

Entwicklungstendenzen in der Regelungstechnik von Heizanlagen

Aktuelle Fragen auf Basis der Heizungsanlagen- und der Wärmeschutzverordnung sowie der Produktangebote auf der ISH '95.

Teil 1: Regelungstechnische Maßnahmen zur Verminderung der Schalthäufigkeit von Brennern

Alle beteiligten Partner in der Technischen Gebäudeausrüstung, speziell auch in der Heiztechnik (Planer, ausführendes Handwerk, Hersteller), sind aufgefordert, bestehende und neue Techniken in Richtung auf maximale Ausnutzung alter Potentiale zur Energieeinsparung, zur Emissionsminderung und zur vereinfachten Bedienung durch den Endkunden zu entwickeln. Leider ist es häufig so, dass sehr komplexe und schwer zu überschauende Anlagen mit integrierten Regelungen geplant und eingebaut werden, die nach den Werbeaussagen der Komponentenhersteller optimale Energieeinsparung bei geringsten Emissionen versprechen, in der Praxis diese Ergebnisse jedoch nicht erbringen. Wichtige Zusammenhänge zwischen den Funktionsanforderungen der Komponenten Wärmeerzeuger, Pumpe, Heizkörper und Thermostatventile werden dabei leider nicht gesehen. Es ist wichtig, dass alle Komponenten einer Heizungsanlage richtig aufeinander abgestimmt sind, um einen optimalen Betrieb zu ermöglichen.

Einführung

Vor, auf und nach der ISH '95 waren die Zusammenhänge von "Schalthäufigkeit und Kesselwasserinhalt bei unterschiedlichen Regelstrategien für die Schaltdifferenz" zentrales Thema verschiedener, in der Fachöffentlichkeit konträr geführter Diskussionen. Zur Minimierung der Anfahrmissionen werden heute von den einzelnen Herstellern in ihren Regelgeräten größere Schaltdifferenzen verwendet. Eine Vergrößerung der Schaltdifferenz bewirkt eine Verlängerung der Brennerlaufzeit, hat also, für sich betrachtet, eine positive Auswirkung auf die Schalthäufigkeit. Der Effekt wird jedoch vernachlässigbar klein, wenn bei Anlagen ohne nachgeschaltete Mischerregelung der Einfluss und die Rückwirkung auf das gesamte System berücksichtigt wird. Durch zu hohe Schaltdifferenzen und daraus resultierende zeitweise höhere Vorlauf- und Raumtemperaturen reagieren Thermostatventile mit einer Drosselung des Volumenstroms. Die Aufheizgeschwindigkeit im Kessel steigt an und auch eine vom Regler höher vorgegebene Schaltdifferenz von 15 bis 20 K wird schneller durchlaufen; das gewünschte Resultat einer verminderten Schalthäufigkeit stellt sich nicht ein!

Dipl.-Ing. (FH) Heike Stock ist Mitarbeiterin, Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff geschäftsführender Leiter des Instituts für Heizungs- und Klimatechnik im Fachbereich Versorgungstechnik der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

Damit direkt zusammenhängend, sei als weiteres Beispiel der Einsatz von Brennwertwandgeräten angeführt, die meist einen sehr geringen Wasserinhalt aufweisen und deshalb einen Mindestumlauf verlangen. Der Endkunde ist in gutem Glauben, dass er mit dem Einbau dieser Gerätetechnik einen um 5 bis 10 % höheren Jahresnutzungsgrad erzielt als bei Einsatz konventioneller Niedertemperaturheizgeräte. Wird jedoch der Durchfluss auf typisch 20 bis 30 % des Auslegungsvolumenstroms durch den normalen Eingriff regelnder Thermostatventile gedrosselt, kann nur durch Einsatz von Überströmventilen oder durch geregelte Brennerabschaltung ein sicherer Betrieb gewährleistet werden. Resultat: Die Brennwertnutzung setzt aus und die Schaltheufigkeit steigt. Brennwertgeräte, die seit Jahren in den Niederlanden, dem Geburtsland der Brennwerttechnik, mit zentraler Raumtemperaturregelung bei relativ geringer Schaltheufigkeit, bei hohen Volumenströmen und niedrigen Heizwassertemperaturen in Anlagen ohne Thermostatventile erfolgreich eingesetzt wurden, versagen hinsichtlich der Brennwertnutzung, wenn sie auf Anlagen mit Thermostatventilen, wie in Deutschland gesetzlich vorgeschrieben, treffen.

