Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen mittels des "normierten Energieaufwandes w_{auf}"

L. Rouvel, P. Deutscher

Teil 1: Herleitung der Methodik und Vergleich den Kennwerten

Mittels des Kennwerts "normierter Energieaufwand w_{auf}" kann der Zusammenhang von Aufwand und Nutzen bei der Energiebereitstellung in der Regel als eine Gerade (Polynom ersten Grades) beschrieben werden. Diese Darstellung ist konsistent zu der in den neuen Normen und Richtlinien verwendeten Aufwandszahl e sowie zu dem auch weiterhin benutzten Nutzungsgrad $\overline{\eta}$. Es ergibt sich hier der Vorteil, dass die Charakteristik einer Anlage mittels zwei gängigen Wertepaaren – Nennwirkungsgrad und Bereitschaftsverlust – beschrieben werden kann. Dadurch können mit relativ geringem Aufwand auch komplexe haustechnische Systeme wie RLT-Anlagen energetisch bewertet werden, was auch nach der EU-Richtlinie über die Energieeffizienz von Gebäuden [1] künftig erforderlich sein wird.

Im folgenden Teil 1 wird der Kennwert "normierter Energieaufwand w_{auf}" eingeführt und die Methodik eingeführt. Teil 2 zeigt die Anwendung dieser Methodik am Beispiel der Ermittlung des Energiebedarfs einer raumlufttechnischen Anlage.

Für den Zusammenhang zwischen Aufwand und Nutzen werden bei energietechnischen Anlagen unterschiedliche Darstellungen gewählt. Sehr häufig wird hierzu der Wirkungsgrad η verwendet, der den Zusammenhang zwischen abgegebener Leistung P_{ab} und aufgenommener Leistung P_{auf} beschreibt:

$$P_{auf} = \frac{P_{ab}}{\eta} \tag{1}$$

Der Wirkungsgrad η ist eine nicht lineare Funktion der abgegebenen Leistung P_{ab}:

$$\eta = f(P_{ab}) \tag{2}$$

Ein "typischer" Verlauf des Zusammenhangs entsprechend Gl. (2) ist in **Bild 1** dargestellt.

Mittels dem Wirkungsgrad η kann in der Regel nur der stationäre bzw. "eingeschwungene" Zustand einer energetischen Anlage erfasst werden, nicht jedoch Anfahrvorgänge bzw. der Aufwand zum Erreichen eines neuen Betriebspunktes. Der in Gl. (2) bzw. in Bild 1 dargestellte Zusammenhang ist somit nicht als eine Betriebskennlinie einer Anlage zu interpretieren, vielmehr entspricht diese Darstellungen einer Zusammenstellung von Einzelbetriebspunkten.

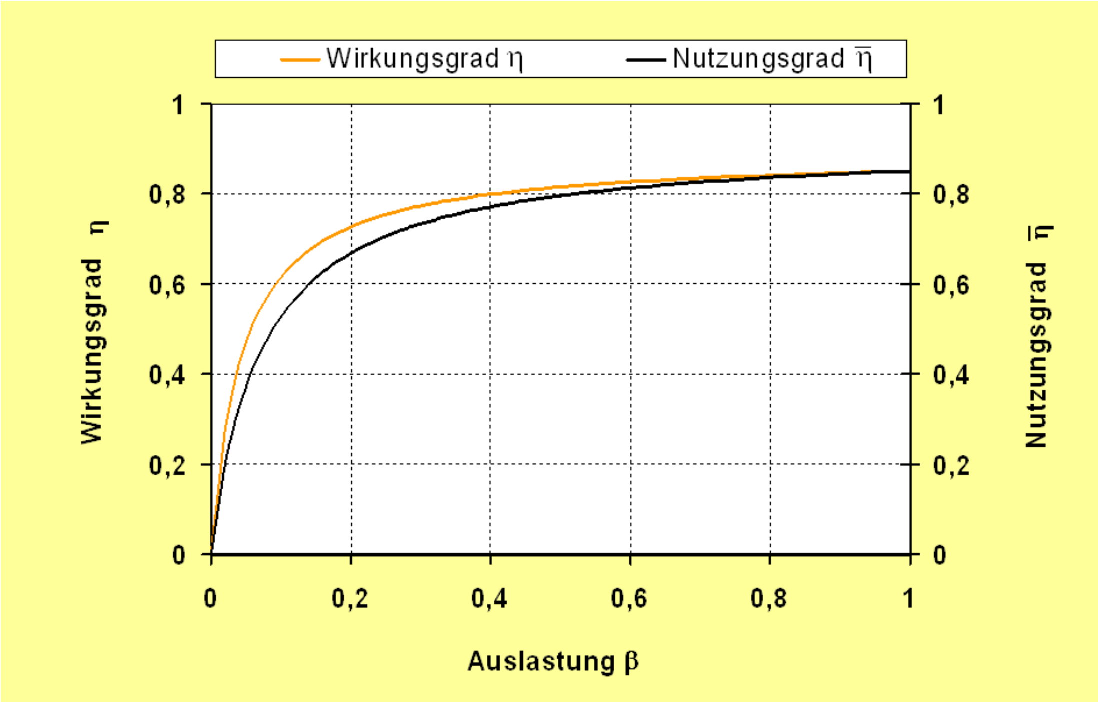

Bild 1: Abhängigkeit des Wirkungsgrades η und des Nutzungsgrades $\overline{\eta}$ von der Auslastung ß

Bei energietechnischen Anlagen ist daher die Aussage über die Leistung (stationärer Zustand) häufig nicht ausreichend. Daher wird der Zusammenhang von Energieaufwand W_{auf} und Nutzenenergieabgabe W_{ab} mittels dem **Nutzungsgrad** $\overline{\eta}$ (der häufig mit dem Wirkungsgrad verwechselt bzw. fälschlicherweise gleichgestellt wird) gewählt:

$$W_{auf} = \frac{W_{ab}}{\overline{\eta}} \tag{3}$$

Ebenso wie der Verlauf von η ist auch der Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ eine nicht lineare Funktion der Nutzenergieabgabe W_{ab}:

$$\overline{\eta} = f(W_{ab}) \tag{4}$$

Allgemeingültiger wird der Zusammenhang von Aufwand und Nutzen, wenn man die Nutzenenergieabgabe W_{ab} auf die "Nenn-Energieabgabe" (Produkt aus der Nennleistung[1] P_N und Gesamtlaufzeit t_B) zur **Auslastung β** normiert, so dass der Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ als nicht lineare Funktion der Auslastung beschrieben werden kann (siehe hierzu auch Bild 1):

$$\overline{\eta} = f(\beta) \tag{5}$$

$$\text{mit } \beta = \frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_N} \tag{6}$$

