

**Universität Stuttgart**

# **Emissionen flüssiggasbetriebener Heizungsanlagen**



**Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)**



## Emissionen flüssiggasbetriebener Heizungsanlagen

---

**Dr.-Ing. Michael Struschka**  
**M.Sc. Winfried Juschka**  
**cand. B.Sc. mach. Anika Bofinger**  
**cand. B.Sc. mach. Marius Schwarz**

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 6 8275  
[ifk@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:ifk@ifk.uni-stuttgart.de)  
[www.ifk.uni-stuttgart.de](http://www.ifk.uni-stuttgart.de)

---

Untersuchung im Auftrag des  
Deutschen Verbandes Flüssiggas e. V.,  
Stralauer Platz 33 - 34, 10243 Berlin

Oktober 2016



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2 Versuchsaufbau und Methodik</b>	<b>10</b>
2.1 Wärmebedarfskurven	11
2.2 Messstrecke	13
2.3 Verwendete Messtechnik	14
2.3.1 Staubmessung	15
2.3.2 SO <sub>x</sub> -Messung	17
2.4 Flüssiggas	18
2.5 Heizgeräte	20
<b>3 Ergebnisse</b>	<b>23</b>
3.1 Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis	24
3.2 Gas-Brennwertkessel	27
3.3 Niedertemperatur-Gas-Heizkessel	30
<b>4 Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger</b>	<b>33</b>
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>36</b>

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2.1: vereinfachter schematischer Aufbau des Prüfstands zur Untersuchung der Flüssiggasgeräte am Beispiel des Mikro-KWK-Gerätes	10
Abbildung 2.2: Heizlastkurven für die Emissionsuntersuchungen an Heizgeräten für Flüssiggas (mittlere Kesselauslastung ist auf die Nennwärmeleistung des Heizkessels bezogen)	12
Abbildung 2.3: Messstrecke und Messpositionen für die Gas- und Staubprobenahmen	13
Abbildung 2.4: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Gasprobenahme	15
Abbildung 2.5: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Staubprobenahme	17
Abbildung 2.6: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur SO <sub>x</sub> -Probenahme	18
Abbildung 2.7: Flüssiggastank zur Versorgung der Heizgeräte während den Untersuchungen	19
Abbildung 2.8: Einhausung am bodenstehenden Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner für die Untersuchungen	22
Abbildung 3.1: Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – beispielhafte Verläufe der Wärmeleistungen für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“ (oben) und „mild“ (unten)	25
Abbildung 3.2: Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von CO <sub>2</sub> , CO, VOC und NO <sub>x</sub> für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“	26
Abbildung 3.3: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – beispielhafter Verlauf der Wärmeleistungen für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“	28
Abbildung 3.4: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von CO <sub>2</sub> , CO, VOC und NO <sub>x</sub> für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“	28
Abbildung 3.5: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von CO <sub>2</sub> und der vorgegebenen Wärmeleistung für die ersten 8 Stunden der Heizlastkurve Wintertag „kalt“	31
Abbildung 3.6: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von NO <sub>x</sub> , CO und VOC für die ersten zwei Stunden der Heizlastkurve Wintertag „kalt“	31
Abbildung 3.7: links: Metallpartikel auf dem Filtermaterial des Staubfilters (Vorversuch) rechts: Mikroskopaufnahme der Metallpartikel	32

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2.1:	Überblick über die verwendeten Geräte für die kontinuierlichen Messungen	14
Tabelle 2.2:	Analysenergebnisse des eingesetzten Flüssiggases für die Untersuchungen an den drei Heizgeräten [PetroLab, 2015]	19
Tabelle 2.3:	Überblick technische Daten für das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis nach Herstellerangaben	20
Tabelle 2.4:	Überblick technische Daten des Gas-Brennwertkessels mit modulierendem Gasbrenner nach Herstellerangaben	21
Tabelle 2.5:	Überblick technische Daten des Niedertemperatur-Gas-Heizkessels mit einstufigem Vormischbrenner nach Herstellerangaben	22
Tabelle 3.1:	Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO <sub>2</sub> -Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven	24
Tabelle 3.2:	Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO <sub>2</sub> -Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven	27
Tabelle 3.3:	Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – Bilder, Probenahmedauer und Masse auf den Staubfiltern für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven	29
Tabelle 3.4:	Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO <sub>2</sub> -Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven	30
Tabelle 3.5:	Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – Bilder, Probenahmedauer und Masse auf den Staubfiltern für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven	32
Tabelle 4.1:	Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger – Ergebnisse der aktuellen im Vergleich mit vorangegangenen Untersuchungen	33
Tabelle 4.2:	Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger – Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen für den Dauerbetrieb und Angaben zu Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand der Haushalte in Deutschland im Jahr 2008	35



## Zusammenfassung

---

Für die Energieversorgung im ländlichen Raum stehen nicht alle Energieträger flächen-deckend zur Verfügung. In Gegenden mit geringer Besiedelungsdichte ist aufgrund der hohen Infrastrukturkosten oft keine netzgebundene Versorgung möglich, zum Beispiel mittels Erdgas oder Fernwärme. Daher wird dort auf nicht leitungsgebundene Energie-träger wie Flüssiggas, Heizöl EL oder Holzpellets zurückgegriffen.

Bei den mit Flüssiggas betriebenen Feuerungsanlagen handelt es sich in der Regel um Gasgeräte der Kategorie II (geeignet für zwei Gasfamilien), welche mit unterschiedlicher Düsenkonfiguration und Geräteeinstellung sowohl für Erdgas als auch für Flüssiggas ein-setzbar sind. Für diese Geräte lagen bisher keine öffentlich zugänglichen Emissionsdaten für den Betrieb mit Flüssiggas vor.

Aus diesem Grund wurde das IFK vom Deutschen Verband Flüssiggas e. V. (DVFG) beauf-tragt, das Emissionsverhalten von mit Flüssiggas betriebenen Heizungssystemen unter praxisnahen Bedingungen auf dem Prüfstand zu untersuchen. Die Untersuchungen erfolgten an drei Geräten unterschiedlicher Technologiestufen:

- an einem bodenstehenden Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner,
- an einem bodenstehenden Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner und
- an einer stromerzeugenden Heizung als Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsgerät (Mikro-KWK-Gerät) auf Stirling-Basis.

Die Messungen erfolgten mit realitätsnahen charakteristischen Wärmebelastungen sowie bei Nennwärmebelastung im Dauerbetrieb. Hierbei wurden unter anderem die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds – VOC) und Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) im Abgas kontinuierlich gemessen. Die Staubemissionen wurden gravimetrisch als Mittelwert für die gesamte Versuchszeit bestimmt.

Ein Vergleich der aktuell ermittelten Emissionsfaktoren für die mit Flüssiggas betriebenen Heizgeräte mit bereits vorliegenden Untersuchungsergebnissen an Heizkesseln für Heizöl EL und für Pellets, die unter vergleichbaren Randbedingungen erzielt wurden, zeigt:

- Für Kohlenmonoxid liegen alle ermittelten Emissionsfaktoren der Flüssiggasgeräte, mit Ausnahme des Mikro-KWK, unter 10 mg/MJ. Pelletkessel emittieren im modulierenden Betrieb ein Vielfaches an CO (Faktor 20 - 100).
- Der Emissionsfaktor für Staub liegt bei den Flüssiggasgeräten mit 0,019 mg/MJ (Mittelwert für alle untersuchten Geräte und Wärmeleistungen) deutlich niedriger als bei den Pelletkesseln (Mittelwert aller untersuchten Kessel und Wärmeleistungen: 27 mg/MJ).

- Stickoxide wurden in den älteren Untersuchungen nur an einem Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL (Standardqualität) im Dauerbetrieb ermittelt. Dabei liegen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen auf einem ähnlichen absoluten Niveau wie beim gleichwertigen Gasgerät, wobei der Flüssiggas-Niedertemperaturkessel im gemessenen Fall einen um ca. 40 Prozent geringeren Emissionsfaktor im Dauerbetrieb im Vergleich zum Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL aufweist.
- Das Mikro-KWK weist im Vergleich der Flüssiggasgeräte untereinander etwas höhere spezifische  $\text{NO}_x$ -Emissionen auf; dies kann im komplexeren Aufbau der Anlage begründet sein. Auf europäischer Ebene wird diesem Anlagentyp daher auch ein 25 Prozent höherer  $\text{NO}_x$ -Grenzwert [Verordnung (EU) Nr. 813/2013:2013-08-02] zugestanden.

Eine weitere Vergleichsbasis bilden die aktuell gültigen Emissionsfaktoren der einzelnen Gerätekategorien für den Anlagenbestand in Deutschland. Diese werden rechnerisch über den gesamten Anlagenbestand der Geräte differenziert nach dem jeweiligen Energieträger ermittelt und repräsentieren den Querschnitt der Bestandsgeräte. Im Vergleich der Emissionsfaktoren für den Dauerbetrieb der untersuchten Flüssiggasgeräte zeigen die Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand ein mögliches Emissionsminderungspotenzial auf, welches sich bei einem Gerätetausch ergeben kann. Dabei ist auch zu erwarten, dass mit Neugeräten bei sachgerechter Installation und Einstellung ein höherer Jahresnutzungsgrad in der Praxis erreichbar ist, wodurch letztlich der Endenergieverbrauch reduziert werden kann. Beim Vergleich der Emissionsfaktoren für die marktüblichen Flüssiggasgeräte mit denen des Anlagenbestandes für Heizkessel EL und für Holzpellets zeigen sich auch die deutlichsten Unterschiede, da im Anlagenbestand vor allem bei den Ölgeräten ältere Geräte dominieren:

- Die Emissionsfaktoren für VOC unterscheiden sich für alle aufgeführten Geräteklassen nur wenig. Für CO ergibt sich eine größere Bandbreite.
- Bei den Emissionsfaktoren für Staub zeigen sich jedoch deutlich größere Unterschiede zu den Flüssiggasgeräten. Bei Heizkesseln für Heizöl EL mit Nennwärmeleistungen von 4 bis 25 kW wird ein Emissionsfaktor für Staub von 0,8 mg/MJ und für Pelletkessel dieser Leistungsklasse ein Emissionsfaktor von 21 mg/MJ angesetzt. Bei der aktuellen Untersuchung ergab sich ein mittlerer Emissionsfaktor für Staub beim Dauerbetrieb der Flüssiggasgeräte von 0,018 mg/MJ.
- Bei den Stickstoffoxiden ergibt sich für den Anlagenbestand für Heizölkessel mit Nennwärmeleistungen von 4 bis 25 kW in etwa der doppelte Emissionsfaktor im Vergleich zu den untersuchten Flüssiggasgeräten. Der Emissionsfaktor für die Pelletkessel im Bestand mit Nennwärmeleistungen von 4 bis 25 kW ergibt etwa den vierfachen Wert im Vergleich zu den Flüssiggasgeräten.

Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse ein mögliches Emissionsminderungspotenzial durch deutlich höhere Sanierungsraten im Anlagenbestand auf, da sich nur so effektiv Emissionen und der Endenergieverbrauch verringern lassen. Bedingt durch das günstigere C/H-Verhältnis von Flüssiggas sind hier die energiebezogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen um 15 Prozent geringer als bei Heizöl EL.

# 1 Einleitung

---

Der Anteil von mit Flüssiggas betriebenen Heizungssystemen in Haushalten beträgt zurzeit rund drei Prozent. Es wird jedoch erwartet, dass die thermische Nutzung von Flüssiggas zu Heizzwecken und zur Warmwassererzeugung bei Haushalten und auch im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen in der Zukunft an Bedeutung gewinnt.

Für die hierbei eingesetzten Feuerungsanlagen für Flüssiggas im Geltungsbereich der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV), handelt es sich in der Regel um Gasgeräte der Kategorie II, welche mit unterschiedlicher Düsenkonfiguration und Geräteeinstellung sowohl für Erdgas als auch für Flüssiggas einsetzbar sind. Für diese Geräte liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch keine öffentlich zugänglichen Emissionsdaten für den Betrieb mit Flüssiggas vor.

Aus diesem Grund wurde das IFK beauftragt, das Emissionsverhalten von mit Flüssiggas betriebenen Heizungssystemen unter praxisnahen Bedingungen auf dem Prüfstand zu untersuchen. Hierbei sollte der Wärmebedarf für die zu untersuchenden Heizsysteme durch Wärmebedarfskurven simuliert werden, die auf idealisierten realen Verbrauchsverläufen (zum Beispiel in einem Einfamilienhaus oder Reihenhaushaus) basieren. Es wurden zwei Wärmebedarfskurven verwendet, die den Wärmebedarf eines Gebäudes an einem kalten Wintertag beziehungsweise milden Übergangstag wiedergeben. Darüber hinaus wurden die Emissionen der Heizgeräte auch im ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung gemessen. Die Systematik bei diesen Untersuchungen wurde bereits in vorangegangenen Arbeiten bei Untersuchungen mit vergleichbarer Zielrichtung eingesetzt.

Neben den Konzentrationen von  $\text{CO}_2$  beziehungsweise  $\text{O}_2$  sollten kontinuierlich die Emissionskonzentrationen von  $\text{CO}$ ,  $\text{VOC}$  und  $\text{NO}_x$  im Abgas gemessen werden. Diskontinuierlich sollten die Staub- und  $\text{SO}_x$ -Konzentrationen während der Versuchszeit erfasst werden. Für die kontinuierlichen Messungen wurden Standard-Gasanalytoren eingesetzt. Die Staubmessung erfolgte gravimetrisch, wobei der Staub auf einem Planfilter gesammelt und anschließend gewogen wurde. Aufgrund der erwartungsgemäß sehr geringen Staubkonzentrationen im Abgas der Flüssiggasgeräte wurde mit sehr langen Probenahmezeiten gerechnet, da eine gewisse Mindestmasse an Staub zur Wägung gesammelt werden muss. Die Ermittlung der  $\text{SO}_x$ -Konzentrationen erfolgte nasschemisch durch Absorption in einer wässrigen Lösung und anschließender Analyse des Schwefels durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie.

An Heizgeräten für Flüssiggas wurden drei unterschiedliche Techniken untersucht. Zum einen eine stromerzeugende Heizung als Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis sowie ein bodenstehender Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner und ein bodenstehender Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner.

Für die Untersuchungen wurde ein Flüssiggastank zur Versorgung der Heizgeräte aufgestellt und mit handelsüblichem Flüssiggas befüllt. Das gelieferte Flüssiggas wurde anhand einer Brennstoffanalyse charakterisiert.

