



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Competence Pool Weihenstephan

Bachelorarbeit
des Studienganges Brauwesen und Getränketechnologie

**Bestimmung der Wirkungsgrad- und Verluständerungen durch
Hochtemperaturspeicher in Dreizug-Flammrohr-
Rauchrohrkesseln
Der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co.KG, Ebersbergerstr.25
D-85570 Markt Schwaben**

Vorgelegt von: Nils Reichhardt
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff
Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff
Abgegeben: Freising, den 27.01.2012

Sperrvermerk

Für die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel :

Bestimmung der Wirkungsgrad- und Verluständerungen durch Hochtemperaturspeicher in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln

waren interne und vertrauliche Informationen der Unternehmen:

- MoonPower Wärmetechnik, Schlot 3, 96394 Marktrodach
- Bayerngas GmbH, Poccistr. 9, 80336 München

notwendig.

Eine Einsicht in diese Bachelorarbeit ist deshalb nicht gestattet. Ausgenommen davon sind die betreuenden Dozenten sowie die befugten Mitglieder des Prüfungsausschusses. Eine Veröffentlichung und Vervielfältigung der Bachelorarbeit – auch in Auszügen – ist nicht gestattet.

Ausnahmen von dieser Regelung bedürfen der Zustimmung des Autors und der oben genannten Unternehmen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich, Nils Reichhardt, die hier vorliegende Arbeit selbständig, nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel sowie ohne fremde Hilfe, angefertigt habe.

Diese Arbeit wurde bisher noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Freising, den 27.01.2011

Nils Reichhardt

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungen und Formelzeichen	VI
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	2
3 Stand der Technik	4
3.1 Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel	4
3.1.1 Allgemeiner Aufbau eines Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessels	4
3.1.2 Grundsätzlicher Ablauf der Dampferzeugung in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln.....	6
3.1.3 Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel der Brauerei Schweiger GmbH & Co KG	7
3.2 Hochtemperaturwärmespeicher	8
3.2.1 Prinzip von Wärmespeichern	8
3.2.2 Einsatz von Hochtemperaturspeichern in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln.....	8
3.2.3 Hochtemperaturspeicher der MoonPower Wärmetechnik	10
4 Material und Methoden	13
4.1 Analysegeräte und Materialien	13
4.2 Methoden	16
4.2.1 Auswahl des Messzeitraumes und Durchführung der Messungen	16
4.2.2 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	17
4.2.3 Dampfmassenbezogener Erdgasverbrauch.....	23
4.2.3.1 Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephase	24
5 Ergebnisse	26
5.1 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	26
5.1.1 Messung ohne Hochtemperaturspeicher	26
5.1.2 Messung mit Hochtemperaturspeicher, ohne Brennerregelung	27
5.1.3 Messung mit HTS, mit Brennerregelung	28

5.2	Gaseinsatz	30
5.3	Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephase	31
5.4	Allgemeine Steuerungswerte	32
5.4.1	Messung ohne HTS	32
5.4.2	Messung mit HTS, ohne Brennerregelung	32
5.4.3	Messung mit HTS, mit Brennerregelung	33
6	Diskussion	34
7	Literaturverzeichnis.....	37
8	Tabellenverzeichnis.....	39
9	Abbildungsverzeichnis	40
10	Formelverzeichnis	41

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung [Einheit]
ρ	Dichte [kg/m^3]
λ	Verbrennungsluftverhältnis
$\eta_{\text{Feuerungstechnisch}}$	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
γ	Masseanteil des Brennstoffes [kg/kg]
$y_{\text{O}_2\text{Ld}}$	Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft [m^3/m^3]
$y_{\text{O}_2\text{d}}$	Sauerstoffgehalt des Rauchgases [m^3/m^3]
$x_{\text{H}_2\text{O}\text{Ld}}$	Wassermassenanteil der Verbrennungsluft [kg/kg]
Vol.-ppm	ppm auf Volumen bezogen
Vol.-%	Volumenprozent
V_{mn}	Molares Normvolumen [m^3/kmol]
V_{L}	Verbrennungsluftvolumen (je Brennstoffmasseneinheit) [m^3/kg]
V_{Gdo}	stöchiometrisches, trockenes Rauchgasvolumen (je Brennstoffmasseneinheit) [m^3/kg]
V_{G}	Rauchgasvolumen (je Brennstoffmasseneinheit) [m^3/kg]
t_{R}	Bezugstemperatur (25 °C) [°C]
t_{L}	Temperatur der Verbrennungsluft (Celsius) [°C]
t_{G}	Temperatur des Rauchgases (Celsius) [°C]
T	Thermodynamische Temperatur [K]
ppm	parts per million [10^{-6}]
NW	Niedrigwasser
M	Molare Masse [kg/kmol]
J_{L}	Enthalpie der Verbrennungsluft (je Brennstoffmasseneinheit) [kJ/kg]
HW	Hochwasser
H_{un}	Heizwert (Normzustand) [MJ/m^3]
HTS	Hochtemperaturspeicher
H_{o}	Brennwert [MJ/kg]
GWI	Gaswärme-Institut e.V.
GES	Gaseinsatz
DFK	Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel

Abkürzung	Bedeutung [Einheit]
d	Durchmesser [m]
c_{pH_2O}	isobare spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf [kJ/(kg*K)]
c_{pCO_2}	Isobare spezifische Wärmekapazität von Kohlenstoffdioxid [kJ/(kg*K)]
A	Luft
μ_{Ldo}	stöchiometrische, trockene Verbrennungsluftmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_{Ld}	trockene Verbrennungsluftmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_L	Verbrennungsluftmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_{H_2Oo}	stöchiometrische entstehende Wassermasse je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_{Gdo}	stöchiometrische, trockene Rauchgasmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_{Gd}	trockene Rauchgasmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_G	Rauchgasmasse (je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
μ_{CO_2o}	Stöchiometrische Kohlenstoffdioxidmasse je Brennstoffmasseneinheit) [kg/kg]
$\dot{Q}_{gesamt,netto}$	Gesamte zugeführte Netto-Energie [kW]
$\dot{Q}_{G,netto}$	Netto-Wärmestrom des Rauchgases [kW]
\dot{m}_F	Brennstoffmassenstrom [kg/s]
\bar{c}_{pLdo}	integrale isobare spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsluft [kJ/(kg*K)]
\bar{c}_{pLdo}	integrale isobare spezifische Wärmekapazität der trockenen Verbrennungsluft [kJ/(kg*K)]
\bar{c}_{pGo}	integrale isobare spezifische Wärmekapazität des Rauchgases [kJ/(kg*K)]
\bar{c}_{pdGo}	integrale isobare spezifische Wärmekapazität des trockenen Rauchgases [kJ/(kg*K)]

1 Zusammenfassung

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad des untersuchten Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessels veränderte sich durch die Hochtemperaturspeicher nicht erkennbar. Lediglich kurze Leistungsspitzen des Brenners von bis zu einer Minute konnten abgefangen werden, bis der Brenner auf ein niedrigeres Niveau regeln konnte. In diesem Zeitraum erhitzen sich die Keramikspeicher und gaben diese gespeicherte sensible Energie spätestens nach einem Stillstand des Brenners an das Flammrohr ab. Erkennbar war dieser Effekt in niedrigeren maximalen Abgastemperaturen während der Messungen.

Dauert die Leistungsspitze länger an, sind die Hochtemperaturspeicher spätestens mit Erreichen der Flammentemperatur nicht mehr in der Lage, Wärmeenergie aufzunehmen.

Die Gegenüberstellung von dem Kessel entnommener Dampfmasse und eingesetzter Energie in Form von Erdgas ergab jedoch eine Einsparung von gemittelt 9,2 %. Eine Verlängerung der Brennerstillstandzeiten wurde während der Messungen beobachtet und wird als Grund für die Einsparung angenommen.

Ebenfalls ist die Veränderung der Eigenschaften der Luft, die das Flamm-Rauchrohrsystem während der Stillstandzeiten durchströmt, verantwortlich für einen Teil der Einsparungen. Strömt die Luft an den noch heißen Hochtemperaturspeichern vorbei, erhitzt sich diese. Das führt zu einer Absenkung der Luftdichte, bei gleichzeitiger Erhöhung der dynamischen Viskosität. Der Luftmassenstrom sinkt, während sich der Strömungswiderstand erhöht. Als Resultat kann ein verringerter Energieaustrag über den Kamin beobachtet werden. Diese theoretischen Überlegungen konnten während der Versuche nicht überprüft werden.

Aufgrund der Höhe der Einsparung muss von einer Kombination aller Effekte ausgegangen werden.

2 Einleitung

Der Großteil thermischer Energie (Wärme) wird nach wie vor durch Verbrennung fossiler Brennstoffe gewonnen, wobei der Umfang dieser Ressourcen endlich ist.

Einsparungen bei der Wärmegewinnung verlängern somit den Zeitraum bis zur Erschöpfung der fossilen Energieträger, reduzieren den finanziellen Einsatz und darüber hinaus auch die zwangsläufig bei Verbrennungen entstehenden Emissionen von Kohlenstoffdioxid und von Schadstoffen wie Staub sowie Schwefel- und Stickoxiden.

In der Industrie benötigte Wärme wird meist in Form von Dampf oder Heißwasser von Großwasserraumkesseln zur Verfügung gestellt. Bei benötigten Dampfleistungen bis 28 t/h dominieren Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel [1 S. 6], die die benötigte Energie heute meist aus der Verbrennung von Erdgas oder Heizöl beziehen.

Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad von Großwasserraumkesseln wird durch ihre Abgasverluste bestimmt und ist somit ein Maß für die Brennereffizienz. Durch dem Flammrohr nachgeschaltete, Rauchrohre konnte der Abgasverlust in sogenannten Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln bereits minimiert werden [2 S. 712].

Die Nachschaltung eines Economisers zur Vorwärmung des Kesselspeisewassers mittels Wärmeaustausch mit den heißen Abgasen reduziert diese Verluste. Er kann aber nicht in alle bestehenden Systeme problemlos integriert werden, da mit der Unterschreitung des Säuretaupunktes des Abgases der Kamin durch die entstehende Schwefelsäure korrodieren kann. Ebenso kann kondensierendes Wasser zu Schäden am Kamin führen [3 S. 406].

Lange Abgaswege stellen ein Problem dar, da der Säure- und der Wassertaupunkt bis zum Austritt des Abgases aus dem Kamin nicht unterschritten werden dürfen. Die niedrigste Kesselaustrittstemperatur des Rauchgases ist in diesen Fällen höher zu wählen [4 S. 92]. Allgemein liegt die Abgastemperatur 70-80 °C über der Arbeitsmitteltemperatur [5 S. 8]. Economiser sind bei größeren, somit längeren Kesseln, nicht zweckmäßig, da über den dreifach verlängerten Abgasweg in diesen Kesseln ein ausreichend großer Wärmeaustausch stattfindet [5 S. 6].

Bei Brennwertkesseln ist die teilweise Kondensation des bei der Verbrennung entstandenen Wasserdampfes erwünscht; die Verdampfungsenthalpie als latenter Abgasverlust kann in solchen Kesseln teilweise zur Wärmeerzeugung genutzt werden [4 S. 93].

Darüber hinaus ist der im Rauchgas vorhandene Luftüberschuss für den Abgasverlust entscheidend. Bei einem Zuviel an Verbrennungsluft sinkt der Feuerungstechnische Wirkungsgrad, da die zuviel zugeführte Luft ebenfalls erhitzt wird und die Flamme abgekühlt

wird. Stand der Technik sind hier CO- oder Lambda-Sonden, mit denen sich der Luftüberschuss dynamisch regeln lässt.

Oberflächenverluste durch Strahlung und Konvektion sind bei größeren Kesseln durch das bessere Oberflächen/Volumen-Verhältnis geringer als bei kleinen Kesseln. Gute Isolierungen reduzieren diese Verluste auf 0,5 % [4 S. 94].

Ein weiterer Verlust tritt mit inneren Auskühlverlusten in Erscheinung. Undichte Luftklappen des Brenners erlauben einen Frischluftstrom über das Flammrohr und die Rauchrohre zum Kamin [6 S. 12]. Ergebnis ist eine Erwärmung der Luft und ein daraus resultierender Energieaustrag über den Kamin.

