



München, 20. Oktober 1998

**Emissionsuntersuchungen an einem stationären Rapsöl-BHKW -
Ergebnisse einer Grundsatzuntersuchung**

Astrid Streit / Hans Friß
Bayer. Landesamt für Umweltschutz (LfU)
Rosenkavalierplatz 3, 81925 München
Tel.: 089-9214-0, Fax: 089-9214-3281
email: *Astrid.Streit@lfu.bayern.de*
Hans.Friess@lfu.bayern.de

Inhaltsübersicht

- 1. Einleitung**
- 2. Untersuchungsumfang**
 - 2.1 Rapsöl
 - 2.2 Anlagen- und Betriebsparameter
 - 2.3 Emissionen
- 3. Beschreibung der Anlage**
- 4. Messergebnisse**
 - 4.1 Zusammensetzung des Pflanzenöls
 - 4.2 Ergebnisse der Emissionsmessungen
- 5. Zusammenfassung**
- 6. Literatur**

1. Einleitung

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zur Substitution fossiler Energieträger hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Bayerische Staatsregierung verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2005 einen Anteil von fünf Prozent des bayerischen Primärenergiebedarfs aus Biomasse zu decken.¹

Im Zuge der Bemühungen um eine verstärkte Biomassenutzung wurde das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) mit der Durchführung des FuE-Projektes "Umweltauswirkungen der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe" beauftragt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollen in Beratungshilfen für Behörden, Gutachter und Betreiber umgesetzt werden.

Neben der Nutzung von Holz in Feuerungsanlagen spielt auch der Einsatz von biogenen Kraftstoffen in Blockheizkraftwerken (BHKW) eine immer größere Rolle. Derzeit sind in Bayern bereits etwa 25 pflanzenölbetriebene BHKW im Leistungsbereich 5 bis ca. 220 kW installiert.

Zum Emissionsverhalten der heute in der Praxis verwendeten Motoren liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. Die in der Literatur aufgeführten Untersuchungen beziehen sich meist auf heute zum Teil nicht mehr übliche Motorbauarten. Auch hinsichtlich des Einflusses von Pflanzenölinhaltsstoffen und -eigenschaften auf die Abgaszusammensetzung bestehen noch Wissenslücken. Aus diesem Grund beauftragte das LfU die TÜV Ecoplan Umwelt GmbH mit der Durchführung einer Grundsatzuntersuchung an einem stationären Pflanzenöl-BHKW.

Nachfolgend wird über die Ergebnisse dieser Grundsatzuntersuchung berichtet.

2. Untersuchungsumfang

Ziel der Untersuchung war die detaillierte Ermittlung des Emissionsverhaltens des Motors im Nenn- und Teillastbetrieb unter Berücksichtigung der Kaltstartphase. Außerdem standen die Bestimmung der Pflanzenölqualität und die Beurteilung der Wirkung des Oxidationskatalysators mit im Vordergrund der Untersuchungen.

Das der Untersuchung zugrunde liegende Emissionsmessprogramm wurde vom LfU erstellt.

2.1 Rapsöl

Während der Emissionsmessungen wurden zwei repräsentative Proben des eingesetzten Rapsöls entnommen. Die Festlegung der zu untersuchenden motor- und umweltrelevanten Kraftstoffparameter erfolgte in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik, Weihenstephan.

¹ Eröffnungsrede von Herrn Staatsminister Reinhold Bocklet anlässlich der 10. Europäischen Biomassekonferenz in Würzburg am 08.06.98

Folgende Kenngrößen wurden im Rapsöl ermittelt:

- Dichte bei 15°C
- kin. Viskosität bei 40°C
- Flammpunkt
- Heizwert
- Zündwilligkeit (Cetanzahl)
- Koksrückstand n. Conradson
- Neutralisationszahl
- Iodzahl
- Gesamtverschmutzung
- Asche (Massenanteil)
- Phosphorgehalt
- Gesamtchlorgehalt
- Gesamtfluorgehalt
- Stickstoffgehalt
- Schwefelgehalt
- Wassergehalt
- Na-, Ca-, K-Gehalt
- Schwermetallgehalte: As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Pt, V, Zn

2.2 Anlagen- und Betriebsparameter

Parallel zu den durchgeführten Emissionsmessungen wurden folgende Anlagen- und Betriebsparameter erfasst:

- Motorleistung im zeitl. Verlauf
- Kraftstoffverbrauch
- Schmierölverbrauch
- Betriebstemperatur
- Einspritzzeitpunkt
- Einspritzdruck
- Zylinderspitzenndruck

2.3 Emissionen

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Emissionsmessungen im Roh- und Reingas.

Die Einzelmessungen erfolgten jeweils während der PCDD/F-Probenahmen.

Tabelle 1: Anzahl und Dauer der durchgeführten Einzelmessungen

Messkomponenten	Messreihe 1		Messreihe 2		Messreihe 3	
	94 %		66 %		91 %	
Lastzustand	Rohgas ¹⁾	Reingas ¹⁾	Rohgas ¹⁾	Reingas ¹⁾	Rohgas ¹⁾	Reingas ¹⁾
Volumenstrom	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.
Druck	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
Temperatur	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
Feuchte	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.	diskont.
Sauerstoff	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
Gesamt-C	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
CO	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
NO _x angegeben als NO ₂	-	kont.	-	kont.	-	kont.
N ₂ O	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.	kont.
SO ₂	-	kont.	-	kont.	-	kont.
Gesamtstaub	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h
Ruß/organ. Anteile	-	-	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h
Schwermetalle ²⁾	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h	1 x 0,5 h
HCl	-	3 x 0,5 h	-	3 x 0,5 h	-	3 x 0,5 h
BTEX	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h
Aldehyde (C1 - C4)	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h	3 x 0,5 h
Chlorbenzole	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h
Chlorphenole	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h
PCB	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h
PAK	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h
PCDD/F	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h	1 x 3 h

¹⁾ Messungen im Roh- und Reingas zeitgleich²⁾ Hg, Cd, As, Pb, Cr, Co, Cu, Fe, Mo, Mn, Pt, Ni, V, Zn

3. Beschreibung der Anlage

Das Blockheizkraftwerk wurde im Juli 1997 zur Stromerzeugung und Versorgung eines Neubaugebietes mit Wärme in Betrieb genommen und wies zum Zeitpunkt der Messung im Oktober 465 Betriebsstunden auf. Während die Abwärme des Verbrennungsmotors über Wärmetauscher genutzt wird, wird die mechanische Energie von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Durch diese Kraft-Wärme-Kopplung wird ein Gesamtwirkungsgrad von über 80 % erreicht.

Das BHKW wird wärmegeführt betrieben und verfügt über einen Wärmepufferspeicher mit einem Fassungsvermögen von 8.000 Litern.

In Tabelle 2 sind wichtige technische Daten des BHKW zusammengestellt.