Ein Wert der Auslastung β ergibt sich als Mittelwert aus vielen Einzelbetriebspunkten mit unterschiedlichen (P_{ab}/P_N), d.h. die Auslastung von beispielsweise $\beta = 0{,}3$ beinhaltet Betriebspunkte mit $(P_{ab}/P_N) > 0{,}3$, $(P_{ab}/P_N) < 0{,}3$ und selbstverständlich auch mit $P_{ab} = 0$. Darüber hinaus ist der Aufwand zum Erreichen der jeweiligen Einzelbetriebspunkte zu berücksichtigen. Analog wird ein zeitgewichteter Mittelwert der Energieaufnahme und –abgabe der

[1] Die Nennleistung P_N einer energetischen Anlage bezieht sich in der Regel auf die Nennleistungs**abgabe** z.B. Nennwärmeabgabe beim Wärmeerzeuger und mechanische Leistung eines Elektromotors.

jeweiligen Betriebspunkte unter Einschluss des Energieaufwands im Leerbetrieb **und** des Energieaufwands bei instationären Vorgängen bestimmt. Dieser Mittelwert wird dann als Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ bezeichnet. In der Regel ist daher bei mittlerer Auslastung der Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ kleiner als der Wirkungsgrad η.
Für ß = 1 bzw. $P = P_N$ (Volllastbetrieb in der gesamten Betriebszeit) ist der Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ gleich dem Nennwirkungsgrad η_{Nenn}, soweit die selben Betriebsparameter wie bei der Definition des Nennbetriebes gefahren werden:

$$\overline{\eta}(\beta = 1) = \eta_{Nenn} \tag{7}$$

In neueren Arbeiten und Normen wie z.B. der DIN 4701-10 [2] und VDI 2067 Blatt 20 [3] wird anstelle des Nutzungsgrades $\overline{\eta}$ die **Aufwandszahl e** verwendet (siehe hierzu **Bild 2**). Die Aufwandszahl e ist der reziproke Wert des Nutzungsgrades $\overline{\eta}$:

$$e = \frac{W_{auf}}{W_{ab}} = \frac{1}{\overline{\eta}} \tag{8}$$

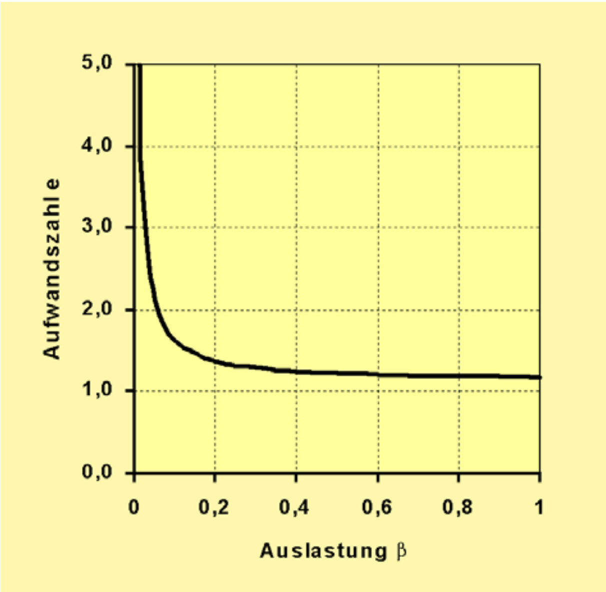

Bild 2: Abhängigkeit der Aufwandszahl e von der Auslastung ß

Die Kurvenverläufe der beiden Kennwerte "Aufwandszahl e" und "Nutzungsgrad $\overline{\eta}$" sind stark nichtlinear. Daher wird häufig davon ausgegangen, dass man für die Herleitung der Kurvenverläufe von $e = f(\beta)$ und $\overline{\eta} = f(\beta)$ sehr viele Messpunkte oder Simulationen benötige und dann in einem zweiten Schritt mittels einer Regressionsanalyse der mittlere Kurvenverlauf ermittelt werden müsse ([4]).
Sogar in der VDI 2067-20 wird ausgeführt: "*Die Aufwandszahlen sind Ergebnisse umfangreicher Simulationen...*" (siehe [3], S.7 oben).

Die Darstellung des Energieaufwands mittels der "Aufwandszahl e" oder des "Nutzungsgrades $\overline{\eta}$" ermöglicht im Bereich der Auslastung "Null" ($\beta \rightarrow 0$) keine Aussagen über den Energieeinsatz, da

$$\overline{\eta}(ß \rightarrow 0) = 0 \tag{9}$$

$$e\,(ß \rightarrow 0) = \infty \tag{10}$$

Darüber hinaus ist aus dieser Darstellung nicht ersichtlich, welche Parameter den Energieaufwand beeinflussen und wie diese energetisch verbessert werden können.

Bereits in den 60er Jahren ist gezeigt worden, dass bei energietechnischen Anlagen in der Regel ein linearer Zusammenhang zwischen **Energieaufnahme W_{auf}** und **Nutzenenergieabgabe W_{ab}** besteht ([5], [6], [7], [8]). Selbst bei Elektromotoren lässt sich der Zusammenhang ohne übermäßige Fehler linearisieren (hier ist ab etwa 50 % bis 100 % der Auslastung ein quadratischer Anteil durch die Stromwärmeverluste zu berücksichtigen).

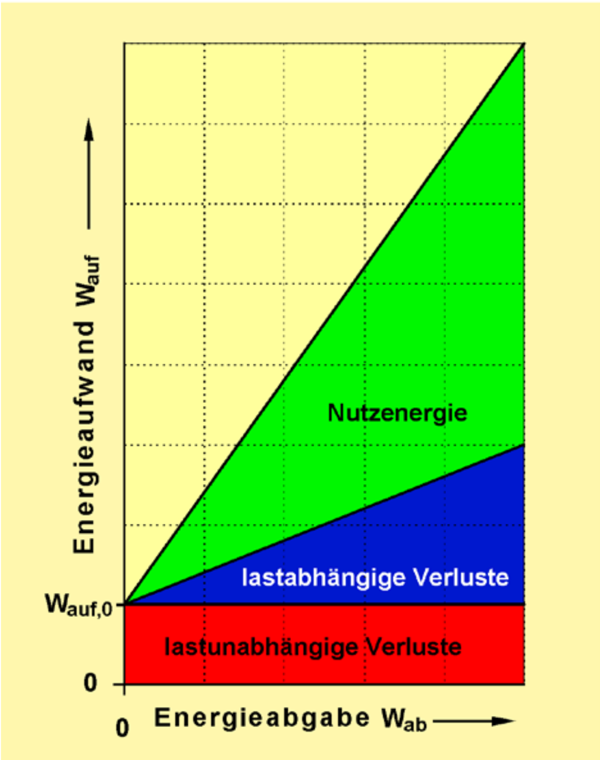

Bild 3: Abhängigkeit des Energieaufwands W_{auf} von der Nutzenergieabgabe W_{ab}

Bild 3 zeigt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen W_{auf} und W_{ab}.
Die von einer Anlage aufgenommene Energie W_{auf} lässt sich in drei Anteile aufgliedern:

- Nutzenergieabgabe, die von den zu versorgenden Verbrauchern angefordert wird
- Lastunabhängige Verluste, $W_{auf,0}$

Die lastunabhängigen Verluste stellen den Leerbetriebsbedarf (Bereitschaftsverlust) dar. Sie sind i.d.R. unabhängig von der Auslastung anzusehen. Die Höhe des Bereitschaftsverlustes ist abhängig von der Art, Größe und Zustand des Energieumwandlers sowie von den eingestellten Betriebsparametern (beispielsweise den Betriebstemperaturen eines Heizkessels in der Bereitschaft), jedoch nicht von der Nutzenergieabgabe.

