

Einfluss der Takthäufigkeit auf Schadstoffemissionen von Heizkesseln

M. Sc. Claudio Sulger, B. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Alexander G. Floß, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Hochschule Biberach

Die Heizlast von Gebäuden variiert in Abhängigkeit von schwankenden jahreszeitlichen und nutzungsbedingten Einflüssen stufenlos zwischen Null und dem Maximalwert. Ein Heizkessel muss seine Wärmeleistung dementsprechend anpassen, um den Wärmebedarf abdecken zu können. Die Leistungsanpassung erfolgt durch die Modulation des Brenners innerhalb seines Modulationsbereichs. Im Idealfall entspricht dabei die benötigte Heizleistung der bereitgestellten Wärmeleistung des Heizkessels. Jedoch ist die Leistungsmodulation in der

Praxis oft nur schwierig oder gar nicht möglich. Zwar wurden in der Vergangenheit große Fortschritte bezüglich der Größe des Modulationsbereichs gemacht, allerdings können Heizkessel nur auf ca. 15–30 % der Nennwärmeleistung stufenlos heruntermodulieren. Durch die bauphysikalischen Verbesserungen der Gebäude ist die benötigte Heizleistung oftmals so klein, dass sie außerhalb des Modulationsbereichs liegt. Daher arbeiten die Heizkessel häufig in einem Taktbetrieb, in dem im Mittel die benötigte Heizleistung bereitgestellt wird.

Der Taktbetrieb hat negative Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO), da während der Start- und Stopp-Phasen deutliche Mehremissionen im Vergleich zum ungestörten Betrieb auftreten. Damit sind die Schadstoffemissionen maßgeblich von der Anzahl der Taktungen abhängig. Daraus folgt, dass die Schadstoffemissionen durch eine Reduktion der Takthäufigkeit gesenkt werden können.

Im vorliegenden Beitrag werden verschiedene Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt, die zur Reduzierung der Takthäufigkeit führen. Eine Optimierungsmöglichkeit ist die Vergrößerung der internen Speicherkapazität des Heizkessels durch eine Erhöhung des Wasserinhalts. Diese Möglichkeit wurde durch eine Simulation mit verschiedenen Heizkesseln genauer untersucht. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bereits durch die Vergrößerung des Wasserin-

halts um wenige Liter die Takthäufigkeit um den Faktor 10 gesenkt und somit die Schadstoffemissionen HC und CO halbiert werden können. Das mögliche Reduktionspotenzial ist von den technischen Eigenschaften des Heizkessels abhängig und daher unterschiedlich hoch.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten umfassen die Regelung der Heizkessel und deren hydraulische Einbindung über einen Pufferspeicher, die der Brennwertnutzung gerecht werden muss.

EINFÜHRUNG

Abgas- und Schadstoffemissionen bei Fahrzeugen sind ein derzeit viel diskutiertes Thema. Dabei steht insbesondere die messtechnische Ermittlung der Abgase auf Prüfständen im Fokus. Die Prüfstandsbedingungen spiegeln die Realität nicht wieder, so dass es zu erheblichen Abweichungen der Emissionen zwischen Prüf- und Realbetrieb kommt.

Dieser Tatbestand trifft auch auf Heiz-

kessel zu. Die Ermittlung der Abgasemissionen für Heizkessel findet bei kontinuierlicher Flamme im ungestörten Dauerbetrieb mit Nennwärmeleistung statt. Im Realbetrieb treten jedoch unterschiedliche Betriebszustände auf, da die Anlagen i. d. R. leistungsgeregelt betrieben werden. Ein Heizkessel passt seine Wärmeleistung an die aktuelle Heizlast an, um so die benötigte Wärme bereitzustellen. Die Leistungsanpassung erfolgt durch die Modulation des Brenners im sogenannten Modulationsbereich. Sobald dieser Bereich durch eine zu geringe Heizlast unterschritten wird, tritt der Taktbetrieb mit Start- und Stopp-Phasen ein. Der Taktbetrieb weist im Vergleich zum ungestörten Dauerbetrieb deutliche Mehremissionen auf. Obwohl der Taktbetrieb bei Heizkesseln häufig eintritt, wird er in Abgasmessungen nicht berücksichtigt, so dass auch hier eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Messung und des Realbetriebs entsteht.

Die emittierten Schadstoffemissionen

und die Takthäufigkeit eines Heizkessels stehen in einem direkten Zusammenhang. Zur Reduzierung der Schadstoffemissionen ist eine Verringerung der Takthäufigkeit erforderlich. Dazu gibt es verschiedene Optimierungsmöglichkeiten, die den Heizkessel sowie dessen Regelung und hydraulische Einbindung umfassen.

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Takthäufigkeit und den Schadstoffemissionen von Heizkesseln und zeigt dabei verschiedene Optimierungsmöglichkeiten für deren Reduktion auf.

TAKTHÄUFIGKEIT UND EMISSIONEN

Bei der Verfeuerung von kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen findet eine chemische Umwandlung statt, bei der im Idealfall bei vollständiger Verbrennung nur Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) entstehen. Vorhandene Begleitsubstanzen im Brennstoff, wie z. B. Schwefel (S), führen in Abhängigkeit von ihrer Konzentration zu unerwünschten Nebenprodukten, die mit dem Abgas emittiert werden. Des Weiteren führen unzureichende Verbrennungsbedingungen wie eine schlechte Durchmischung von Brennstoff und Verbrennungsluft zu einer unvollständigen Verbrennung. Das Resultat sind unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Unzureichende Verbrennungsbedingungen treten speziell während der Start- und Stopp-Phase des Brenners auf, die Bestandteile eines Taktzyklus sind. Die nachfolgenden Emissionsbetrachtungen und Untersuchungen beschränken sich auf HC und CO als emittierte Abgase, da sie in der Start- und Stopp-Phase eine erhöhte Konzentration aufweisen.

Die Ermittlung der Abgasemissionen für Kleinf Feuerungsanlagen, erfolgt nach DIN 4207 und dem darin beschriebenen Messverfahren. Die Prüfung und Messung der Emissionen und Abgasparameter ist erstmalig nach der Neuerrichtung der Anlage und wiederkehrend in festgelegten Fristen durchzuführen. Die Messungen haben während der üblichen Betriebszeiten (Heizzwecke) stattzufinden.

Dafür wird die Anlage im ungestörten Dauerbetriebszustand bei Nennwärmeleistung oder ersatzweise bei der höchsten einstellbaren Wärmeleistung betrieben. Beginn der Messung ist bei Öl- und Gasfeuerungen frühestens 2 Minuten nach dem Einschalten des Brenners, sobald die Anlage den Dauerbetrieb erreicht hat. Dabei müssen die Heizkessel vorgegebene Emissionsgrenzwerte für den jeweiligen eingesetzten Brennstoff einhalten, die in der 1. BImSchV (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) festgelegt sind.

