

Aufbau, Planung, Betrieb und Regelung von Ein- und Mehrkesselanlagen

Dr.-Ing. Dieter Wolff ist Professor an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel im Institut für Heizungs- und Klimatechnik des Fachbereichs Versorgungstechnik, dem er seit 1993 als Dekan vorsteht. Die Schwerpunkte seiner Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegen im Bereich von Regelungs- und Einspartechnologien heiz- und energietechnischer Anlagen. Er ist ferner Mitglied und Obmann in VDI-Richtlinienausschüssen zu dieser Thematik sowie Vertreter der Wissenschaft im Lenkungsausschuß des NHRS-Fachbereichs 1 "Heiztechnik" (DIN).

Eine Chance, den Nutzungsgrad von Wärmeerzeugern zu verbessern und Schadstoffemissionen aus Feuerungen zu vermindern, besteht darin, durch strukturierte Planung aller Komponenten einer Heizungsanlage, vor allem des Wärmeerzeugers und der Hydraulik sowie durch Einsatz von Mikroprozessorreglern, eine optimierte Lösung zu erhalten.

Zur Erforschung der Abhängigkeiten zwischen dem dynamischen Verhalten einer Kesselanlage, der Regelung und der Hydraulik wurden an , der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel Untersuchungen im Rahmen eines Projektes "Optimierung von Mehrkesselanlagen" durchgeführt und Simulationsprogramme entwickelt. Ergebnisse zur Volumenstromverteilung zeigen, mit welchen Problemen Betreiber und Planer in der Praxis rechnen müssen.

Die Ergebnisse zur Schalzhäufigkeit und zum elektrischen Zusatzenergiebedarf für Pumpen 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.

Structure, planning, operating and control of single and multiple boiler plants

There is a possibility of improving the efficiency and of reducing the pollutant emissions from boilers by structured planning of all components in a heating plant, esp. the boiler plant, the hydraulic control and the use of microprocessor controls to get optimized solutions.

To investigate the dependencies of the dynamic behaviour of a boiler plant, the controls and the hydraulic control und analysis of the subject "Optimization of multiple boiler plant" and different simulation programs were developed at the Fachhochschule Braunschweig1Woffenbüttel. The results from the volumetric flow distribution indicate the problems that must be expected by operators and designers in practice.

The tests on the switching frequency and on the additional electric energy for pumps concentrated on assessing the effect of the dynamic parameters of boiler in relation to the downstream hydraulic control as well as the effects of the operating mode, the excess dimension and the volumetric flow distribution.

1. Einführung

Die Planung heiztechnischer Anlagen mit dem Schwerpunkt auf der Wärmeerzeugungsanlage hat viele sich gegenseitig beeinflussende Komponenten zu berücksichtigen. Erst die aufeinander abgestimmte Zusammenstellung der verschiedenen Komponenten ermöglicht eine näherungsweise optimale Lösung. Kurze Planungszeiten und die ansteigende Komplexität des Produktangebotes von Herstellern er-

schweren es dem Planer, eine angepasste und optimierte Auswahl der einzelnen Komponenten durchzuführen.

An der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Institut für Heizungs- und Klimatechnik, läuft seit 1988 ein Forschungsprojekt "Optimierung von Mehrkesselanlagen", das sich schwerpunktmäßig mit dieser Thematik befasst. Ziel ist die Erstellung eines rechnergestützten Planungsprogramms, mit dem die Auswahl heiztechnischer Komponenten unter dem Gesichtspunkt eines Gesamtoptimums erleichtert werden soll.

Hierfür müssen die wichtigsten Komponenten der Wärmeerzeugungsanlage, wie:

- die Wärmeerzeuger,
- der Energieträger (zunächst Beschränkung auf Gas und/oder Öl), die Art des Heizungssystems,
- die Hydraulik,
- die Regelung des Wärmeerzeugers und des Wärmeverteils- und Verbrauchernetzes sowie
- die Warmwasserbereitung und sonstige Wärmeverbraucher

als Bausteine in Unterprogrammen teilloptimiert werden. In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe eines wissensbasierten Beratungsprogramms nach bestimmten Regelsätzen diese Bausteine so zusammengestellt, dass ein teilloptimiertes Gesamtsystem erzielt wird. Dabei ist in jedem Fall davon auszugehen, dass mehrere Lösungen existieren und der Planer die "Management"-Aufgabe hat, aktiv in den Entscheidungsablauf des Programms einzugreifen.

Vorrangige Aufgabe des rechnergestützten Planungsprogramms - der Begriff "Expertenprogramm" erscheint zu weitgehend - ist die "Abarbeitung" einer Systematik, die weitgehend alle gegenseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Komponenten und ihrer Auslegungsregeln berücksichtigt.

Die wesentlichen Entscheidungen bei der Planung einer Ein- oder Mehrkesselanlage betreffen die Auswahl des Wärmeerzeugers, der zugeordneten Hydraulik und die Einstellung der Regelung. Diese Einzelkomponenten sind an vielen Schnittstellen voneinander abhängig. Die sich häufenden Betriebsmängel auch neuer, ausgeführter Anlagen zeigen deutlich auf, dass Wirkeinflüsse zwischen der Wärmeerzeugerwahl, der Hydraulik und der Regelung nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Eine optimierte Wärmeerzeugungsanlage ermöglicht hohe Jahresnutzungsgrade, auch unter Einbezug bisher nicht erfasster elektrischer Zusatzenergien, sowie die Verminderung der Emissionen, vor allem auch durch Reduzierung der Schalthäufigkeit einstufiger, zweistufiger oder modulierender Brenner.