Tabelle 2: Technische Daten des Rapsöl-BHKW

Gesamtmodul		
Hersteller		Fa. Höcker und Partner Energieanlagenbau GmbH
Typ		HP T 60 T-ASY
Baujahr		1997
Mechanische Leistung	kW	63,8
Elektrische Leistung	kW	60
Thermische Leistung	kW	90
Gesamtwirkungsgrad	%	84,7
Elektrischer Wirkungsgrad	%	34
Motor		
Hersteller		Thüringer Motorenwerke GmbH
Typ		4 P 13,5 A
Zylinderzahl/Anordnung		4R
Ansaugart		Turbo
Verbrennungsverfahren		4 Takt
Einspritzverfahren		direkt
Drehzahl	min ⁻¹	1500
Abgasvolumenstrom	Nm ³ /h	295
Abgastemperatur bei Nennlast	°C	400
Generator		
Fabrikat		Emond
Typ		250/4-310
Betriebsart		asynchron
Kühlungsart		wassergekühlt
Wirkungsgrad	%	94
Nennleistung	kW	62
Nennstrom	A	106
Drehzahl	min ⁻¹	1515

Wärmebilanz

Kühlwasser Motor	%	27,6
Abgas	%	23,2
Abstrahlung Motor	%	3,8
wassergekühlter Generator	%	2,0

Gemäß Nr. 1.4, Spalte 2 des Anhangs zur 4. BImSchV [1] sind Verbrennungsmotoranlagen bei Einsatz von Altöl, Deponie- oder Klärgas ohne Leistungsschwelle, bei Einsatz von Biogas aus der Landwirtschaft und der Abfallvergärung ab einer Feuerungswärmeleistung (FWL) von 350 kW und bei Einsatz "anderer brennbarer Stoffe" ab 1 MW immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig. Die untersuchte Anlage mit einer FWL von nur 90 kW ist somit von der Genehmigungspflicht nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz ausgenommen, aber baurechtlich genehmigungsbedürftig.

Zur Emissionsminderung sind im Abgaspfad hinter dem Motor ein Oxidationskatalysator und ein wassergekühltes Wendelsystem installiert. Das Wendelsystem zur Rußabscheidung ist ein Eigenbau der Fa. Höcker und Partner GmbH und besteht aus ST 37. Es ist in gekühlten Rohrleitungen über eine Länge von ca. 4,5 m installiert. Die Rohrleitungen sind im rechten Winkel U-förmig angeordnet und können zur mechanischen Abreinigung an den Winkelkanten geöffnet werden.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die technischen Daten des Oxidationskatalysators.

Tabelle 3: Technische Daten des Oxidationskatalysators

Oxidationskatalysator

Hersteller	Oberland Mangold
Bezeichnung	RME-Oxi-Kat 200 x 152 mm
Typ	125.003
Baujahr	1996
Grundkörper	Edelstahl
Beschichtung	Platin 50 g/ft ³
Betriebstemperatur	mind. 175 °C
Max. zul. Temperatur	1100 °C

4. Messergebnisse

4.1 Zusammensetzung des Pflanzenöls

Das im BHKW eingesetzte naturbelassene, kaltgepresste Rapsöl wird dezentral gewonnen und in der Ölmühle auf Speiseölqualität gefiltert. An beiden Messtagen wurden repräsentative Proben des auf 40 °C vorgewärmten Pflanzenöls aus dem Tagesbehälter entnommen, die anschließend auf verschiedene motor- und umweltrelevante Parameter untersucht wurden (siehe Kapitel 2.1).

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der beiden Ölanalysen an beiden Messtagen den Werten aus dem vorläufigen RK-Qualitätsstandard [2] gegenüber gestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Mittelwerte der Rapsölanalysen an beiden Messtagen mit den Werten im vorläufigen RK-Qualitätsstandard

Eigenschaften	Einheit	Mittelwert aus beiden Rapsölanalysen	Wert nach RK-Qualitätsstandard	
			min	max
Dichte (15 °C)	g/ml	0,92	0,90 - 0,93	
kinemat. Viskosität (40 °C)	mm ² /s	33,8	38	
Heizwert	MJ/kg	36,6	35	
Flammpunkt (nach Pensky-Martens)	°C	313,5	300	
Zündwilligkeit (Cetanzahl) *)	-	38	38	
Koksrückstand (nach Conradson)	Masse-%	0,39	0,03 **)	
Gesamtverschmutzung ***)	mg/kg	11,7	25	
Asche	Masse-%	0,002	0,02	
Wassergehalt	mg/kg	632	1000	
Phosphorgehalt	mg/kg	2	25	
Schwefelgehalt	Masse-%	0,0004	0,03	
Neutralisationszahl	mg KOH/g	2,12	1,5	
Iodzahl	g/100 g	107	120	

*) Methodik für Cetanzahlbestimmung bei RK noch offen [2]

**) Grenzwert ist zu berichtigen voraussichtlich auf 0,3²

***) eventuell zweiter Wert für 5µm-Filter bei RK noch festzulegen

Ein Hauptunterschied zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff ist die sehr viel höhere Viskosität des Pflanzenöls. Die Analysen ergaben eine kinematische Viskosität des Rapsöls von 33,8 mm²/sec bei 40 °C, was in etwa dem Zehnfachen von üblichem Dieselmotorkraftstoff (2,0 -

² mündliche Auskunft von Herrn Dr. Widmann, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik am 09.09.98

4,5 mm²/sec bei 40 °C) entspricht. Dagegen lag der Heizwert des Rapsöls mit 36,6 MJ/kg nur knapp unter dem des leichten Heizöls (ca. 42 MJ/kg). Der Schwefelgehalt des Pflanzenöls wurde mit 0,0004

Gew.-% bestimmt und war damit im Vergleich zu Heizöl EL (LfU-Erfahrungswerte: 0,07 - 0,19 Gew.-%) [3] erwartungsgemäß wesentlich geringer. Auch der Gehalt an Stickstoff im eingesetzten Rapsöl lag mit 70 ml/l auf vergleichsweise niedrigem Niveau.

Im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf den Oxidationskatalysator ist u.a. der Gesamtphosphorgehalt im Rapsöl interessant. Im Verlauf der Ölaufbereitung kann der Gehalt an Phospholipiden durch Entschleimung entscheidend beeinflusst werden. Der mittlere Gesamtphosphorgehalt des während der Untersuchung eingesetzten Öls unterschritt mit einer Konzentration von 2 mg/kg deutlich den im vorläufigen RK-Qualitätsstandard festgelegten Wert von 25 mg/kg.

Da Chlor in biogenen Stoffen hauptsächlich als wasserlösliches Chlorid vorliegt und der Wassergehalt im Öl i.d.R. gering ist, sind relativ niedrige Gesamtchlorgehalte in naturbelassenen Pflanzenölen zu erwarten. Im eingesetzten Rapsöl lag der ermittelte Gesamtchlorgehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 10 ppm.

Auch die untersuchten Schwermetalle befanden sich überwiegend unterhalb der Nachweisgrenze von 0,02 ppm (für Arsen und Cadmium) bzw. 0,05 ppm (Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Pt, V, Zn). Lediglich für die Elemente Kupfer, Eisen, Mangan und Zink wurden Messwerte oberhalb der Nachweisgrenze ermittelt.

Die Rapsölanalysen ergaben, dass das eingesetzte Öl weitgehend den Anforderungen des vorläufigen RK-Qualitätsstandards [2] entsprach. Lediglich der Koksrückstand, der Aufschluss über mögliche Ablagerungen im motorischen Brennraum gibt und die Neutralisationszahl, ein Maß für den Gehalt an freien Fettsäuren im Öl, überschritten die im Standard angegebenen Werte. Allerdings lag der Koksrückstand noch unterhalb der vom BHKW-Motorenhersteller an das Öl gestellten Anforderung von 0,5 Masse-%. Da die Neutralisationszahl stark vom Raffinations- und Alterungsgrad des Öles abhängig ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass das untersuchte Rapsöl bereits über einen längeren Zeitraum gelagert wurde und Polymerisationsvorgänge eingesetzt haben.

