

# Emissionsmessungen bei der Verbrennung biogener flüssiger Brennstoffe

Datum: 29.01.2020

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

**Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,  
CH – 3003 Bern  
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie  
und Kommunikation (UVEK).

**Auftragnehmer:** Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)  
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz (IBRE)

**Autoren:** Dieter Winkler  
Tom Strebel  
Nemo Lohberger

## Inhalt

1	Ausgangslage .....	4
2	Ziele der Untersuchung .....	5
2.1	Fragestellung 1: Erhöhung des Grenzwertes für den Aschegehalt in der LRV .....	5
2.2	Fragestellung 2: Verbrennung von Altspeiseöl in kleinem Ölbrenner .....	5
2.3	Untersuchte Stoffe .....	5
3	Prüf- und Analysemethoden .....	6
3.1	Vorgehen bei der Prüfung .....	6
3.2	Green Power-Ölbrenner .....	6
3.3	Emissionsmessmethoden .....	8
3.4	Brennstoffanalyse .....	9
4	Ergebnisse .....	10
4.1	Übersicht über die durchgeführten Messungen .....	10
4.2	Brennstoffanalyse .....	10
4.3	Gasförmige Emissionen .....	12
4.4	Russ-Emission .....	13
4.5	Feinstaub-Emissionen .....	15
4.6	PCDD/F und PAK .....	17
5	Fazit .....	19
5.1	Zu Fragestellung 1 .....	19
5.2	Zu Fragestellung 2 .....	20
6	Anhang .....	22
6.1	Analyse-Bestimmungsgrenzen für PCDD/F und PAK .....	22

## 1 Ausgangslage

Die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) schreibt in Anh. 5 Ziff. 13 vor, dass "andere flüssige Brennstoffe" die Grenzwerte aus Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 2 LRV (Tabelle 1) nicht überschreiten und keine höheren oder anderen Schadstoffemissionen wie Heizöl Extraleicht verursachen (Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 1 LRV) dürfen.

Tabelle 1: Grenzwerte Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 2 LRV

Asche	50 mg/kg
Chlor	50 mg/kg
Barium	5 mg/kg
Blei	5 mg/kg
Nickel	5 mg/kg
Vanadium	10 mg/kg
Zink	5 mg/kg
Phosphor	5 mg/kg
Polychlorierte aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. PCB)	1 mg/kg

Für flüssige biogene Brennstoffe gelten für Asche und Phosphor abweichend von Abs. 2 folgende Werte:

Tabelle 2: Grenzwerte Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 3 LRV

Asche	100 mg/kg
Phosphor	20 mg/kg

Die LRV erlaubt seit Sommer 2018 andere flüssige Brennstoffe unter gewissen Bedingungen auch in Anlagen unter 350 kW einzusetzen. Dafür müssen sie gemäss Anh. 3 Ziff. 7 LRV:

- a) den Qualitätsanforderungen einer Norm entsprechen; und
- b) die Anforderungen bei der Verbrennung im vorgesehenen Feuerungstyp einhalten, d. h. nebst den Grenzwerten in Anh. 5 Ziff. 13 LRV auch keine höheren oder anderen Schadstoffemissionen wie Heizöl Extraleicht verursachen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Analysen und Emissionsmessungen mit verschiedenen biogenen Stoffen durchgeführt, um abzuklären, ob diese Stoffe die Anforderungen für andere flüssige Brennstoffe der LRV einhalten und welche Auswirkungen die Brennstoffe auf die Emissionen haben.

## 2 Ziele der Untersuchung

### 2.1 Fragestellung 1: Erhöhung des Grenzwertes für den Aschegehalt in der LRV

Der Verband Biofuels Schweiz stellte einen Antrag zur Erhöhung des Grenzwertes für den Aschegehalt in der LRV für flüssige biogene Brennstoffe von 100 mg/kg auf 200 mg/kg. Die Motivation des Verbands war es, dadurch ein grösseres Angebot an potenziellen "anderen flüssigen Brennstoffen" am Markt zu haben, insbesondere auch von Lieferanten aus dem Ausland. In Absprache mit dem BAFU wurden zwei potenzielle biogene Brennstoffe zur Untersuchung gewählt. Die potenziellen Brennstoffe und deren Emissionen sollten analysiert und mit denjenigen von Heizöl Extraleicht und FAME (Biodiesel) verglichen werden. Zusätzlich wurde noch ein weiterer potenzieller Brennstoff aus der Tierverwertung untersucht.

Falls keine höheren oder andere Schadstoff-Emissionen als bei Heizöl "Extra leicht" auftreten sollten und die Grenzwerte nach Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 2 LRV eingehalten werden, könnten diese als Brennstoffe in Feuerungen mit einer Wärmeleistung über 350 kW eingesetzt werden. Die Anforderungen an Lagerung, Leitungen, Brenner usw., die solch hochviskose Brennstoffe verbrennen sollen, sind erheblich grösser als die Anforderungen, die kleinere Feuerungen im Bereich Ein- und Mehrfamilienhaus aktuell erfüllen. Aus diesem Grund konnten diese Versuchsmessungen auch nicht an einem handelsüblichen Brenner getestet werden. Vergleiche dazu Kapitel 3.2.

Aufgrund der Resultate sollte auch die Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, ob ein höherer Aschegehalt keine höheren Emissionen verursacht. Dies war Voraussetzung für eine allfällige Erhöhung des Grenzwerts für den Aschegehalt in der LRV.

### 2.2 Fragestellung 2: Verbrennung von Altspeiseöl in kleinem Ölbrenner

Aus Klimaschutzgründen besteht ein Interesse daran, CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen zu verringern, indem diese teilweise oder ganz durch biogene Brennstoffe ersetzt werden. Das BAFU erhält immer wieder Anträge für Kompensationsprojekte in diesem Bereich. Aus Sicht der Luftreinhaltung stellt sich in solchen Fällen immer die Frage, ob ein potenzieller alternativer Brennstoff nicht zu höheren oder anderen Schadstoffemissionen führt. Dies sollte nun in einem konkreten Fall durch Emissionsmessungen bei einem potenziellen anderen flüssigen Brennstoff untersucht und die Emissionen mit denjenigen von Heizöl Extraleicht und FAME verglichen werden. Gereinigtes Altspeiseöl der Firma RegiOil Sagl wurde deshalb in einem Green Power-Ölbrenner mit 30 kW Nennleistung (Caminada Energietechnik GmbH) getestet. Dieser Brenner verfügt über eine Druckluftzerstäubung sowie eine Brennstoffvorwärmung, um das gereinigte Altspeiseöl sauber verbrennen zu können. Ziel der Untersuchungen war zu erfahren, ob das gereinigte Altspeiseöl mit diesem Brennertyp emissionsarm verbrannt werden kann.

### 2.3 Untersuchte Stoffe

Es wurden unterschiedliche Stoffe auf pflanzlicher und tierischer Basis auf ihre Eignung als Brennstoffe untersucht. Als Referenz wurden Messungen mit Heizöl Extraleicht (Standard- und Öko-Heizöl, schwefelarm, max. Schwefelgehalt von 50 mg/kg) durchgeführt. FAME als in der LRV zugelassener biogener Brennstoff wurde als weiterer Vergleichsbrennstoff analysiert.