Ziel des noch nicht abgeschlossenen Forschungsprojektes "Optimierung von Mehrkesselanlagen" ist, die wichtigsten Einflussparameter für die Wärmeerzeugerwahl, die Hydraulik und die Regelung nach Prioritäten zu ordnen und daraus erste allgemeingültige Regeln abzuleiten, die in eine Planung von Wärmeerzeugungsanlagen Eingang finden können. Die Untersuchungen dienen weiterhin dazu, verbesserte Regelverfahren für Ein- und Mehrkesselanlagen zu entwickeln. Die Arbeiten werden in einem Erfahrungsaustausch mit führenden Kessel- und Regelgeräte-Herstellern durchgeführt.

2. Wärmeerzeuger

Auswahl, Anordnung und Betrieb einer Wärmeerzeugerzentrale (Brenner, Kessel und Schornstein) bestimmen wesentlich die Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit einer Zentralheizung.

Nach den beiden Ölkrisen 1973 und 1978/79 wurde erkannt, dass die Abgas-, Strahlungs- und Bereitschaftsverluste der früher groß dimensionierten Wärmeerzeuger ein Hauptverursacher des zu hohen Brennstoffverbrauchs und der Emissionen sind. Basierend auf Untersuchungen von *Dittrich [1]* wurden die Betriebsbereitschaftsverluste aufgrund einer schlechten Wärmedämmung und aufgrund der inneren und durch den Schornsteinweg bedingten Auskühlung des Kessels sowie aufgrund der hohen mittleren Kesseltemperaturen und der hohen Kesselleistungen in den Mittelpunkt fast aller Betrachtungen gerückt.

Die Entwicklung von Niedertemperaturkesseln mit gleitender, der Außentemperatur angepasster Kesseltemperatur und stark verbesserter Wärmedämmung des Kesselkörpers sowie die Forderung nach reduzierter, dem Wärmebedarf angepasster Kesselleistung führten neben anderen Forderungen zu den Einzelbestimmungen der ersten Fassung der Heizungsanlagenverordnung. Vor allem die Forderung nach Anpassung der Wärmeerzeugerleistung an den Wärmebedarf zur Verminderung der Stillstandsverluste und die Beschränkung der maximalen Kesseltemperatur auf 75 °C hatte auch negative Effekte. Die reduzierte Kessel- und Feuerungsleistung führte zwangsläufig zu reduzierten Abgasmassenströmen mit starker Auskühlung und häufig auch zur Taupunktunterschreitung des Wasserdampfes der Rauchgase im Schornstein.

Die hohe Anzahl von mehreren hunderttausend, vom Schornsteinfegerhandwerk erfasster Fälle von Schornsteinversottungen seit Einführung des Niedertemperaturkessels und der Heizungsanlagenverordnung für die Modernisierung von Altanlagen sind das Resultat einer in ihren Auswirkungen nicht vollständig durchdachten Theorie zum Kesselnutzungsgrad und zur Bemessung der Wärmeerzeugerleistung. Die Begrenzung der Kesseltemperatur auf maximal 75 °C bei Niedertemperaturkesseln ist beim heutigen Stand der Technik nicht weiter sinnvoll und deshalb auch in der Neufassung der seit 1. Juni 1994 gültigen Heizungsanlagenverordnung für zukünftige Hochwirkungsgradkessel nach CE-Norm entfallen. Weiterhin ist für diese Kessel die Überdimensionierung der Wärmeerzeugerleistung gegenüber dem Normwärmebedarf erlaubt und in vielen Fällen auch sinnvoll.

Durch die Einführung der Niedertemperatur- und Brennwertkesseltechnik, zunächst im kleinen Leistungsbereich und dann auch für mittlere und größere Leistungen, haben sich Auslegungs- und Betriebsbedingungen wesentlich geändert. Brennwert-

Kessel nutzen im Gegensatz zu konventionellen (Standard-Kessel nach neuer CE-Norm) und Niedertemperaturkesseln zusätzlich die Kondensationswärme des Wasserdampfes im Rauchgas aus. Der Nutzungsgrad von Brennwertkesseln ist damit primär von den Heizwassertemperaturen abhängig. Weil in der Bundesrepublik Nutzungs- und Wirkungsgrade leider noch immer auf den unteren Heizwert (also ohne Ausnutzung der Kondensationswärme) bezogen werden, ergeben sich für Brennwertkessel Wirkungs- und Nutzungsgrade über 100 %.

Folgende Rahmenbedingungen bestimmen die Auslegung, den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit eines Kessels:

- oder Leistungsbereich, in dem der Kessel betrieben werden kann,
- der Abgastemperaturverlauf in Abhängigkeit von der Kesselwassertemperatur, der Belastung und der Brennerlaufzeit,
- der Druck-(Zug-)verlauf von Feuerung und Rauchgas,
- die Schadstoffemissionen bei unterschiedlichen Belastungen und in Abhängigkeit von der Schalzhäufigkeit (Anfahr- und Abschalt-Emissionen),
- das Vermeiden rauchgasseitiger Korrosion.

3. Nutzungsgrad von Wärmeerzeugern

Der Nutzungsgrad, als das Verhältnis von abgegebener Nutzwärme zur eingesetzten Feuerungswärme in einem definierten Zeitraum, ist nur sekundär eine Eigenschaft des Wärmeerzeugers. Er wird primär durch folgende Randbedingungen beeinflusst:

- die eingestellte Feuerungsleistung (Kesselbelastung) bezogen auf die Kessel-nennwärmeleistung; hierdurch werden primär die Abgasverluste beeinflusst,
- die Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems und die resultierenden Kesseltemperaturen. Der Einfluss der Rücklauftemperatur ist vor allem bei Brennwertkesseln von großer Bedeutung,
- die Kesselleistung bezogen auf den erforderlichen Wärmebedarf (Überdimensionierung),
- die Grenzbedingungen des angeschlossenen Schornsteins,
- die Konstruktion und der Wasserinhalt,
- die vom Kesselhersteller geforderten Betriebsbedingungen für den Kessel,
- die Art der Kesseltemperaturregelung.

