

Kessel im Heizungsbetrieb

Einführung

Heizsystem

Wärmebedarf, Heizleistung

Intermittierender Brennerbetrieb

Quasistationärer und instationärer Teillastbetrieb

Wirkungs- und Nutzungsgrad der Heizungsanlage

Stationäre Wirkungsgrade

Nutzungsgrade im Taktbetrieb

Norm-Nutzungsgrad

Der quasistationäre Taktbetrieb

Sanierung von Altanlagen

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Einführung

Heizsystem:

Der Heizkessel ist ein Bestandteil des Heizsystems. Das Heizsystem besteht aus dem Brenner, dem Heizkessel, den Raumheizflächen und eventuell der Warmwasserbereitung (Abbildung 1).

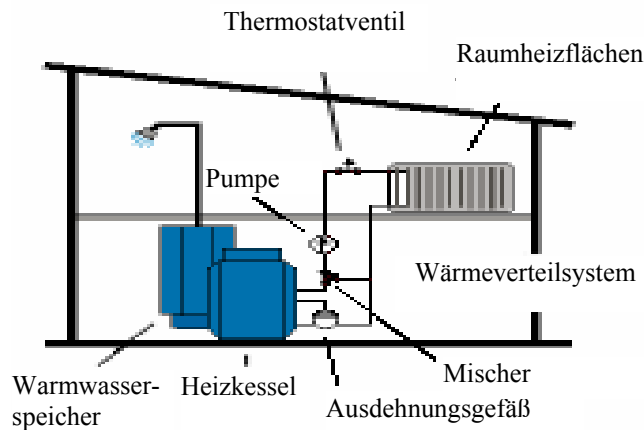


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Heizsystems

Wärmebedarf, Heizleistung

Die erforderliche Heizleistung ist bei durchgehender Beheizung im Wesentlichen abhängig von der jeweiligen (aktuellen) Außentemperatur. Die Heizungsanlage, insbesondere die Kesselleistung, wird nach dem Bedarf der kältesten Tage dimensioniert. Dazu kommen eventuell Zuschläge für die Warmwasserbereitung und für unterbrochenen Heizbetrieb. Die momentane Heizleistung hat einen Wert, der zwischen Null und der erforderlichen (maximalen) Heizleistung liegt (Abbildung 2).

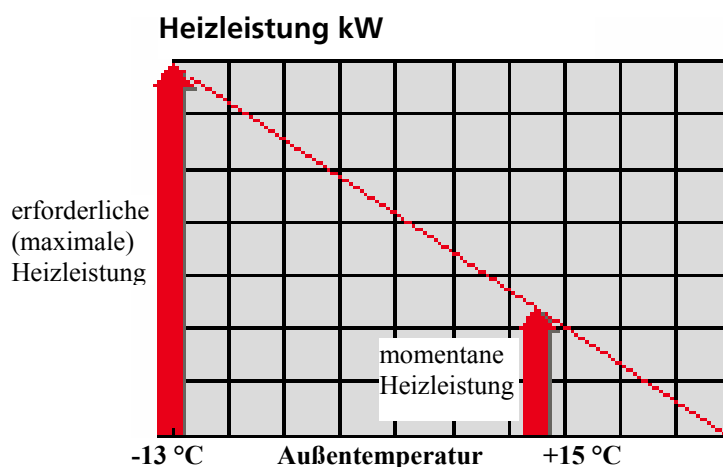


Abbildung 2: Erforderliche und momentane Heizleistung des Heizsystems

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Intermittierender Brennerbetrieb

Die Brennerleistung kleinerer Kessel ist häufig unveränderlich auf den höchsten Bedarf ausgelegt. Bei geringerem Bedarf erfolgt die Leistungsanpassung über Brenner-Ein/Aus-Schaltungen. Insbesondere bei Gasheizungen setzen sich zunehmend Brenner mit veränderlicher "modulierender" oder mit gestufter Leistung durch. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf Einstufenbrenner. Diese Betrachtungsweise kann durch Verallgemeinerung auch auf den modulierenden Heizungsbetrieb übertragen werden. Der intermittierende Brennerbetrieb wird auch als Taktbetrieb bezeichnet.

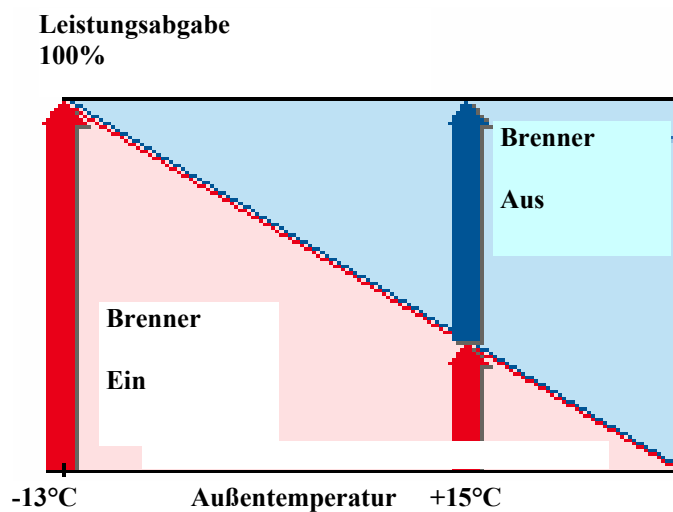


Abbildung 3: Leistungsanpassung einer Heizungsanlage im Taktbetrieb

Bei Einstufenbrenner ist das Verhältnis des maximalen zum augenblicklichen Wärmebedarf genau so groß wie das Verhältnis Brenner-Einschaltzeit zur Gesamt-Betriebszeit. Dieses Verhältnis wird auch relative Kesselleistung bzw. als Anlagenauslastung genannt: Gl. (1).

$$\varphi = \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} \quad (1)$$

Die Auslastung hat einen starken Einfluss auf den Anlagenwirkungsgrad.

Quasistationärer und instationärer Teillastbetrieb

Der quasistationäre Teillastbetrieb ist ein intermittierender Betrieb der Heizungsanlage, bei dem die Auslastung durch langsame Änderung der Außentemperatur sich langsam ändert. Die jeweilige Ein- und Ausschaltzeit des Brenners unterscheidet sich nur unwesentlich von der vorangegangenen Ein- und Ausschaltzeit (Abbildung 4).

Beim instationären Teillastbetrieb tritt eine plötzliche Änderung der Lastbedingung auf. Dies ist z.B. der Fall beim Beenden der Nachtabenkung, beim Stoßlüften der Wohnung, beim Füllen der Badewanne, beim Nachladen des Warmwasserspeichers, bei Verstellung der gewünschten Raumtemperatur, etc. (Abbildung 5).