Tabelle 3: Geprüfte Brennstoffe

	Bezeichnung	Beschreibung	Lieferant	Bemerkung
1	Heizöl Extraleicht (Standard-Heizöl)	Referenzbrennstoff, normiert nach SN 181160-2	Handelsware	Referenz
2	Heizöl Extraleicht (Öko-Heizöl, schwefelarm)	Referenzbrennstoff, normiert nach SN 181160-2	Handelsware	Referenz
3	FAME (Biodiesel)	Normiert nach EN 14214	Biofuels	Referenz
4	Altspeiseöl, gereinigt	Aus der Gastronomie	RegiOil Sagl	Fragestellung 2
5	Pflanzliche Misch-Fettsäuren "MFS"	Misch-Fettsäuren, Nebenprodukt bei der Refineration von Speiseölen	Lipid AG	Fragestellung 1
6	Tierfett (GZM)	Aus der Tierverwertung	Extraktionswerk AG	Fragestellung 1
7	Schweinefett	Reines Schweinefett	Lipid AG	Fragestellung 1

### 3 Prüf- und Analysemethoden

#### 3.1 Vorgehen bei der Prüfung

Die Durchführung der Emissionsmessungen für die relevanten Betriebspunkte gemäss EN 267 war aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich. Für die Messung der polychlorierten Dioxine und Furane musste der Brenner für 6 Stunden auf einem Betriebspunkt betrieben werden. Alle Brennstoffe wurden bei einem Punkt entsprechend HP1 (EN 267 Abschnitt 5.7.7.2, maximale Nennleistung bei minimalem Feuerraumüberdruck) geprüft. Jeder Brennstoff wurde für 6 Stunden auf diesem Betriebspunkt betrieben (Anforderung für das abgesaugte Gesamtvolumen aus der EN 1948-1 für die Dioxin-/Furan-Messungen).

##### Betriebsparameter:

Brennstoffwärmeleistung	30 kW
Restsauerstoffgehalt im trockenen Abgas	2.5 Vol%

#### 3.2 Green Power-Ölbrenner

Für die Versuche musste ein Brenner eingesetzt werden, der sich für den Einsatz mit höher viskosen Brennstoffen eignet. Der Green Power-Ölbrenner der Caminada Energietechnik GmbH mit 30 kW Nennleistung besitzt eine Brennstoffvorwärmung sowie eine Druckluftzerstäubung für den Flüssigbrennstoff. Die Brennstoffvorwärmung erniedrigt die Viskosität und ermöglicht dadurch eine feinere Zerstäubung. Allerdings sind der Brennstoffvorwärmung Grenzen gesetzt, da sich die biogenen Brennstoffe bei zu hohen Temperaturen zu zersetzen beginnen. Hier kommt die eingesetzte Druckluftzerstäubung zum Tragen, die es erlaubt, auch höher viskose Brennstoffe fein zu zerstäuben. Im

Gegensatz dazu verfügt ein klassischer, handelsüblicher Ölbrenner über eine reine Druckzerstäubung. Bei Brennern kleinerer Leistung unter 50 KW wird in der Regel auch eine Brennstoffvorwärmung verwendet. Jedoch würden sie für die Verbrennung der untersuchten Brennstoffe, vor allem der Fette, dennoch nicht genügen.

Der Green Power-Ölbrenner ist aus Sicht der RegiOil ideal für den Einsatz mit gereinigtem Altspeiseöl. Aufgrund seiner Technik eignet er sich aber auch für anspruchsvollere Brennstoffe wie "MFS" oder Schweinefett und wurde deshalb in diesem Projekt für alle Verbrennungsversuche verwendet. Der Brenner wurde an einem bei der FHNW vorhandenen und betriebsbereiten Heizkessel mit einem Nennleistungsbereich von 30 - 50 kW installiert (Abbildung 1).

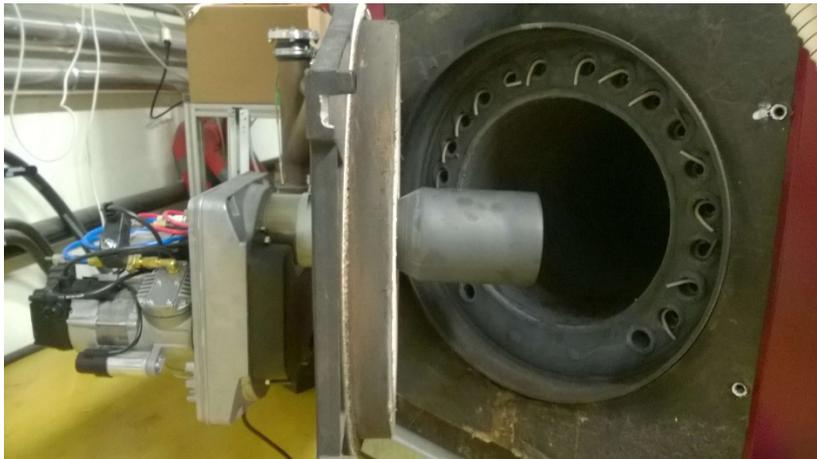


Abbildung 1: Montage des Caminada-Green Power-Ölbrenners am Heizkessel

Um die Viskosität der potenziellen anderen flüssigen Brennstoffe niedrig genug und damit pumpfähig zu halten, wurden sie in einem Blechbehälter auf einer Heizplatte mit 60 Grad (Altspeiseöl) oder 80 Grad Celsius ("MFS" und die tierischen Fette) aufgewärmt. Die Brennstoffleitung führte ca. 35 Grad warmes Altspeiseöl zum Brenner. "MFS" und die tierischen Fette wurde bei ca. 40 Grad zum Brenner geführt. Zur Bestimmung des Brennstoffdurchsatzes des Brenners wurde die ganze Anordnung auf eine Waage gestellt (Abbildung 2).



Abbildung 2: Brennstoffversorgung mit Waage und Heizplatte

### 3.3 Emissionsmessmethoden

#### 3.3.1 Gasförmige Emissionen

Für die Messung gasförmiger Emissionen wurde das Gasanalysesystem MGA5+ von MRU sowie ein Flammenionisationsdetektor VE5 von JUM verwendet.

Tabelle 4: Messmethoden für gasförmige Emissionen

Komponente	Messverfahren	Norm
Sauerstoff O <sub>2</sub>	Elektrochemisch	EN 267:2011
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	NDIR (Infrarotabsorption)	EN 267:2011
Kohlenmonoxid CO	NDIR	EN 267:2011
Methan CH <sub>4</sub>	NDIR	EN 267:2011
Stickoxide NO <sub>x</sub>	NDIR	EN 267:2011
Kohlenwasserstoffe TOC	FID (Flammenionisationsdetektor)	EN 267:2011

#### 3.3.2 Russ-Emissionen

Die Russzahlen wurden nach DIN 51402 (Bacharach-Methode 1986) und EN 267 ermittelt. Die beaufschlagten Filter wurden mit der Russzahl-Vergleichsskala des BAFU verglichen. Zur Durchführung der Russmessungen wurde das EAM-zugelassene Emissionsmessgerät ecom-J von alba-therm AG verwendet.

#### 3.3.3 Staub-Emissionen

##### 3.3.3.1 Messung der Staubmassenkonzentration

##### Gravimetrische Messmethode mit Wöhler SM96 nach EN-16510 (Anhang F)

Für die Messung werden 540 Normliter Rauchgas (trocken) in einer Stunde durch eine beheizte Glasfaserfilterhülle gesaugt, wobei die Absauggeschwindigkeit – bezogen auf eine Rauchgastemperatur von 325 °C und einen Druck von 1013 mbar – 4 m/sec. beträgt. Der Filter wird vor und nach der Probenahme konditioniert (getrocknet) und gewogen. Es werden jeweils mehrere Blindmessungen durchgeführt, um Fehler bei der Wägung oder Konditionierung erkennen und herausrechnen zu können.

##### 3.3.3.2 Messung der Anzahlkonzentration, mittlerer Durchmesser und Masse (berechnet)

##### Online-Messmethode mit DiSCmini

Das Online-Partikelmessgerät DiSCmini von testo misst nicht direkt Masse, sondern die Anzahlkonzentration und den mittleren geometrischen Durchmesser mittels Corona-Aufladung der Partikel und zwei seriell geschalteten Elektrometerstufen. Das DiSCmini ist in ein von der FHNW konzipiertes Gerät eingebaut, inklusive einem Verdünner und einer Online-Verdünnungsmessung/-Normierung (genannt DIEM (Dilution Independent Emission Measurement)).