4.2 Ergebnisse der Emissionsmessungen

Das Emissionsverhalten des BHKW wurde sowohl im Nenn- (>90 % der maximalen Leistung) als auch im Teillastbetrieb (ca. 65 %) bestimmt. In der Teillastmessreihe wurde zudem die Kaltstartphase berücksichtigt, zu deren Beginn das Motoröl auf eine Temperatur von ca. 60 °C vorgewärmt war. Während die Messreihe 2 im Teillastbetrieb durchgeführt wurde, dokumentieren die Messwerte der Messreihen 1 und 3 das Emissionsverhalten der Anlage im Nennlastbetrieb.

Im folgenden werden die wesentlichen Messergebnisse dargestellt und diskutiert. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich alle Daten auf trockenes Abgas im Normzustand (0°C, 1013 mbar) und einen Bezugssauerstoffgehalt von 5 Vol.-%.

Für die in der Praxis üblicherweise eingesetzten Pflanzenölmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung unterhalb von 1 MW sind keine Normen zur Emissionsbegrenzung einschlägig. Zur Bewertung der Meßdaten aus der Grundsatzuntersuchung werden daher hilfsweise die Emissionswerte der TA Luft 86 [4] bzw. die sich hieraus ableitenden Werte der Konkretisierung der Dynamisierungsklausel vom 06.08.1991 [5] und des StMLU-Schreibens (UMS) vom 29.11.1996 [6] herangezogen.

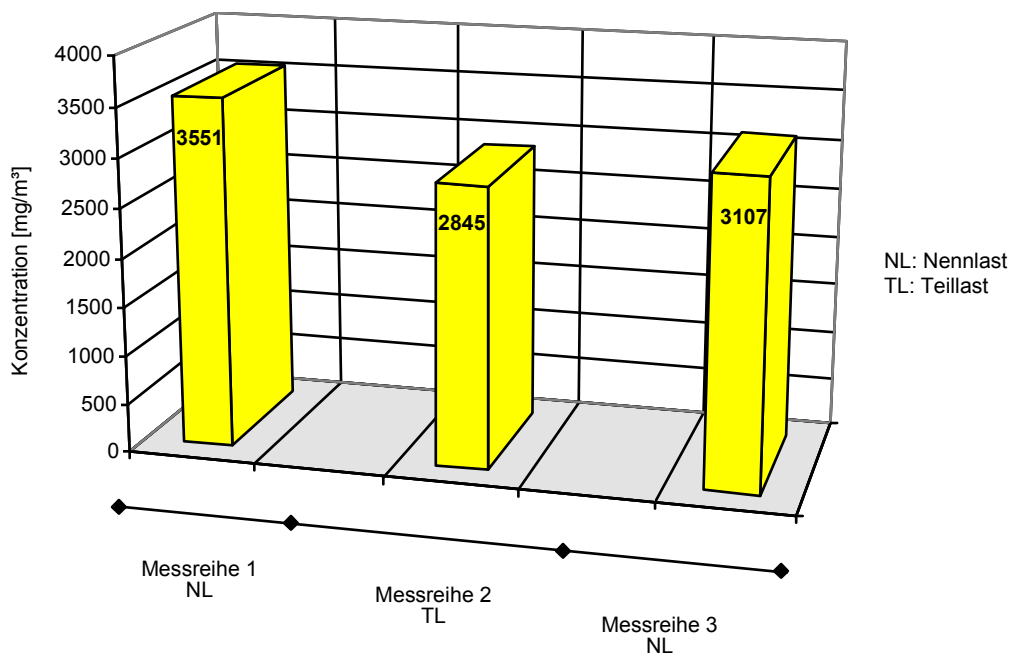
4.2.1 Emissionen anorganischer Stoffe

Stickstoffoxide (NO_x)

Der Kraftfahrzeugverkehr stellt eindeutig die Hauptemissionsquelle für Stickstoffoxide dar, wobei insbesondere bei Selbstzündungsmotoren NO_x-Emissionen eine grosse Rolle spielen. Die gegenwärtige NO_x-Immissionsbelastung liegt aufgrund der wachsenden Verkehrsleistungen nach wie vor auf hohem Niveau.

Die Ergebnisse der Stickstoffoxid-Messungen im Reingas sind als Mittelwerte über die jeweiligen Messreihen in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Mittlere NO_x-Gehalte (angegeben als NO₂) im Reingas



Die NO_x-Emissionen lagen mit Werten zwischen 2,8 und 3,5 g/m³ auf relativ hohem Niveau. Da Rapsöl im Vergleich zu Dieselmotoren relativ wenig Stickstoff enthält (siehe Kapitel 4.1), sind die NO_x-Emissionen u.U. auf einen früheren Einspritzbeginn und einen höheren Druckanstieg

zurückzuführen[7]. Nach [8] führt auch das bei dem untersuchten Motor angewandte Verbrennungsverfahren (Direkteinspritzung) im Vergleich zu den pflanzenöлтаuglichen Vor- und Wirbelkammermotoren, die mit geringerem Luftverhältnis bzw. niedrigeren Verbrennungstemperaturen arbeiten, erfahrungsgemäß zu höheren NO_x -Emissionen.

Der in der TA Luft 86 [4] für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Selbstzündungsmotoren mit einer FWL von < 3 MW genannte Emissionswert von $4,0 \text{ g NO}_2 / \text{m}^3$ wurde während des gesamten Messzeitraumes unterschritten. Gemäß Konkretisierung der Dynamisierungsklausel vom 06.08.1991 [5] ist jedoch ein Zielwert von $1,0 \text{ g NO}_x/\text{m}^3$ anzustreben. Dieser Wert wurde von allen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfassten Halbstundenmittelwerten überschritten, wobei im Teillastbetrieb aufgrund der niedrigeren Temperaturen allgemein geringere Stickstoffoxidkonzentrationen ermittelt wurden als bei Nennlast.

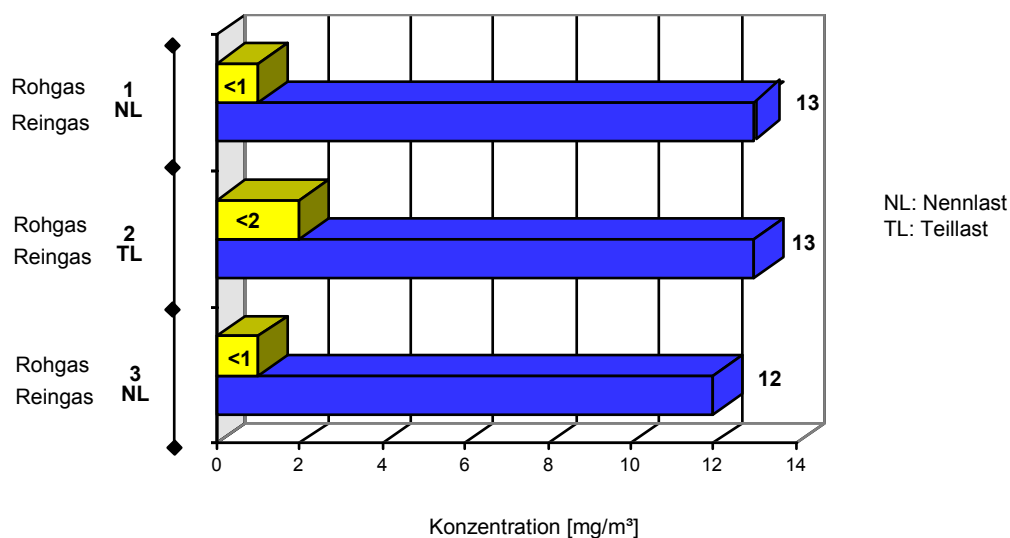
Insbesondere bei größeren Pflanzenöl-BHKW ist ein besonderes Augenmerk auf die NO_x -Minderungsmaßnahmen zu richten. Hier ist zu prüfen, ob die bei Diesel-BHKW dem Stand der Technik entsprechenden motorischen und sekundären NO_x -Minderungsmaßnahmen auch bei Pflanzenöl-BHKW eingesetzt werden können.