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

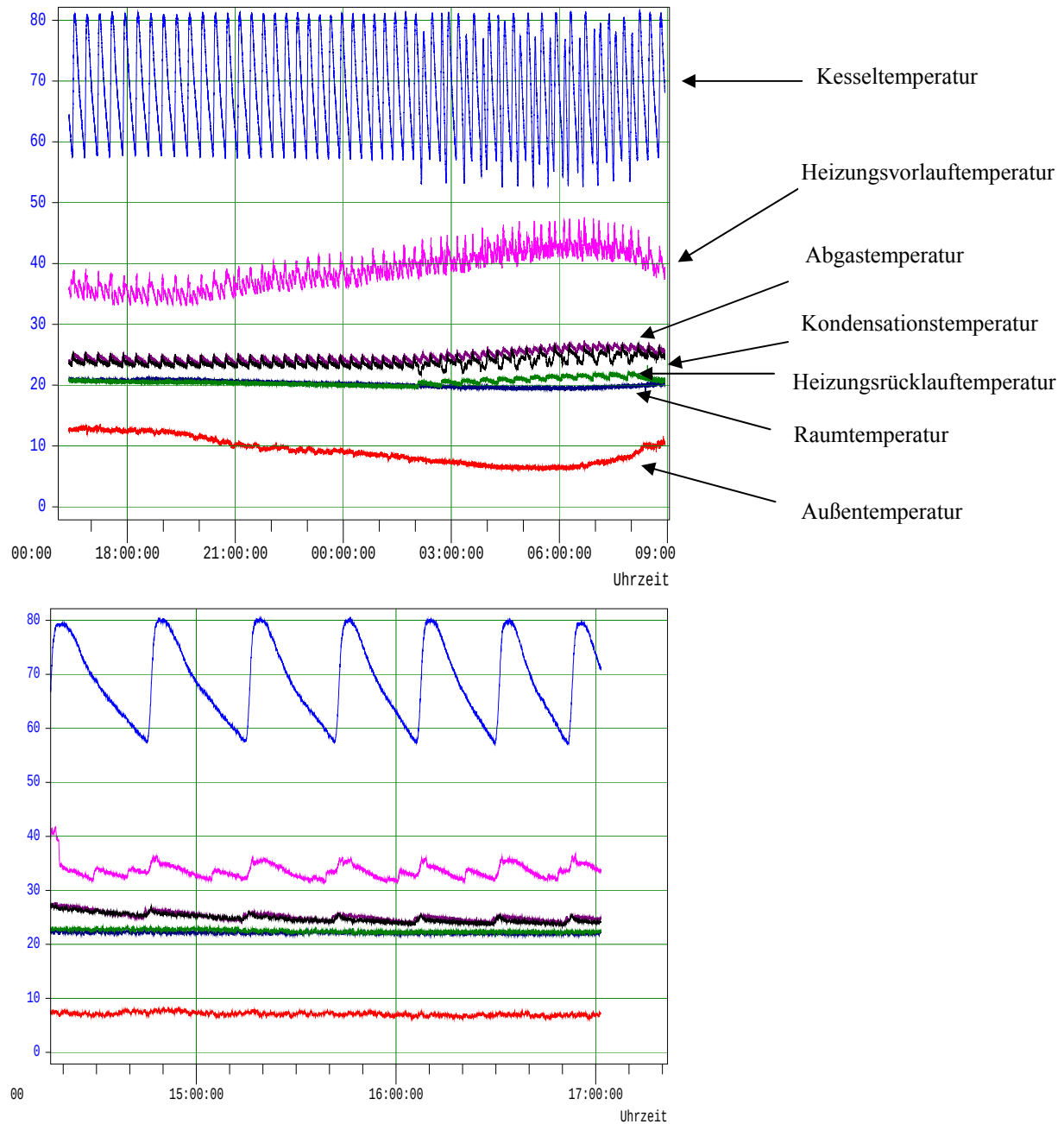


Abbildung 4: Quasistationärer Teillastbetrieb

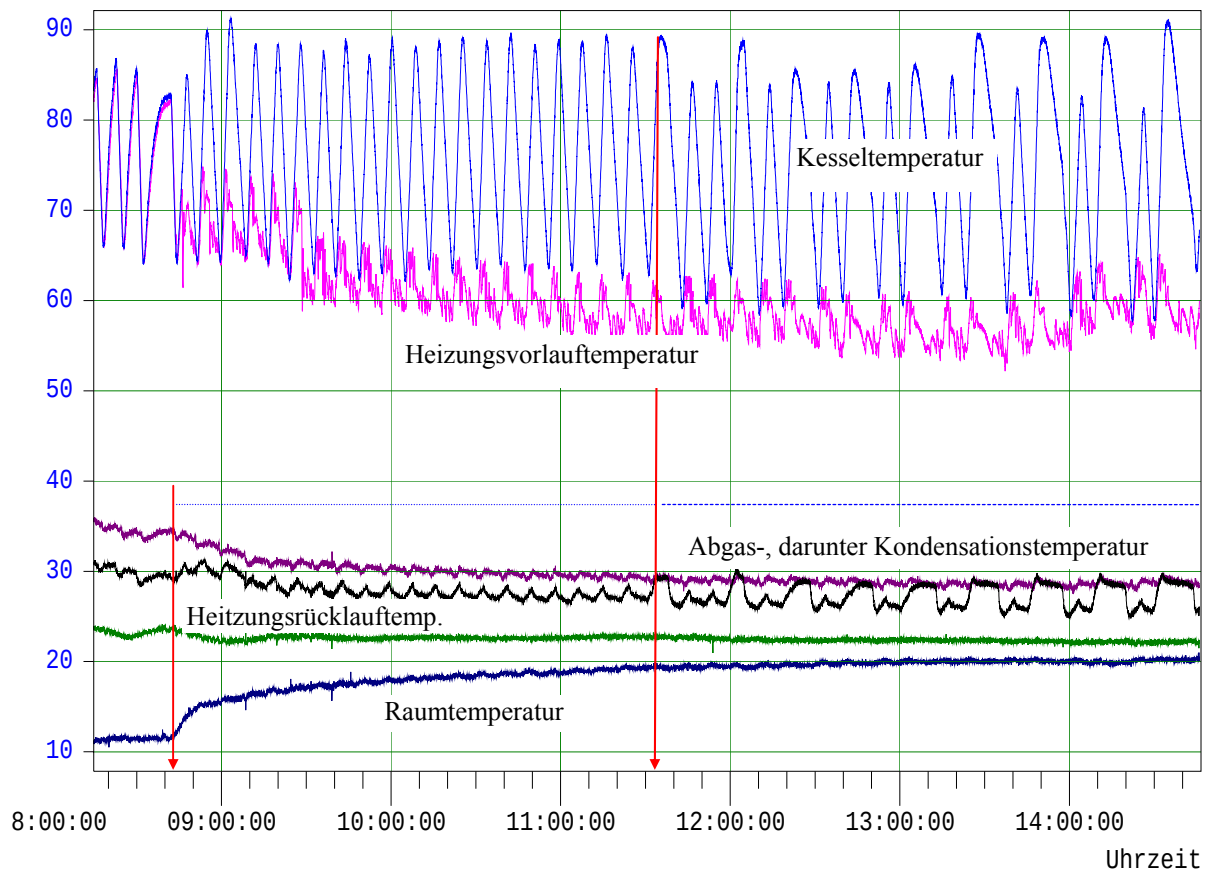
Abbildung 4 zeigt Temperaturmessungen im quasistationären Teillastbetrieb einer Ölberennwertnutzenden Heizungsanlage. Das obere Bild umfasst einen Zeitraum von 17 Stunden, das untere Bild zeigt einen Zeitraum von 2 Stunden und 45 Minuten. Man erkennt, dass jede Schaltperiode der vorangegangenen ähnelt; in einem größeren Zeitabstand können sich jedoch auch größere Veränderungen ergeben. Die vier mittleren Temperaturen (Abgastemperatur und Kondensationstemperatur beziehungsweise Heizungsrücklauftemperatur und Raumtemperatur) überlagern sich so sehr, dass sie teilweise kaum voneinander unterscheidbar sind.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

02.04.1998; Heizungsauslegung 55/45°C

Temperaturen: Kesselvorlauf, Heizungsvorlauf, Abgas/Kondensat, Kesselrücklauf, Heizungsrücklauf, Raum-, Außentemperatur



bis 8:42 Fenster geöffnet, Kühlventilatoren an

8:42 Fenster geschlossen, Kühlventilatoren abgestellt

8:42 bis 11:32 Raumtemperaturregelung durch Thermostatventile an den Rücklaufleitungen der Heizkörper

11:32 bis 14:50 Raumtemperaturregelung teils durch Thermostatventile an der Rücklaufleitungen der Heizkörper,

teils durch Thermostatventil in der Rücklauf-Sammelleitung

Abbildung 5: Instationärer Teillastbetrieb

Abbildung 5 zeigt Temperaturmessungen im instationären Teillastbetrieb der gleichen Ölbeheizten Heizungsanlage wie bei Abbildung 4. Die instationäre Betriebsphase beginnt um 8 Uhr 42 Minuten mit dem Schließen der bis dahin geöffneten Fenster.

Um 11 Uhr 32 Minuten beginnt ein Betriebszustand, bei dem durch regelungstechnische Maßnahmen die Taktfrequenz der Heizungsanlage reduziert wird: Die gleiche Auslastung wird durch verlängerte Ein- und Ausschaltzeiten verwirklicht. Durch das Reduzieren der Schaltfrequenz wird die Brennerschlussbedingte Schadstoffbildung reduziert.

Eine einfache regelungstechnische Möglichkeit zur Reduzierung der Schaltfrequenz ist, dass beim Einschalten des Brenners der Heizkreismassenstrom erhöht wird, z.B. durch Erhöhung des Heizkreisstroms. Auf diese Weise wird die Wärmekapazität des Heizkessels mit der Wärmekapazität der Heizkörper virtuell verknüpft.

Wirkungs- und Nutzungsgrad der Heizungsanlage

Stationäre Wirkungsgrade:

Der **feuerungstechnische Wirkungsgrad** einer Feuerungsanlage, η_F , ist ein Maß für die Verluste durch die fühlbare Abgaswärme bei der Verbrennung:

$$\eta_F = 100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{fA}}{\dot{Q}_{Br}}\right) \quad (2)$$

$\dot{Q}_{fA}$ = fühlbarer Abgaswärmestrom [kW]

$\dot{Q}_{Br}$ = Wärmestrom der Verbrennung bezogen auf den Heizwert [kW]

Den fühlbaren Abgaswärmestrom kann man aus dem Abgasmassenstrom in Kenntnis von dessen spezifischer Wärmekapazität errechnen als:

$$\dot{Q}_{fA} = \dot{m}_A \int_{T_L}^{T_A} c_p(T) dT \quad (3)$$

$\dot{m}_A$ = Abgasmassenstrom [kg/s]

T_A = Abgastemperatur [°C]

T_L = Temperatur der Verbrennungsluft [°C]

c_p = spezifische Wärmekapazität der Abgase [kJ / (kg K)]

Eine Näherungsformel für die Ermittlung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades ist in Gleichung (4) angegeben

$$\eta_F \approx 100 - c \frac{T_A - T_L}{CO_2} \quad (4)$$

mit

CO_2 = Konzentration im Abgas [%]

c = Brennstoffbeiwert; Erdgas: $c = 0,48$; Flüssiggas: $c = 0,53$; Heizöl: $c = 0,59$

Der **Kesselwirkungsgrad** einer Feuerungsanlage, η_K , ist ein Maß für die Summe der Abgasverluste und der Verluste durch die konduktive Wärmeabgabe des Kessels während der Brennerlaufzeit. Dieser Wärmeverlust ist die Summe der Strahlungswärme und des konvektiven Wärmeverlustes:

$$\eta_K = 100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{Konduktion} + \dot{Q}_{fA}}{\dot{Q}_{Br}}\right) \quad (5)$$

$\dot{Q}_{Konduktion}$ = Summe der Wärmestrahlung und des konvektiven Wärmeverlustes des Heizkessels. Dieser Wärmeverlust ist ein Maß für die „Wärmedichtheit“ des Kessels und beträgt in der Regel weniger als 1 % der Brennerleistung.

Achtung: In der älteren Literatur wird oft der Term $\dot{Q}_{Konduktion}$ als Kesselwirkungsgrad oder als Ofenwirkungsgrad bezeichnet. Bei dieser Definition des Kesselwirkungsgrades η_K wird für den Begriff nach Gl. (5) das Wort Gesamtwirkungsgrad η_G benutzt: $\eta_G = \eta_F \cdot \eta_K$. Diese Definition taucht immer wieder auf, daher ist es ratsam, bei dem Kesselwirkungsgrad immer auf die genaue Definition zu achten!!

Nutzungsgrade im Taktbetrieb:

Der **Stillstandsverlust** einer Feuerungsanlage, η_{st} , ist ein Maß für die Wärmeverluste des Heizkessels in der Ausschaltphase. Dieser Verlust setzt sich aus drei Teilen zusammen:

- 1) Konduktiver Wärmeverlust in der Ausschaltphase.
- 2) Wärmeverlust durch Luftströmung durch Feuerraum und Nachschaltheizfläche in der Stillstandszeit.
- 3) Wärmeverlust durch Luftströmung durch den Feuerraum in während der Vorspülung beim Brennerstart.