Die durch *Dittrich [1]* eingeführte Nutzungsgradtheorie, die Ende der 70er, Anfang der 80er Jahre die Entwicklung der Heizungstechnik wesentlich und z. T. auch mit umstrittenen Schlussfolgerungen beeinflusst hat, berücksichtigt diese Randbedingungen nur teilweise.

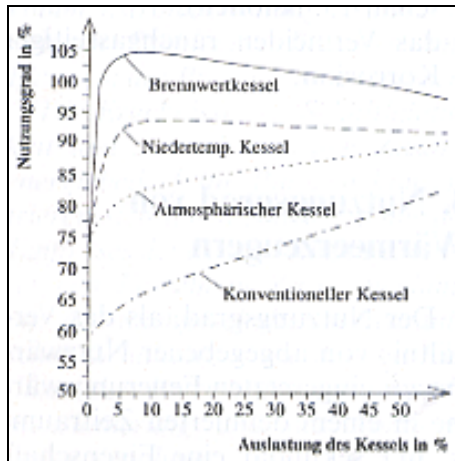


Bild 1: Nutzungsgrad in Abhängigkeit von der Kesselbelastung.

Die Nutzungsgradtheorie zeigt Vor- und Nachteile. Zum einen wird deutlich gemacht, dass Betriebsweise und Bauart eines Wärmeerzeugers wesentlich dessen Nutzungsgrad mitbestimmen (Bild 1). Zum anderen wird die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der gesamten Heizungsanlage bei alleiniger Konzentration auf den Nutzungsgrad vernachlässigt. Der elektrische Zusatzenergiebedarf für integrierte Komponenten wie Gebläseantrieb und Pumpenantrieb bleibt fast immer unberücksichtigt. Die Wechselbeziehungen zwischen Wärmeerzeuger und Schornstein, zwischen Wärmeerzeuger und Hydraulik sowie zwischen Wärmeerzeuger und Regelungsanlage werden z. T. außer acht gelassen [2; 3]. Die Einflüsse der Hydraulik und der Regelung werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

4. Hydraulik

Warmwasser- und Heißwasserheizungssysteme können grundsätzlich in drei Abschnitte gegliedert werden:

- Wärmeerzeugerteil,
- Verteilnetz und
- Verbraucherteil.

Im Wärmeerzeugerteil ergeben sich aus den Betriebsbedingungen für den eingesetzten Wärmeerzeuger Anforderungen an die hydraulischen Schaltungen und den Einsatz gegebenenfalls eigener Kesselkreispumpen. Dies trifft im besonderen für Heizkessel größerer Leistung sowie für Wärmeerzeuger mit Sonderfunktionen, wie z. B. nachgeschaltetem Abgaswärmeübertrager und bei Mehrkesselanlagen, zu.

Für das Verteilnetz haben sich in der Vergangenheit verschiedene Lösungen mit und ohne eigene Verteilnetzpumpen durchgesetzt. Hier ist zukünftig die Leistungsregelung der eingesetzten Schubpumpen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu prüfen.

Im Wärmeverbraucherteil können je nach Anschlussschaltung (Beimischschaltung, Doppelbeimischschaltung, Einspritzschaltung, drucklose Übergabe mit hydraulischem Entkoppler) unterschiedliche Bemessungsrichtlinien herangezogen werden.

Die Hydraulik einer geschlossenen Heizungsanlage kann in Analogie zur Elektrotechnik als Reihen und Parallelschaltung unterschiedlicher hydraulischer Widerstände analysiert werden [4]. Analog zum Ohmschen Gesetz der Elektrotechnik kann für die Hydraulik der Zusammenhang zwischen Druckabfall (Δp), Volumenstrom (V) und

hydraulischem Widerstand (C) für den Bereich der turbulenten Strömung angesetzt werden nach der Gleichung:

$$\Delta p = C \cdot V^2 .$$

Hydraulische Widerstände sind sowohl Rohrleitungen mit einem gegebenen Nenn-durchmesser und gegebener Länge, weiterhin Einzelwiderstände, wie Rohrbögen, Abzweigungen, Heizkörper, Kessel und anderes, sowie Regelorgane, wie Durchgangsregelventile oder Dreiwegeventile mit einem bestimmten k_{vs} -Wert.

Bei der Reihenschaltung hydraulischer Widerstände, beispielsweise in einer Einrohrheizung die Reihenschaltung der einzelnen Heizkörper, addieren sich die Druckverluste bei konstantem Volumenstrom. In der Parallelschaltung, typisch beispielsweise die Zweirohrheizung mit parallel geschalteten Heizkörpern, addieren sich bei gleicher Druckdifferenz über den parallel geschalteten Widerständen die Volumenströme.

Eine grundsätzliche Gliederung hydraulischer Schaltungen ergibt folgende Gruppen:

- hydraulische Schaltungsteile, bei denen die Volumenströme entsprechend der geforderten Leistung im Teillastgebiet verändert werden (Mengenregelung),
- hydraulische Schaltungen, bei denen durch Einsatz einer Pumpe die Volumenströme möglichst konstant gehalten werden, beispielsweise zur Vorlauf-temperaturregelung oder zur stetigen Rücklaufanhebung für Wärmeerzeuger,
- Schaltungen, bei denen Volumenströme unterschiedlicher Temperatur durch Einsatz von Beimischpumpen auf eine geforderte Solltemperatur gemischt werden.

Ein typisches Regelorgan in der Hydraulik von Heizungsanlagen ist das Dreiwegeventil. Dieses Dreiwegeventil kann in der Form als Mischventil (auch Mischhahn) oder Verteilventil eingesetzt werden.

Um den Volumenstrom auf der Wärmeerzeugerseite konstant zu halten, haben sich drei typische Grundschaltungen durchgesetzt:

- die Einhaltung eines Mindestvolumenstromes durch Einsatz einer Kesselbeimischpumpe,
- der Einsatz einer zentralen Kesselkreispumpe mit Übergabe an die Verbraucher über ein Überströmventil, häufig eingesetzte Lösung bei atmosphärischen Gaskesseln mit Anforderungen an einen Mindestdurchfluss,
- der Einsatz eines hydraulischen Entkopplers, durch den eine vollständige Entkopplung zwischen Wärmeerzeuger und Wärmeverteiler- bzw. Verbrauchernetz erfolgt.

