

Vorschläge zur Umsetzung der EU-Richtlinie: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden Effizienz von Wärmeerzeugern

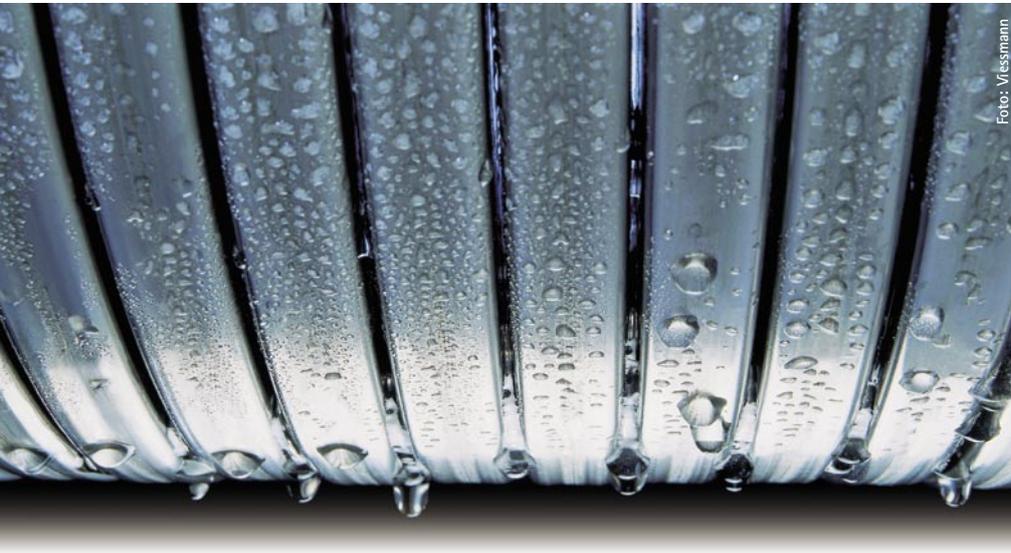


Foto: Viessmann

„E-A-V: Energieanalyse aus dem Verbrauch“ im TGA Fachplaner 9-2004 hat die Vorteile einer mit Wärmemengenzählern durchgeführten Verbrauchsanalyse zur Ermittlung von Gebäudekennwerten beschrieben. Eine kürzlich abgeschlossene, von der DBU geförderte Feldstudie zeigt, dass sich mit den gleichen Messeinrichtungen ebenso alle wichtigen Kennwerte fossil beheizter Wärmeerzeuger ableiten [1] lassen.

Das DBU-Projekt „Felduntersuchungen: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gasbrennwertkessel“ [1] (kurz: „Brennwertanlagen“) sollte primär die Frage beantworten, ob für die Bewertung von Wärmeerzeugern häufig herangezogene Normnutzungsgrade von bis zu 109% (H_u bezogen) im Praxisbetrieb erreicht werden und ob der Jahresnutzungsgrad des Kessels als alleiniges Beurteilungskriterium einer Heizungsanlage für die energetische Effizienz ausreicht. Dazu wurden 60 Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln und sieben Heizungsanlagen mit Gas-Niedertemperaturkesseln mit zusätzlichen

Wärmemengenzählern so ausgestattet, dass die zugeführte Energie (Input) über die Gasmenge und die abgeführte Energie (Output) über die Wärmemengenzähler erfasst wurde.

Die Messwerterfassung entspricht damit den für die „E-A-V: Energieanalyse aus dem Verbrauch“ [TGA 9-2004] getroffenen Abgrenzungen (Bild 1). Der Schwerpunkt der Ausführungen in dem ersten Teil lag auf der messtechnischen Bestimmung von Kennwerten, die den beheizten Bereich beschreiben sowie der Bewertung der Wärmeverluste von Rohrleitungen im unbeheizten Bereich des Gebäudes. Die nachfolgend beschriebene Feldstudie „Brennwertanlagen“ zeigt, dass sich mit der gleichen Messausstattung auch alle wichtigen Kennwerte fossil beheizter Wärmeerzeuger ableiten lassen.

Aus den Ergebnissen werden unten Anforderungen für einen effizienten Betrieb von Brennwertkesseln abgeleitet, die bei der Umsetzung der EU-Richtlinie „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ [12] in einen Energiepass berücksichtigt werden sollten, denn die Feldanalyse zeigt eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit des realen Nutzungsgrads von Merkmalen des vom Wärmeerzeuger versorgten Heizsystems. Die am Beispiel der Brennwertkessel aufgezeigten Zusammenhänge lassen sich grundsätzlich auch auf andere Wärmeerzeuger übertragen.

Wichtige Ergebnisse aus den Feldmessungen

Als eines der wichtigsten Ergebnisse konnte eine unmittelbare Abhängigkeit des Jahresnutzungsgrads vom Wärmeverbrauch und von der mittleren Kesselauslastung festgestellt werden. Hier ergeben sich die größten Abweichungen zwischen dem realen Nutzungsgrad und dem auf Prüfständen gemessenen Normnutzungsgrad. Während der Normnutzungsgrad von einer mittleren Belastung von 38,8% ausgeht, liegt die mittlere Belastung aller im Projekt eingesetzten Brennwertkessel bei ca. 9%. Hauptgründe für diese hohe Abweichung liegen

- in der Ableitung des Normnutzungsgrads aus Belastungen nach dem Verlauf der mittleren Tagesaußentemperaturen mit geringfügiger Berücksichtigung von Heizpausen und Fremdwärmegewinnen und
- in der Gleichsetzung von Kesselnennleistung und Gebäudeheizlast in DIN 4702-8, obwohl im Einfamilienhausbereich die Kesselnennleistung von den Leistungsanforderungen der Trinkwarmwasserbereitung bestimmt wird.

Die Kessel in den Feldtestobjekten sind daher gegenüber der Gebäudeheizlast formal um das etwa zwei- bis vierfache überdimensioniert. Der Nutzungsgrad der Anlagen nimmt mit sinkendem Wärme-

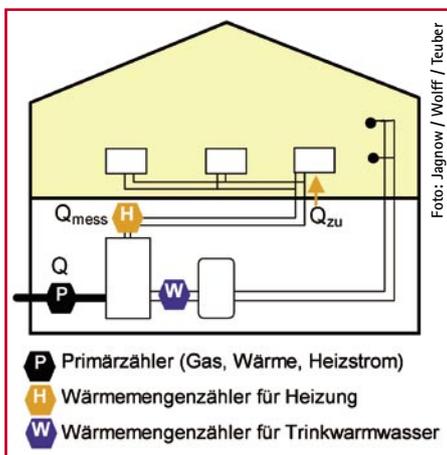


Bild 1 Mit vergleichsweise geringem Aufwand lassen sich sowohl Anlagenkennwerte als auch Kennwerte fossil beheizter Wärmeerzeuger messtechnisch ableiten

verbrauch ab. Trotzdem verringern sich die absoluten Kesselverluste. Deshalb ist der Nutzungsgrad als alleiniges Kriterium zur Beurteilung eines Wärmeerzeugers nicht geeignet.

Weiterhin ergibt die Untersuchung, dass gleiche Wärmeerzeuger in verschiedenen Anlagen bei annähernd gleicher Wärmeabnahme unterschiedliche Jahresnutzungsgrade aufweisen. Für die Effizienz einer Heizungsanlage ist die Qualität des Wärmeerzeugers nur zum Teil verantwortlich. Einen mindestens gleich großen Einfluss haben die Reglereinstellung bei der Inbetriebnahme und die hydraulische Einbindung des Wärmeerzeugers in der Anlage und auch das Nutzerverhalten. Denn unterschiedliche Bedingungen hinsichtlich Raumtemperaturen und Lüftung sowie unterschiedlicher, räumlich und zeitlich eingeschränkter Heizbetrieb wirken sich unmittelbar auf die Kesselbelastung aus.