- Lastabhängige Verluste
- In der Regel besteht zwischen den lastabhängigen Verlusten und der Höhe des Nutzenergiebedarfs ein linearer Zusammenhang.

Entsprechend Bild 3 kann der Zusammenhang zwischen der Energieaufnahme W_{auf} und der Energieabgabe W_{ab} mittels einer Geraden (Polynom ersten Grades) beschrieben werden:

$$W_{auf} = W_{auf,0} + a \cdot W_{ab} \tag{11}$$

mit $W_{auf,0}$: Bereitschaftsverlust

Für den Volllastbetrieb in der gesamten Betriebszeit t_B ergibt sich:

$$W_{auf,Volllast} = \frac{P_N \cdot t_B}{\eta_{Nenn}} \tag{12}$$

Werden W_{ab} und W_{auf} auf maximal mögliche "Nenn-Energieabgabe" ($P_N \cdot t_B$) bezogen, so wird aus der Energieabgabe W_{ab} die "normierte Energieabgabe" $\frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_B}$, die gleichbedeutend mit der Auslastung β nach Gl. (6) ist:

$$\frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_B} = \beta \tag{13}$$

Aus dem Energieaufwand W_{auf} wird dementsprechend der "**normierte Energieaufwand w_{auf}**":

$$\frac{W_{auf}}{P_N \cdot t_B} = w_{auf} \tag{14}$$

Ausgehend von Gl. (11) lässt sich unter Einbezug von Gl. (13) und Gl. (14) der Zusammenhang zwischen dem "normierten Energieaufwand w_{auf}" und der Auslastung β mittels einer linearen Funktion (siehe hierzu auch **Bild 4**) darstellen:

$$w_{auf}(\beta) = w_{auf,0} + a \cdot \beta \tag{15}$$

Dabei entspricht $w_{auf,0}$ den Bereitschaftsverlusten $W_{auf,0}$, die auf die "Nenn-Energieabgabe" ($P_N \cdot t_B$) normiert sind.

$$w_{auf,0} = \frac{W_{auf,0}}{P_N \cdot t_B} \tag{16}$$

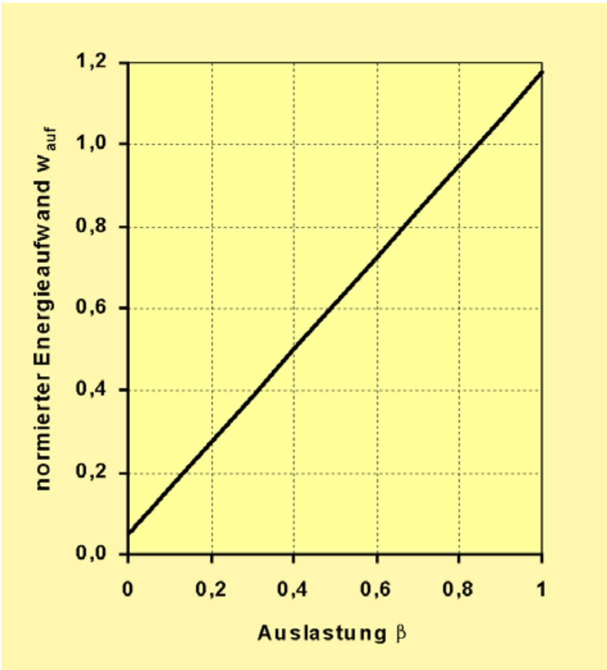

Bild 4: Abhängigkeit des normierter Energieaufwands w_{auf} von der Auslastung ß

Der Koeffizient a in Gl. (15) wird anhand der Betrachtung des Volllastbetriebes bestimmt. Für $\beta = 1$ ergibt sich dementsprechend Gl. (15) zu:

$$w_{auf}(\beta = 1) = w_{auf,0} + a \quad (17)$$

bzw.

$$a = w_{auf}(\beta = 1) - w_{auf,0} \quad (17)a$$

w_{auf} für $\beta = 1$ kann aus dem Zusammenhang entsprechend Gl. (12) gewonnen werden, wenn Gl. (12) ebenfalls auf die "Nenn-Energieabgabe" ($P_N \cdot t_B$) bezogen wird. Daraus wird ersichtlich, dass w_{auf} für $\beta = 1$ der reziproke Wert des Nennwirkungsgrades ist:

$$w_{auf}(\beta = 1) = \frac{W_{auf,Vollast}}{P_N \cdot t_B} = \frac{1}{\eta_{Nenn}} \quad (18)$$

Daraus folgt, dass der Koeffizient a der Gl. (15) aus dem Nennwirkungsgrad η_{Nenn} und dem normierten Bereitschaftsverlusten $w_{auf,0}$ bestimmt werden kann:

$$a = \frac{1}{\eta_{Nenn}} - w_{auf,0} \quad (19)$$

Gl. (15) kann somit auch wie folgt dargestellt werden:

$$w_{auf}(\beta) = w_{auf,0} + \left(\frac{1}{\eta_{Nenn}} - w_{auf,0}\right) \cdot \beta \quad (20)$$

Es ist also ausreichend, zur Bestimmung der Charakteristik der meisten Verbraucher bzw. der meisten energietechnischen Anlagen nur **zwei Kennwerte** heranzuziehen:

- normierte Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$
- Nennwirkungsgrad η_{Nenn}

Dabei sind jeweils die gültigen Betriebsparameter zu berücksichtigen, beispielsweise die Kesseltemperatur bei Volllast und im Bereitschaftszustand.
Selbstverständlich ist es aufgrund des linearen Zusammenhangs nach Gl. (20) auch möglich, zur Bestimmung der Funktion $w_{auf} = f(\beta)$ zwei beliebige Betriebspunkte heranzuziehen.

