

Optimierung von getaktet
beheizten Kesseln zur
Erzeugung von Warmwasser
der Heizungstechnik

Prof.em.Dr.-Ing.Dr.Ing.Eh.Rudolf Jeschar

Erstellt für die Moon-Power

96364 Marktrodach,Schlot 3

Kapitel 12

Zusammenfassung

Ausgabe Mai 2009

12. Zusammenfassung

Gegenstand dieser Untersuchung ist die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Berechnung und Beurteilung getaktet beheizter Kessel zur Erzeugung von Warmwasser für die Beheizung von Wohnhäusern und Verwaltungsgebäuden sowie zur Erzeugung von Prozesswärme. Anwendbar ist dieses Modell in gleicher Weise auch auf Apparate zur Erwärmung von Thermalölen in Industriebetrieben.

Ausgelöst wurde diese Untersuchung durch Berichte aus der Praxis, dass etwa 10 bis 20 % des auf die Nutzwärme bezogenen Energiebedarfs eingespart werden könnten, wenn man in das Flammrohr dieser Kessel einen Wärmespeicher aus Metall oder Feuerfestkeramik einbaut. Da vonseiten der Lieferfirmen solcher Speicher keine eindeutige Erklärung für diesen Erfolg abgegeben werden konnte und Fachleute der Heizungsbranche diese Wirkung bestritten oder auf eine Verstellung der Brennerleistung in der Heizzeit zurückführten, wurde der Autor dieses Berichtes von dritter Seite um ein entsprechendes Gutachten gebeten.

Bereits nach einer Teilnahme an etwa 30 Umstellungen konnte der Gutachter bestätigen, dass die von den Lieferfirmen solcher Speicher angegebenen Energieeinsparungen für mehr als 90 % aller umgestellten Kessel zutreffend sind. Als Mittelwert möchte jedoch der Gutachter 10 bis 20 % angeben. Kleinere und größere Werte werden selten erreicht. Stets wurde vom Gutachter darauf geachtet, dass die Grundeinstellung der Brennstoffzufuhr nicht geändert wurde.

In der Zwischenzeit sind dem Gutachter die Werte von etwa weiteren 50 umgestellten Anlagen bekannt geworden, bei denen ebenfalls Energieeinsparungen in dem genannten Bereich erzielt wurden. Auffallend war, dass die Höhe der jeweils erreichten Energieeinsparungen weitgehend unabhängig von der Art der Fabrikate

sowie von der Größe der Kessel war, und zwar von den kleinsten Baugrößen mit Leistungen von wenigen kW bis hin zu Anlagen mit

einer Leistung von mehreren MW. Es war deshalb die Vermutung erlaubt, dass es sich um eine Art Strukturfehler handeln muss, der stets in gleicher Weise wirksam ist.

Eine eindeutige Zuordnung der erzielten Energieeinsparungen zu bestimmten Gliedern der stets aufgestellten Energiebilanzen war auch für den Gutachter anfangs nicht zu erkennen. Eindeutig war jedoch, dass die jeweilige Brennerleistung nur geringfügig die erzielten Einsparungen beeinflussen kann, da diese Größe stets unverändert gelassen wurde. Aufgrund dieses Ergebnisses war es erforderlich, die Theorie dieser Apparategruppe vollständig neu zu entwickeln. Nach fast zwei Jahren kann nunmehr das Ergebnis dieser Untersuchung vorgelegt werden. Verbesserungen dieses Modells sind noch in relativ geringem Umfang erforderlich. Dazu sind ergänzende experimentelle Untersuchungen an einigen Kesseln durchzuführen.