Die Untersuchungsergebnisse an Flüssiggasgeräten werden im Vergleich zu Ergebnissen anderer Untersuchungen an nicht leitungsgebundenen Heizsystemen für leichtes Heizöl (Heizöl EL) und Holzpellets sowie mit Emissionsfaktoren für diese Feuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV dargestellt.

## 2 Versuchsaufbau und Methodik

Für die Untersuchungen an den Heizgeräten für Flüssiggas wurde im Technikum des IFK ein Versuchstand aufgebaut. Abbildung 2.1 zeigt in vereinfachter Form den schematischen Aufbau des Prüfstandes am Beispiel des Mikro-KWK-Gerätes. Dieses Heizgerät ist in Verbindung mit einem Pufferspeicher zu betreiben, um möglichst lange Laufzeiten des Stirlingmotors zur Stromerzeugung zu realisieren.

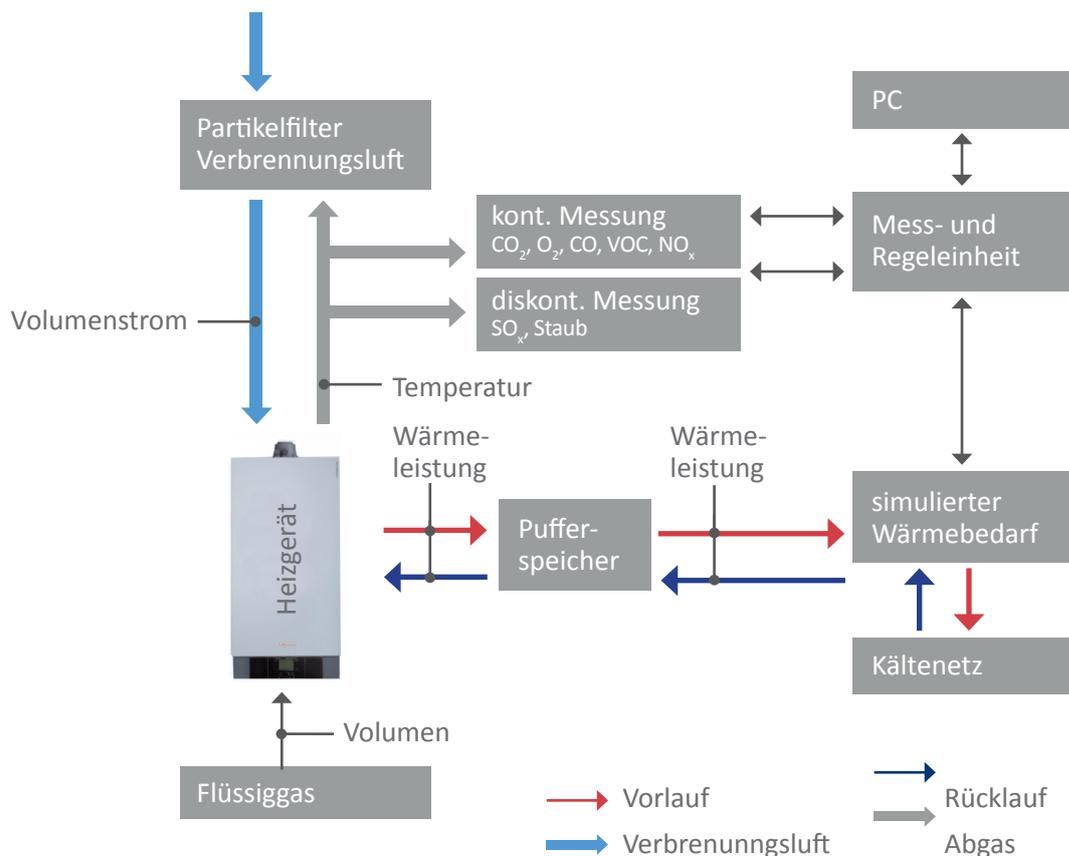


Abbildung 2.1: vereinfachter schematischer Aufbau des Prüfstandes zur Untersuchung der Flüssiggasgeräte am Beispiel des Mikro-KWK-Gerätes

Die Verbrennungsluftversorgung der Heizgeräte erfolgte mit Raumluft, die mit einem Partikelfilter gereinigt wurde. Die Wirksamkeit des Partikelfilters wurde überprüft, der Eintrag von Staub über die gereinigte Verbrennungsluft in die Feuerung war äußerst gering und kann im Verhältnis zu den gemessenen Staubkonzentrationen im Abgas vernachlässigt werden.

Aus dem Abgasstrom der Heizgeräte wurden jeweils Teilströme für die kontinuierlich messenden Gasanalysatoren und für die Probenahme zur diskontinuierlichen Ermittlung der Staub- und SO<sub>x</sub>-Konzentrationen entnommen.

Neben Gaskonzentrationen wurden Temperaturen (Gasuhr für Flüssiggas, welche auch als Verbrennungslufttemperatur verwendet wurde; Abgas; Vor- und Rücklauf) und Volumenströme (Verbrennungsluft, Heiz- und Kühlkreise) sowie Drücke (Umgebungsdruck, Unterdruck bei Staubprobenahme, Unterdruck in der Messstrecke) kontinuierlich gemessen. Diese Messgrößen wurden zum Beispiel zur Berechnung der Wärmeleistung der Heizgeräte, zur Regelung der Staubprobenahme, zur Verbrennungsrechnung oder zur Schwefelbilanzierung verwendet.

Über Wärmetauscher erfolgte jeweils die Entnahme des simulierten Wärmebedarfs aus dem Heizkreis, im Fall des Mikro-KWK-Gerätes wurde die Energie aus dem Pufferspeicher bezogen. Die von den Heizgeräten erzeugte Wärme wurde in das Kältenetz der Universität eingespeist.

Die Flüssiggasversorgung für die Heizgeräte wurde von einem Fachbetrieb installiert und in Betrieb genommen. Hierzu wurde ein oberirdischer Lagerbehälter mit einem Nenn-Füllgewicht von 1,2 t (ca. 2.700 l Füllmenge) aufgestellt. Der Gasverbrauch während der Versuche wurde mit einem handelsüblichen Gaszähler erfasst und liegt als Mittelwert über die Versuchszeit vor. Insgesamt wurden nahezu zwei Tankfüllungen Flüssiggas während den Versuchen verfeuert.

Die Heizgeräte wurden im stationären Dauerbetrieb und mit Wärmebedarfskurven betrieben. Im stationären Dauerbetrieb ergeben sich für Produkte der unvollständigen Verbrennung (CO, VOC und Ruß) bei korrekter KesselEinstellung die Minimalemissionen. Beim Betrieb mit Wärmebedarfskurven können sich höhere Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung ergeben, wenn der Kessel in den Teillastbetrieb oder in die taktende Betriebsweise übergeht. Der Betrieb mit Wärmebedarfskurven entspricht im Grundsatz in der Regel der praktischen Betriebsweise.

## 2.1 Wärmebedarfskurven

Auf der Grundlage von Praxisuntersuchungen der Tagesgänge des Heizenergiebedarfs [FfE, 2002] wurden idealisierte typische Verläufe für unterschiedliche Außentemperaturniveaus zusammengestellt. Die für die Untersuchungen verwendeten Verläufe des Heizenergiebedarfs weisen jeweils zu Beginn des Heiztages, bei niedrigen Außentemperaturen und gegebenenfalls relativ geringen Innenraumtemperaturen nach einer Nachtabsenkung, für eine gewisse Zeit den höchsten Wärmebedarf auf. Bei ansteigenden Außentemperaturen und zunehmender Erwärmung der Innenräume durch innere Wärmequellen sowie durch mögliche solare Gewinne nimmt der Heizwärmebedarf im Tagesverlauf kontinuierlich ab. Gegen Abend, bei abnehmenden Außentemperaturen steigt der Heizbedarf wieder etwas an. Die Messungen wurden mit zwei Heizlastkurven durchgeführt, wobei eine Kurve „kalte Wintertage“ mit einer mittleren Kesselauslastung von 44 Prozent und eine Kurve „milde Winter- beziehungsweise Übergangstage“ mit einer mittleren Kesselauslastung von 14 Prozent repräsentiert, siehe Abbildung 2.2.

Die Heizlastkurven wurden für einen täglichen Heizbetrieb von 16 Stunden ohne Warmwassererzeugung definiert, was in der Praxis einem Heizungsbetrieb mit Nachtabsenkung entspricht.

Diese Heizlastkurven sind als beispielhafte Tagesverläufe der in einem Wohngebäude angeforderten Heizleistung zu verstehen. Sie gelten für ein Wohngebäude mit den gegebenen

Randbedingungen bei klimatisch ähnlichen Verhältnissen wie in Stuttgart [Struschka et al., 2010b]. In der Praxis können die tatsächlichen Verläufe des Heizenergiebedarfs sowohl im Detail und Niveau als auch von der Dynamik deutlich hiervon abweichen, da diese von den örtlichen Gegebenheiten, wie Bauart und Betriebsweise der Heizanlage sowie von den Gebäudeeigenschaften und vom Nutzerverhalten abhängen.

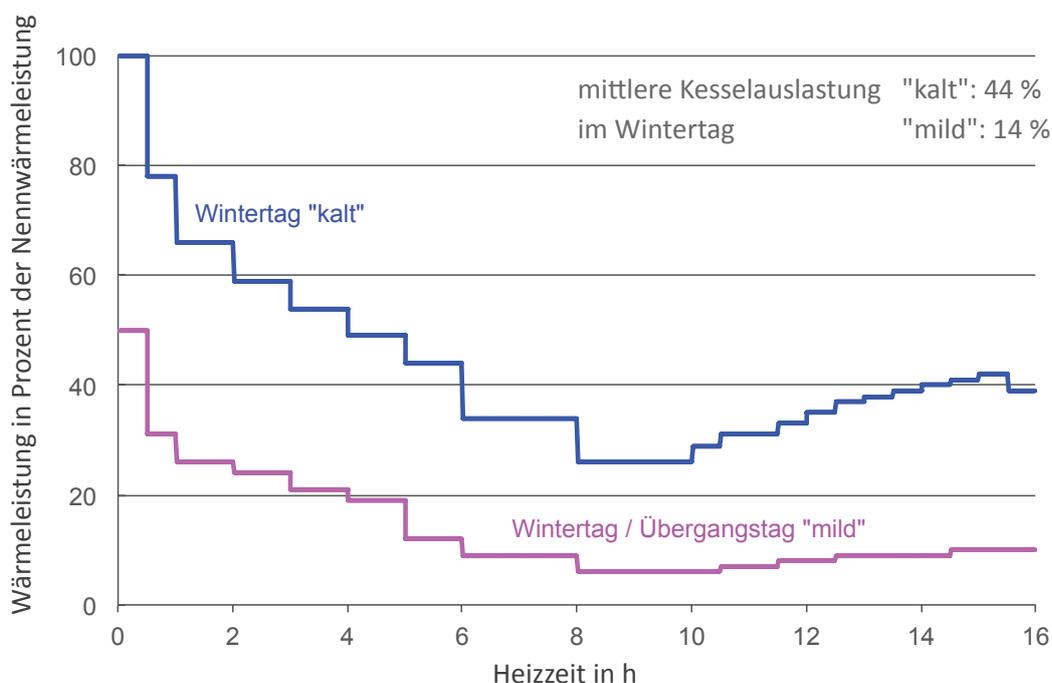


Abbildung 2.2: Heizlastkurven für die Emissionsuntersuchungen an Heizgeräten für Flüssiggas (mittlere Kesselauslastung ist auf die Nennwärmeleistung des Heizkessels bezogen)

Für die Festlegung der Betriebsbedingungen der Heizgeräte wurde angenommen, dass diese richtig dimensioniert waren. Bei angenommener niedrigster Außentemperatur wurde die maximale Heizleistung entsprechend der Nennwärmeleistung des Heizkessels als Heizwärme angefordert, d. h. 100 Prozent Wärmeleistung entspricht der Nennwärmeleistung des Kessels. Die Kesselauslastung ergibt sich durch die Wärmeanforderung der Verbraucherseite und damit durch die festgelegten Heizlastkurven. Die Kesselregelung sorgt dafür, dass der Kessel die angeforderte Leistung im Dauerbetrieb bei modulierender oder bei getakteter Betriebsweise zur Verfügung stellt.

Bei den Versuchen wurde das verfeuerte Gasvolumen sowie die an den Kühlkreislauf abgegebene Wärmeleistung (Nutzwärme) erfasst. Die Feuerungswärmeleistung wurde über den pro Zeiteinheit verbrauchten Brennstoff bestimmt, die an den Kühlkreislauf abgegebene Wärmeleistung über die Temperaturdifferenz des Vor- und Rücklaufes und dessen Volumenstrom am Kesselausgang.

Weiterhin wurde festgelegt, welche Rücklauftemperatur das vom Heizkreis an den Heizkessel zurückgeführte Wasser hat. Außerdem wurde eine minimale Rücklauftemperatur festgelegt, damit die Rücklauftemperatur in einem praxisüblichen Bereich bleibt und

nicht auf die Temperatur des Kältenetzes zurückgehen kann. Für die Heizlastkurve „kalter Wintertag“ wurde eine Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklaufwasser von 15 K und beim „milden Wintertag“ von 7 K eingestellt.

Darüber hinaus wurden auch Versuche bei stationärem Dauerbetrieb durchgeführt. Hierbei wurden die Heizgeräte bei Nennwärmeleistung und einer Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklaufwasser von 20 K betrieben.

Die Dauer der Versuche wurde in Vorversuchen anhand der Staubkonzentrationen im Abgas festgelegt. Je nach Heizgerät und Verbrennungsqualität ergaben sich für die beiden Heizlastkurven und den Dauerbetrieb unterschiedliche Versuchszeiten, wobei die Heizlastkurven wenn notwendig immer mehrfach unmittelbar hintereinander abgefahren wurden.

## 2.2 Messstrecke

Für die Untersuchung wurde eine Messstrecke konstruiert und gebaut, die für alle Heizgeräte verwendet wurde. Die Messstrecke bestand aus einem doppelwandigen Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von ca. 60 mm und ausreichender Ein- und Auslaufstrecke für die Staubmessung. Die Messstrecke wurde extern über einen Wasserkreis beheizt, um eine Kondensation von Wasserdampf zu verhindern beziehungsweise um feine Wassertropfen vor der Staubprobenahmestelle zu verdampfen. Abbildung 2.3 zeigt die Messstrecke im Schnitt mit den Messpositionen für die Gas- und Staubprobenahmen.