In dieser neuen WÄRMETECHNIK-Artikelserie sollen aktuelle Fragen der Regelung von Heizanlagen behandelt werden, die sich aus den veränderten Randbedingungen der Heizungsanlagen-VO und der neuen WärmeschutzVO sowie aus den Produktangeboten der ISH'95 ergeben. Im ersten Teil wird das oben angesprochene Thema: "Kesselwasserinhalt und Schaltheufigkeit" behandelt.

Vorgesehen sind weiterhin die folgenden Themen:

- Hydraulik und Pumpe: Wann ist die Drehzahlregelung von Pumpen sinnvoll?
- Auslegung von Rohrnetzen und Regelventilen: Die Stromsparquelle der Zukunft.
- Systeme zur integrierten Regelung und Heizkostenerfassung: Verliert die Heizkostenerfassung an Bedeutung?
- Heizflächen der Zukunft: Einzelraumregelung bei statischen Heizflächen; Heizkörper und/oder Fußbodenheizung?
- Kontrollierte Wohnungslüftung: Mit oder ohne Wärmerückgewinnung? Verbesserte Chancen durch die Regelung?

Teil 1: Verringerung der Schaltheufigkeit von Brennern zur Reduzierung der Anfahrmissionen

Höchste Aufmerksamkeit ist zukünftig den Anfahrmissionen beim Brennerstart (Ruß, CO, unverbrannte Kohlenwasserstoffe) zu widmen; neben der Minderung der CO₂-Emissionen durch verbesserte Kesselnutzungsgrade und neben der drastischen Reduzierung elektrischer Zusatzenergien für Brenner und Pumpen. Die Anfahrmissionen liegen betragsmäßig in der gleichen Größenordnung und zum Teil noch höher als die stationären Emissionen, obwohl die Anfahrphase eines Brenners nur 1/100 bis 1/20 der Brennerlaufzeit ausmacht. Die Startemissionen lassen sich aber nicht nur allein durch regelungstechnische Maßnahmen reduzieren, sondern alle Komponenten eines Heizsystems, angefangen von der Konstruktion und dem Speichervermögen (Wasserinhalt) des Kessels, vom Wärmeabgabesystem bis hin zum P-Bereich des Thermostatventils bestimmen die Schaltheufigkeit des Brenners sowie den mittleren Nutzungsgrad (siehe Abb. 1). Daher ist es notwendig, dass alle Komponenten optimal aufeinander abgestimmt werden.

Die Schalthäufigkeit des Brenners ist abhängig von der Länge der Aufheiz- und Abkühlphase des Kessels.

1 Aufheizphase + 1 Abkühlphase \cong 1 Brennerstart

Eine Verlängerung der einzelnen Phasen bewirkt bei gleicher Belastung eine Verringerung der Brennerstarts.

Nachfolgend sind Maßnahmen aufgeführt, mit denen eine Verringerung der Brennerstarts erreicht werden kann.

Betrachtung des Wärmeerzeugers hinsichtlich der Schalthäufigkeit

Die Kesselkonstruktion, die eingesetzten Werkstoffe für die Kesselheizflächen, die Platzierung des Kesseltemperaturfühlers, der Verlauf der Wasserwege im Kessel und letztendlich mit sehr großer Beachtung der Wasserinhalt haben Einfluss auf die Schalthäufigkeit sowie auf die Kesseltemperaturschwankung.