Der Term **1)** lässt sich durch eine gute Wärmedämmung des Kessels reduzieren. In der Regel ist dieser Term der niedrigste Anteil des Stillstandsverlustes.

Der Term **2)** kann durch folgende Maßnahmen vermindert werden: **A)** – durch Schornstein-Zugbegrenzer, z.B. durch Luftklappe in der Abgasleitung nach dem Kessel; **B)** – durch Herabsetzung der Abgastemperatur; **C)** – durch Sperrung der Luftzufuhr zum Feuerraum in der Ausschaltphase; und **D)** – durch Reduzierung der Brennerleistung und somit durch Reduzierung der Stillstandszeit.

Der Term **3)** kann durch Herabsetzung der Schaltfrequenz reduziert werden. Da die Schaltperioden bei Altanlagen länger sind als bei Neuanlagen, ist der Stillstandverlust einer sanierten Altanlage (z.B. Sanierung durch Senkung der Brennerleistung, eventuell durch Austausch des Brenners, jedoch unter Beibehaltung des alten Kessels) deutlich geringer als der einer modernen Kesselanlage.

Der **Teillastnutzungsgrad** einer Feuerungsanlage, η_φ , ist ein Maß für die Summe der Abgasverluste, der konduktiven Wärmeabgabe des Kessels während der Brennerlaufzeit und der Stillstandsverluste. Da die Stillstandsverluste der Anlage von der Einschaltquote φ abhängig sind, wird der Teillastwirkungsgrad als Funktion der relativen Auslastung angegeben.

$$\eta_\varphi = 100 \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{Stillstand}(\varphi)} + \dot{Q}_{\text{Konduktion}} + \dot{Q}_{fA}}{\dot{Q}_{Br}} \right) \quad (6)$$

mit

$$\begin{array}{lll} \dot{Q}_{fA} & \text{(Abgasverlust)} & \text{nach Gl. (3),} \\ \dot{Q}_{\text{Konduktion}} & \text{(Konduktionsverlust)} & \text{nach Gl. (5) und} \\ \dot{Q}_{\text{Stillstand}} & \text{(Stillstandsverlust) bei der Auslastung } \varphi. & \end{array}$$

Für die drei Verlustterme in Gl. (6) gilt:

$$\text{Stillstandsverlust} \quad > \quad \text{Abgasverlust} \quad > \quad \text{Konduktionsverlust (Strahlungsverlust).}$$

Der Stillstandsverlust sinkt mit zunehmender Anlagenauslastung und erreicht im stationären Betrieb (bei Volllast, d.h. bei $\varphi = 1$) den Wert $\dot{Q}_{\text{Stillstand}} = 0$.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Norm-Nutzungsgrad:

Der **Nutzungsgrad** ist ein Maß dafür, wie viel der im Energieträger gespeicherten Energie auch tatsächlich in einer Heizperiode verwendet wird. Im Unterschied zum **Wirkungsgrad**, der im *stationärem Betrieb* (Volllast) gemessen wird, wird der Nutzungsgrad über einem längeren Zeitraum beim *Taktbetrieb* ermittelt.

Der Wirkungsgrad ist stets höher als der Nutzungsgrad, da beim Teillastbetrieb neben Abgas- und Kesselverlusten auch Stillstandverluste auftreten. Beispiel: Ein Ölkessel hat einen Wirkungsgrad von 85%, dieser wird bei Volllast am Prüfstand gemessen. Im eingebauten Zustand (realer Betrieb in einem Haus) wird er vielleicht nur einen Nutzungsgrad von 60% über eine Heizperiode erreichen, da er fast nie im optimalen Betriebspunkt betrieben wird, sondern fast immer im Teillastbetrieb oder Taktbetrieb.

Der **Norm-Nutzungsgrad** ist ein Mittelwert von fünf Teillastwirkungsgraden (Nutzungsgraden), bei denen die Auslastungen so ausgewählt sind, dass bei jeder der fünf Teillastbereiche ca. 20 % Brennstoff im realen Heizbetrieb verbraucht werden (siehe Abbildung 9).

Für die Bestimmung des Nutzungsgrades einer Heizungsanlage müssen deren Teillast-Wirkungsgrade, η_{φ} , bei verschiedenen Auslastungen, φ , bekannt sein. Der Nutzungsgrad errechnet sich nach DIN 4702, Teil 8, aus den Teillast-Wirkungsgraden nach Gleichung (7)

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\varphi,i}}{\sum_{i=1}^n Br_{\varphi,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\varphi,i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_{\varphi,i}}{\eta_{\varphi,i}}} \quad (7)$$

mit

$\bar{\eta}$ = Nutzungsgrad

$E_{\varphi,i}$ = Energiebedarf bei Teillast φ

$Br_{\varphi,i}$ = Brennstoffenergie bei Teillast φ

η_{φ} = Wirkungsgrad bei Teillast φ nach Gl. (6)

φ = Auslastung nach Gl. (1)

Wählt man die verschiedenen Teillastbereiche für die Ermittlung des Nutzungsgrades so, dass bei jedem Teillastbereich die gleiche Energie umgesetzt wird, vereinfacht sich Gleichung (7) zu

$$\bar{\eta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta_{\varphi,i}}} \quad (\text{Norm-Nutzungsgrad: } n = 5) \quad (8)$$

Für die Bestimmung des Norm-Nutzungsgrades einer Heizungsanlage wird Gleichung (8) mit **n = 5** vorgeschrieben (DIN 4702, Teil 8). Bei Brennwertnutzung muss man für die Kesselleistungen im Teillastbereich so einstellen, dass die Rücklauftemperatur jeweils so hoch ist, wie bei einer gegebenen Heizkörperauslegung dies für den untersuchten Teillastbereich sich ergeben würde.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Der quasistationäre Taktbetrieb:

Der Heizwärmebedarf beträgt bei quasistationärer Teillast

$$\dot{Q}_{\text{Heizwärmebedarf}} = \dot{Q}_{\text{Brenner}} \cdot \eta_{\text{Kessel}} \cdot \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} = \dot{Q}_{\text{Kessel}} \cdot \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} = \dot{Q}_{\text{Kessel}} \cdot \varphi \quad (9)$$

mit $\varphi = \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}}$ als relative Kesselleistung nach Gleichung (1),

In der Einschaltphase wird die nicht an das Heizungssystem abgegebene Wärme durch Wärmekapazität des Kessels gespeichert. Die gespeicherte Wärmemenge beträgt:

$$Q_{\text{Kessel}} = (\dot{Q}_{\text{Brenner}} \cdot \eta_{\text{Kessel}} - \dot{Q}_{\text{Heizwärmebedarf}}) \cdot t_{\text{ein}} = (\dot{Q}_{\text{Kessel}} - \dot{Q}_{\text{Heizwärmebedarf}}) \cdot t_{\text{ein}} \quad (10)$$

In der Stillstandszeit wird der Heizwärmebedarf durch die gespeicherte Wärmeenergie des Heizkessels, Q_{Kessel} , abgedeckt. Also gilt

$$Q_{\text{Kessel}} = \dot{Q}_{\text{Heizwärmebedarf}} \cdot t_{\text{aus}} \quad (11)$$

Die Wärmekapazität des Kessels ist

$$Q_{\text{Kessel}} = M_{\text{Kessel}} \cdot c_{p,\text{Kessel}} \cdot \Delta T_{\text{Kessel}} \quad \text{bzw.} \quad Q_{\text{Kessel}} = W_{\text{Kessel}} \cdot c_{p,\text{Wasser}} \cdot \Delta T_{\text{Kessel}} \quad (12)$$

mit

M_{Kessel} als Masse des Kessels,

W_{Kessel} als Wasserwert des Kessels,

$c_{p,\text{Kessel}}$ als spezifische Wärmekapazität des Kessels und

ΔT_{Kessel} als Temperaturdifferenz der Kesseltemperatur zwischen Ein- und Ausschalten.

Der **Wasserwert** W_{Kessel} ist die Wärmekapazität des Kessels ausgedrückt als Wassermasse (d.h. Wassermenge, deren Wärmekapazität mit der des Kessels übereinstimmt). Moderne Heizkessel haben kleine Abmessungen (Vorteil) und folglich kurze Schaltkonstanten (Nachteil), hohe Taktfrequenz und erhöhte Schadstoffbildung, verursacht von häufigen Schaltvorgängen.

Setzt man für den Heizwärmebedarf von Gl. (9) in Gl. (11) ein, erhält man

$$Q_{\text{Kessel}} = \dot{Q}_{\text{Heizwärmebedarf}} \cdot t_{\text{aus}} = \dot{Q}_{\text{Kessel}} \cdot \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} \cdot t_{\text{aus}} = \dot{Q}_{\text{Kessel}} \cdot \frac{t_{\text{ein}} \cdot t_{\text{aus}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} = \dot{Q}_{\text{Kessel}} \cdot t^* \quad (13)$$

mit

$$t^* = \frac{t_{\text{ein}} \cdot t_{\text{aus}}}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} \quad (14)$$

t^* ist die **Schalt-Zeitkonstante** oder Schaltkonstante. Dieser Wert ist eine Apparatkonstante und ist beim quasistationärem Taktbetrieb **unabhängig von der Auslastung** φ . Die Schaltkonstante wird vom Wasserwert des Heizkessels, von der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausschalttemperatur des Brenners und von der Brennerleistung beeinflusst.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Die kürzestmögliche Einschaltzeit beträgt t^* und kommt im Sommerbetrieb vor, wenn der Brenner nur die Wärmeverluste des Kessels abdeckt ($\varphi \geq 0$).

Die kürzestmögliche Ausschaltzeit beträgt t^* und kommt im Kesselbetrieb wegen der Überdimensionierung der Heizungsanlagen so gut wie nie vor. Theoretisch entstünde diese kurze Ausschaltzeit bei der Auslegungstemperatur, wenn die Brennerleistung gerade noch die erforderliche Heizleistung abdecken kann. ($\varphi \leq 1$).