Lachgas (N_2O)

In Bezug auf den Treibhauseffekt spielt neben dem CO_2 v.a. auch das Distickstoffoxid (N_2O) mit einer ca. 300mal höheren Klimarelevanz (entspricht 300 CO_2 -Äquivalenten) eine wichtige Rolle. Zudem trägt N_2O zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht bei.

In Abbildung 2 sind die mittleren N_2O -Konzentrationen im Roh- und Reingas dargestellt.

Abbildung 2: Mittlere N_2O -Konzentrationen im Roh- und Reingas



Aus der Grafik geht hervor, dass die N_2O -Konzentrationen im Reingas unabhängig vom Lastzustand ein Vielfaches der im Rohgas vor dem Oxidationskatalysator gemessenen Gehalte betru-

gen.

Die hierfür verantwortlichen N_2O -Bildungsmechanismen im Oxidationskatalysator sind sehr komplex und noch weitgehend unbekannt, jedoch scheinen die aus dem Kraftstoffstickstoff gebildeten sekundären Zwischenprodukte die Ausgangsprodukte für die N_2O -Bildung darzustellen.

Als Hauptreaktionswege werden hauptsächlich diskutiert:

- HCN-Mechanismus
- NH_3 -Mechanismus
- HNO-Mechanismus [9].

Aus einer vom IFEU-Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführten Ökobilanz von Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff [10] geht hervor, dass sich bezüglich der Emissionen an CO_2 -Äquivalenten ein deutlicher Vorteil für RME bzw. Rapsöl ergibt. Durch das im Oxidationskatalysator gebildete Lachgas wird dieser CO_2 -Vorteil jedoch geringfügig verringert. Aufgrund ihrer Klimarelevanz und Umweltschädlichkeit sollten aus Sicht der Luftreinhaltung somit auch die N_2O -Emissionen weitestgehend minimiert werden.

Schwefeloxide (SO_x)

Auch wegen des verstärkten Einsatzes von schwefelreduzierten Kraftstoffen konnte innerhalb der vergangenen Jahre ein deutlicher Rückgang der allgemeinen Schwefeloxidbelastung erreicht werden. Das gegenwärtige SO_x -Immissionsniveau kann als niedrig eingestuft werden.

Die Vorteile der energetischen Nutzung von Pflanzenölen sind dennoch neben dem nahezu geschlossenen CO_2 -Kreislauf, deren biologischer Abbaubarkeit und der Schonung fossiler Energieträger auch im vergleichsweise günstigen SO_x -Emissionsverhalten der Anlagen aufgrund des geringen Schwefelgehaltes im Kraftstoff zu sehen. In Ziffer 3.3.1.4.1 der TA Luft 86 wird der Massegehalt an Schwefel im Kraftstoff auf den in der DIN 51 603 Teil 1 geforderten Maximalwert von 0,20 Gew.-% begrenzt. Die Kraftstoffanalysen in der vorliegenden Untersuchung dagegen ergaben für das eingesetzte Rapsöl einen Schwefelgehalt von lediglich 0,0004 Gew.-%.

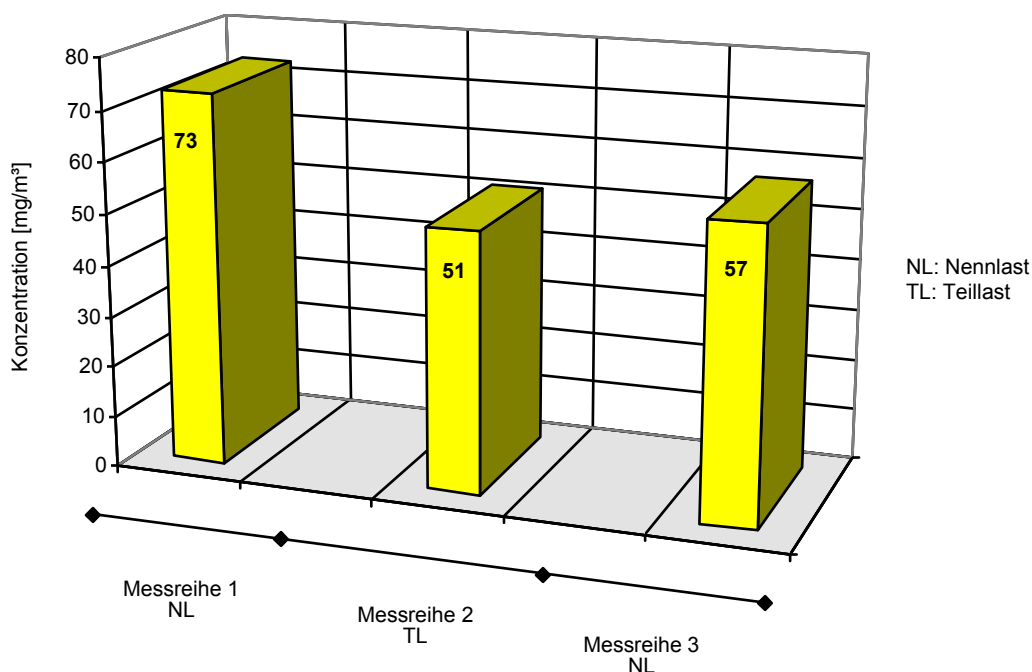
Abbildung 3 gibt einen Überblick über die mittleren SO_x -Konzentrationen im Reingas.

Die SO_x -Emissionen (als SO_2) mit Mittelwerten zwischen 51 und 73 mg/m^3 lagen auf niedrigem Niveau. Bilanziert man jedoch die im Abgas gemessene Schwefelkonzentration ausgehend von dem ermittelten Schwefelgehalt im Rapsöl von 0,0004 Gew.-%, so sind die Ergebnisse auch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der angewandten Verfahren zu hoch und nicht plausibel. Als mögliche Fehlerquellen wurden überprüft:

- Messunsicherheit der SO₂-Messung
- ermittelter Schwefelgehalt im Rapsöl: Die bisher im LfU und bei der Landesanstalt für Landtechnik vorliegenden Rapsölanalysen bestätigen die Größenordnung der im Rahmen dieser Grundsatzuntersuchung ermittelten Schwefelkonzentrationen.
- mögliche anlagentechnische Ursachen
- kraftstoffbedingte Ursachen: Da das BHKW bisher ausschließlich mit Pflanzenöl betrieben wurde, können die erhöhten SO_x-Messwerte nicht auf eventuelle durch Dieselkraftstoff bedingte Ablagerungen zurückgeführt werden.