Ausgegangen wurde für die Entwicklung eines Modells zur Berechnung von getaktet beheizten Kesseln von den maßgebenden Energiebilanzen für den gesamten Prozess sowie für die beiden Teilzeiten Heizen und Kühlen. Es ist das Merkmal von Kesseln der Heizungstechnik, dass diese Geräte sowohl kurzfristig als auch langfristig mit größeren Lastschwankungen betrieben werden. Als kurzfristige Schwankungen sind die Nachtabsenkungen sowie die Spitzenverbräuche zur Mittagszeit zu nennen und als langfristige Schwankungen die unterschiedlichen Wärmeleistungen abhängig von den veränderlichen Außentemperaturen z.B. über die Jahreszeiten. Da hiermit erhebliche Änderungen für den spezifischen Energiebedarf B/N verbunden sind, erschien es sinnvoll, für alle Einflussgrößen als Bezugsgröße die maximale Kesselleistung N_{max} einzuführen. Es entsteht auf diese Weise die Größe N/N_{max} , die sich als die wichtigste Einflussgröße für fast alle übrigen Größen wie z.B. den spezifischen Energiebedarf B/N , den Gesamtwirkungsgrad,

die relative Energieeinsparung E sowie die noch zu beschreibenden zusätzlichen Verlustgrößen herausgestellt hat. Beispielsweise folgt hieraus, dass die Wandverluste bei $N/N_{max} = 1$ durchaus als hinreichend klein angesehen werden können, was jedoch für Werte von

z.B. $N/N_{\max} = 0,3 - 0,4$, die für die meisten Kessel dem Jahresmittel entsprechen, durchaus nicht der Fall ist. Nur der sogenannte Feuerungstechnische Wirkungsgrad ist weitgehend von N/N_{\max} unabhängig und kann in der Regel für einen bestimmten Kessel näherungsweise als Konstante angesehen werden. Die Größe wird bekanntlich außer den betreffenden Analysewerten mit den regelmäßigen Überprüfungen durch die Schornsteinfeger ermittelt.

Wegen der Bedeutung der Größe N/N_{\max} wird diese Kennzahl im Rahmen dieser Arbeit als relative „Kesselauslastung“ bezeichnet. Die hier verwendete Definition darf jedoch nicht mit dem Verhältnis „Zahl der jährlichen Betriebstage eines Kessels zur Zahl der jährlichen Kalendertage“ verwechselt werden. Dieses Verhältnis wird im Fachschrifttum ebenfalls als Kesselauslastung bezeichnet. Da diese Bezeichnung begrifflich besser zu dem hier definierten Verhältnis N/N_{\max} passt, sollte die bisherige Definition umbenannt werden.

Man erhält schließlich mit dieser Darstellung einen vollständigen Satz von Kenngrößen, so dass die Ergebnisse, die z.B. an einer kleinen Versuchsanlage gemessen wurden, in weiten Grenzen auf wesentlich größere Betriebsanlagen übertragen werden können. Der vorgelegte Bericht kann somit als ein Beitrag zur Theorie der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Technikumsversuchen auf die Praxis angesehen werden.

Die Auswertung der theoretischen Beziehungen hat nun ergeben, dass es außer dem Abgasverlust sowie dem Wandverlust mindestens zwei weitere Verlustquellen geben muss, und zwar eine Verlustquelle in der Heizzeit und eine zweite in der Kühlzeit. Eine dritte mögliche Verlustquelle für den Zündvorgang zu Beginn der Heizzeit aufgrund eines kurzzeitigen Ausstoßes unverbrannter Gasbestandteile hat sich nach einer Abschätzung als gering erwiesen, so dass diese Verlustquelle im Vergleich zu den beiden vorgenannten Verlustquellen vernachlässigt werden kann. Die nähere Analyse dieses Gleichungssystems hat schließlich ergeben, dass bezogen auf die Summe dieser beiden Verluste etwa 70 bis 80 % in der Heizzeit verursacht werden und entsprechend 20 bis 30 % in der Kühlzeit.

Die Suche nach den Ursachen dieser Verluste ergab schließlich, dass der überwiegende Teil dieser Verluste durch die Kondensatbildung von

Wasser auf der Innenseite der äußeren Blechverkleidung sowie der anschließenden Wiederverdampfung im Innern des Kessels gegeben ist.