Die in der Vergangenheit häufig eingesetzte sogenannte Einspritzschaltung vereinigt die Anforderungen an konstante Volumenströme sowohl auf der Wärmeerzeugerseite als auch im Wärmeverteilnetz. Aufgrund der erhöhten Anforderungen an den hydraulischen Abgleich (Anpassung der erforderlichen Volumenströme) wird die Einspritzschaltung in immer stärkerem Maße durch eine hydraulische Entkopplung ersetzt werden.

a) Kriterien und Anforderungen für hydraulische Grundschaltungen von Ein- und Mehrkesselanlagen

Mit der Zielsetzung eines umweltschonenden Betriebes und einer hohen Gesamtwirtschaftlichkeit haben sich die Anforderungen an die Hydraulik und den Wärmeerzeuger gegenüber früheren Anlagen deutlich erhöht.

Hierzu zählen:

- Schnell regelbare Feuerungen für Kessel mit z. T. kleinen Wasserinhalten und daraus resultierender hoher Aufheizgeschwindigkeit. Nach diesem Prinzip arbeitende Zwangsumlaufwärmeerzeuger sind häufig mit eigenen Kesselkreispumpen zur Aufrechterhaltung der Mindestvolumenströme ausgestattet, wobei die Übergabe an das Verteil- bzw. Verbrauchernetz häufig über ein Überströmventil erfolgt.
- Variable Wasservolumenströme durch Einsatz verschiedener Heizkreisregelungen und durch Einsatz von Thermostatventilen, die spezielle Anforderungen an die Hydraulik der Wärmeerzeugeranlage stellen: entweder Einsatz eines hydraulischen Entkopplers zur Aufrechterhaltung konstanter Volumenströme des Wärmeerzeugers oder Einsatz eines Wärmeerzeugers ohne Anforderungen an einen Mindestkesselwasserstrom; letzteres erfordert Kessel mit entsprechend kleinen Druckverlusten bzw. relativ großen Wasserinhalten.
- Häufige Betriebsunterbrechung mit Totalabschaltungen des Heizkessels in Heizpausen.
- Einsatz von Optimierungsschaltungen mit sehr langen Absenkezeiten und entsprechenden Aufheizvorgängen bei gleichzeitig ausgekühltem Heiznetz.
- Betrieb von Mehrkesselanlagen mit zweistufigen oder modulierenden Brennern, dies erfordert eine entsprechende Anpassung auf der Hydraulikseite durch Einsatz von jedem Kessel zugeordneten Einzelpumpen oder durch Einsatz drehzahl geregelter Pumpen.

In jedem Fall sind für die Funktion und Betriebssicherheit der gesamten Anlage die von den Herstellern geforderten Betriebsbedingungen einzuhalten. Hierbei haben sich für die ordnungsgemäße Funktion und den bestimmungsgemäßen Einsatz verschiedene Kriterien, die zu beachten sind, herauskristallisiert:

- Zulässige Temperatur des Heizkessels, Mindest- bzw. Maximaltemperatur.
- Minimale- bzw. maximale Volumenströme durch den Wärmeerzeuger, meistens angegeben durch eine der Kesselnennleistung zugeordnete Spreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur.
- Mindestrücklauf-temperaturen oder Mindestkesselwassertemperaturen, die durch entsprechende hydraulische Schaltungen einzuhalten sind.
- Mindestabgastemperaturen.
- Randbedingungen, die bei einer Totalabschaltung des Heizkessels und anschließender Wiederaufheizung einzuhalten sind.
- Mindestkesselleistung, die nicht unterschritten werden darf, um Taupunkt-korrosionen in konventionellen und Niedertemperaturkesseln zu vermeiden.

Die Gewichtung dieser einzelnen Anforderungen ist abhängig von der Konstruktion des Wärmeerzeugers und von seinen Anwendungs- und Einsatzmerkmalen.

b) Standardschaltungen für Mehrkesselanlagen

Eine Sammlung bevorzugt einzusetzender hydraulischer Schaltungen für Mehrkesselanlagen findet sich in den Bildern 2a-g.

Während in der Vergangenheit häufig sogenannte Kesselbeimischpumpen zur Rücklauf Temperaturerhöhung eingesetzt wurden, zeigen die Erfahrungen zum Einsatz von Hochwirkungsgradkesseln $> 100 \text{ kW}$, dass die hydraulische Entkopplung oder der Einsatz von Kesseln ohne Anforderung an einen Mindestvolumenstrom bessere Randbedingungen für die Auslegung der Hydraulik darstellen. Die Kesselbeimischpumpe erfordert das Befolgen einer komplexen Auslegungsprozedur beim Einsatz moderner Niedertemperaturwärmeerzeuger, die das Verständnis und den Planungsaufwand hydraulischer Schaltungen sehr erschwert. Nachweislich ist der Pumpenenergieaufwand beim Einsatz von Kesselbeimischpumpen höher als bei anderen hydraulischen Lösungen. Fehlzirkulationen, die in hydraulisch nicht entkoppelten Systemen häufig auftreten, werden durch nachträglichen Einbau von Rückschlagklappen nur unzureichend eliminiert. Das Abdrosseln von überschüssiger Pumpenergie durch Strangregulierventile oder durch Überströmventile stellt für zukünftige hydraulische Netze eine nicht optimierte Lösung dar. Der hydraulischen Entkopplung sowohl zwischen dem Wärmeerzeuger- und dem Wärmeverbraucherteil als auch bei ausgedehnten Netzen zwischen dem Wärmeverteilnetz und den Wärmeerzeuger- und Wärmeverbraucherkreisen kommt deshalb eine immer stärkere Bedeutung zu. Die hydraulische Entkopplung als nahezu druckverlustfreies Glied zwischen den Kreisen bekannt ist die Ausführung der senkrecht eingeordneten "hydraulischen Welche" - bewirkt, dass sich Stelleingriffe der Regelventile in einem Kreis nicht auf die Volumenströme in anderen Kreis auswirken.