Die Ein- und die Ausschaltzeit bei 50 % Auslastung beträgt $2t^*$ ($\varphi = 0,5$).

Die kürzeste Schaltperiode entsteht bei 50 % Auslastung, und beträgt $4t^*$ ($\varphi = 0,5$).

Bei niedrigerer Auslastung verlängert sich die Ausschaltzeit (im Extremfall bis in die „Unendlichkeit“), die Einschaltzeit kann jedoch auch bei extrem niedriger Auslastung den Wert von t^* nicht unterschreiten. Dabei vermindert sich die Taktfrequenz durch die langen Ausschaltzeiten.

Bei sehr hohen Auslastungen hingegen vermindert sich die Ausschaltzeit, kann jedoch den Wert von t^* nicht unterschreiten. Auch dieser Fall führt zu einer Verminderung der Taktfrequenz, da die Einschaltzeiten sehr lang sind.

Die **Schaltfrequenz** bei einer beliebigen Teillast beträgt:

$$f_{\text{Schaltfrequenz}} = 1/(t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}) \quad (15)$$

und die **Schaltperiode** ist

$$t_{\text{Schaltperiode}} = \frac{1}{f} = t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}} \quad (16)$$

Eine Verkürzung der Schaltperiode verschlechtert den Anlagenwirkungsgrad, da jeder Brennerstart mit einer Luftdurchspülung des Feuerraumes beginnt. In dieser Zeit wird Wärme aus dem Feuerraum durch den Schornstein aus der Anlage ausgetragen. Da die Schaltperioden von Altanlagen durch ihre höhere Wärmekapazität länger sind als bei Neuanlagen, kann die Sanierung einer Altanlage (Senkung der Brennerleistung, eventuell Austausch des Brenners, eventuell Schornsteinsanierung mit Beibehaltung des alten Kessels) höhere Wirkungsgrade ergeben als der Einbau einer neuen Kessel-Brenner-Einheit.

Aufgabe 1 Berechnen Sie die Ein- und Ausschaltzeit und Auslastung folgender Heizungsanlage:

W:	Wasserwert des Kessels [kg]	35 kg
cp:	Wärmekapazität des Wassers	4,18 kJ/kgK
ΔT :	höchste Temperaturdifferenz Brenner Ein- Aus	8 K
$\dot{Q}_{\text{Kessel}}$	Kesselleistung (Brennerleistung-Kesselwirkungsgrad)	15 kW
$\dot{Q}_{\text{Heizwärmbedarf}}$	momentaner Heizleistungsbedarf	6 kW

Aufgabe 2: Wie hoch sind Ein- und Ausschaltzeit und die Schaltperiode der in der Aufgabe 1 definierten Anlage bei 20 % relativer Kesselleistung?

Aufgabe 3: Wie hoch ist die kürzeste mögliche Schaltperiode der in der Aufgabe 1 und 2 berechneten Anlage?

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

$$\text{Relative Kesselleistung} \quad \varphi = \frac{E}{E + A} \quad (1)$$

$$\text{Schaltkonstante} \quad t^* = \frac{E \cdot A}{E + A} \quad (14)$$

Wenn für die Schaltkonstante der Wert

$$t^* = 1 \text{ Minute} \quad \text{bzw.} \quad t^* = 60 \text{ s}$$

angenommen und für die relative Kesselleitung eine Parametervariation mit den Werten von

$$\varphi = 0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95 \text{ und } 0,99$$

durchgeführt wird, beinhalten die zwei Gleichungen, Gl. (1) und Gl. (14), zwei unbekannten, nämlich E (Einschaltzeit) und A (Ausschaltzeit), und sind somit lösbar. Aus Gleichung (1) kann die Einschaltzeit als Funktion der Kesselleistung und der Ausschaltzeit berechnet werden.

$$\varphi = \frac{E}{E + A} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$\varphi \cdot (E + A) = E \quad \text{Gl. (17)}$$

$$\varphi \cdot E - E = -\varphi \cdot A \quad \text{Gl. (18)}$$

$$E \cdot (\varphi - 1) = -\varphi \cdot A \quad \text{Gl. (19)}$$

$$E = -\frac{\varphi \cdot A}{\varphi - 1} \quad \text{Gl. (20)}$$

Nach einsetzen von Gl. (20) in Gl. (14) ergibt sich

$$t^* \cdot (E + A) = E \cdot A \quad \text{Gl. (21)}$$

$$t^* \left(\frac{-\varphi \cdot A}{\varphi - 1} + A \right) = \frac{\varphi \cdot A^2}{\varphi - 1} \quad \text{Gl. (22)}$$

und für die Schaltkonstante $t^* = 1$ erhält man schließlich:

$$\left(\frac{-\varphi \cdot A}{\varphi - 1} + A \right) = \frac{\varphi \cdot A^2}{\varphi - 1} \quad \text{Gl. (23)}$$

$$\frac{-\varphi \cdot A + A \cdot (\varphi - 1)}{\varphi - 1} = \frac{\varphi \cdot A^2}{\varphi - 1} \quad \text{Gl. (24)}$$

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

$$\varphi \cdot A^2 - \varphi \cdot A + \varphi \cdot A - A = 0 \quad \text{Gl. (25)}$$

$$\varphi \cdot A^2 - A = 0 \quad \text{Gl. (26)}$$

$$A \cdot (\varphi \cdot A - 1) = 0 \quad \text{Gl. (27)}$$

$$\varphi \cdot A - 1 = 0 \quad \text{Gl. (28)}$$

$$A = \frac{1}{\varphi} \quad \text{Gl. (29)}$$

Relative Kesselleistung φ Gl. (1)	Ausschaltzeit $A=1/\varphi$ Gl. (29)	Einschaltzeit $E=-(\varphi \cdot A)/(\varphi - 1)$ Gl. (20)	Schaltfrequenz $f=1/[(E+A) \cdot 60]$ Gl. (15)	Schaltperiode $60/f$ Gl. (16)
[%]	[Min]	[Min]	[Hz]	[Min]
1	100,00	1,01	0,00017	101,0
5	20,00	1,05	0,00079	21,1
10	10,00	1,11	0,00150	11,1
20	5,00	1,25	0,00267	6,3
30	3,33	1,43	0,00350	4,8
40	2,50	1,67	0,00400	4,2
50	2,00	2,00	0,00417	4,0
60	1,67	2,50	0,00400	4,2
70	1,43	3,33	0,00350	4,8
80	1,25	5,00	0,00267	6,3
90	1,11	10,00	0,00150	11,1
95	1,05	20,00	0,00079	21,1
99	1,01	100,00	0,00017	101,0

Tabelle 1 Schaltzeiten, Schaltfrequenzen und Schaltperioden eines Heizkessels mit der Schaltkonstante $t^* = 1$ Minute bzw. $t^* = 60s$.

Gemäß Gleichung (13), $Q_{Kessel} = \dot{Q}_{Kessel} \cdot t^*$, ist diese Bedingung erfüllt bei

$\Delta T_{Kessel} = 10$ K (Temperaturdifferenz der Kesseltemperatur zwischen Ein- und Ausschalten),

$\eta_{Kessel} = 90\%$ und

Brennerleistung [in kW] $\cong$ Wasserwert des Kessels W_{Kessel} [in Liter]. Dies ist der Fall bei Heizkesseln mit geringer Wärmekapazität, die folglich mehrere hunderte Mal am Tag ein- und ausschalten. Wegen der Temperaturschichtung im Kessel steht nicht die gesamte Wärmekapazität des Kessels für die Wärmespeicherung zur Verfügung. Folglich ist die tatsächliche Taktfrequenz einer Heizungsanlage etwas höher als die aus den Erhaltungsbleichungen berechnete. Ebenso ist die gemessene Schaltkonstante t^* etwas kürzer als die aus Gleichung (13) ermittelte.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

EINSTUFENBRENNER:

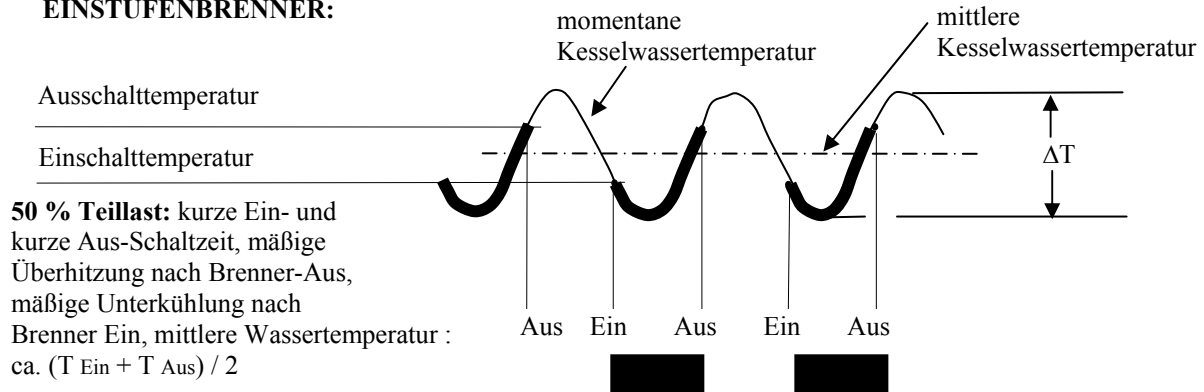


Abbildung 6: Instationärer Teillastbetrieb bei $\phi = 0,5$.