Zusammenhang zwischen dem normierten Energieaufwand w_{auf} und der Aufwandszahl e bzw. dem Nutzungsgrad $\bar{\eta}$

Erweitert man Gl. (14) im Zähler und Nenner um W_{ab}, wird deutlich, dass der normierte Energieaufwand w_{auf} auch aus dem Produkt aus der Auslastung β und dem Verhältnis von Energieaufwand W_{auf} und zu Energieabgabe W_{ab} ermittelt werden kann:

$$w_{auf} = \frac{W_{auf}}{P_N \cdot t_B} = \frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_B} \cdot \frac{W_{auf}}{W_{ab}} = \beta \cdot \frac{W_{auf}}{W_{ab}} \quad (21)$$

$$\text{mit } \beta = \frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_B}$$

Nach Gl. (8) entspricht der Quotient aus Energieaufwand W_{auf} und Energieabgabe W_{ab} der Aufwandszahl e bzw. dem reziproken Wert des Nutzungsgrades $\bar{\eta}$.
Somit ist der "normierte Energieaufwand w_{auf}" gleich dem Produkt aus der Auslastung β und der Aufwandszahl e:

$$w_{auf} = \frac{W_{auf}}{W_{ab}} \cdot \beta = e \cdot \beta \qquad (22)$$

$$\text{mit } e = \frac{W_{auf}}{W_{ab}}$$

Analog entspricht der "normierte Energieaufwand w_{auf}" dem Quotienten aus der Auslastung β und dem Nutzungsgrad $\overline{\eta}$:

$$w_{auf} = \frac{W_{auf}}{W_{ab}} \cdot \beta = \frac{\beta}{\overline{\eta}} \qquad (23)$$

$$\text{mit } \overline{\eta} = \frac{W_{ab}}{W_{auf}}$$

Löst man Gl. (22) nach e(β) bzw. Gl. (23) nach $\overline{\eta}(\beta)$ auf und berücksichtigt jeweils die Zusammenhänge aus Gl. (15), kann man die Aufwandszahl e und den Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ als eine Funktion der beiden Parameter "$w_{auf,0}$" und "a" darstellen.

$$e(\beta) = \frac{w_{auf.0}}{\beta} + a \qquad (24)$$

$$\overline{\eta}(\beta) = \frac{1}{e(\beta)} = \frac{\beta}{a \cdot \beta + w_{auf,0}} \qquad (25)$$

Somit stellen alle drei Kurvenverläufe

- der normierte Energieaufwand w_{auf}= f(β)
- der Nutzungsgrad $\overline{\eta}$ = f(β)

und

- die Aufwandszahl e = f(β)

denselben Sachverhalt dar, siehe Gl. (15), (24) und (25). Die Bewertung der Anlagentechnik mittels des normierten Energieaufwands ist daher konsistent zur bereits existierenden Bewertungsmethodik für die Heizungstechnik.

Es ist weiterhin ersichtlich, dass somit **auch** zur Bestimmung des Funktionsverlaufs von e = f(β) bzw. $\overline{\eta} = f(\beta)$ nur **zwei Kennwerte** erforderlich sind:

- die normierten Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$
- der Nennwirkungsgrad η_{Nenn}

Die in der Fachliteratur wiederholt anzutreffende Annahme, dass man die Funktion e = f(β) bzw. $\overline{\eta} = f(\beta)$ aufgrund des stark nicht linearen Zusammenhangs mit Hilfe vieler Messpunkte im Labor bzw. vieler Simulationen bestimmen müsste, **ist also nicht richtig.**
Die zahlreichen Diagramme in den Normen und Richtlinien ließen sich damit durch eine Zuordnungstabelle, welche die Koeffizienten a und $w_{auf,0}$ enthält, ersetzen. Die derzeit relativ ungenaue Bestimmung von e mittels Ablesen der Werte aus einem Diagramm würde ebenfalls entfallen.

Als Beispiel soll eine Kennlinie e = f(β) in die Darstellungsform w = f(β) übergeführt werden. Hierzu wird die im Rechenbeispiel der VDI 2067-20 [3] (Kapitel 7.1) verwendete Kennlinie eines leichten Heizkörpers heranzogen (Bild 25 der VDI 2067-20 [3]). Siehe hierzu **Bild 5.**

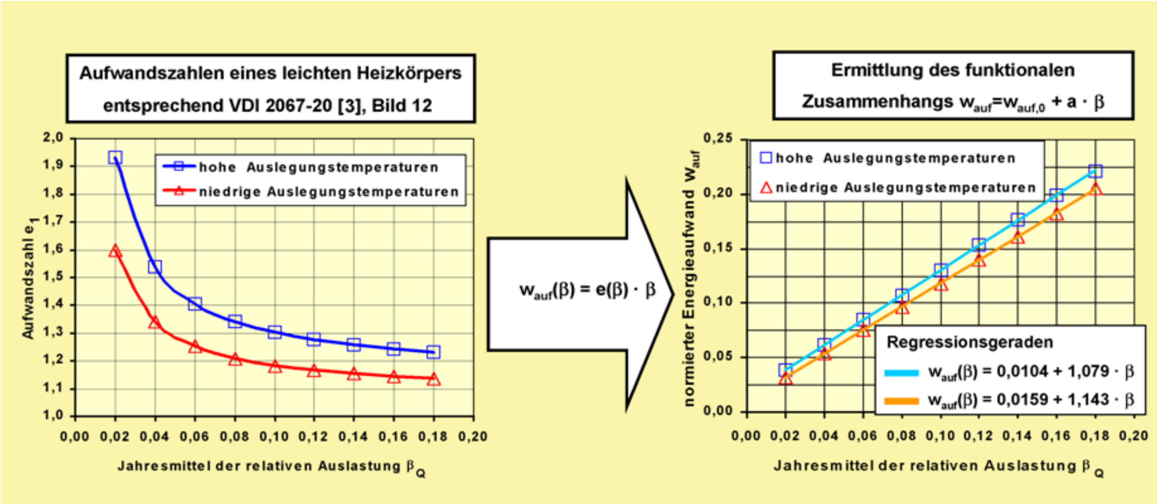

Bild 5: Bestimmung des normierten Energieaufwands w_{auf} anhand des Berechungsbeispiels im Kapitel 7 der VDI 2027-20 [3] (leichter Heizkörper bei hohen und niedrigen Auslegungstemperaturen)

Aus den Kennlinien für niedrige und hohe Auslegungstemperaturen werden für den Bereich $\beta = 0{,}02$ bis $\beta = 0{,}20$ die zugehörigen Aufwandszahlen abgelesen. Mittels des Zusammenhangs aus Gl. (22)

$$w_{auf} = e \cdot \beta$$

werden die entsprechenden Werte des normierten Energieaufwands ermittelt. Diese sind im rechten Diagramm der Bild 5 eingetragen. Es ist offensichtlich, dass hierfür der lineare Zusammenhang zwischen w_{auf} und β entsprechend Gl. (15) gilt:

$$w_{auf}(\beta) = 0{,}0104 + 1{,}079 \cdot \beta \quad \text{für hohe Auslegungstemperaturen}$$

bzw.

