

# MATERIALIEN

---

Umwelt & Entwicklung Bayern

## Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

### Abschlussbericht



Bayerisches Staatsministerium für  
Landesentwicklung und Umweltfragen



# MATERIALIEN

---

Umwelt & Entwicklung Bayern

## Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke

Betriebs- und Emissionsverhalten  
ausgewählter bayerischer Anlagen,  
Schwachstellenanalyse und Bewertung

## Abschlussbericht

---

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für  
Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)  
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München  
Internet: <http://www.umweltministerium.bayern.de>  
E-Mail: [poststelle@stmlu.bayern.de](mailto:poststelle@stmlu.bayern.de)

- Juli 2002 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: TU München - Weihenstephan  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Vorstand: Prof. Dr. Dr.h.c. H. Schön

Projektleiter: Dr. B. A. Widmann  
Projektbearbeiter  
und Autoren: Dipl.-Ing.agr. K. Thuneke  
Dipl.-Ing. (FH) H. Link  
Dr. B. A. Widmann  
Dipl.-Ing.agr. E. Remmele

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

#### Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMLU erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMLU, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMLU oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMLU Einsicht nehmen.

Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMLU vertreten.

Die Verteilung der aufgrund finanzieller oder materieller Beteiligung an der Herstellung als Gegenleistung an Personen oder Institutionen abgegebenen Exemplare liegt nicht in der Verantwortung des StMLU.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehen und Methodik</b> .....	<b>3</b>
2.1	Auswahl der BHKW .....	3
2.2	Ermittlung des Betriebsverhaltens .....	6
2.2.1	Erfassung der Qualität der Betriebsstoffe.....	6
2.2.2	Erfassung von Betriebskennwerten .....	9
2.2.3	Dokumentation von Wartung, Reparatur und Störungen .....	14
2.3	Bestimmung des Emissionsverhaltens .....	15
2.3.1	Wiederkehrende Messungen .....	16
2.3.2	Kontinuierliche Messungen .....	20
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>22</b>
3.1	Gesamtkonzeption.....	22
3.1.1	BHKW Weißenburg .....	22
3.1.2	BHKW Greußenheim.....	25
3.1.3	BHKW Landtechnik Weihenstephan .....	27
3.2	Betriebsverhalten.....	32
3.2.1	Qualität der Betriebsstoffe .....	32
3.2.2	Betriebskennwerte .....	49
3.2.3	Instandhaltung .....	63
3.3	Emissionsverhalten .....	90
3.3.1	BHKW Weißenburg .....	90
3.3.2	BHKW Greußenheim.....	96
3.3.3	BHKW Landtechnik Weihenstephan .....	102
3.3.4	Vergleich und Einordnung des Emissionsverhaltens.....	109
<b>4</b>	<b>Schwachstellenanalyse, Bewertung, Lösungsansätze</b> .....	<b>116</b>
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>129</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>132</b>
	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>137</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>138</b>

## 1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Der Einsatz von naturbelassenem Pflanzenöl als Kraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Dieselmotoren gewinnt aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes, vor allem aber wegen der Verminderung der Kohlendioxidbelastung und Ressourcenschonung zunehmend an Bedeutung. Ein weiterer Grund ist die verbesserte Wirtschaftlichkeit des Betriebs durch gestiegene Preise von Heizöl, Dieselkraftstoff und Biodiesel. Bei der Verwendung pflanzenöлтаuglicher Antriebstechniken, können im Vergleich zur Nutzung von Methylester in konventionellen Dieselmotoren der Schritt der Umesterung des Pflanzenöls und die damit verbundenen Kosten sowie der Energieeinsatz für die Umwandlung entfallen. Vor allem die Verwendung naturbelassener Pflanzenöle zur Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken unter hoher Ausnutzung des Energieinhaltes des Kraftstoffes spielt eine immer wichtigere Rolle, nicht zuletzt durch den im Erneuerbaren Energien-Gesetz vom April 2000 verabschiedeten garantierten höheren Vergütungssatz bei der Einspeisung von Strom aus Biomasse.