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Messergebnisse. Die Jahresnutzungsgrade wurden

	BW-Kessel	NT-Kessel
Zahl der Anlagen	60	7
Jahresnutzungsgrad in % (Hu)	96,4	83,4
Jahresnutzungsgrad in % (HO)	86,6	75,3
spez. Kesselverluste (HO) in kWh/(m ² a)	15,9	37,8
spez. Stromverbrauch kWh/(m ² a)	2,91	1,64

Tabelle 1
Durchschnittliche gemessene Jahresnutzungsgrade, Kesselverluste und Hilfsenergien; [1]

aus Jahresmesswerten gebildet. Nähere Erläuterungen zu den Tabellenwerten sind in [1] zu finden. Abhängig von den Systemvoraussetzungen schwanken die auf den Brennwert bezogenen Kesselverluste in neu gebauten Einfamilienhäusern zwischen ca. 5 und 35 kWh/(m²a) bei gleicher Qualität der eingesetzten Brennwertgeräte. Von Einfluss sind:

- die Nutzwärmeabnahme
- die Fläche des Gebäudes
- der Aufstellort des Kessels

- die hydraulische Einbindung mit oder ohne integrierte Pumpe sowie mit oder ohne Einbau eines Überströmventils
- die Einstellung der Kesseltemperaturregelung
- das Heizsystem (Heizkörper oder Flächenheizung)
- sowie weitere Anlagenmerkmale

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Feldmessungen im Projekt „Brennwertanlagen“

größtenteils brennwertbezogen, obwohl bei Angaben von Wirkungs- und Nutzungsgraden in der Branche bis heute (leider) der Bezug auf den unteren Heizwert H_u (europäisch: H_i) überwiegt. Insbesondere bei Brennwertkesseln entstehen dadurch unsinnige Effizienzbewertungen und außerhalb des Fachs kaum zu kommunizierende Nutzungsgrade über 100%. Erste Schritte hin zum Brennwertbezug sind zurzeit in der deutschen und internationalen Normung absehbar. Im Folgenden wurde daher konsequent Bezug auf den oberen Heizwert bzw. auf den Brennwert H_o (europäisch: H_j) gewählt.

Abkehr vom Nutzungsgrad: Neue Darstellung der Verlustkennwerte

Seit Einführung des Niedertemperaturkessels in den 1970er Jahren wurde in unzähligen Fachveröffentlichungen versucht, die Effizienz der Energieausnutzung von gas- bzw. ölbefeuerten Wärmeerzeugern mit dem Begriff „Nutzungsgrad“ als Verhältnis von abgegebener Nutzenergie und zugeführter Brennstoffenergie zu bewerten:

$$\eta = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{V_B \cdot H_u} \quad [\text{Gl. 1}]$$

η : Nutzungsgrad

Q_{Nutz} : vom Kessel abgegebene Wärmemenge

V_B : zugeführte Brennstoffmenge

H_u : unterer Heizwert

Der Nutzungsgrad ist dabei vom Wirkungsgrad zu unterscheiden. Letzterer bewertet nur die Effizienz im durchgehenden Betrieb, d.h. bei laufendem Brenner, wenn lediglich Wärmeverluste über die Kesseloberflächen (Strahlungsverluste) und Abgasverluste – abhängig von der Abgastemperatur und dem eingestellten Luftüberschuss – auftreten.

Im realen Betrieb über einen längeren Zeitraum, z.B. für den Jahresnutzungsgrad über ein Jahr, sind zusätzlich Stillstands- und Bereitschaftsverluste zu berücksichtigen. Diese werden durch Wärmeverluste über die Kesseloberflächen, durch innere Auskühlverluste des Feuerraums aufgrund des Schornsteinzugs bei Brennerstillstand, durch die Vorspülverluste vor dem Brennerstart und vor der Zündung sowie durch die Anfahrverluste bis zum Erreichen stabiler Verbrennungswerte verursacht.

Es gibt jedoch auch andere Darstellungsformen für die Verlustkennwerte. Gebräuchlich ist neben dem Nutzungsgrad η die Aufwandszahl e . In Bild 2 sind beide über der Kesselauslastung aufgetragen. Da beide Kennwerte bezogene Größen sind, geben sie keine Auskunft über die absolute Höhe der Verluste. Die Darstellung von Nutzungsgrad und Aufwandszahl als Funktion der Auslastung ergibt im Bereich geringer Kesselbelastungen stark gekrümmte Verläufe.

Alternativ können zwei absolute Kennwerte verwendet werden (Bild 2c). Die wichtigsten Verlustkennwerte von Heizkesseln sind Abgas- und Abstrahlungsverluste (besser Oberflächenverluste) sowie Verluste der inneren Auskühlung. Sie können zu Verlusten während des Betriebs (Abgas- und Abstrahlungsverluste) und Betriebsbereitschaftsverlusten (Auskühlung und Abstrahlungsverluste) zusammengefasst werden.

So kann zum einen der von der Wärmeabgabe relativ unabhängige Kennwert für die sowieso vorhandenen Bereitschaftswärmeverluste $Q_{g,\text{Sowieso}}$ angegeben werden. Vereinfacht wird hier angenommen, dass die zugehörige Verlustleistung unabhängig vom Betriebszustand (Brenner ein oder aus) etwa konstant ist. Der zweite Wert $Q_{g,\text{Umwandlung}}$ beschreibt die Verluste bei der Energieumwandlung der Nutzwärme und der sowieso vorhandenen

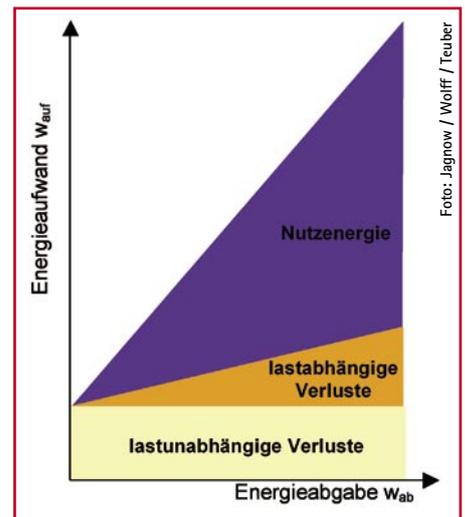


Bild 3 Aufteilung der dem Kessel zugeführten Energie; [11]

Kesselverluste, d.h. er entspricht mittleren Abgas- und Abstrahlungsverlusten. Der Zusammenhang dieser Größen ist praktisch linear und kann mit zwei Messpunkten reproduziert werden.

Aus den absoluten Werten der Wärmeerzeugerverluste können normierte Verluste abgeleitet werden. Das von Deutscher/Rouvel [11] veröffentlichte Verfahren des normierten Energieaufwands soll hier in seiner praktischen Anwendung näher erläutert werden. Es wird zurzeit für die Normung (DIN 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Beheizung, Kühlung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung“) zur ganzheitlichen Bilanzierung nach der EU-Gebäuderichtlinie 2006 präferiert.