#### 3.3.4 PCDD/F und PAK

Der PCDD/F- und PAK-Messung liegt die EN-Norm 1948 zugrunde. Für die Probenahme wurde die "Gekühltes-Absaugrohr-Methode" gemäss EN 1948-1 Anhang B.7 gewählt. Dabei wird das Messgas

(Anteil des Abgases welches analysiert wird) über ein wassergekühltes Absaugrohr aus Glas nacheinander durch zwei gekühlte Waschflaschen und eine Feststofffiltereinheit in eine Gasuhr mit vorgeschaltetem Trockenturm geführt. Alle PCDD/F- und PAK-Emissionen werden so aufgefangen.

Die Probe (Kondensat und Filter) wird danach im Analyselabor von Eurofins GfA Lab Service GmbH in Hamburg gemäss der EN-Norm 1948 extrahiert und mittels hochauflösender Gaschromatographie und Massenspektroskopie analysiert. Es werden 17 PCDD/F-Verbindungen und 16 PAK-Verbindungen bestimmt. Die Analysewerte gelten pro Probe. Sie werden mit dem bei der Probenahme erfassten Gesamtprobenvolumen und dem gemessenen Sauerstoffgehalt im Abgas auf Normkubikmeter trockenes Abgas bei 3 % O<sub>2</sub> normiert.

#### **Abweichungen von der EN-1948:**

Gemäss EN-1948 muss isokinetisch abgesaugt werden, um alle Partikel in der gleichen Verteilung wie im Abgas auch im abgesaugten Messgas zu erhalten. Aufgrund der geringen Brennerleistung und damit einhergehend geringer Strömungsgeschwindigkeit im Abgaskamin hätte dies sehr lange Messzeiten (>12 h) bedeutet, um das von der Norm geforderte Mindestabgasvolumen aufzufangen. Es wurde daher mit grösserer Strömungsgeschwindigkeit abgesaugt, als im Kamin herrschte. Da die Partikel von unter 1 µm (siehe Messung DiSCmini) bei den vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten der Strömung folgen, ist kein Fehler bei der Messung zu erwarten.

### **3.4 Brennstoffanalyse**

Die Analysen der biogenen Brennstoffe wurden bei Intertek (Schweiz) AG in Schlieren durchgeführt. Dabei wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Eigenschaften und Inhaltsstoffe bestimmt.

Tabelle 5: Bei der Brennstoffanalyse bestimmte Eigenschaften und Methoden

<b>Stoffe / Eigenschaft / Methode</b>	<b>Normen</b>
Aschegehalt (Oxid-Asche)	EN ISO 6245
Asche (Sulfat-Asche)	ISO 3987
Brennwert und Heizwert (inkl. Elementaranalyse)	ASTM D4809
Schwefelgehalt inkl. Dichte	EN ISO 20846
Stickstoffgehalt inkl. Dichte	ASTM D4629
Viskosität bei 40 °C	EN ISO 3104
Wassergehalt (Coulometr.)	EN ISO 12937
Erdalkaligehalt (Ca+Mg)	EN 14538
Alkaligehalt (Na+K)	EN 14538
Phosphor	EN 14107
Kohlenstoff und Wasserstoff	ASTM D5291
Quecksilber	Aufschluss/AAS (extern)
Säureaufschluss für ICP-OES	Interne Methode
Chlor (ICP-OES)	SOP 601
Spurenelemente ICP-OES(Pb, Cd, Cr ,Cu, Zn, etc)	SOP 613/612

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Übersicht über die durchgeführten Messungen

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Messungen und Analysen

Brennstoff	Brennstoff-analyse	Emissions-messung	Russ-messung	Staub-messung	PCDD/F- + PAK-messung
Heizöl EL, Quelle 1, Messung 1	-	x	x	-	-
Heizöl EL, Quelle 2, Messung 2	-	x	x	-	-
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 3	-	x	x	x	Nur PCDD/F
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 4	-	x	x	x	x
FAME	x	x	x	x	x
Altspeiseöl	x	x	x	x	x
Misch-Fettsäuren "MFS"	x	x	x	x	x
Tierfett (GZM)	x	x	x	x	x
Schweinefett	x	x	x	x	x

### 4.2 Brennstoffanalyse

Die Ergebnisse der Brennstoffanalysen sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die meisten Werte aus den Brennstoffanalysen liegen nahe oder unterhalb der Bestimmungsgrenzen (< BG). Die Analysewerte, die die Grenzwerte der LRV überschreiten, sind rot unterlegt. Hohe Analysewerte für Stoffe, die keinen Grenzwert in der LRV besitzen, sind blau unterlegt.

Beim Tierfett der GZM stechen der hohe Asche- und Phosphorgehalt heraus. Der Aschegehalt bei "MFS" und Schweinefett lag unter dem heute gültigen Grenzwert der LRV von 100 mg/kg für andere flüssige Brennstoffe. Der Stickstoffgehalt der "MFS" und der tierischen Fette ist mit 1.0 – 1.2 % (m) (10'000 bis 12'000 mg/kg) sehr hoch. Die erhöhten Werte für Schwefel, Calcium und Eisen sind hier ebenfalls zu beachten.

Tabelle 7: Analyseresultate der biogenen Brennstoffe in mg/kg

	<b>Grenzwert Anh. 5 LRV</b>	<b>FAME</b>	<b>Altspeiseöl</b>	<b>MFS</b>	<b>Tierfett (GZM)</b>	<b>Schweinefett</b>
Asche (Oxid)	100	<10	20	10	410	<10
Asche (Sulfat)		50	<50	90	500	<50
Chlor	50	<20	<20	11	<10	<10
Barium	5	<1	<1	<1	<1	<1
Blei	5	<1	<1	<5	<5	<5
Nickel	5	<1	<1	<5	<5	<5
Vanadium	10	<1	<1	<3	<3	<3
Zink	5	<1	<1	<5	<5	<5
Phosphor	20	<4	<4	<10	123	<10
Stickstoff		39	41	11'000	12'000	10'000
Schwefel		6	1.2	11	73	<5
Natrium		<1	1.9	<10	<10	<10
Kalium		<1	1.2	<20	<20	<20
Calcium		<1	<1	112	189	97
Silber		<1	<1	<2	<2	<2
Arsen				<3	<3	<3
Aluminium		<1	<1	37	35	36
Bismut				<10	<10	<10
Bor		<1	<1			
Cadmium		<1	<1	<1	<1	<1
Kobalt				<2	<2	<2
Chrom		<1	<1	<2	<2	<2
Kupfer		<1	<1	<2	<2	<2
Eisen		<1	<1	36	31	4
Gallium				<10	<10	<10
Indium				<10	<10	<10
Lithium				<2	<2	<2
Magnesium		<1	<1	2	14	<1
Mangan		<1	<1	<1	<1	<1
Molybdän		<1	<1	<3	<3	<3
Silicium		<1	<1			
Zinn		<1	<1	<3	<3	<3
Strontium				<2	<2	<2
Titan		<1	<1	<3	<3	<3
Thallium				<20	<20	<20

Farbcodes: Orange: Überschreitung Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 3 LRV; blau: hohe Analysewerte

Die wichtigsten verbrennungsrelevanten Eigenschaften wie Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt, Heizwert sowie kinematische Viskosität für die Zerstäubung sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalte liegen eng zusammen und damit zusammenhängend auch die Heizwerte bei 36.9 - 37.6 MJ/kg. Bei der Viskosität ist Heizöl mit maximal 6 mm<sup>2</sup>/s bei 20 °C spezifiziert, was etwa 3.5 mm<sup>2</sup>/s bei 40 °C entspricht. Die Viskosität von FAME ist vergleichbar mit Heizöl. Das Altspeiseöl hat dagegen die 10-fach höhere Viskosität, was bereits die Notwendigkeit einer Brennstoffvorwärmung aufzeigt. Die bei Raumtemperatur noch festen Fette ("MFS" und Tierfette) mussten für

die Viskositätsbestimmung auf 60 °C erwärmt werden. Bei 60 °C dürfte die Viskosität des Altspeiseöls mit der der Fette vergleichbar sein.