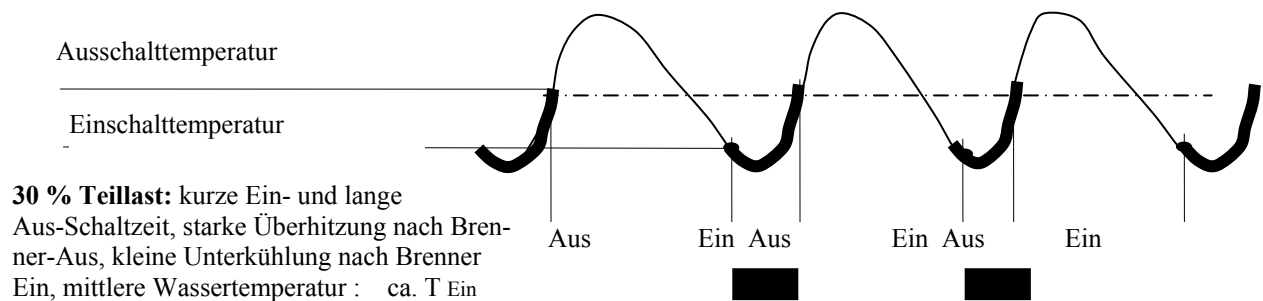


Abbildung 7: Instationärer Teillastbetrieb bei $\phi = 0,3$ (milde Außentemperatur).

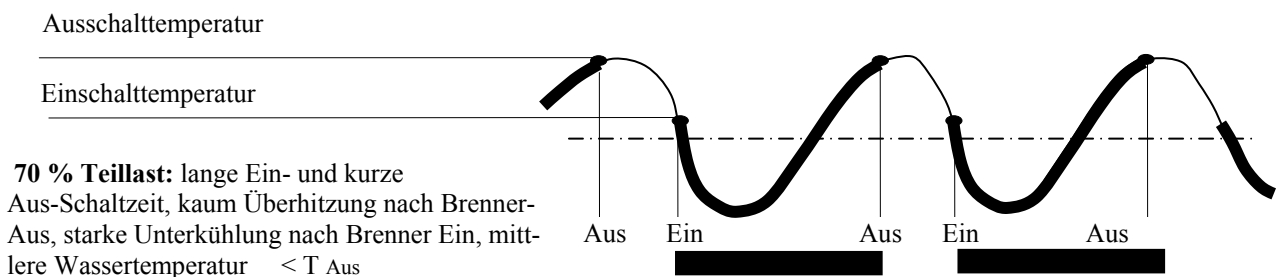


Abbildung 8: Instationärer Teillastbetrieb bei $\phi = 0,7$ (sehr niedrige Außentemperatur).

Die Abbildungen 6 bis 8 zeigen die Kesseltemperatur beim Taktbetrieb eines Einstufenbrenners. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die höchste Schaltfrequenz bei 50 % relativer Kesselleistung liegt. Ferner zeigen die Abbildungen, dass im Sommerbetrieb nach dem Brenner-Ausschalten die Kesseltemperatur deutlich ansteigt, da nur sehr wenig Wärme aus der Anlage abgeführt wird, während die heißen Brennerbauteile unmittelbar nach dem Brennerschluss ihre überschüssige Wärme dem Heizkessel abgeben. Aus den gleichen Gründen sinkt im Winterbetrieb nach dem Brennerstart zunächst die Kesseltemperatur.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

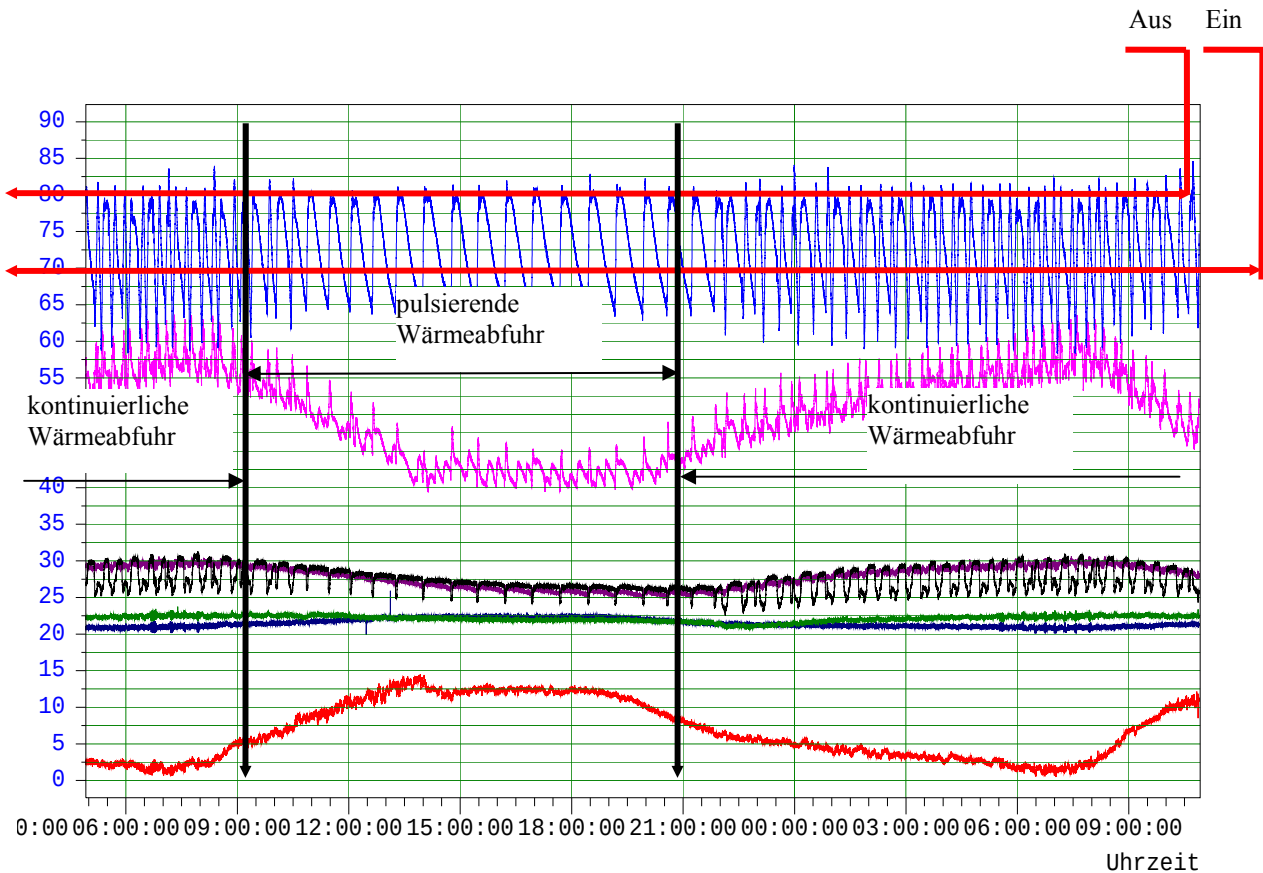


Abbildung 9: Heizkreistemperaturen bei stationärer (oben) und dynamischer (unten) Teillast

Kontinuierliche Wärmeabfuhr: Die Umwälzpumpe läuft kontinuierlich, d.h. unabhängig von dem Brennerzustand (EIN oder AUS)

Pulsierende Wärmeabfuhr: Der Heizkreismassenstrom wird erhöht in der Zeit, in der der Brenner läuft und reduziert in der Brennerstillstandzeit. Auf diese Weise werden die Wärmekapazitäten des Heizkessels und der Heizkörper virtuell miteinander verknüpft. Brennereinschaltzeit und Stillstandzeit werden länger, die Startverluste und Startemissionen der Anlage werden reduziert.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Sanierung von Altanlagen:

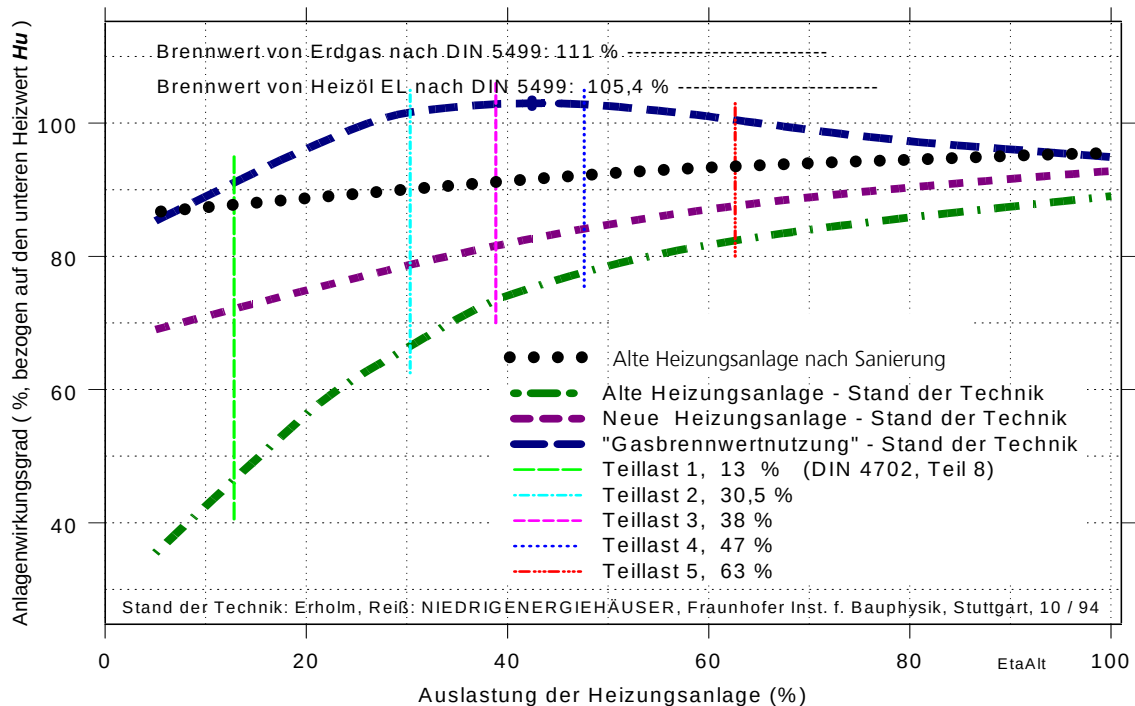


Abbildung 10: Instationärer Anlagenwirkungsgrad als Funktion der Auslastung φ

Für eine Steigerung des Jahresnutzungsgrades muss eine Überdimensionierung der Anlage möglichst vermieden werden. Bei gleicher Auslastung steigt der Nutzungsgrad mit zunehmender Wärmekapazität der Anlage: Große Wärmekapazität → kleine Schaltfrequenz → Reduzierung der Startverluste.