Die einer Kesselanlage zuzuführende Energie lässt sich in der Regel in drei Teile aufteilen (Bild 3):

- Nutzenergieabgabe, die von den zu versorgenden Verbrauchern angefordert wird

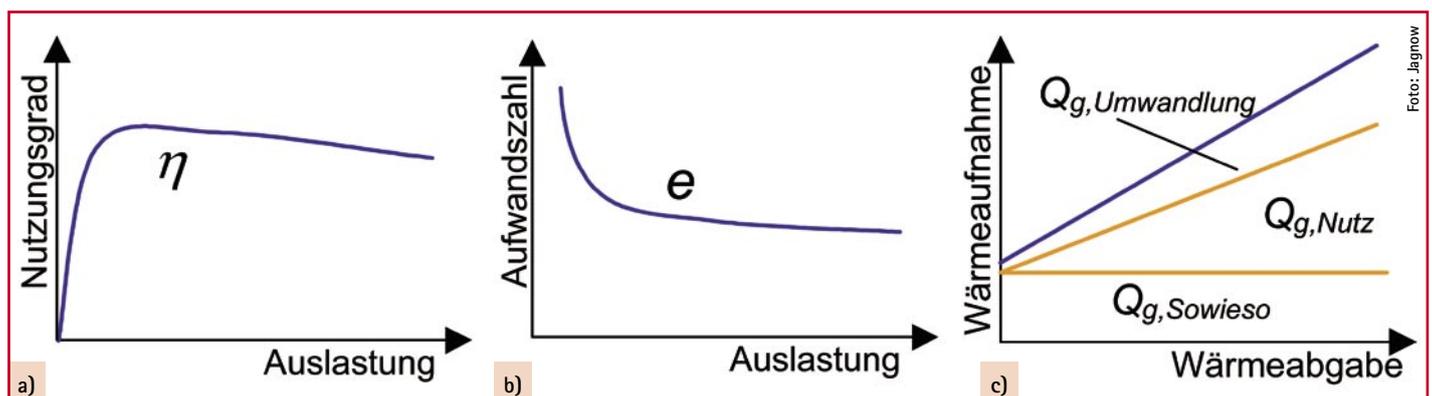


Bild 2 a) Nutzungsgrad, b) Aufwandszahl, c) absolute Verluste; [8]

- lastunabhängige Verluste (Betriebsbereitschaftsverluste)
- lastabhängige Verluste (Abgas- und Strahlungsverluste)

Zwischen den lastabhängigen Verlusten und der Nutzenergieabgabe besteht ein näherungsweise linearer Zusammenhang. Genauso kann der Zusammenhang zwischen Nutzenergieabgabe und zuzuführender Energie (Feuerungswärmemenge) als einfache Ausgleichsgerade dargestellt werden. Tritt bei Brennwertkesseln erhöhte Kondensation auf, ergeben sich Abweichungen von der linearen Abhängigkeit.

Ableitung des normierten Energieaufwands

Der Zusammenhang von Aufwand und Nutzen eines Erzeugers kann normiert werden, wenn man sowohl die aufgenommene Feuerungswärmemenge Q_{Feuerung} als auch die Nutzenergieabgabe Q_{Nutz} des untersuchten Wärmeerzeugers auf die maximal mögliche Nennenergieabgabe

(Produkt aus Kesselnennleistung und Gesamtlaufzeit) bezieht.

$$w_{\text{auf}} = \frac{Q_{\text{Feuerung}}}{\dot{Q}_K \cdot t_B} \quad [\text{Gl. 2}]$$

$$\beta = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{Q_K \cdot t_B} \quad [\text{Gl. 3}]$$

w_{auf} : normierter Energieaufwand

Q_{Feuerung} : Feuerungswärmeaufnahme des Kessels

β : Auslastung

Q_{Nutz} : Nutzenergieabgabe des Kessels

\dot{Q}_K : Kesselnennleistung

t_B : Betriebszeit

Die beiden entstehenden Terme sind der normierte Energieaufwand w_{auf} und die Kessel-Auslastung. Es ergibt sich der Zusammenhang zwischen dem normierten Energieaufwand und der Auslastung mit einer linearen Funktion:

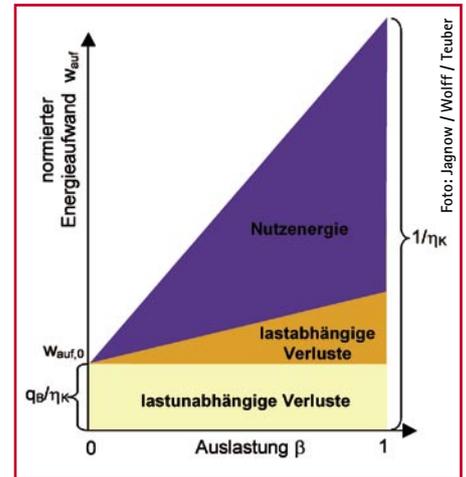


Bild 4 Bekannte Kennwerte

$$w_{\text{auf}}(\beta) = w_{\text{auf},0} + a \cdot \beta \quad [\text{Gl. 4}]$$

$w_{\text{auf}}(\beta)$: normierter Energieaufwand je nach Belastung

$w_{\text{auf},0}$: normierter Energieaufwand bei Nulllast

a : Verhältnisfaktor (Umwandlungsfaktor)

β : Belastung

Gemäß Bild 4 entspricht der Achsenabschnitt der y-Achse $w_{auf,0}$ den Bereitschaftsverlusten dividiert durch den Kesselwirkungsgrad. Für den Betriebsbereitschaftsverlust ergibt sich dann:

$$q_B = \eta_K \cdot w_{auf,0} \quad [Gl. 5]$$

q_B : Bereitschaftsverluste

$w_{auf,0}$: normierter Energieaufwand bei Nulllast

q_B : Kesselwirkungsgrad

Der mittlere Kesselwirkungsgrad (Umwandlungswirkungsgrad) ergibt sich aus dem Steigungsverhältnis von Nutzen zu Aufwand, beispielsweise bei einer Auslastung von $\beta = 100\%$. Es gilt:

$$\eta_K = \frac{\text{Kesselleistung}}{\text{Feuerungsleistung}} = \frac{\Delta\beta}{\Delta w_{auf}} = \frac{1}{w_{auf}(\beta = 1)} \quad [Gl. 6]$$

$w_{auf}(\beta = 1)$: normierter Energieaufwand bei Volllast

Mit diesem Verfahren wurden alle im Projekt gemessenen Nutzwärmemengen, unabhängig vom jeweiligen Messzeitraum, auf die „normierte Energieabgabe“ und alle gemessenen Feuerungswärmemengen auf den „normierten Energieaufwand w_{auf} “ umgerechnet. Dabei wurden Monatswerte ausgewertet und die zugeführte Brennstoffenergie Q_B auf den Brennwert bezogen. Die maximal mögliche Kesselnutzwärme ergibt sich als Produkt der Kesselnennleistung und der Betriebszeit (Messzeitraum). Aus den Geradengleichungen des normierten Energieaufwands wurden – bezogen auf die in der Feldstudie untersuchten Anlagen – die mittleren Bereitschaftsverluste und mittleren anlagenspezifischen Kesselwirkungsgrade extrahiert.

Durchschnittswerte aller untersuchten Anlagen

Werden alle Brennwertkesselanlagen – unabhängig von ihren speziellen Merkmalen – gemeinsam ausgewertet, ergibt sich das Diagramm in Bild 5. Aus der Regression ergibt sich für $\beta = 0$ ein durchschnittlicher Betriebsbereitschaftsverlust von $q_B = 0,47\%$ für alle Brennwertanlagen. Der mittlere Kesselwirkungsgrad beträgt 90%.