Ausgelöst wird diese Kondensation durch die Art des Wandaufbaus, wie er in ähnlicher Form bei den meisten der in der Praxis vorhandenen Kesseln anzutreffen ist.

Ebenso wie bei den Industrieöfen sowie ähnlichen brennstoffbeheizten Apparaten wurde offensichtlich auch im Kesselbau übersehen, dass die üblichen Innenisolierungen z.B. aus gemauerten feuerfesten Wänden oder Isoliermatten nicht gasdicht sind. Aufgrund der Unterschiede des Auftriebes im heißen Innenraum und dem kälteren Spalt zwischen äußerer Blechwand und sich anschließender Isolierwand bildet sich eine Zirkulationsströmung heißer Verbrennungsgase derart aus, dass im oberen Bereich Gas zur Blechwand strömt und unten wieder zurück in den Innenraum gelangt. An der Wand selbst kondensiert das Wasser des Verbrennungsgases, wobei die freigesetzte Wärme nach außen abgeführt wird. Im unteren Wandbereich fließt auch das Wasser zurück in den Gasraum und wird dort erneut verdampft. Verbunden ist damit ein entsprechender Energieverlust. Dies ist der Grund, warum sich bei zahlreichen brennstoffbeheizten Anlagen entsprechend der Höhe des Taupunktes der Verbrennungsgase eine von unten nach oben steigende Temperatur der Außenwände etwa von 40 bis 60 °C ausbildet.

Bei Industrieöfen sind die Temperaturen der Außenwände meist höher. Sie steigen jedoch ebenfalls von unten nach oben an. Bei entsprechender Zusammensetzung der Verbrennungsgase kann es bei den Industrieöfen zur Kondensation von Säuren kommen, was zu erheblichen Schäden an den Ofengefäßen führen kann. Bei den Kesseln der Heizungstechnik führt die Kondensation von Wasser nicht nur zu zusätzlichen Energieverlusten in der Heizzeit, sondern auch in der Kühlzeit.

In der Kühlzeit wird der entsprechende zusätzliche Verlust primär durch den Luftstrom ausgelöst, der in diesem Zeitabschnitt gewollt oder ungewollt durch den Kessel strömt, sich dort erwärmt und mit einer

entsprechend erhöhten Temperatur über den Kamin abgeführt wird. Zu beachten ist jedoch, dass die Menge dieser Luft wesentlich kleiner sein muss als die Menge der Verbrennungsluft für die Heizzeit, da diese über Gebläse gefordert wird, während die Luft der Kühlzeit nur vom Kaminzug abhängt. Demzufolge müsste eigentlich dieser Verlust sehr gering sein. Zu berücksichtigen ist aber, dass die in der Kühlzeit durch den Kessel strömende Luft nicht nur erwärmt wird, sondern zusätzlich Wasserdampf aufnimmt, der in der Heizzeit als Kondensat von einem Teil der porösen Isolierung in flüssiger Form eingelagert wurde. Die Luft der Kühlzeit trocknet also die mit Wasser durchtränkte Isolierung und erhöht damit den zusätzlichen Energieverlust in diesem Zeitabschnitt. Durch stichpunktartige Feuchtemessungen im Abgasstutzen wurde nachgewiesen, dass diese Luft beim Verlassen des Kessels eine im Vergleich zur Umgebungsluft wesentlich erhöhte relative Feuchte aufwies. Systematische Messungen der Menge, der Temperatur sowie der relativen Feuchte dieser Luft konnten jedoch noch nicht durchgeführt werden. Der zusätzliche Verlust in der Kühlzeit musste deshalb geschätzt werden. Wesentliche Fehler in Bezug auf die Gesamtbeurteilung der Kessel entstehen dadurch nicht, da der Verlust der Heizzeit um ein Mehrfaches größer ist als der Verlust der Kühlzeit und der Gesamtverlust als Restglied aus der Energiebilanz bestimmt wurde.