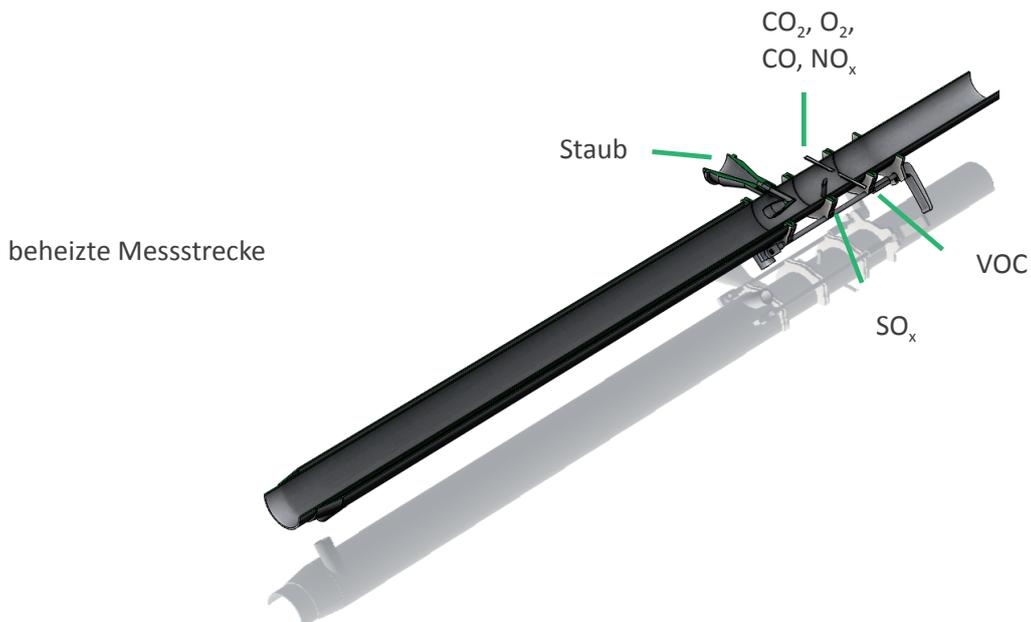


Abbildung 2.3: Messstrecke und Messpositionen für die Gas- und Staubprobenahmen

## 2.3 Verwendete Messtechnik

In Tabelle 2.1 sind alle im Versuchsaufbau verwendeten kontinuierlich aufzeichnenden Messgeräte aufgelistet.

Die Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) wurden im trockenen Abgasvolumenstrom gemessen und auch bezogen auf trockenes Abgas angegeben. Gemessen wurde die Summe an Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), die bezogen auf die Masse von NO<sub>2</sub> angegeben wird.

Messgröße	Messprinzip	Gerät	Messbereich	Prüfgas
O <sub>2</sub>	Paramagnetismus	Emerson NGA 2000	0 - 25 Vol. %	5,98 Vol. % *
CO <sub>2</sub>	nicht dispersive Infrarotabsorption	Emerson NGA 2000	0 - 20 Vol. %	12,10 Vol. % *
CO	nicht dispersive Infrarotabsorption	Emerson NGA 2000	0 - 100 ppm	100 ppm *
VOC	Flammenionisationsdetektor	TESTA FID 123	0 - 100 ppm	79,2 ppm Propan **
NO <sub>x</sub>	Chemilumineszenz	Emerson NGA 2000 CLD	0 - 50 ppm	28,7 ppm *
Wassertemperatur	Platin-Messwiderstand	PT 100	-50 - 600 °C	
Gastemperatur	Thermoelektrizität	NiCr-Ni Thermoelement	-200 - 1100 °C	
Volumenstrom Wasser	Magnetisch induktiver Durchfluss	Krohne MID	0 - 3,5 m <sup>3</sup> /h	
Volumenstrom Verb. Luft	thermische Anemometrie	Schmidt SS 20.250	0 - 1 m/s	
Differenz- und Absolutdruck	pneumatisch elektrisch	Airflow PTSXR-K	0 - 100 Pa 0 - 1.200 Pa <sub>abs</sub>	

\* in Stickstoff    \*\* in 4,76 Vol. Prozent O<sub>2</sub> mit Rest Stickstoff

Tabelle 2.1: Überblick über die verwendeten Geräte für die kontinuierlichen Messungen

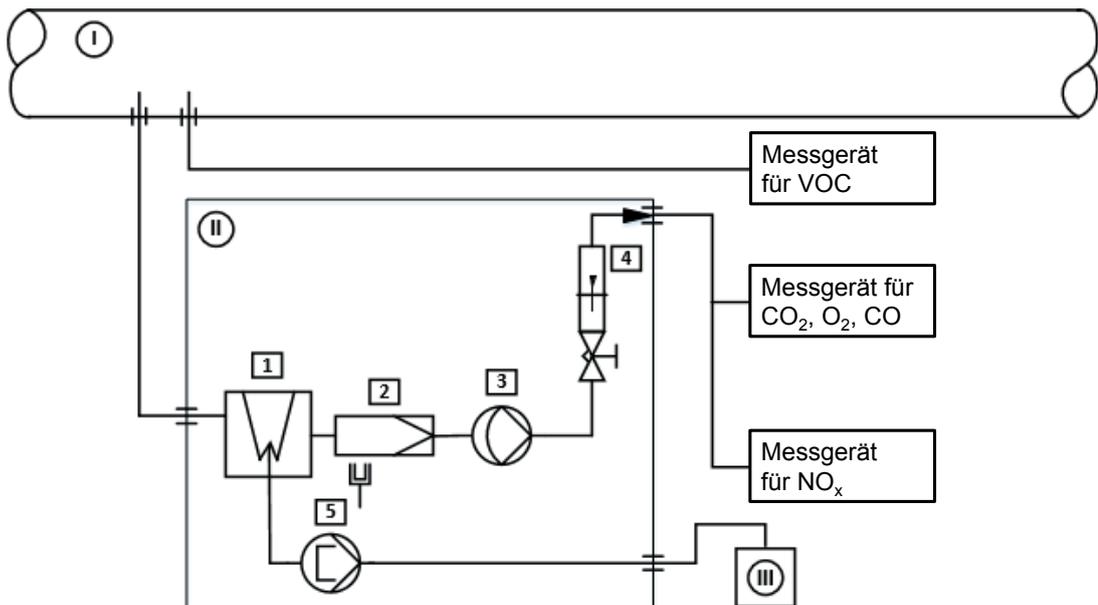
Die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wurden im feuchten Teilvolumenstrom gemessen und anschließend auf trockenes Abgas sowie auf die Masse von Kohlenstoff (C) bezogen (angegeben zum Beispiel als mgC/MJ). Die Bezugsrechnung auf trockenes Abgas erfolgte anhand der Verbrennungsrechnung, wobei gegebenenfalls der Kondensatanfall der Heizgeräte (Brennwertgeräte) berücksichtigt wurde.

Vor und nach jedem Versuch wurden die Null- und Kalibrierpunkte der Messgeräte mit Nullgas (reiner Stickstoff) und Prüfgas überprüft. Abweichungen wurden bei der Versuchsauswertung korrigiert.

Da sich bei Versuchen mit Wärmebedarfsprofilen sowohl die Gaskonzentrationen als auch die Abgasvolumenströme ändern können, erfolgte eine Berechnung der mittleren Gaskonzentrationen beziehungsweise Emissionen über die Emissionsfrachten. Für die

gemittelten und abgespeicherten Zeitintervalle (jeweils 60 Sekunden) wurden die Emissionsfrachten mit den gemessenen Konzentrationen an  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $VOC$  und  $NO_x$  und dem berechneten Abgasvolumenstrom ermittelt.

Abbildung 2.4 zeigt die schematische Darstellung des zur Gasprobenahme eingesetzten Versuchsaufbaus.



I Messstrecke	1 Messgaskühler	4 Strömungsmesser
II Messgasaufbereitung	2 Messgasfilter	5 Kondensatpumpe
III Kondensatbehälter	3 Messgaspumpe	

Abbildung 2.4: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Gasprobenahme

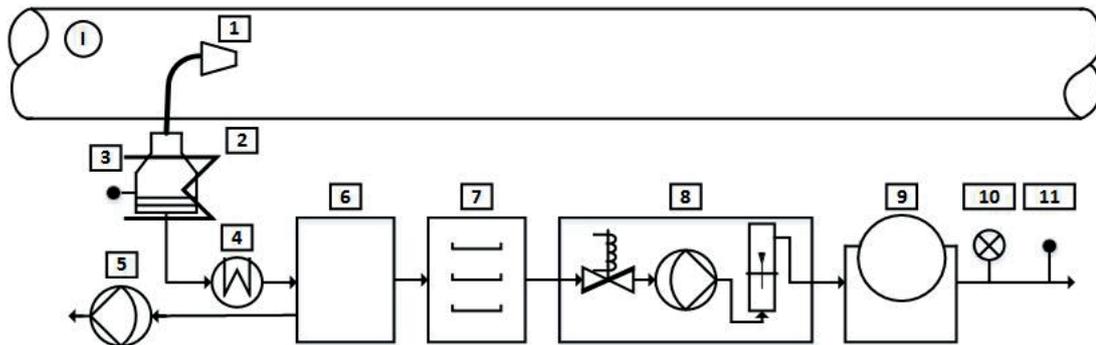
### 2.3.1 Staubmessung

Die Staubmessungen wurden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [VDI 2066 Blatt 1:2006-11] mit einigen Anpassungen an die Messaufgabe durchgeführt. Für die Staubmessung wurde ein Teilstrom isokinetisch beziehungsweise Geschwindigkeitsproportional aus dem Abgas mittels einer Sonde entnommen und über einen Planfilter geleitet. Staub lagerte sich hierbei teilweise in der Entnahmesonde vor dem Filter und auf dem Filter ab. Die Konzentration des Staubes wurde anhand der abgeschiedenen Staubmasse und des abgesaugten Gasvolumens bestimmt. Die auf dem Planfilter abgeschiedene Staubmasse wurde durch eine Wägung des Filters vor und nach der Probenahme ermittelt. Die in der Entnahmesonde abgelagerte Staubmasse wurde dadurch bestimmt, dass diese nach Versuchsende mit Flüssigkeiten (100 Prozent destilliertes Wasser sowie Mischung aus 50 Prozent Aceton und 50 Prozent Isopropanol) gespült und die Staubmasse in der Spülflüssigkeit ermittelt wurde. Die Staubmasse des Filters und der Spülflüssigkeit wurden addiert und auf das Probenahmenvolumen im Normzustand bezogen. Um die Messunsicherheit bei den Staubmessungen zu minimieren, wurden Kontrollwägungen durchgeführt, um zum Beispiel Schwankungen der Laborwaage bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Gegenüber der in VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 beschriebenen Vorgehensweise und aufgrund der vorliegenden Messaufgabe wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Die Probenahmetemperatur (Temperatur des Planfilterkopferätes) wurde auf ca. 70 °C eingestellt, um gegebenenfalls vorliegende Schwefelsäuretröpfchen abzuscheiden.
- Die Probenahmezeiten waren deutlich länger und wurden so gewählt, dass einige mg Staubmasse gesammelt werden konnten.
- Durch die langen Probenahmezeiten war der Anfall an Kondensat aus dem Probengas entsprechend groß, so dass der üblicherweise verwendete Messaufbau nicht eingesetzt werden konnte. Für die Messungen an den Flüssiggasgeräten wurde deshalb vor dem eingesetzten Tropfenabscheider ein mit Kaltwasser betriebener Wärmeübertrager integriert, wodurch eine weitgehende Kondensation des Wasserdampfes erfolgte. Das Kondensat sammelte sich im Tropfenabscheider und wurde aus diesem mit einer Kondensatpumpe gefördert.
- Aufgrund der feinen Stäube (es wird davon ausgegangen, dass die aus der Verbrennung stammenden Stäube beziehungsweise Partikel aerodynamische Durchmesser von  $< 1 \mu\text{m}$  aufweisen) erfolgte die Probenahme leicht über-isokinetisch.
- Um die Staubanteile der unterschiedlichen Kesselleistungen bei unterschiedlichen Abgasvolumenströmen exakt zu erfassen, erfolgte die Staubprobenahme proportional zur Abgasgeschwindigkeit. Die Regelgröße wurde hierbei anhand der Geschwindigkeit in der Verbrennungsluft sowie der Sauerstoffgehalt und die Temperatur im Abgas berechnet.
- Während den Stillstandszeiten der Heizgeräte wurde die Staubprobenahme ebenfalls gestoppt.
- Die Planfilter aus Quarzfasermaterial wurden vor der Beprobung für eine Stunde bei 110 °C in einem Ofen ausgeheizt und für 24 Stunden in einen Exsikkator mit Silicagel äquilibriert und danach gewogen. Nach der Probenahme wurden die Planfilter wiederum für 24 Stunden im Exsikkator mit Silicagel bis zu Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend rückgewogen.
- Die Spügläschen wurden vor der Probenahme für eine Stunde bei 110 °C in einem Ofen ausgeheizt und für 24 Stunden in einen Exsikkator äquilibriert und dann gewogen. Nachdem die Spülflüssigkeit in den Gläschen aufgefangen wurde, wurde diese verdampft. Anschließend wurden die Gläschen 24 Stunden in einem Exsikkator bis zu Gewichtskonstanz getrocknet und dann rückgewogen.

Abbildung 2.5 zeigt die schematische Darstellung des zur Staubprobenahme eingesetzten Versuchsaufbaus. Die Staub-Konzentrationen werden bezogen auf trockenes Abgas angegeben.



I Messstrecke	4 Wärmeübertrager	8 Volumenstromregelung
1 Staubsonde	5 Kondensatpumpe	9 Gasuhr
2 Planfilterkopfgerät	6 Tropfenabscheider	10 Messung Absolutdruck
3 geregelte Heizung	7 Trockenturm	11 Temperaturmessung

Abbildung 2.5: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Staubprobenahme

### 2.3.2 SO<sub>x</sub>-Messung

Neben den Staub-Konzentrationen wurden auch die SO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas diskontinuierlich während der Versuchszeit erfasst. In Anlehnung an DIN EN 14791 [DIN EN 14791:2014-12 - Entwurf] wurde ein Teilvolumenstrom aus dem Abgas entnommen und durch Waschflaschen geleitet, die mit destilliertem Wasser (97 Volumenprozent) unter Zugabe einer Wasserstoffperoxid-Lösung (3 Volumenprozent) gefüllt waren. In dieser wässrigen Lösung wurden gasförmiges SO<sub>2</sub> sowie gegebenenfalls vorliegende Schwefelsäuretröpfchen vollständig absorbiert.