Neben den beiden Eckpunkten der Auswertung kann zusätzlich ein mittlerer normierter Energieaufwand bestimmt werden. Hierfür wird in die Geradengleichung die mittlere Kesselauslastung aller in diesem Projekt untersuchten Heizungs-

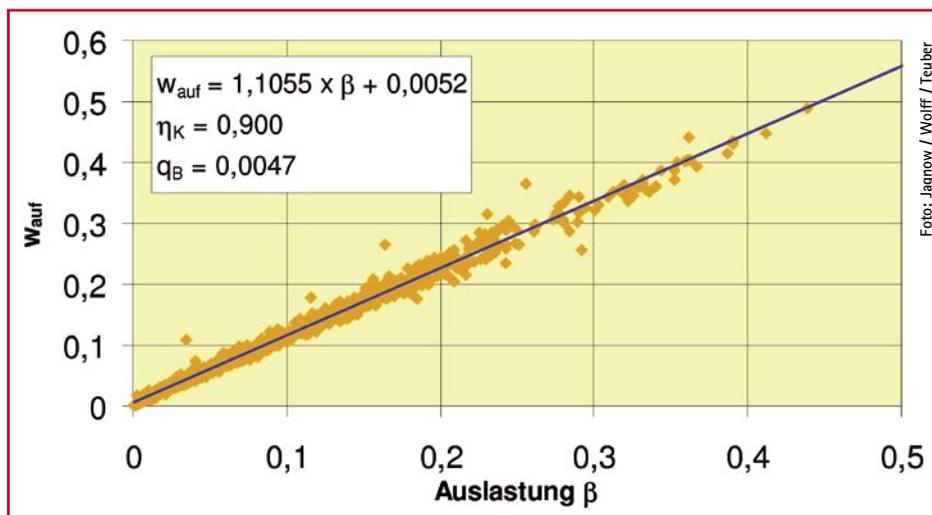


Bild 5 Anlagenspezifischer Energieaufwand über normierter Energieabgabe aller BW-Anlagen; [1]

anlagen eingesetzt. Für die mittlere Belastung $\beta = 0,09$ ergibt sich ein normierter Aufwand von $w_{auf} = 0,105$. Die Werte sind so zu interpretieren:

- Die mittlere Kesselnutzleistung im Betrieb beträgt 9% der installierten Kesselleistung ($\beta = 0,09$), für einen typischen 20-kW-Kessel ergibt sich eine mittlere Leistung von 1,8 kW
- Die dabei benötigte zugeführte Leistung beträgt 10,5% der installierten Kesselleistung ($w_{auf} = 0,105$), für den 20-kW-Kessel also im Mittel 2,1 kW

Abgleich mit bekannten Bewertungskriterien

Die Jahresnutzungsgradtheorie nach Dittrich und die Beschreibung mit dem normierten Aufwand sind kompatibel, wenn der Jahresnutzungsgrad auf die Beschreibung durch zwei Kenngrößen nach Dittrich reduziert wird: den mittleren

Kesselwirkungsgrad η_K und den mittleren spezifischen Bereitschaftsverluste q_B . Beide Größen sind auch Grundlage für die Geradengleichung des normierten Aufwands. Durch Umformung folgt daraus der mittlere Jahresnutzungsgrad:

$$\eta_a(\beta) = \frac{\beta}{a \cdot \beta + w_{auf,0}} \quad [Gl. 7]$$

$\eta_a(\beta)$: Kesselnutzungsgrad je nach Belastung

Für die durchschnittliche Anlagenbelastung aller Anlagen von $\beta = 9\%$ und mit dem Koeffizienten der Geradengleichung $a = 1,1055$ aus Bild 5 ergibt sich ein mittlerer anlagenspezifischer Jahresnutzungsgrad von 85,9%

$$\eta_{a,H_0} = \frac{0,09}{1,1055 \cdot 0,09 + 0,0052} = 0,859$$

Dieser Wert stimmt trotz der durchgeführten Regression sehr gut mit dem davon unabhängig ermittelten mittleren Nutzungsgrad als Quotient aus der Summe

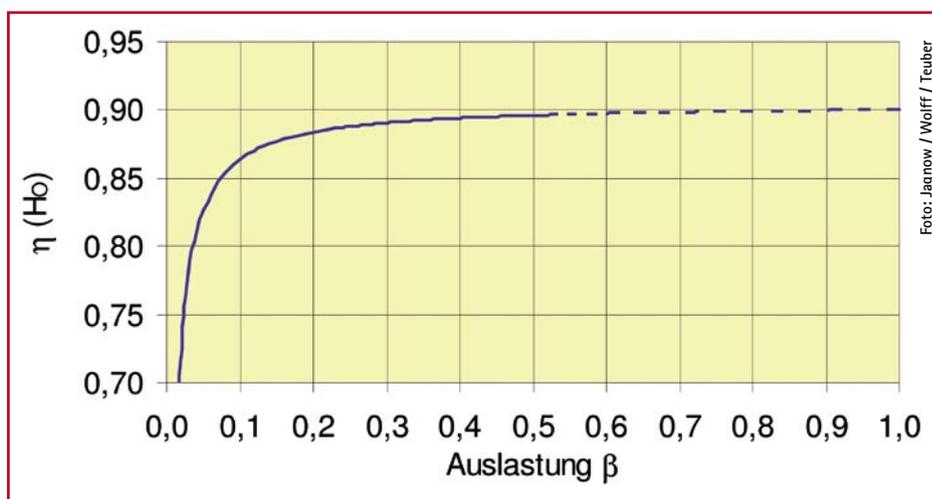


Bild 6 Nutzungsgradverlauf (H_0) aller Brennwertanlagen; [1]

	Kennwert
Zahl der Anlagen	60
Mittlere Kesselbelastung β in %	9
Mittlerer Kesselwirkungsgrad η_K in % (H_o)	90,0
Mittlerer Bereitschaftsverlust in % (H_o)	0,47
Betriebsbereitschaftsverlustleistung in kW	0,1
Mittlerer Nutzungsgrad aus normiertem Energieaufwand in % (H_o)	85,9

Tabelle 2
Kennwerte aus normiertem Energieaufwand für die Brennwertkessel; [1]

aller Nutzwärmemengen zur Summe aller auf den Brennwert bezogenen Brennstoffenergien (86,6%) überein. Mit den vorliegenden Eckwerten der mittleren anlagenspezifischen Bereitschaftsverluste von $q_B = 0,47\%$ und des mittleren anlagenspezifischen Kesselwirkungsgrads 90% für alle Brennwertanlagen ergibt sich der in Bild 6 dargestellte Nutzungsgradverlauf in Abhängigkeit von der Kesselbelastung.

Wie aus dem Verlauf zu erkennen ist, fällt der Nutzungsgrad bei Belastungen unter etwa 30 bis 40% ab. Besonders stark wird der Nutzungsgradabfall bei

Belastungen unter 5 bis 10%. Dieser Bereich ist vor allem in den Sommermonaten relevant, in denen der Kessel ausschließlich zur Trinkwarmwasserbereitung genutzt wird. Trotz des geringen Sommernutzungsgrades sind aber die absoluten Verluste in kWh in den Sommermonaten sehr viel kleiner als bei großen Kesselbelastungen im Winter. Hieraus wird ersichtlich, dass bei kleiner werdenden Nutzwärmeverbräuchen der Nutzungsgrad nicht das geeignete Kriterium zur Kesselbewertung darstellt. Tabelle 2 fasst die Merkmale, die sich aus der Auswertung des normierten Energieaufwands ergeben, zusammen.