$$w_{auf}(\beta) = 0{,}0159 + 1{,}143 \cdot \beta \quad \text{für niedrige Auslegungstemperaturen}$$

Selbstverständlich ist es ebenfalls möglich, aus vorliegenden Werten der Aufwandszahl $e = f(\beta)$ eine funktionsmäßige Beschreibung des stochastischen Zusammenhang zu ermitteln. Dies ist im Falle der VDI 2067-20 [3] auch erfolgt. In allen graphischen Darstellungen der Aufwandszahl e ist in der Ordinatenbeschriftung folgende Funktion aufgeführt:

$$e(\beta) = k + \frac{a}{\beta} \tag{26}$$

Die zugehörigen Parameter a und k sind hierbei mittels Simulationsrechnungen und anschließender Ausgleichsrechnung ermittelt worden. Der in Gl. (24) aufgeführte Zusammenhang zwischen e, den normierten Bereitschaftsverlusten $w_{auf,0}$ und dem Nennwirkungsgrad η_{Nenn} ist jedoch offensichtlich nicht erkannt worden.

Die Bewertung mittels des normierten Energieaufwands w_{auf} hat auch aufgrund der i.d.R. linearen Zusammenhänge Vorteile im Vergleich zur Bewertung mittels der Aufwandszahl e bzw. des Nutzungsgrades $\overline{\eta}$, da bei der Darstellung des Energieaufwands mittels der "Aufwandszahl e" oder des "Nutzungsgrades $\overline{\eta}$" im Bereich der Auslastung "Null" ($\beta \rightarrow 0$) keine Aussagen über den Energieeinsatz möglich sind. Auch wenn hierfür der Zusammenhang entsprechend den Gl. (24) und Gl. (25) beschrieben werden kann, bewirken im Bereich der Auslastung "Null", aufgrund der sehr großen Steigung der Funktionen $e = f(\beta)$ bzw. $\overline{\eta} = f(\beta)$, bereits kleine Ableseabweichungen eine erhebliche Bandbreite der Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$.

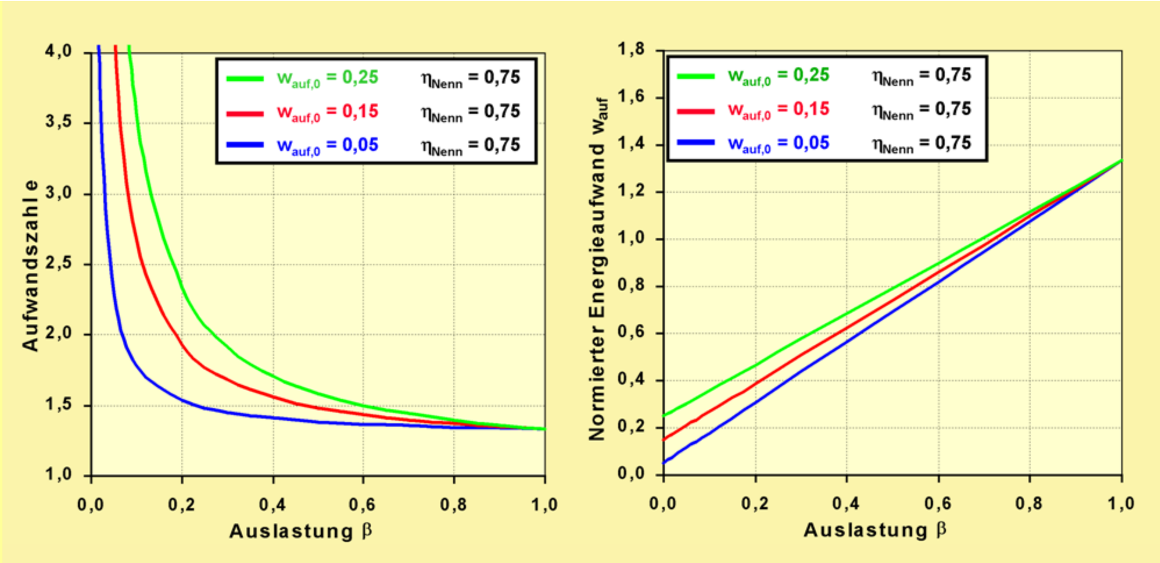

Bild 6: Zusammenhang zwischen der Aufwandszahl e und der Auslastung ß und zwischen dem normierten Energieaufwand w_{auf} und Auslastung ß bei Variation der normierten Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$

Bild 6 zeigt den Verlauf von $e = f(\beta)$ und $w_{auf} = f(\beta)$ bei Variation der normierten Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$. Für $\beta = 1$ ergibt sowohl für e $(\beta=1)$ als auch für w_{auf} $(\beta=1)$ definitionsgemäß stets den gleiche Wert, nämlich den reziproken Wert des Nennwirkungsgrades η_{Nenn}. Dieser ist unabhängig von den vorhandenen normierten Bereitschaftsverlusten $w_{auf,0}$

$$e(\beta = 1) = w_{auf}(\beta = 1) = \frac{1}{\eta_{Nenn}} \tag{27}$$

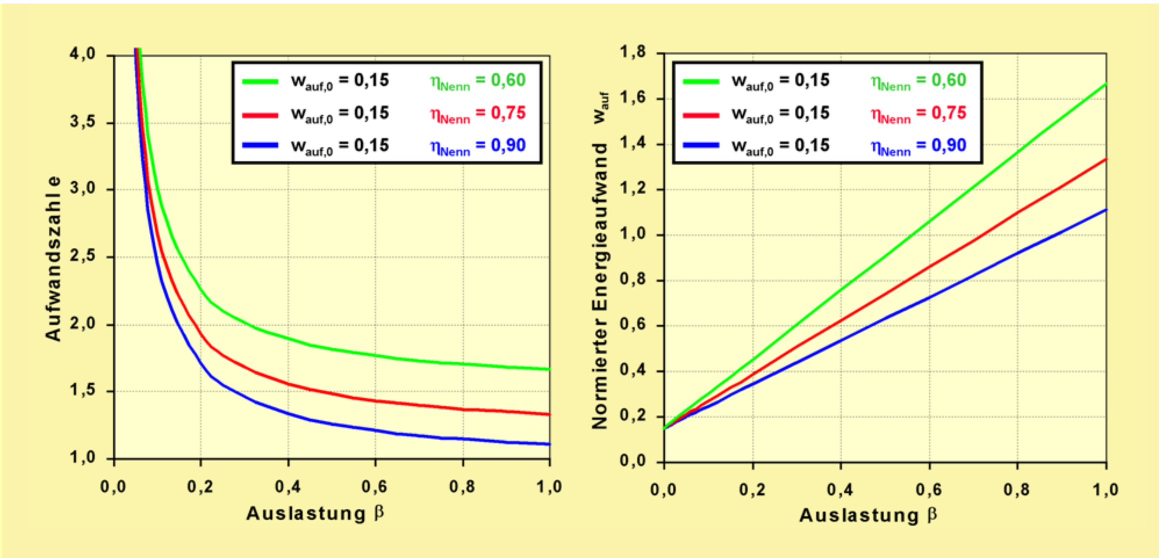

Bild 7: Zusammenhang zwischen Aufwandszahl e und Auslastung ß und zwischen normierten Energieaufwand w_{auf} und Auslastung ß bei Variation Des Nennwirkungsgrades η_{Nenn}