Im Folgenden wurde die Wirkung der Wärmespeicher des Kessels untersucht. Der Betrieb mit getakteter Beheizung setzt voraus, dass der Kessel eine bestimmte Speicherfähigkeit für Wärme aufweist, da in der Kühlzeit der Energiebedarf allein von der im Speicher vorhandenen Energie gedeckt werden muss. Der Speicher ist mit einem Teil des im Kessel vorhandenen Wassers gegeben, dessen Temperatur sich in der Kühlzeit entsprechend absenkt und anschließend in der Heizzeit wieder aufgeheizt wird. Die dabei durchlaufende Temperaturänderung liegt in der Größenordnung von 10 bis 20°C. Nach dem obigen Gleichungssystem wird mit dieser Temperaturänderung das Zeitverhalten von Heizen und Kühlen bestimmt. Nach den maßgebenden Beziehungen ist der Zusammenhang zwischen der im Wasser gespeicherten Energie und den Längen der beiden Taktzeiten linear.

Weitergehende Abhängigkeiten sind mit dem obigen Gleichungssystem nicht gegeben. Würde man die als Speicher wirksame Wassermenge durch eine geeignete Maßnahme erhöhen, so würden sich lediglich die Taktzeiten entsprechend verlängern. Eine merkliche Energieeinsparung wäre damit nicht verbunden.

Wird anstatt der Vergrößerung des Wasserspeichers ein zusätzlicher Speicher z.B. aus Feuerfestkeramik in das Flammrohr des Kessels eingesetzt, werden die Taktzeiten in gleicher Weise verlängert wie bei einer gedachten Vergrößerung des Wasserspeichers. Hinweise für eine mögliche Energieeinsparung sind aus dem Gleichungssystem ebenfalls nicht zu erkennen.

Aus Betriebsversuchen ergibt sich aber, dass in diesem Fall gleichzeitig eine erhebliche Energieeinsparung erreicht wird. Erst nach einer entsprechenden Erweiterung des mathematischen Modells war zu erkennen, dass eine Nebenwirkung der Keramikspeicher eine Energieeinsparung ermöglicht. Dieser offensichtlich nicht leicht zu übersehende Einfluss mag der Grund sein, warum die mit einem solchen Speicher stets erreichte Energieeinsparung von einer größeren Zahl von Fachleuten bestritten wird.

Es ist aber zu berücksichtigen, dass bei Einbau eines sogenannten Hochtemperaturwärmespeichers die Temperatur im Gasraum während der Kühlzeit um mehrere hundert Grad angehoben wird. Aus den maßgebenden Strömungsgesetzen folgt hieraus, dass mit diesem Temperaturanstieg eine Verringerung der vom Kamin in der Kühlzeit angesaugten Luftmenge verbunden ist. Sie wird etwa halbiert. In entsprechender Weise wird der Verlustwert für die Kühlzeit vermindert. Zur Unterscheidung der beiden Speicher wird der Wasserspeicher als

„Niedrigtemperaturwärmespeicher“ (LTS) und der

Keramikspeicher im Flammrohr als

„Hochtemperaturwärmespeicher“ (HTS)

bezeichnet.

In entsprechender Weise werden mit dem Einbau eines HTS durch dessen Nebenwirkung auch die Verluste der Heizzeit vermindert. Die je

Zeiteinheit gebildete Kondensatmenge wird von der je Zeiteinheit durch die poröse Isolierschicht strömende Gasmenge bestimmt. Hierfür gilt eine entsprechende Gleichung für die Durchströmung von Kanälen mit geringem Durchmesser. Diese Strömung ist im Unterschied zu der Strömung in den Gaskanälen laminar. Es folgt hieraus, dass die durch die Isolierung strömende Gasmenge linear mit der absoluten Temperatur abnimmt. Entsprechendes gilt auch für die Austrocknung der Wände während der Kühlzeit. Da durch die Wirkung der HTS die Temperatur der Wand ansteigt, gelangt weniger Gas in den Spalt hinter der äußeren Blechverkleidung, so dass die kondensierte Wassermenge abnimmt. Verbunden ist damit eine Verringerung des zusätzlichen Verlustes sowohl in der Heizzeit, als auch in der Kühlzeit. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass nach den bisherigen Versuchen mit dem Einbau eines HTS eine Energieeinsparung in der Größenordnung von 10 bis 20 % erreicht wird.