Mögliche Ursachen für die unplausiblen SO_x-Konzentrationen im Abgas konnten im Rahmen der Datenauswertung nicht ermittelt werden, so dass nunmehr seitens der BHKW-Betreibergesellschaft eine SO₂-Wiederholungsmessung in Erwägung gezogen wird.

Abbildung 3: Mittlere SO_x-Gehalte im Reingas (angegeben als SO₂)



Gesamtstaub

Aufgrund des krebserzeugenden Potentials von Dieselruß sind Partikelemissionen aus Verbrennungsmotoren als immissionsrelevant einzustufen. Man geht davon aus, dass die krebserzeugende Wirkung nicht auf die in geringen Mengen am Dieselruß gebundenen organischen Verbindungen, sondern auf die Rußpartikel selbst zurückzuführen ist [11].

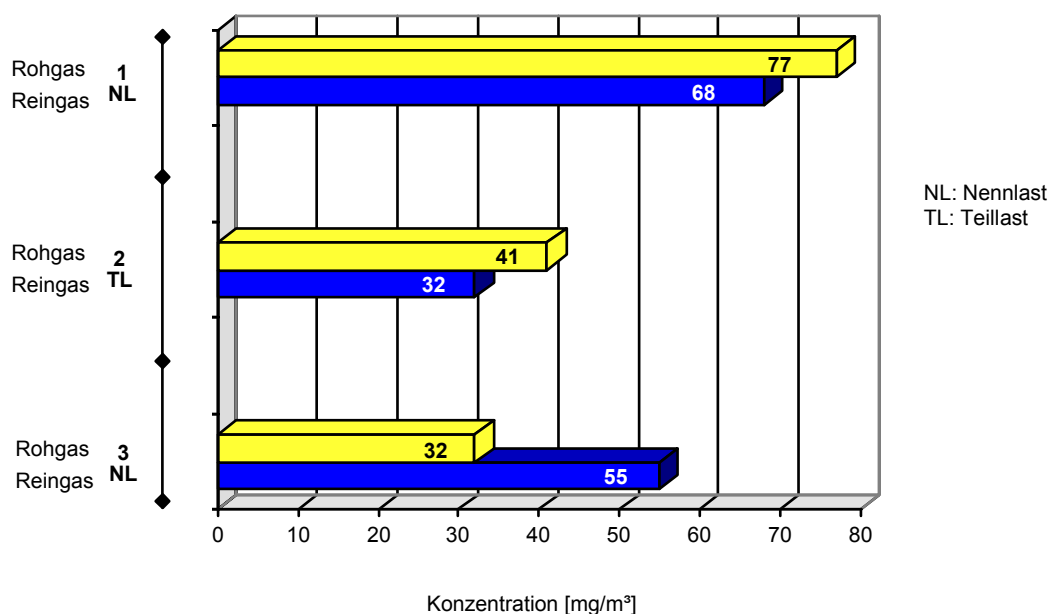
Folgende Vorschriften begrenzen die Partikelemissionen aus stationären Verbrennungsmotoren: In der TA Luft 86 ist für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Selbstzündungsanlagen in Nr. 3.3.1.4.1 ein Emissionswert von $0,13 \text{ g/m}^3$ für staubförmige Emissionen genannt. Darüber hinaus ist zur weiteren Reduzierung der Einsatz von Rußfiltern anzustreben. Weiterhin sind nach Nr. 2.3 TA Luft 86 die im Abgas enthaltenen Emissionen kanzerogener Stoffe (insbesondere Dieselruß) unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit so weit wie möglich zu begrenzen.

Gemäß Konkretisierung dieser Dynamisierungsklausel vom 06.08.1991 ist nach Einzelfallprüfung durch Anwendung motorischer Maßnahmen bei Einzelanlagen $< 1000 \text{ kW FWL}$ ein Zielwert von 80 mg/m^3 , bei Anlagen $> 1000 \text{ kW FWL}$ von 50 mg/m^3 anzustreben. Des weiteren wird auch hier der Einsatz von Rußfiltern empfohlen.

Gemäß UMS vom 29.11.96 zum Stand der Technik bei Staubemissionen von stationären Selbstzündungsmotoren ist für Neuanlagen mit einer FWL $\geq 1 \text{ MW}$ ein Staubemissionsgrenzwert von 20 mg/m^3 festzulegen. Dies gilt unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit auch für Anlagen $< 1 \text{ MW FWL}$.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Staubmessungen im Roh- und Reingas. Bei den dargestellten Staubkonzentrationen handelt es sich jeweils um Mittelwerte, gebildet aus den Halbstundenmittelwerten über den entsprechenden Messzeitraum.

Abbildung 4: Ergebnisse der Staubmessungen im Roh- und Reingas



Wie aus Abbildung 4 hervorgeht wurden im Rohgas mittlere Staubkonzentrationen zwischen 32 und 77 mg/m^3 , im Reingas zwischen 32 und 68 mg/m^3 gemessen. Dabei waren die während der

Teillastmessreihe bestimmten Konzentrationen im Vergleich zum Nennlastbetrieb erwartungsgemäß niedriger.

In der 3. Messreihe wurden im Reingas höhere Staubwerte als im Rohgas ermittelt. Dies ist möglicherweise auf die größere Messunsicherheit bei der Staubmessung im Rohgas zurückzuführen, da hier die Messstelle im Abgaskrümmen unter relativ ungünstigen Strömungsverhältnissen eingerichtet werden musste und nicht den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 entsprach. Konstruktionsbedingt war jedoch vor dem Katalysator keine andere Messstelle möglich. Die Reingasmessungen erfolgten im Schornstein.

Nach Auskunft des Messinstitutes kann davon ausgegangen werden, dass die Staubkonzentration im Rohgas während der 3. Messreihe aufgrund der vorherrschenden pulsierenden Strömungsverhältnisse zu niedrig bestimmt wurde.

Der Oxidationskatalysator trägt durch die Umsetzung organischer Partikelanteile zur Reduzierung der Staubemissionen bei. Eine umfassende Bewertung der Abscheideleistung in Bezug auf Partikel ist jedoch aufgrund der ungünstigen Messstelle und der herrschenden Temperaturverhältnisse (Abkühlung des Abgases von ca. 400 °C im Rohgas auf ca. 150 °C im Reingas) nicht möglich.

Während alle Staub-Halbstundenmittelwerte deutlich unter dem in der TA Luft 86 genannten Wert von 0,13 g/m³ lagen, wurde der Zielwert von 80 mg/m³ gemäß Konkretisierung der Dynamisierungsklausel innerhalb des ersten Messzeitraumes sowohl roh- als auch reingasseitig je einmal überschritten. Die über die jeweiligen Messreihen gemittelten Werte lagen jedoch alle unterhalb von 80 mg/m³. Die im UMS vom 29.11.96 geforderte Emissionsbegrenzung für Staub von 20 mg/m³ für Anlagen mit einer FWL von ≥ 1 MW wird dagegen von allen Halbstundenmittelwerten überschritten.

Um die Einhaltung dieses Wertes zu garantieren, wären neben dem bereits vorhandenen Oxidationskatalysator und dem Wendelsystem weitere sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen (Rußfilter) einzusetzen. Des Weiteren könnten konstruktive motorische Maßnahmen zur Reduzierung der Partikelemissionen beitragen.