Dieser Zusammenhang wird auch aus **Bild 7** ersichtlich, in der der Verlauf von $e = f(\beta)$ und $w_{auf} = f(\beta)$ bei Variation des Nennwirkungsgrades η_{Nenn} dargestellt wird.
Die Ermittlung des Nennwirkungsgrades ist somit sowohl anhand des Kurvenverlaufs von $e = f(\beta)$ als auch von $w_{auf} = f(\beta)$ grundsätzlich möglich. Für $e = f(\beta)$ gilt dies jedoch nur, wenn der Kurvenverlauf im Bereich $\beta = 1$ vorliegt. Das "Ablesen" des Nennwirkungsgrades η_{Nenn} aus den Diagrammen in der VDI 2067-20 [3] ist hingegen sehr schwierig, da die in [3] enthaltenen Diagramme nur für den Bereich der Auslastung $\beta = 0{,}02$ bis $0{,}20$ dargestellt sind.
Die Ermittlung der Bereitschaftsverluste $W_{auf,0}$ bzw. der normierten Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$ ist aus der Betrachtung des Kurvenverlaufs $e = f(\beta)$ äußerst schwierig, wenn nicht unmöglich. Bild 6 (links) zeigt zwar, dass mit geringer werdenden Bereitschafsverlusten der Kurvenverlauf zunehmend "flacher" wird, dies erlaubt allerdings nur qualitative Aussagen.
Wird hingegen der "Kurven"-Verlauf des normierten Energieaufwands - der i.d.R. eine Gerade ist - herangezogen, können die Bereitschaftsverluste für $\beta = 0$ direkt aus dem Diagramm abgelesen werden.

Vergleich mit der Definition des Jahresnutzungsgrades für Heizkessel nach Dittrich

Nach Dittrich ([10], [11] und [12]) wird der Jahresnutzungsgrad für Heizkessel η_a wie folgt bestimmt:

$$\eta_a = \frac{\eta_K}{\left(\frac{b}{b_{VK}} - 1\right) \cdot q_B + 1} \tag{28}$$

mit η_K mittlerer Kesselwirkungsgrad
b Bereitschaftsdauer des Kessels
b_{VK} Vollbetriebsstunden des Kessels
q_B Bereitschaftsverlust, bezogen auf die Feuerungsleistung im Nennbetrieb ($P_{auf,Nenn}$)

Wird Gl. (28) umgestellt, ergibt sich:

$$\eta_a = \frac{\frac{b_{VK}}{b}}{\left(\frac{1}{\eta_K} - \frac{q_B}{\eta_K}\right) \cdot \frac{b_{VK}}{b} + \frac{q_B}{\eta_K}} \tag{28a}$$

Die Bereitschaftsdauer b des Kessels entspricht der Gesamtlaufzeit t_B:

$$b \triangleq t_B \tag{29}$$

Die Vollbetriebstunden b_{VK} werden üblicherweise mittels des Quotienten aus der abgegebenen Energie und der installierten Nennleistung ermittelt:

$$b_{VK} = \frac{W_{ab}}{P_N} \tag{30}$$

Der Quotient aus Vollbetriebsstunden b_{VK} und der Bereitschaftsdauer b entspricht somit nach Gl. (6) der Auslastung β:

$$\frac{b_{VK}}{b} = \frac{W_{ab}}{P_N \cdot t_B} = \beta \tag{31}$$

Der Kennwert q_B beschreibt das Verhältnis aus der Bereitschaftsverlust-Leistung ($P_{auf,0}$) und der Feuerungsleistung. Die "Feuerungsleistung" kann der Aufnahmeleistung im Nennbetrieb gleich gesetzt werden. Somit kann q_B wie folgt beschrieben werden:

$$q_B = \frac{P_{auf,0}}{P_{auf,N}} \tag{32}$$

Durch Erweiterung der Gl. (32) um die Betriebdauer t_B, welche wie zuvor erläutert der Bereitschaftsdauer b entspricht, wird deutlich, dass q_B auch dem Verhältnis zwischen den Bereitschaftsverlusten $W_{auf,0}$ und der "Nenn-Energieaufnahme" ($P_{auf,N} \cdot t_B$) entspricht:

$$q_B = \frac{P_{auf,0} \cdot t_B}{P_{auf,N} \cdot t_B} = \frac{W_{auf,0}}{P_{auf,N} \cdot t_B} \tag{33}$$

Wird Gl. (33) um den Kehrbruch des "mittleren Kesselwirkungsgrads η_K " erweitert, entspricht der Quotient aus q_B und η_K dem auf die "Nenn-Energieabgabe" bezogenen Energieaufwand zur Deckung der Bereitschaftsverluste:

$$\frac{q_B}{\eta_K} == \frac{1}{\eta_K \cdot P_{auf,N}} \cdot \frac{W_{auf,0}}{t_B} = \frac{W_{auf,0}}{P_N \cdot t_B} \tag{34}$$

Der rechter Term der Gl. (34) entspricht nach Gl. (17) der Definition des "normierten Bereitschaftsverlusts $w_{auf,0}$". Somit ist der Quotient aus q_B und η_K gleich dem "normierten Bereitschaftsverlust $w_{auf,0}$":

$$\frac{q_B}{\eta_K} = w_{auf,0} \tag{35}$$

$$\text{mit } w_{auf,0} = \frac{W_{auf,0}}{P_N \cdot t_B}$$

Werden die Zusammenhänge auch Gl. (31) und Gl. (35) in Gl. (28) bzw. in Gl. (28)a eingebunden ergibt sich:

$$\eta_a = \frac{\frac{b_{VK}}{b}}{\left(\frac{1}{\eta_K} - \frac{q_B}{\eta_K}\right) \cdot \frac{b_{VK}}{b} + \frac{q_B}{\eta_K}} = \frac{\beta}{\left(\frac{1}{\eta_{Nenn}} - w_{auf,0}\right) \cdot \beta + w_{auf,0}} \tag{36}$$

$$\text{mit} \qquad \beta = \frac{b_{VK}}{b}$$

$$w_{auf,0} = \frac{q_B}{\eta_K}$$

$$\eta_{Nenn} = \eta_K$$

Somit ist die Analogie von der Definition des Jahresnutzungsgrades nach Dittrich und dem Jahresnutzungsgrad $\overline{\eta}$, der sich aus Gl. (25) ergibt, ersichtlich. Folglich ist auch die Definition des "normierten Energieaufwands w_{auf}" nach Gl. (15) konsistent zur der Definition des Jahresnutzungsgrades nach Dittrich.