Aus den oben geschilderten Zusammenhängen folgt schließlich, dass die zusätzlichen Verluste, und zwar sowohl die Verluste der Heizzeit als auch der Kühlzeit allein von der Kondensatbildung von Wasser der Verbrennungsgase während der Heizzeit ausgelöst werden. Würde man die bisher in der Mehrzahl aller alten Kessel vorhandenen gasdurchlässigen Wandisolierungen durch eine entsprechende verbesserte Isoliertechnik ersetzen, müssten nach den obigen Untersuchungen die bisher festzustellenden zusätzlichen Verluste vollständig verschwinden. Mit zusätzlich in die Kessel eingebauten Hochtemperaturwärmespeichern (HTS) ließen sich dann nur noch die Teilzeiten Heizen und Kühlen verlängern. Eine Energieeinsparung wäre damit nicht mehr zu erreichen. In einem besonderen Abschnitt dieser Untersuchung wird dargestellt, wie eine solche kondensatfreie Wandisolierung aufzubauen ist. Mit einer solchen verbesserten Isolierung könnte durchaus eine Energieeinsparung in der Größenordnung von etwa 25 % erreicht werden.

Zu ergänzen ist schließlich, dass bei Vermeidung aller Verlustquellen der Einfluss der oben genannten Kesselauslastung N/N_{max} unwirksam wird. Die Kessel würden damit weitgehend unempfindlich in Bezug auf

die in der Heizungstechnik unvermeidlichen Lastschwankungen werden. Vermieden würden damit auch die mit den Jahreszeiten stark schwankenden Werte für den spezifischen Energiebedarf.

Zum Abschluss dieses Berichtes wurde zusätzlich der Einfluss der Brennwerttechnik untersucht. Es ergibt sich, dass mit der Brennwerttechnik der spezifische Energiebedarf zusätzlich um maximal 10 % abgesenkt werden kann. Das maximale Einsparpotential liegt demnach in der Größenordnung von etwa 40 %, das sich jedoch nicht vollständig nutzen lässt. Vonseiten der Industrie wird angegeben, dass mit der neuen Kesselgeneration Einsparungen von etwa 30 % zu erwarten sind. Diese Angabe entspricht den Ergebnissen dieses Berichtes.

Sicherlich wird es aus verschiedenen Gründen nicht möglich sein, mehrere Millionen Kessel in kürzester Zeit auszutauschen. Aus diesen Gründen bietet sich als Übergangslösung an, mit relativ geringem Kostenaufwand einen Teil der Kessel mit HTS sowie gegebenenfalls mit einer zusätzlichen Außenisolierung der Wände auszurüsten. Durch diese beiden Maßnahmen wären Energieeinsparungen von 15 bis 25 % möglich. Die Nutzung der HTS-Technik allein führt immerhin zu einer Energieeinsparung in der Größenordnung von 10 - 20 %.

Abschließend sei noch ergänzt, dass man größere Wohnsiedlungen sicherlich über zentrale Heizwerke mit geringeren Energieverlusten versorgen kann, weil in solchen Betrieben die notwendige Reservehaltung weniger verlustbehaftet durchzuführen ist als dies über die übliche Einzelversorgung möglich ist. Außerdem können zentrale Heizwerke als Kombikraftwerke mit gleichzeitiger Stromversorgung betrieben werden. Schließlich können zentrale Heizwerke relativ einfach mit Ersatzbrennstoffen beheizt werden.

Zum Schluss dieser Untersuchung wird es für notwendig gehalten, auf eine Publikation von **R. Hirschberg** mit dem Titel „Energieeinsparung durch Zusatzkomponenten an Wärmeerzeugern?“, „Wärme- und Versorgungstechnik“, 11/2001, einzugehen. Der Autor kommt in dieser Arbeit u.a. zu dem Schluss, dass zusätzlich in die Kessel eingebaute

Wärmespeicher zu keiner Energieeinsparung führen können. Ausdrücklich weist der Autor darauf hin, dass in der von ihm dargestellten Theorie die Kondensation von Wasser nicht berücksichtigt wurde.