Auswertung nach Anlagenmerkmalen

Die Auswertung nach dem Verfahren des normierten Energieaufwands wurde auch verwendet, um den Einfluss verschiedener Anlagenmerkmale auf die Kesseleffizienz sichtbar zu machen. Dazu wurden jeweils Gruppen von Anlagen mit unterschiedlichen Merkmalen gebildet. Die Merkmalunterscheidungen und die Anzahl der Anlagen je Gruppe zeigt Bild 7.

Aus den sich ergebenden zwei Auftragungen des normierten Energieaufwands wurden jeweils alle Effizienzmerkmale abgeleitet. Bild 7 zeigt die Ergebnisse des mittleren anlagenspezifischen Kesselwirkungsgrads (bei Belastung $\beta = 100\%$) und des mittleren Kesselnutzungsgrads (bei mittlerer Kesselbelastung β) für verschiedene Anlagenmerkmale. Der Einfluss des Kesselaufstellorts (innerhalb und außerhalb des beheizten Bereichs) sowie des Überströmventils (vorhanden oder nicht vorhanden) auf die Kennwerte sind am stärksten.

Einflüsse von Anlagenmerkmalen auf den mittleren anlagenspezifischen Kesselwirkungsgrad und den mittleren anlagenspezifischen Kesselnutzungsgrad

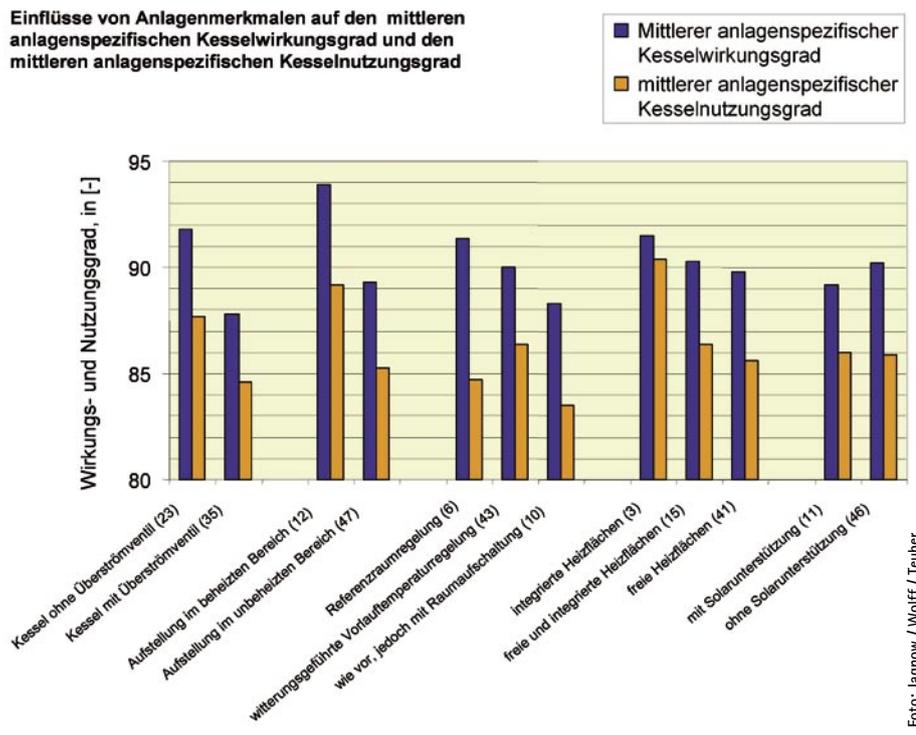


Bild 7 Einflüsse von Anlagenmerkmalen auf die Effizienz; (Daten nach [1])

Vergleich mit Bedarfswerten nach DIN V 4701-10

Eine Aufgabe des Projekts „Brennwertanlagen“ war der Vergleich gemessener Erzeugerverluste mit Bedarfswerten. Im Folgenden werden die Vergleichsergebnisse mit den Bedarfswerten nach DIN V 4701-10 sowie mit dem Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 vorgestellt. In DIN V 4701-10 zur Berechnung des Primärenergieaufwands nach der Energieeinsparverordnung werden die Erzeugerverluste getrennt für Trinkwarmwasserbereitung und Raumheizung mit Hilfe von Aufwandszahlen berechnet. Die Erzeugeraufwandszahl beschreibt das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen. In der Norm wird der Bezug auf den unteren Heizwert H_u gewählt.

$$e_{g(Hu)} = \frac{Q_{B(Hu)}}{Q_{Nutz}} = \frac{Q_{Nutz} + Q_{g(Hu)}}{Q_{Nutz}} \quad [\text{Gl. 8}]$$

$e_{g(Hu)}$: Erzeugeraufwandszahl bezogen auf H_u

$Q_{B(Hu)}$: Brennstoffwärmemenge bezogen auf H_u

$Q_{g(Hu)}$: Erzeugerverlust bezogen auf H_u

Q_{Nutz} : Nutzwärmemenge ab Kessel

Um eine vergleichbare Datenbasis zu erhalten, müssen die auf den Heizwert bezogenen Standardaufwandszah-

len nach DIN V 4701-10 in brennwertbezogene Erzeugerverluste umgerechnet werden. Die Berechnung des Erzeugerverlustes erfolgte mit einem an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel erstellten Rechenprogramm zur EnEV [7] unter Annahme folgender Randbedingungen:

- Heizwärmebedarf: 65 kWh/(m²a)
- Nutzfläche: 159 m² (entspricht dem Mittelwert der untersuchten Gebäude)
- statische Heizflächen mit Auslegung auf 55/45 °C, angeordnet an den Außenwänden unter dem Fenster und mit Thermostatventilen mit P-Bereich 1K
- Heizverteilungen überwiegend im beheizten Bereich, Steigestränge innenliegend
- Regelpumpe

	Nutzfläche	Erzeugerverlust bezogen auf H_o		
		Messwert	DIN V 4701-10, Anhang C 70/55 °C	BDH-Produktkennwerte 55/45 °C
Einheit	m ²	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)
Brennwertkessel	159	15,9	15,2	9,3
Niedertemperaturkessel	149	37,8	19,9	-

Tabelle 3 Gemessene Erzeugerverluste und Bedarfswerte nach DIN V 4701-10; [1]

- zentrale Warmwasserbereitung mit indirekt beheiztem Speicher und ohne Zirkulation (Anordnung von Leitungen und Speicher überwiegend im beheizten Bereich)

- Aufstellung des Brennwertkessels im beheizten Bereich, verbesserte BDH-Kennwerte nach Neuauflage DIN V 4701-10, August 2003

Aus dieser Berechnung nach Energieeinsparverordnung ergeben sich Kesselverluste von $q_g(H_o) = 9,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ für eine Brennwertkesselanlage mit angenommenen sehr guten Randbedingungen. Zum Vergleich erfolgt die Berechnung mit teilweise schlechteren anlagentechnischen Randbedingungen, den Standardwerten nach Anhang C aus DIN V 4701-10:

- statische Heizflächen mit Auslegung auf 70/55 °C, angeordnet an den Außenwänden unter dem Fenster und mit Thermostatventilen mit P-Bereich 2K

- Aufstellung des Brennwertkessels im beheizten Bereich, Standardwerte nach Anhang C

- sonst gleiche Randbedingungen

Hier liegen die Kesselverluste bei $q_g(H_o) = 15,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$. Ein Niedertemperaturkessel wurde analog (mit den ungünstigeren Daten) berechnet. In Tabelle 3 sind die errechneten Bedarfswerte den tatsächlichen Messwerten gegenübergestellt. Der aus den Aufwandszahlen nach DIN V 4701-10 mit verbesserten BDH-Daten berechnete Wärmeerzeugerverlust steht mit $9,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ einem tatsächlich gemessenen Wärmeerzeugerverlust der Brennwertkessel von $15,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ gegenüber.