Der Einsatz von Hochtemperaturspeichern aus Keramik in das Flammrohr von Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln verspricht eine Reduzierung der inneren Auskühlverluste, sowie einen verbesserten Wärmeaustausch im Flammrohr durch Rezirkulation der Rauchgase und damit einen besseren Wirkungsgrad [6] [7].

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Wirkungsgradveränderung mit Einbau von Hochtemperaturspeichern in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln. Dafür wird hauptsächlich die verbrennungsseitige Auswirkung auf den gesamten Kessel untersucht.

3 Stand der Technik

Im Kapitel Stand der Technik wird im Allgemeinen auf Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel und im Speziellen auf den Kessel der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co KG Bezug genommen. Ferner wird auf Wärmespeicher und die eingesetzten Hochtemperaturspeicher der Jürgen Duda Gießereibedarf GmbH eingegangen.

Der allgemeine Teil über Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel beschränkt sich auf solche Kessel, die zur Dampferzeugung eingesetzt werden, da der untersuchte Kessel ebenfalls nur zur Dampferzeugung eingesetzt wird.

3.1 Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel

3.1.1 Allgemeiner Aufbau eines Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessels

Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel (DFK) gehören zu den Großwasserraumkesseln und sind die für kleinere benötigte Dampfleistungen am häufigsten gebaute Kesselart [8 S. L50]. Sie bestehen aus einem zylindrischen, mit Wasser gefüllten Behälter. In diesem sind, je nach Leistung, ein (< 9,1 MW) bis zwei (10,5–18,5 MW), in seltenen Fällen auch drei Flammrohre verbaut [5 S. 8]. Am Anfang des Flammrohres befindet sich ein Brenner für feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe (Abbildung 3-1: 1), gegenüberliegend ist die erste der beiden Wendekammern zu finden (Abbildung 3-1: 3).

In dieser werden die noch 400–600 °C heißen Rauchgase in das erste der beiden Rauchrohrbündel geleitet, welches, horizontal oder vertikal, parallel zum Flammrohr die Rauchgase erneut durch den Kessel strömen lässt (Abbildung 3-1: 5) [5 S. 6].

Am Kesselanfang leitet eine zweite Wendekammer (Abbildung 3-1: 4) die kühleren Rauchgase ein drittes Mal durch den Kessel in Richtung Kamin (Abbildung 3-1: 6).

Die Rauchrohre in fünf Durchmesserbereichen (45,3–88,9 mm) dienen der Übertragung der in den Abgasen enthaltenen thermischen Energie auf das Kesselwasser. Ein verbesserter Wärmeübergang ist mit Einbuchtungen und Turbulatoren möglich [5 S. 8]. Insgesamt wird mit Rauchrohren ein höherer Feuerungstechnischer Wirkungsgrad gegenüber reinen Flammrohrkesseln erzielt. Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad stellt das brennerbezogene Verhältnis von Nutzenergie zu eingebrachter Energie dar. Auf ihn wird näher in Kapitel 4.2.2 eingegangen.

Die Ausführung der Flammrohre kann glatt oder gewellt gewählt werden, wobei gewellte Rauchrohre eine Vergrößerung der Heizflächen um 14–20 % gegenüber der glatten Ausführung bewirken und außerdem geringere Kräfte durch Wärmedehnungen auftreten [5 S. 6].

Die Wärmeübertragungsmechanismen sind allgemein rauchgasseitig Konvektion und Strahlung, Wärmeleitung durch die Wandung und erneut Konvektion im Wasserraum [5 S. 6].

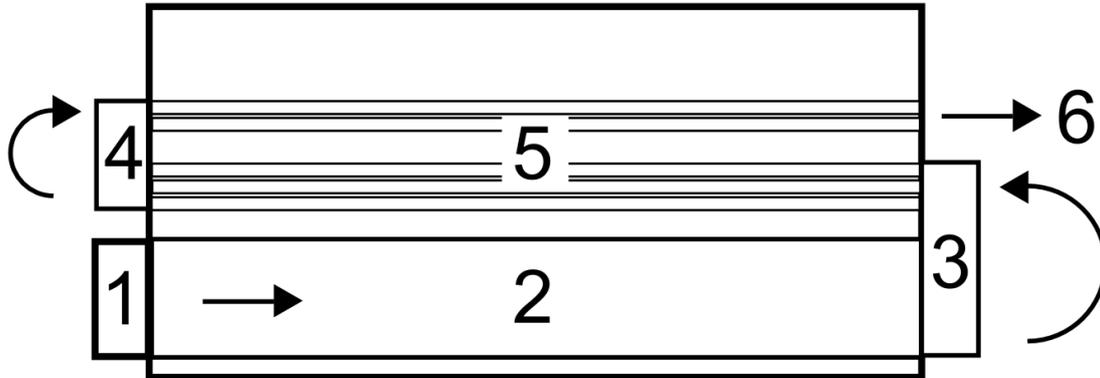


Abbildung 3-1: Schematischer Strömungsverlauf in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln (Aufsicht). 1 Brenner, 2 Flammrohr, 3 erste Wendekammer, 4 zweite Wendekammer, 5 Rauchrohrbündel, 6 Kamin (Quelle: Nils Reichhardt)

Nach Helmut Effenberger beträgt der Anteil des Flammrohrs an der übertragenen Wärme 50 %, der der beiden jeweils Rauchrohre 40 % bzw. 10 % [5 S. 8].

DFK können sowohl zur Heißwasser- als auch zur Dampferzeugung verwendet werden. Wird Dampf erzeugt, muss über dem Kesselwasser Volumen für den entstehenden Dampf vorhanden sein. Die Rauchrohre müssen zu jeder Zeit unter Kesselwasser liegen, um deren thermische Überbelastung zu vermeiden. Dies wird durch Niveausonden gewährleistet, welche die Steuerung, bei niedrigen Wasserständen nach Dampfernahme, zu einem Auffüllen des Kessels durch die Speisewasserpumpe veranlassen.

An das Kesselspeisewasser, mit dem entnommene Dampfmassen über die Speisewasserpumpe ersetzt werden, sind hohe Ansprüche bezüglich Wasserhärte, Leitfähigkeit und pH-Wert zu stellen, um Korrosion oder Belagbildung der Kesselwand zu verhindern. Entsprechende Angaben sind in verschiedenen Richtlinien zu finden, sollen hier aber nicht näher erläutert werden, da dies nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

DFK zur Heißwassererzeugung sind vollständig mit Wasser gefüllt, welches über einen Kreislauf zum Wärmenutzer gepumpt wird, in Wärmetauschern seine Energie abgibt, zurück zum DFK geleitet und dort erneut erhitzt wird. Ein Auffüllen des DFK ist nur bei Undichtigkeiten durchzuführen.

3.1.2 Grundsätzlicher Ablauf der Dampferzeugung in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln

Aufgabe des Brenners ist es, die im Brennstoff chemisch gebundene Energie möglichst vollständig in Wärme umzuwandeln, also eine rückstandsfreie Verbrennung zu gewährleisten. Rückstandsfreie Verbrennungen sind primär mit aschefreien Brennstoffen zu erzielen.

Möglich ist dies mit einer innigen Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsluft. Eine ideale, stöchiometrische Verbrennung kann aufgrund der kurzen Verweildauer im Brennraum nicht gewährleistet werden. Es muss also eine höhere Luftmasse zugeführt werden, als auf Grund der Stöchiometrie benötigt wird. Der Quotient aus tatsächlich zugeführter Luftmasse und stöchiometrischer Luftmasse wird als Luftzahl oder Luftverhältnis λ bezeichnet.

Je aufwändiger die Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsluft ist, desto höher muss λ gewählt werden. Gängige Werte sind bei Gasfeuerungen und Heizöl 1,05–1,2 und bei Kohlenstaub 1,1–1,3 [9 S. 27]. Höhere Werte sind bei stückigen festen Brennstoffen üblich.

Über den Wärmeeintrag des Brenners wird der Kesselinnendruck auf ein spezifisches Maximum erhöht und anschließend der Brenner abgeschaltet. Das Druckmaximum liegt unter dem maximal zulässigen Druck des Kessels.

Bei Dampfentnahme aus dem Dampfraum reduziert sich der Druck im DFK. Dies führt zu einer weiteren Verdampfung von Wasser, da der Kesseldruck unter den Dampfdruck des heißen Wassers fällt. Die erneute Verdampfung entzieht dem Kesselwasser Energie in Höhe der entsprechenden Verdampfungsenthalpie, was eine Temperatursenkung des Kesselwassers nach sich zieht. Der relativ große Wasserinhalt eines Großwasserraumkessels verhindert starke Temperaturschwankungen durch Wärmeverluste über kurze Zeiträume.

Wird ein vorgegebenes Kesseldruckminimum erreicht, wird der Brenner erneut eingeschaltet. Um die Explosionsgefahr durch eventuell im Flammrohr verbliebene brennbare Gase auszuschließen, werden vor Zündung des Brenners das Flammrohr und die nachfolgenden Rauchrohre über das Brennergebläse mit Frischluft gespült.

Spätestens mit Erreichen des minimal zulässigen Wasserinhaltes, auch Niedrigwasser (NW) genannt, füllt die Speisewasserpumpe den Kessel auf, um ein Freiliegen der Rauchrohre zu verhindern. Generell wird der Wasserinhalt nicht zwischen NW und maximalem Füllstand Hochwasser (HW) geregelt, sondern in einem schmalen Bereich innerhalb dieser beiden Werte.

3.1.3 Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel der Brauerei Schweiger GmbH & Co KG

Der Dampferzeuger der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co KG ist ein DFK mit folgenden Daten:

Tabelle 3-1: Daten des Großwasserraumkessels der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co KG [10]

Hersteller	Loos Deutschland GmbH, Gunzenhausen (DE)
Bauart	Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel
Herstelljahr	1994
zul. Betriebsüberdruck	10 bar
Dampfleistung	5000 kg/h
Wärmeleistung	5700 kW
Rauchgasberührte Heizfläche	100 m ²
Flammrohrausführung (1. Zug)	Glattrohr
Flammrohrlänge	4600 mm
Flammrohrdurchmesser	1020 mm
Rauchrohranzahl 2. Zug	80
Rauchrohrdurchmesser 2. Zug	60 mm
Rauchrohranzahl 3. Zug	53
Rauchrohrdurchmesser 3. Zug	60 mm
NW [11]	6990 l
HW [11]	8286 l

Der ursprünglich verbaute Brenner wurde 2010 gegen einen Zweistoffbrenner des Typs WM-GL 30/3-A ZM-R des Herstellers Max Weishaupt GmbH getauscht. Dieser kann wahlweise mit Erdgas oder Heizöl EL betrieben werden. Als Feuerungsautomat wird ein W-FM 200, ebenfalls ein Produkt der Max Weishaupt GmbH, mit integrierter Dichtheitskontrolle, Leistungsregelung, Drehzahlregelung und angebundener O₂-Regelung eingesetzt. [12 S. 3] Die Betriebsweise des Brenners ist modulierend zwischen Klein- und Nennlast. Brennerseitig ist aufgrund der Aktualität der eingesetzten Technik mit einem guten Feuerungstechnischen Wirkungsgrad zu rechnen.

Der maximale Kesseldruck im Normalbetrieb beträgt 8,2 bar, der minimale 7,2 bar. Das Kesselwasserniveau schwankte während der Messungen zwischen 62 und 76 %, wobei der relative Bereich von 0-100 % zwischen den absoluten Füllständen NW und HW festgelegt wurde [11]. Füllstandänderungen von 1 % zwischen HW und NW entsprechen ungefähr 13 l.

Vor Beginn der Messungen wurde in das Dampfrohr des Kessels ein Dampf volumenzähler PROWIRL W der Endress+Hauser Flowtec AG eingebaut, die entfernte Rohrisolierung im

Verläufe der Messungen jedoch nicht wieder angebracht. Ebenso wurde vor Messbeginn die Isolierung am hinteren Zugang des Flammrohres entfernt, um darüber die verwendeten Hochtemperaturspeicher einbauen zu können. Diese Isolierungen wurden ebenfalls im Verlauf aller Messungen nicht wieder angebracht.