4.2.2 Emissionen organischer Stoffe und Kohlenmonoxid

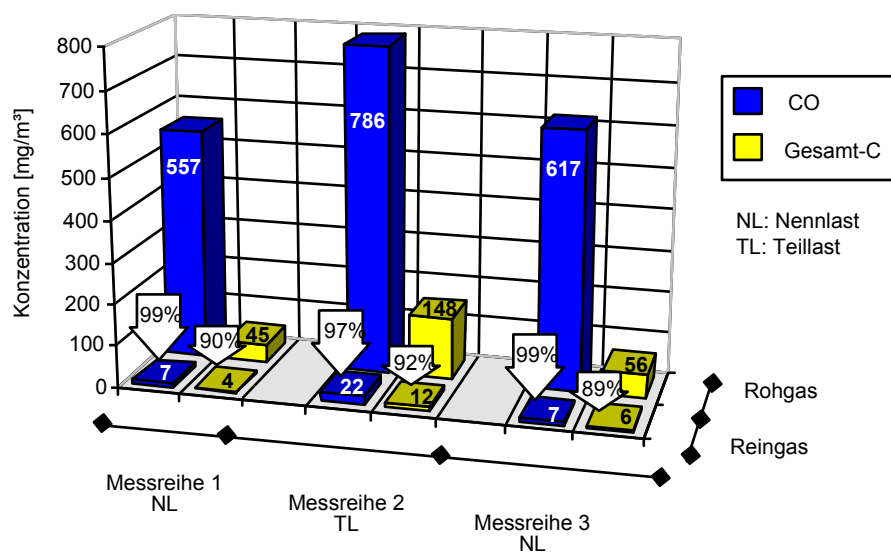
Kohlenmonoxid (CO), Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C)

Als geeignete Leitgrößen zur Beschreibung des motorischen Ausbrands werden üblicherweise die leicht zu bestimmenden Gehalte an Kohlenmonoxid (CO) und Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C) herangezogen. Sie spiegeln das Emissionsniveau organischer und geruchsrelevanter Stoffe wider. Des Weiteren kann durch Differenzmessung dieser Parameter im Roh- und Reingas die Funktionsfähigkeit von Oxidationskatalysatoren beurteilt werden.

In Abbildung 5 sind die mittleren CO- und Gesamt-C-Konzentrationen im Roh- und Reingas dargestellt.

Wie aus der Abbildung hervorgeht wurden im Rohgas mittlere CO-Konzentrationen zwischen 557 und 786 mg/m³ und Gesamt-C-Gehalte von 45 bis 148 mg/m³ gemessen. Im Reingas dagegen lagen die Gehalte mit CO-Werten zwischen 7 und 22 mg/m³ und Gesamt-C-Konzentrationen zwischen 4 und 12 mg/m³ auf wesentlich niedrigerem Niveau.

Abbildung 5: Mittelwerte der CO- und Gesamt-C-Konzentrationen im Roh- und Reingas



Der Teillastbetrieb inklusive Kaltstartphase erwies sich als vergleichsweise emissionsrelevant. Während in den beiden Nennlastmessreihen 1 und 3 im Reingas ausschließlich CO- und Gesamt-C-Halbstundenmittelwerte kleiner 10 mg/m³ gemessen wurden, betrug die maximale CO-Reingaskonzentration in der Kaltstartphase 104 mg/m³. Im Rohgas vor dem Oxidationskatalysator wurden hier sogar CO-Halbstundenmittelwerte bis zu 850 mg/m³ ermittelt.

Der Oxidationskatalysator trug somit mit Abscheideleistungen zwischen 89 und 99 % erheblich zum günstigen CO- und Gesamt-C-Emissionsverhalten des BHKWs bei.

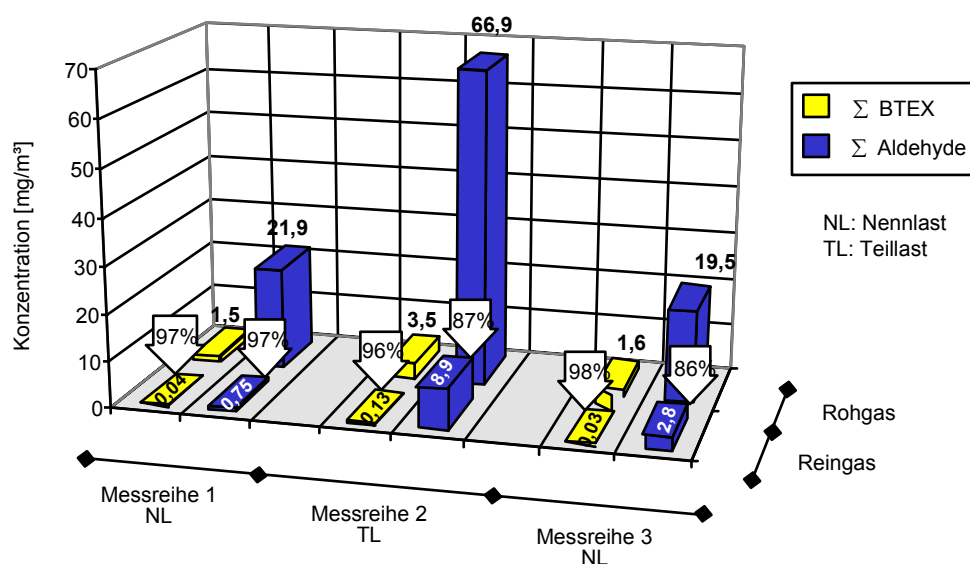
Eine Überschreitung der in der TA Luft 86 genannten und für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen einschlägigen CO-Emissionsbegrenzung von 0,65 g/m³ kann ohne Einsatz von Oxidationskatalysatoren nicht ausgeschlossen werden. In der vorliegenden Untersuchung überschritten alle während der Teillastmessreihe im Rohgas ermittelten CO-Halbstundenmittelwerte diesen Wert. Im Nennlastbetrieb lag rohgasseitig immer noch ein CO-Halbstundenmittelwert über 0,65 g/m³.

Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX), Aldehyde

Während das überwiegend durch den Kraftfahrzeugverkehr in die Umwelt gelangende Benzol aufgrund seines krebserzeugenden Potentials besonders immissionsrelevant ist, können die BTEX-Aromaten allgemein zur Bildung des sog. Sommersmogs beitragen [11]. Außerdem spielen sie zusammen mit den Aldehyden auch im Hinblick auf mögliche Geruchsemissionen eine Rolle.

Bei Einsatz von Pflanzenölen in Verbrennungsmotoren muss im Vergleich zum Betrieb mit konventionellem Dieselkraftstoff z.T. mit höheren Emissionen an geruchsintensiven Aldehyden gerechnet werden. In Abbildung 6 sind die im Roh- und Reingas gemessenen BTEX- und Aldehydkonzentrationen (C1-C4) als Mittelwerte über den jeweiligen Messzeitraum dargestellt.