Abbildung 2.6 zeigt die schematische Darstellung des zur SO<sub>x</sub>-Probenahme eingesetzten Versuchsaufbaus. Die erste und zweite Waschflasche waren jeweils mit Absorptionsflüssigkeit gefüllt, die dritte Waschflasche diente als Tropfenabscheider. In der ersten Waschflasche sollten sich laut DIN EN 14791 mehr als 95 Prozent der in beiden Waschflaschen abgeschiedenen Schwefelmasse befinden. Die zweite Waschflasche diente im Wesentlichen zur Überprüfung des Absorptionswirkungsgrades der ersten Waschflasche. Durch die langen Probenahmezeiten war der Anfall an Kondensat aus dem Probengas entsprechend groß, so dass der üblicherweise verwendete Messaufbau nicht eingesetzt werden konnte. Für die Messungen an den Flüssiggasgeräten wurde deshalb vor der ersten Waschflasche ein Messgaskühler vorgeschaltet, um den vorhandenen Wasserdampf aus dem Probengas zu entfernen. Ohne den vorgeschalteten Messgaskühler wäre der Wasserdampf des Probengases in der ersten Waschflasche kondensiert und hätte eine Verdünnung der Absorptionsflüssigkeit und ein Überlaufen der Waschflaschen zur Folge gehabt. Die Probenahmeleitungen und der Messgaskühler wurden nach jeder Messung mit demineralisiertem Wasser gespült.

Zusätzlich zu den Inhalten der Waschflaschen 1 und 2 wurde das Kondensat des Messgaskühlers anschließend im Labor bezüglich des Schwefelgehaltes untersucht. Die Analyse auf Schwefel erfolgte mittels induktiv gekoppelter Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie. Die im Abgas vorliegende SO<sub>x</sub>-Konzentration ergibt sich aus der Summe an Schwefel in den Waschflaschen und im Kondensat aus dem Messgaskühler, jeweils berechnet als SO<sub>2</sub>, und des abgesaugten trockenen Probengasvolumens.

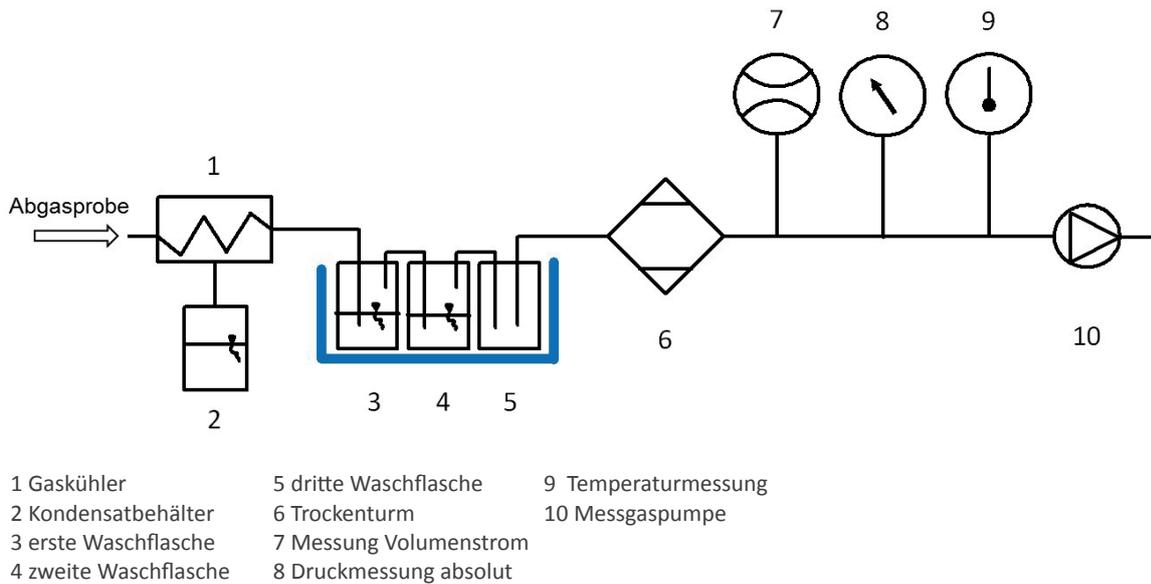


Abbildung 2.6: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur  $\text{SO}_x$ -Probenahme

Zur Plausibilisierung der  $\text{SO}_x$ -Messungen im Abgas wurde eine Schwefelbilanz erstellt. Hierzu wurden neben der über das Abgas emittierten Schwefelmasse auch die Schwefelmasse im gegebenenfalls anfallenden Kondensat der Heizgeräte bestimmt. Die Summe der über das Abgas beziehungsweise das Kondensat aus dem Heizgerät ermittelten Schwefelmassen wurde jeweils mit der über den Brennstoff in die Feuerung transportierten Schwefelmasse verglichen. Bei der Schwefelbestimmung im Brennstoff lagen allerdings nur Angaben zur Bestimmungsgrenze vor, da der Messwert unterhalb der Nachweisgrenze des zur Analyse eingesetzten Verfahrens lag, so dass ein direkter Vergleich von berechnetem Schwefelgehalt aus den  $\text{SO}_x$ -Messungen und von Analysenwerten des Brennstoffes nicht möglich war.

## 2.4 Flüssiggas

Die Flüssiggasversorgung der Heizgeräte erfolgte über einen Lagerbehälter mit einem Nenn-Füllgewicht von 1,2 t (ca. 2.700 l Füllmenge), der außerhalb des Technikums aufgestellt wurde, siehe Abbildung 2.7. Der Lagerbehälter wurde zweimal mit Propan befüllt, einmal mit 2.285 l im März 2015 und einmal mit 2.232 l (jeweils bezogen auf 15 °C) im September 2015. Von dem Flüssiggas wurde jeweils eine Probe durch den Lieferanten entnommen und von einem Labor analysiert. In Tabelle 2.2 sind die Analyseergebnisse des eingesetzten Flüssiggases für die Untersuchungen an den drei Heizgeräten aufgeführt [PetroLab, 2015].

Gereinigtes Flüssiggas ist nahezu geruchslos und wird deshalb für den Gebrauch im Gewerbe, Haushalt und in der Industrie mit einem schwefelhaltigen organischen Odoriermittel versetzt, welches den überwiegenden Anteil des Brennstoffschwefels ausmacht.



Abbildung 2.7: Flüssiggastank zur Versorgung der Heizgeräte während den Untersuchungen

Analysenergebnisse Flüssiggas	Gasfüllung März 2015	Gasfüllung September 2015
Gesamt-Schwefel in mg/kg	< 5	< 5
Abdampfrückstand bei Raumtemperatur in mg/kg	70	200*
Manometer-Dampfdruck bei 40 °C in kPa	1.288	1.293
Dichte als Gas in kg/m <sup>3</sup>	2,011	2,007
Brennwert in kJ/m <sup>3</sup>	101.187	100.858
Heizwert in kJ/m <sup>3</sup>	93.172	92.933
oberer Wobbe-Index in kJ/m <sup>3</sup>	81.130	80.949
unterer Wobbe-Index in kJ/m <sup>3</sup>	74.704	74.589
Summe C5-Olefine in Gew. %	< 0,05	< 0,05
Gesamt Olefine in Gew. %	0,84	5,17
Methan in Gew. %	< 0,01	< 0,01
Ethan in Gew. %	0,70	0,53
Ethen in Gew. %	< 0,01	< 0,01
<b>Propan in Gew. %</b>	<b>96,9</b>	<b>93,0</b>
Propen in Gew. %	0,82	5,13
Propadien in Gew. %	< 0,01	< 0,01
iso-Butan in Gew. %	1,32	0,99
n-Butan in Gew. %	0,21	0,26
1-Buten in Gew. %	0,01	0,02
iso-Buten in Gew. %	0,01	0,02
cis-2-Buten in Gew. %	< 0,01	< 0,01
trans-2-Buten in Gew. %	< 0,01	< 0,01
1,2-Butadien in Gew. %	< 0,01	< 0,01
1,3-Butadien in Gew. %	< 0,01	< 0,01
neo- + iso-Pentan in Gew. %	< 0,01	< 0,01
n-Pentan in Gew. %	< 0,01	< 0,01
Pentene in Gew. %	< 0,05	< 0,05

\* Parameter entspricht nicht Anforderungen nach DIN 51622 (1985)

Tabelle 2.2: Analysenergebnisse des eingesetzten Flüssiggases für die Untersuchungen an den drei Heizgeräten  
[PetroLab, 2015]

## 2.5 Heizgeräte

Für die Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Heizgeräte, die auf den Betrieb mit Flüssiggas eingestellt wurden, eingesetzt. Zum einen eine stromerzeugende Heizung als Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis sowie ein bodenstehender Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner und ein bodenstehender Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner.

Die drei Heizgeräte repräsentieren unterschiedliche Techniken und Entwicklungsstufen von Gasheizgeräten. Das modernste und insgesamt komplexeste Gerät ist das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis, welches sowohl Strom als auch Wärme produziert. Die Stromerzeugung erfolgt mit einem Stirling-Motor, der von einem Ringbrenner kleinerer Leistung erhitzt wird. Reicht die Abwärme des Stirling-Motors nicht aus um den Wärmebedarf zu decken, wird ein im Heizgerät zusätzlich integrierter Spitzenlastkessel zugeschaltet. Das Heizgerät ist als Brennwertgerät konzipiert und für die Grundversorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern ausgelegt. Es kann mit Erdgas oder auch mit Flüssiggas und sowohl wärme- als auch stromgeführt betrieben werden. Das Mikro-KWK ist mit einem Pufferspeicher zu betreiben, um möglichst lange Betriebszeiten des Stirling Motors zu erhalten. Für die Untersuchungen wurde das Heizgerät wärmegeführt in Kombination mit einem 750 l Pufferspeicher betrieben.

Der Vor- und Rücklauf des Heizgerätes und der Wärmetauscher zur Simulation des Wärmebedarfs waren jeweils direkt an den Pufferspeicher angeschlossen. Bei dieser Betriebsweise wurde zuerst die Wärmeleistung des Heizgerätes in den Pufferspeicher geladen und dann für die Verbraucher wieder aus diesem entnommen. Um für die einzelnen Versuchsreihen vergleichbare Startzustände zu erhalten, wurde der Pufferspeicher vor dem Start der ersten Wärmebedarfskurve durch eine vierstündige Vorlaufzeit auf dieselbe Temperatur geladen.

In Tabelle 2.3 ist ein Auszug wichtiger technischer Daten (nach Herstellerangaben) für das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis enthalten.

Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis	Einheit	Daten
Baujahr		2015
Nenn-Wärmeleistungsbereich (bei $T_V / T_R = 50 / 30 \text{ °C}$ )	$\text{kW}_{th}$	3,6 - 25,3
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung ( $T_R = 30 \text{ °C}$ )	$\text{°C}$	45
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung ( $T_R = 60 \text{ °C}$ )	$\text{°C}$	70
$\text{CO}_2$ -Gehalt bei Nenn-Wärmeleistung (Flüssiggas)	Vol. %	10,6
Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 (bei $T_V / T_R = 50 / 30 \text{ °C}$ )	%	120
<b>Stirling-Motor</b>		
elektrische Leistung	$\text{kW}_{el}$	0,6 - 1,0
Wärmeleistungsbereich (bei $T_V / T_R = 50 / 30 \text{ °C}$ )	$\text{kW}_{th}$	3,6 - 5,3
<b>Spitzenlastkessel</b>		
Wärmeleistungsbereich (bei $T_V / T_R = 50 / 30 \text{ °C}$ )	$\text{kW}_{th}$	6,0 - 20,0

$T_V$ : Vorlauftemperatur  $T_R$ : Rücklauftemperatur Normnutzungsgrad bezogen auf Heizwert

Tabelle 2.3: Überblick technische Daten für das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis nach Herstellerangaben

Bei den Versuchen wurde der Anschluss des Heizgerätes für den raumluftunabhängigen Betrieb genutzt, da die Verbrennungsluft zum einen über einen Partikelfilter geleitet und zum anderen der Volumenstrom der Verbrennungsluft gemessen wurde. Die Inbetriebnahme des Heizgerätes erfolgte durch den Kundendienst des Herstellers.

Das zweite untersuchte Heizgerät in Form eines Gas-Brennwertkessels mit modulierendem Gasbrenner wurde ohne Pufferspeicher direkt an den Wärmeverbraucher angeschlossen und für den Betrieb mit Flüssiggas eingestellt. Hier wurde ebenfalls der Anschluss des Heizgerätes für den raumluftunabhängigen Betrieb genutzt, damit die Verbrennungsluft gefiltert und der Volumenstrom gemessen werden konnte. Dieses Heizgerät repräsentiert ein modernes Gasheizgerät mit hohem technischem Stand und mit einem breit modulierenden Matrixbrenner.

Um für die einzelnen Versuchsreihen vergleichbare Startzustände zu erhalten, wurde vor dem Start der ersten Wärmebedarfskurve eine zweistündige Vorlaufzeit mit ansteigendem Wärmebedarf eingestellt.

In Tabelle 2.4 ist ein Auszug wichtiger technischer Daten (nach Herstellerangaben) des Gas-Brennwertkessels mit modulierendem Gasbrenner enthalten.

Die Inbetriebnahme des Heizgerätes erfolgte durch den Kundendienst des Herstellers.

Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner	Einheit	Daten
Baujahr		2015
Nenn-Wärmeleistungsbereich (bei $T_V / T_R = 50 / 30$ °C)	kW <sub>th</sub>	2,6 - 19
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung ( $T_R = 30$ °C)	°C	45
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung ( $T_R = 60$ °C)	°C	75
CO <sub>2</sub> -Gehalt bei Nenn-Wärmeleistung (Flüssiggas)	Vol. %	9,3 - 10,9
Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 (bei $T_V / T_R = 40 / 30$ °C)	%	109

$T_V$ : Vorlauftemperatur  $T_R$ : Rücklauftemperatur Normnutzungsgrad bezogen auf Heizwert

Tabelle 2.4: Überblick technische Daten des Gas-Brennwertkessels mit modulierendem Gasbrenner nach Herstellerangaben

Das dritte untersuchte Heizgerät in Form eines bodenstehenden Niedertemperatur-Gas-Heizkessels mit einstufigem Vormischbrenner war verbrennungs- und regelungstechnisch am einfachsten aufgebaut und repräsentiert das Niedrigpreissegment.

Das Gerät ist für den raumluftabhängigen Betrieb vorgesehen und mit einer Strömungssicherung ausgestattet. Der Vormischbrenner besteht aus drei Brennerrohren. Für die Untersuchungen mussten einige Änderungen vorgenommen werden.