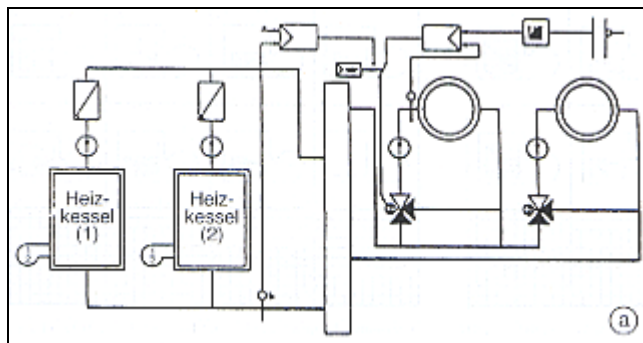


Bild 2a: Hydraulischer Entkoppler: Rücklaufanhebung durch Rückgriff auf Heizgruppenregelventile.

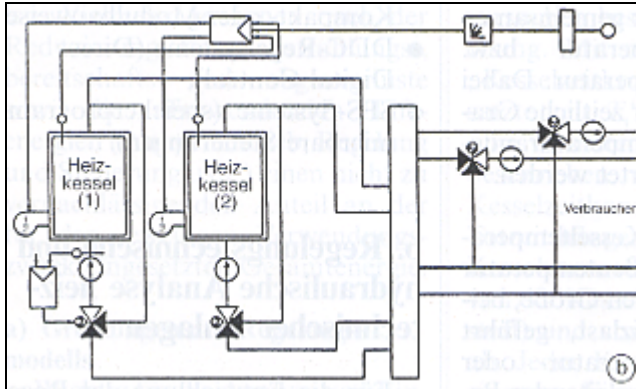


Bild 2b: Hydraulischer Entkoppler: Stetige Rücklaufanhebung je Kessel, lastabhängige Kessel- und Brennerfolgeregulation mit Kesseltemperaturfühler, gleitende Regelung der Kesseltemperatur nach der Außentemperatur.

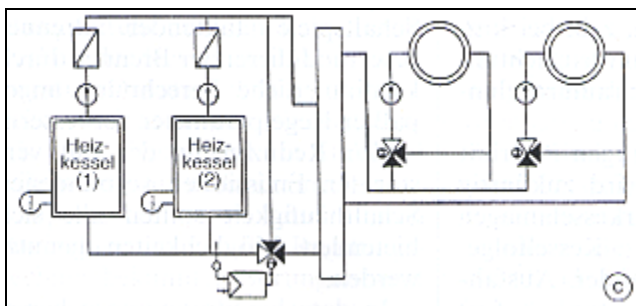


Bild 2c: Hydraulischer Entkoppler: Stetige Rücklaufanhebung mit gemeinsamem Stellorgan (Dreiwegmischventil).

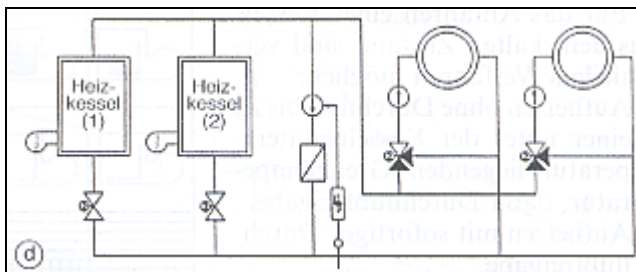


Bild 2d: Druckbehaffeter Verteiler: Rücklaufanhebung mit Kesselbeimischpumpe (bei Modernisierung bestehender Anlagen und Übernahme der Hydraulik).

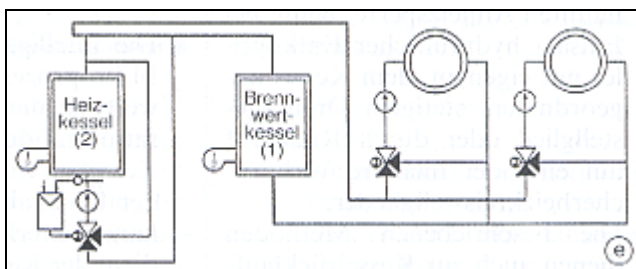


Bild 2e: Druckbehaffeter Verteiler: Brennwertkessel und konventioneller Kessel (mit eigener stetiger Rücklaufanhebung) in Serie geschaltet.

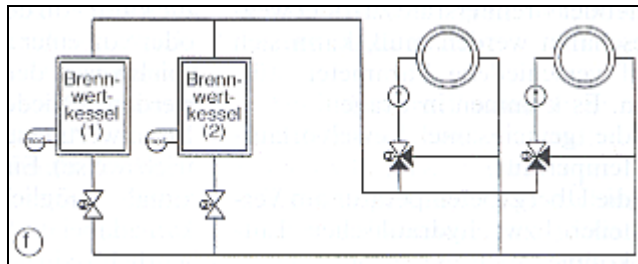


Bild 2f: Druckbehalteter Verteiler: Brennwertkessel ohne Rücklaufanhebung.

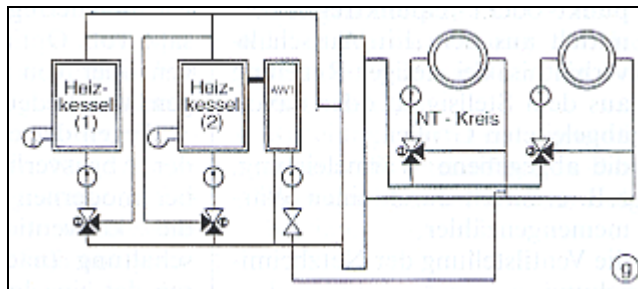


Bild 2g: Hydraulischer Entkoppler: Einbindung eines Kessels mit Abgaswärmetauscher.