In Bayern sind derzeit etwa 30 pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke mit einer elektrischen Leistung von ca. 5 bis ca. 220 kW (z.T. 2 Module) installiert. Die Betreiber sind in erster Linie Städte und Gemeinden, landwirtschaftliche Betriebe, Betreibergesellschaften, Privatpersonen, aber auch z.B. der Deutsche Alpenverein auf Berghütten.

Die Erfahrungen mit pflanzenölbetriebenen BHKW in der Praxis sind bislang sehr gegensätzlich. Neben dauerhaft funktionstüchtigen Aggregaten traten an anderen Anlagen immer wieder schwerwiegende Betriebsstörungen auf, so dass mehrere BHKW nach meist nur kurzer Laufzeit den Betrieb einstellten. Die Ursachen von Betriebsstörungen werden üblicherweise nicht analysiert. Erfahrungen wurden nicht aufbereitet und sind für Planer und Betreiber in der Regel nicht verfügbar. Somit werden Schwachstellen nicht erkannt und die Vermeidung bereits früher gemachter Fehler ist schwer möglich.

Zudem liegen derzeit keine umfassenden Kenntnisse über das Emissionsverhalten von Pflanzenöl-BHKW vor. Die Arbeiten im Rahmen des Projektes *„Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen - Literatur- und Technologieübersicht, Datenbank“*, haben deutliche Wissenslücken aufgezeigt [13]. Die wenigen in der Literatur aufgeführten Untersuchungen beziehen sich meist auf heute zum Teil nicht mehr übliche ältere Motorbauarten. Auch die Entwick-

lung und Bandbreite der Emissionen während eines längeren Betriebszeitraumes wurde bislang nicht hinreichend untersucht. Bei den vorhandenen Untersuchungen zu Pflanzenöl-BHKW wurden in den seltensten Fällen die Qualität der verwendeten Kraftstoffe ausreichend genau dokumentiert, so dass Zusammenhänge zwischen wesentlichen Eigenschaften des Pflanzenöls und dem Betriebs- und Emissionsverhalten nicht abgeleitet werden können.

Um Praxisempfehlungen für einen störungsarmen und umweltschonenden Betrieb geben zu können, ist es notwendig, das Langzeitbetriebs- und Emissionsverhalten von Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken zu kennen und eventuelle Schwachstellen hinsichtlich der Kraftstoffqualität, den Betriebsbedingungen und der installierten Anlagentechnik aufzudecken.

Die **Ziele** dieser Untersuchungen sind deshalb:

- Erfassung des Betriebsverhaltens ausgewählter pflanzenölbetriebener BHKW über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren, mit
  - Dokumentation der Kraftstoffherkunft und Kraftstoffqualität
  - Erfassung von Messgrößen zur Beschreibung der Betriebsbedingungen
  - Dokumentation aller Störungen sowie Wartungs- und Reparaturarbeiten,
- Ermittlung des Emissionsverhaltens dieser Anlagen während des Betreuungszeitraumes durch
  - regelmäßig wiederkehrende Messungen wichtiger Abgaskomponenten (CO, NO<sub>x</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> und Staub)
  - mehrwöchige Dauermessungen von CO und NO,
  - zusätzliche Messung von Aldehyden an einem Aggregat
- Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Kraftstoffqualität, Betriebsbedingungen und installierter Technik auf eventuelle Störungen und die Emissionen
- Bewertung der Ergebnisse mit Erarbeitung von Praxisempfehlungen
- Erstellung eines **Leitfadens** für die Planung und den Betrieb von Pflanzenöl-BHKW  
Der Leitfaden soll die wechselseitigen Anforderungen von Pflanzenöl und Motor bzw. Peripheriekomponenten aufzeigen und eine Hilfestellung für Anlagenplaner, Betreiber und Entscheidungsträger bei Fragen zur Planung, Ausführung und zum Betrieb von Pflanzenöl-BHKW bieten. Darüber hinaus sollen mithilfe des Leitfadens Schwachstellen frühzeitig erkannt und beseitigt werden können, um eventuelle Schadensfälle abzuwenden. Somit soll ein Beitrag für einen sicheren, wirtschaftlichen und umweltgerechten Betrieb von Pflanzenöl-BHKW geleistet werden.