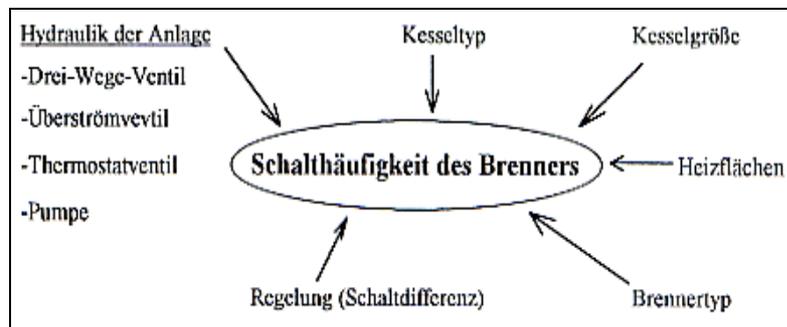


Abb. 1 Übersicht der Komponenten, die auf die Schalthäufigkeit Einfluß haben.

Dynamisches Verhalten eines Kessels

Die durch die Feuerung dem Kessel zugeführte Leistung teilt sich in drei Teilströme auf.

Leistungsbilanz um den Kessel:

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_W + \dot{Q}_K + \dot{Q}_V \quad (1)$$

\dot{Q}_B := zugeführte Leistung

$\dot{Q}_W = \dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot (\delta_V - \delta_R)$: abgeführte Leistung durch das Heizwasser

$\dot{Q}_K = \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (d\delta_V / dt)$: Aufheizung des Kessels

\dot{Q}_V : Verluststrom

Daraus erfolgt unter der Annahme einer idealen Vermischung im Kessel, ein Modell, das den praktischen Betrieb ausreichend wiedergibt:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_B &= \dot{m}_W \cdot c_{pW} \cdot (\delta_V - \delta_R) \\ &+ \dot{m}_K \cdot c_{pK} \cdot (d\delta_V / dt) + \dot{Q}_V \end{aligned} \quad (2)$$

Der überwiegende Anteil der zugeführten Leistung \dot{Q}_B erwärmt den Wassermassenstrom \dot{m}_W , der mit Rücklauftemperatur δ_R in den Kessel hineinströmt, auf die Vorlauf-temperatur δ_V . Ein weiterer Energiestrom sind die Strahlungsverluste \dot{Q}_V des Kessels. Auf diese Verluste soll in diesem Bericht nicht weiter eingegangen werden. Sie sind jedoch zur Vollständigkeit der Gleichung mitaufgeführt.

Interessanter ist die Leistung, die im instationären Betrieb dazu benötigt wird, um die Kesselmasse m_K , vorwiegend bestehend aus dem Wasserinhalt und dem Anteil von Stahl und/oder Guss, auf Betriebstemperatur zu erwärmen. \dot{Q}_K beschreibt das dynamische Verhalten eines Kessels. Während des instationären Betriebes ist der dynamische Anteil relativ groß, mit zunehmender Brennerlaufzeit nimmt der Anteil ab und nimmt den Wert null an durch Erreichen des stationären Betriebes. Die zugeführte Leistung \dot{Q}_B wird dann ausschließlich für die Erwärmung des Heizwassers genutzt. Da in der Regel die Schaltdifferenz x_{sd} kleiner ist als die mögliche Temperaturerhöhung $A_{\ddot{u}}$, schaltet der Brenner vor dem Erreichen des stationären Betriebs ab. Das bedeutet, dass der Kessel fast ausschließlich im instationären Betrieb arbeitet und somit ein Anteil der zugeführten Leistung zur Erwärmung des Kessels dient.

Wie verschiedene Untersuchungen zeigen, lässt sich eine Kesseltemperaturregelstrecke gut durch eine P-T₁-T_t-Regelstrecke mit volumenstromabhängigen Zeitkonstanten beschreiben (siehe Abb. 2). Dies zeigten durchgeführte Versuche mit bodenständigen Stahl- oder Gusskesseln mit Wasserinhalten von 1 bis 5 l/kW.