Beschreibung nichtlinearer Zusammenhänge zwischen Energieaufwand und Energieabgabe mittels w_{auf}

Mittels dem Kennwert "normierter Energieaufwand w_{auf}" können auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen Energieaufwand und Energieabgabe beschrieben werden. Der Zusammenhang $w_{auf} = f(\beta)$ kann in diesen Fällen mittels einem Polynom n-ter Ordnung ausreichend genau erfasst werden.

Ein nichtlinearer Zusammenhang von Energieaufwand und Energieabgabe besteht beispielsweise bei Brennwertkesseln. Im Bereich geringer Auslastung ist bekanntermaßen der Nutzungsgrad eines Brennwertkessel wegen der niedrigeren Systemtemperaturen höher als im Nennleistungsbereich. Erst bei sehr geringer Auslastung (i.d.R. für $\beta < 10\%$) sinkt der Nutzungsgrad dann gegen Null. Es stellt sich hier berechtigterweise die Frage, mit welcher Beschreibung $\overline{\eta} = f(\beta)$ bzw. $e = f(\beta)$ dieser Verlauf des Nutzungsgrades am sinnvollsten beschrieben werden kann. Hier kann die Betrachtung des normierten Energieaufwands ebenfalls helfen.

Als Beispiel zur Ermittlung der Funktion $w_{auf} = f(\beta)$ bei nichtlinearen Zusammenhängen zwischen Energieabgabe und Energieaufwand wird auf ein in [14] dargestelltes Berechnungsbeispiel zurückgegriffen: In [14] wird für einen Brennwertkessel die Bestimmung des **Normnutzungsgrades η_N** gemäß der DIN 4702 Teil 8 [13] durchgeführt. Entsprechend DIN 4702 Teil 8 [13] sind hierzu fünf definierte Messwerte erforderlich, die ebenfalls in [14] aufgeführt sind.

Diese fünf Messwerte werden für das nachfolgend beschriebene Beispiel herangezogen. Darüber hinaus wird der ebenfalls in [14] aufgeführte Nutzungsgrad bei Vollauslastung verwendet.

Anzumerken ist, dass der in [14] verwendete Begriff der "relative Kesselleistung" der Auslastung β entspricht und somit die Konsistenz zu der hier erläuterten Methodik $w_{auf} = f(\beta)$ bzw. $\overline{\eta} = f(\beta)$ gegeben ist.

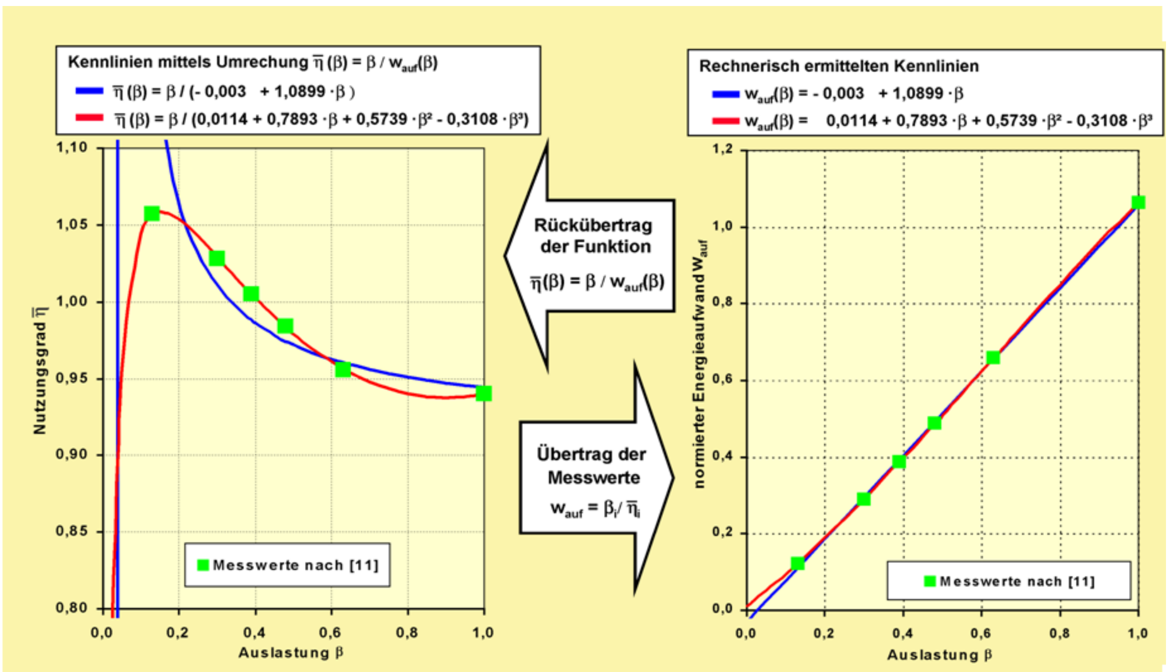

Bild 8: Beschreibung nicht linearer energetischer Zusammenhänge am Beispiel eines Brennwertkessels

Zuerst werden entsprechend Gl. (23) aus den in [14] entnommenen Wertpaaren ($\overline{\eta}$, β) die zugehörigen Wertepaare (w_{auf}, β) ermittelt. **Bild 8** zeigt zwei Diagramme in denen jeweils die Wertepaare ($\overline{\eta}$, β) bzw. (w_{auf}, β) eingetragen sind (grüne Punkte). Auf den ersten Blick erscheint für $w_{auf} = f(\beta)$ ein linearen Zusammenhang zu bestehen. Eine Gerade würde jedoch das charakteristische Verhalten eines Brennwertkessel im Teillastbereich nicht berücksichtigen. Der Punkt mit der Auslastung, an dem der Maximalwert des Nutzungsgrades auftritt, muss im Kennlinienverlauf des normierten Energieaufwands $w_{auf} = f(\beta)$ einem Wendepunkt entsprechen. Daher ist zur ausreichend genauen Beschreibung eines Brennwertkessels zumindest ein Polynom dritter Ordnung erforderlich.
Mittels einer Regressionsanalyse ergibt sich somit der Zusammenhang von w_{auf} und β zu

$$w_{auf}(\beta) = 0{,}0114 + 0{,}7893 \cdot \beta + 0{,}5739 \cdot \beta^2 - 0{,}3108 \cdot \beta^3 \tag{37}$$

Mittels Gl. (23) kann nun auch der stochastische Zusammenhang des Verlaufs des Nutzungsgrades $\overline{\eta} = f(\beta)$ mit folgender Funktion sehr genau beschrieben werden:

$$\overline{\eta}(\beta) = \frac{\beta}{0{,}0114 + 0{,}7893 \cdot \beta + 0{,}5739 \cdot \beta^2 - 0{,}3108 \cdot \beta^3} \tag{38}$$

Entsprechend gilt für die Aufwandszahl :

$$e(\beta) = \frac{0{,}0114 + 0{,}7893 \cdot \beta + 0{,}5739 \cdot \beta^2 - 0{,}3108 \cdot \beta^3}{\beta} \tag{39}$$

Der in Bild 8 eingetragene Verlauf von $\overline{\eta} = f(\beta)$ nach Gl. (38) weist eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten auf. Auch im Bereich, der durch keine Messwerte belegt ist ($\beta < 0{,}13$), werden die richtigen Tendenzen aufgezeigt. Der Verlauf von $\overline{\eta} = f(\beta)$ wäre in diesem Bereich selbstverständlich noch genauer, wenn die spezifischen Bereitschaftsverluste $w_{auf,0}$ bekannt wären.