5. Regelung des Anfahrens und der Stufenfolge von Mehrkesselanlagen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln mehrfach ausgeführt, können Regelung und Hydraulik speziell auf der Wärmeerzeugerseite nur als eine Einheit gesehen werden.

Die steuerungs- bzw. regelungstechnische Zu- und Abschaltung der Kessel- und Brennerstufen bei Ein- und Mehrkesselanlagen richtet sich wesentlich nach dem angeschlossenen Verteilnetz, den zugehörigen Verbrauchern und der Hydraulik auf der Wärmeerzeuger-, Wärmeverteil- und Wärmeverbraucherseite.

Für das Anfahren eines Kessels aus dem kalten Zustand sind verschiedene Verfahren möglich:

- Aufheizen ohne Durchfluss bis zu einer unter der Kesselnenntemperatur liegenden Grenztemperatur, dann Durchflussfreigabe.
- Aufheizen mit sofortiger Durchflussfreigabe.
- Aufheizen im internen Zirkulationsbetrieb, früher mit der bereits beschriebenen Kesselbeimischpumpe und einer sogenannten Anheizsperre, heute bei Einsatz hydraulischer Entkoppler mit eigenem, dem Kessel zugeordneten, stetigem Dreiwegestellglied oder durch Rückgriff auf ein oder mehrere Verbraucherheizkreisstellglieder.
- Die beschriebenen Methoden dienen auch zur Kesselrücklauf-temperatur-anhebung.

Die Entscheidung, ob eine Kessel- oder Brennerstufe zu- oder weggeschaltet werden muss, kann sich auf verschiedene Parameter stützen. Es kommen in Frage:

- die gemeinsame Kesselvorlauf-Temperatur,
- die Übergabetemperatur am Verteiler bzw. hydraulischen Entkoppler,
- die Rücklauf-Temperatur,

- die Außentemperatur,
- die Brennerbelastung, bei Zweipunkt- oder Dreipunktreglern ermittelt aus dem Ein/Ausschaltverhältnis, bei stetiger Regelung aus dem Stellsignal oder davon abgeleiteten Größen,
- die abgegebene Wärmeleistung, z.B. ermittelt durch einen Wärmemengenzähler,
- die Ventilstellung der Netzbeimischung.

Die zweckmäßigsten Lösungen werden dann erhalten, wenn von einem einzigen Parameter aus sowohl die Zu- als auch die Abschaltung der einzelnen Stufen erfolgt. Als besonders geeignet für eine Kesselfolgeschaltung sind dabei zu nennen:

- Die Gesamtwärmemenge aller Verbraucher oder ersatzweise das Brenner-Ein/Ausschaltverhältnis bzw. das stetige Ausgangssignal bei modulierenden Brennern.
- Die intelligente und mit einem Mikroprozessor mögliche Auswertung der Einzelkesseltemperatur und/oder der gemeinsamen Kesselvorlauftemperatur bzw. der Übergabetemperatur. Dabei kann weiterhin der zeitliche Gradient der Kesseltemperaturänderung mit ausgewertet werden.

Der Sollwert der Kesseltemperatur kann von der Außentemperatur oder von einer anderen Größe, beispielsweise der Heizlast, geführt werden (Niedertemperatur- oder Brennwertkessel mit gleitender Betriebsweise). Eine variable oder maximal mögliche Schaltdifferenz kann dabei die Schalthäufigkeit wesentlich reduzieren.

Bei größeren Anlagen ist die Möglichkeit der Kommunikation von Wärmeerzeuger- und Wärmeverbraucherregelung, z.B. bei Einsatz von Optimierungseinrichtungen oder von Einzelraumregelungen, von Bedeutung.

Wegen der eindeutigen Priorität der Abgasverluste wird zukünftig bei modernen Mehrkesselanlagen die konventionelle Kesselfolgeschaltung (nacheinander Ausfahren der einzelnen Leistungsstufen) durch einen weitgehenden Parallelbetrieb bei Kesseln mit zweistufigen und modulierenden Brennern ersetzt werden (Bild 3).

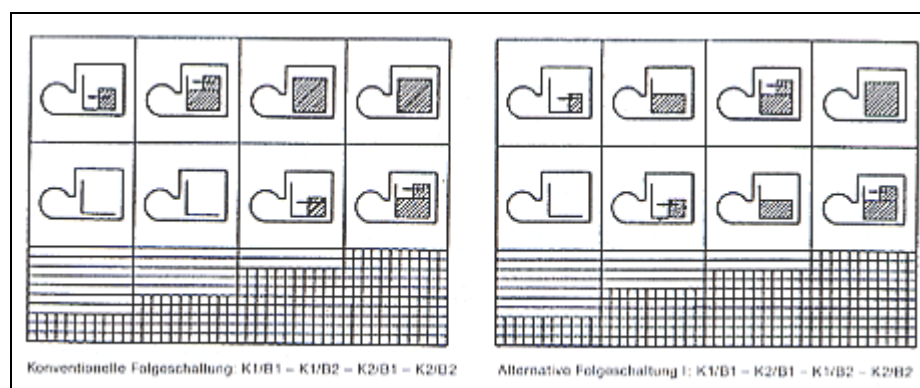


Bild 3: Konventionelle und alternative (parallele) Folgeschaltung von Mehrkesselanlagen.

Verschiedene Regel- und Steuerfunktionen für Mehrkesselanlagen werden zukünftig immer weniger durch konventionelle Analogregeltechnik bzw. durch eine Steuerungstechnik mit Schützen, Zeitrelais und ähnlichem erfüllt werden. Vielmehr werden sich auch hier durch Einzug der Mikroprozessortechnik festprogrammierte oder freiprogrammierbare Steuerungen und Regelungen durchsetzen:

- Mikroprozessorregelgeräte in Kompakt- oder Modulbauweise,
- DDC-Regelsysteme (Direct Digital Control),
- SPS-Systeme (speicherprogrammierbare Steuerungen).