Tabelle 8: Verbrennungsrelevante Eigenschaften der biogenen Brennstoffe

Brennstoff	Kohlenstoff (% m/m)	Wasserstoff (% m/m)	Heizwert (MJ/kg)	Kin. Viskosität (mm <sup>2</sup> /s)
FAME	77.3	13.1	37.60	4.3 bei 40 °C
Altspeiseöl	77.0	12.5	36.94	43.7 bei 40 °C
Pflanzliche Fettsäuren "MFS"	75.2	11.1	36.41	16.0 bei 60 °C *
Tierfett (GZM)	75.6	11.0	37.05	21.8 bei 60 °C *
Schweinefett	75.7	10.9	37.12	20.8 bei 60 °C *

\* Die bei Raumtemperatur noch festen Fette mussten für die Viskositätsbestimmung auf 60 °C erwärmt werden.

### 4.3 Gasförmige Emissionen

In Anh. 3 Ziff. 411 LRV sind folgende Grenzwerte für Feuerungen mit Heizöl Extraleicht festgelegt, bezogen auf 3 % (vol.) Restsauerstoffgehalt im Abgas:

- CO: 80 mg/m<sup>3</sup> (~ 64 ppm)
- NO<sub>x</sub> (c): 120 mg/m<sup>3</sup> (~ 59 ppm), als NO<sub>2</sub>

Die gemessenen CO-, NO<sub>x</sub>- und TOC-Emissionen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Der Green Power-Ölbrenner läuft nominell bei 2.5 % Restsauerstoff. Die Emissionen wurden auf 3 % O<sub>2</sub> korrigiert.

Die verwendeten Gasanalysegeräte von MRU und JUM werden regelmässig mit Stickstoff (Nullpunkt) und Prüfgasen mit geeigneten Gehalten der Messkomponenten geprüft und bei Bedarf kalibriert. Die Messunsicherheiten liegen für O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> bei 0.3 % (absolut), für CO und NO<sub>x</sub> bei 2 ppm (~ 3 mg CO/m<sup>3</sup> bzw. 4 mg NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) oder 5% vom Messwert. Bei TOC liegt die Messunsicherheit bei 2 ppm (~ 1 mg C/m<sup>3</sup>) oder 2 % vom Messwert.

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, wurden für Heizöl EL 4 Messungen durchgeführt mit unterschiedlichen Quellen für das Heizöl EL. In diesem Fall liegen 4 Messergebnisse für gasförmige Emissionen vor. Dies zeigt deutlich, dass es zwischen den Messungen Schwankungen bei den Messergebnissen gibt. Bei der zweiten Messung wurde Heizöl aus einer älteren Tankfüllung verwendet, das wahrscheinlich noch nicht dem Öko-Standard entsprach. Die dritte und vierte Messung wurde mit neuem Öko-Heizöl durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen sowohl eine (geringe) Schwankung der NO<sub>x</sub>-Emissionen zwischen Messung 3 und 4 mit gleichem Heizöl als auch eine deutliche Schwankung zwischen den drei Heizöl-Chargen.

Tabelle 9: Gasförmige Emissionen. CO und NO<sub>x</sub> mit NDIR, TOC mit FID gemessen

Brennstoff	CO (mg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	TOC als C (mg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )
Heizöl EL, Quelle 1, Messung 1	<3	111	3
Heizöl EL, Quelle 2, Messung 2	<3	109	2
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 3	<3	94	2
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 4	<3	90	<2
FAME	<3	103	2
Altspeiseöl	<3	113	2
Pflanzliche Fettsäuren "MFS"	<3	98	2
Tierfett (GZM)	<3	178	4
Schweinefett	<3	96	4

Farbcode: Gelb: Überschreitung Anh. 3 Ziff. 411 Abs. 1 LRV

Der Green Power-Ölbrenner weist bei allen Brennstoffen im Nennbetrieb praktisch keine CO-Emissionen auf.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen für alle biogenen Brennstoffe ausser dem Tierfett (GZM) um 100 mg/Nm<sup>3</sup> als NO<sub>2</sub> bei 3% O<sub>2</sub> im Abgas vergleichbar mit dem Referenzbrennstoff Heizöl EL. Das Tierfett der GZM liegt bei 178 mg/Nm<sup>3</sup> als NO<sub>2</sub>.

Das ist bemerkenswert, da der hohe Stickstoffgehalt der Fette (Tabelle 7) bei vollständiger Umsetzung zu NO<sub>x</sub> einen Wert von ca. 3500 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> bei 3% O<sub>2</sub> im Abgas zur Folge hätte. Das heisst im Umkehrschluss, dass die hohen Stickstoffgehalte praktisch keine bzw. nur eine minimale Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Emissionen zur Folge haben. Es kann hier nur vermutet werden, dass der Stickstoff im Brennstoff in einer Form vorliegt, die zur Bildung von mineralisch gebundenem Stickstoff im Staub oder von gasförmigem Stickstoff (N<sub>2</sub>) führt.

Die Emissionen an Kohlenwasserstoffen (TOC) liegen bei den pflanzlichen Ölen sowie bei Heizöl bei ca. 2 mg/Nm<sup>3</sup> C bei 3% O<sub>2</sub> im Abgas. Die tierischen Fette haben TOC-Emissionen um 4 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### 4.4 Russ-Emission

In Abbildung 3 sind die Bilder der mit Abgas beaufschlagten Filterpapiere zu sehen. Die Messposition 1 entspricht dem Brennernennbetrieb.

Um den Einfluss abnehmender Luftzahl auf die Russemission zu erkennen, wurden die Russzahlen auch mit abnehmendem Restsauerstoffgehalt im Abgas bestimmt (steigende Zahlen auf den Filtern). Diese Messungen sollen zeigen, ab welcher Luftzahl eine vermehrte Russbildung einsetzt.