Bei der Sanierung einer Altanlage:

- 1) Verbesserung der Wärmedämmung
- 2) Falls möglich: Brennwertnutzung
- 3) Falls die Altanlage Ölheizung war: nicht auf Gas umsteigen
- 4) Falls der Alte Heizkessel technisch einwandfrei ist: Altkessel behalten
 In diesem Fall
 - a) Schornstein sanieren
 - b) Brennerleistung reduzieren: Neuer Brenner mit kleinerer Leistung
 - c) Möglichst neue Heizungsregelung
 - d) Wärmedämmung des alten Kessels verbessern
- 5) Stillstandverluste Reduzieren
 - a) Absenkung der Abgastemperatur
 - b) Absenkung des Schornsteinzuges
 - c) Absenkung der Schaltfrequenz
- 6) Ermittlung der erforderlichen Heizleistung, Verminderung der Brennerleistung

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Ermittlung der erforderlichen Heizleistung $Q_{\max}$

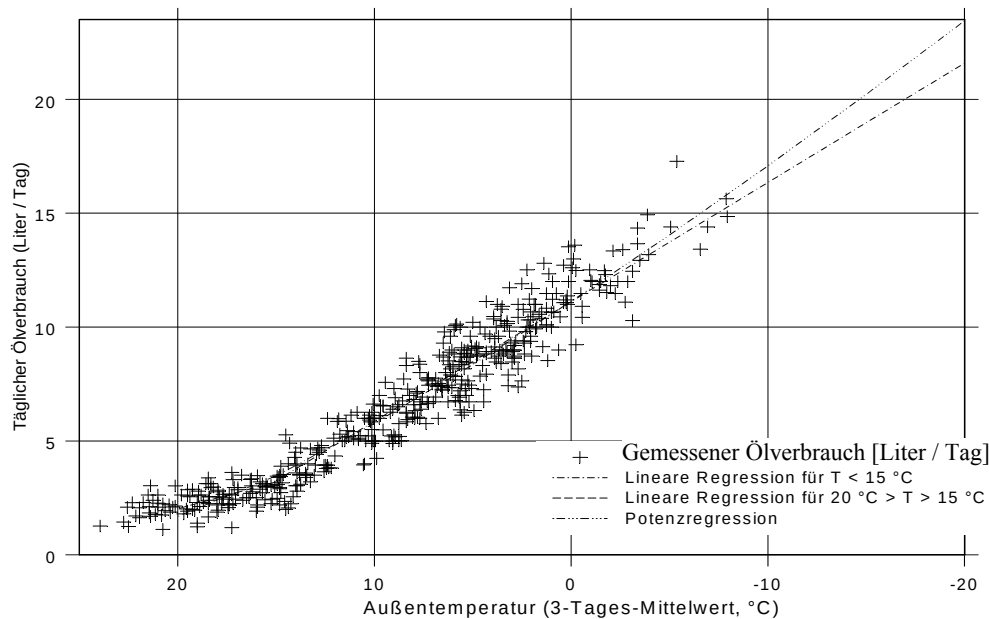


Abbildung 11: Täglicher Ölverbrauch für Heizung und Wassererwärmung für ein freistehendes Einfamilienhaus. Quelle für Abb. 11.-12: Faragó: Maximaler Wärmebedarf von Gebäuden, TGA Fachplaner 12-2002

Aus den Messungen wurde ermittelt, wie groß der Brennstoffverbrauch bzw. der Heizwärmebedarf des Hauses wäre, wenn an dem jeweiligen Messtag die tiefste anzunehmende Außentemperatur vorgeherrscht hätte. Die Umrechnung des täglichen Brennstoffverbrauchs in die maximal benötigte Heizleistung erfolgt nach der Gleichung:

$$\Gamma = \frac{\dot{B} \cdot H \cdot \Delta T_{\text{Auslegung}}}{24 \cdot \Delta T_{\text{Messung}}} \quad \text{mit} \quad (30)$$

- Γ = Heizwärmebedarf bzw. Heizleistung [kW],
- $\dot{B}$ = täglicher Brennstoffverbrauch in [kg/d] , [Liter/d] oder [m³/d],
- H = Brennstoffheizwert oder -brennwert (siehe Tabelle),
- $\Delta T_{\text{Auslegung}}$ = Differenz zwischen Raum- und Auslegungstemperatur [K].
- $\Delta T_{\text{Messung}}$ = Differenz zwischen Raum- und gemessener Außentemperatur [K].

Tabelle 1 zeigt den auf kWh bezogenen Heizwert und Brennwert verschiedener Brennstoffe. Für das beschriebene Experiment wurde Heizöl EL als Brennstoff genommen.

Brennstoff	Heizöl	Erdgas	Flüssiggas
Einheit	KWh/Liter	kWh/m³	kWh/kg
Brennwert	10,7	9,77 – 11,48	13,98
Heizwert	10	8,8 – 10,3	12,8
Prozentualer Unterschied	7 %	11,4 – 11,8 %	9,2 %

Tabelle 2: Heizwert und Brennwert in kWh/Liter, kWh/m³ oder kWh/kg

5 – Heizungsbetrieb

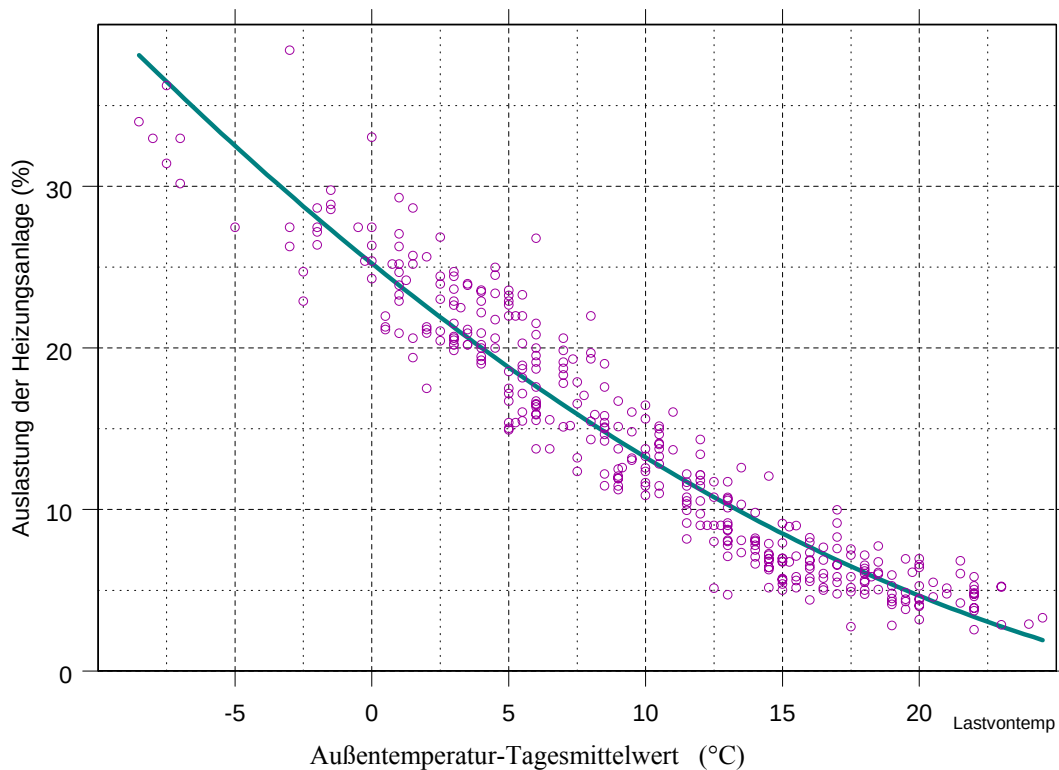


Abbildung 12: Auslastung eines Heizkessels in einem Einfamilienhaus als Funktion der Außentemperatur. Der maximale Wärmebedarf des Gebäudes beträgt 11 kW, die Brennerleistung 18 kW. Das Einfamilienhaus (Altbau) steht in der Klimazone mit -14°C Auslegungstemperatur, die Heizkörperauslegung ist $55/45^{\circ}\text{C}$, die Wärme für Heizung und Brauchwasserbereitung erfolgt durch eine brennwertnutzende Ölfeuerung.

Abbildung 12 wurde durch Auswertung der in Abbildung 11 gezeigten Versuche ermittelt. Sie zeigt die relativ schwache Korrelation zwischen Außentemperatur und Auslastung der Heizungsanlage.

Aufgabe 4: Bei der experimentellen Bestimmung des Heizwärmebedarfes eines Einfamilienhauses beträgt der gemessene Tages-Heizölverbrauch 10 Liter bei einer mittleren Tages-Außentemperatur von $+4^{\circ}\text{C}$. Die Auslegungstemperatur ist -18°C und die Raumtemperatur wird mit $+20^{\circ}\text{C}$ berücksichtigt. Wie hoch ist der auf dem Heizwert bezogene Heizwärmebedarf?