6. Regelungstechnische und hydraulische Analyse heiztechnischer Anlagen

Für die Entwicklung der Regelung und Hydraulik von Ein- und Mehrkesselanlagen sind Konzepte durch den Einsatz von Mikroprozessorsystemen zu entwickeln, die kontinuierlich den Nutzungsgrad aus Betriebsdaten berechnen und adoptierend optimieren sowie die Schaltspiele taktender Brenner bzw. modulierender Brenner durch kontinuierliche Berechnung angepasster Regelparameter verbessern. Zur Reduzierung der mit verstärkten Emissionen verbundenen Schalthäufigkeit sollten alle sich bietenden Möglichkeiten genutzt werden.

In dem bereits angesprochenen Forschungsprojekt "Optimierung von Mehrkesselanlagen" werden neben der Untersuchung und Analyse des Betriebes bestehender Anlagen und neben Labormessungen an einer Versuchsmehrkesselanlage Simulationsmodelle entwickelt, die das dynamische Verhalten von Kesseln (Betrieb) und der angeschlossenen Hydraulik beschreiben. Die vorrangige Aufgabe der Untersuchungen besteht darin, die Wertigkeit der einflussnehmenden Parameter, wie z. B.:

- Kesselkonstruktion,
- Wasserinhalt,
- ein- oder mehrschalige Bauweise,
- eingesetzte Werkstoffe,
- Kesselbetriebsweise,
- Kesselvolumenströme,
- Kesseltemperaturregelung,
- Schaltdifferenzen der Brenner,
- Kessel- und Anlagenleistung (Überdimensionierung)

zu ermitteln, um daraus entsprechende Regeln für die Planung und Regelung abzuleiten. Die Ergebnisse zeigen, dass es nicht mehr ausreicht, die Heizungsanlage nur nach dem rein thermischen Nutzungsgrad der Kesselanlage zu beurteilen. Vielmehr gewinnen nach der Reduzierung Kesselabstrahlungs-, Bereitschafts- und -abgasverluste sowie die aufzuwendenden Hilfsenergien (Pumpenantrieb, Regelung und Steuerung usw.) einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der für den jeweiligen Verwendungszweck eingesetzten Gesamtenergie.

a) Grundlagen des Regelungsmodells

Wichtig für die Analyse von Ein- und Mehrkesselanlagen ist die Kenntnis der Regelstrecke "Wärmeerzeuger". Bei dem intermittierenden Betrieb eines Brenners an einem Kessel handelt es sich um ein dynamisches Verhalten mit in stationären Vorgängen für die Leistungszufuhr und den Temperaturverlauf der Kessel- und Abgastemperatur. Das statische und dynamische Verhalten der Regelstrecke "Kessel", beginnend am Stellglied "Brenner" und endend am "Kesseltemperaturfühler", kann durch Aufnahme einer in der Regelungstechnik bekannten Sprungantwort bestimmt und ausgewertet werden. Die Sprungantwort zeigt proportionales Verhalten höherer

Ordnung mit vom Kesselwasserstrom abhängigen Verstärkungsfaktor K_{PS} bzw. Regelbereich X_{HS} . Ohne Kesselwasserdurchfluss zeigt die Kesseltemperaturregelstrecke integrales Verhalten.

Bekannt ist, dass proportionale Regelstrecken höherer Ordnung (mit Kesselwasserdurchfluss) in guter Näherung durch Regelstrecken erster Ordnung mit Totzeit ($P-T_1-T_t$) ersetzt werden können. Die Überprüfung in Labor- und Feldversuchen bestätigt diese Vereinfachung. Mit nur zwei Parametern "Kesselzeitkonstante T_K " und "Ersatztotzeit T_t " kann das dynamische Verhalten des Kessels sehr gut beschrieben werden. Sowohl die Kesselzeitkonstante als auch die Totzeit hängen wesentlich von dem Kesselwasserdurchfluss, als auch von der Kesselkonstruktion (Werkstoff) und vom Kesselwasserinhalt ab. Jeder Kessel hat damit seinen eigenen "Fingerabdruck".

Gerade die Streubreite der heute am Markt angebotenen Kesselkonstruktionen in Hinsicht auf Speichermasse, Wasserinhalt und Brennerausführung kann mit diesem einfachen Regelmodell sehr gut analysiert und bewertet werden. Damit ist die Spannbreite zwischen Gasumlaufwasserheizer über Spezialgaskessel mit atmosphärischen Brennern und geringem Wasserinhalt in Gussausführung oder größerem Wasserinhalt in Stahl- bzw. Edelstahlausführung sowie mehrschaliger Heizflächen in Kesseln mit Öl oder Gas einfach analysierbar. Bild 4 zeigt als Beispiel den Verlauf der dynamischen Parameter eines dynamisch "trägen" und eines dynamisch "schnellen" Kessels.

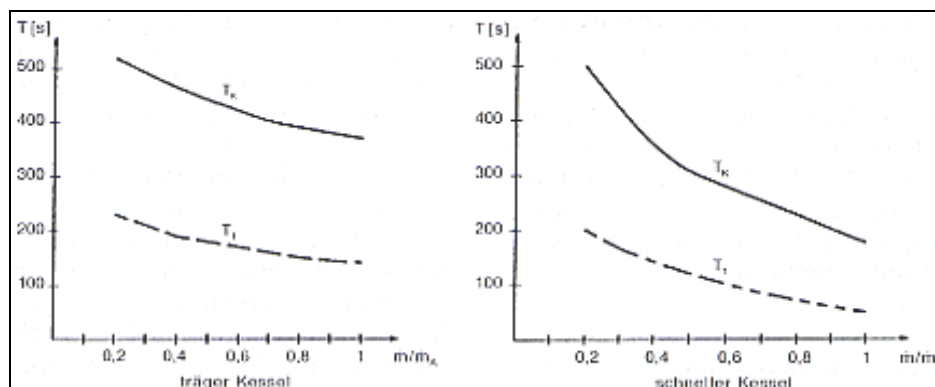


Bild 4: Verlauf der dynamischen Parameter eines dynamisch "trägen" und eines dynamisch "schnellen" Kessels, T_K Kesselzeitkonstante, T_t Ersatztotzeit.