Es kann festgestellt werden, dass die Bedarfswerte der DIN 4701-10 nur dann eine akzeptable Übereinstimmung mit den realen Messwerten ergeben, wenn die Heizflächen für eine Auslegungstemperaturspannung von 70/55 °C bei einem schlechteren P-Bereich der

Thermostatventile von 2K angenommen werden und für die Kessel die Standardwerte nach Anhang C verwendet werden. Die für DIN V 4701-10 theoretisch ermittelte Werte für die Erzeugerverluste entsprechen dann etwa den im Praxisbetrieb erreichten Werten.

Wird – wie in der Praxis üblich – mit den verbesserten BDH-Kennwerten gerechnet, ergibt sich eine Abweichung von ca. 6 kWh/(m²a). Diese Differenz liegt in einer Größenordnung, die dem Bonus eines erfolgreich bestandenen Dichtheitsstests für Gebäude nach der Energieeinsparverordnung entspricht. Der Blower-Door-Test setzt dabei eine Qualitätssicherung voraus, für die Investitionen von 300 bis 500 Euro im Einfamilienhaus wirtschaftlich gerechtfertigt sind. Für das Heizsystem werden keine vergleichbaren Qualitätssicherungsmaßnahmen gefordert.

Die Abweichungen zwischen berechneten und in diesem Projekt gemessenen Nutzungsgraden für NT-Kessel sind noch gravierender, obwohl nach DIN 4701-10 bereits nur mit Standardwerten gerechnet wurde und keine herstellereigene Werte verwendet wurden.

Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8

In einem Standard-Handbuch für Heizungs- und Klimatechnik finden sich in einer älteren Ausgabe von 1995 die folgenden Aussagen:

„Um Heizkessel-Anlagen der verschiedenen Bauarten energiewirtschaftlich auf rein messtechnischer Grundlage miteinander vergleichen zu können, kann der Jahresnutzungsgrad aus Gründen des Versuchszeitraumes praktisch nicht herangezogen werden. Damit aber eine vernünftige Beurteilung erreicht werden kann, wird – sozusagen als Kurzverfahren – eine neue Vergleichszahl angewandt, die auch in DIN 4702-8 als sog. Norm-Nutzungsgrad η_K definiert ist.

Das Bestreben dazu ist, das Messverfahren zur Ermittlung dieser Kennzahl mit einem geringstmöglichen Aufwand durchzuführen. Das verlangt, von vereinfachten Annahmen auszugehen. [...]

Der Norm-Nutzungsgrad soll funktionsbedingt allein auf den Wärmeerzeuger selbst bezogen sein. Er kann daher besondere Einflußgrößen, wie Gebäudeart, Heizgewohnheiten, Kesseldimensionierungsqualitäten und -genauigkeiten o.ä.m., die bekanntlich im normalen Jahresnutzungsgrad zusätzlich noch Berücksichtigung finden, nicht enthalten. Aus diesem Grunde läßt sich auch der Norm-Nutzungsgrad nicht mit dem Jahresnutzungsgrad ohne weiteres vergleichen, denn für ein und denselben Wärmeerzeuger liegt der Norm-Nutzungsgrad in der Regel um bis zu 1% über dem Jahresnutzungsgrad.“ [2]

Mit dieser Aussage wurde und wird teilweise auch heute noch Planern, Handwerkern, Endkunden suggeriert, dass der reale Jahresnutzungsgrad eines Wärmeerzeugers nur geringfügig (maximal 1%) vom Normnutzungsgrad abweicht. Die Ergebnisse des Projekts „Brennwertanlagen“ liefern jedoch Unterschiede zwischen real gemessenem Nutzungsgrad und Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 [4] von 10 bis 13 Prozentpunkten.

Hinweise zur Optimierung und Qualitätssicherung

Im Folgenden werden aus den Projektergebnissen erste abgeleitete Regeln für die künftige Konstruktion, die Planung und den Betrieb von Brennwertkesselanlagen formuliert.

Mit zunehmendem Dämmstandard neuer und nachträglich modernisierter Gebäude differiert in immer stärkerem Maße die Leistungsanforderung an die minimale und maximale Kesselleistung einerseits für die Raumheizung (im Einfamilienhaus 1 bis 6kW) und für die Trinkwassererwärmung (mindestens 10 bis 12kW beim Speicherprinzip, 18 bis 24kW beim Durchflussprinzip). Die heute überwiegend angebotenen und vertriebenen Geräte sind als Allroundgeräte konzipiert für:

- kombinierten Heiz- und Trinkwasserbetrieb nach dem Durchflussprinzip, meist mit nur einer Pumpe und einem Umschaltventil
- kombinierten Heiz- und Trinkwasserbetrieb mit gesondertem Speicher

Da beide Aufgaben mit nur einem Konstruktionsprinzip erfüllt werden sollen, weisen fast alle heute am Markt angebotenen Brennwertgeräte einen extrem niedrigen Kesselwasserinhalt auf. Nur so kann die Trinkwassererwärmung nach dem Durchflussprinzip einigermaßen komfortabel ohne zu lange Verzögerungszeiten gewährleistet werden. Der geringe Kesselwasserinhalt der Geräte bewirkt aber:

- hohe hydraulische Widerstände und als Folge hohe Gerätedruckverluste
- die Notwendigkeit eines Kesselmindestumlaufstroms
- den Einbau integrierter, für die nachgeschalteten Heizkreise im Regelfall viel zu großer Pumpen
- den Einbau von Überströmventilen oder sogar den Einsatz von hydraulischen Weichen, die zur Rücklauftemperaturenanhebung und damit zu verminderter Brennwertnutzung führen

In Einzelfällen wird sogar der Einbau von Heizwasserpufferspeichern empfohlen. Sowohl beim Einsatz von hydraulischen Weichen als auch von Pufferspeichern ist der zusätzliche Einsatz einer gesonderten Pumpe in der Primärenergiebilanz zu berücksichtigen.

Empfehlungen an die Hersteller

1) Da heute die Trinkwassererwärmung überwiegend nach dem Speicherprinzip erfolgt und eine geringe Zeitverzögerung bei der Wärmebereitstellung daher toleriert werden kann, sollten die hierfür eingesetzten Brennwertkesselkonstruk-

„Aus 'Sicherheitsgründen' wird bei normalen Heizkörpersystemen in ca. 90% der Fälle die Werkeinstellung der Kesseltemperatur nicht verändert, wodurch zu hohe Kesselwassertemperaturen einer optimalen Brennwertnutzung entgegenstehen.“

tionen einen so hohen Kesselwasserinhalt aufweisen, dass der hydraulische Widerstand des Gerätes vernachlässigbar wird und somit auf eine Kesselpumpe verzichtet werden kann bzw. integrierte Pumpen mit kleinsten Leistungswerten und mit einstellbaren Förderhöhen verwendet werden.

2) Dies würde den Einsatz der kleinsten heute bereits verfügbaren Umwälzpumpen mit ca. 10 bis 25W elektrischer Leistungsaufnahme anstelle der heute üblichen Pumpen zwischen 60 bis 150W ermöglichen. Der Primärenergieverbrauch könnte um 8 bis 15% bzw. die Verluste um weitere 6 bis 25kWh Primärenergie je m² und Jahr in neuen Einfamilienhäusern vermindert werden. Geräte mit geringem hydraulischem Widerstand werden bereits seit vielen Jahren von einzelnen Herstellern angeboten, wurden z.T. jedoch wieder aus den Programmen genommen.