3.2 Hochtemperaturwärmespeicher

3.2.1 Prinzip von Wärmespeichern

Wärmespeicher dienen der Speicherung thermischer Energie, um zeitlich begrenzte Leistungsdifferenzen der Energieerzeugung zu überbrücken.

Die Energie kann durch drei physikalische Mechanismen gespeichert werden. Einerseits durch die sensible Wärmespeicherung, welche von einer Temperaturänderung des Mediums ausgeht, andererseits durch Phasenwechsel oder chemische Reaktionen desselben.

Eine Unterscheidung nach Temperaturbereichen ist ebenfalls möglich, hier wird zwischen Niedertemperaturspeichern ($T < 100\text{ °C}$), Mitteltemperaturspeichern ($100\text{ °C} < T < 500\text{ °C}$) und Hochtemperaturspeichern (HTS) ($T > 500\text{ °C}$) differenziert [13 S. 359].

Folglich zählt das Kesselwasser zu den Mitteltemperaturspeichern. Es ist in der Lage, kurzfristige Brennerstillstandzeiten zu überbrücken.

3.2.2 Einsatz von Hochtemperaturspeichern in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln

In DFK bietet sich der Einbau von HTS im Flammrohr an, da in diesem der Brenner integriert ist. Der Brenner ist die primäre Energiequelle eines Dampfkessels, und die Flammentemperatur (ca. 1200 °C) entspricht dem Speicherbereich der HTS.

Die verwendeten Keramikspeicher speichern Wärmeenergie nur durch sensible Wärmespeicherung.

Ein Einbau der HTS soll zu einer Erhöhung des Jahresnutzungsgrades des Kessels führen. Theoretische Überlegungen dazu stellte Prof. Rudolf Jeschar bereits 2006 an [6].

Der Einbau von HTS in das Flammrohr führt zu einer erheblichen Verringerung der Kesselwärmeverluste während der Brennerstillstandzeiten. Die Minimierung der Verluste ist mit der Abgabe der in den HTS gespeicherten Energie an das Kesselwasser sowie mit der Veränderung der physikalischen Eigenschaften der bei undichten Kaminklappen durch den Kessel strömenden Luft zu erklären [6 S. 17].

Eine starke Erhöhung der Lufttemperatur senkt einerseits die Dichte der Luft, was eine Verminderung der angesaugten Luftmasse zur Folge hat. Andererseits steigert die erhöhte Temperatur die dynamische Viskosität, was wiederum den Strömungswiderstand erhöht [14 S. 151]. Diese Effekte führen zu einem verminderten Abtransport von thermischer Energie über den Kamin des Dampfkessels und zu einem entsprechend verringerten, zum Ausgleich der Verluste benötigten, Energieeinsatz.

Eine Verlängerung der Brennerstillstandzeiten ist eine Folge des Energietransfers auf das Kesselwasser und des verminderten Verlustes thermischer Energie während der Stillstandzeiten. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Laufzeiten des Brenners durch eingebaute HTS verlängert werden, da zusätzlich zum Kesselwasser die HTS Energie aufnehmen [6 S. 14].

Einer Simulation des Gaswärme-Institut e.V. (GWI) zufolge führt der Einbau von HTS zu einer Rezirkulation der heißen Verbrennungsgase im Flammrohr und einem damit einhergehenden verbesserten Wärmeübergang. Die Rezirkulation ist bedingt durch den Aufprall der Rauchgase auf die im Flammenbereich installierten HTS.

Der verbesserte Wärmeübergang führt in der Simulation zu einer um 62 K [7 S. 7] verringerten Temperatur am Flammrohraustritt, was einen besseren Wirkungsgrad zur Folge hat [7 S. 11].

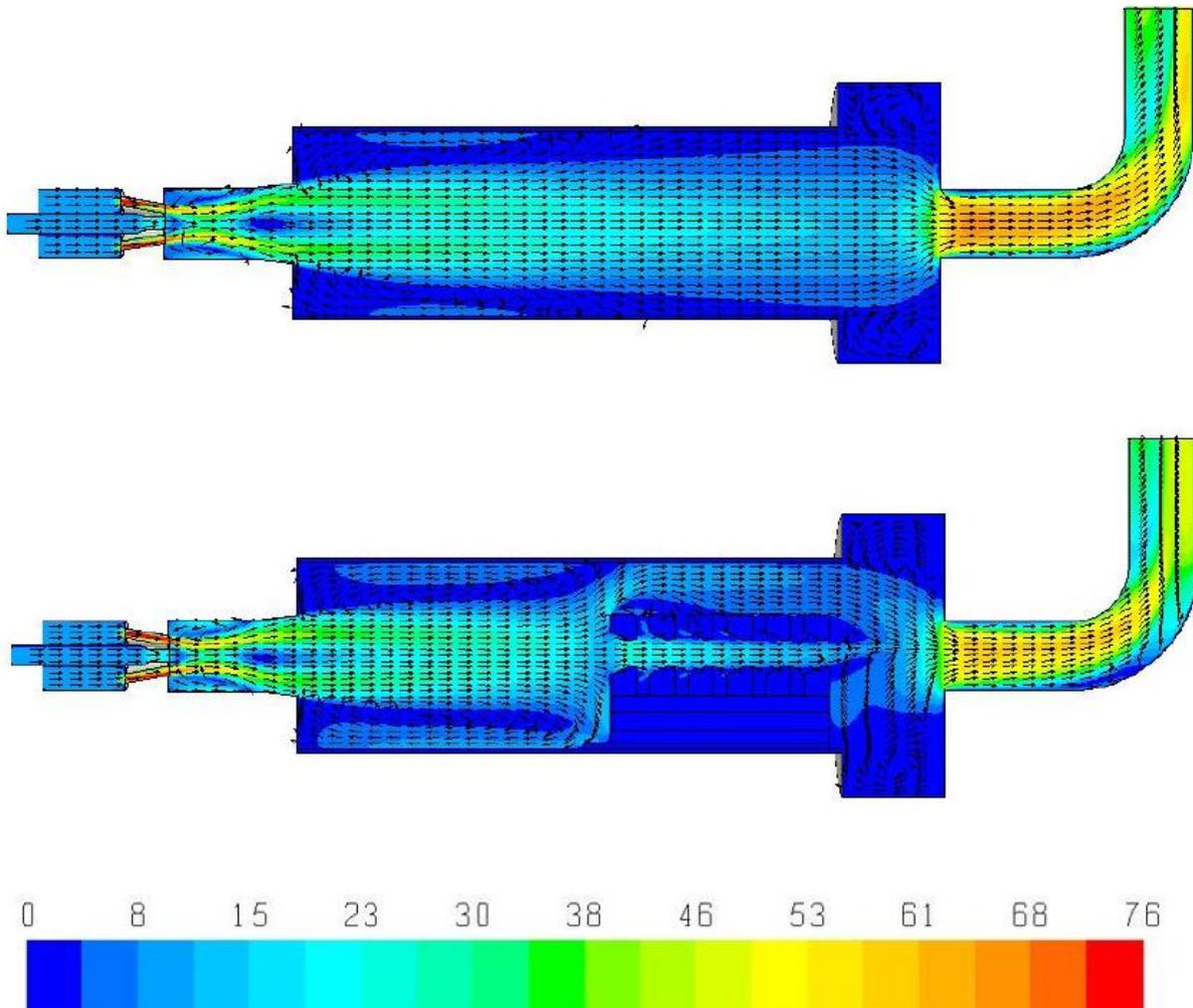


Abbildung 3-2: Resultierende Geschwindigkeiten [m/s] und der Vektorenverlauf in der vertikalen Mittelebene für den herkömmlichen Kessel (oben) und den Kessel mit Speicherelementen (unten). (Quelle: Dipl. Ing. Eren Tali [7 S. 6])

3.2.3 Hochtemperaturspeicher der MoonPower Wärmetechnik

Die während der Versuchstage verwendeten HTS wurden von der MoonPower Wärmetechnik am 03.09.2011 in den Dampfkessel der Privatbrauerei Schweiger installiert. Insgesamt wurden 10 HTS mit einer Gesamtmasse von 150 kg eingebaut. Die Speicher wurden auf Riegeln und Trägern mit einer Gesamtmasse von ungefähr 160 kg installiert. Zwischen Riegeln und Flammrohr wurde eine 15 mm dicke Keramikfasermatte RG 128 angebracht.

Hersteller der HTS, der Riegel und der Träger ist die Jürgen Duda Gießereibedarf GmbH. Der Werkstoff ist die Keramik DUROCAST 462 A, ein Gemisch aus Aluminiumoxid, Siliziumdioxid und weiteren Komponenten.

Eine von MoonPower gewünschte Reduzierung der Brennerleistung um 10 % fand erst am 13.09.2011 statt und wurde vom Bosch Kundendienst durchgeführt.

Die Reduzierung der Brennerleistung war notwendig, um im Bereich der HTS die Strömungsgeschwindigkeit der Rauchgase zu verringern. Nach Formel 3-1 reduziert sich im Kessel der Brauerei Schweiger die freie Querschnittsfläche im Bereich der Keramiken um rund $\frac{1}{8}$.

$$\frac{\text{Fläche}_{HTS}}{\text{Fläche}_{\text{Flammrohr}}} = \frac{2 * 0,065 \text{ m} * 0,140 \text{ m} + 0,085 \text{ m} * 0,200 \text{ m} + \pi * (0,150^2 - 0,050^2) \text{ m}^2}{0,501^2 \text{ m}^2 * \pi} \approx \frac{1}{8} \quad \text{Formel 3-1}$$

Dies führt unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung zu einer um den Faktor 1,14 größeren Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der HTS.

$$v_{\text{mit HTS}} = v_{\text{ohne HTS}} * \frac{A_{\text{ohne HTS}}}{A_{\text{mit HTS}}} = \frac{8}{7} * v_{\text{ohne HTS}} \approx 1,14 * v_{\text{ohne HTS}} \quad \text{Formel 3-2}$$

Damit einhergehend verringert sich der Betrag der im Flammrohr übertragenen Wärme. Über die eine Woche nach Einbau der HTS durchgeführte Brennerleistungsregelung war es möglich, eine eventuell nur durch die Leistungsreduzierung induzierte Wirkungsgradverbesserung durch getrennte Messungen auszuschließen.

Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 zeigen das Flammrohr des untersuchten Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessels vor und nach Einbau der HTS.



Abbildung 3-3: Flammrohr vor Einbau der HTS mit Sicht auf den Brenner (Quelle: Klaus Lehmann, MoonPower)

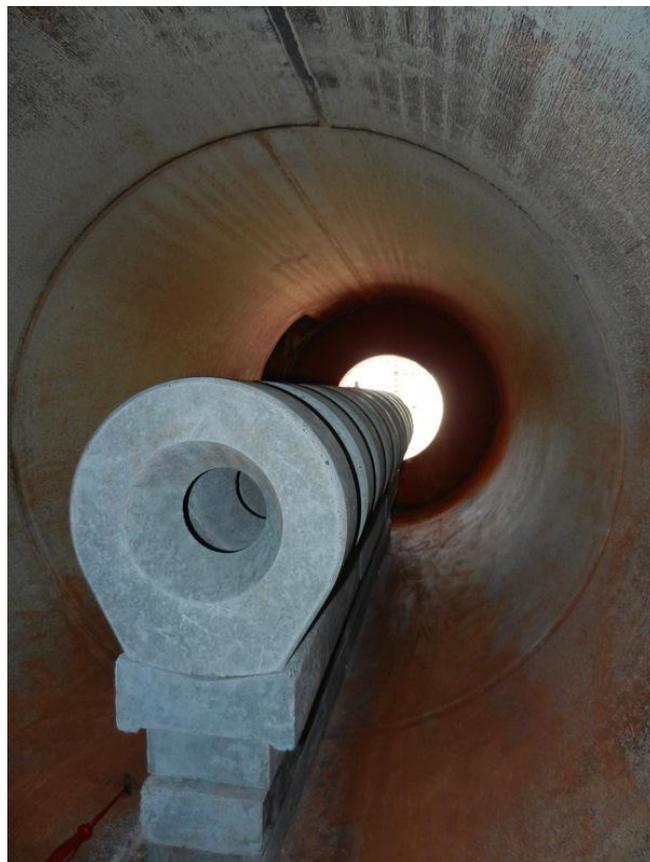


Abbildung 3-4: Flammrohr nach Einbau der HTS mit Sicht auf das Einstiegsloch (Quelle: Klaus Lehmann, MoonPower)

4 Material und Methoden

4.1 Analysegeräte und Materialien

Folgende Tabelle listet die verwendeten Messgeräte mit den benötigten Spezifikationen auf.