b) Ergebnisse des Simulationsprogramms

Mit den im Institut für Heizungs- und Klimatechnik an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel entwickelten Simulationsprogrammen wurden Variationsrechnungen zu folgenden Aufgabenstellungen durchgeführt:

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

Veränderbare Parameter in den Simulationsrechnungen sind:

- die hydraulische Schaltung,
- Kesseltypen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten und unterschiedlicher Temperaturbetriebsweise (Konstant-, Niedertemperatur- und Brennwertkessel),
- Leistungsaufteilung der Kessel- und Brennerstufen,
- Überdimensionierung der Kesselleistung hinsichtlich des Wärmebedarfs,
- Regelung der Leistungsstufenfolge, z. B. Variationen in Parallel- oder konventionellem Folgebetrieb.

Ergebnisse der Simulationsberechnungen, die durch Messungen an Feldanlagen bestätigt wurden, sollen hier nur ausschnittsweise wiedergegeben werden.

Hydraulische Schaltung

Bei Einsatz von Kesselbeimischpumpen mit druckbehaftetem Sammler-Verteiler ergeben sich sowohl auf der Kessel- als auch auf der Verbraucherseite starke Volumenstromänderungen, wenn die Kesselbeimischpumpe in Betrieb geht.

Bei Einsatz differenzdruckarmer hydraulischer Entkopplung verlaufen die Volumenströme im gesamten Teillastbereich konstant, was sich positiv auf die Regelgüte der Primär- und Sekundärvorlauftertemperaturregelung auswirkt. Schaltungen mit Kesselbeimischpumpen weisen einen höheren Pumpenenergieverbrauch auf.

Kesselkonstruktionen

Die Kesselkonstruktion hat wesentlichen Einfluss auf die Jahresschaltheufigkeit, die bei Kesseln mit großem Speicher- und Wasserinhalt sehr viel niedriger als bei Kesseln mit geringem Wasserinhalt liegt. Vor allem bei Kesseln mit geringem Wasserinhalt und Zwangsumlauf vermindert der hydraulische Entkoppler die Schaltheufigkeit und wirkt sich deshalb positiv aus.

Leistungsstufenfolge

Wesentlichen Einfluss auf die Jahresschaltheufigkeit hat die unterschiedliche Leistungsstufenfolge. Der parallele Folgebetrieb mit Zuschaltung der jeweils ersten Brennerstufen hat bei einer typischen Leistungsaufteilung positive Auswirkungen auf die Schaltheufigkeit und auf den Jahresnutzungsgrad.

Kesseldimensionierung

Die Kesseldimensionierung, das heißt die Wahl der Kesselleistung bezogen auf den Heizwärmebedarf, hat ebenfalls Einfluss auf die Schaltheufigkeit. Bei begrenzter Überdimensionierung um bis zu 50 % sinkt die Schaltheufigkeit bei typischer Leistungsstufenfolge zweistufiger Brenner.

Kesselvolumenstrom und Einsatz variabler Schaltdifferenzen

Durch Reduzierung des Kesselwasservolumenstromes und damit verbundener Erhöhung der Auslegungsspreizung für den Kessel kann sowohl der Energieaufwand für die Kesselkreispumpen drastisch gesenkt werden als auch, bei gleichzeitiger Erhöhung der Schaltdifferenz, die Schaltheufigkeit drastisch reduziert werden. Eine variable Schaltdifferenz kann im Extremfall auf eine variable, beispielsweise nach der Außentemperatur geführte Einschalttemperatur und eine konstant hohe Ausschalttemperatur reduziert werden. Notwendig ist bei dieser Betriebsart natürlich eine nachgeschaltete Mischerregelung, wie sie in größeren Anlagen Standard ist. Simula-

tionsberechnungen und Veröffentlichungen anderer Quellen zeigen eine drastische Reduzierung der Schalthäufigkeit auf Werte von nur noch 20 bis 25 % der ursprünglichen Schalthäufigkeit.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Chance, Schadstoffemissionen und Energieverbrauch von Heizungsanlagen durch den Einsatz moderner Planungsmethoden und angepasster Regelverfahren zu reduzieren, sollte konsequent genutzt werden. Rechnerunterstützte Planungsverfahren und mikroprozessorgestützte Regelsysteme eröffnen die Möglichkeit, die Vielzahl möglicher Parametervariationen zu erfassen und zu strukturieren. Hieraus abgeleitete Regeln können dazu dienen, für zukünftige Wärmeherzeugungsanlagen verbesserte Randbedingungen herzustellen.

Für weitere Anregungen aus dem Bereich der Planung, des ausführenden Handwerks und der Hersteller ist der Verfasser jederzeit dankbar.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff
Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel
Institut für Heizungs- und Klimatechnik
Salzdahlumer Str. 46/48
38302 Wolfenbüttel
Tel.: 05346-1088 (auch FAX).

Literatur

- [1] Dittrich, A.: Zum Jahresnutzungsgrad von Ein- und Mehrkesselanlagen. HLH 23, (1972), Nr. 12, S. 381-386.
- [2] Andreas, U., Winter, A. und Wolff, D.: Regelung heiztechnischer Anlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1985.
- [3] Winter, A., und Wolff, D.: Regelung und Wärmeherzeuger. HLH 36 (1985) 3, S. 120-129.
- [4] Roos, H.: Hydraulik der Wasserheizung. Oldenbourg Verlag, München Wien 1994.

Quelle: Originalmanuskript