3) Parallel sind möglichst hohe Modulationsbereiche der eingesetzten Gasbrenner zu fordern, um eine Anpassung an verschiedene Auslegungslasten und Teillastbereiche zu ermöglichen. Integrierte Pumpen sollten einstellbar sein und Kessel ggf. ohne integrierte Pumpe ausgeliefert werden, damit die Pumpe abgestimmt auf die nachgeschaltete Anlage gewählt werden kann.

4) Als wichtigster Einfluss auf einen möglichst ausgeprägten Brennwerteffekt erweist sich für Geräte mit einem Zwangsumlauf das mittlere Kesselwassertemperaturniveau, das wesentlich durch die Werkeinstellung der integrierten Kesseltemperaturregelung geprägt wird. Praxisberichte zeigen, dass die ausführenden Firmen die Werkeinstellung bei normalen Heizkörpersystemen in ca. 90% aller Fälle aus „Sicherheitsgründen“ nicht verändern. Dies bewirkt hohe Kesselvorlauftemperaturen und, v.a. bei Einsatz von Überströmventilen, auch hohe mittlere Rücklauf- und hohe mittlere Kesselwassertemperaturen, die einer Kondensation und damit einer optimalen Brennwertnutzung entgegenstehen.

Kurzfristig wird den Herstellern empfohlen, die Werkeinstellung der Kesseltem-

peraturregelung im Auslieferungszustand zu verändern. Vorgeschlagen werden Auslegungsvorlauftemperaturen von 50 bis 55°C (rund 20 bis 25K niedriger als die heute übliche Werkeinstellung) und eine Parallelverschiebung der Heizkurve um 2 bis 4K bezogen auf die Raumtemperatur. Damit wäre gewährleistet, dass auch bei Außentemperaturen über 8 bis 12°C „fühlbare“ Heizwassertemperaturen am Heizkörper vorliegen. Damit wären Beschwerden der Nutzer, bei der heute üblichen Überdimensionierung von Heizkörpern weitgehend ausgeschlossen. Vorschlag:

- Heizkurvensteilheit: $A = 1,0$
- Parallelverschiebung $B = 2$ bis $4K$ bezogen auf die Raumtemperatur

Empfehlungen für die Planung

1) Zu unterscheiden sind Planungen für die Kesselmodernisierung im Bestand und für Neuanlagen. Es sollten jedoch grundsätzlich weitgehend einfache Anlagensystemkonzepte geplant werden, Kessel mit ausreichendem Wasserinhalt und damit geringem hydraulischem Widerstand bevorzugt und die Kessel im beheizten Bereich des Gebäudes angeordnet werden.

2) Im Bestand sind das vorhandene Rohrnetz sowie die Heizflächen in einer Ist-Analyse aufzunehmen. Hierzu wurden von den Verfassern einfache Hilfen, u.a. auch mit Softwareunterstützung, im Rahmen des Projekts Optimus [10] in Zusammenarbeit mit proKlima Hannover entwickelt und erfolgreich erprobt [6]. Wichtig ist, insbesondere für die Brennwertnutzung, die Anpassung der Heizwassertemperaturen auf einem möglichst niedrigen Niveau.

3) Im Neubau sollten innerhalb eines Raums nur einfache Heizsysteme, entweder nur Heizkörper oder nur Fußbodenheizflächen eingesetzt werden. Empfehlungen der Autoren für die Komponentenauslegung finden sich in [9]. Gesamtsysteme eines Herstellers, speziell auch für solarunterstützte Systeme und ein einfaches Gesamtregelkonzept sind zu bevorzugen.

4) Für Kessel mit ausreichendem Wasserinhalt und ohne Anforderungen an einen Mindestvolumenstrom werden Gesamtspreizungen des Heizkreislaufs von 15 bis 25K (Vorlauftemperatur: 60 bis 70°C, Rücklauftemperatur: 40 bis 55°C) empfohlen. Für Kessel mit geringem Wasserinhalt können meist keine Gesamtspreizungen über 10 bis 15K (Vorlauftemperatur: 50 bis 60°C, Rücklauftemperatur: 40 bis 55°C) eingestellt werden. Je höher die Auslegungsspreizung, desto besser ist die Regelgüte für die Einzelraumregelung zusammen mit angepassten, voreinstellbaren Thermostatventilen (kleine k_{VS} -Werte).

5) Zu achten ist weiterhin auf die Wahl eines Kessels mit einem möglichst hohen Modulationsbereich der in den Brennwertgeräten integrierten Brenner mit möglichst niedriger Grundlaststufe (unter 4 bis 5kW) und auf eine getrennte Einstellung der Brenner-/Kessel-Leistungen für die Raumheizung und für die Trinkwarmwasserspeicherladung.

6) Die Planung sollte eine Heizlastberechnung, eine Rohrnetzberechnung und eine Heizflächenauslegung mit den Plandaten für die Einstellung der Heizkurve am Kesselregler, für die Einstellung der Pumpförderhöhe und für den Hydraulischen Abgleich (Voreinstellwerte für Thermostatventile) umfassen.

7) Bei der Wahl von Kesseln im kleinen Gebäude ist besonders auf geringe Bereitschaftsverluste und Pumpenstromaufwendungen zu achten, da die Kessel praktisch die gesamte Heizperiode hindurch in Betrieb bzw. großteils in Betriebsbereitschaft sind.

8) Grundsätzlich wird der Einbau eines Wärmemengenzählers nach dem Wärmeerzeuger als Kontrollinstrument für den späteren Betrieb empfohlen. Denkbar ist auch, den Wärmemengenzähler als optionale Zusatzausstattung des Kessels vorzusehen, sozusagen als Verbrauchsanzeiger für Gebäude und Wärmeerzeugerverluste im Zusammenspiel mit einem Brennstoffmesser.

Empfehlungen für die Ausführung

Die Plandaten sind von den ausführenden Handwerkern einzustellen und in einer Fachunternehmererklärung zu bestätigen. Besonders zu achten ist auf die korrekte Einstellung der Heizkurve am Regler sowie die Anpassung der Pumpe und auf die Durchführung des Hydraulischen Abgleichs, um niedrige Rücklauftemperaturen und einen geringen Pumpenenergieverbrauch zu gewährleisten.

Empfehlungen für die Übergabe, Inbetriebnahme und Nutzung

Zusammen mit dem ausführenden Handwerksunternehmen ist der Kunde bei der Endabnahme über alle wesentlichen Geräte- und Bedienfunktionen zu informieren und ihm eine schriftliche Dokumentation auszuhändigen. Dies betrifft insbesondere die Reglereinstellung (Heizpausen, Heizgrenztemperaturen, Sommerbetrieb) sowie die Bedienung der Thermostatventile.

Es ist grundsätzlich zu empfehlen, regelmäßig (monatliche) Verbrauchswerte zu erfassen und damit Verbrauchskontrollen zu ermöglichen. Auf das typische Verschwendungspotenzial zu hoher Raumtemperaturen und dauernd gekippter Fenster (besonders in der Übergangszeit) ist deutlich hinzuweisen. Weitere Hinweise finden sich in [6].