Zur Bewertung der tatsächlichen, jährlichen Schadstoffemissionen ist es allerdings notwendig, die Emissionskonzentration nicht nur im ungestörten Dauerbetrieb, sondern während aller Betriebszustände zu betrachten. Ein Heizkessel weist folgende drei Betriebszustände für den intermittierenden Betrieb auf:

1. Start-Phase – instationärer Betrieb

Die Start-Phase beginnt mit dem Öffnen des Brennstoffventils sowie dem unmittelbar darauffolgenden Zünden

stetig. Daher wird die Start-Phase dem instationären Betrieb zugeordnet.

2. Quasistationärer Betrieb

Der quasistationäre (ungestörte) Betrieb folgt auf den Startvorgang. Während dieser Betriebsphase schwankt die Emissionskonzentration nur noch wenig um einen Mittelwert.

3. Stopp-Phase – instationärer Betrieb

Die Stopp-Phase ist die zweite instationäre Betriebsphase und folgt auf den quasistationären Betrieb. Sie beginnt mit dem Schließen des Brennstoffventils und dem Erlöschen der Flamme. Die Stopp-Phase ist beendet, sobald die Emissionskonzentration Null erreicht oder der Brenner erneut startet.

Abb. 1 zeigt qualitativ den Emissionsverlauf eines Heizkessels über einen Taktzyklus, der sich aus den drei beschriebenen Betriebszuständen zusammensetzt [5]. Auffällig sind die großen Emissionsspitzen in der Start- und Stopp-Phase. Grund für die Mehremissionen in der Start-Phase ist eine ungleichmäßige Gemischbildung während des Zündvorgangs, was

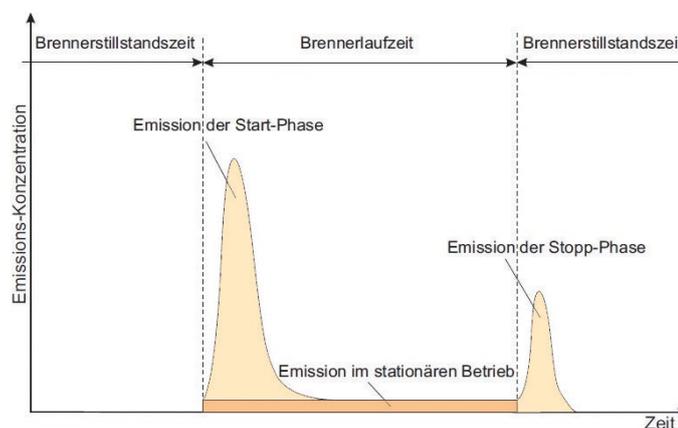


Abb. 1: Qualitativer Emissionsverlauf für einen Takt [5]

der Flamme und wird mit dem Erreichen des quasistationären (ungestörten) Betriebs beendet. Im Startvorgang ist das Einschalten des Gebläses, das Vorspülen (um verbliebene brennbare Gase aus dem Brennraum zu entfernen), die Brennstofffreigabe und das Zünden der Flamme enthalten. Während des Startvorgangs ändert sich die Emissionskonzentration der Abgase

zu einer unvollständigen Verbrennung und somit zu mehr CO und HC führt. Die Ursachen für die Mehremissionen in der Stopp-Phase sind unverbrannte Reste des Brenngases und ein Nachsprühen der Brennstoffeinspritzdüsen.

Auf Grund der deutlich höheren Emissionen in der Start- und Stopp-Phase gegenüber dem ungestörten Betrieb sind die jährlichen Schadstoffemissionen ei-

nes Heizkessels von dessen Takthäufigkeit in hohem Maß abhängig. Daraus folgt, dass durch eine Verringerung der Takthäufigkeit die jährlichen Schadstoffemissionen stark reduziert werden können.

Leistungsgeregelte Heizkessel können ihre Wärmeleistung durch Modulation des Brenners stufenlos an den aktuellen Wärmebedarf anpassen. Die Leistungsbandbreite (minimale und maximale Leistung), innerhalb derer der Brenner modulieren kann, wird als Modulationsbereich bezeichnet. Ein großer Modulationsbereich ist vorteilhaft, da der Heizkessel seine Wärmeleistung über große Zeiträume flexibel an die jahreszeitlichen Schwankungen des Wärmebedarfs anpassen kann. In der Vergangenheit wurden in Bezug auf die Größe des Modulationsbereichs in vielen Fällen Fortschritte erzielt. Jedoch kann kein Heizkessel auf nahezu 0 kW Wärmeleistung heruntermodulieren. Die untere Grenze liegt in der Regel in einem Bereich von 15–30 % der Nennwärmeleistung. Durch Verbesserungen der Gebäude (z. B. Gebäudehülle, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) konnte deren Heizlast stark reduziert werden und liegt heute oftmals unterhalb des Modulationsbereichs der angebotenen Wärmeerzeuger, da deren Leistung nicht in gleichem Maße reduziert wurde. Sobald die untere Grenze des Modulationsbereichs (minimale Wärmeleistung) unterschritten wird, tritt der Taktbetrieb mit Start- und Stoppvorgängen ein.

Der Taktbetrieb ist bei Heizkesseln keine Seltenheit. Verschiedene simulations- und messtechnische Untersuchungen von z. B. Streicher [5] oder Mühlbacher [3] haben gezeigt, dass die Anzahl der jährlichen Taktungen eines Heizkessels im Bereich von zwischen 10.000 bis über 80.000 liegen kann. Neben dem verwendeten Kessel spielen dabei die Randbedingungen wie der Wärmebedarf des Gebäudes, die hydraulische Einbindung und das Regelkonzept eine entscheidende Rolle. Die große Bandbreite der Taktungen deutet dabei auf ein großes Optimierungspotential auch zur Reduzierung

der tatsächlichen jährlichen Schadstoffemissionen hin.

Neben der Wärmeanforderung und dem Modulationsbereich ist die Takthäufigkeit auch von der Speicherkapazität des Heizkessels abhängig. Während die Wärmeanforderung durch das zu versorgende Gebäude bestimmt wird, sind der Modulationsbereich sowie die Speicherkapazität technische Eigenschaften eines jeden Heizkessels. Hierbei existieren große Unterschiede zwischen verschiedenen Heizkesseln. Die Vergrößerung der Speicherkapazität ist eine einfache Maßnahme, um die Takthäufigkeit zu reduzieren. Es gibt aber auch regelungstechnische Möglichkeiten wie die Vergrößerung der Schalthysterese, auf die später noch eingegangen wird.

MARKTANALYSE VON BRENNWERTGERÄTEN

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird zunächst eine Marktanalyse mit Blick auf Modulationsbereich und Speicherkapazität als technische Eigenschaften von Heizkesseln durchgeführt. Dabei wird die Speicherkapazität über den Wasserinhalt der Heizkessel charakterisiert und bewertet (interne Speicherkapazität). Für die Untersuchung werden 70 wandhängende und bodenstehende Öl- und Gas-Brennwertgeräte von mehreren Herstellern betrachtet und miteinander verglichen. Tab. 1 zeigt beispielhaft fünf ausgewählte Brennwertgeräte von verschiedenen Herstellern mit ihren jeweiligen Modulationsbereichen und Wasserinhalten.

Viele der heute am Markt verfügbaren Brennwertgeräte verfügen über einen großen Modulationsbereich. Aufgrund ihrer hohen Nennleistung liegt die untere

re Modulationsgrenze bei vielen Geräten mit ca. 3 kW für moderne Gebäude mit einer Heizlast von 3 bis 5 kW bei –16° C Außentemperatur aber sehr hoch.

Bei modernen Brennwertgeräten weisen besonders wandhängende, aber auch bodenstehende Geräte meist sehr kleine Wasserinhalte auf. Keines der dargestellten Brennwertgeräte besitzt einen Wasserinhalt von mehr als 4 l. Dementsprechend sind auch die internen Speicherkapazitäten der Geräte gering. In den letzten Jahren ist ein genereller Trend zu immer kleineren Wasserinhalten zu beobachten. Die geringen Wasserinhalte sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Zum einen kann dadurch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV, ehemals Druckbehälterverordnung) umgangen werden, da diese erst ab Wasserinhalten von 10 l Anwendung findet. Zum anderen sind Materialeinsparungen möglich, die wiederum zu Kosteneinsparungen führen. Nachteil der geringen Wasserinhalte ist die fehlende thermische Trägheit, die bei Unterschreiten der unteren Modulationsgrenze zu einem häufigen Takten führt.

Um eine niedrige Takthäufigkeit bei Brennwertgeräten zu erreichen, ist ein großer Modulationsbereich mit einer möglichst geringen minimalen Leistung und/oder eine große Speicherkapazität (intern/extern) notwendig.

SIMULATION DER TAKTHÄUFIGKEIT

Zur Untersuchung des Einflusses der Takthäufigkeit auf die jährlichen Schadstoffemissionen eines Heizkessels wird eine Simulation erstellt, in der die Brennerlaufzeit und die Anzahl der Taktungen von Brennwertgeräten ermittelt werden. Ausgehend von diesen Ergebnissen

Hersteller	Produkt	Modulationsbereich [kW]	Wasserinhalt [l]
Buderus	Logamax plus GB 162-15	2,7 – 14,0	2,5
DE Dietrich	INNOVENS MCA 15	3,4 – 15,8	1,7
Elco	THISION S 9.1	1,0 – 9,1	3,2
Viessmann	Vitodens 300-W	1,7 – 10,1	3,8
Weishaupt	Thermo Condens WTC 15	3,8 – 13,7	2,6

Tab. 1: Technische Daten von verschiedenen Brennwertgeräten

können dann die jährlichen Schadstoffemissionen an HC und CO berechnet werden. Ziel der Simulation ist es, die emittierten Schadstoffemissionen von

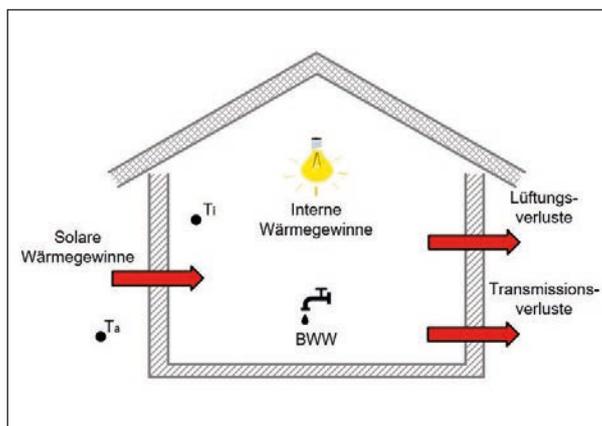


Abb. 2: Gebäudemodell für Raumheizung und BWW

Heizkesseln unter Berücksichtigung der Takthäufigkeit aufzuzeigen. Mögliche Energieeinsparungen in Verbindung mit der Anzahl der Taktungen werden nicht betrachtet.

Rahmenbedingungen und Aufbau der Simulation

Im Vorfeld der Simulation werden verschiedene Rahmenbedingungen festgelegt, die im nachfolgenden beschrieben sind.

Für die Simulation werden meteorologische Daten benötigt. Diese haben einen starken Einfluss auf die Heizlast und den Heizenergiebedarf. Dazu werden die Datensätze des Testreferenzjahres (TRJ) aus dem Jahr 2010 vom Standort Potsdam in einer stündlichen Auflösung verwendet. Dabei werden die Daten der Umgebungstemperatur und der solaren Einstrahlung benötigt, die die Basis zur Ermittlung des Wärmebedarfs und der Heizleistung eines Gebäudes bilden.

Zur Berechnung einer Heizleistung und eines Wärmebedarfs für ein Gebäude wird ein vereinfachtes Gebäudemodell erstellt, das auf Wärmegewinne und -verluste reduziert ist, siehe Abb. 2. Die (Gesamt-)Heizleistung des Gebäudes setzt sich aus den Heizleistungen für die Raumheizung und für die Erwärmung von Brauchwarmwasser (BWW) zusammen. Die Heizleistung für die Raumhei-

zung resultiert aus der Bilanzierung der Wärmeverluste (Transmission und Lüftung) und der Wärmegewinne (solar und intern). Diese werden mit dem Verfahren

nach DIN EN 12831 durch die Festlegung einer Innenraumtemperatur berechnet. Die Heizleistung für Brauchwassererwärmung wird durch die Standardlastprofile nach VDI 4655 ermittelt. Diese Lastberechnungen werden quasistationär in 1-Stunden-Schritten durchgeführt. Sie erfolgen ohne die Berücksichtigung einer Nachtabsenkung, wodurch über längere Zeiträume eine kleinere Heizleistung vorliegt. Aus dem Gebäudemodell resultieren ein Jahreswärmebedarf, ein thermisches Jahres-Lastprofil und eine Häufigkeitsverteilung der benötigten Heizleistungen.

Der Heizkessel wird in einem Heizkesselmodell über seine minimale thermische Nennwärmeleistung und seinen Wassergehalt als spezifische Größen abgebildet. Das Modell dient zur Berechnung der Taktzykluszeit, der jährlichen Taktzykluszeit, der jährlichen Taktzykluszeit und der jährlichen taktfreien Stunden. Ein Taktzyklus setzt sich aus der Brennerlaufzeit (Aufheizzeit und ggf. quasistationärer Betrieb) und der Brennerstillstandszeit (Abkühlzeit) zusammen. Der Brenner ist so lange eingeschaltet, wie eine Wärmeanforderung vorliegt und ein oberer Temperatursollwert nicht überschritten wird. Beim Überschreiten des oberen Temperatursollwertes wird der Brenner ausgeschaltet. Die Brennerstillstandszeit dauert so lange an, bis das Brennwertgerät auf eine vorgegebene

Temperatur (unterer Temperatursollwert) abgekühlt ist.

Abb. 3 zeigt das Heizkesselmodell mit den darin festgelegten Wärmeströmen, die für die Berechnungen benötigt werden. Die Aufheiz- und Abkühlleistung als innere Wärmeströme sowie die interne Speicherkapazität (Wasserinhalt) sind durch die folgenden Gleichungen definiert.

$$\dot{Q}_{\text{Aufheiz}} = \dot{Q}_{\text{Nenn, min}} - \dot{Q}_{\text{Bedarf}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{Abkühl}} = \dot{Q}_{\text{Bedarf}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{in, Sp.}} = m_{\text{ws}} \cdot c_{p, \text{ws}} \cdot \Delta \vartheta_H \quad (3)$$

Durch die definierten Wärmeströme berechnet sich die Aufheiz- und Abkühlzeit mit den Gleichungen 4 und 5.

$$t_{\text{Aufheiz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{in, Sp.}}}{\dot{Q}_{\text{Aufheiz}}} = \frac{m_{\text{ws}} \cdot c_{p, \text{ws}} \cdot \Delta \vartheta_H}{\dot{Q}_{\text{Nenn, min}} - \dot{Q}_{\text{Bedarf}}} \quad (4)$$

$$t_{\text{Abkühl}} = \frac{\dot{Q}_{\text{in, Sp.}}}{-\dot{Q}_{\text{Abkühl}}} = \frac{m_{\text{ws}} \cdot c_{p, \text{ws}} \cdot \Delta \vartheta_H}{\dot{Q}_{\text{Bedarf}}} \quad (5)$$

Die Summe aus Aufheiz- und Abkühlzeit bilden die Taktzykluszeit. Der reziproke Wert der Taktzykluszeit bildet die Taktrate zur Berechnung der jährlichen Takthäufigkeit.

Bezüglich der Berechnung der jährlichen Schadstoffemissionen wird eine messtechnisch ermittelte Emissionskurve aus Mühlbacher [3] entnommen, die sich über einen Taktzyklus mit Start- und Stoppphase erstreckt. Dadurch wird der quasistationäre und instationäre Betrieb des Heizkessels berücksichtigt, so dass

Nomenklatur

$\dot{Q}_{\text{Nenn, min}}$	min. Nennwärmeleistung	W
\dot{Q}_{Bedarf}	Wärmebedarf/Heizleistung	W
$\dot{Q}_{\text{Abkühl}}$	Abkühlleistung	W
\dot{Q}_{Aufheiz}	Aufheizleistung	W
$\dot{Q}_{\text{in, Sp.}}$	interne Speicherkapazität	Wh
m	Masse des Wassers	kg
$\Delta \vartheta_H$	Hysterese	K
t_{Aufheiz}	Aufheizzeit	s
$t_{\text{Abkühl}}$	Abkühlzeit	s
EE	Emissionseinheit	-

der Kurvenverlauf dem aus Abb. 1 entspricht. Die Emissionskurve wurde in einer messtechnischen Untersuchung an einem Prüfstand ermittelt. Dabei wurden die Konzentrationen von Abgasbestand-

Die Häufigkeitsverteilung dient zur Analyse der benötigten Heizleistungen, die vom eingesetzten Heizkessel bereitgestellt werden müssen und kann somit bei der Wahl eines geeigneten Kessels hilf-

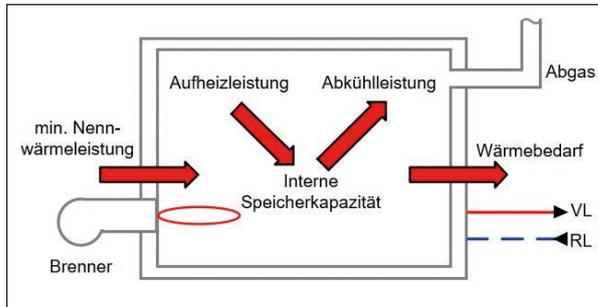


Abb. 3: Heizkesselmodell

teilen wie CO und HC gemessen, die als Schadstoffemissionen in der Simulation betrachtet werden. Die Schadstoffemissionen pro Taktzyklus werden durch eine zeitliche Integration der Emissionskurve berechnet. Dabei wird für die Emissionen eine dimensionslose Emissionseinheit EE eingeführt. Die Summe der Emissionen pro Taktzyklus bildet die jährlichen Gesamtemissionen.

Heizleistung und Wärmebedarf für ein Referenzgebäude

Für die im nachfolgenden durchgeführten Untersuchungen wird mit dem Gebäudemodell ein fiktives Referenzgebäude abgebildet, das von einem Heizkessel mit Wärme versorgt wird. Bei dem Referenzgebäude handelt es sich um ein Einfamilienhaus mit einer beheizten Bezugsfläche von 140 m². Die Innenraumtemperatur wird mit 20° C angesetzt.

Aus den Berechnungen ergibt sich ein Jahreswärmebedarf von 6.653 kWh/a für das Gebäude, der in 4.483 Jahresheizstunden anfällt. Abb. 4 zeigt die benötigten Heizleistungen dargestellt in einer Häufigkeitsverteilung. Die benötigten Heizleistungen sind auf der Abszisse in Leistungsbereichen von 0,05 kW aufgetragen. Die Säulen und deren Höhe repräsentieren die Anzahl der Stunden im Jahr, in denen die jeweilige Heizleistung auftritt. Die Gesamtanzahl der Stunden entspricht den Jahres-Heizstunden von 4.483 h/a.

reich sein. Anhand der Verteilung zeigt sich, dass im Großteil des Jahres nur eine geringe Heizleistung von unter 2,4 kW benötigt wird. Durch diese geringen Heizleistungen wird der eingesetzte Heizkessel oftmals im Teillastbetrieb (Modulationsbereich) arbeiten. In vielen Fällen dürfte auch die minimale Nennwärmeleistung der Modulationsbereiche unterschritten werden, so dass der Heizkessel häufig im Taktbetrieb arbeiten wird. Dies lässt vorab auf eine hohe Takthäufigkeit schließen.

Vorstellung der Simulationsergebnisse

Im Rahmen dieses Beitrags werden die jährliche Takthäufigkeit und Schadstoffemissionen der in Tab. 1 dargestellten Brennwertgeräte untersucht und verglichen. Dazu werden die Brennwertgeräte jeweils im Heizkesselmodell über ihre minimale Nennwärmeleistung und ihren Wasserinhalt abgebildet. Die Hysterese wird für alle Geräte auf 8 K festgelegt. Tab. 2 zeigt die Simulationsergebnisse der fünf Brennwertgeräte.

Anhand der Simulationsergebnisse offenbaren sich große Unterschiede zwischen den Brennwertgeräten bei der jährlichen Takthäufigkeit und dadurch auch bei den Schadstoffemissionen. Zwar verfügen die Brennwertgeräte alle über einen großen Modulationsbereich, jedoch liegt die Wärmeanforderung in vielen Fällen unterhalb der minimalen Nennwärmeleistung, die die Geräte zur Verfügung stellen können. Dadurch arbeiten die Brennwertgeräte, wie sich an der Anzahl der taktfreien Stunden zeigt, überwiegend im Taktbetrieb. Das Brennwertgerät der Firma Weishaupt arbeitet bei dieser Untersuchung sogar dauerhaft im Taktbetrieb (0 taktfreie Stunden). Nur bei Wärmeanforderungen oberhalb der minimalen Nennwärmelei-

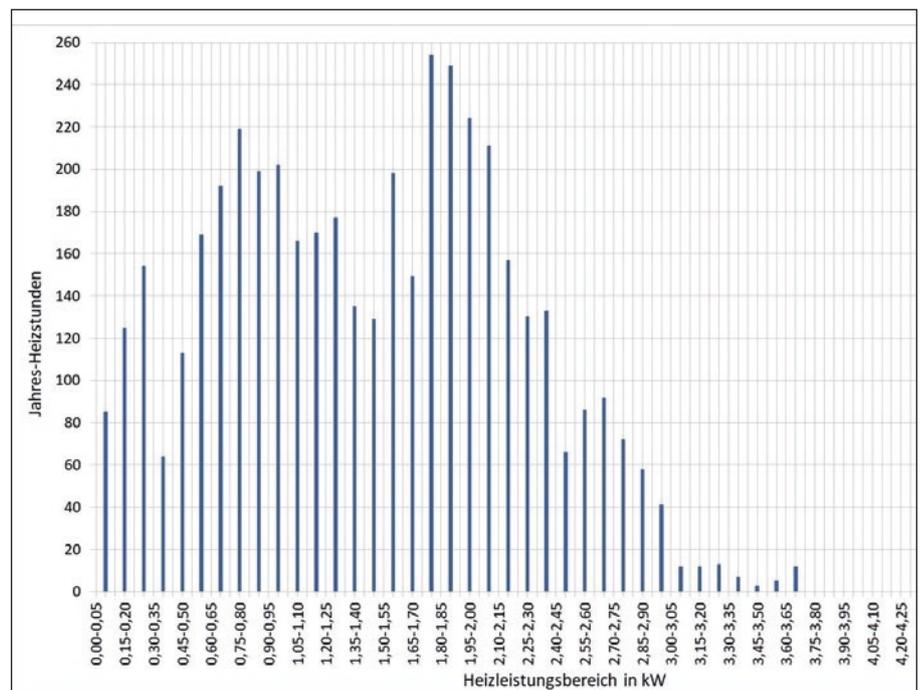


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der benötigten Gebäudeheizleistung ohne Brauchwarmwasser

stung passt das Brennwertgerät seine Wärmeleistung innerhalb des Modulationsbereichs stufenlos an die benötigte Heizleistung an. Folglich arbeitet das Brennwertgerät im modulierenden Betrieb (Teillastbetrieb). Die relativ hohen minimalen Nennwärmeleistungen können durch einen größeren Wasserinhalt (interne Speicherkapazität) teilweise

OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Für die Reduktion der jährlichen Takthäufigkeit und somit der Schadstoffemissionen existieren verschiedene Möglichkeiten. Diese umfassen die technischen Eigenschaften der Geräte, deren Regelung und hydraulische Einbindung. Ziel der Optimierung ist es immer, die Brennerlauf- und Brennerstillstandszeit zu er-

emissionen bei unterschiedlichen Wasserinhalten für das Brennwertgerät der Firma DE Dietrich.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich bereits bei kleinen Vergrößerungen des Wasserinhalts um wenige Liter die Anzahl der Taktungen halbieren lässt. Der Verlauf der jährlichen Taktungen (blau Kurve) veranschaulicht, dass mit zunehmender Vergrößerung des Wasserinhalts die Taktungen stetig weiter sinken und um mehr als den Faktor 10 reduziert werden können. Jedoch nähern sie sich asymptotisch einem Grenzwert an, so dass das Reduktionspotenzial mit zunehmendem Wasserinhalt kontinuierlich abnimmt.

Die in Abb. 5 in Säulen dargestellten Schadstoffemissionen setzen sich aus den Emissionen im quasistationären (schraffiert) und im instationären (ausgefüllt) Betrieb zusammen. Infolge der Reduzierung der Taktungen verringern sich auch die jährlichen Schadstoffemissionen sukzessive. In dieser Untersuchung konnten die Schadstoffemissionen mehr als halbiert werden. Die Reduktion resultiert aus der abnehmenden Anzahl von Start- und Stoppvorgängen und der sich daraus ergebenden Verringerung der Emissionen im instationären Betrieb. Demgegenüber stehen die Emissionen im quasistationären Betrieb, die mit zunehmendem Wasserinhalt ansteigen, da das Brennwertgerät durch die Vergrößerung der Speicherkapazität längere Brennerlaufzeiten während eines Taktzyklus erreicht. Da jedoch die Emissionen im instationären Betrieb wesentlich größer sind als die Emissionen im quasistationären Betrieb, vgl. Abb. 1) nehmen die jährlichen Gesamtemissionen insgesamt ab. Wie die Taktungen nähern sich auch die Schadstoffemissionen asymptotisch einem Grenzwert an. Dadurch nimmt das Reduktionspotenzial der Schadstoffemissionen bei größer werdendem Wasserinhalt stetig ab.

Die beispielhaft für das Brennwertgerät der Firma DE Dietrich vorgestellten Simulationsergebnisse und Zusammenhänge ergeben sich auch bei einer Vergrößerung des Wasserinhalts der anderen vier

Hersteller	Takthäufigkeit pro Jahr [-]	taktfreie Stunden [h/a]	Brennerlaufzeit [h/a]	jähr. Emissionen [Mio.EE/a]
Buderus	90.236	327	2.437	2,75
DE Dietrich	187.869	27	1.955	3,88
Elco	7.964	3.163	3.914	1,47
Viessmann	22.203	1.986	3.322	1,64
Weishaupt	138.635	0	1.751	3,98

Tab. 2: Simulationsergebnisse der Brennwertgeräte

kompensiert werden. Jedoch sind die hohen Takthäufigkeiten und die dadurch bedingten hohen Schadstoffemissionen der untersuchten Brennwertgeräte als kritisch/schlecht zu bewerten.

Eine Ausnahme bei der Untersuchung bildet das Brennwertgerät der Firma Elco. Auf Grund der kleinen minimalen Nennwärmeleistung von 1 kW kann das Brennwertgerät weit heruntermodulieren und die benötigte Heizleistung des Gebäudes im Großteil des Jahres in einer modulierenden Betriebsweise abdecken (3.163 taktfreie Stunden). Die vergleichsweise geringe Takthäufigkeit und die langen Brennerlaufzeiten (quasistationärer Betriebszustand) wirken sich positiv auf die jährlichen Schadstoffemissionen aus. Die jährliche Takthäufigkeit und Schadstoffemissionen sind bei diesem Brennwertgerät als gut zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigen, dass jährliche Takthäufigkeit und Schadstoffemissionen umso geringer sind, je kleiner die minimale Nennwärmeleistung und je größer der Wasserinhalt eines Brennwertgerätes ist. Angesichts der überwiegend hohen jährlichen Taktungen und Schadstoffemissionen ist dahingehend ein großes Optimierungspotenzial zur Verbesserung vorhanden.

höhen, um dadurch die Start- und Stoppvorgänge während des Taktbetriebs zu reduzieren. Im Folgenden werden verschiedene Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Erhöhung des Wasserinhalts (interne Speicherkapazität)

Eine häufig umgesetzte Maßnahme ist die Erhöhung der Speicherkapazität. Dadurch können längere Brennerlaufzeiten erreicht werden, da mehr der nicht abgeführten Wärme aufgenommen werden kann. Zunächst wird eine Erhöhung der internen Speicherkapazität, d. h. des Wasserinhalts, betrachtet. Diese Optimierung wird mit der erstellten Simulation näher untersucht und so das Reduktionspotenzial bezüglich der jährlichen Takthäufigkeit und der Schadstoffemissionen aufgezeigt.

Um den Einfluss bei unterschiedlichen Wasserinhalten aufzeigen zu können wird dieser bei jedem der fünf Brennwertgeräte in 21-Schritten bis auf 30l erhöht und die Einzelergebnisse erfasst. Zur Bewertung werden die bisherigen Simulationsergebnisse der Brennwertgeräte mit ihren originalen Wasserinhalten (im Diagramm 0,0l) als Ausgangswerte herangezogen. Abb. 5 zeigt beispielhaft die jährlichen Taktungen und Schadstoff-

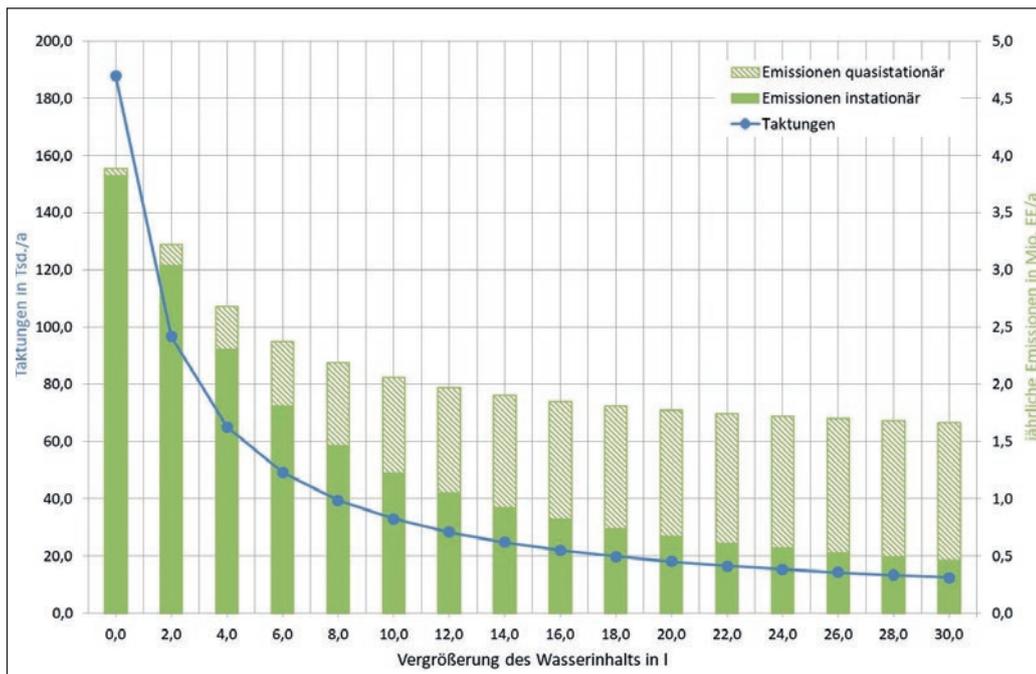


Abb. 5: Taktungen und jährliche Schadstoffemissionen bei unterschiedlichen Wasserinhalten

Brennwertgeräte. Durch den größer werdenden Wasserinhalt kann mehr nicht abgeführte Wärme aufgenommen und die Brennerlaufzeiten pro Taktzyklus verlängert werden. Als Folge dessen wird die jährliche Takt Häufigkeit reduziert und die taktfreien Stunden pro Jahr nehmen zu. Je größer die jährliche Anzahl der Taktungen und die Schadstoffemissionen der Brennwertgeräte mit ihren originalen Wasserinhalten waren, desto größer ist das jeweilige Reduktionspotenzial durch diese Optimierungsmaßnahme.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der internen Speicherkapazität besteht in der Vergrößerung der Hysterese, siehe Gleichung 3. In der Regel wird diese vom Hersteller vorgegeben, kann jedoch bei den meisten Geräten flexibel reguliert werden. Eine Alternative zum Betrieb mit konstanter Hysterese ist der Betrieb mit variabler/wärmebedarfsabhängiger Hysterese. Dabei wird unter Berücksichtigung der Kesselwassertemperatur und der Wärmeanforderung die optimale Hysterese berechnet und automatisch eingestellt. D. h. die Hysterese wird z. B. in einem Bereich von 6–12 K bedarfsabhängig geregelt. Die variable Hysterese führt zu einer variablen internen Speicherkapazität.

Hydraulische Einbindung (externe Speicherkapazität)

Neben einer Erhöhung der internen Speicherkapazität besteht auch die Option, die externe Speicherkapazität durch einen Pufferspeicher zu erhöhen. Dieser wird dann mit einem Brennwertgerät hydraulisch eingebunden. Vom Prinzip wird dabei der gleiche Effekt verfolgt wie bei einer Vergrößerung des Wasserinhalts im Brennwertgerät (interne Speicherkapazität). Die Brennerlaufzeiten können durch die Aufnahme von mehr Wärme verlängert werden, wodurch die Anzahl der Taktungen gesenkt wird. Diese Optimierungsmöglichkeit wird z. B. eingesetzt, wenn der Hersteller eine Vergrößerung des Wasserinhalts nicht anbietet. Für die untersuchten Brennwertgeräte mit ihren geringen Wasserinhalten ist die Kopplung mit einem Pufferspeicher naheliegend. Grundsätzlich muss bei der hydraulischen Einbindung eines Brennwertgerätes dessen Anforderung an eine niedrige Rücklaufumtemperatur zur Brennwertnutzung beachtet werden. Für Brennwertgeräte eignet sich z. B. eine Drossel- und Beimischtung oder eine Einspritzschaltung mit Durchgangsventil.

Abb. 6 zeigt eine spezielle Möglichkeit

der hydraulischen Einbindung von Brennwertgerät und Pufferspeicher, bei der es nicht zur ungewünschten Rücklaufumtemperaturerhöhung durch den Pufferspeicher kommt. Zur Umsetzung wird ein Brennwertgerät benötigt, das über einen Hochtemperatur- (HT-RL) und Niedertemperaturrücklauf (NT-RL) verfügt. Die beiden Rückläufe dienen zur Trennung von Heizkreisen mit unterschiedlichen Rücklaufumtemperaturen. Bei Brennwertgeräten mit zwei Wärmetauschern, d. h. mit nachgeschaltetem Abgas-Wärmetauscher, wird der NT-RL an diesen

angeschlossen, um dort die maximale Kondensation des Wasserdampfes zu erreichen. Bei Brennwertkesseln mit integriertem Wärmetauscher ist der NT-RL so am Gerät angebracht, dass das kühlere Rücklaufwasser in den unteren (kälteren) Bereich des Wärmetauschers geleitet wird, so dass auch in diesen Geräten die maximale Kondensation stattfinden kann. Im Rahmen der Marktanalyse wurden auch die Anschlüsse der Brennwertgeräte recherchiert. Von den insgesamt 70 untersuchten Geräten sind nur 18 mit einem zweiten Rücklauf ausgestattet. Alle fünf hier näher untersuchten Geräte verfügen nicht über zwei Rückläufe. Wie im Schema dargestellt wird der Verbraucher über den NT-RL eingebunden, der im Brennwertgerät an den Abgas-Wärmetauscher angeschlossen ist. Dadurch ist über den NT-RL eine Brennwertnutzung durch niedrige Rücklaufumtemperaturen des Verbrauchers möglich. Der Pufferspeicher wird parallel zum Brennwertgerät über dessen HT-RL eingebunden. Der HT-RL ist im Brennwertgerät an den Brennraum-Wärmetauscher angeschlossen. Über diesen ist keine Brennwertnutzung möglich. Der Pufferspeicher wird über zwei Rohrleitungen mit dem Vorlauf verbun-

den. In die erste Rohrleitung wird ein differenzdruckgesteuertes Überströmventil (ÜV) eingebaut, durch das die Beladung des Pufferspeichers in Abhängigkeit von der Wärmeanforderung erfolgt. In der zweiten Rohrleitung wird die Entladepumpe (Pumpe 2) eingebaut, die zum Entladen des Pufferspeichers dient.

Durch das wärmebedarfsabhängige Öffnen und Schließen des Thermostatventils (TV) entstehen im Verbraucherkreis variable Massenströme. Bedingt durch die Anbindung des Verbrauchers über den NT-RL führt dies auch zu variablen Massenströmen im Abgas-Wärmetauscher. Um bei geringen Wärmeanforderungen trotzdem eine ausreichende Wärmeabfuhr aus dem Brennwertgerät

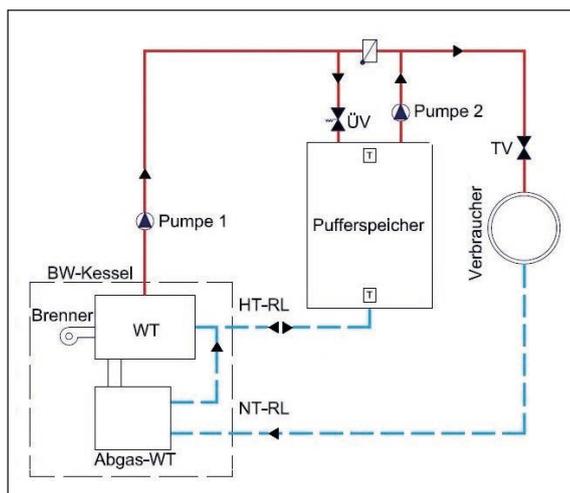


Abb. 6: Hydraulisches Anlagenkonzept

gewährleisten zu können und eine vorzeitige temperaturbedingte Abschaltung zu verhindern, dienen das ÜV und der Pufferspeicher. Diese sorgen bei geringen Wärmeanforderungen während der Brennerlaufzeit für einen annähernd konstanten Massenstrom über den HT-RL im Gerätekreis und damit für die Wärmeabfuhr aus dem Gerät. Das ÜV öffnet sich durch den Anstieg des Differenzdrucks beim Schließen des TV. Die für Heizzwecke nicht benötigte Wärme kann aus dem Gerät abgeführt und in den Pufferspeicher geleitet werden. Dadurch wird der Brennwertnutzen im Abgas-Wärmetauscher nicht negativ beeinflusst. Die Brennerlaufzeit wird aufgrund

der zusätzlichen Speicherkapazität erhöht und die Takthäufigkeit somit reduziert.

Die Be- und Entladung des Pufferspeichers wird über zwei Temperaturfühler geregelt, siehe Abb. 6. Die Beladung beginnt mit dem Öffnen des ÜV und dem Einleiten von warmem Vorlaufwasser. Dadurch verschiebt sich die Temperaturfront nach unten. Sobald die Solltemperatur am unteren Fühler erreicht wird, ist der Speicher voll beladen. Daraufhin werden das Brennwertgerät sowie die Pumpe 1 ab- und die Pumpe 2 angeschaltet. Infolgedessen wird die Strömungsrichtung im Pufferspeicher umgekehrt und die benötigte Heizleistung über den Pufferspeicher zur Verfügung gestellt. Der Pufferspeicher wird entladen und die Temperaturfront verschiebt sich wieder nach oben. Sobald die Solltemperatur am oberen Fühler unterschritten wird, ist der Pufferspeicher entladen, woraufhin die Pumpe 2 abschaltet. Bei einer erneuten Wärmeanforderung schalten sich das Brennwertgerät und die Pumpe 1 wieder ein.

Regelung der Brennerlauf- und Brennerstillstandszeit

Abgesehen von den bisher beschriebenen Optimierungen gibt es auch regelungstechnische Möglichkeiten zur Verlängerung der Brennerlauf- und Brennerstillstandszeiten.

Dabei ist zunächst die Einstellung einer Mindestbrennerlaufzeit zu nennen, die in der Regelung bei den meisten Brennwertgeräten parametrisiert werden kann. Dadurch wird ein schnelles Wiederschalten des Brenners nach dem Start verhindert. Neben einer Mindestbrennerlaufzeit kann auch eine Mindestbrennerstillstandszeit (Sperrzeit) festgelegt werden. Dadurch bleibt das Brennwertgerät nach dem Ausschalten für diese Zeit abgeschaltet und ein sofortiges Wiedereinschalten wird verhindert. Zur Überbrückung der Sperrzeit wird z. B. die

Speicherkapazität des Gebäudes ausgenutzt oder Wärme von einem Pufferspeicher bereitgestellt.

Eine weitere Möglichkeit bilden Verfahren zur dynamischen Pausenzeit-Optimierung [2]. Dabei sollen wie beim Betrieb mit einer variablen Hysterese die starren Ein- und Ausschaltbedingungen vermieden werden. Es wird zwischen zwei Verfahren unterschieden: dem Integral- und Differenzialverfahren. In beiden Verfahren werden die Brennerstillstandszeiten dynamisch angepasst und verlängert. Beim Integralverfahren wird die geringe Speicherkapazität eines Brennwertgerätes durch die Speicherkapazität des Heizungsnetzes ausgeglichen. Das Ein- und Ausschalten erfolgt durch die Bildung von Zu- und Abschaltintegralen, die ein Maß für die zugeführte Wärmeenergie sind und flächenmäßig ausgeglichen werden. Beim Differenzialverfahren werden die Vorlaufemperaturgradienten überwacht. Die Pausenzeit wird in Abhängigkeit von den Aufheiztemperaturgradienten berechnet und angepasst.

SCHLUSSFOLGERUNG

Zur Bewertung von Schadstoffemissionen wie HC und CO von Heizkesseln ist es notwendig, die Emissionskonzentrationen in allen Betriebszuständen während des intermittierenden Betriebs zu erfassen. Dazu gehören der quasistationäre (ungestörte) Betrieb sowie der instationäre Betrieb mit Start- und Stopp-Phasen. Die Schadstoffemissionen in der Start- und Stopp-Phase sind entscheidend, da sie aufgrund von unzureichenden Verbrennungsbedingungen im Vergleich zum quasistationären Betrieb um ein Vielfaches höher sind. Dies wird in DIN 4207 bei der messtechnischen Überprüfung der Schadstoffemissionen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Mehremissionen während der Start- und Stopp-Phase eines Heizkessels sind die Schadstoffemissionen von der Anzahl der Taktungen abhängig. Je höher die jährliche Takthäufigkeit, desto höher sind auch die jährlichen Schadstoffemissionen. Zur Reduktion der Schadstoffemissionen ist demnach eine

Reduktion der Takthäufigkeit notwendig. Die Takthäufigkeit ist von verschiedenen Parametern wie dem Modulationsbereich des Heizkessels, der Speicherkapazität und der Wärmeanforderung abhängig. Die Untersuchung hat gezeigt, dass am Markt verfügbare Geräte oftmals einen großen Modulationsbereich aufweisen. Aufgrund ihrer hohen minimalen Nennwärmeleistung können sie jedoch nicht weit genug heruntermodulieren. Zudem weisen sie in der Regel kleine Wasserinhalte und dadurch kleine interne Speicherkapazitäten auf. Dies hat hohe Takthäufigkeiten und hohe Schadstoffemissionen zur Folge, die als negativ zu bewerten sind.

Es liegt somit ein großes Optimierungspotenzial zur Schadstoffreduktion vor. Dafür existieren verschiedene Möglichkeiten, mit denen immer eine Verlängerung der Brennerlauf- und Brennerstillstandszeiten erreicht werden soll.

Eine im Rahmen der Untersuchung durchgeführte Optimierungsmöglichkeit ist die Vergrößerung der internen Speicherkapazität durch eine Erhöhung des

Wasserinhalts. Dabei zeigte sich, dass bereits bei einer Erhöhung von wenigen Litern die Takthäufigkeit um den Faktor 10 und die Schadstoffemissionen HC und CO halbiert werden können. Das Optimierungspotenzial ist dabei immer vom Heizkessel abhängig.

Die Erfassung der Emissionskonzentration in allen Betriebszuständen ist für eine ganzheitliche Bewertung der Schadstoffemissionen von essentieller Bedeutung. Nur so kann ein Bewusstsein für das große Reduktionspotential geweckt und dadurch ein Anstoß für Optimierungen geben werden. Durch die vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten sind große Reduktionen der Schadstoffemissionen möglich.

Autoren:

Claudio Sulger, B. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Alexander G. Floß

Institut für Gebäude- und Energiesysteme

Hochschule Biberach

88400 Biberach

Grafiken: Claudio Sulger

www.hochschule-biberach.de

Literatur

1. DIN EN 12831: Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008.
2. Dzubiella M. et al.: Gas-Brennwert-Wandgeräte optimieren- Es geht noch sparsamer und komfortabler. In: SBZ: Fachseiten für Sanitär Heizung und Klima, 5/2009 S. 88-93.
3. Mühlbacher H.: Verbraucherverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten. TUM, Dissertation, 2007.
4. Pfeiffer F.: Bestimmung der Emissionen klimarelevanter und flüchtiger organischer Spurengase aus Öl- und Gasfeuerungen kleiner Leistung. Universität Stuttgart, Dissertation, 2001.
5. Streicher, W. et al.: Fortschrittliche Wärmespeicher – Erhöhung von solarem Deckungsgrad und Kesselnutzungsgrad und Emissionsverringern durch verringertes Takten. bmvit, Wien 2007.
6. Sulger C.: Untersuchung der Takthäufigkeit von Brennwertwärmeerzeugern. Hochschule Biberach Bachelorarbeit, 2016.
7. VDI-Richtlinie 4207: Messung von Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2018.
8. VDI-Richtlinie 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008.