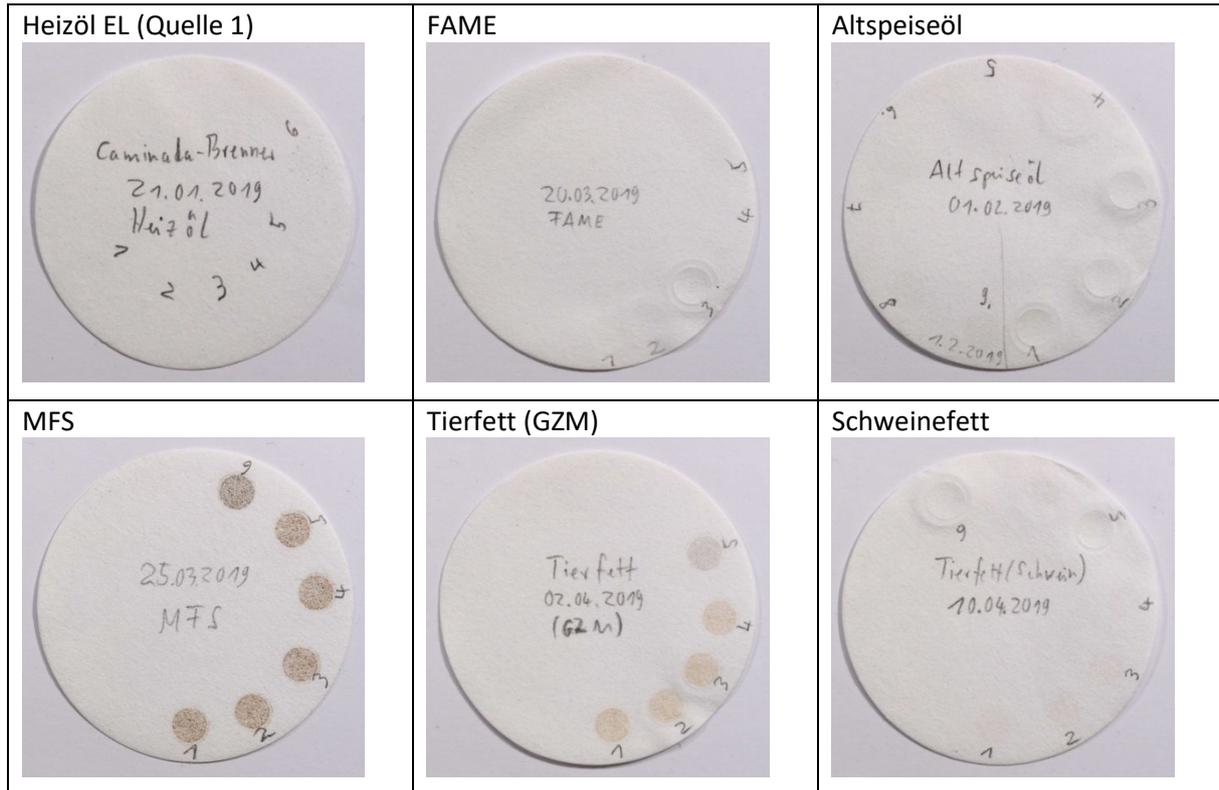


Abbildung 3: Russmessungen. Nr. 1 bei Brennerennbetrieb. Steigende Zahlen bedeuten zunehmenden Luftmangel

In Tabelle 10 sind die ausgewerteten Russzahlen der verschiedenen Brennstoffe im Brennerennbetriebspunkt eingetragen.

Tabelle 10: Russ-Emissionen bei Brenner-Nennbetrieb

Brennstoff	Russzahl (@2.5% O <sub>2</sub> )
Heizöl EL, alle Messungen	0
FAME	0
Altspeiseöl	0
Pflanzliche Fettsäuren "MFS"	1
Tierfett (GZM)	0
Schweinefett	0.5

Bei Luftmangel steigen zwar die CO-Emissionen, eine Russbildung ist jedoch nur minimal feststellbar. Dies zeigt die guten Zerstäubungs-/Verbrennungseigenschaft des Green Power-Brenners. Die bräunliche und rötliche Färbung des Filters im Nennbetrieb bei "MFS" und dem Tierfett der GZM muss vom höheren Aschegehalt (z. B. Eisen) dieser beiden Brennstoffe stammen. Eine Graufärbung durch Russ ist bei den Tierfetten kaum feststellbar. Bei "MFS" wurde neben der bräunlichen Färbung auch ein leichter Grauteil festgestellt (Russzahl 1).

## 4.5 Feinstaub-Emissionen

Feinstaubemissionen im Abgas wurden sowohl mit der gravimetrischen Filtermethode nach EN-16510 (Anhang F) als auch mit einem Online-Messgerät der FHNW bestimmt. Siehe dazu auch Kapitel 3.3.3.

### 4.5.1 Gravimetrische Messung Wöhler SM96 - Messung und Messunsicherheit

Pro Brennstoff wurden jeweils drei Filter zeitlich nacheinander durchströmt. Ein Foto der staubbeladenen Filter ist in Abbildung 4 zu sehen. Auch hier ist ein bräunlich/rötlicher Belag wie beim Russfilter zu erkennen. Drei der konditionierten Filter wurden ohne Abgasdurchströmung gewogen, um Wägeunsicherheiten durch das Handling abschätzen zu können (Blindmessung). Diese bewegen sich unter 0.5 mg pro Wägung. Dies ergibt durch die Wägung für den Feinstaubgehalt von einem Norm- $m^3$  Abgas eine Messunsicherheit von unter 1  $mg/Nm^3$ . Der Fehler der Gasvolumenmessung des Wöhler-Gerätes wird mit unter 3 % angegeben. Da dieser Fehler bei jeder Messung etwa gleich ist, würden vergleichende Messungen, wie hier, nicht davon beeinflusst.

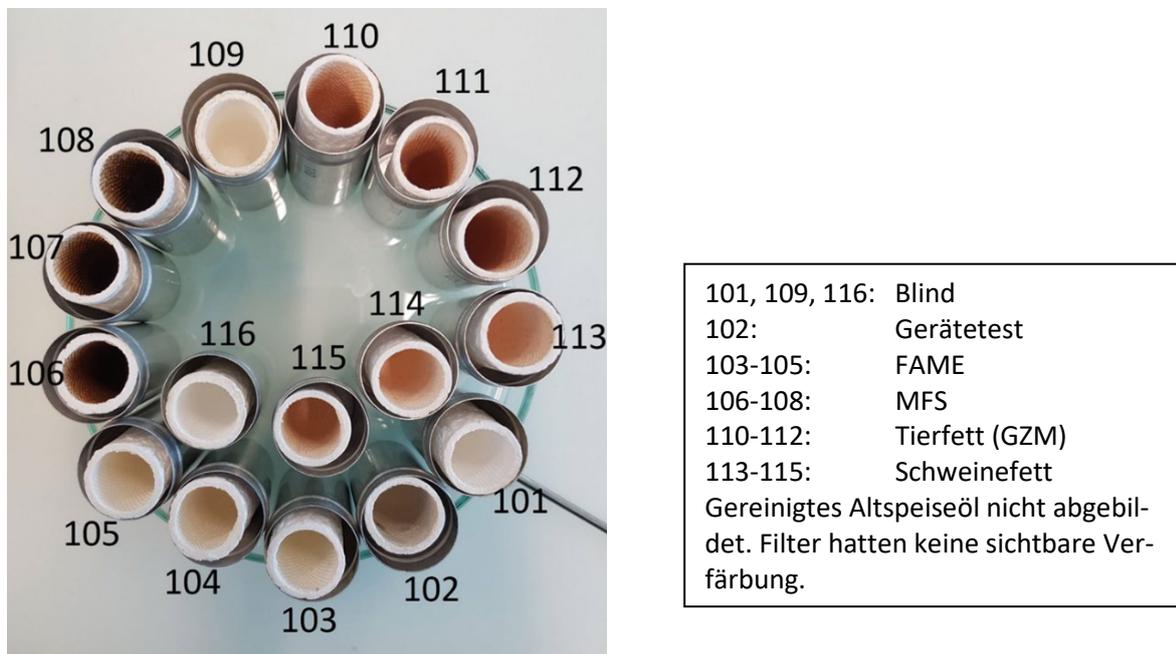


Abbildung 4: Filter nach Abgasbeaufschlagung

### 4.5.2 Online-Messung mit DiSCmini - Messung und Messunsicherheit

Das Messgas wird während der gesamten Messdauer abgesaugt und kontinuierlich normiert auf 3%  $O_2$ . Die gemessenen Werte sind erwartungsgemäss konstant und werden über die betrachtete Messdauer gemittelt. Die Masse wird aus der Anzahlkonzentration und dem mittleren Durchmesser und der Annahme einer fixen Grössenverteilung berechnet.

Bei diesem Messprinzip besteht eine zusätzliche Messunsicherheit, da das DiSCmini auf die Partikelgrössenverteilung bei Holzverbrennung abgestimmt ist, die breiter ist als diejenige bei Flüssigbrennstoffverbrennung. Dadurch wird der Durchmesser leicht unterschätzt (max. 30%) und die Anzahl leicht überschätzt (max. 10%). Sowohl die Partikelgrössenverteilung als auch der mittlere Durchmesser hängen auch noch vom Brenner und der Zerstäubungsmethode ab. Wichtig sind ausserdem Diffusionsverluste in der Messleitung, die zu Verlusten von sehr kleinen Partikeln führen (Abbildung 5). Kleine Partikel haben aber wiederum weniger Einfluss auf die Masse, da der Durchmesser in der 3. Potenz in die Masse eingeht.