Die Zeitkonstante T, wird als Kesselzeitkonstante (T_K) bezeichnet und ist die Zeit, die theoretisch benötigt wird, damit bei konstantem Volumenstrom und konstanter Rücklauf-temperatur ca. 63 % der max. Temperaturerhöhung durch die Aufheizung erreicht werden. Sie berechnet sich theoretisch nach folgender Gleichung:

$$T_K = \frac{\dot{m}_K \cdot cp_K}{\dot{m}_W \cdot cp_W} \quad (3)$$

cp_K : spezifische Wärmekapazität des Kessels
 cp_W : spezifische Wärmekapazität des Wassers

Bei einem Kessel mit großem Wasserinhalt (m_K) liegt die Kesselzeitkonstante höher als bei einem Kessel mit geringem Wasserinhalt. Das bedeutet, dass ein Temperaturanstieg wesentlich langsamer erfolgt, wodurch eine Verlängerung der Brennerlaufzeit stattfindet. Aus der Gleichung 3 ist zu erkennen: Je größer die wirksame Speichermasse m_K ist, um so größer ist die Zeitkonstante und desto geringer wird die Schalthäufigkeit (siehe Abb. 3). Eine Vergrößerung der Kesselzeitkonstanten kann auch durch Verringern des Wassermassenstroms \dot{m}_W erzielt werden. Dieser Einfluss wird ausführlich im Kapitel "Einfluss des Volumenstroms auf die Schalthäufigkeit" betrachtet.

Die Totzeit T_t entspricht der Verzugszeit, die vergeht, bis eine messbare Änderung der Kesseltemperatur am Kesseltemperaturfühler zu erkennen ist. Lange Wasserlaufwege und hintereinander geschaltete Verzögerungsglieder des Wärmedurchgangs erhöhen diese Totzeit. Je größer die Totzeit, um so länger wird die Brennerlaufzeit. Der Nachteil einer großen Totzeit sind starke Kesseltemperaturschwankungen.