Damit nur gereinigte Raumluft in den Kessel gelangen und die bisherige Verbrennungsluftversorgung weiter genutzt werden konnte, wurde ein Luftverteilerkasten vor den Brenner gebaut und vorhandene Undichtigkeiten im Brennerbereich abgedichtet. Die Verbrennungsluft wurde in diesem Fall mit einem schwachen Lüfter in den Partikelfilter gefördert, um die Druckverluste bis zum Vormischbrenner zu kompensieren. Des Weiteren wurde die Strömungssicherung verschlossen und mit einer Überdrucksicherung versehen, um ein Ansaugen von ungereinigter Raumluft während des Kesselbetriebs zu verhindern.

Der Unterdruck in der Messstrecke beziehungsweise am Kesselausgang wurde so eingestellt, dass in Verbindung mit einem geringen Förderdruck der Verbrennungsluft ein sicheres Zünden des Brenners und ein stabiler Betrieb des Kessels erreicht wurden.

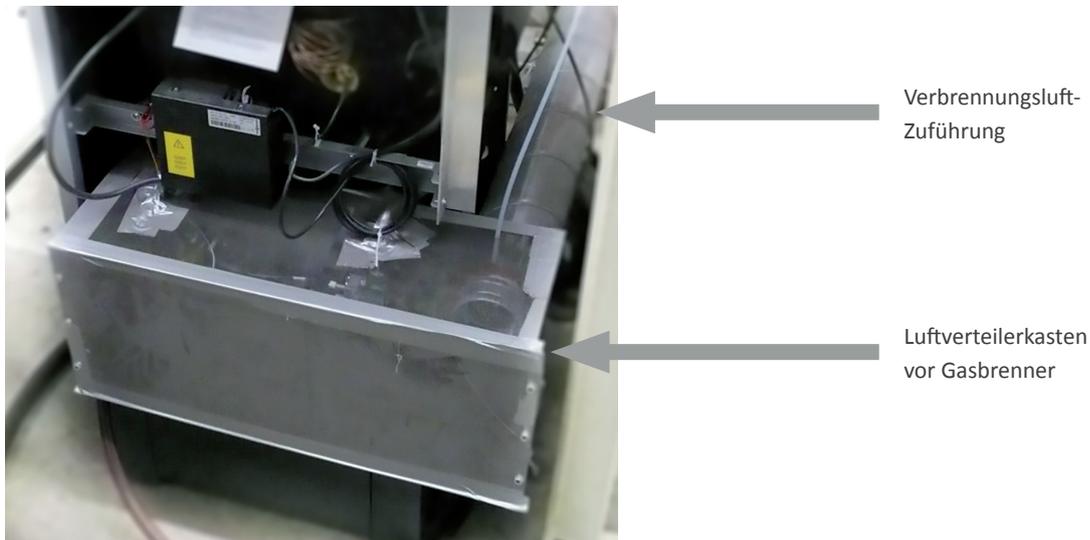


Abbildung 2.8: Einhausung am bodenstehenden Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner für die Untersuchungen

Um für die einzelnen Versuchsreihen vergleichbare Startzustände zu erhalten, wurde jeweils vor dem Start der ersten Wärmebedarfskurve eine zweistündige Vorlaufzeit mit ansteigendem Wärmebedarf eingestellt.

In Tabelle 2.5 ist ein Auszug wichtiger technischer Daten (nach Herstellerangaben) des Niedertemperatur-Gas-Heizkessels mit einstufigem Vormischbrenner enthalten.

Die Inbetriebnahme des Heizgerätes erfolgte durch den Kundendienst des Herstellers. Das Heizgerät wurde für den Betrieb mit Flüssiggas eingestellt.

Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner	Einheit	Daten
Baujahr		2015
Nenn-Wärmeleistung	kW <sub>th</sub>	18
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung (T <sub>R</sub> = 50°C)	°C	90
Abgastemperatur bei Nenn-Wärmeleistung (T <sub>R</sub> = 80 °C)	°C	102
CO <sub>2</sub> -Gehalt bei Nenn-Wärmeleistung (Flüssiggas)	Vol. %	6,0
Normnutzungsgrad nach DIN 4702-8 (bei T <sub>V</sub> /T <sub>R</sub> = 75/60 °C)	%	93

T<sub>V</sub>: Vorlauftemperatur T<sub>R</sub>: Rücklauftemperatur Normnutzungsgrad bezogen auf Heizwert

Tabelle 2.5: Überblick technische Daten des Niedertemperatur-Gas-Heizkessels mit einstufigem Vormischbrenner nach Herstellerangaben

### 3 Ergebnisse

---

Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen an den drei Heizgeräten beschrieben. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte von zwei oder drei Versuchen, die unter gleichen Bedingungen durchgeführt wurden. Bei den Messungen mit Wärmebedarfsprofilen wurden diese, falls notwendig, für jeden Versuch mehrfach unmittelbar hintereinander abgefahren. Die im Text jeweils genannten Gesamtversuchszeiten sind die addierten Versuchszeiten der Einzelversuche. Insgesamt unterscheiden sich bei den untersuchten Heizgeräten die Ergebnisse für die Einzelversuche unter gleichen Randbedingungen (Dauerversuch oder Wärmebedarfsprofile) nur wenig, das Betriebsverhalten der jeweiligen Heizgeräte war insgesamt sehr gut reproduzierbar.

Die angegebenen Emissionsfaktoren sind auf den Heizwert des eingesetzten Flüssiggases, bei VOC auf die Masse von Kohlenstoff (C), bei  $\text{NO}_x$  auf die Masse von  $\text{NO}_2$  und bei  $\text{SO}_x$  auf die Masse von  $\text{SO}_2$  bezogen.

Bei den nasschemischen Messungen der  $\text{SO}_x$ -Konzentrationen im Abgas wurde sowohl gasförmiges  $\text{SO}_2$  als auch tropfenförmig vorliegende Schwefelsäure (gebildet aus  $\text{SO}_3$  mit der Abgasfeuchte) erfasst.

Staubemissionen aus Verbrennungsprozessen beinhalten, in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes, der Feuerungstechnik und den Betriebsbedingungen der Feuerungsanlage unterschiedliche Anteile von anorganischen Verbindungen aus Asche- oder Brennstoffbestandteilen, Ruß, hochsiedende organische Verbindungen und Teere. Hierbei können zum Beispiel ultrafeine Partikel (aerodynamische Durchmesser  $< 0,1 \mu\text{m}$ ), Feinstaub (aerodynamische Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$ ) oder auch Grobstaub (aerodynamische Durchmesser  $> 10 \mu\text{m}$ ) auftreten. Bei der hier angewendeten Staubmessung wurden sowohl Fein- als auch Grobstäube quantitativ erfasst. Ultrafeinstäube im Bereich von einigen Nanometern sind zum Teil filtergänglich, tragen aber aufgrund der geringen Massen auch nur wenig zur Gesamtstaubkonzentration bei. Eine Unterscheidung zwischen Grob- und Feinstaub wurde bei den Untersuchungen nicht vorgenommen, da davon ausgegangen wurde, dass bei der Flüssiggasverbrennung in den untersuchten Feuerungen keine Partikel  $> 10 \mu\text{m}$  gebildet werden. Dies galt auch für die im folgenden Kapitel zitierten Emissionsfaktoren für Heizöl EL. Auch bei den zitierten Heizkesseln für Holzpellets wurden meist überwiegend Feinstäube emittiert (ca. 97 Prozent), weshalb auch hier keine Unterscheidung nach Partikelfractionen beziehungsweise Fein- und Grobstaub vorgenommen wurde.

Bei Verbrennungsprozessen mit Luft können Stickstoffoxide nach drei Bildungsmechanismen entstehen. Bei hohen Verbrennungstemperaturen aus dem Stickstoff der Verbrennungsluft (thermisches  $\text{NO}_x$ ), aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff (Brennstoff- $\text{NO}_x$ ) und über eine Umsetzung von  $\text{N}_2$  mit Brennstoffradikalen (promptes  $\text{NO}_x$ ), wobei dieser Mechanismus nur eine untergeordnete Rolle spielt. Bei der Verbrennung von Flüssiggas oder Erdgas wird im Wesentlichen thermisches  $\text{NO}_x$  gebildet. Die höheren Stickstoffgehalte bei Heizöl EL und vor allem bei Biomassen führen dagegen zu einer verstärkten Bildung von Brennstoff- $\text{NO}_x$ . Bei der Verbrennung von Biomassen in Hausheizungen wird aufgrund der relativ niedrigen Verbrennungstemperaturen überwiegend Brennstoff- $\text{NO}_x$  gebildet.

### 3.1 Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis

In Tabelle 3.1 sind die Versuchsergebnisse für das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis als Mittelwerte für die jeweiligen Heizlastkurven beziehungsweise den Dauerversuch aufgelistet. Die Gesamtversuchszeit für den Dauerversuch betrug 173 Stunden, die beiden Heizlastkurven wurden in mehrfachen Durchgängen vermessen mit einer Gesamtversuchszeit von 144 Stunden (Profil „kalt“) beziehungsweise 112 Stunden (Profil „mild“).

Kesseltyp	Profil	Leistung		CO <sub>2</sub>	CO	VOC	Staub	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
		[kW <sub>th</sub> ]	[kW <sub>el</sub> ]	[Vol.%]	[mg/MJ]	[mgC/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Mikro-KWK	dauer	23,7	0,9	10,8	51	1,8	0,014	0,11	24
	kalt	11,4	0,9	10,0	28	5,7	0,029	0,12	20
	mild	4,0	0,7	9,2	13	4,0	0,005	0,13	13

Tabelle 3.1: Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven

In Abbildung 3.1 (oben) sind die Verläufe der vorgegebenen, abgeführten und erzeugten Wärmeleistungen ( $Q_{\text{Heizlastkurve}}$ : Sollwert nach Wärmebedarfskurve,  $Q_{\text{Verbraucher}}$ : an Kühlkreislauf abgeführte Wärmeleistung;  $Q_{\text{Heizkessel}}$ : erzeugte Wärmeleistung des Heizkessels) beispielhaft für einen Zyklus der Heizlastkurve Wintertag „kalt“ dargestellt. Die an den Kühlkreis abgegebene Wärmeleistung folgt sehr gut dem vorgegeben Sollwert. Beim Verlauf der Wärmeleistung des Heizkessels sind sowohl der Einfluss des Pufferspeichers als auch der Grundlastbetrieb durch den Brenner für den Stirling-Motor und der Betrieb des Spitzenlastkessels deutlich erkennbar. So schaltet der Spitzenlastkessel erst nach ca. 30 Minuten Versuchszeit ein, obwohl beim Start der Heizlastkurve die höchste Wärmeleistung eingestellt wird. Die hier entnommene Wärmemenge stammt aus dem Pufferspeicher. Kann die Wärmeleistung des Stirling-Motors die geforderte Soll-Wärmeleistung nicht dauerhaft erbringen und sinkt die Temperatur im Wärmespeicher ab, so schaltet der Spitzenlastkessel zu, was bei diesem Wärmebedarfsprofil regelmäßig der Fall ist.

Beim Wärmebedarfsprofil für den Wintertag „mild“ schaltete sich der Spitzenlastkessel nur selten zu. Aufgrund des insgesamt wesentlich geringeren Wärmebedarfs konnte der Brenner des Stirling-Motors diesen meist alleine abdecken (siehe Abbildung 3.1 unten).

In Abbildung 3.2 sind beispielhaft die gemessenen Gaskonzentrationen für CO<sub>2</sub>, CO, VOC und NO<sub>x</sub> für einen Zyklus der Heizlastkurve Wintertag „kalt“ für das Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis dargestellt.

Die Verläufe der Gaskonzentrationen machen deutlich, dass es sich beim Brenner für den Stirling-Motor und beim Spitzenlastkessel um unterschiedliche Brennersysteme handelt. Schaltet der Spitzenlastkessel zu, nehmen die CO<sub>2</sub>-, CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen zu und die VOC-Konzentration im Abgas ab. Beim alleinigen Betrieb des Stirling-Brenners werden geringere CO<sub>2</sub>-, CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen und höhere VOC-Konzentrationen im Abgas gemessen. Hierdurch ergeben sich die in Tabelle 3.1 aufgeführten Mittelwerte der Emissionsfaktoren. Bei allen Versuchen mit dem Mikro-Kraft Wärme Kopplungsgerät konnten keine Verfärbungen auf den Filtern der Staubprobenahme festgestellt werden.

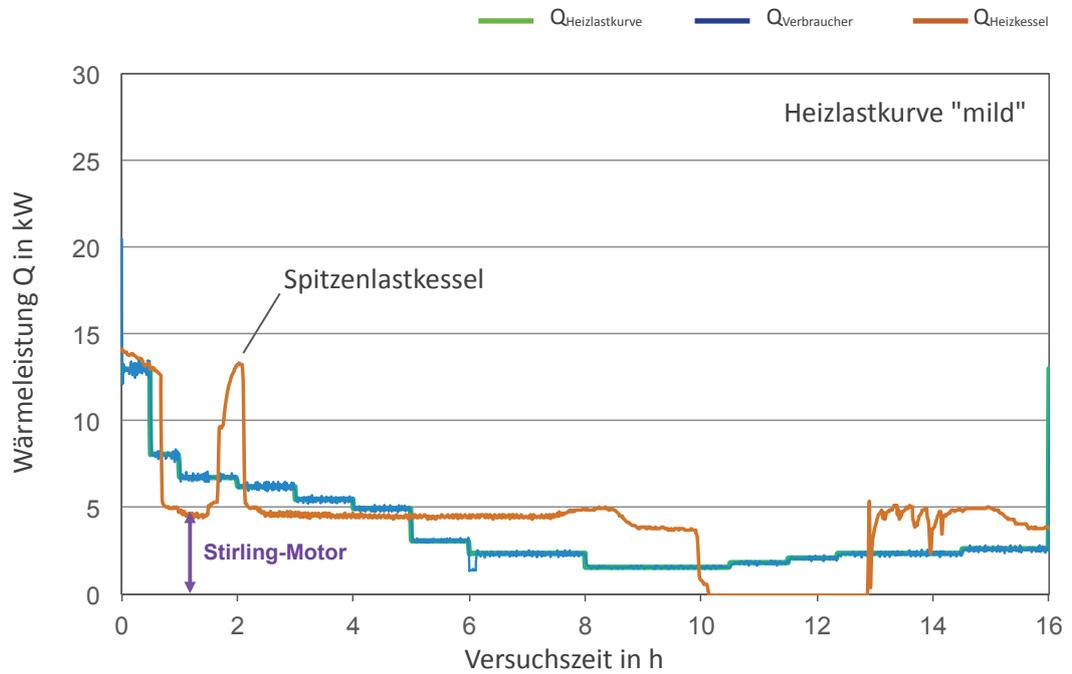
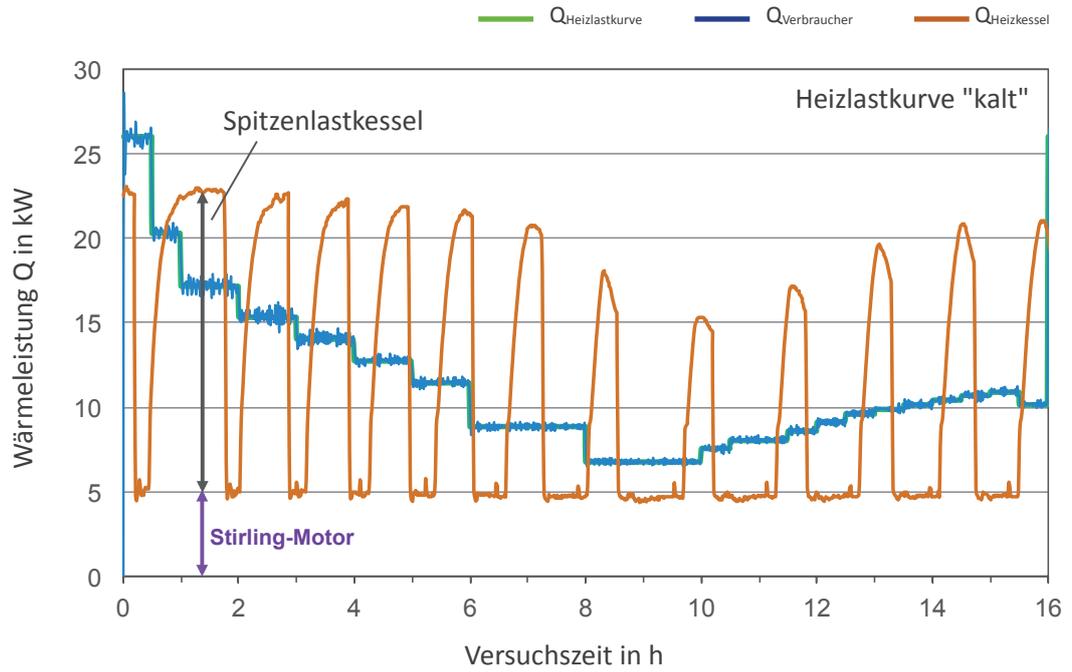


Abbildung 3.1: Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – beispielhafte Verläufe der Wärmeleistungen für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“ (oben) und „mild“ (unten)

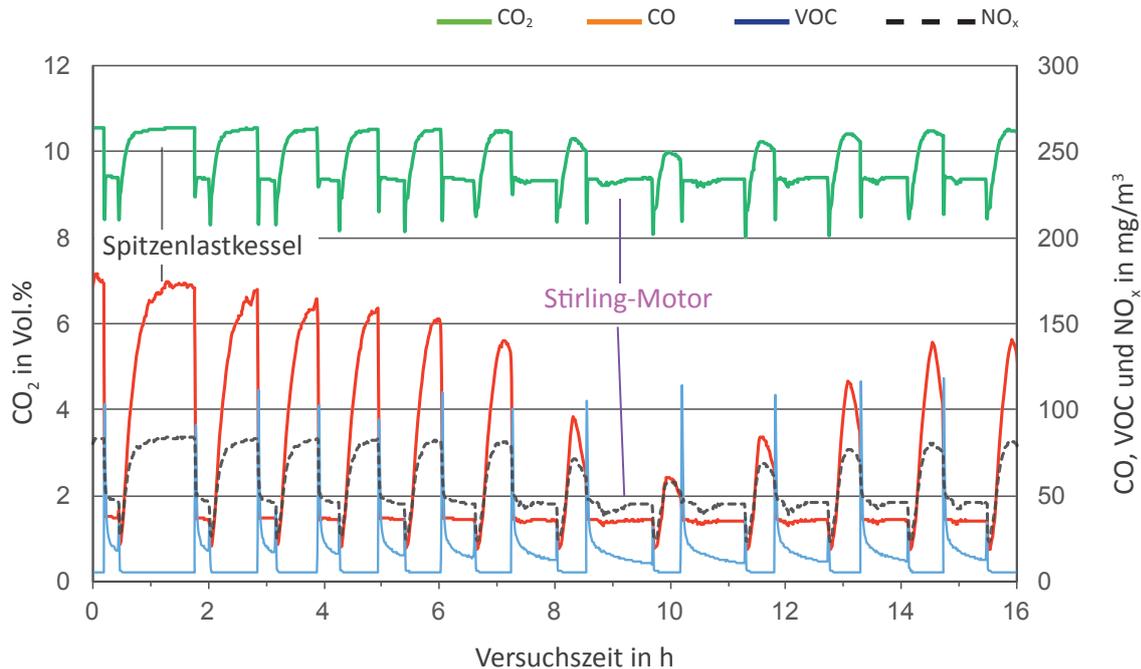


Abbildung 3.2: Mikro-KWK-Gerät auf Stirling-Basis – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von CO<sub>2</sub>, CO, VOC und NO<sub>x</sub> für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“

Im Dauerbetrieb bei höchster Wärmeleistung (sowohl Spitzenlastkessel als auch Brenner des Stirling-Motors ist in Betrieb) ergeben sich die höchsten Emissionen an CO und NO<sub>x</sub> und die geringsten Konzentrationen an VOC. Beim Betrieb des Heizgerätes mit dem Wärmebedarfsprofil „mild“ läuft im Wesentlichen nur der Stirling-Brenner, der Spitzenlastkessel schaltet nur gelegentlich zu. Hier ergeben sich dann die niedrigeren CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen und die höheren VOC-Emissionen. Da bei den Schaltvorgängen beim Spitzenlastkessel noch kurze VOC-Spitzenkonzentrationen gemessen werden, sind die VOC-Emissionsfaktoren für das Wärmebedarfsprofil Wintertag „kalt“ höher als beim Profil „mild“, da bei letzterem nur wenige Ein- und Ausschaltvorgänge beim Spitzenlastkessel auftreten.

Die ermittelten Emissionsfaktoren für Staub sind für alle untersuchten Betriebszustände niedrig und korrelieren nicht unmittelbar mit den gemessenen CO- beziehungsweise VOC-Emissionen. Die Staubemissionen setzen sich im Wesentlichen aus Ruß und Schwefelsäuretröpfchen zusammen, denn Aschebestandteile sind in Flüssiggas allenfalls in Spuren vorhanden.

Da sich die im Abgas vorliegende tröpfchenförmige Schwefelsäure bevorzugt auf feuchten oder nassen Wärmeübertragerflächen niederschlagen wird, ist deren Anteil an den Staubemissionen auch vom Brennwertbetrieb des Heizkessels abhängig. Bei einem hohen Kondensatanfall im Heizkessel nimmt dieser Anteil ab. VOC-Emissionen können bei Gasgeräten auch zu einem höheren Anteil aus unverbranntem Brennstoff bestehen, wenn zum Beispiel Gasventile nicht vollständig dicht schließen oder nach einem Verlöschen der Flamme noch geringe Gasmengen aus der Zuführung (Verbindungsrohr zwischen Gasventil und Brenner) entweichen. In einem solchen Fall entstehen die VOC-Emissionen nicht durch Luftmangel in der Flamme und es findet damit auch keine parallele Rußbildung in der Flamme statt.

Die gemessenen SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren lagen für alle untersuchten Betriebszustände in einer engen Bandbreite und unterschieden sich nur wenig. Bei allen Betriebszuständen lag eine Brennwertnutzung vor, der Schwefelanteil im Kondensat des Heizkessels lag zwischen 22 und 36 Prozent, dementsprechend wurden 64 bis 78 Prozent des insgesamt über den Brennstoff zugeführten Schwefels über das Abgas emittiert.

### 3.2 Gas-Brennwertkessel

In Tabelle 3.2 sind die Versuchsergebnisse für den Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner als Mittelwerte für die jeweiligen Heizlastkurven beziehungsweise den Dauerversuch aufgelistet. Die Gesamtversuchszeit für den Dauerversuch betrug 239 Stunden, die beiden Heizlastkurven wurden in mehrfachen Durchgängen vermessen mit einer Gesamtversuchszeit von 287 Stunden (Profil „kalt“) beziehungsweise 32 Stunden (Profil „mild“).

In Abbildung 3.3 sind die Verläufe der vorgegebenen, abgeführten und erzeugten Wärmeleistungen ( $Q_{\text{Heizlastkurve}}$ : Sollwert nach Wärmebedarfskurve,  $Q_{\text{Verbraucher}}$ : an Kühlkreislauf abgeführte Wärmeleistung;  $Q_{\text{Heizkessel}}$ : erzeugte Wärmeleistung des Heizkessels) beispielhaft für den Betrieb von Heizkesseln ohne Pufferspeicher für einen Zyklus der Heizlastkurve Wintertag „kalt“ dargestellt. Die an den Kühlkreis abgegebene Wärmeleistung folgte sehr gut dem vorgegeben Sollwert, wobei hier etwas größere Schwankungen auftraten als beim Betrieb über einen Pufferspeicher mit dem Mikro-KWK-Gerät.

Kesseltyp	Profil	Leistung		CO <sub>2</sub>	CO	VOC	Staub	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
		[kW <sub>th</sub> ]	[kW <sub>el</sub> ]	[Vol.-%]	[mg/MJ]	[mgC/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Gas-Brennwertkessel	dauer	17,7	–	10,3	1,4	1,9	0,001	0,09	15
	kalt	7,2	–	10,1	1,4	1,8	0,001	0,09	21
	mild	2,9	–	9,2	10	8,8	0,067	0,06	20

Tabelle 3.2: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven

Aufgrund des großen Modulationsbereichs des Gas-Brennwertkessels (laut Herstellerangaben von 2,6 bis 19 kW) lag der Wärmebedarf für das Profil Wintertag „kalt“ komplett und für den Wintertag „mild“ zu rund 50 Prozent innerhalb dieses Bereiches, so dass keine Schaltvorgänge notwendig waren.

In Abbildung 3.4 sind beispielhaft die gemessenen Gaskonzentrationen für CO<sub>2</sub>, CO, VOC und NO<sub>x</sub> für einen Zyklus der Heizlastkurve Wintertag „kalt“ für den Gas-Brennwertkessel dargestellt.

Die Verläufe der Gaskonzentrationen zeigen den kontinuierlichen Brennerbetrieb mit einigen Schwankungen bei den CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen, die wahrscheinlich auf Regelvorgänge zurückzuführen sind. Diese haben aber keine Auswirkungen auf die CO- und VOC-Konzentrationen, die während der gesamten dargestellten Versuchszeit auf einem sehr geringen Niveau verblieben.

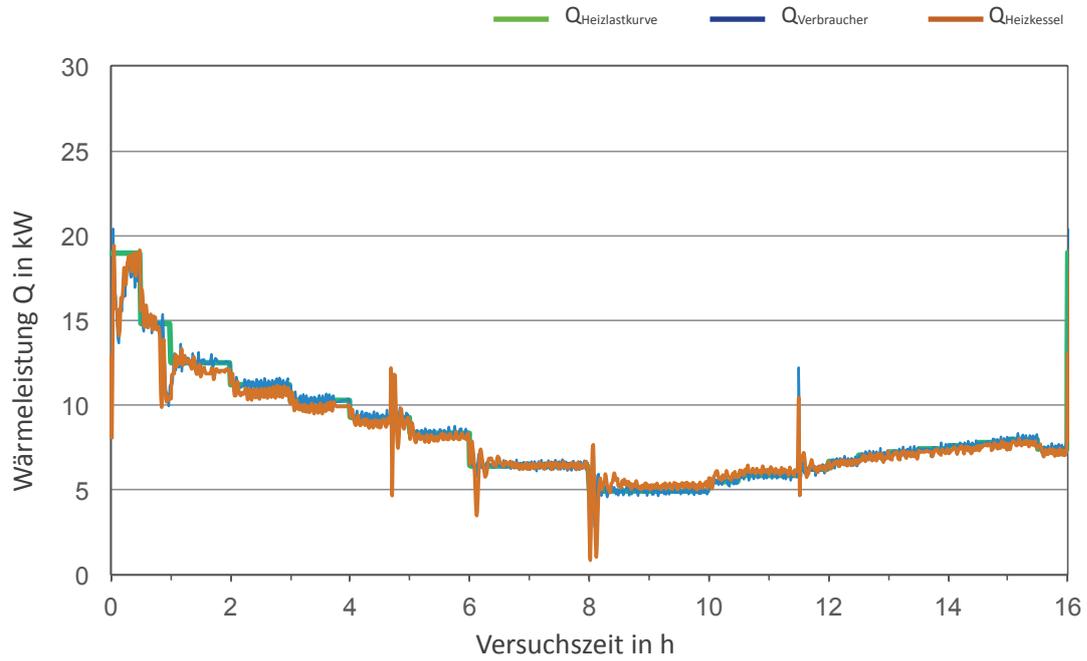


Abbildung 3.3: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – beispielhafter Verlauf der Wärmeleistungen für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“

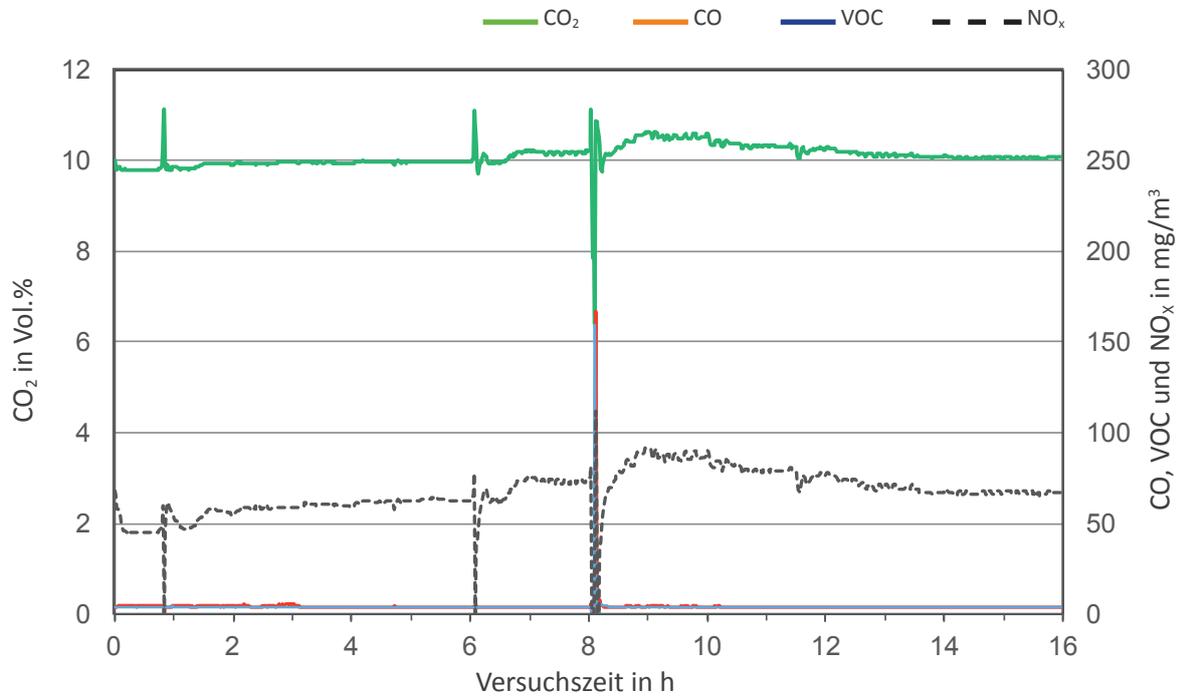


Abbildung 3.4: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von  $\text{CO}_2$ , CO, VOC und  $\text{NO}_x$  für die Heizlastkurve Wintertag „kalt“

Im Profil Wintertag „mild“ verhält sich das Heizsystem in den ersten Stunden der Heizzeit vergleichbar, da auch hier der Wärmebedarf innerhalb des Modulationsbereichs des Brenners liegt. Erst der geringe Wärmebedarf ab ca. der achten Stunde der Heizzeit (siehe Abbildung 2.2) liegt nicht mehr im Modulationsbereich des Brenners, so dass ab diesem Zeitpunkt Start- und Stoppvorgänge mit erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung vorliegen.

Das diskutierte Betriebsverhalten des Heizkessels spiegelt sich in den in Tabelle 3.2 aufgeführten Mittelwerten der Emissionsfaktoren wieder.

Im Dauerbetrieb bei höchster Wärmeleistung und im Wärmebedarfsprofil „kalt“ ergeben sich die geringsten Emissionen an CO, VOC und Staub. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind beim Dauerbetrieb am niedrigsten und steigen bei den Wärmebedarfsprofilen etwas an.

Da bei den Schaltvorgängen im Wärmebedarfsprofil „mild“ erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung auftreten, nehmen die ermittelten Emissionsfaktoren für CO, VOC und Staub zu. Die Zunahme der Staubemissionen wird hierbei vor allem durch Ruß verursacht (siehe Bilder in Tabelle 3.3).

Die gemessenen SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren liegen für alle untersuchten Betriebszustände in einer engen Bandbreite und unterscheiden sich nur wenig. Bei allen Betriebszuständen lag eine Brennwertnutzung vor, der Schwefelanteil im Kondensat des Heizkessels lag zwischen 27 und 53 Prozent, dementsprechend wurden 47 bis 73 Prozent des insgesamt über den Brennstoff zugeführten Schwefels über das Abgas emittiert.

Filter „dauer“	Filter „kalt“	Filter „mild“	Filter „leer“
			
<b>Probenahmedauer</b>			
146 h	143 h	16 h	–
<b>Masse auf Filter</b>			
1,4 mg	0,5 mg	3,4 mg	-
<b>Emissionsfaktor für Versuch *</b>			
0,001 mg/MJ	0,001 mg/MJ	0,073 mg/MJ	-

\* Emissionsfaktor des Versuchs errechnet sich aus der Staubmasse des Filters und der Staubmasse in der Spülflüssigkeit

Tabelle 3.3: Gas-Brennwertkessel mit modulierendem Gasbrenner – Bilder, Probenahmedauer und Masse auf den Staubfiltern für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven

### 3.3 Niedertemperatur-Gas-Heizkessel

In Tabelle 3.4 sind die Versuchsergebnisse für den Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner als Mittelwerte für die jeweiligen Heizlastkurven beziehungsweise den Dauerversuch aufgelistet. Die Gesamtversuchszeit für den Dauerversuch betrug 166 Stunden, die beiden Heizlastkurven wurden in mehrfachen Durchgängen vermessen mit einer Gesamtversuchszeit von 164 Stunden (Profil „kalt“) beziehungsweise 224 Stunden (Profil „mild“).

Kesseltyp	Profil	Leistung		CO <sub>2</sub>	CO	VOC	Staub	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
		[kW <sub>th</sub> ]	[kW <sub>el</sub> ]	[Vol.%]	[mg/MJ]	[mgC/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Niedertemperatur-Gas-Heizkessel	dauer	17,9	–	9,0	1,7	2,3	0,008	0,21	13
	kalt	7,7	–	5,7	9,9	32	0,028	0,15	12
	mild	2,3	–	6,1	8,8	28	0,018	0,08	7,9

Tabelle 3.4: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – Mittelwerte der ermittelten Emissionsfaktoren, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Leistungen für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven

Aufgrund des einstufigen Brenners beginnt der Heizkessel bei Wärmeanforderungen unterhalb der Nennwärmeleistung zu takten, dies ist in Abbildung 3.5 beispielhaft anhand des CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverlaufs dargestellt. Mit aufgeführt ist die vorgegebene Wärmeleistung ( $Q_{\text{Heizlastkurve}}$ : Sollwert nach Wärmebedarfskurve) für das Wärmebedarfsprofil „kalt“ für die ersten acht Stunden des Profils. Abbildung 3.6 zeigt die gemessenen Gaskonzentrationen für NO<sub>x</sub>, CO und VOC für die ersten zwei Stunden eines Zyklus der Heizlastkurve Wintertag „kalt“.

Die Verläufe der Gaskonzentrationen zeigen den taktenden Brennerbetrieb bei Wärmeleistungen unterhalb der Nennwärmeleistung, wobei bei den Start- und Stopp-Vorgängen jeweils CO- und VOC-Emissionsspitzen auftreten. Die Brennerlauf- und Stillstandszeiten hängen von der Spreizung der Kesselwassertemperatur und vom jeweiligen Wärmebedarf ab.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind beim Dauerbetrieb am höchsten und nehmen bei den Wärmebedarfsprofilen ab.

Bei allen Betriebszuständen lag beim Niedertemperatur-Gas-Heizkessel keine messbare Brennwertnutzung vor, dementsprechend ergab sich für diesen Kessel nur eine SO<sub>2</sub>-Emission über das Abgas. Die gemessenen SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren unterscheiden sich für die untersuchten Betriebszustände deutlich und nehmen vom Dauerbetrieb bis zum Wärmebedarfsprofil „mild“ merklich ab. Es wird vermutet, dass bei geringen Wärmeleistungen und damit verbunden geringen Kesseltemperaturen örtlich Kondensat im Wärmeübertrager des Heizkessels entsteht und dort SO<sub>2</sub> in Lösung geht. Da das Kondensat bei diesem Heizkessel nicht abgeführt wird, kann es in der Schwefelbilanz auch nicht berücksichtigt werden.

Das Betriebsverhalten des Heizkessels spiegelt sich in den in Tabelle 3.4 aufgeführten Mittelwerten der Emissionsfaktoren wieder. Im Dauerbetrieb werden bei diesem Kessel die geringsten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und Staub) gemessen. Beim Betrieb mit Wärmebedarfsprofilen nehmen diese Emissionen zu. Die Zunahme der Staubemissionen wird hierbei vor allem durch Ruß verursacht (siehe Bilder in Tabelle 3.5).

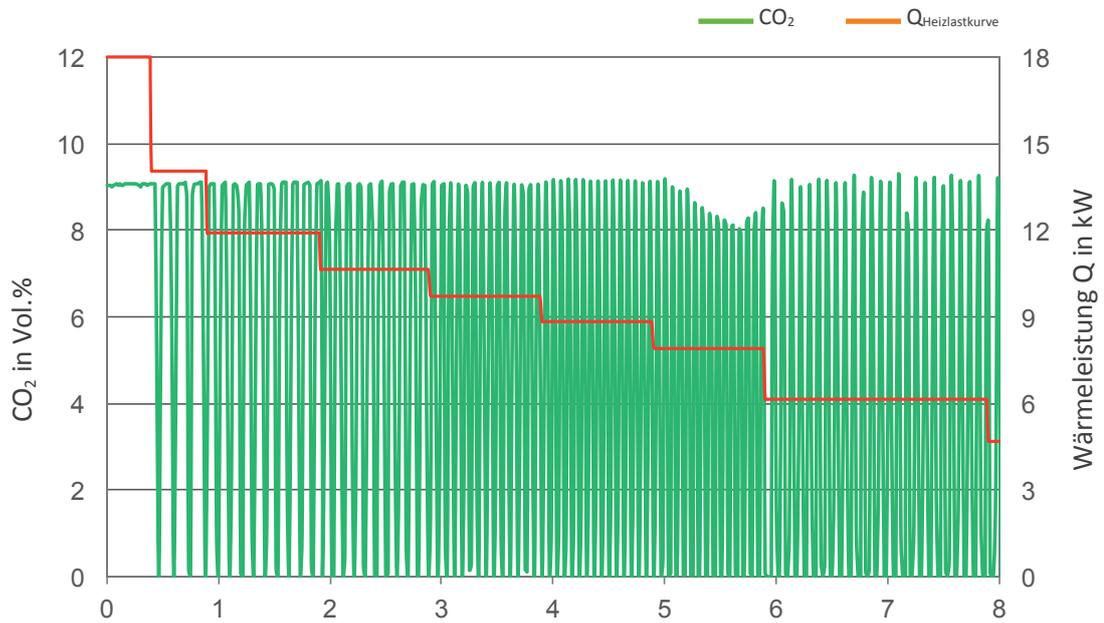


Abbildung 3.5: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von  $\text{CO}_2$  und der vorgegebenen Wärmeleistung für die ersten 8 Stunden der Heizlastkurve Wintertag „kalt“

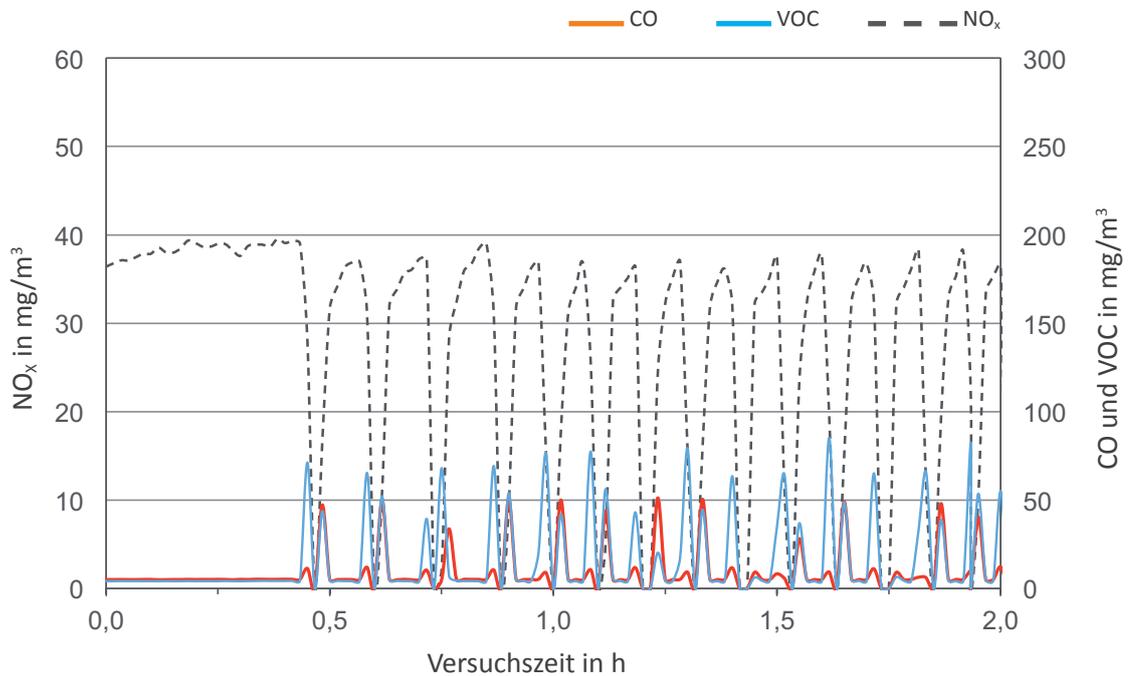


Abbildung 3.6: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – beispielhafter Verlauf der Gaskonzentration von  $\text{NO}_x$ , CO und VOC für die ersten zwei Stunden der Heizlastkurve Wintertag „kalt“

Filter „dauer“	Filter „kalt“ Versuch 1	Filter „kalt“ Versuch 2	Filter „mild“
			
<b>Probenahmedauer</b>			
71 h	82 h	82 h	128 h
<b>Masse auf Filter</b>			
3,6 mg	1,2 mg	7,4 mg	2,5 mg
<b>Emissionsfaktor für Versuch *</b>			
0,008 mg/MJ	0,007 mg/MJ	0,049 mg/MJ	0,018 mg/MJ

\* Emissionsfaktor des Versuchs errechnet sich aus der Staubmasse des Filters und der Staubmasse in der Spülflüssigkeit

Tabelle 3.5: Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner – Bilder, Probenahmedauer und Masse auf den Staubfiltern für den Dauerversuch und die beiden Heizlastkurven

Bei den Versuchen mit dem Niedertemperatur Gas Heizkessel waren bei fast allen Messungen Metallpartikel auf dem Filter zu finden (vgl. Abbildung 3.7). Anfangs wurde vermutet, dass die Metallpartikel auf den Filtern überproportional zur Masse beitragen, was sich im Laufe der Messungen nicht bestätigt hat und in Tabelle 3.5 bei den Filtern „kalt Versuch 2“ und „mild“ erkennbar ist. Beide Filter weisen eine ähnliche Verfärbung auf, die aus Partikeln von Produkten unvollständiger Verbrennung (zum Beispiel Ruß, hochsiedende organische Verbindungen) stammen, wobei auf Filter „mild“ eine große Menge von Metallpartikeln erkennbar ist. Trotzdem wurde bei einer längeren Probenahmedauer eine geringere Partikelmasse gewogen. Folglich wird die Partikelkonzentration der Feuerung durch die Verbrennungsbedingungen bestimmt. Die Herkunft der Metallpartikel ist unbekannt.

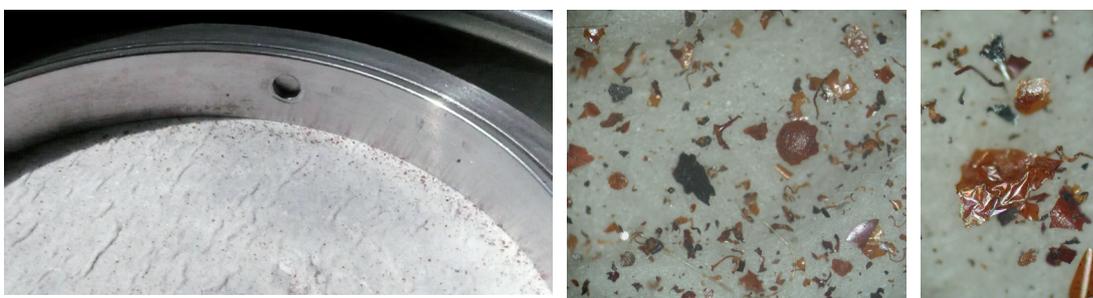


Abbildung 3.7: links: Metallpartikel auf dem Filtermaterial des Staubfilters (Vorversuch)  
rechts: Mikroskopaufnahme der Metallpartikel

## 4 Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger

Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Hausheizungen unter praxisnahen Bedingungen wurden bereits an Heizkesseln für Heizöl EL und für Holzpellets durchgeführt [Struschka et al., 2010a] [Struschka et al., 2010b]. Diese älteren Untersuchungen wurden unter gut vergleichbaren Randbedingungen und vergleichbarer Methodik durchgeführt. Die damals eingesetzten Heizgeräte waren am Markt verfügbar und entsprachen dem Stand der Technik.

In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der aktuellen Untersuchung im Vergleich mit den älteren, unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführten Untersuchungen, aufgelistet.

Kesseltyp	Profil	CO	VOC	Staub	NO <sub>x</sub>
		[mg/MJ]	[mgC/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
Mikro-KWK	dauer	51	2	0,014	24
	kalt	28	6	0,029	20
	mild	13	4	0,005	13
Gas-Brennwertkessel	dauer	1	2	0,001	15
	kalt	1	2	0,001	21
	mild	10	9	0,067	20
Niedertemperatur-Gas-Heizkessel	dauer	2	2	0,008	13
	kalt	10	32	0,028	12
	mild	9	28	0,018	8
Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL (Standardqualität*) <sup>1)</sup>	dauer	2		0,392	22*
	kalt			0,389	
Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL (schwefelarm*) <sup>1)</sup>	dauer	2		0,046	
	kalt			0,026	
Mittelwert 3 Pelletskessel mit Pufferspeicher <sup>** 2)</sup>	dauer	140	3	15	
	kalt	803	59	30	
	mild	710	62	37	

\* Standardqualität S-Gehalt 741 mg/kg, schwefelarme Qualität S-Gehalt 9 mg/kg

\*\* bei Staub Mittelwert von 2 Pelletskesseln (ein Kessel mit Elektrofilter: Staub ~ 5 mg/MJ)

<sup>1)</sup>[Struschka et al., 2010a] <sup>2)</sup>[Struschka et al., 2010b] (2010b)

Tabelle 4.1: Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger – Ergebnisse der aktuellen mit vorangegangenen Untersuchungen

Aufgrund unterschiedlicher Schwerpunkte bei den einzelnen Untersuchungen sind, im Vergleich zu der aktuellen Untersuchung an Flüssiggasgeräten, nicht alle Emissionskomponenten durchgängig vorhanden.

Mit Ausnahme des Mikro-KWK-Gerätes liegen beim CO die ermittelten Emissionsfaktoren für die Flüssiggasgeräte bei 10 mg/MJ oder darunter. Der untersuchte Niedertemperaturkessel mit den beiden aufgeführten Heizölqualitäten erreicht im Dauerbetrieb vergleichbare Werte, für die Wärmebedarfsprofile liegen keine Ergebnisse vor. Deutlich höhere Emissionsfaktoren für CO (> 100 mg/MJ) wurden mit den Pelletskesseln ermittelt. Werden diese nicht im

stationären Dauerbetrieb betrieben, sondern mit Wärmebedarfsprofilen, wobei Leistungsregelvorgänge sowie Start- und Stoppvorgänge erfasst werden, steigen die Emissionen von CO und auch VOC merklich an.

Ein ähnliches Verhalten zeigt hier der untersuchte Niedertemperatur-Gas-Heizkessel mit einstufigem Vormischbrenner. Durch die häufigen Start- und Stoppvorgänge bei den beiden untersuchten Wärmebedarfsprofilen steigen die VOC-Emissionen, im Vergleich zum Wert beim stationären Dauerbetrieb, deutlich an.

Die Emissionsfaktoren für Staub unterscheiden sich zwischen den Heizgeräten für Flüssiggas und Heizöl EL sowie Holzpellets wesentlich. Bei den Heizgeräten für Flüssiggas und Heizöl EL liegen diese unterhalb von 0,4 mg/MJ beziehungsweise, wenn nur das derzeit marktübliche schwefelarme Heizöl betrachtet wird, sogar unterhalb von 0,07 mg/MJ. Der Mittelwert für die drei aufgeführten Pelletkessel liegt im Dauerbetrieb bei 15 mg/MJ und bei den Wärmebedarfsprofilen mindestens doppelt so hoch.

Die Unterschiede bei den Emissionsfaktoren für Staub sind für die Heizgeräte für Flüssiggas und Heizöl EL (schwefelarm) gering. Im Dauerbetrieb ergeben sich für alle untersuchten Flüssiggasgeräte etwas niedrigere Emissionsfaktoren für Staub im Vergleich zum Niedertemperaturkessel mit Ölgebläsebrenner, bei den Wärmebedarfsprofilen liegen diese zum Teil etwas niedriger (zum Beispiel beim Gas-Brennwertkessel und Profil „kalt“), auf ähnlichem Niveau (zum Beispiel Mikro-KWK und Profil „kalt“) oder höher (Gas-Brennwertkessel mit Profil „mild“).

Die NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren der untersuchten Flüssiggasgeräte liegen in einem Bereich von 8 bis 24 mg/MJ. Der niedrigste Emissionsfaktor wird beim Wärmebedarfsprofil „mild“ vom Niedertemperatur-Gas-Heizkessel erreicht, der höchste Wert ergibt sich im Dauerbetrieb beim Mikro-KWK-Gerät. Stickstoffoxide wurden in den älteren Untersuchungen nur beim Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL (Standardqualität) im Dauerbetrieb ermittelt. Dabei liegen die NO<sub>x</sub>-Emissionen auf einem ähnlichen absoluten Niveau wie beim gleichwertigen Gasgerät, wobei der Flüssiggas-Niedertemperaturkessel im gemessenen Fall einen um ca. 40 Prozent geringeren Emissionsfaktor im Dauerbetrieb im Vergleich zum Niedertemperaturkessel mit Heizöl EL aufweist.

Für die dargestellten Untersuchungen gilt insgesamt, dass aufgrund der gewählten Anzahl an Flüssiggas-Heizgeräten die Ergebnisse nicht die gesamte Bandbreite der am Markt verfügbaren Heizkessel abdecken. Die Ergebnisse sind vielmehr beispielhaft für zum jeweiligen Zeitpunkt marktübliche Geräte zu sehen. Da die Ergebnisse grundsätzlich auch von den Randbedingungen und der Methodik abhängen, können diese nicht uneingeschränkt mit anderen Untersuchungen, Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV oder den Ergebnissen von Norm-Typenprüfungen verglichen werden. Insofern kann mit dieser Untersuchung nicht beurteilt werden, inwiefern sich technische Weiterentwicklungen bei den Pellet- und Heizölkesseln, die zum Beispiel aufgrund verschärfter Grenzwerte in der aktuellen 1. BImSchV notwendig wurden, auf die Untersuchungsergebnisse mit Wärmebedarfskurven auswirken könnten. So sind die Überprüfungen auf Einhaltung der Grenzwerte nach 1. BImSchV unter stationären Betriebsbedingungen auf dem Prüfstand im Rahmen der Typenprüfung (NO<sub>x</sub>-Emissionen für Ölfeuerungen) unter den in der DIN EN 267 definierten Bedingungen beziehungsweise bei installierten Anlagen während des ungestörten Dauerbetriebs (Staub- und CO-Konzentrationen bei Pelletkesseln) nach den Messbedingungen für den Geltungsbereich der 1. BImSchV durchzuführen.

In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der aktuellen Untersuchung für den Dauerbetrieb im Vergleich zu den derzeit noch aktuellen Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand der Haushalte und Wohngebäude in Deutschland im Jahr 2008 für Gebläsebrenner mit Heizöl EL und für Pelletkessel für Nennwärmeleistungen von 4 - 25 kW aufgeführt.

Bei dieser Berechnung der Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand werden die Bestandsstruktur (Alters- und Leistungsstruktur der im Verbrauchssektor Haushalte installierten Anlagen), der gerätebezogene Endenergieverbrauch (hierzu wird der Endenergieverbrauch der jeweiligen Energieträger im Bereich der Haushalte strukturiert nach Gerätegruppen beziehungsweise Bauarten der Feuerungsanlagen und Leistungsbereiche aufgeschlüsselt) und das Emissionsverhalten der einzelnen Bauarten berücksichtigt. Das Emissionsverhalten der einzelnen Gerätebauarten wird anhand von Emissionsangaben von Prüfstands- und Felduntersuchungen unter Berücksichtigung der Anlagenstruktur sowie der Betriebsweise (Unterscheidung nach Lastfällen) der Anlagen beschrieben. Erhöhte Emissionen durch Start- und Stoppvorgänge oder Regelvorgänge werden hierbei aufgrund der mangelnden Datennlage nicht berücksichtigt. Deshalb erfolgt in Tabelle 4.2 der Vergleich zwischen den Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand nur mit den Ergebnissen für den Dauerbetrieb der aktuellen Untersuchung. Insgesamt überwiegen bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand in Deutschland die Emissionsdaten aus Prüfstandsuntersuchungen, da Feldmessungen an installierten Anlagen nicht so häufig durchgeführt werden.

Kesseltyp	Profil	CO	VOC*	Staub	NO <sub>x</sub>
		[mg/MJ]	[mgC/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]
<b>Mikro-KWK</b>	dauer	51	2	0,014	24
<b>Gas-Brennwertkessel</b>	dauer	1	2	0,001	15
<b>Niedertemperatur-Gas-Heizkessel</b>	dauer	2	2	0,008	13
<b>Heizöl EL (Gebläsebrenner) <sup>1)</sup></b>	EF	7	2,5	0,8	40
<b>Pelletskessel <sup>1)</sup></b>	EF	179	1,7	21	80

EF: Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand in Deutschland im Jahr 2008 für Heizkessel in Haushalten mit Nennwärmeleistungen zwischen 4 bis 25 kW

<sup>1)</sup>[Struschka et al., 2012] \*für Daten aus <sup>1)</sup>: angegeben sind NMVOC

Tabelle 4.2: Emissionsvergleich nicht leitungsgebundener Energieträger – Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen für den Dauerbetrieb und Angaben zu Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand der Haushalte in Deutschland im Jahr 2008

Im Vergleich zu den aufgeführten Emissionsfaktoren für Heizöl EL (Gebläsebrenner) für den Anlagenbestand liegen die aus den aktuellen Untersuchungsergebnissen berechneten Emissionsfaktoren für den Dauerbetrieb nahezu gleich (für VOC) oder niedriger (mit Ausnahme CO für das Mikro-KWK-Gerät).

Die für den Bestand an Pelletkesseln berechneten Emissionsfaktoren für CO und NO<sub>x</sub> und vor allem für Staub liegen deutlich über den Ergebnissen der untersuchten Heizgeräte für Flüssiggas für den Dauerbetrieb.

Beim Vergleich der vorliegenden Ergebnisse an derzeit marktüblichen Heizgeräten mit den Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand bei Heizgeräten mit Ölgebläsebrennern ergeben sich größere Unterschiede, da im Anlagenbestand auch Altgeräte mit einem hohem Anteil vertreten sind.

## Quellenverzeichnis

---

### 1. BImSchV, 2010

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 26. Januar 2010. BGBl I, S. 38., 2010.

### DIN EN 267:2011-11

Automatische Brenner mit Gebläse für flüssige Brennstoffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

### DIN 4702-8:1990-03

Heizkessel; Ermittlung des Norm-Nutzungsgrades und des Norm-Emissionsfaktors. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

### DIN EN 14791:2014-12 - Entwurf

Emissionen aus stationären Quellen - Bestimmung der Massenkonzentration von Schwefeloxiden - Standardreferenzverfahren. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

### DIN 51622:1985-12

Flüssiggase; Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische; Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

### FFE, 2002

Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung. Verbundprojekt ISOTEC. Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung. Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V. (FFE), München.

### PetroLab, 2015

Analysenergebnisse des verfeuerten Flüssiggases vom 24.4.2015 (für Gasfüllung 24.3.2015) und 13.10.2015 (für Gasfüllung vom 14.9.2015). Auszug aus Analysenzertifikate von PetroLab GmbH, Speyer.

### Struschka et al., 2010a

Struschka, Michael; Springmann, Maik; Goy, Julia; Schäfer, Christian, 2010a.  
Feinstaubemissionen von Öl-, Gas- und Pelletkesseln. Immissionsschutz, Heft 1, Seite 23ff.

### Struschka et al., 2010b

Struschka, Michael; Goy, Julia; Schäfer, Christian, 2010b.  
Beitrag von Pelletsfeuerungen zu den Emissionen von Feinstäuben, CO und VOC in Ballungsräumen. Endbericht zum Vorhaben FKZ A24206 der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg in Karlsruhe. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

### Struschka et al., 2012

Struschka, Michael; Möck, Philipp, Brodbeck, Johannes, 2012.  
Ermittlung aktueller Emissionsfaktoren für das Bezugsjahr 2008. Bericht im Auftrag des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) Institut für Technologiefolgenabschätzung und Systemanalyse, Eggenstein-Leopoldshafen im Rahmen des Projektes „Datenvalidierung/Methodenentwicklung zur verbesserten Erfassung und Darstellung der Emissionssituation im PRTR“ (UBA FKZ 371091244). Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart.

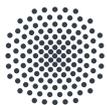
### VDI 2066 Blatt 1:2006-11

Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

### Verordnung (EU) Nr. 813/2013:2013-08-02

Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 2. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten. ABl. EG L 239, S. 136, 6. September 2013.





**Universität Stuttgart**

**Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)**

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685 6 8275

E-Mail: [ifk@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:ifk@ifk.uni-stuttgart.de)

[www.ifk.uni-stuttgart.de](http://www.ifk.uni-stuttgart.de)



Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)