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

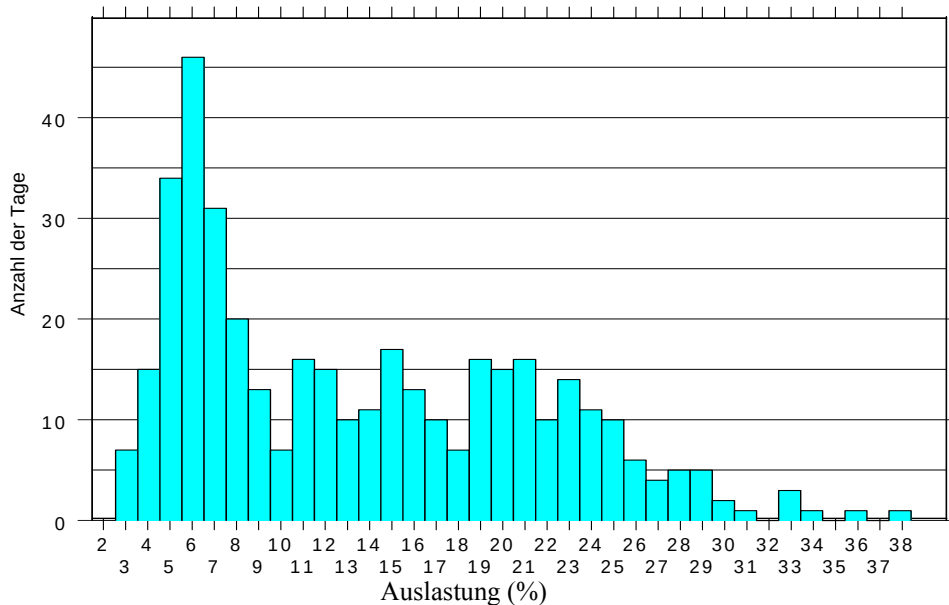


Abbildung 13: Auslastungshäufigkeit der Heizungsanlage entsprechend der Versuche nach Abbildung 11

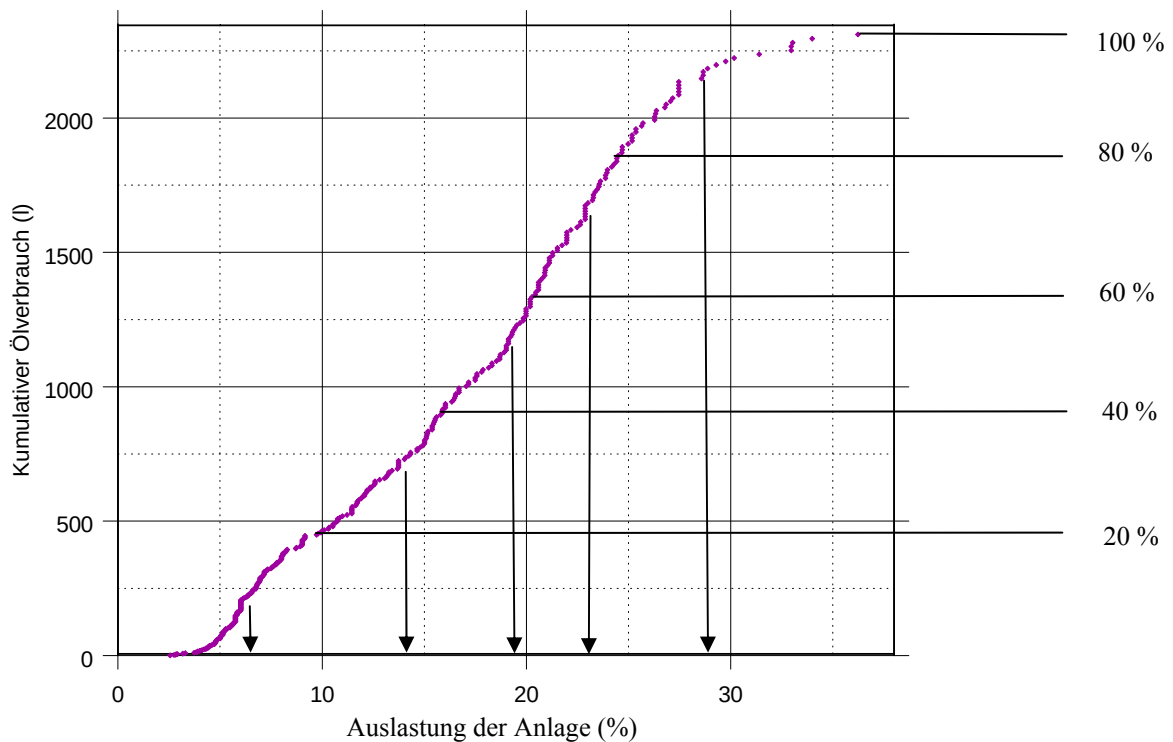


Abbildung 14: Auslastungshäufigkeit und kumulierter Brennstoffverbrauch entsprechend der Versuche nach Abbildung 11.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

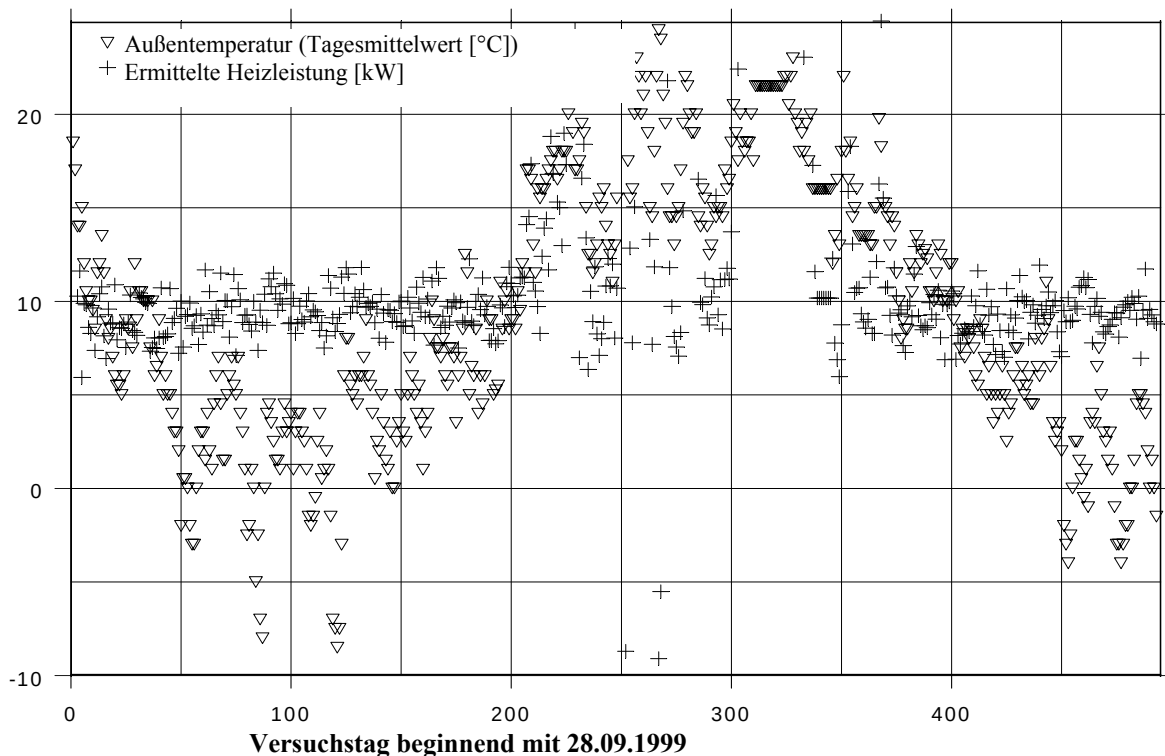


Abbildung 15: Ermittelte Heizleistung nach den Messungen gezeigt in Abbildung 14 und ausgewertet mit Gleichung 30 Quelle für Abb. 15.-16: Faragó: Maximaler Wärmebedarf von Gebäuden, TGA Fachplaner 2-2003

Aus Abbildung 15 ist ersichtlich, dass der aus dem täglichen Brennstoffverbrauch abgeleitete Nennwärmebedarf großen statistischen Schwankungen unterworfen ist. Wenn das Messergebnis als Mittelwert vieler Messungen angesehen wird, muss die Anzahl der notwendigen Messungen groß sein, um eine hinreichende Genauigkeit zu erzielen. Dabei handelt es sich nicht um Mess- Ungenauigkeiten, sondern um den Einfluss der nicht erfassten Größen, wie Wind, tägliche Sonnenscheindauer, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, von den Bewohnern bewirkte Schwankungen der Raumtemperatur, Schwankungen des Lüftungswärmebedarfes, Schwankungen des täglichen Warmwasserbedarfes etc.

Durch eine selektive Filterung der Messwerte bezüglich statistischer Schwankungen kann aus der in Abbildung 15 dargestellten Messung der außentemperaturabhängige Wärmebedarf bis auf eine Genauigkeit von $\pm 10\%$ sehr einfach ermittelt werden:

Regel für die Ermittlung des maximalen Wärmebedarfes einer Heizung aus mehreren Messungen: Die Messung wird so lange durchgeführt, bis das Verhältnis zwischen gemessenem Maximal- und Minimalwert den Betrag **1,25** erreicht oder überschreitet; der gemessene Maximalwert gilt als der maximale Heizwärmebedarf. Berücksichtigt werden nur solche Messwerte, bei denen die tagesmittlere Außentemperatur den Wert von **+12 °C** nicht überschreitet. Für eine abgeschlossene Messung müssen wenigstens **5** gültige Messwerte vorliegen.