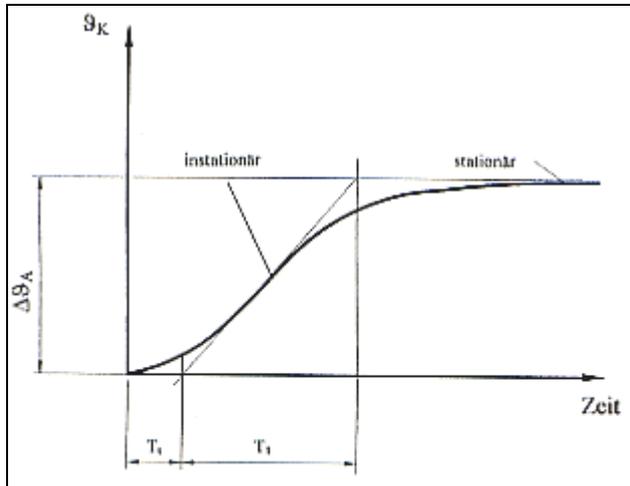


Abb. 2 Darstellung der Kesseltemperatur von der Zeit

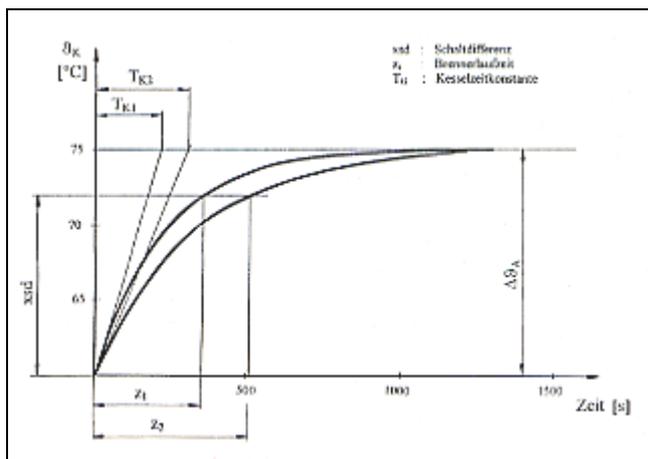


Abb. 3 Einfluss unterschiedlicher Zeitkonstanten (T_K) auf die Brennerlaufzeit

Betrachtung der Schaltdifferenz hinsichtlich der Schalthäufigkeit

Ein Kessel durchläuft bei konstanter Feuerungsleistung eine kleine Schaltdifferenz schneller als eine größere. Eine Vergrößerung der Schaltdifferenz bewirkt daher eine Verlängerung der Brennerlaufzeit sowie der Stillstandszeit. Dabei ist zu beachten, dass die Schaltdifferenz nicht beliebig erhöht werden kann. Bei Einsatz einer Anlage ohne nachgeschaltete Mischerregelung bewirkt eine große Amplitude der Kesselwassertemperatur eine starke Vorlauf temperaturschwankung, die sich wegen schwankender Wärmeabgabe der Heizflächen nachteilig auf die Behaglichkeit sowie auf die Raumtemperaturregelung auswirkt. Die Behaglichkeit wird beeinträchtigt durch die Raumtemperaturschwankungen, die in Abhängigkeit der Kesseltemperaturschwankung zeitverzögert und gedämpft auftreten. Begrenzt sind diese Raumtemperaturschwankungen durch den P-Bereich sowie die Hysterese bei Einsatz von Thermostatventilen.

Der P-Bereich sagt aus, welche Raumtemperaturänderung vorliegen muss, damit das Ventil den vollen Auslegungsventilhub durchläuft (0 ... 100 %).

Damit das Ventil funktionsgerecht arbeiten kann, darf durch die Vorlauftemperaturschwankung möglichst kein oder nur ein geringer Eingriff des Ventils erfolgen.

Einfluss des Volumenstromes auf die Schalthäufigkeit

Der Volumenstrom des Heizungswassers ist ein wesentliches Kriterium für die Schalthäufigkeit des Brenners. Durch Verändern des Volumenstroms werden zwei Wirkungen erzielt, die sich gegenseitig beeinflussen.

Mit Verringerung des Wassermassenstroms \dot{m}_W nimmt zum einen die Kesselzeitkonstante T_K zu, welches sich positiv auf die Schalthäufigkeit auswirkt. Zum anderen erhöht sich die Temperaturspreizung, die der Kessel bei konstanter Feuerungsleistung schafft (negative Auswirkung). Anhand dieses Beispiels wird die Auswirkung verdeutlicht.

Auslegungsspreizung 75/60 °C:

$$\Delta\delta_A = 15 \text{ K}$$

Verringerung des Massenstroms auf

$$30 \%: (\dot{m}/\dot{m}_A) = 0,3$$

Konstante Leistung des Kessels:

$$\dot{Q}/\dot{Q}_A = 1$$

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_A} \cdot \frac{cp_W}{cp_W} \cdot \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_A}$$

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_A}{\dot{m}/\dot{m}_A} = \frac{15 \text{ K}}{0,3} = 50 \text{ K}$$

Bei Nennvolumenstrom ($\dot{m}/\dot{m}_A = 1$) schafft der Kessel eine Temperaturspreizung von 15 K. Durch Verringerung des Volumenstroms auf 30 % erhöht sich die Spreizung auf 50 K. Diese Auswirkung ist gravierender als die Erhöhung der Zeitkonstanten.

