Kennzeichnung der Zeitdauer des Energieverbrauchs wird von einem Jahresnutzungsgrad ζ gesprochen. Als Wirkungsgrad η wird dasselbe Verhältnis für die jeweiligen Leistungen bezeichnet.

Bei der Wärmeversorgung sind Erdöl und Erdgas die wichtigsten Endenergien. Für diese gilt

$$Q_{\text{End}} = V_{\text{End}} \times H_s \quad (1.2)$$

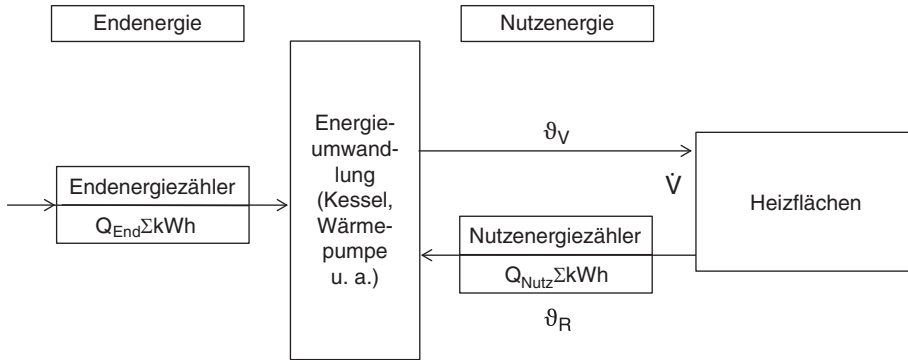


Abb. 1.1 Schema Energieumwandlung

V_{End} Volumen Endenergie in m^3 oder l

H_s Brennwert Endenergie in kWh/Nm^3 oder kWh/l

Für Erdgas werden der Brennwert $H_{s,n}$ in kWh/Nm^3 und die Gas-Zustandszahl Z in Nm^3/m^3 angegeben. Nm^3 bedeutet das Volumen im Normzustand. Die Gaszustandszahl berücksichtigt die Abweichung des Gaszustandes an der Lieferstelle vom Normzustand. Der Brennwert wird aus $H_s = H_{s,n} \times Z$ ermittelt. Die Werte von $H_{s,n}$ und Z können den Abrechnungen der Energielieferer entnommen werden.

Kennzeichnend für die Untersuchungen der Wärmeversorgungsanlagen ist die Auswertung von Verbrauchsmessungen und deren Beurteilung in Bezug zu theoretischen Grundlagen. Der Weg zu einer Verbesserung der Energieeffizienz beginnt demnach mit einer möglichst stichhaltigen Analyse der bestehenden Versorgungsverhältnisse. Hierzu werden im Kap. 2 Verbrauchs-Kosten-Diagramme als eine erste Orientierung vorgestellt. Grundlage für diese Diagramme sind Jahresrechnungen mit Angaben zum Energieverbrauch und deren Kosten. Um unterschiedliche Gebäude miteinander vergleichen zu können, ist der Bezug auf eine Fläche notwendig.

Zur Beurteilung des Energieverbrauchs ist die Kenntnis zweier meteorologischer Größen notwendig. Das sind die Außentemperatur für den Wärmeverbrauch von Gebäuden und die Globalstrahlung für den Energieertrag solarer Systeme. Im Kap. 3 wird gezeigt wie beide Größen aus Informationen der meteorologischen Stationen gewonnen werden können.

Im Kap. 4 erfolgt eine Beurteilung des Wärmeverbrauchs von Gebäuden. Mit Hilfe der in Wärmezählern gespeicherten Verbrauchsdaten können die Versorgungsverhältnisse als Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur dargestellt und Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Energieeffizienz abgeleitet werden. Des Weiteren kann die erforderliche Nennwärmeleistung ermittelt und mit der berechneten Normwärmeleistung verglichen werden. Oft ist die Normwärmeleistung deutlich größer als die Nennwärmeleistung. In diesen Fällen muss davon ausgegangen werden, dass auch die

Komponenten der Wärmeversorgung wie Heizkessel, Heizflächen, Umwälzpumpen und Stellventile zu groß bemessen sind.

Kap. 5 beschäftigt sich mit Heizungsanlagen und den beiden wichtigsten „Stellschrauben“ für deren Einstellung, den Heizkurven und den Umwälzpumpen. Neben der theoretischen Ableitung der Heizkurve werden für ausgewählte Hersteller die Parameter der Heizkurveneinstellung vorgestellt. Für Umwälzpumpen werden ebenfalls die theoretischen Grundlagen und für ausgewählte Hersteller die Parameter der Pumpeneinstellung genannt. Schließlich werden Betrachtungen zum hydraulischen Abgleich durchgeführt. Dabei geht es vor allem darum, wie die Wirksamkeit des hydraulischen Abgleichs erreicht werden kann, wenn die Normwärmeleistung deutlich größer als die erforderliche Nennwärmeleistung ist.