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

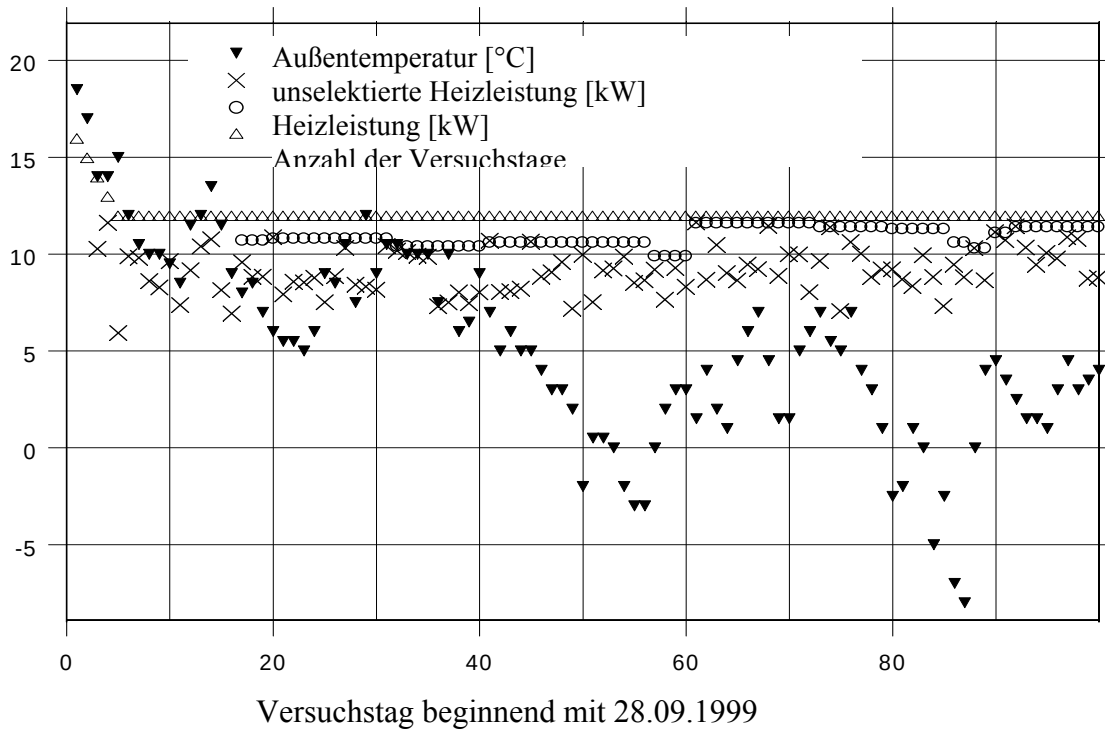


Abbildung 16: Selektierte Heizleistung nach den Messungen gezeigt in Abbildung 15

Ein Beispiel für die gemessene Heizleistung zeigt Abbildung 16. An den in der Abbildung gezeigten 100 Messtagen entstehen 94 gültige Messungen mit dem Messergebnis einer erforderlichen Heizleistung von $10,5 \pm 0,5$ kW. Die gleiche maximale Heizleistung ergaben die in der Abbildung 16 nicht gezeigten weiteren 400 Messtage. Für die Messung werden lediglich ein Maximum-Minimum-Thermometer für die Messung der täglichen Außentemperatur und ein Öl-mengenzähler bzw. eine Gasuhr benötigt. Die Messung berücksichtigt die Auswirkungen der meteorologische Wetterschwankungen auf den Heizwärmebedarf, die Wärmekapazität des Hauses und die Gewohnheiten der Hausbewohner bezüglich Heizung und Warmwasserverbrauch.

Aufgabe 5: Ermitteln Sie den maximalen Wärmebedarf eines Einfamilienhauses aus folgender Messserie. Benutzen Sie dabei die „Regeln für die Ermittlung des maximalen Wärmebedarfes“. Heizwert des Heizöls ist $H = 10$ kWh/Liter, Auslegungstemperatur = -16 °C, Raumtemperatur = 20 °C

Versuchstag	maximale Außentemperatur [°C]	minimale Außentemperatur [°C]	gemessener Ölverbrauch [Liter]
No			
1	10	-3	5,9
2	11	0	6,3
3	10	-1	6,5
4	12	0	6,1
5	13	-1	5
6	12	-2	5,8
7	12	0	5,9
8	10	1	5,8
9	10	4	6,1

Lösung der Aufgaben

Aufgabe 1 Berechnen Sie die Ein- und Ausschaltzeit und Auslastung folgender Heizungsanlage:

W:	Wasserwert des Kessels [kg]	35 kg
cp:	Wärmekapazität des Wassers	4,18 kJ/kgK
ΔT :	höchste Temperaturdifferenz Brenner Ein- Aus	8 K
$\dot{Q}_{Kessel}$	Kesselleistung (Brennerleistung·Kesselwirkungsgrad)	15 kW
$\dot{Q}_{Heizwärmbedarf}$	momentaner Heizleistungsbedarf	6 kW

$$Q_{Kessel} = W \cdot cp \cdot \Delta T = 35 \cdot 4,18 \cdot 8 \text{ [kgkJ/kgK} \cdot \text{K} = \text{kJ}] = 1217 \text{ kJ} \quad \text{Gl. (12)}$$

$$Q_{Kessel} = (\dot{Q}_{Kessel} - \dot{Q}_{Heizwärmbedarf}) \cdot t_{ein} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$\dot{Q}_{Heizwärmbedarf} = \dot{Q}_{Kessel} \cdot \varphi \quad \text{Gl. (9)}$$

$$Q_{Kessel} = \dot{Q}_{Heizwärmbedarf} \cdot t_{aus} \quad \text{Gl (13)}$$

$$\text{Auslastung } \varphi = \dot{Q}_{Heizwärmbedarf} / \dot{Q}_{Kessel} = 6 / 15 = 0,4 = 40 \%$$

$$t_{aus} = Q_{Kessel} / \dot{Q}_{Heizwärmbedarf} = 1217 \text{ J} / 6 \text{ kW} = 1217 \text{ kJ} / 6 \text{ kJ/s} = 195 \text{ s}$$

$$t_{ein} = Q_{Kessel} / (\dot{Q}_{Kessel} - \dot{Q}_{Heizwärmbedarf}) = 1217 \text{ J} / 9 \text{ kW} = 130 \text{ s}$$

Aufgabe 2: Wie hoch sind Ein- und Ausschaltzeit und die Schaltperiode der in der Aufgabe 1 definierten Anlage bei 20 % relativer Kesselleistung?

$$t^* = \frac{t_{ein} \cdot t_{aus}}{t_{ein} + t_{aus}} \quad \text{Gl. (14)}$$

$$\varphi = \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$t_{Schalperiode} = \frac{1}{f} = t_{ein} + t_{aus} \quad \text{Gl. (16)}$$

$$t^* = (195 \cdot 130) / (195 + 130) = 78 \text{ s}$$

$$\varphi = 0,2$$

$$t_{ein} + t_{aus} = t_{ein} \cdot t_{aus} / t^*$$

$$t_{ein} + t_{aus} = t_{ein} / \varphi$$

$$t_{ein} / \varphi = t_{ein} \cdot t_{aus} / t^*$$

$$1/0,2 = t_{aus} / 78 = \varphi \cdot (t_{ein} + t_{aus})$$

$$t_{aus} = 78 / 0,2 = 390 \text{ s}$$

$$t_{ein} = \varphi \cdot (t_{ein} + t_{aus}) \rightarrow t_{ein} \cdot (1 - \varphi) = \varphi \cdot t_{aus} \rightarrow 0,8 \cdot t_{ein} = 0,2 \cdot t_{aus} \rightarrow t_{ein} = 97,5 \text{ s}$$

$$t_{Schaltkonstante} = t_{ein} + t_{aus} = 97,5 + 390 = 487,5$$

5 – Heizungsbetrieb

zoltan.farago@dlr.de

Aufgabe 3: Wie hoch ist die kürzeste mögliche Schaltperiode der in der Aufgabe 1 und 2 berechneten Anlage?

$$T_{\text{kürzeste Schaltkonstante}} = 4 \cdot t^* = 4 \cdot 78 = 312 \text{ s}$$

Aufgabe 4: Bei der experimentellen Bestimmung des Heizwärmebedarfes eines Einfamilienhauses beträgt der gemessene Tages-Heizölverbrauch 10 Liter bei einer mittleren Tages-Außentemperatur von + 4 °C. Die Auslegungstemperatur ist –18 °C und die Raumtemperatur wird mit + 20 °C berücksichtigt. Wie hoch ist der auf dem Heizwert bezogene Heizwärmebedarf?

$$\Gamma = \frac{\dot{B} \cdot H \cdot \Delta T_{\text{Auslegung}}}{24 \cdot \Delta T_{\text{Messung}}} \quad \text{mit} \quad (30)$$

Γ	=	Heizwärmebedarf bzw. Heizleistung	[kW],
$\dot{B}$	=	täglicher Brennstoffverbrauch in	10 [Liter/d],
H	=	Heizwert von Heizöl EL	10 kWh/l,
$\Delta T_{\text{Auslegung}}$	=	Differenz zwischen Raum- und Auslegungstemperatur	(20 - -18)=38 [K].
$\Delta T_{\text{Messung}}$	=	Differenz zw. Raum- und gemessener Außentemperatur	(20 - 4) = 16[K].

$$\Gamma = \frac{\dot{B} \cdot H \cdot \Delta T_{\text{Auslegung}}}{24 \cdot \Delta T_{\text{Messung}}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 38}{24 \cdot 16} = 9,90 \text{ kW}$$

Aufgabe 5: Ermitteln Sie den maximalen Wärmebedarf eines Einfamilienhauses aus den gegebenen Messwerten. Benutzen Sie dabei die **Regeln für die Ermittlung des maximalen Wärmebedarfes**.

Heizwert des Heizöls ist $H = 10 \text{ kWh/Liter}$,
 $\Delta T_{\text{Auslegung}} = -16 \text{ °C}$,
 Raumtemperatur $= 20 \text{ °C}$

Messdaten						Berechnet			
No	T-a Max	T-a Min	$\dot{B}$	T-Mittel	$\Delta T_{\text{Messung}}$	Γ	Qmax	Qmin	Qmax/Qmin
1	10	-3	5,9	3,5	16,5	5,36363636	5,36363636	5,36363636	1,00
2	11	0	6,3	5,5	14,5	6,51724138	6,51724138	5,36363636	1,22
3	10	-1	6,5	4,5	15,5	6,29032258	6,51724138	5,36363636	1,22
4	12	0	6,1	6	14	6,53571429	6,53571429	5,36363636	1,22
5	13	-1	5	6	14	5,35714286	6,53571429	5,35714286	1,22
6	12	-2	5,8	5	15	5,8	6,53571429	5,35714286	1,22
7	12	0	5,9	6	14	6,32142857	6,53571429	5,35714286	1,22
8	10	1	5,8	5,5	14,5	6	6,53571429	5,35714286	1,22
9	10	4	6,1	7	13	7,03846154	7,03846154	5,35714286	1,31

Nach 9 Tagen ist die Messung beendet, der maximale Wärmebedarf beträgt 7,0 kW