Zum Durchlaufen einer vorgegebenen Schaltdifferenz ist eine wesentlich kürzere Brennerlaufzeit erforderlich als bei Nennvolumenstrom. Dies ist jedoch nicht generell für alle Fälle zutreffend. In Ausnahmefällen, bei denen die Totzeit einen beachtlichen Wert annimmt, muss eine genauere Betrachtung erfolgen.

Aufheizphase des Kessels = Brennerlaufzeit + Totzeit Abkühlphase des Kessels = Brennerstillstandszeit + Totzeit
--

Mit abnehmendem Volumenstrom nimmt die Transportzeit des Wärmeträgers vom Stellort bis hin zum Messort zu, dadurch vergrößert sich die Totzeit. Wenn die Totzeit durch Verringerung des Volumenstroms im Verhältnis zur kürzer werdenden Brennerlaufzeit stark ansteigt, so kann es unter Umständen dazu kommen, dass eine Verlängerung der Aufheiz- bzw. Abkühlzyklen stattfindet. Die Regelbarkeit nimmt in diesem Fall stark ab und es kommt zu ungewollten Kesseltemperaturschwankungen.

In der Praxis werden zwei Anlagentypen unterschieden:

- Heizungsanlage mit konstantem Volumenstrom
- Heizungsanlage mit veränderlichem Volumenstrom

Heizungsanlagen mit konstantem Volumenstrom werden überwiegend in Anlagen mit Raumtemperaturregelung ohne Einzelraumregelung eingesetzt. Die Regelung findet über einen Raumthermostaten statt, der für die Ansteuerung des Brenners und eventuell der Pumpe verantwortlich ist. Der Vorteil dieser Anlage hinsichtlich der Schalthäufigkeit liegt in dem konstanten Massenstrom. Mit ihm bleiben die Zeitkonstanten sowie die Kesseltemperaturspreizung bei gleichbleibender Feuerungsleistung konstant. Dies hat positive Auswirkungen auf die Schalthäufigkeit, da die Aufheizgeschwindigkeit nicht verändert wird. Der Nachteil dieser Regelung ist eine eventuelle Unterversorgung einzelner Räume, wenn ein Fremdwärmegewinn im Referenzraum auftritt, in dem der Raumthermostat angeordnet ist.

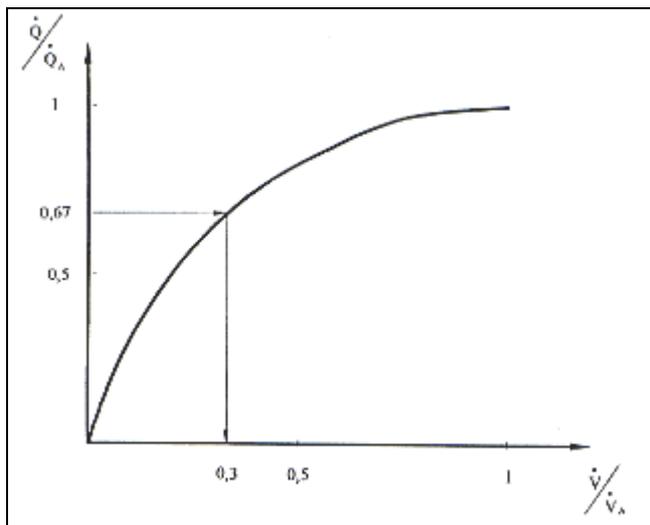


Abb. 4 Belastung \dot{Q} in Abhängigkeit vom Volumenstrom bei konstanter Vorlauftemperatur