Tabelle 4-1: Eingesetzte Analysegeräte und Materialien

Beschreibung Hersteller	Spezifikation
Rauchgasanalysegerät Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH (Bad Wünnenberg, DE)	A400^{PRO} (Angaben bezogen auf trockenes Rauchgas)
	<ul style="list-style-type: none"> - Sauerstoffkonzentration [Vol.-%] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: 0,0 bis 21,0 ○ Empfindlichkeit: 0,1 ○ Genauigkeit: ± 0,3 - Kohlenstoffmonoxidkonzentration [Vol.-ppm] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: 0 bis 4000 ○ Empfindlichkeit: 1 ○ Genauigkeit: ± 20 (< 400), sonst 5 % vom Messwert - Abgastemperatur [°C] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: - 20,0 bis +800,0 ○ Empfindlichkeit: 0,1 ○ Genauigkeit (gem. EN 50379, Teil 2): <ul style="list-style-type: none"> ▪ (0–133) ± 2 ▪ (133–800) ±1,5 % vom Messwert
USB-Temperaturlogger Voltcraft (Hirschau, DE)	DL-100T
	<ul style="list-style-type: none"> - Verbrennungslufttemperatur [°C] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: -40 bis +70 ○ Empfindlichkeit: 0,1 ○ Genauigkeit: <ul style="list-style-type: none"> ▪ (0–40) ± 1 ▪ (40–70) ± 2,5 ○ Ansprechzeit: ca. 20 s
Dampfmengenzähler Endress+Hauser Flowtec AG (Rheinach, CH)	PROWIRL 72W
	<ul style="list-style-type: none"> - Volumenfluss [m³/h] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt - Temperatur [°C] (wird Steuerungsintern)

Beschreibung Hersteller	Spezifikation
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: -40 bis +260
	IRM-G G250
Erdgaszähler Elster-Instromet (Mainz, DE)	<ul style="list-style-type: none"> - Volumen [m³] (auf 25 °C berechnet) <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt ○ Messgenauigkeit (MPE): 0,5 %
	SIMATIC MULTI PANEL
	<ul style="list-style-type: none"> - Dampfmassenstrom [t/h] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt ○ Empfindlichkeit: 0,1 - Dampfmasse [t] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt - Dampfdruck [bar] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt ○ Empfindlichkeit: 0,1 - Kesseldruck [bar] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt ○ Empfindlichkeit: 0,1 - Kesselniveau [%] <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: 0 bis 100 ○ Empfindlichkeit: 1 - Betriebsstunden (Brenner und Kessel) [h:min]: <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: <ul style="list-style-type: none"> ▪ h: nicht bekannt ▪ min: 0 bis 59 ○ Empfindlichkeit: <ul style="list-style-type: none"> ▪ h: 1 ▪ min: 1 - Brennerstarts: <ul style="list-style-type: none"> ○ Messbereich: nicht bekannt
	Keramikspeicher Ø 300
Keramikspeicher Jürgen Duda Gießereibedarf GmbH (Vielbach, DE)	<ul style="list-style-type: none"> - Werkstoff: DUROCAST 462 A - $\rho = 2750 \frac{kg}{m^3}$ - $\bar{c}_p = 963 \frac{J}{kg \cdot K}$ - m = 15 kg

Beschreibung Hersteller	Spezifikation
	<ul style="list-style-type: none"> - $d_{\text{au\ss en}} = 300 \text{ mm}$ - $d_{\text{innen}} = 100 \text{ mm}$
	Träger 200x85x600
	<ul style="list-style-type: none"> - Werkstoff: DUROCAST 462 A - $\rho = 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Trägerelemente Jürgen Duda Gießereibedarf GmbH (Vielbach, DE)	<ul style="list-style-type: none"> - $\bar{c}_p = 963 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ - $m = 22 \text{ kg}$ - Breite = 200 mm - Höhe = 85 mm
	Riegel 140x65x600
	<ul style="list-style-type: none"> - Werkstoff: DUROCAST 462 A - $\rho = 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Riegelemente Jürgen Duda Gießereibedarf GmbH (Vielbach, DE)	<ul style="list-style-type: none"> - $\bar{c}_p = 963 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ - $m = 14 \text{ kg}$ - Breite = 140 mm - Höhe = 65 mm

Die Angaben des Dampfmassenstromes und der Dampfmasse in der Steuerungsvisualisierung wird nach Auskunft von Loos International über eine systeminterne Formel aus dem vom Dampfmenzähler übergebenen Dampfvolumentfluss und dem Dampfdruck berechnet. Anschließend werden die von der Formel übergebenen Werte über eine Korrekturformel an die Werte der Wasserdampf tabel angepasst [15]. Eine stichprobenartige, qualitative Überprüfung der Umrechnung über angezeigten Druck und Dampfvolumentfluss wurde anhand der Dampf tabel durchgeführt, und die Werte der Visualisierung wurden für richtig befunden [16].

In den auf die Dampfmasse bezogenen Berechnungen wird mit dieser ausgegebenen Dampfmasse gerechnet.

Konnte der Messbereich auf Grund mangelnder Dokumentation der entsprechenden Geräte nicht zweifelsfrei angegeben werden, wurde dies in Abbildung 4-1 vermerkt.

Die geometrischen Maße der Keramikspeicher und der Träger sind vereinfacht angegeben.

4.2 Methoden

Der Begriff Standardbedingung bezeichnet die Zustände bei

- $p = 101325 \text{ Pa}$ und
- $t = 0 \text{ °C}$.

Während der Aufzeichnung der für die Berechnung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrad benötigten Werte wurde das Absalzventil manuell verschlossen. Somit konnten thermische Verluste über das Absalzen für diesen Zeitraum ausgeschlossen werden.

4.2.1 Auswahl des Messzeitraumes und Durchführung der Messungen

Um die Vergleichbarkeit der gemessenen Werte gewährleisten zu können, wurde nach Absprache mit der Brauerei Schweiger GmbH & Co KG jeweils sonntags ab 20:00 Uhr mit den Messungen begonnen. Zwischen 20:00 Uhr und ca. 5:00 Uhr des Folgetages benötigte nur das Sudhaus Dampf, ab 5:00 Uhr begann die Flaschenwaschmaschine mit dem Aufheizen der Reinigungsmittel.

Über einen Zeitraum von 12 Stunden wurden mit einem Rauchgasanalysegerät der Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH in Intervallen von 30 s folgende Werte gemessen und automatisch auf einem Laptop gespeichert:

- Abluftsauerstoff [vol.-%]
- Ablufttemperatur [°C]
- Kohlenstoffdioxidgehalt der Abluft [vol.-%]

Darüber hinaus wurden in Abständen von 15 min mit einem Fotoapparat alle weiteren Werte protokolliert, da diese nicht automatisch gespeichert werden konnten. Dazu gehören:

- verbrauchtes Erdgasvolumen [m^3]
- Kesseldruck [bar]
- Kesselniveau [%]
- Dampfmasse [t]
- Anzahl der Brennerstarts
- Brennerbetriebsstunden [h:mm]
- Kesselbetriebsstunden [h:mm]

Die Uhrzeit des Fotoapparates wurde vor Beginn jeder Messung mit der Uhrzeit des Laptops abgeglichen.

4.2.2 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades eines Kessels kann die direkte oder die indirekte Methode gewählt werden.

Bei der direkten Methode müssen alle Massen- und Energieströme über die Kesselsystemgrenzen während des Beharrungszustandes aufgezeichnet werden. Für den Beharrungszustand werden alle Zustände und Zu- und Abflüsse über einen Zeitraum von ca. 5 min konstant gehalten. Der Aufwand für diese Bestimmungsmethode ist größer und der zu erwartende Messfehler steigt auf das Drei- bis Vierfache des Messfehlers der indirekten Methode [17 S. 4].

Wird der Wirkungsgrad eines Großwasserraumkessels nach der indirekten Methode bestimmt, werden nur die thermischen Verluste des Kessels ermittelt. Dabei wird angenommen, dass diese Verluste nicht mehr zur Dampferzeugung verwendet werden können. Beachtet man nur die Rauchgasverluste, spricht man vom Feuerungstechnischen Wirkungsgrad $\eta_{\text{Feuerungstechnisch}}$.

Dieser berücksichtigt bei Feuerungsanlagen den Energieverlust durch die spürbare Wärme l_{Rauchgas} im Rauchgas ohne Kondensation desselbigen [18 S. 114] und ist ein Maß für die Effizienz des Feuerungssystems in Kombination mit eventuell nachgeschalteten Wärmetauschern.

$$\eta_{\text{Feuerungstechnisch}} = 1 - l_{\text{Rauchgas}} \quad \text{Formel 4-1}$$

Der Rauchgasverlust ist definiert als der Quotient aus Netto-Wärmestrom des Rauchgases $\dot{Q}_{G,Netto}$ und des Bruttobetrages der zugeführten Wärme $\dot{Q}_{\text{gesamt,brutto}}$ [17 S. 20].

$$l_{\text{Rauchgas}} = \frac{\dot{Q}_{G,netto}}{\dot{Q}_{\text{gesamt,brutto}}} \quad \text{Formel 4-2}$$

Nach [17 S. 17] ist der Netto-Wärmestrom $\dot{Q}_{G,netto}$ des Rauchgases über den Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{Brennstoff}}$, die brennstoffmassenbezogene Rauchgasmasse μ_G , die integrale isobare spezifische Wärmekapazität \bar{c}_G des Rauchgases und die Temperaturdifferenz derselben zur Verbrennungsluft zu berechnen.

$$\dot{Q}_{G,netto} = \dot{m}_{\text{Brennstoff}} * \mu_G * \bar{c}_G * (t_G - t_L) \quad \text{Formel 4-3}$$

Unter Berücksichtigung der Verbrennungsreaktionen (Tabelle 4-3) der Bestandteile des Erdgases und dem Verbrennungsluftverhältnis λ kann μ_G berechnet werden. Nach

DIN EN 12953-11 und den Angaben der tagesaktuellen Gasanalysen werden nur folgende Bestandteile berücksichtigt [19]:

- Methan (CH_4)
- Ethan (C_2H_6)
- Propan (C_3H_8)
- Butan (C_4H_{10})
- Stickstoff (N_2)
- Kohlenstoffdioxid (CO_2)

Stickstoff und Kohlenstoffdioxid sind Ballastgase, von denen angenommen wird, dass sie die Verbrennung ohne Reaktion durchlaufen [3]. Höhere Kohlenwasserstoffe wurden konform mit DIN EN 12953-11 zu Propan gezählt [17 S. 24].

Ausgehend von der Zusammensetzung des Brenngases, den Reaktionsgleichungen der Verbrennungsreaktionen und den Eigenschaften der molaren Masse und des molaren Normvolumens (Tabelle 4-4) der brennbaren Bestandteile können folgenden Parameter berechnet werden:

- trockene Verbrennungsluftmasse (je Brennstoffmasseneinheit) μ_{Ld} [kg/kg]
- trockene Rauchgasmasse (je Brennstoffmasseneinheit) μ_{Gd} [kg/kg]
- Volumen des trockenen Rauchgases (je Brennstoffmasseneinheit) V_{Gd} [m³/kg]
- CO₂-Gehalt des trockenen Rauchgases (je Brennstoffmasseneinheit) μ_{CO_2} [kg/kg]
- bei der Verbrennung erzeugtes Wasser (je Brennstoffmasseneinheit) μ_{H_2O} [kg/kg]

Der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff wird über die Umgebungsluft gedeckt. Diese Angaben sind für die berücksichtigten Brenngasbestandteile nach [17 S. 25] in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: μ_{Ld} , μ_{Gd} , V_{Gd} , μ_{CO_2} , und μ_{H_2O} der Brennstoffbestandteile (stöchiometrische Verbrennung) [17 S. 25]

Bestandteil	μ_{Ldo} [kg/kg]	μ_{Gdo} [kg/kg]	V_{Gdo} [m³/kg]	μ_{CO_2o} [kg/kg]	μ_{H_2Oo} [kg/kg]
Methan (CH_4)	17,23826	15,99234	11,92859	2,75201	2,24592
Ethan (C_2H_6)	16,09464	15,29728	11,32231	2,93534	1,79736
Propan (C_3H_8)	15,67859	15,04442	11,10174	3,00203	1,63417
Butan (C_4H_{10})	15,46334	14,91360	14,91360	3,03654	1,54975
Stickstoff (N_2)	-	1,00000	0,79972	-	-

Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	-	1,00000	0,50582	1,00000	-
--------------------------------------	---	---------	---------	---------	---

Tabelle 4-3: Reaktionsgleichungen der berücksichtigten brennbaren Bestandteile mit Sauerstoff

Edukte	Produkte	
CH ₄ + 2 O ₂	CO ₂ + 2 H ₂ O	Formel 4-4
2 C ₂ H ₆ + 7 O ₂	4 CO ₂ + 6 H ₂ O	Formel 4-5
C ₃ H ₈ + 5 O ₂	3 CO ₂ + 4 H ₂ O	Formel 4-6
2 C ₄ H ₁₀ + 13 O ₂	8 CO ₂ + 10 H ₂ O	Formel 4-7

Tabelle 4-4: Molare Masse, molares Normvolumen, Brennwert und Heizwert der Brennstoffbestandteile [17 S. 24]

Bestandteil:	M [kg/kmol]	Molares Volumen (Standardbedingung) V_{mn} [m ³ /kmol]	Brennwert H_o [MJ/kg]	Heizwert (Standardbedingung) H_{un} [MJ/m ³]
CH ₄	16,0428	22,360	55,499	36,883
C ₂ H ₆	30,0690	22,191	51,876	64,345
C ₃ H ₈	44,0962	21,928	50,346	93,215
C ₄ H ₁₀	58,1230	21,461	49,500	123,809
N ₂	28,0134	22,403	-	-
CO ₂	44,0098	22,261	-	-
Wasser (H ₂ O)	18,0152	-	-	-

Über die Massenanteile x_i und Brennwerte H_{oi} der einzelnen Gasbestandteile aus Tabelle 4-4 lässt sich der gesamte Brennwert H_o des Gases berechnen.

$$H_o = \sum H_{oi} * x_i \quad \text{Formel 4-8}$$

Ausgehend von Tabelle 4-2 und der Zusammensetzung wird für das verbrannte Erdgas der stöchiometrische Verbrennungsluftgehalt μ_{Ldo} (trocken) nach

$$\mu_{Ldo} = \sum \mu_{Ldoi} * x_i \quad \text{Formel 4-9}$$

der stöchiometrische Rauchgasgehalt (trocken) nach

$$\mu_{Gdo} = \sum \mu_{Gdoi} * x_i$$

Formel
4-10

das stöchiometrische Rauchgasvolumen (trocken) nach

$$V_{Gdo} = \sum V_{Gdoi} * x_i$$

Formel
4-11

der Kohlenstoffdioxidgehalt des Rauchgases nach

$$\mu_{CO_2o} = \sum \mu_{CO_2oi} * x_i$$

Formel
4-12

und der Wassergehalt des Rauchgases nach

$$\mu_{H_2Oo} = \sum \mu_{H_2Oi} * x_i$$

Formel
4-13

berechnet. Der Wassergehalt μ_{H_2Oo} berücksichtigt nur das bei der stöchiometrischen Verbrennung entstehende Wasser.

Die brennstoffmassenbezogene, trockene Verbrennungsluftmasse μ_{Ld} kann, ausgehend von μ_{Ldo} , V_{Gdo} , der Normdichte der Verbrennungsluft ρ_{nAd} und dem volumetrischen Rauchgassauerstoffgehalt y_{O_2d} im Rauchgas berechnet werden.

$$\mu_{Ld} = \mu_{Ldo} + \rho_{nAd} * V_{Gdo} * \frac{y_{O_2d}}{y_{O_2Ld} - y_{O_2d}}$$

Formel
4-14

Der Sauerstoffgehalt der trockenen Verbrennungsluft ist $y_{O_2Ld} = 0,20938 \frac{m^3}{m^3}$ [3 S. 369].

Die feuchte Verbrennungsluftmasse μ_L ist mit

$$\mu_L = \mu_{Ld} * (1 + x_{H_2OLd})$$

Formel
4-15

zu berechnen.

Der Summand $x_{H_2O_{Ld}}$ ist der Wassergehalt der feuchten Luft basierend auf der zur Verbrennung benötigten trockenen Luftmasse. Der Wassergehalt vergrößert einerseits die Verbrennungsluftmasse und erhöht andererseits, wenn auch in geringerem Maße, den Wassergehalt des Rauchgases. Dieser wird während der weiteren Berechnungen als Mittelwert mit $0,0062 \frac{kg}{kg}$ angenommen [3 S. 369].

Da Verluste durch Ascheanteile bei gasförmigen Brennstoffen vernachlässigt werden können, ist die Rauchgasmasse bezogen auf die Brennstoffmasse nach Rietschel [3 S. 370] folgendermaßen zu berechnen.

$$\mu_G = \mu_L + 1$$

Formel
4-16

Um die Temperaturabhängigkeit der isobaren spezifischen Wärmekapazität des Rauchgases zu berechnen, werden folgende Polynome verwendet [3 S. 380]:

$$\bar{c}_{pGo}(t) = \bar{c}_{pLdo}(t) + C_{pH_2O}(t) * x_{H_2O} + C_{pCO_2}(t) * x_{CO_2}$$

Formel
4-17

Wobei die integrale isobare spezifische Wärmekapazität trockener Verbrennungsluft \bar{c}_{pLdo} mit folgendem temperaturabhängigem Polynom [3 S. 380] berechnet wird:

$$\bar{c}_{pLdo}(t) = a + \frac{b}{2}t + \frac{c}{3}t^2 + \frac{d}{4}t^3 + \frac{e}{5}t^4 + \frac{f}{6}t^5$$

Formel
4-18

Die isobare spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes C_{pH_2O} wird mit folgendem Polynom berechnet:

$$c_{pH_2O}(t) = a_1 + \frac{b_1}{2}t + \frac{c_1}{3}t^2 + \frac{d_1}{4}t^3 + \frac{e_1}{5}t^4$$

Formel
4-19

die isobare spezifische Wärmekapazität von CO_2 analog mit:

$$c_{pCO_2}(t) = a_2 + \frac{b_2}{2}t + \frac{c_2}{3}t^2 + \frac{d_2}{4}t^3 + \frac{e_2}{5}t^4$$

Formel
4-20

Der Gültigkeitsbereich der Wärmekapazitäten liegt zwischen 0 °C und t °C, die Einheit ist $\frac{kJ}{kg \cdot K}$.

Die notwendigen Polynomkoeffizienten sind in Tabelle 4-5 aufgeführt.

Tabelle 4-5: Polynomkoeffizienten zur Bestimmung der integralen isobaren spezifischen Wärmekapazität [3 S. 380]

Wert (\bar{c}_{pAO})			Wert (C_{pH_2O})			Wert (C_{pCO_2})		
a	0,1004173	E+01	a ₁	0,8554535		a ₂	-0,1002311	
b	0,1919210	E-04	b ₁	0,2036005	E-03	b ₂	0,7661864	E-03
c	0,5883483	E-06	c ₁	0,4583082	E-06	c ₂	-0,9259622	E-06
d	-0,7011184	E-09	d ₁	-0,2798080	E-09	d ₂	0,5293496	E-09
e	0,3309525	E-12	e ₁	0,5634413	E-13	e ₂	-0,1093573	E-12
f	-0,5673876	E-16	-	-		-	-	

Der Wassergehalt des Rauchgases x_{H_2O} setzt sich aus dem Wassergehalt der Verbrennungsluft und dem bei der Verbrennung entstandenen Wasser μ_{H_2O} (Formel 4-13) zusammen. Dieser kann über die brennstoffmassenbezogene Rauchgasmasse in zwei Schritten berechnet werden:

$$\mu_{H_2O} = \mu_{H_2Oo} + \mu_{Ld} * x_{H_2OoLd}$$

**Formel
4-21**

$$x_{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_G}$$

**Formel
4-22**

Die proportional zum Brennstoff zugeführten, berücksichtigten Wärmen sind der Brennwert des Brennstoffes H_G und die Enthalpie der Verbrennungsluft J_L . Nicht berücksichtigt wurde die Enthalpie des Erdgases, da eine Temperaturmessung anlagenbedingt nicht möglich war. Nebenrechnungen haben einen sehr geringen Einfluss der Erdgasenthalpie auf den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad gezeigt.

Somit ist die Summe der zugeführten Wärmen:

$$\dot{Q}_{gesamt,brutto} = \dot{m}_F * [H_o + J_L]$$

**Formel
4-23**

J_L kann wie folgt berechnet werden:

$$J_L = \mu_L \bar{c}_{pL} (t_L - t_r)$$

Formel
4-24

Bekannt ist die μ_L (Formel 4-15) und die Verbrennungslufttemperatur t_L . Analog zur Berechnung der integralen isobaren spezifischen Wärmekapazität des Rauchgases lässt sich die Wärmekapazität der Verbrennungsluft berechnen.

$$\bar{c}_{pLo} = \bar{c}_{pLdo} + C_{pH_2O} x_{H_2OL}$$

Formel
4-25

\bar{c}_{pLdo} ist nach Formel 4-15 und C_{pH_2O} nach Formel 4-19 bekannt.

Der auf die feuchte Gesamtmasse bezogene Wassergehalt der Verbrennungsluft x_{H_2OL} lässt sich berechnen durch:

$$x_{H_2OL} = \frac{x_{H_2OLd}}{1 + x_{H_2OLd}}$$

Formel
4-26

so dass $x_{H_2OL} \approx 0,00616 \frac{kg}{kg}$.

Setzt man Formel 4-3 und Formel 4-23 in Formel 4-2, ist der Rauchgasverlust:

$$l_{Rauchgas} = \frac{\dot{Q}_{G,netto}}{\dot{Q}_{gesamt,brutto}} = \frac{\dot{m}_F \mu_G \bar{c}_{pG} (t_G - t_r)}{\dot{m}_F (H_o + J_L)} = \frac{\mu_G \bar{c}_{pG} (t_G - t_r)}{H_o + J_L}$$

Formel
4-27

Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad $\eta_{Feuerungstechnisch}$ ist somit;

$$\eta_{Feuerungstechnisch} = 1 - l_{Rauchgas} = 1 - \frac{\mu_G \bar{c}_{pG} (t_G - t_r)}{H_o + J_L}$$

Formel
4-28

4.2.3 Dampfmassenbezogener Erdgasverbrauch

Der Feuerungstechnische Wirkungsgrad berücksichtigt nur Verluste während der Brennerlaufzeiten. Nicht berücksichtigt werden Verluste durch Abkühlung des Flammrohres während der Brennerstillstandzeiten (Bereitschaftsverluste), Anfahrverluste durch die sicherheitsbedingte Vorlüftung sowie Absalz- und Strahlungsverluste.

Werden alle Verluste bei der Wirkungsgradbestimmung über den Zeitraum eines Jahres bestimmt, erhält man den sogenannten Jahresnutzungsgrad. Meist ist eine quantitative Bestimmung aller Verluste nicht möglich, so dass man die nutzbare Energie zu der eingesetzten Energie ins Verhältnis setzt [20 S. 240].

Der zeitliche und messtechnische Aufwand für dessen Bestimmung wäre für den Umfang dieser Arbeit zu beträchtlich. Daher wurden über die Zeiträume von jeweils einer Woche die dem Kessel entnommene Dampfmenge und der Erdgasverbrauch gemessen und zueinander in Beziehung gesetzt. Man erhält die eingesetzte Erdgasmenge in m³ pro entnommener Dampfmenge in t.

Des Weiteren muss der schwankende Energiegehalt des Erdgases im Verlauf des Messzeitraumes berücksichtigt werden, um mögliche Abweichungen erkennbar zu machen. Eine Mittelung der genauen Heizwerte über die jeweiligen Messzeiträume war messtechnisch nicht möglich. Daher werden die Heizwerte, bezogen auf die Standardbedingung, aller zur Verfügung stehender Heizwerte gemittelt und im Erdgas-Dampfmengenverhältnis folgendermaßen beachtet:

$$\text{Gaseinsatz} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{t}} \right] = \frac{\text{verbrauchtes Erdgasvolumen [m}^3\text{]} * H_{\text{un}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]}{\text{entnommene Dampfmenge [t]}}$$

Formel
4-29

Das Verhältnis von eingesetzter Energie zu entnommener Dampfmenge wird im Folgenden nur Gaseinsatz (GES) genannt. Der GES ohne eingesetzte HTS wird als Referenzwert verwendet, die weiteren GES mit HTS ohne Brennerregelung und mit HTS mit Brennerregelung werden auf diesen Referenzwert bezogen.

4.2.3.1 Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephase

In den ausgewählten Messzeiträumen gab es Perioden, in denen dem Kessel kein Dampf entnommen wurde, so dass der Brenner ausschließlich die Wärmeverluste durch Strahlung und Leitung ausgleichen musste. Der Kesseldruck fiel in diesen Perioden von 8,2 bar auf 7,2 bar, bis der Brenner, bedingt durch die Steuerungsprogrammierung, erneut den Druck auf 8,2 bar erhöhte.

Diese Phasen eignen sich zur vergleichenden Betrachtung der Brennerstillstands- und Brennerlaufzeiten. Zu anderen Zeitpunkten müsste zusätzlich die Dampfenahme berücksichtigt werden, um einen sinnvollen Vergleich durchzuführen. Nach Jeschar sollte sich durch Einbau der HTS die Zeitspanne, in der der Brenner still steht, vergrößern, was

wiederum mit einer Energieeinsparung einhergeht [6 S. 15]. Die resultierende Verlängerung der Brennerlaufzeit ist durch den Energieeintrag in die HTS bedingt.

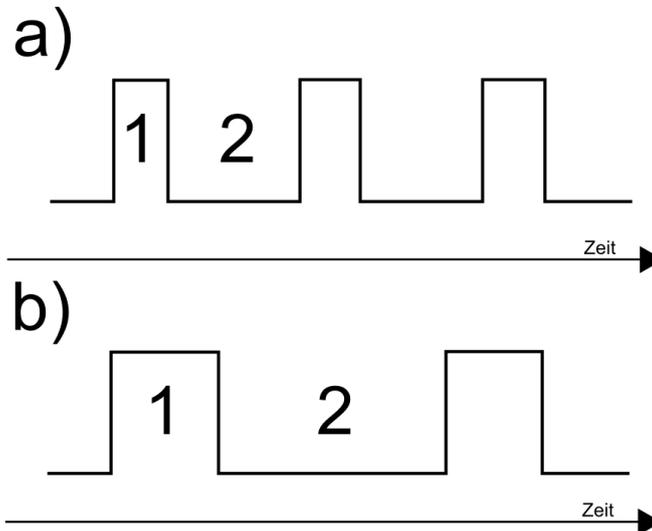


Abbildung 4-1: Erwartete Veränderung des Verhältnisses von Brennerlaufzeiten (1) und Brennerstillstandszeiten (2) ohne (a) und mit (b) HTS (Quelle: Nils Reichhardt, nach [6 S. 15])

Die Leistungsregelung in Abbildung 4-1 entspricht einer Taktung zwischen Nennlast des Brenners und ausgeschaltetem Brenner, die Regelart des Brenners im Großwasserraumkessel der Brauerei Schweiger ist modulierend.

Während der oben genannten Aufheizphasen taktet der Brenner jedoch nur zwischen Kleinlast (13,5 %) und Brennerstillstand. Die Höhe der Kleinlast hat sich auch mit Brennerregelung nicht verringert.

Aus den über die Messzeiträume protokollierten Werten des Abluftsaurestoffes und der Temperatur konnten mit einer Genauigkeit von 0,5 min (Intervall zwischen den einzelnen Messpunkten) die Brennerstillstands- und Brennerlaufzeiten ermittelt werden. Bedingung für die Auswahl der berücksichtigten Zeiten war, dass in diesen Zeiträumen keine Dampfenahme stattfand.

Dies konnte mit den viertelstündlich protokollierten Werten des Dampfmengenzählers gewährleistet werden.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die ausgewerteten Messwerte dargestellt.

5.1 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Es wurden nur die Zeitpunkte zum Vergleich verwendet, bei denen die Brennerleistung abgelesen werden konnte.

Ausgewertet wurden folgende Tage:

- 28.08.2011 (ohne HTS)
- 11.09.2011 (mit HTS, ohne Brennerregelung)
- 25.09.2011 (mit HTS, mit Brennerregelung)

Am 21.08.2011 (ohne HTS) und am 18.09.2011 (mit HTS, mit Brennerregelung) wurde ebenfalls im Laufe einer Nacht gemessen. Diese Werte sind nur im Anhang zu finden, da diese nicht von den anderen Messtagen abweichen und die allgemeine Datendichte bei den anderen Messungen höher ist.

5.1.1 Messung ohne Hochtemperaturspeicher

Diese Messungen fanden im Zeitraum zwischen dem 28.08.2011 (20:19 Uhr) und dem 29.08.2011 (08:06 Uhr) statt. Es waren keine Hochtemperaturspeicher eingebaut.

Tabelle 5-1: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung ohne eingebaute HTS

Zeit	P_{Brenner} [%]	T_{Abgas} [°C]	y_{O_2d} [vol-%]	T_{Luft} [°C]	Niveau Speisewasser [%]	p_{Kessel} [bar]	η [%]
20:50	13,5	174,1	4,4	26,7	66	7,4	93,36
21:49	14,3	178,5	4,3	23,4	74	7,8	93,19
22:19	13,5	176,6	4,2	23,7	67	7,6	93,31
22:34	13,5	176,1	4,2	23,4	75	7,7	93,33
23:04	33,5	190,9	5,2	22,2	69	7,2	92,28
00:04	64,3	171,8	4,5	22,2	62	6,9	93,42
00:18	17,4	181,4	4,8	21,5	68	7,2	92,88
00:48	13,5	173,0	4,3	21,9	74	7,5	93,43
02:19	13,5	172,3	4,3	22,9	73	7,5	93,46
02:49	13,5	173,7	4,3	22,9	66	7,9	93,40
03:19	13,5	173,3	4,3	22,4	72	8,0	93,42
04:04	13,5	171,1	4,4	22,2	64	7,6	93,49
04:19	13,5	170,5	4,7	21,7	76	7,3	93,41

04:34	13,5	167,2	5,3	21,7	68	6,5	93,36
04:49	48,9	193,7	5,0	21,2	65	7,2	92,23
05:05	92,3	230,5	3,9	20,6	65	7,2	90,99
05:19	99,7	233,7	3,7	20,8	62	6,9	90,93
05:35	95,9	233,9	3,8	20,6	71	7,2	90,88
05:50	87,6	233,6	3,9	20,8	65	7,2	90,85
06:05	75,8	225,0	4,1	20,8	67	7,2	91,15
06:20	52,1	206,4	4,9	21,2	67	7,2	91,67
06:35	13,5	184,9	4,2	22,2	72	7,7	92,93
07:05	14,2	178,3	4,6	22,7	74	7,3	93,09
07:20	39,3	177,3	4,6	22,4	66	7,1	93,14
07:35	56,1	195,8	5,1	21,7	73	7,2	92,09

Die maximale Abgastemperatur während der Messungen betrug 236,5 °C ($y_{O_2d} = 3,7 \text{ Vol. -\%}$; $T_{\text{Luft}} = 20,6 \text{ °C}$), was einem Feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 90,80 % entspricht.

Im Gegensatz zu den nachfolgenden Messungen ist der Umfang der ausgewählten Messpunkte geringer ausgefallen, da zu weniger Zeitpunkten der viertelstündlichen Messungen die Brennerleistung, bedingt durch den abgeschalteten Brenner, abzulesen war.

5.1.2 Messung mit Hochtemperaturspeicher, ohne Brennerregelung

Diese Messungen fanden im Zeitraum zwischen dem 11.09.2011 (20:21 Uhr) und dem 12.09.2011 (07:57 Uhr) statt. Im Flammrohr waren zehn Speicherkeramiken installiert, der Brenner nicht geregelt.

Tabelle 5-2: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung mit eingebauten HTS, ohne Brennerregelung

Zeit	P_{Brenner} [%]	T_{Abgas} [°C]	y_{O_2d} [vol-%]	T_{Luft} [°C]	Niveau Speisewasser [%]	p_{Kessel} [bar]	η [%]
20:21	39,3	182,0	3,3	30,1	65	7,2	93,37
20:35	22,7	180,8	3,5	30,1	64	7,2	93,36
20:50	19,4	181,8	3,5	30,1	65	7,2	93,32
21:06	14,2	177,6	3,4	30,1	68	7,3	93,53
21:21	27,5	183,2	3,6	30,1	70	7,2	93,23
21:36	22,8	184,4	3,7	29,4	69	7,2	93,14
21:51	13,5	201,3	3,9	29,7	65	7,3	92,33

22:08	45,6	182,7	3,5	29,1	72	7,2	93,28
22:23	22,0	194,9	4,4	28,8	73	7,3	92,43
22:38	47,0	201,1	4,1	28,8	66	7,2	92,26
22:54	14,4	180,7	4,0	28,5	73	7,5	93,20
23:54	13,5	172,5	3,8	27,8	66	7,2	93,63
00:24	13,5	174,4	3,7	27,5	72	8,1	93,57
00:54	13,5	173,6	3,7	27,5	67	8,1	93,61
01:24	13,5	171,8	3,7	27,5	74	7,8	93,67
01:39	13,5	174,4	3,7	26,9	69	7,6	93,57
02:09	13,5	172,9	3,7	26,9	65	7,7	93,65
02:39	26,0	182,5	3,9	26,9	74	7,2	93,15
02:54	28,6	183,1	4,2	26,7	72	7,2	93,03
03:09	24,3	184,0	4,1	26,7	71	7,2	93,02
03:25	14,0	177,5	3,8	26,4	74	7,9	93,40
04:10	99,7	225,6	3,2	25,8	74	6,9	91,51
04:25	45,7	196,9	4,5	25,8	69	7,2	92,29
04:40	43,5	195,9	4,6	26,4	62	7,2	92,30
04:55	57,9	203,8	4,3	26,4	68	7,2	92,06
05:10	42,8	194,3	4,5	26,1	72	7,2	92,41
05:25	70,8	213,4	4,1	26,4	65	7,1	91,70
05:40	61,7	216,4	3,8	26,1	73	7,2	91,68
05:56	32,8	196,5	4,4	26,4	63	7,4	92,35
06:10	41,0	196,3	4,7	26,1	72	7,2	92,24
06:25	62,1	206,4	4,2	26,1	68	7,2	91,98
06:40	33,8	191,7	4,8	25,8	71	7,2	92,41
06:56	14,1	180,3	4,0	26,1	71	7,5	93,22
07:11	14,1	179,9	4,0	25,8	64	7,7	93,23
07:26	36,2	194,1	4,7	25,5	66	7,2	92,34
07:43	71,5	202,0	4,4	25,8	73	7,2	92,10
07:57	50,2	200,8	4,5	26,1	68	7,1	92,12

Die maximale Abgastemperatur während der Messungen betrug 231,1 °C ($y_{O_2,d} = 3,1 \text{ Vol. -\%}$; $T_{\text{Luft}} = 26,4 \text{ °C}$), was einem Feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 91,31 % entspricht.

5.1.3 Messung mit HTS, mit Brennerregelung

Diese Messungen fanden im Zeitraum zwischen dem 25.09.2011 (19:48 Uhr) und dem 26.09.2011 (07:21 Uhr) statt. Die Brennerleistung wurde um 10 % des von der Steuerung vorgegebenen Wertes zurückgenommen.

Tabelle 5-3: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung mit eingebauten HTS, mit Brennerregelung

Zeit	P _{Brenner} [%]	T _{Abgas} [°C]	y _{O_{2d}} [vol-%]	T _{Luft} [°C]	Niveau Speisewasser [%]	p _{Kessel} [bar]	η [%]
19:50	89,7	182,2	4,2	26,1	71	5,0	93,07
20:05	24,9	178,9	4,1	25,3	64	7,2	93,24
20:20	13,5	176,0	3,7	24,7	68	7,7	93,49
20:50	13,5	173,1	3,8	24,4	63	7,6	93,59
22:06	13,5	174,2	3,8	23,4	72	7,7	93,54
22:36	13,5	174,3	4,0	22,4	74	7,9	93,47
22:51	14,3	177,1	4,2	22,2	74	7,7	93,28
23:06	13,5	178,1	3,9	22,2	74	8,1	93,33
23:36	13,5	175,3	4,0	22,2	70	8,0	93,43
00:06	21,2	179,8	4,6	21,7	64	7,2	93,02
01:22	13,5	174,9	4,1	21,2	74	8,1	93,41
01:52	50,8	199,6	4,7	21,9	74	7,2	92,08
02:07	56,8	203,7	4,6	21,7	63	7,2	91,93
02:37	73,7	212,0	4,4	22,2	62	7,1	91,63
02:52	53,4	199,4	4,9	22,2	65	7,2	92,01
03:07	15,9	185,7	4,1	21,7	74	7,2	92,93
03:22	13,5	180,0	4,0	21,9	68	7,7	93,22
03:53	13,5	177,9	4,0	21,7	71	8,0	93,31
04:22	55,1	204,4	4,6	21,5	72	7,2	91,89
04:37	40,6	194,0	5,1	21,5	70	7,2	92,18
04:53	73,3	212,5	4,4	21,0	72	6,9	91,60
05:08	67,4	210,7	4,6	21,0	63	7,2	91,60
05:23	58,3	207,8	4,7	21,0	70	7,2	91,69
05:38	42,8	198,5	5,2	20,8	71	7,2	91,93
05:53	52,2	201,6	5,0	21,0	62	7,2	91,86
06:08	13,5	183,4	4,2	20,8	63	8,1	92,99
06:23	13,5	178,4	4,3	21,2	73	7,5	93,19
06:54	13,5	175,6	4,5	20,3	64	7,6	93,25
07:09	13,5	176,4	4,6	19,7	73	7,8	93,17

Die maximale Abgastemperatur während der Messungen betrug 225,9 °C ($y_{O_2d} = 3,5 \text{ Vol. -\%}$; $T_{Luft} = 22,2 \text{ °C}$), was einem Feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 91,37 % entspricht.

5.2 Gaseinsatz

Die Ergebnisse des Gaseinsatzes (GES) sind in Tabelle 5-4 aufgelistet und in Abbildung 5-1 graphisch dargestellt.

Der Messzeitraum ohne Hochtemperaturspeicher (HTS) lag zwischen dem 22.08.2011, 6:30 Uhr und dem 28.08.2011, 20:19 Uhr.

Der Messzeitraum mit HTS, ohne Brennerregelung lag zwischen dem 12.09.2011, 7:57 Uhr und dem 18.09.2011, 19:52 Uhr.

Der Messzeitraum mit HTS, mit Brennerregelung lag zwischen dem 19.09.2011, 7:56 Uhr und dem 25.09.2011, 19:48 Uhr.

Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der mittleren GES des Großwasserraumkessels der Brauerei Schweiger

	Messdauer [h]	$\overline{GES} \left[\frac{MJ}{t} \right]$	GES relativ [%]	Einsparung [%]
ohne HTS	157,82	3755,44	100,00	-
mit HTS, ohne Regelung	155,92	3334,72	88,8	11,2
mit HTS, mit Regelung	155,87	3484,78	92,8	7,2

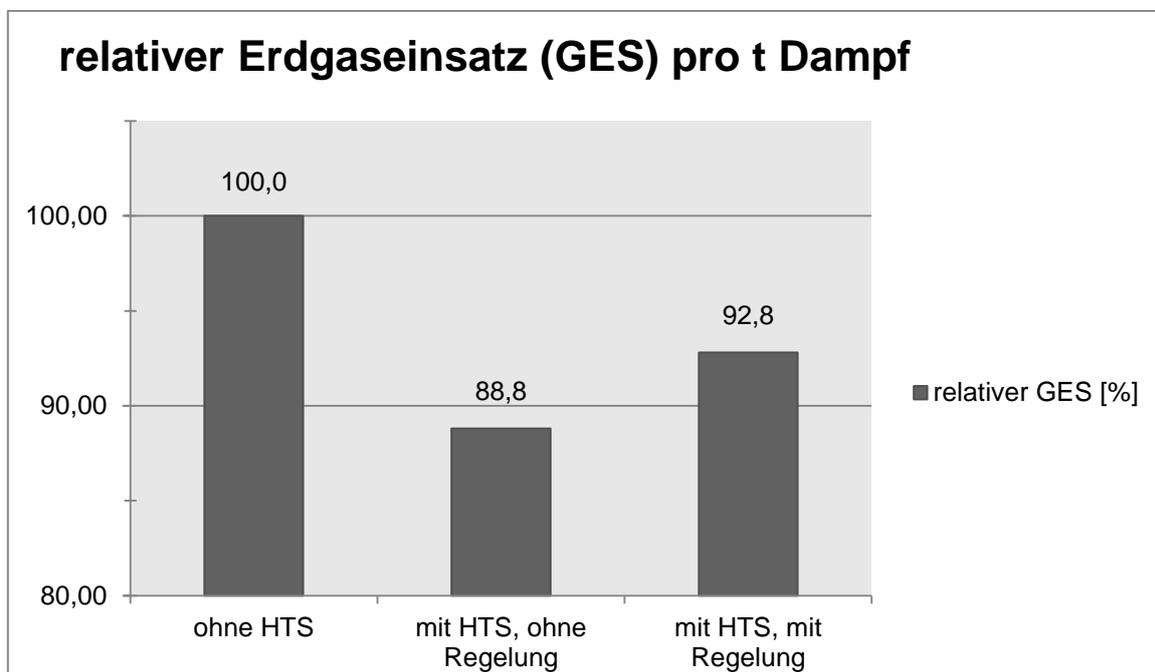


Abbildung 5-1: Relativer GES ohne HTS, mit HTS ohne Regelung und mit HTS mit Regelung

5.3 Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephase

In folgende Tabellen werden die ermittelten Zeitintervalle zwischen den einzelnen Takten in der Heißhaltephase aufgelistet. Ebenso werden die Mittelwerte und Stichprobenvarianzen berechnet.

Tabelle 5-5: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 28.08.2011 und dem 29.08.2011

Brenner aktiv [min]	Brenner inaktiv [min]
9,5	17,0
8,5	17,5
12,0	15,5
8,5	16,5
$\bar{\emptyset} = 9,6 \pm 1,7$	$\bar{\emptyset} = 16,6 \pm 0,9$

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 11.09.2011 und dem 12.09.2011

Brenner aktiv [min]	Brenner inaktiv [min]
9,5	29,0
9,0	16,0
9,0	13,0
9,0	21,5
-	20,0
$\bar{\emptyset} = 9,1 \pm 0,3$	$\bar{\emptyset} = 19,9 \pm 6,1$

Tabelle 5-7: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 25.09.2011 und dem 26.09.2011

Brenner aktiv [min]	Brenner inaktiv [min]
19,0	22,5
9,5	19,5
9,0	19,5
13,0	21,5
-	20,0
$\bar{\emptyset} = 12,6 \pm 4,6$	$\bar{\emptyset} = 20,6 \pm 1,3$

5.4 Allgemeine Steuerungswerte

Über die Steuerungsvisualisierung ließen sich noch die Anzahl der Brennerstarts, die Höhe der Brennerbetriebsstunden und der Kesselbetriebsstunden auslesen.

Diese Werte wurden zueinander ins Verhältnis gesetzt und zusätzlich der Gasverbrauch pro Brennerbetriebsstunde berechnet.

Der Messzeitraum ohne HTS lag zwischen dem 22.08.2011, 6:30 Uhr und dem 28.08.2011, 20:19 Uhr.

Der Messzeitraum mit HTS, ohne Brennerregelung lag zwischen dem 12.09.2011, 7:57 Uhr und dem 18.09.2011, 19:52 Uhr.

Der Messzeitraum mit HTS, mit Brennerregelung lag zwischen dem 19.09.2011, 7:56 Uhr und dem 25.09.2011, 19:48 Uhr.

5.4.1 Messung ohne HTS

Tabelle 5-8: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum ohne HTS

Kesselbetriebsstunden [h]	167,10
Brennerstarts	189
Brennerbetriebsstunden [h]	63,93
Gasverbrauch [m ³]	4728
Starts/Kesselbetriebsstunde [h ⁻¹]	1,13
Brennerbetriebsstunden/Start [h]	0,34
Gasverbrauch/Brennerbetriebsstunde [m ³ /h]	73,96

5.4.2 Messung mit HTS, ohne Brennerregelung

Tabelle 5-9: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum mit HTS, ohne Brennerregelung

Kesselbetriebsstunden [h]	165,28
Brennerstarts	157
Brennerbetriebsstunden [h]	74,37
Gasverbrauch [m ³]	5785
Starts/Kesselbetriebsstunde [h ⁻¹]	0,95
Brennerbetriebsstunden/Start [h]	0,47
Gasverbrauch/Brennerbetriebsstunde [m ³ /h]	77,79

5.4.3 Messung mit HTS, mit Brennerregelung

Tabelle 5-10: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum mit HTS, mit Brennerregelung

Kesselbetriebsstunden [h]	153,82
Brennerstarts	163
Brennerbetriebsstunden [h]	67,08
Gasverbrauch [m ³]	5376
Starts/Kesselbetriebsstunde [h ⁻¹]	1,06
Brennerbetriebsstunden/Start [h]	0,41
Gasverbrauch/Brennerbetriebsstunde [m ³ /h]	80,14

6 Diskussion

Vergleicht man die Feuerungstechnischen Wirkungsgrade für ähnliche Füllstände und Brennerleistungen, lässt sich keine Konsistenz für einen Zusammenhang zwischen Wirkungsgradverbesserung und dem Einbau der Hochtemperaturspeicher (HTS) feststellen.

Tabelle 6-1: Zwei Gegenüberstellungen von Feuerungstechnischen Wirkungsgraden ohne HTS, mit HTS und ohne Brennerregelung und mit HTS und mit Brennerregelung

	Zeit	P_{Brenner} [%]	T_{Abgas} [°C]	y_{O_2d} [vol-%]	T_{Luft} [°C]	Niveau Speisewasser [%]	p_{Kessel} [bar]	η [%]
ohne HTS	20:50	13,5	174,1	4,4	26,7	66	7,4	93,36
HTS	23:54	13,5	172,5	3,8	27,8	66	7,2	93,63
HTS + Regelung	06:54	13,5	175,6	4,5	20,3	64	7,6	93,25
ohne HTS	06:20	52,1	206,4	4,9	21,2	67	7,2	91,67
HTS	07:57	50,2	200,8	4,5	26,1	68	7,1	92,12
HTS + Regelung	05:53	52,2	201,6	5,0	21,0	62	7,2	91,86

Lediglich die Wirkungsgrade, bei den während der Messung kurzfristig bei voller Brennerleistung auftretenden Maximaltemperaturen, lassen eine Unterscheidung zu. Ohne HTS betrug der Feuerungstechnische Wirkungsgrad 90,8 %, mit HTS ohne Brennereinstellung 91,3 % und mit HTS, mit Brennereinstellung 91,4 %, was einer Verbesserung von 0,5 bzw. 0,6 Prozentpunkten entspricht.

Die Fähigkeit von HTS, in kurzfristigen Brennerleistungsspitzen Wärme aufzunehmen und bei reduzierten Brennerleistungen diese wieder abzugeben, erklärt dieses Ergebnis. Die geringfügige Verbesserung des Wirkungsgrades bei eingebauten HTS und reduzierter Brennerleistung wird durch eben diese Leistungsreduzierung hervorgerufen.

Niedrige Brennerleistungen führen zu erhöhten Feuerungstechnischen Wirkungsgraden, da die Strömungsgeschwindigkeit verlangsamt wird und der Wärmeaustausch im Flammrohr und in den Rauchrohren verbessert wird.

Jedoch sollte die Fähigkeit der HTS, Leistungsspitzen aufzunehmen, nicht überbewertet werden, da diese nur in sehr kurzen Zeiträumen bis 1 min möglich ist.

Der Kessel der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co KG ist für 5 t/h Dampf ausgelegt, welche zu keinem Messzeitpunkt abgerufen wurden. Die Brennerleistungsspitzen traten während der Leistungsregelung der Steuerung nach einer kurzfristigen Entnahme von bis zu 4 t/h Dampf auf. Bei diesem Dampfstrom ist die volle Brennerleistung nicht notwendig. Sollten dem Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkessel (DFK) über einen längeren

Zeitraum knapp 5 t/h Dampf entnommen werden, wird sich der Feuerungstechnische Wirkungsgrad mit HTS dem Wirkungsgrad ohne HTS angleichen.

Diese Erkenntnis scheint im Widerspruch zu der numerischen Simulation des GWI zu stehen, welche wegen einer um 18 % besseren Wärmeübertragung im Flammrohr mit eingebauten HTS eine Wirkungsgradverbesserung prognostizierte [7 S. 11].

Jedoch wurde in der Simulation ausschließlich ein Kessel mit einem Flammrohr, nicht jedoch die Nachschaltung von zwei Rauchgaszügen berücksichtigt. Sofern eine bessere Wärmeübertragung im Flammrohr stattfindet, ist die Temperaturdifferenz der Rauchgase zum Kesselwasser bei Erreichen der ersten Wendekammer schon geringer, was wiederum zu einem verringerten Wärmestrom in den Rauchrohren führt.

Eine Verlängerung der Brennerstillstandzeiten konnte während der Intervalle, in denen keine Dampfenahme stattfand, ebenfalls beobachtet werden. Im Mittel liegen diese bei 3,0–4,0 min, die relativ hohe Streuung der Werte lässt aber keine eindeutigen Schlüsse zu. Der Verlängerung der Brennerstillstandzeiten steht eine Verlängerung der Heizzeiten von 3,0–3,5 min gegenüber. Die hohe Streuung der Messwerte lässt hier ebenfalls keine signifikanten Schlüsse zu.

Im Vergleich der allgemeinen Werte der Brennerstatistik nahm die Anzahl der Brennerbetriebsstunden pro Start mit Einbau der HTS zu, die Anzahl der Brennerstarts pro Kesselbetriebsstunde nahm hingegen ab. Diese Erkenntnis bestätigt die unsicheren Werte der Messung der Brennerstillstandzeiten in den kurzen Zeiträumen.

Lediglich der Gasverbrauch pro Brennerbetriebsstunde nahm mit Einbau der HTS zu. Ohne einen Vergleich zur entnommenen Dampfmasse sind diese Werte nicht aussagekräftig. Während der Messungen mit HTS wurden 9-14 t mehr Dampf entnommen, was einer relativen Massenzunahme von 22-34 % entspricht. Die Zunahme des Gasverbrauchs pro Brennerbetriebsstunde liegt dagegen nur bei 5,1-8,4 %.

Stellt man die eingesetzte Gasmenge unter Berücksichtigung eventueller Heizwertschwankungen der entnommenen Dampfmasse gegenüber, zeigt sich für die relativ kurzen dokumentierten Zeiträume eine Einsparung von 7,2 % (mit HTS und mit Brennerregelung) und 11,2 % (mit HTS und ohne Brennerregelung) bei dem Gaseinsatz (GES). Die höhere Einsparung im Zeitraum, in dem die Brennerleistung nicht reduziert wurde, kann in einer unterschiedlichen Auslastung des DFK begründet liegen. Eine Messung über längere Zeiträume von mehreren Wochen bis Monaten könnte diese Unterschiede bestätigen, aber auch widerlegen. Kurze Aufzeichnungszeiträume unterliegen größeren Schwankungen.

Der Trend der durchgeführten Auswertungen zeigt eine Einsparung, insbesondere der Vergleich des GES. Dies bestätigt die theoretischen Überlegungen von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Jeschar, welcher Einsparmöglichkeiten außerhalb der Heizzeiten durch den Einsatz von HTS größere Bedeutung zumaß, als während der Heizzeiten.

Die Wärmeabgabe der HTS an das Kesselwasser, die Erhöhung des Strömungswiderstandes der durch den Kessel gesaugten Luft und die Reduzierung ihres Volumens durch die erniedrigte Dichte werden in seinem Gutachten als maßgebliche Effekte angeführt [6].

Abschließend ist zu sagen, dass eine mittlere Erdgaseinsparung von 9,2 % bei ursprünglichen Kosten für Erdgas von beispielsweise 6000 Euro pro Monat eine Ersparnis von 552 Euro pro Monat bewirkt. Neben dem finanziellen Vorteil kann auch eine Verringerung der Emissionen angeführt werden. Bei einem monatlichen Verbrauch von ca. 25000 m³ Erdgas werden ca. 51500 kg Kohlenstoffdioxid emittiert. Werden 9,2 % weniger Erdgas verbrannt, entstehen somit monatlich 4730 kg weniger Kohlenstoffdioxid.

7 Literaturverzeichnis

1. **Brandt, Fritz.** *Dampferzeuger.* Essen : Vulkan Verlag, 1999. 3-8027-3504-8.
2. **Hirschberg, Hans Günther.** *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau.* Berlin : Springer, 1999. 3-540-60623-8.
3. **Rietschel, Hermann.** *Raumklimatechnik 1. Grundlagen.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1994. 3-540-54466-6.
4. **Rudolph, Manfred und Wagner, Ulrich.** *Energieanwendungstechnik.* Berlin : Springer, 2008. 978-3-540-79021-1.
5. **Effenberger, Helmut.** *Dampferzeugung.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2000. 3-540-64175-0.
6. **Jeschar, Rudolf.** *Gutachten über Energieeinsparung bei Kessel zur Erzeugung von Heißwasser und Prozessdampf mittels Hochtemperaturwärmespeicher (HTS).* Clausthal : s.n.
7. **Dipl. Ing. Eren Tali.** *Numerische Simulation der thermischen Belastung eines Flammrohrs nach Einbau von Hochtemperaturwärmespeichern (HTS) im Kessel zur Erzeugung von Warmwasser.* Essen : Gaswärme-Institut e.V., 2011.
8. **Dubbel.** *Taschenbuch für den Maschinenbau.* Berlin : Springer, 2005. 3-540-22142-5.
9. **Ruß, Winfried.** *Energieversorgung technischer Prozesse, Skript Brennstoffe Sommersemester 11.* Freising : Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie, 2011.
10. **GmbH, Loos International.** *Kesselkörperzeichnung.* Gunzenhausen : s.n., 1982.
11. **Hr. Rissland, Loos International GmbH.** *Telefonische Auskunft.* 2011.
12. **Max Weishaupt GmbH.** *Produktinformation über digitales Feuerungsmanagement,* <http://www.weishaupt.co.at/local/documentBase/de/2014-D-08-07.pdf>. Schwendi : (zuletzt abgerufen am 15.01.2011), 2007.
13. **Herwig, Heinz.** *Wärmeübertragung A-Z.* Berlin : Springer, 2000. 3-540-66852-7.
14. **Hering, Ekbert, Martin, Rolf und Stohrer, Martin.** *Physik für Ingenieure.* Berlin : Springer, 2007. 978-3-540-71855-0.
15. **Hr. Lübel, Loos International GmbH.** *Telefonische Auskunft.* 2011.
16. **Siemens AG.** *Wasserdampftafel.* https://www.hqs.sbt.siemens.com/gip/general/dlc/data/assets/hq/Wasserdampftafel_20463_hq-en.pdf.
17. **DIN EN 12953-11.** *Großwasserraumkessel Teil 11: Abnahmeversuche.* Berlin : Beuth Verlag, 2003. DIN EN 12953-11:2003-12.
18. **Cerbe, Günther.** *Grundlagen der Gastechnik.* München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2008. 978-3-446-41352-8.
19. **Bayerngas GmbH, München.** *Gasanalysen.* München : s.n., 2012.

20. **Schmid, Christiane.** *Energieeffizienz in Unternehmen.* Zürich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2004. 3-7281-2951-8.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Daten des Großwasserraumkessels der Privatbrauerei Schweiger GmbH & Co KG [10]	7
Tabelle 4-1: Eingesetzte Analysegeräte und Materialien	13
Tabelle 4-2: μ_{Ld} , μ_{Gd} , V_{Gd} , μ_{CO_2} , und μ_{H_2O} der Brennstoffbestandteile (stöchiometrische Verbrennung) [17 S. 25]	18
Tabelle 4-3: Reaktionsgleichungen der berücksichtigten brennbaren Bestandteile mit Sauerstoff.....	19
Tabelle 4-4: Molare Masse, molares Normvolumen, Brennwert und Heizwert der Brennstoffbestandteile [17 S. 24].....	19
Tabelle 4-5: Polynomkoeffizienten zur Bestimmung der integralen isobaren spezifischen Wärmekapazität [3 S. 380]	22
Tabelle 5-1: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung ohne eingebaute HTS.....	26
Tabelle 5-2: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung mit eingebauten HTS, ohne Brennerregelung.....	27
Tabelle 5-3: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad von Messpunkten mit bekannter Brennerleistung mit eingebauten HTS, mit Brennerregelung	29
Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der mittleren GES des Großwasserraumkessels der Brauerei Schweiger	30
Tabelle 5-5: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 28.08.2011 und dem 29.08.2011.....	31
Tabelle 5-6: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 11.09.2011 und dem 12.09.2011.....	31
Tabelle 5-7: Gegenüberstellung von Brennerstillstand- und Brennerlaufzeiten während der Heißhaltephasen zwischen dem 25.09.2011 und dem 26.09.2011.....	31
Tabelle 5-8: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum ohne HTS	32
Tabelle 5-9: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum mit HTS, ohne Brennerregelung	32
Tabelle 5-10: Allgemeine Brennerwerte über den Messzeitraum mit HTS, mit Brennerregelung	33
Tabelle 6-1: Zwei Gegenüberstellungen von Feuerungstechnischen Wirkungsgraden ohne HTS, mit HTS und ohne Brennerregelung und mit HTS und mit Brennerregelung.....	34

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Schematischer Strömungsverlauf in Dreizug-Flammrohr-Rauchrohrkesseln (Aufsicht). 1 Brenner, 2 Flammrohr, 3 erste Wendekammer, 4 zweite Wendekammer, 5 Rauchrohrbündel, 6 Kamin (Quelle: Nils Reichhardt)	5
Abbildung 3-2: Resultierende Geschwindigkeiten [m/s] und der Vektorenverlauf in der vertikalen Mittelebene für den herkömmlichen Kessel (oben) und den Kessel mit Speicherelementen (unten). (Quelle: Dipl. Ing. Eren Tali [7 S. 6])	10
Abbildung 3-3: Flammrohr vor Einbau der HTS mit Sicht auf den Brenner (Quelle: Klaus Lehmann, MoonPower)	12
Abbildung 3-4: Flammrohr nach Einbau der HTS mit Sicht auf das Einstiegsloch (Quelle: Klaus Lehmann, MoonPower)	12
Abbildung 4-1: Erwartete Veränderung des Verhältnisses von Brennerlaufzeiten (1) und Brennerstillstandszeiten (2) ohne (a) und mit (b) HTS (Quelle: Nils Reichhardt, nach [6 S. 15])	25
Abbildung 5-1: Relativer GES ohne HTS, mit HTS ohne Regelung und mit HTS mit Regelung	30

10 Formelverzeichnis

Formel 3-1	11
Formel 3-2	11
Formel 4-1	17
Formel 4-2	17
Formel 4-3	17
Formel 4-4	19
Formel 4-5	19
Formel 4-6	19
Formel 4-7	19
Formel 4-8	19
Formel 4-9	19
Formel 4-10	20
Formel 4-11	20
Formel 4-12	20
Formel 4-13	20
Formel 4-14	20
Formel 4-15	20
Formel 4-16	21
Formel 4-17	21
Formel 4-18	21
Formel 4-19	21
Formel 4-20	21
Formel 4-21	22
Formel 4-22	22
Formel 4-23	22
Formel 4-24	23
Formel 4-25	23
Formel 4-26	23
Formel 4-27	23
Formel 4-28	23
Formel 4-29	24