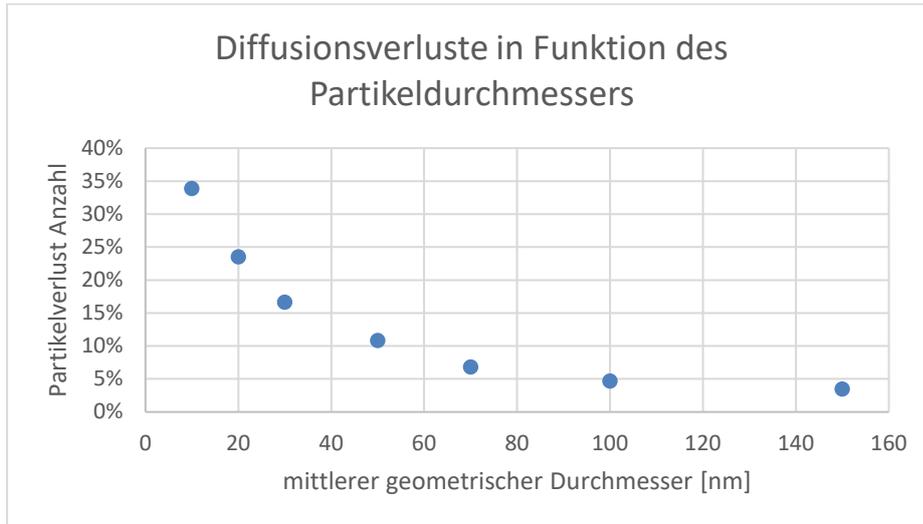


Abbildung 5: Diffusionsverluste von DIEM-Messleitung gemessen mit SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)

Aufgrund der genannten Einflüsse ist die DiSCmini-Messung eher qualitativ von Nutzen als quantitativ. Sie dient dem Vergleich der Brennstoffe untereinander und ist eine gute Ergänzung für die gravimetrische Messung.

### 4.5.3 Ergebnisse

Die Feinstaubmessergebnisse sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Gemessene Feinstaubemissionen im Abgas

Brennstoff	Filter (mg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	DiSCmini (#/cm <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	DiSCmini <sup>1</sup> (mg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	d_mean (nm)
Heizöl EL, Quelle 3	<1	1.14E+07	0.17	<10
FAME	<1	1.39E+07	0.2	<10
Altspeiseöl	<1	2.02E+07	0.5	13
Pflanzliche Fettsäuren "MFS"	6.8	2.36E+07	5.1	25
Tierfett (GZM)	24.4	2.21E+07	10.2	32
Schweinefett	1.9	2.21E+07	1.8	17

Farbcode: Violett: Erhöhte Emissionen gemäss Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 1 LRV

<sup>1</sup> Quantitative Werte mit Unsicherheit, da Methode für Holz kalibriert

Die Werte für Heizöl, Altspeiseöl und FAME liegen für die gravimetrische Methode (Filter) unterhalb der Nachweisgrenze. Beim Einsetzen und Entnehmen der Filter in bzw. aus der Halterung können Fasern des Filters verloren gehen. Diese Verluste sind schwer zu vermeiden und wirken sich massgeblich auf die Messunsicherheit dieser Methode aus. Deshalb sind die Messwerte eher zu tief und die Messunsicherheit muss entsprechend erweitert werden auf -1/+3 mg/Nm<sup>3</sup> und zusätzlich ±3 % vom Messwert.

Beim Vergleich der DiSCmini-Messwerte zeigt Heizöl Extraleicht die geringsten Staubemissionen, gefolgt von FAME und Altspeiseöl. "MFS" und Tierfett (GZM) zeigen deutlich höhere Feinstaubgehalte, die mit dem Aschegehalt korrespondieren. Beim Schweinefett liegt der Feinstaubgehalt knapp über der Bestimmungsgrenze, der Aschegehalt jedoch unter der Bestimmungsgrenze.

Die vom DiSCmini gemessene Partikelanzahl liegt für die verschiedenen Brennstoffe relativ eng zusammen. Die Massen des Feinstaubes spreizen hauptsächlich durch die unterschiedlich ermittelten mittleren Partikeldurchmesser stärker ( $m \sim d^3$ ). Die Abweichungen zur Gravimetrie sind auf die oben genannten Messunsicherheiten zurückzuführen. Die DiSCmini-Werte sind deshalb nur qualitativ für den Vergleich der Brennstoffe untereinander zu verwenden. Sie bestätigen aber tendenziell die Werte der Gravimetrie.

#### 4.6 PCDD/F und PAK

Tabelle 12: PCDD/F und PAK-Emissionen

Brennstoff	PCDD/F <sup>1</sup> (ng/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )			PAK <sup>2</sup> (µg/m <sup>3</sup> @3% O <sub>2</sub> )	
	exkl. BG <sub>i</sub>	inkl. 1/2 BG <sub>i</sub>	inkl. BG <sub>i</sub> <sup>3</sup>	Inkl. BG <sup>3</sup>	Nur BG <sup>4</sup>
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 3	0.00240	0.00346	<b>0.00454</b>	-	-
Heizöl EL, Quelle 3, Messung 4	0	0.00164	<b>0.00328</b>	2.19	0.23
FAME	0.00127	0.00242	<b>0.00357</b>	1.68	0.23
Altspeiseöl	0.00580	0.00650	<b>0.00723</b>	2.83	0.21
Pflanzliche Fettsäuren "MFS"	0.00695	0.00810	<b>0.00926</b>	2.74	0.33
Tierfett (GZM)	0.00057	0.00257	<b>0.00458</b>	1.40	0.30
Schweinefett	0.00241	0.00383	<b>0.00509</b>	1.19	0.29

Farbcode: Violett: Erhöhte Emissionen gemäss Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 1 LRV

<sup>1</sup> I-TEQ (NATO-Forschungsgruppe Committee on the Challenges of Modern Society)

<sup>2</sup> 16 EPA-PAK inkl. BG

<sup>3</sup> Stellt den maximalen Gehalt dar: Wenn die Bestimmungsgrenze einer einzelnen Verbindung unterschritten wird, wird die Bestimmungsgrenze dieser Verbindung als Wert verwendet (Tabelle 15).

<sup>4</sup> Summe der individuellen gewichteten Bestimmungsgrenzen der 16 PAK-Verbindungen (Tabelle 16).

Liegt das Messergebnis einer PCDD/F-Verbindung oder PAK-Komponente unter der Bestimmungsgrenze (BG), so kann ihr Wert zwischen null und der BG liegen. Für den nach I-TEQ gewichteten Gesamt-PCDD/F-Gehalt kann deshalb nur ein Bereich zwischen "exkl. BG" und "inkl. BG" angegeben werden. Des Weiteren sind die Messwerte für PCDD/F TEQ inkl. BG mit einer Unsicherheit von 25 % und diejenigen für die Summe der 16 EPA-PAK inkl. BG mit 30 % behaftet.