Abbildung 6: Mittlere BTEX- und Aldehydkonzentrationen (C1-C4) im Roh- und Reingas



Wie aus Abbildung 6 hervorgeht lag die mittlere Summenkonzentration der gemessenen Aldehyde C1 - C4 (Formaldehyd, Acetaldehyd, Propionaldehyd und Acrolein) im Rohgas zwischen 19,5 und 66,9 mg/m³. Die BTEX-Gehalte schwankten im Bereich von 1,5 bis 3,5 mg/m³. Dagegen lagen die im Reingas ermittelten Konzentrationen mit Werten zwischen 0,75 und 8,9 mg/m³ für Aldehyde bzw. 0,03 bis 0,13 mg/m³ für BTEX auf wesentlich niedrigerem Niveau. Dies ist auf mittlere Abscheideleistungen des Oxidationskatalysators von 90 % für Aldehyde und 97 % für BTEX zurückzuführen.

Erwartungsgemäß erwies sich der Teillastbetrieb auch hier als vergleichsweise emissionsrelevant. Hohe Konzentrationen wurden v.a. während der Kaltstartphase ermittelt.

Die Aldehydemissionen des Rapsöl-BHKW wurden hauptsächlich von Formaldehyd und Acetaldehyd bestimmt. Dagegen waren die Anteile von Propionaldehyd und Acrolein, das im Verdacht steht, den charakteristischen Abgasgeruch beim Motorbetrieb mit Pflanzenöl zu verursachen, vergleichsweise gering.

Für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen ist in der TA Luft 86 in Ziffer 3.1.7 für die Summenkonzentration an Stoffen der Klasse I, in die u.a. Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein eingeordnet sind, ein Emissionswert von 20 mg/m³ genannt. Insbesondere im Teillastbetrieb inklusive Kaltstartphase lag die mittlere Aldehydkonzentration mit 66,9 mg/m³ weit darüber.

Benzol ist gemäß TA Luft 86 in Nr. 2.3 Klasse III einzustufen, für die eine maximale Summenkonzentration von 5 mg/m³ genannt ist. Dieser Wert wurde in der vorliegenden Untersuchung in jedem Fall unterschritten.

Aufgrund der im Teillastbetrieb v.a. während der Kaltstartphase gemessenen Rohgaskonzentrationen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei vergleichbaren Anlagen ohne Oxidationskatalysator unter ungünstigen Ableitbedingungen gelegentliche Beeinträchtigungen durch Gerüche nicht ausgeschlossen sind. Aus der Sicht der Luftreinhaltung ist daher der Einsatz von Oxidationskatalysatoren dringend zu empfehlen.

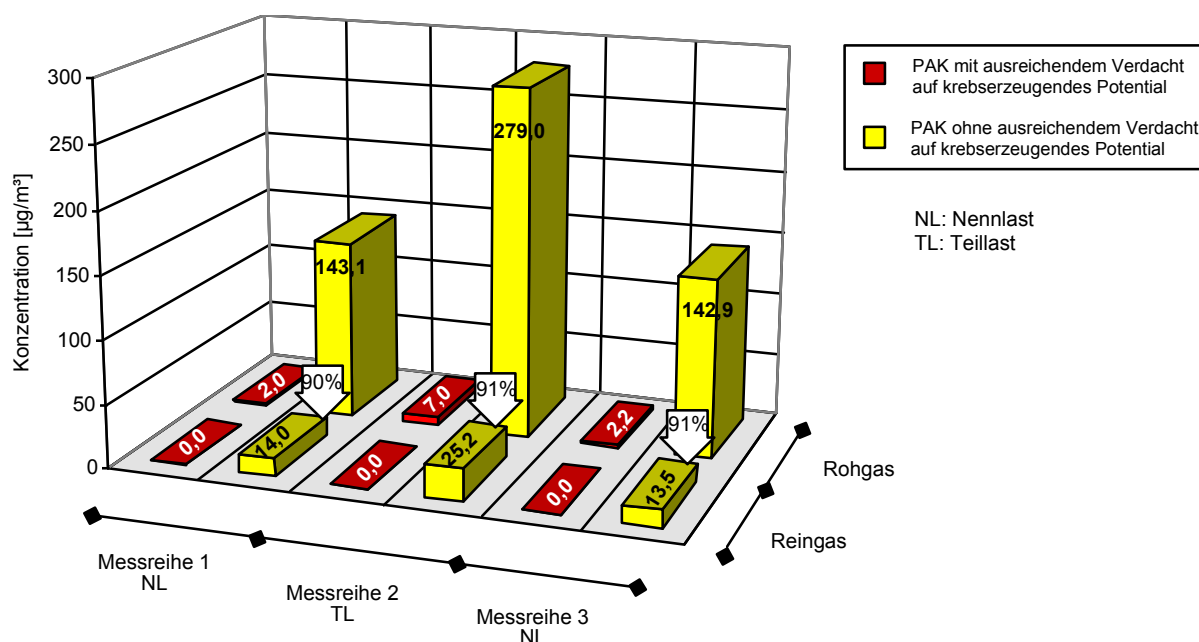
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe gehören zu den wichtigsten Umweltkanzerogenen und entstehen als unerwünschte Nebenprodukte bei unvollständiger Verbrennung, Pyrolyseprozessen oder bei sonstiger thermischer Zersetzung organischen Materials [11].

In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die Ermittlung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe nach der Methode EPA 610, nach der insgesamt 16 Einzel-PAK erfasst werden. Für 7 dieser Einzel-PAK liegen gemäß MAK-Werte-Liste ausreichende Hinweise auf krebserzeugendes Potential vor.

In Abbildung 7 sind die im Roh- und Reingas ermittelten PAK-Gehalte dargestellt. Bei der Darstellung wurde unterschieden in PAK mit bzw. ohne ausreichenden Verdacht auf krebserzeugendes Potential. Die Summe beider Konzentrationen ergibt den Gehalt an PAK nach EPA 610.

Abbildung 7: Konzentrationen an PAK mit bzw. ohne ausreichenden Verdacht auf krebserzeugendes Potential



Die Konzentration an PAK nach EPA 610 wurden hauptsächlich von den PAK ohne ausreichenden Verdacht auf krebserzeugendes Potential bestimmt. Hierbei spielte jedoch v.a. das Naphthalin eine Rolle, das in der MAK-Werte-Liste 1998 [12] in Kategorie III. 3 eingestuft ist ("Stoffe, die wegen möglicher krebserzeugender Wirkung beim Menschen Anlass zur Besorgnis geben, aber aufgrund unzureichender Informationen nicht endgültig beurteilt werden können."). Die PAK mit ausreichendem Verdacht auf krebserzeugendes Potential waren im Reingas nicht mehr nachweisbar. Mit Konvertierungsraten von über 90 % trug der Oxidationskatalysator somit wesentlich zur Reduzierung der PAK-Emissionen bei.

Aus der Sicht der Luftreinhaltung ist daher der Einsatz von Oxidationskatalysatoren auch bei kleineren Anlagen dringend zu empfehlen.

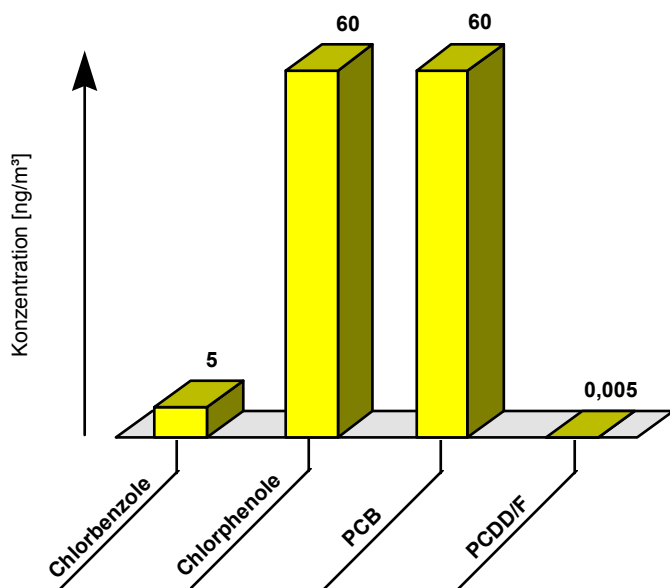
4.2.3 Weitere organische Emissionen (Sonderparameter)

Polychlorierte Biphenyle (PCB), Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F), Chlorbenzole und -phenole

Im Rahmen der Grundsatzuntersuchung wurden umfangreiche Messungen von organischen luftverunreinigenden Stoffen durchgeführt.