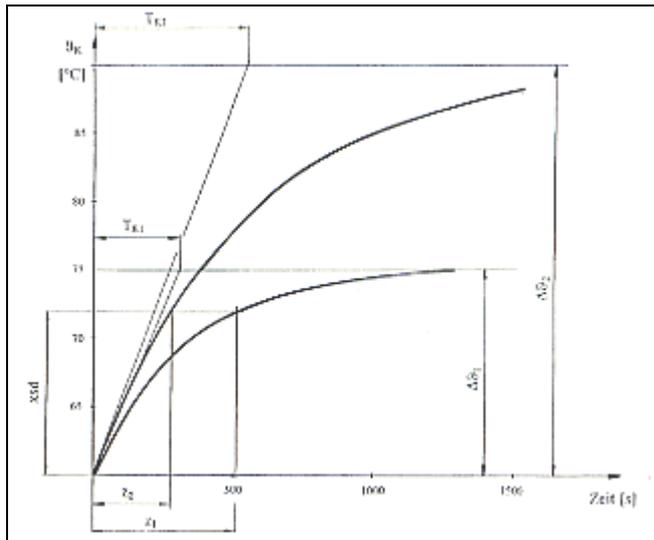


Abb. 5 Aufheizkurve für unterschiedliche Volumenströme

Heizungsanlagen mit veränderlichem Volumenstrom sind hierzulande üblich. Durch den Einsatz von Thermostatventilen zur Einzelraumregelung ändert sich der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Belastung des Raumes. Bei Auftreten von Fremdwärme (Sonneneinstrahlung, innere Lasten) greifen die Thermostatventile regelnd ein, indem sie den Heizwasservolumenstrom drosseln.

In der Praxis kommt es höchst selten vor, dass der Nennvolumenstrom durch die Anlage fließt. In der Regel werden nicht alle Heizkörper mit 100 % belastet. Ein Teil der Heizkörper werden sogar ganz abgeschaltet, z. B. im Flur oder Schlafzimmer. Hinzu kommt noch ein Fremdwärmegewinn, der durchaus im Bereich von 30 ... 50 % liegen kann. Bei einem Fremdwärmegewinn von 33 % drosseln die Thermostatventile um 70 % bei gleichbleibender Vorlauftemperatur. Der Zusammenhang zwischen der Belastung und dem Volumenstrom ist in Abb. 4 graphisch dargestellt. Diese Drosselung ermöglicht einen Temperaturhub von 50 K durch den Kessel (siehe Abb. 5); auch durch eine Vergrößerung der Schaltdifferenz auf die Auslegungsspreizung $\Delta\delta_A$ bei Nennvolumenstrom bzw. größer als $\Delta\delta_A$ wird keine wesentliche Verlängerung der Brennerlaufzeit erzielt.

An dieser Stelle nimmt der Kesseltyp an Bedeutung zu. Abhängig von der Kesselkonstruktion, ob es sich um einen Kessel mit kleinem oder großem Wasserinhalt handelt, verlängert sich die Brennerlaufzeit mit der nutzbaren Speichermasse (siehe Kapitel "Dynamisches Verhalten eines Kessels").

Einfluß der Überdimensionierung auf die Schalthäufigkeit

Die Dimensionierung des Kessels richtet sich heutzutage weitgehend nach dem Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung. Grund dafür ist der geringe Wärmebedarf des Gebäudes gegenüber der Leistungserfordernis für die Warmwasserbereitung. Am Beispiel eines Niedrigenergiehauses soll der Einfluss auf die Schalthäufigkeit erläutert werden.

$$\dot{Q}_{N,Geb} = 6 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{WW} = 18 \text{ kW} = Q_{kessel}$$

Der Kessel mit 18 kW ist, bezogen auf den Wärmebedarf des Gebäudes ($\dot{Q}_{N,Geb}$), um das Dreifache überdimensioniert. Die Heizkreispumpe sollte aber, im Falle eines Kessels z. B. mit Ölgebläsebrenner ohne eigene Kesselpumpe, für den Wärmebedarf von 6 kW ausgelegt werden, so dass der Volumenstrom im Verhältnis zur Kesselgröße sehr klein ist. Die Aufheizung des Kesselwassermassenstroms erfolgt aufgrund der großen Temperatursteigerung $\Delta\delta$ in relativ kurzer Zeit, jedoch findet eine Verlängerung der Stillstandszeit durch die große Speichermasse des Kessels statt. Allgemein wirkt sich eine Überdimensionierung positiv auf die Schalzhäufigkeit aus.