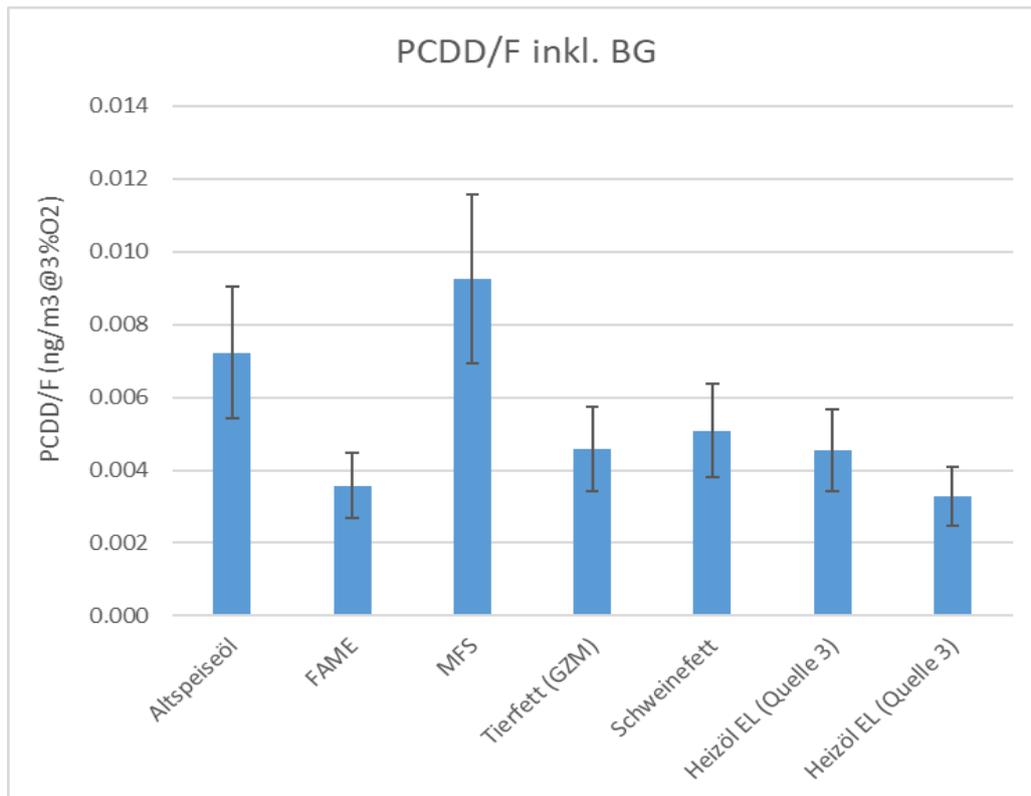


Abbildung 6: PCDD/F Messungen inklusive Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit

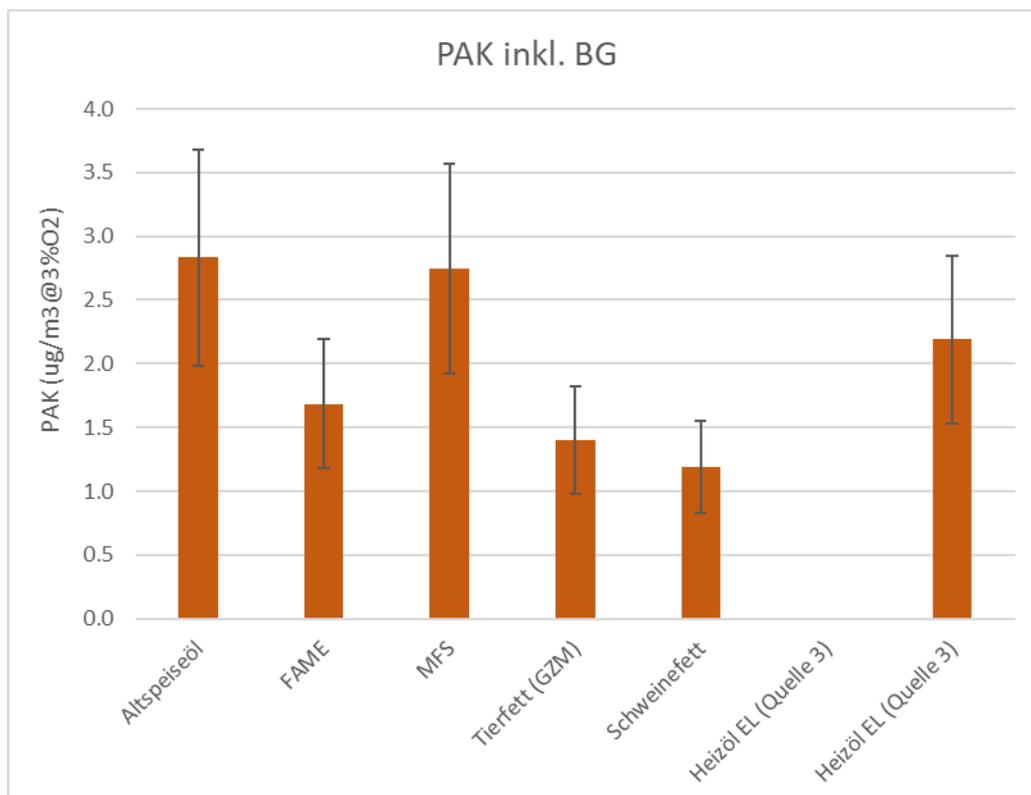


Abbildung 7: PAK Messungen inklusive Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit

## 5 Fazit

### 5.1 Zu Fragestellung 1

Alle in dieser Fragestellung zu untersuchenden Stoffe konnten mit einer geeigneten Brennertechnologie verbrannt werden. Für "MFS" und Schweinefett lagen die LRV-relevanten Analysewerte des Brennstoffs unter den heute gültigen Grenzwerten der LRV. Im Vergleich mit den Analysewerten von FAME waren diese gleich bzw. leicht höher. Beim Tierfett (GZM) lagen die Werte für Asche und Phosphor deutlich über den LRV-Grenzwerten. Auch der Wert für Schwefel lag deutlich über dem der anderen untersuchten Stoffe. Bei allen Fetten wurden im Vergleich mit FAME hohe Werte für Calcium und Eisen festgestellt. Die Analysewerte sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die in Tabelle 13 folgenden Emissions-Messergebnisse und Vergleiche mit den Grenzwerten und Referenzbrennstoffen beziehen sich auf die Messungen, die mit dem Green Power-Ölbrenner bei 30 kW Leistung und bei 2.5 Vol% Restsauerstoffgehalt durchgeführt wurden.

Die gemessenen CO-Emissionen aller untersuchten Stoffe liegen weit unterhalb der Grenzwerte der LRV. Die TOC-Emissionen liegen ebenfalls für alle Stoffe auf vergleichbarem sehr niedrigem Niveau. Die gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen ausser beim Tierfett (GZM) innerhalb des Streubereichs der Messungen mit Heizöl EL. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Tierfetts (GZM) sind deutlich höher und überschreiten den Grenzwert um ca. 50 %.

Bei den Russ-Emissionen liegen alle untersuchten Stoffe unter dem LRV-Grenzwert (Russzahl 1). Die Staub-Emissionen von "MFS" und Tierfett (GZM) liegen deutlich über den Werten der Referenzbrennstoffe, die alle unter der Nachweisgrenze liegen.

Um die Fragestellung 1 bezüglich Erhöhung des Aschegehaltes geeignet beantworten zu können, wäre es wünschenswert gewesen, Emissionsmessungen an Brennstoffen mit Aschegehalten zwischen 100 und 200 mg/kg durchführen zu können. Dies war leider nicht der Fall. Betrachtet man die Sulfataschegehalte, so wiesen FAME und Schweinefett geringe Werte auf. Knapp doppelt so hohe Sulfataschegehalte traten beim "MFS" auf, während beim Tierfett GZM beide Aschegehalte (Oxid sowie Sulfat) sehr hoch waren. Die erhöhten Staubemissionen des "MFS" bzw. Tierfetts (GZM) lassen vermuten, dass eine Korrelation zwischen Sulfataschegehalt im Brennstoff und Staubemissionen besteht. Aufgrund der vorliegenden Messresultate wäre eine Verdoppelung des Grenzwerts nicht unproblematisch.

Die PCDD/F-Emissionen liegen bei den Referenzbrennstoffen unterhalb der Nachweisgrenze, bei den Tierfetten liegen sie nahe an der Nachweisgrenze und beim "MFS" etwa beim doppelten Wert der Nachweisgrenze. Aber auch der Wert beim "MFS" bedeutet noch immer sehr geringe Emissionen.

Bei den PAK-Emissionen liegen die Werte der tierischen Fette sogar unter den Werten der Referenzbrennstoffe. "MFS" zeigt einen geringfügig höheren Werte im Vergleich zu den Referenzbrennstoffen, dieser Wert zeigt jedoch eine Überschneidung im Messunsicherheitsbereich.