In Bild 8 sind auch der Verlauf von $\overline{\eta} = f(\beta)$ und von $w_{auf} = f(\beta)$ dargestellt, falls bei der Ermittlung des normierten Energieaufwandes eine lineare Ausgleichfunktion angesetzt wird. Obgleich zumindest bei der Betrachtung von $w_{auf} = f(\beta)$ eine sehr gute Übereinstimmung mit den umgerechneten Messwerten zu bestehen scheint, wird vor allem bei der Betrachtung von $w_{auf,0}$ eine Inkonsistenz erkennbar: $w_{auf,0}$ ist negativ, was für einen Heizkessel nicht möglich ist. Wird für die beiden Fälle der zurückgerechnete Verlauf von $\overline{\eta} = f(\beta)$ mit den Messwerten verglichen, ist es offensichtlich, dass die lineare oder quadratische Ausgleichfunktion zur korrekten Bild von w_{auf} nicht ausreichend ist.
Die kubische Ausgleichfunktion von $w_{auf} = f(\beta)$ bzw. die umgerechnete Funktion $\overline{\eta} = f(\beta)$ hingegen liefert wie zuvor dargestellt ein sehr gutes Ergebnis. Es ist somit auch für scheinbar nur sehr schwierig zu beschreibenden Kennlinienverläufe möglich, diese mittels des Systematik des "normierten Energieaufwandes w_{auf}" zu beschreiben.

Fazit

Mittels des Kennwerts "normierter Energieaufwand w_{auf}" kann der Zusammenhang von Aufwand und Nutzen bei den energetischen Anlagen in der Regel als eine Gerade (Polynom ersten Grades) beschrieben werden. Diese Darstellung ist konsistent zu der in den neuen Normen und Richtlinien verwendeten Aufwandszahl e, sowie zu dem auch weiterhin benutzten Nutzungsgrad $\overline{\eta}$. Es ergibt sich hier der Vorteil, dass die Charakteristik einer Anlage mittels zweier gängiger Wertepaare – Nennwirkungsgrad und Bereitschaftsverlust – beschrieben werden kann. Aufgrund der linearen Zusammenhänge bei der energetischen Betrachtung mittels des "normierten Energieaufwands w_{auf}" können Einflussfaktoren wesentlich einfacher erkannt werden.

Auch bei nicht linearen Zusammenhängen - beispielsweise bei Betrachtung von Brennwertkesseln – erlaubt die Methodik des "normierten Energieaufwands w_{auf}" die Zusammenhänge von Energieaufwand und Energieabgabe mit einem Polynom n-ter Ordnung zu beschreiben.

Ebenso können mit relativ geringem Aufwand komplexe haustechnische Systeme wie RLT-Anlagen energetisch bewertet werden, was auch nach der EU-Richtlinie über die Energieeffizienz von Gebäuden [1] künftig erforderlich sein wird.

Die Bewertung komplexer hautechnischer Systeme wird im zweiten Teil der Veröffentlichung dargestellt.

Literatur

[1] RICHTLINIE 2002/ /EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden 8094/2/02 REV 2.

[2] DIN 4701 Teil 10: Energetische Bewertung von heiz- und raumlufttechnischer Anlagen, Heizen, Warmwasser, Lüften, Vornorm, April 2000

[3] VDI 2067 Blatt 20: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Warmwasserheizungen. August 2000

[4] Bach, H.; Bauer, M.; Treiber, M.: MEDUSA - Minmierung des Energiebedarfs von Gebäuden durch Simulation und von Heizanlagen. AiF-Vorhaben-Nr.: 10592 N. Abschlussbericht.
Universität Stuttgart. April 1998

[5] Gehrecke, H.; Schaefer, H.; Schenkel, G.: Methoden in der Energieverbrauchs-Forschung. PEK Jg. 14 (1966) Heft 2/3

[6] Schaefer, H.: Festlegung von Definitionen über den Nutzungsgrad in der Energiewirtschaft. PEK Jg. 11 (1963) Heft 1. S. 3/5

[7] Schaefer, H.: Grundlagen der Strombedarfsdeckung. VDI-Lehrgang Nr. 13-03-04. VDI-Bildungswerk. Juni 1967

[8] Ebersbach, K. F.; Schaefer H.: Grundlagen der Wärmebedarfsdeckung. VDI-Lehrgang Nr. 13-04-04. VDI-Bildungswerk. Juni 1967

[9] Schaefer H.: Betriebsverhalten und –kennlinien von Anlagen und Maschinen. IFE Vorlesungsmanuskripte, Heft 4. Technische Universität München. 1987

[10] Recknagel H.; Sprenger, Schramek, E. R.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, Oldenburg 1998

[11] Dittrich, A.: Zum Jahreswirkungsgrad von Ein- und Mehrkesselanlagen. HLH Bd. 23 (1972) Nr. 12. S. 381/386

[12] Dittrich, A.: Berechnung des Jahresnutzungsgrades bei schwierigen Fällen. Eine neue vereinfachende Lösung. HLH Bd. 33 (1982) Nr. 10. S. 492/494

[13] DIN 4702 Teil 8: Heizkessel – Ermittlung des Norm-Nutzungsgrades und des Norm-Emissionsfaktors. März 1990

[14] Höbel, R.; Schlappmann, D.: Alternative zum Wirkungsgrad in der Heizkesselnorm. HLH Bd. 39 (1988) Nr. 3. S. 107/111

veröffentlicht in der HLHH:

Deutscher P., Rouvel L.: Der "normierte Energieaufwand w_{auf}"
Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen

Teil 1: Herleitung der Methodik und Vergleich mit den Kennwerten "Aufwandszahl e" und "Nutzungsgrad η"
HLH Bd. 54 (2003) Nr. 7 - Juli S. 27/33

Teil 2: Anwendung am Beispiel einer raumlufttechnischen Anlage
HLH Bd. 54 (2003) Nr. 8 - August S. 44/48

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE