

Optimierung von Mehrkesselanlagen

Verbesserung der Regelung und der Hydraulik

Eine Chance, Schadstoffemissionen aus Feuerungsanlagen zu verringern, besteht darin, durch Einsatz von Mikroprozessor-Reglern die Schaltspiele und damit die An- und Abfahremissionen von intermittierenden Brennern zu reduzieren.

Zur Erforschung der Abhängigkeiten beim dynamischen Verhalten einer Kesselanlage wurde an der FH BS / Wolfenbüttel ein Simulationsprogramm für PCs entwickelt. Ergebnisse zur Volumenstromverteilung zeigen, mit welchen Problemen Betreiber und Planer in der Praxis rechnen müssen.

Die Untersuchungen zur Jahresschaltheufigkeit konzentrieren sich auf die Beurteilung des Einflusses der dynamischen Parameter von Kesseln in Zusammenhang mit der nachgeschalteten hydraulischen Schaltung sowie auf die Einflüsse der Betriebsart, der Überdimensionierung und der Volumenstromverteilung.

Um zukünftig weitere Reduzierungen des Primärenergieeinsatzes und vor allem der Emissionen bei der Heizwärmeerzeugung zu erreichen, sind durch Einsatz von Mikroprozessoren und darauf basierenden Regelsystemen weitere Entwicklungsschritte erforderlich. Für Mehrkesselanlagen mit mehreren Brennerleistungsstufen und/oder stetiger Leistungsanpassung können Regler entwickelt werden, die kontinuierlich den Nutzungsgrad aus Betriebsdaten berechnen und die Schaltspiele taktender Brenner durch kontinuierliche Berechnung angepasster Regelparameter minimieren. Trotz aller Fortschritte in der Feuerungstechnik emittieren taktende Brenner beim An- und Abschalten verstärkt Schadstoffe. Zur Reduzierung der Schaltheufigkeit sollten daher alle sich bietenden Möglichkeiten genutzt werden.

An der Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik - Institut für Technische Gebäudeausrüstung - Heizungstechnik, wird zu dieser Thematik das Forschungsprojekt "Optimierung von Mehrkesselanlagen" durchgeführt. Die Erhöhung des Jahresnutzungsgrades und die Verminderung der Emissionen durch Reduzierung der Schaltheufigkeit sind primäre Ziele der experimentellen und theoretischen Untersuchungen [1]. Unterstützt durch Feldversuche und Messungen an einer Laborversuchsanlage wurden Simulationsmodelle auf einem PC entwickelt, die das dynamische Verhalten von Kesseln bei intermittierendem Betrieb beschreiben.

Ziel der Untersuchungen ist, die wichtigsten Einflussparameter nach ihrer Priorität zu ordnen und daraus allgemein gültige Regeln abzuleiten, die in die Programmierung von zukünftigen Mikroprozessor-Reglern Eingang finden.

Theoretische Vorbetrachtungen

Während Einkesselanlagen in ihrem dynamischen Verhalten bereits gut beschrieben werden können, liegen bisher für Mehrkesselanlagen nur wenig Erkenntnisse vor. Der intermittierende Betrieb von ein- und zweistufigen Brennern erzeugt instationäre Verhältnisse für die Leistungszufuhr und den Temperaturverlauf. Zur Charakterisierung des statischen und dynamischen Verhaltens wird die Kesseltemperatur-Regelstrecke durch Aufnahme der aus der Regelungstechnik bekannten Sprungantwort analysiert. Die Sprungantwort zeigt proportionales Verhalten höherer Ordnung mit vom Kesselwasserstrom abhängigem Verstärkungsfaktor K_{ps} bzw. Regelbereich X_{HS} , ohne Kesselwasserdurchfluss zeigt sie integrales Verhalten.

Es ist bekannt, dass proportionale Regelstrecken höherer Ordnung (mit Kesselwasserdurchfluss) in guter Näherung durch Regelstrecken erster Ordnung mit Totzeit ersetzt werden können [2]. Die Überprüfung in Laborversuchen bestätigt diese Vereinfachung. Mit nur zwei Parametern, der Kesselzeitkonstanten T_K und der Ersatztotzeit T_t , kann das dynamische Verhalten eines Kessels gut beschrieben werden. Hierbei hängt die Kesselkonstante T_K von der Kesselkonstruktion ab, d.h. von den wirksamen Speichermassen des Kesselwerkstoffes und vor allem des Kesselwasserinhalts sowie vom Kesselwasserstrom (Bild 1). Die Ersatztotzeit (Verzugszeit) eines Kessels gibt den zeitlichen Versatz des Wärmetransportes durch die Kesseltemperatur-Regelstrecke wieder. Sie bestimmt, wie lange nach dem Brennerstart die erste merkbare Temperaturänderung am Vorlauf oder Kesseltemperaturfühler erfolgt und ist für einen gegebenen Kessel primär vom Kesselmassenstrom abhängig.

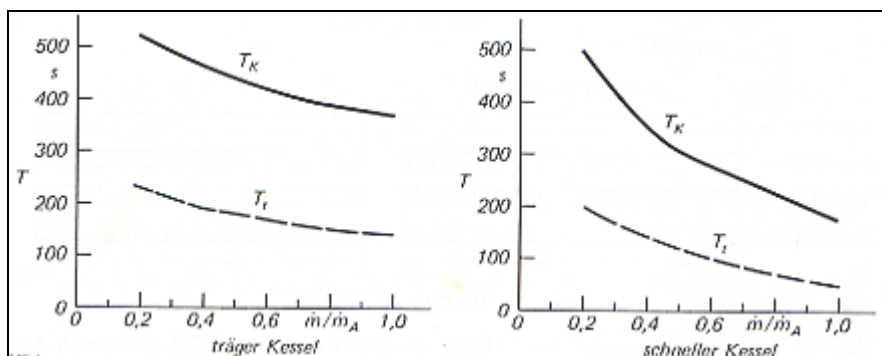


Bild 1 Verlauf der dynamischen Parameter eines dynamisch "trägen" und dynamisch "schnellen" Kessels

Im Labor für Heizungstechnik der FH Braunschweig-Wolfenbüttel wurde durch entsprechende Messungen die Abhängigkeit der Kesselzeitkonstanten und der Ersatztotzeit vom Kesselmassenstrom an verschiedenen Kesseln messtechnisch ermittelt (Bild 1). Nach dem Verlauf der Funktionen Kesselzeitkonstante T_K und Ersatztotzeit T_t in Abhängigkeit vom Kesselwasserstrom kann der Einfluss der Kesselkonstruktion grob differenziert werden: Ein "träger" Kessel ist dadurch gekennzeichnet, dass sich T_K und T_t nur relativ wenig bei Variation des Kesselwasserdurchsatzes ändern. Hingegen besteht bei einem "schnellen" Kessel eine starke Abhängigkeit der dynamischen Parameter T_K und T_t vom Kesselwasserdurchsatz.

Eine weitere und vom Betreiber nur selten beeinflussbare Größe ist die Höhe der Schaltdifferenz. Bekanntlich sinkt mit wachsender Schaltdifferenz die Schalthäufigkeit, gleichzeitig steigt jedoch die Kesselvorlauftemperaturschwankung.

Durch Variation der Schaltdifferenz in Abhängigkeit von der Belastung bzw. der Außentemperatur lässt sich die Schalthäufigkeit gegenüber einer Betriebsweise mit konstanter Schaltdifferenz extrem senken. So zeigten experimentelle Messungen im Rahmen einer Diplomarbeit, dass bei variabler Schaltdifferenz die Schalthäufigkeit auf das Jahr extrapoliert um 76 % niedriger liegt als bei einer konstanten Schaltdifferenz von 4 K. Durch lange Brennerlaufzeiten liegen die mittleren Abgastemperaturen und -verluste zwar höher als bei intermittierendem Betrieb, durch Einstellung einer geringen Brennerbelastung und gleichzeitiger Überdimensionierung der Kesselleistung bei Kesseln mit Gebläsebrennern lassen sich jedoch auch hier optimale Jahresnutzungsgrade erzielen.

Das Verhalten einstufiger Brenner lässt sich auf die einzelnen Belastungsstufen von Mehrkesselanlagen extrapolieren. Der Einfluss weiterer Parameter auf das Taktverhalten, z.B. die Anzahl und Einschaltfolge der Kessel- und Brennerstufen, der Einfluss der hydraulischen Schaltung und der Einfluss der Kesselbetriebsweise (Konstant-, Niedertemperatur-, Brennwertkessel) wurde bisher nicht untersucht. Im Rahmen des Forschungsprojektes "Optimierung von Mehrkesselanlagen" wurde daher ein Simulationsprogramm entwickelt.

Rechenprogramm zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Mehrkesselanlagen

Mit dem an der FH Braunschweig-Wolfenbüttel erstellten Simulationsprogramm können Variationsrechnungen zu folgenden Aufgabenstellungen durchgeführt werden:

- Volumenstromverteilung im Rohrnetz,
- benötigte elektrische Energie für die Pumpenantriebe,
- Schalthäufigkeit der einzelnen Brennerstufen,
- zu erwartende Jahresschalthäufigkeit nach einem vorgegebenen Anlagenbelastungsprofil.
- Jahresnutzungsgrad der Mehrkesselanlagen.

Das Programm ist für Zweikesselanlagen bis zu einer maximalen Gesamtkesselleistung von 10 MW mit zweistufig taktenden Brennern konzipiert. Veränderbare Parameter sind:

- die hydraulische Schaltung; z.B. können die in Bild 2 dargestellten Schaltungen berechnet werden. Mit hydraulischem Entkoppler bleiben Kessel- und Verbrauchervolumenströme im Betrieb weitgehend konstant; mit Kesselbeimischpumpe schwanken sie z.T. sehr stark.
- Kesseltypen; es lassen sich Konstant-, NT- und Brennwertkessel berechnen.
- Mindestrücklauftemperatur für Konstant- und NT-Kessel.
- Kesselkonstruktion: Sie wird durch unterschiedliche dynamische Parameter T_K und T_t als Funktion des Kesselwasservolumenstromes beschrieben.
- Leistungsaufteilung der Kessel- und Brennerstufen.
- Überdimensionierung der Kesselleistung hinsichtlich des Wärmebedarfs.
- Regelung der Leistungsstufenfolge; z.Z. sind vier z.T. in der Praxis nicht realisierte Betriebsarten möglich (Bild 3).

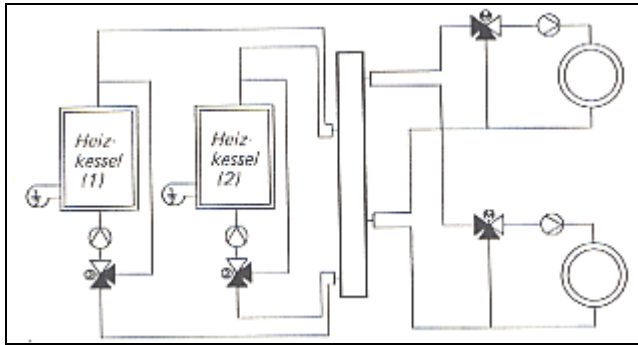


Bild 2a Schematische Darstellung einer Zweikesselanlage mit hydraulischem Entkoppler

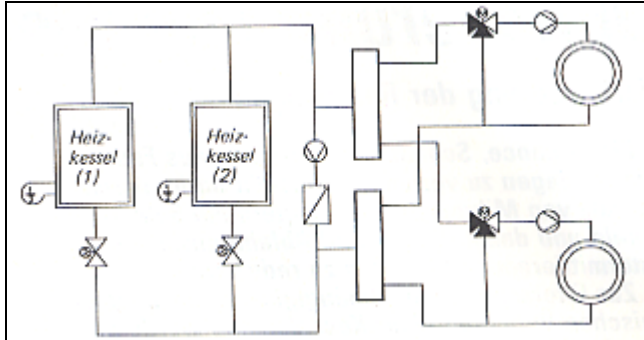


Bild 2b Schematische Darstellung einer Zweikesselanlage mit druckbehaftetem Sammler/Verteiler und Beimischpumpe

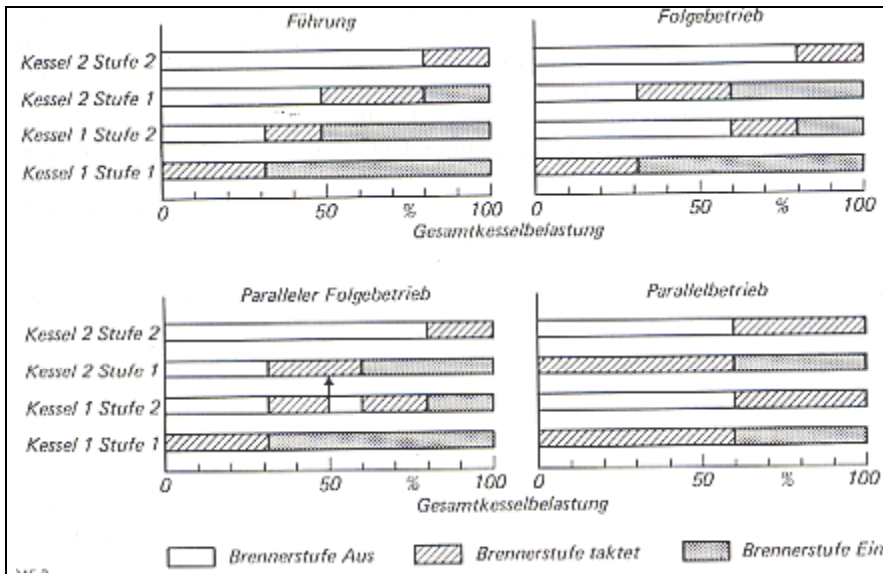


Bild 3 Übersicht über möglich Betriebsarten einer Zweikesselanlage mit zweistufigen Brennern

Programmaufbau und Rechnungsablauf werden in einem zusammenfassenden Forschungsbericht später veröffentlicht.

Ergebnisse

Den nachfolgenden Ergebnissen einer Berechnung wird ein Rohrnetz mit einem Verbraucherkreis sowie unterschiedlicher kesselseitiger Hydraulik (Bild 2) zugrundegelegt. Die Anlagenleistung beträgt 2000 kW bei einem maximalen Gesamtkesselstrom von 110 m³/h. Es werden weiterhin nach dem Einfluß der Kesselkonstruktion ein dynamisch "träger" und ein "schneller" Kessel verglichen. Weitere Variationsparameter sind die Kessel- und Brennerleistungsstufenfolge (Bild 3), die Kesseldimensionierung bezogen auf den Wärmebedarf, die Auslegungsspreizung bzw. der Auslegungskesselwasserdurchsatz und die Schaltdifferenz.

Hydraulische Schaltung

Untersucht werden die hydraulischen Schaltungen "Kesselbeimischpumpe" und "hydraulischer Entkoppler" (Bild 2). Mit einem PC-Berechnungsprogramm [3] zur Untersuchung der Volumenstromverteilung und Druckverteilung in hydraulischen Netzen kann für ein komplettes Rohrnetz die Massenstromverteilung bei unterschiedlichen Belastungen (in 10 %-Schritten) ermittelt werden.

Bei Einsatz eines differenzdruckarmen hydraulischen Entkopplers verlaufen die Volumenströme im gesamten Teilbetrieb sehr gleichmäßig (Bild 4); dies wirkt sich positiv auf die Regelgüte der Primär- und Sekundärvorlauftemperaturregelung aus. Bei Einsatz von Kesselbeimischpumpen mit druckbehaftetem Sammler-Verteiler ergeben sich sowohl auf der Kessel- als auch auf der Verbraucherseite starke Volumenstromänderungen bei Belastungen unter 50 %, bei denen die Kesselbeimischpumpe in Betrieb geht (Bild 4b).

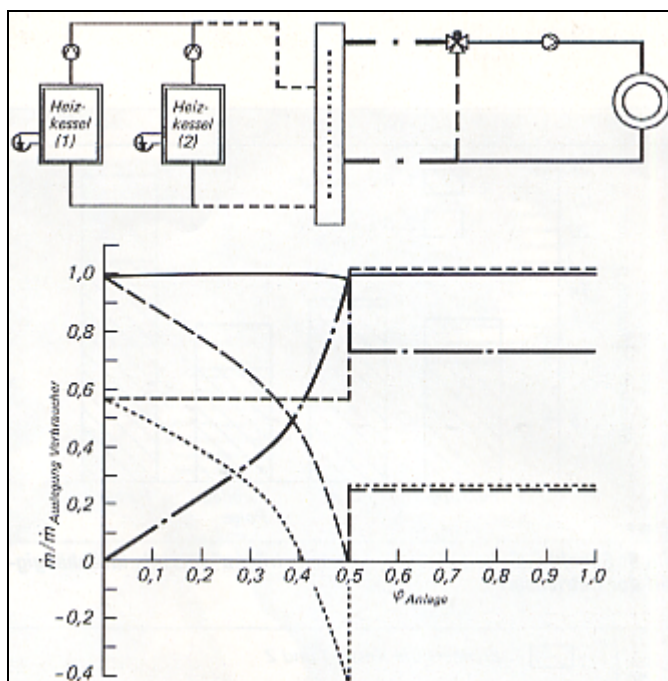


Bild 4a Volumenstromverteilung in einer Zweikesselanlage mit hydraulischem Entkoppler

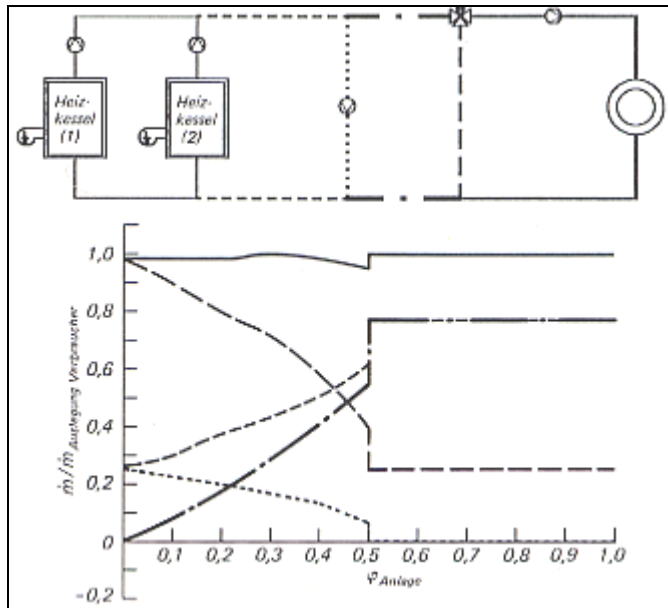


Bild 4b Volumenstromverteilung in einer Zweikesselanlage mit Sammler/Verteiler und Beimischpumpe

Kesselkonstruktion

Die Kesselkonstruktion (träger bzw. schneller Kessel) hat wesentlichen Einfluss auf die Jahresschalthäufigkeit. In Bild 5 ist einem dynamisch schnell reagierenden ein dynamisch träge reagierender Kessel bei weiterhin unterschiedlicher nachgeschalteter Hydraulik gegenübergestellt. In beiden Fällen liegt Führungsbetrieb, d.h. konventionelle Zu- und Abschaltung der einzelnen Brennerleistungsstufen zugrunde (Bild 3).

Deutlich erkennt man, dass die hydraulische Schaltung für den schnell reagierenden Kessel kaum Einfluss auf die Jahresschalthäufigkeit hat, während der hydraulische Entkoppler vor allem für den trägen Kessel von Vorteil ist. Gleichzeitig wird deutlich, dass ein träger Kessel bedeutend weniger Jahresschaltungen erzeugt als ein schneller.

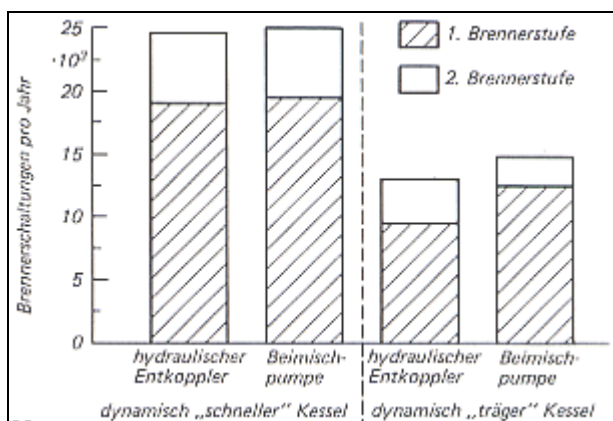


Bild 5 Schalthäufigkeiten eines dynamisch "trägen" und "schnellen" Kessels bei unterschiedlichen hydraulischen Anbindungen

Leistungsstufenfolge

Wesentlichen Einfluss auf die Jahresschalzhäufigkeit hat die unterschiedliche Leistungsstufenfolge gemäß Bild 3. Für einen trägen Niedertemperaturkessel mit nachgeschaltetem hydraulischem Entkoppler liefert die parallele Folge die besten Ergebnisse, während der reine Parallelbetrieb am schlechtesten abschneidet (Bild 6); da sich diese Ergebnisse auch beim Einsatz einer Beimischpumpe mit druckbehaftetem Verteiler/Sammler bestätigen, lassen sich mit dem parallelen Folgebetrieb für konventionelle Regelungen die besten Ergebnisse erzielen.

Frühere Untersuchungen [1] zeigen, dass die parallele Folge auch hinsichtlich des Jahresnutzungsgrades die günstigsten Ergebnisse liefert.

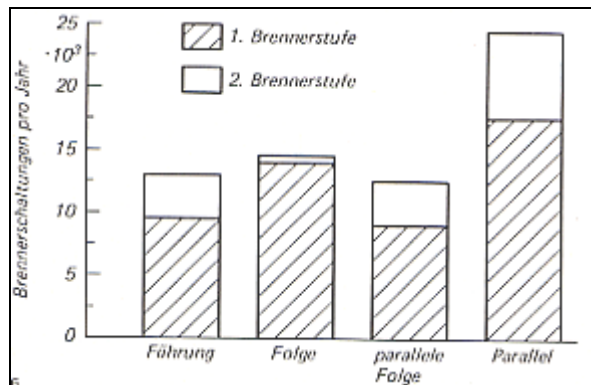


Bild 6 Schalzhäufigkeit eines dynamisch "trägen" Kessels in Abhängigkeit der Betriebsart

Kesselleistung

Die Kesseldimensionierung, d.h. die Wahl der Kesselleistung bezogen auf den Heizwärmebedarf der Verbrauchergruppen, hat ebenfalls Einfluss auf die Schalzhäufigkeit. Bild 7 zeigt die Ergebnisse für eine Dimensionierung von 0 bis 100 %, d.h. von einer exakten Anpassung der Kesselleistung an den Wärmebedarf bis hin zur doppelten Dimensionierung. Es ist zu erkennen, dass bis ca. 30 % Überdimensionierung die Schalzhäufigkeit sinkt, während bei größerer Überdimensionierung ein fast linearer Anstieg der Schalzhäufigkeit zu verzeichnen ist. Dieser Einfluss der Kesseldimensionierung ist im weiteren stark abhängig von der gewählten Leistungsstufenfolge, d.h., die Einflüsse müssen immer in Kopplung miteinander gesehen werden.

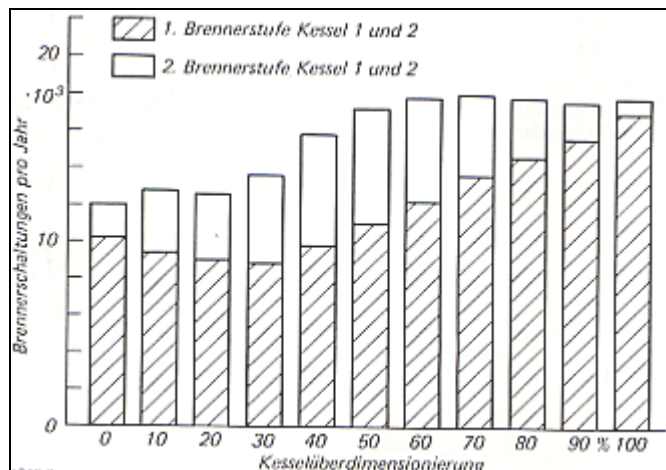


Bild 7 Schalzhäufigkeit eines dynamisch "trägen" Kessels in Abhängigkeit des Verhältnisses Kesselleistung zu max. Wärmebedarf bei Führungsbetrieb

Kesselauslegungsvolumenstrom und Einsatz variabler Schaltdifferenzen

Durch Reduzierung des Kesselwasservolumenstromes bzw. damit verbundener Erhöhung der Auslegungsspreizung der Kesselaustritts- und -eintrittstemperatur z.B. von 75/60 °C auf 90/60 °C kann der Energieaufwand für die Kesselkreispumpen drastisch gesenkt werden. Eine Halbierung des Kesselwasservolumenstromes erfordert bei gleichem Rohrnetz nur noch ein Achtel des Leistungsbedarfs für die Wassermwälzung.

Zusätzlich kann durch variable Schaltdifferenzen die Anzahl der Schaltspiele der Brenner und Kesselleistungsstufen drastisch reduziert werden. In herkömmlichen Kesselkreisregelungen schaltet ein Zwei-Punkt-Regler bei Erreichen des unteren Schaltpunktes den Brenner ein und am oberen Schaltpunkt wieder aus. Die Schaltdifferenz kann zwar in der Größe verändert werden, ist aber über den gesamten Lastbereich konstant. Zunehmend werden jedoch auch Regler mit variabler Schaltdifferenz angeboten, bei denen bei kleiner Belastung die Schaltdifferenz hoch, bei hoher Belastung klein gewählt wird.

Bisher nur diskutiert wurde eine Regelung mit variabler Schaltdifferenz, bei der der Ausschaltzeitpunkt des Brenners über den gesamten Lastbereich konstant eingestellt, während der untere Schaltpunkt in Anlehnung an die Heizkurve variabel gefahren wird (Bild 8). Notwendig für diese Betriebsart sind nachgeschaltete Mischregelungen für die Vorlauftemperaturregelung der Verbraucher. Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen zeigt Bild 9.

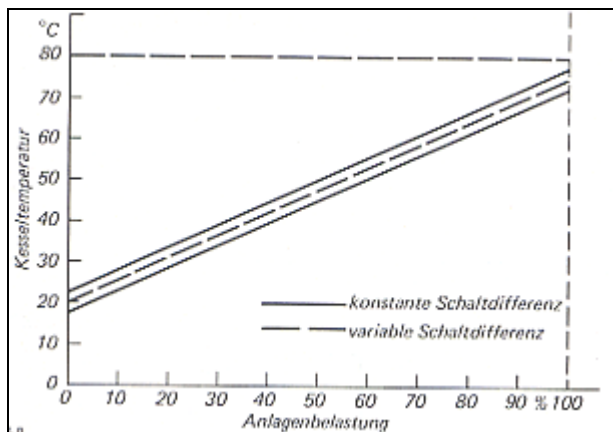


Bild 8 Prinzipielle Darstellung der variablen und konstanten Schaltdifferenz am Beispiel einer linearisierten Heizkurve