Tabelle 13: Zusammenfassung wichtiger Messwerte bezüglich Fragestellung 1

	Ein- heit	Anforderung max.	Heizöl EL	FAME	MFS	Tierfett (GZM)	Schweine- fett
<b>Analysewerte der Inhaltsstoffe</b>							
Asche (Oxid)	mg/kg	100		<10	10	410	<10
Asche (Sulfat)	mg/kg			50	90	500	<50
Chlor	mg/kg	50		<20	11	<10	<10
Barium	mg/kg	5		<1	<1	<1	<1
Blei	mg/kg	5		<1	<5	<5	<5
Nickel	mg/kg	5		<1	<5	<5	<5
Vanadium	mg/kg	10		<1	<3	<3	<3
Zink	mg/kg	5		<1	<5	<5	<5
Phosphor	mg/kg	20		<4	<10	123	<10
Stickstoff	mg/kg			39	11000	12000	10000
Schwefel	mg/kg			6	11	73	<5
Calcium	mg/kg			<1	112	189	97
Eisen	mg/kg			<1	36	31	4
<b>Gasförmige Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>							
CO	mg/m <sup>3</sup>	80	<3/<3/<3/<3	<3	<3	<3	<3
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	120	111/90/ 94/109	103	98	178	96
TOC	mg/m <sup>3</sup>	-	3/2/2/<1	<1	<1	<2	<2
<b>Staub-Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>							
Russzahl		1	0/0/0/0	0	1	0	0.5
Staub (gravimetrisch)	mg/m <sup>3</sup>		<1	<1	6.8	24.4	1.9
Staub (DiSCmini)	mg/m <sup>3</sup>		0.17	0.2	5.1	10.2	1.8
<b>PCDD/F-, PAK-Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>							
PCDD/F	ng/m <sup>3</sup>		0.00454/ 0.00328	0.00357	0.00926	0.00458	0.00509
PAK	µg/m <sup>3</sup>		2.19	1.68	2.74	1.4	1.19

Farbcodes: Orange: Überschreitung Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 3 LRV; blau: hohe Analysewerte;

gelb: Überschreitung Anh. 3 Ziff. 411 Abs. 1 LRV; violett: Erhöhte Emissionen gemäss Anh. 5 Ziff. 132 Abs. 1 LRV

## 5.2 Zu Fragestellung 2

Die Analysewerte der Inhaltsstoffe des gereinigten Altspeiseöls lagen auf vergleichbar niedrigem Niveau wie bei FAME. Sie sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Die gemessenen CO- und TOC-Emissionen liegen wie bei den Referenzbrennstoffen auf sehr niedrigem Niveau. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Altspeiseöls liegen innerhalb des Streubereichs der Messungen mit Heizöl EL und unterhalb des Grenzwertes in der LRV.

Die Russ- und Staub-Emissionen liegen wie bei den Referenzbrennstoffen unterhalb der Nachweisgrenze für das gravimetrische Verfahren. Die online DISCmini-Staubmessungen werden nicht quantitativ verglichen, sondern dienen nur der qualitativen Einschätzung der gravimetrischen Messung im

niedrigen Konzentrationsbereich, in welchem das gravimetrische Verfahren keine verlässlichen Daten mehr liefert. (siehe Kapitel 4.5.2).

Die PCDD/F-Emissionen sind beim Altspeiseöl leicht höher als bei den Referenzbrennstoffen. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten ergibt sich eine Schnittmenge mit der Messung 3 von Heizöl EL. Die PAK-Emissionen sind geringfügig erhöht gegenüber den Referenzbrennstoffen. Auch hier zeigt dieser Wert eine Überschneidung im Messunsicherheitsbereich mit dem Wert von Heizöl EL.

Die Fragestellung 2 kann folgendermassen zusammenfassend beantwortet werden:

Unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten und gewisser Schwankungen von Messung zu Messung, wie im Falle von Heizöl Extraleicht in Abbildung 6, Abbildung 7 und Tabelle 14 zu sehen, hält gereinigtes Altspeiseöl alle LRV-Grenzwerte für flüssige biogene Brennstoffe ein und weist, unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten, weder höhere noch andere Schadstoff-Emissionen auf, als dies beim Heizöl Extraleicht der Fall ist.

Tabelle 14: Zusammenfassung wichtiger Messwerte bezüglich Fragestellung 2

	Einheit	Anforderung max.	Heizöl EL	FAME	Gereinigtes Altspeiseöl
<b>Analysewerte der Inhaltsstoffe</b>					
Asche (Oxid)	mg/kg	100		<10	20
Asche (Sulfat)	mg/kg			50	<50
Chlor	mg/kg	50		<20	<20
Barium	mg/kg	5		<1	<1
Blei	mg/kg	5		<1	<1
Nickel	mg/kg	5		<1	<1
Vanadium	mg/kg	10		<1	<1
Zink	mg/kg	5		<1	<1
Phosphor	mg/kg	20		<4	<4
Stickstoff	mg/kg			39	41
Schwefel	mg/kg			6	1.2
<b>Gasförmige Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>					
CO	mg/m <sup>3</sup>	80	<3/<3/<3/<3	0	1
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	120	111/90/ 94/109	103	113
TOC	mg/m <sup>3</sup>		3/2/2/<1	2	2
<b>Staub-Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>					
Russzahl		1	0/0/0/0	0	0
Staub (gravimetrisch)	mg/m <sup>3</sup>		<1	<1	<1
Staub (DiSC)	mg/m <sup>3</sup>		0.17	0.2	0.5
<b>PCDD/F-, PAK-Emissionen (bezogen auf 3 % O<sub>2</sub>)</b>					
PCDD/F	ng/m <sup>3</sup>		0.00454/ 0.00328	0.00357	0.00723
PAK	µg/m <sup>3</sup>		2.19	1.68	2.83

## 6 Anhang

### 6.1 Analyse-Bestimmungsgrenzen für PCDD/F und PAK

Tabelle 15: Bestimmungsgrenzen (LOQ limit of quantification) für PCDD/F (Eurofins GfA Lab Service GmbH)

PCDD/F	LOQ	unit	TEQ-Anteil nach WHO 2005
2,3,7,8-TetraCDD	0,00225	ng / sample	0,00225
1,2,3,7,8-PentaCDD	0,00300	ng / sample	0,0030
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0,00600	ng / sample	0,00060
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0,00600	ng / sample	0,00060
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0,00600	ng / sample	0,00060
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0,00675	ng / sample	0,0000675
OctaCDD	0,02750	ng / sample	0,00000825
2,3,7,8-TetraCDF	0,00400	ng / sample	0,00040
1,2,3,7,8-PentaCDF	0,00550	ng / sample	0,000165
2,3,4,7,8-PentaCDF	0,00550	ng / sample	0,00165
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0,00500	ng / sample	0,00050
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0,00500	ng / sample	0,00050
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	0,00500	ng / sample	0,00050
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0,00500	ng / sample	0,00050
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0,00650	ng / sample	0,000065
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0,00475	ng / sample	0,0000475
OctaCDF	0,04000	ng / sample	0,000012
WHO(2005) TEQ inkl BG	0,0115	ng / sample	
I-TEQ (inkl. BG)	0,0112	ng / sample	

Tabelle 16: Bestimmungsgrenzen für PAK (Eurofins GfA Lab Service GmbH)

	µg/Probe
Naphthalin	< 0,5
Acenaphthylen	< 0,02
Acenaphthen	< 0,02
Fluoren	< 0,02
Phenanthren	< 0,02
Anthracen	< 0,02
Fluoranthren	< 0,02
Pyren	< 0,02
Benz(a)anthracen	< 0,02
Chrysen	< 0,02
Benzo(b/j)fluoranthren	< 0,02
Benzo(k)fluoranthren	< 0,02
Benzo(a)pyren	< 0,02
Dibenz(a,h)anthracen	< 0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,02
Benzo(ghi)perylene	< 0,02