Rückkopplung mit den Heiztechnikherstellern

Die Ergebnisse des Projektes „Brennwertanlagen“ sowie die Förderbedingungen der Brennwertkesselförderung von proKlima Hannover boten den Anlass für einen ersten Erfahrungsaustausch mit Herstellern (Bild 8). Neben der Vorstellung der Ergebnisse wurden die aus den Projektergebnissen resultierenden Wünsche an die Kesselkonstruktion und den Anlagenbetrieb mit 15 Vertretern von acht Heiztechnikherstellern diskutiert. Folgende wichtige Ergebnisse brachte die Zusammenkunft:

- Sofern der Markt es fordert, könnten seitens der Hersteller Kesselkonstruktionen mit ausreichendem Wasserinhalt bzw. mit geringem hydraulischem Widerstand angeboten werden. Die Technik ist vorhanden. Derzeit besteht jedoch praktisch nur der Wunsch nach Geräten mit Allroundfunktionen (Kombibetrieb) und geringstem Platzbedarf.
- Die Diskussion lieferte den Vorschlag seitens der Hersteller, dass integrierte Pumpen externen vorgezogen werden sollen, da Kompaktgeräte am Markt immer stärker nachgefragt sind und diese Bauweise eine optimale Einbindung der Pumpe in die Kesselregelung ermöglicht. Die Pumpförderhöhe für integrierte Pumpen und gegebenenfalls zu ergänzende Differenzdruckregler sollten mindestens in drei Stufen einstellbar sein: 0,5/1,0/1,5 mWS.



Foto: Jagnow / Wolff / Teuber

Bild 8
Ergebnisse des DBU-Projekts Brennwertanlagen werden bei proKlima mit den Heiztechnikherstellern diskutiert

- Eine Modulation im Bereich von 1 : 6 bis 1 : 10 ist ein Kompromiss bei Geräten mit maximal 18 kW Leistung.
- Die gemeinsame Forderung aller Parteien war es, dass der Energieverbrauch von Geräten mehr ins Zentrum des Bewusstseins (der Nutzer, Planer und Handwerker) gerückt werden muss, damit effizientere (u.U. momentan noch teurere) Technik am Markt eine Chance hat.

Ausblick: Vorschläge zur Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie

Das Projekt hat deutlich gezeigt, dass die Normnutzungsgrade von Brennwertkesselanlagen im Praxisbetrieb unter den in klassischen Heizungsanlagen vorliegenden Randbedingungen als Jahresnutzungsgrad nicht zu erreichen sind. Die typische Anlage der untersuchten Gebäude weist einen mittleren Bereitschaftsverlust von $q_B = 0,5\%$ oder ca. 100 W auf. Der mittlere Wirkungsgrad beträgt 90% (H_0). Da die Anlagen aber im Mittel nur zu 9% ausgelastet sind, ergibt sich ein durchschnittlicher normierter Jahresnutzungsgrad von etwa 86% (H_0).

In Zukunft sollten zur Bewertung der Effizienz der normierte Aufwand bezogen auf die mittlere Kesselleistung herangezogen werden. Zusätzlich oder alternativ können die daraus abgeleiteten Größen (mittlerer Kesselwirkungsgrad, mittlerer spezifischer Bereitschaftsverlust) sowie für Vergleiche mit Verordnungswerten und für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen flächenbezogene Verlustkennwerte anstelle von Nutzungsgraden und Aufwandzahlen herangezogen werden.

Bei aller Kritik an den untersuchten Brennwertanlagen wird an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die als Referenzanlagen betrachteten Niedertemperaturanlagen deutlich höhere Wärmeverluste aufweisen; auch hier werden die angegebenen Normnutzungsgrade nicht erreicht.

Aus der Untersuchung der „Brennwertanlagen“ sowie den Aussagen zur „Energieanalyse aus dem Verbrauch“ geht hervor, dass es nicht ausreicht, den Wärmeerzeuger oder andere Komponenten der Heizungsanlage und des Gebäudes einzeln zu betrachten und zu bewerten. Nur die Optimierung des Gesamtsystems im Zusammenspiel mit Gebäudedämmstandard und Nutzerprofil kann zu besserer Energieausnutzung und zu einwandfreier Funktion der Heizungsanlage führen.

Die Bewertung des Gesamtsystems „Gebäude“ kann im Bestand anhand von Verbrauchsdaten erfolgen. Eine mit einfachen Mitteln und Rechenwerkzeugen durchführbare Analyse von Messwerten liefert eine Reihe von Kennwerten für die Bewertung des beheizten Bereichs eines Gebäudes und der Wärmeversorgung außerhalb des beheizten Bereichs.

Damit ist die Chance gegeben, Gebäude kostengünstig und realistisch energetisch zu beurteilen, wenn „nur“ ein Energiepass erstellt werden soll. Auch die Gefahr, dass, insbesondere bei der Modernisierung, durch reine Bedarfsrechnungen mit Normen und Richtlinien zu optimistische Einsparungen vorausberechnet werden, wird durch den Verbrauchs-Bedarf-Abgleich beseitigt. ←

Literatur

- [1] Von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU gefördertes Projekt zur Untersuchung des Betriebsverhaltens von Brennwertkesseln im Feld, durchgeführt von der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel: Brennwertkessel im Feld. Abschlussbericht im Internet unter <http://enev.tww.de>
- [2] Buderus Heiztechnik GmbH (Hrsg.): Handbuch für Heizungstechnik. Berlin: Beuth 1995 und 2002
- [3] DIN Dieter Wolff und Kati Jagnow: E-A-V: Energieanalyse aus dem Verbrauch. Stuttgart: Gentner, TGA Fachplaner 9-2004
- [4] DIN 4702-8 Heizkessel; Ermittlung des Norm-Nutzungsgrades und des Norm-Emissionsfaktors. Berlin: Beuth 1990
- [5] DIN V 4701-10 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10 (Vornorm): Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung. Berlin: Beuth, 2001 und August 2003

- [6] Kati Jagnow, Christian Halper, Tobias Timm und Marco Sobirey: Optimierung von Heizungsanlagen im Bestand. Teile 1 bis 5. Stuttgart: Gentner, TGA Fachplaner 05-, 08- und 11-2003, 01- und 03-2004
- [7] Kati Jagnow: EP – Rechenprogramm zur EnEV. <http://enev.tww.de>: erstellt 2001 bis 2004
- [8] Kati Jagnow: Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik. Dortmund: Fakultät Bauwesen der Universität, Dissertation, 2004
- [9] Landeshauptstadt Hannover (Hrsg.): Bauen Am Kronsberg – Heiztechnisches Konzept: Hannover: Amt für Umweltschutz, 1998
- [10] Optimus: von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU gefördertes Projekt zur Optimierung von Heizungsanlagen zusammen mit dem ausführenden Handwerk, Berufsbildenden Schulen, Berufsschullehrerausbildung und Wissenschaftlicher Begleitung. Beteiligt u. a. Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel. www.optimus-online.de
- [11] Peter Deutscher und Lothar Rouvel: Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen, 2 Teile. Düsseldorf: VDI, HLH 07- und 08-2003
- [12] Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Gebäuderichtlinie). 16. Dezember 2002



Dipl.-Ing. (FH)
Kati Jagnow
ist selbständige
Ingenieurin der TGA,
Wernigerode



Prof. Dr.-Ing.
Dieter Wolff ist Professor
für Heizungs- und Regelungstechnik im Fachbereich Versorgungstechnik der FH Braunschweig/Wolfenbüttel,
Telefax
(0 53 31) 9 39 44 02



Dipl.-Ing. (FH)
Peter Teuber
ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Institut
für Heizungs- und Klimatechnik, IfHK,
FH Braunschweig/
Wolfenbüttel