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die durchschnittlich ermittelten Emissionswerte verschiedener chlororganischer Verbindungen.

Abbildung 8: Überblick über das Emissionsniveau verschiedener chlororganischer Verbindungen (Mittelwerte)



Die ermittelten Chlorbenzolkonzentrationen schwankten zwischen 3 und 9 ng/m³, die Chlorphenol-Gehalte zwischen 13 und 117 ng/m³.

Bei der Messung der polychlorierten Biphenyle wurden die PCB nach LAGA erfasst. Die ermittelten Gehalte lagen hier zwischen 40 und 81 ng/m³.

Die PCDD/F-Messungen ergaben Konzentrationen zwischen 0,004 und 0,007 ng TE/m³.

Die Konzentrationen der gemessenen chlororganischen Verbindungen lagen somit auf allgemein niedrigem Niveau.

4.2.4 Schwermetalle

Im Rahmen der vorliegenden Grundsatzuntersuchung wurden u.a. auch umfangreiche Schwermetallmessungen durchgeführt.

Die hierbei ermittelten Schwermetallkonzentrationen lagen allgemein auf niedrigem Niveau und befanden sich sowohl rein- als auch rohgasseitig größtenteils unterhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen. Lediglich für Kupfer und Zink wurden regelmäßig Werte oberhalb der Nachweisgrenze im Bereich bis 0,06 mg/m³ für Kupfer und 0,04 mg/m³ für Zink ermittelt. Die höchste gemessene Konzentration an Eisen betrug 1,1 mg/m³, die maximale Bleikonzentration 0,1 mg/m³.

Zur Begrenzung von Schwermetallemissionen werden in Nr. 3.1.4 der TA Luft 86 drei Klassen genannt, deren jeweilige Emissionswerte im Laufe der Untersuchung immer sehr deutlich unterschritten wurden.

Auch die Analyse des eingesetzten Rapsöls ergab überwiegend Schwermetallkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Grundsatzuntersuchung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) wurden umfangreiche Emissionsmessungen an einem mit Rapsöl betriebenen Blockheizkraftwerk mit Oxidationskatalysator im Nenn- und Teillastbetrieb unter Berücksichtigung der Kaltstartphase durchgeführt. Parallel zu den Messungen im Roh- und Reingas wurden Proben des eingesetzten Rapsöls aus dem Tagestank entnommen und auf verschiedene motor- und umweltrelevante Parameter untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass das eingesetzte Pflanzenöl weitgehend den Anforderungen des RK-Qualitätsstandards entspricht.

Die Emissionen an Stickstoffoxiden lagen aufgrund des Verbrennungsverfahrens (Direktein-spritzung) auf relativ hohem Niveau. Nachgewiesen wurde weiterhin die N₂O-Bildung im Oxidationskatalysator. Allgemein erwies sich die Kaltstartphase trotz erfolgter Vorwärmung des Kraftstoffes und Schmieröls erwartungsgemäß als der emissionsrelevanteste Betriebszustand.

Bezüglich der untersuchten organischen Komponenten wies der Oxidationskatalysator mit mittleren Konvertierungsraten zwischen 86 und 99 % ein erhebliches Emissionsminderungspotential auf. Aufgrund der im Teillastbetrieb gemessenen Rohgaskonzentrationen kann davon ausgegangen werden, dass bei vergleichbaren Anlagen ohne Oxidationskatalysator unter ungünstigen Ableitbedingungen gelegentliche Beeinträchtigungen durch Gerüche nicht ausgeschlossen sind. Aus der Sicht der Luftreinhaltung wird deshalb der Einsatz eines Oxidationskatalysators auch bei kleineren Anlagen dringend empfohlen. Auch die Anwendung von konstruktiven motorischen sowie sekundären Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen an Stickstoffoxiden und Gesamtstaub sollte i.R. der technischen Fortentwicklung insbesondere bei größeren Anlagen weiter verfolgt werden. Im Rahmen des Anlagenbetriebs sollten häufige Kaltstartphasen aufgrund deren Emissionsrelevanz möglichst vermieden werden.

Die Grundsatzuntersuchung hat gezeigt, dass mit Rapsöl betriebene Blockheizkraftwerke mit Oxidationskatalysator bei geeigneter Anlagenauslegung und sachgemäßem Betrieb auch aus Sicht der Luftreinhaltung eine Alternative zu konventionellen Diesel-BHKW sind, durch die die Bedeutung regenerativer Energieträger gestärkt werden kann.

6. Literatur

- [1] Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4.BImSchV) vom 24.07.1985 (BGBl. I. S. 1586), in der Fassung der Bekanntmachung vom 14.03.1997 (BGBl. I. S. 504), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 19.03.1997 (BGBl. I. S. 545), zuletzt geändert am 20.04.1998 (BGBl. I S. 723)
- [2] LTV-Arbeitskreis "Dezentrale Pflanzenölgewinnung" Weihenstephan: Vorläufiger Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard); 1996
- [3] Ergebnisse von 67 Zollmitteilungen des Jahres 1992
- [4] Techn. Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 27.02.1986 (GMBL. S. 202)
- [5] StMLU: Bekanntmachung vom 06.08.1991 Nr.8221-333-37615 (AllMBI Nr.22/1991, S.634), 1991
- [6] StMLU: Schreiben vom 26.11.1996, Az.: 8267-7/84-41178 zum Vollzug des BImSchG; Rußfiltertechnologie bei stationären Selbstzündungsmotoren, 1996
- [7] TU München, Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: "Gelbes Heft" Nr. 40 (Kurzfassung) "Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht"; Mai 1992
- [8] J. Kolar: Stickstoffoxide und Luftreinhaltung: Grundlagen, Emissionen, Transmission, Immissionen, Wirkungen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990
- [9] U. Fritz, C. Wehinger, Bundesministerium für Forschung und Technologie: Forschungsbericht (0326726A6) "Messung der N₂O-Emissionen von Verbrennungsanlagen und Untersuchung von Möglichkeiten zur Emissionsminderung" TU-München Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie; Dezember 1994
- [10] Dr. G. Reinhardt, J. Borken, Dr. A. Patyk, R. Vogt: Ressourcen- und Emissionsbilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff, Gutachten für das Umweltbundesamt, IFEU-Institut Heidelberg, 1997
- [11] StMLU (Hrsg.): Luftschadstoffe - Auswirkungen auf Gesundheit und Natur, Druckschrift in der Reihe "Umwelt & Entwicklung - Umwelthygiene Bayern", 1. Auflage, August 1997
- [12] Deutsche Forschungsgemeinschaft: MAK-und BAT-Werte-Liste 1998, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1998