In dieser Beziehung deckt sich diese Aussage mit dem Ergebnis des hier vorgelegten Berichtes, wonach mit den nachträglich eingebauten Hochtemperaturwärmespeichern (HTS) keine Energieeinsparungen zu erzielen sind, wenn die Kessel so nachgerüstet werden, dass eine Kondensation von Wasser nicht mehr möglich ist. Dieser Idealzustand entspricht jedoch nicht den Eigenschaften der meisten bisher in der Praxis vorhandenen Kessel und ist bestenfalls für eine neue Kesselgeneration zu erwarten.

Die von R. Hirschberg vorgelegte Arbeit ist also kaum geeignet, die Mehrzahl der bisher in der Praxis vorhandenen Anlagen richtig zu beurteilen. Der von **R. Hirschberg** am Anfang seines Berichtes von Max Planck zitierte Ausspruch „Nichts ist so praktisch wie eine gute Theorie“, möchte ich aufgrund zahlreicher ähnlicher Erfahrungen wie folgt ergänzen:

„Eine gute Theorie ist jedoch nur dann als eine solche zu bezeichnen, wenn sie geeignet ist, die Beobachtungen der Praxis ausreichend zu beschreiben!“ In diesem Sinn hat dies Max Planck sicherlich auch gemeint. Ob eine entwickelte Theorie diesen erwarteten Anspruch erfüllt, kann in der Regel nur experimentell überprüft werden. Es ist deshalb zu empfehlen, den Autor der oben genannten Publikation zu einer entsprechenden Umstellung eines Kessels auf die HTS-Technik einzuladen.

Goslar, im März 2009



Prof. Dr.-Ing. R. Jeschar

Schrifttumsverzeichnis

- Recknagel, Sprenger, Schramek*: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2000. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien. 69. Auflage 1998.
- Bole, W.*: Vom Brennstoff zum Rauchgas. B. G. Teubner Verlagsgemeinschaft, Leipzig 1957.
- Günther, R.*: Verbrennung und Feuerungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1974.
- Carlowitz, Otto, Cerbe, Günter, u.a.*: Grundlagen der Gastechnik.
- Arbeitskreis der Dozenten der Klimatechnik*: Handbuch der Klimatechnik. Verlag C.F. Müller G.m.b.H., Karlsruhe. Band 1 bis 3 1989.
- Baehr, Hans Dieter*: Thermodynamik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 6. Auflage 1988.
- Stephan, Karl, Mayinger, Franz*: Thermodynamik, Band 1 Einstoffsysteme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 12. neubearbeitete und erweiterte Auflage 1986.
- Bosnjakovic, R., Knoche, K.F.*: Technische Thermodynamik Teil 1. Steinkopff Verlag, Darmstadt. 7. vollständige und erweiterte Auflage 1988.
- Brauer, Heinz*: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Verlag Sauerländer, Aarau, Frankfurt (M) 1971.
- Schack, Alfred*: DER INDUSTRIELLE WÄRMEÜBERGANG. Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf. 7. Auflage 1969.
- Heiligenstaedt, Werner*: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen. Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf. 4. Auflage 1966.
- Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf*: Anhaltzahlen für die Wärmewirtschaft in Eisenhüttenwerken. 6. Auflage 1968.
- Grigull, Ulrich, Blanke, Walter (Hrsg.)*: Thermophysikalische Stoffgrößen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1989.
- Jeschar, R., Alt, R., Specht, E.*: Grundlagen der Wärmeübertragung. Viola-Jeschar-Verlag, Goslar. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage 1990.
- Jeschar, R., Alt, R., Kostowski, E.*: Wärmestrahlung in Industrieöfen. Verlag Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld 2004.