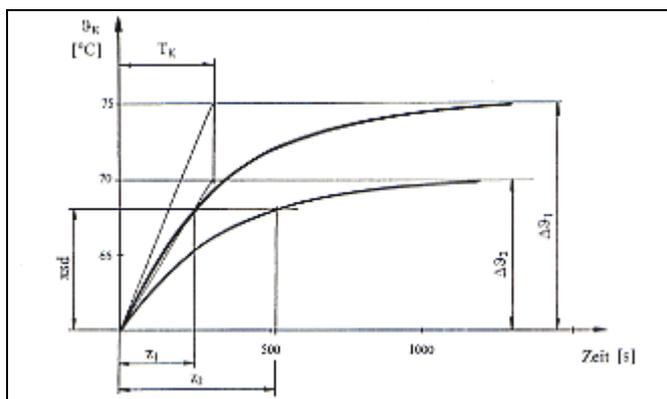


Abb. 6 Aufheizkurve bei Einsatz eines modulierenden Brenners.

Einsatz eines modulierenden Brenners

Durch einen modulierend arbeitenden Brenner wird die Feuerungsleistung der geforderten Leistung angepasst. Wenn die Feuerungsleistung OF abnimmt, sinkt mit ihr auch die erreichbare Temperatursteigerung bei gleichbleibendem Massenstrom.

$$\dot{Q}_F = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\delta$$

Die Kesselzeitkonstante T_K bleibt durch den konstanten Massenstrom unverändert. Daraus folgt, dass mit kleiner werdender Leistung die Aufheizgeschwindigkeit abnimmt. Dies führt bei einer vorgegebenen Schaltdifferenz x_{sd} einer Verlängerung der Brennerlaufzeit (siehe Abb. 6).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz eines modulierenden Brenners bei einem überdimensionierten Kessel nicht immer die gewünschten Vorteile bringt. Der Kessel arbeitet die überwiegende Zeit zur Bereitstellung der Heizleistung im unteren Leistungsbereich. Der modulierende Brenner jedoch geht im unteren Leistungsbereich in den Taktbetrieb über, so dass er als einstufiger Brenner arbeitet.

Die Vorteile eines modulierenden Brenners gegenüber einem einstufigen Brenner, wie lange Brennerlaufzeiten, niedrige Schalzhäufigkeit, geringe Stillstandsverluste und erhebliche Brennstoffeinsparungen, sind daher von den Grenzen des Modulationsbereichs abhängig.

Bei Einsatz eines Gaswandgerätes mit einem Modulationsbereich zwischen 6 bis 18 kW in einem Gebäude mit 6 kW Heizlast erbringt der modulierende Betrieb keinerlei Vorteile.

Fazit

Die wichtigsten Einflüsse auf die Schalzhäufigkeit resultieren aus dem Verhältnis Kesselwasserinhalt zu Kesselwasservolumenstrom.

In Anlagen, in denen starke Volumenstromschwankungen auftreten, sollte daher ein Kessel eingesetzt werden, der eine große nutzbare Speichermasse besitzt, um eine Verlängerung der Brennerlaufzeit zu erreichen. Der Kesselwasserinhalt hat positive Auswirkungen auf die Regelbarkeit.

Die Schaltdifferenz des Brenners ist ein weiteres Kriterium. Je größer die Schalthysterese und damit die Vorlauftemperaturschwankungen, um so stärker kann der Eingriff von Thermostatventilen sein. Die Drosselung des Volumenstroms verursacht jedoch wieder eine Erhöhung der Schalzhäufigkeit. Es ist daher wichtig, alle Größen, die auf die Schalzhäufigkeit Einfluss nehmen, richtig zu beurteilen, um eine optimale Regelung zu entwickeln.

Quelle: Manuskript für Wärme + Versorgungstechnik