Neben dem Wärmeverbrauch für die Heizung ist bei den meisten Gebäuden der Wärmeverbrauch für die Trinkwarmwasser-Bereitung (TWWB) eine nicht zu vernachlässigende Größe. Im Kap. 6 werden energetische Betrachtungen durchgeführt, und es werden die wichtigsten Systeme der TWWB vorgestellt. Messungen an TWWB-Anlagen haben gezeigt, dass die der Bemessung zugrunde liegenden Trinkwarmwasser-Volumenströme deutlich größer sind. Es werden deshalb Bemessungsempfehlungen genannt.

Regelungstechnische Aspekte stehen bei der Untersuchung von Wärmeversorgungsanlagen oft nicht im Fokus der Betrachtungen. Im Kap. 7 werden Grundlagen vorgestellt und Empfehlungen für die Einstellung der wichtigsten Parameter genannt.

Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bilden den Inhalt von Kap. 8. Betrachtet werden anhand ausgewählter Beispiele Umwälzpumpen und Heizkurven. Ebenfalls werden Hinweise zur Verbesserung der Regelgüte genannt. Wichtig für die Erhaltung des durch diese Maßnahmen erreichten Versorgungsniveaus ist ein Verbrauchs-Controlling. Dazu wird die im Abschn. 4.2 vorgestellte Methode der Darstellung der Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur empfohlen.

Im letzten Kap. 9 werden Systeme der Wärmeversorgung anhand ausgewählter Beispiele vorgestellt. In die Auswahl sind Anlagen einbezogen worden, für welche vom Autor Untersuchungen zur Verbesserung der Energieeffizienz durchgeführt wurden. Es werden anhand von Bilanzschemata die Art der Wärmeversorgung dargestellt und mit Hilfe der verfügbaren Verbrauchsinformationen Berechnungen der die Energieeffizienz kennzeichnenden Koeffizienten durchgeführt.

Viele der durchgeführten Berechnungen werden anhand von EXCEL®-Schemata erläutert und sollen für den Leser eine Hilfe sein, diese selbst durchführen zu können.

Eine erste Orientierung zur Wärmeversorgung erhält man mit Verbrauchs-Kosten-Darstellungen. Grundlage hierfür sind Jahresrechnungen, die Verbrauch und Kosten ausweisen. Um die Versorgungseinheiten miteinander vergleichen zu können, ist ein Bezug auf die Versorgungsfläche sinnvoll.

Abb. 2.1 zeigt eine solche Darstellung für Gebäude, deren Wärmeversorgung mit Gaskessel (rote Linie) oder Fernwärme (blaue Linie) erfolgt. Die ausgewerteten Jahresrechnungen reichen von 2015 bis 2017. Wichtig für die Vergleichbarkeit ist, dass es im gewählten Zeitraum keine nennenswerten Preisänderungen gibt.

Das Diagramm ist in vier Quadranten aufgeteilt. Es werden drei Quadranten *zu hohe Kosten*, *Handlungsbedarf* und *in Ordnung* genannt. Im vierten, nicht bezeichneten Quadranten gibt es keine Gebäude mit Fernwärmeversorgung.

Für den spezifischen Wärmeverbrauch wurden $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ als Grenze angegeben. Dieser Wert wurde bei vielen Wohngebäuden mit einem Wärmedämmstand ab 1995 als Summe aus dem Jahresverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung gemessen. Die Grenze für die spezifischen Kosten von $11 \text{ €/}(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ist diejenige für den Fernwärmebezug bei einem spezifischen Verbrauch von $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Des Weiteren ist zu bemerken, dass der Jahresverbrauch nicht außentemperaturbereinigt ist. Da beim Vergleich der Gebäude der Schwerpunkt bei den Kosten liegt, ist die Außentemperaturkorrektur nicht relevant. Der spezifische Wärmepreis ist der Anstieg beider Geraden und beträgt $5,96 \text{ Ct/kWh}$ für Erdgas und $9,33 \text{ Ct/kWh}$ für Fernwärme.

Die Unterscheidung zwischen Gaskessel- und Fernwärme-Anlagen ist notwendig, weil die Jahresrechnungen für Erdgas und Fernwärme verschiedene Preisbestandteile enthalten. Des Weiteren sind auf den Gasrechnungen Endenergie und auf den Fernwärmerechnungen Nutzenergie ausgewiesen. Die Differenz beider wird durch den Nutzungsgrad der Energieumwandlung gemäß Gl. 1.1 bestimmt.