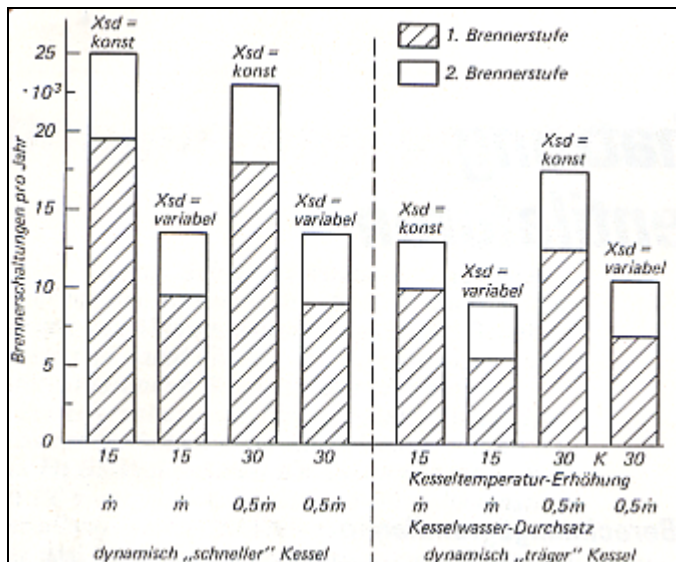


Bild 9 Vergleich eines dynamisch "trägen" und "schnellen" Kessels bei unterschiedlichen Kesselvolumenströmen und Einsatz von konstanter und variabler Schaltdifferenz

Durch die variable Schaltdifferenz mit konstanter Ausschalttemperatur wird für beide Kesseltypen die Schalthäufigkeit erheblich gesenkt, wobei die Verringerung der Schaltspiele beim dynamisch schnellen Kessel prozentual höher liegt; absolut jedoch fällt die Schalthäufigkeit eines trägen, mit Speicherfähigkeit behafteten Kessels insgesamt sehr viel niedriger aus. Der Einfluss des Kesselwasserdurchsatzes ist nicht eindeutig zuzuordnen. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Diskussion über die Umweltverträglichkeit der Verbrennung fossiler Energieträger zwingt alle Beteiligten, nach neuen Konzepten und Strategien zu suchen. Weitere Reduzierungen, vor allem der Emissionen, sind durch wirksame Regelstrategien ohne zusätzlichen anlagentechnischen Aufwand möglich.

Weitergehende Untersuchungen zielen darauf, durch Verbesserungen bestehender Regelstrategien die Zielsetzung "Optimierung des Jahresnutzungsgrades von Mehrkesselanlagen bei gleichzeitiger Minimierung der Abgasverluste und der Schalthäufigkeit" weiter zu verfolgen. Durch Auswertung des dynamischen Kesseltemperaturverlaufs bei bekanntem funktionalem Zusammenhang zwischen Kesselzeitkonstante T_K und Ersatztotzeit T_t vom Kesselmassenstrom können weiterhin Rückschlüsse auf den momentanen Kesselmassenstrom und durch indirekte Auswertung auf den momentanen Nutzungsgrad, ggf. auf die Verschmutzung von Kesselheizflächen gezogen werden.

Mikroprozessorgeregelte Systeme eröffnen die Möglichkeit, allein durch Auswertung der Einzelkesseltemperatur und ihres dynamischen Verlaufs eine optimierte Regelstrategie für Mehrkesselanlagen mit mehrstufigen Brennern ohne zusätzliche Messgrößen zu realisieren.

Die hier vorgestellten Berechnungsergebnisse sind ein erster Auszug der Vielzahl von möglichen Parametervariationen. Die Berechnungsgrundlagen sowie weitere Simulationsergebnisse als Basis für eine den Anlagen- und Betriebsverhältnissen angepasste Regelstrategie werden in einem zusammenfassenden Forschungsbericht zum Projekt "Optimierung von Mehrkesselanlagen" vorgestellt werden.

Literaturangaben

- [1] Voigt, M. ; D. Wolff: Optimierung von Mehrkesselanlagen. Gesundheitsingenieur, 112 (1991) Nr. 4, S. 173/81.
- [2] Schäfer, A.; in: Hydraulik und Regelung von Wassernetzen in Heizungs- und Klimaanlageanlagen. Lehrgang 1989, TA Esslingen.
- [3] Arzt, K: Diplomarbeit bei Prof. Beelte, FH Braunschweig-Wolfenbüttel, 1990.

Quelle: Originalmanuskript