## 2 Vorgehen und Methodik

### 2.1 Auswahl der BHKW

Die Auswahl der Anlagen für die Untersuchungen erfolgte in Abstimmung mit dem BayLfU nach folgenden Kriterien:

- Praxisanlagen mit Standort in Bayern
- verschiedene Anlagenkonzepte der Kraft-Wärme-Kopplung
- Abdeckung der praxisüblichen Leistungsbereiche von Pflanzenöl-BHKW
- Verschiedene Motorenbauarten und Abgasreinigungstechnologien
- Bereitschaft zur Auskunft und Mithilfe der Betreiber, Planer und Hersteller

Nach eingehender Überprüfung oben genannter Kriterien wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Blockheizkraftwerke ausgewählt.

Tabelle 1: Standorte und Betreiber der ausgewählten BHKW

Standort	Betreiber	Ansprechpartner	Aggregat-Hersteller	Nennleistung	
91781 Weißenburg	Stadtwerke Weißenburg GmbH	Herr Lang Schlachthofstr. 19 Tel.: 09141/999-0	DMS	2x110 kW <sub>el</sub>	2x110 kW <sub>th</sub>
97259 Greußenheim	Blockheizkraftwerks- betreiber GbR mbH	Herr Bgm. Scheiner Kirchplatz 7 Tel.: 09369/90680	TMW	60 kW <sub>el</sub>	90 kW <sub>th</sub>
85354 Freising	Bayerische Landesanstalt für Landtechnik	Herr Dr. Widmann Vöttinger Str. 36 Tel.: 08161/71-4130	VWP/ Konrad Weigel Energietechnik	8 kW <sub>el</sub>	15 kW <sub>th</sub>

### BHKW Weißenburg

Das von der Firma KKW Färber GmbH ausgeführte BHKW in Weißenburg wird von der Stadtwerke Weißenburg GmbH betrieben. Die in ein dortiges Freibad installierten zwei baugleichen Aggregate mit einer elektrischen und thermischen Leistung von jeweils 110 kW der Firma Dieselmotoren- und Gerätebau GmbH Schönebeck (DMS) dienen vorrangig zur Spitzenstromabdeckung. Während der Badesaison wird die anfallende Wärme für die Schwimmbeckenheizung genutzt. Bei einem der beiden Aggregate wurde im Juni 1999 ein neues System einer kontinuierlichen Motorölaufreinigung installiert.

### **BHKW Greußenheim**

Das Blockheizkraftwerk in Greußenheim wird von einer eigens gegründeten Gesellschaft, der „Blockheizkraftwerksbetreiber GbR mbH“ betrieben, deren Geschäftsführer der erste Bürgermeister der Gemeinde Greußenheim Herr Bruno Scheiner ist. Weitere Mitglieder der Gesellschaft sind Hauseigentümer eines umliegenden Neubaugebietes, die ihre Wohnhäuser an das Nahwärmenetz anschließen. Das BHKW, das mit einem Motor der Thüringer Motorenwerke (TMW) ausgestattet ist, weist eine elektrische Leistung von 60 kW und eine thermische Leistung von 90 kW auf und wurde von der Fa. Höcker und Partner Energieanlagenbau GmbH, Westenfeld realisiert. Die Errichtung eines saisonalen Erdwärmespeichers ist in Zusammenarbeit mit der Universität Würzburg geplant, um die überschüssige thermische Energie im Sommer zu speichern und im Winter mit Wärmepumpen wieder in das Nahwärmenetz einzuspeisen. Das Blockheizkraftwerk Greußenheim war Demonstrationsobjekt für die EXPO 2000.

### **BHKW Landtechnik Weihenstephan**

An der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Weihenstephan wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein pflanzenöltaugliches BHKW mit einer elektrischen Leistung von 8 kW und einer thermischen Leistung von 15 kW der Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP) installiert (Abbildung 1).

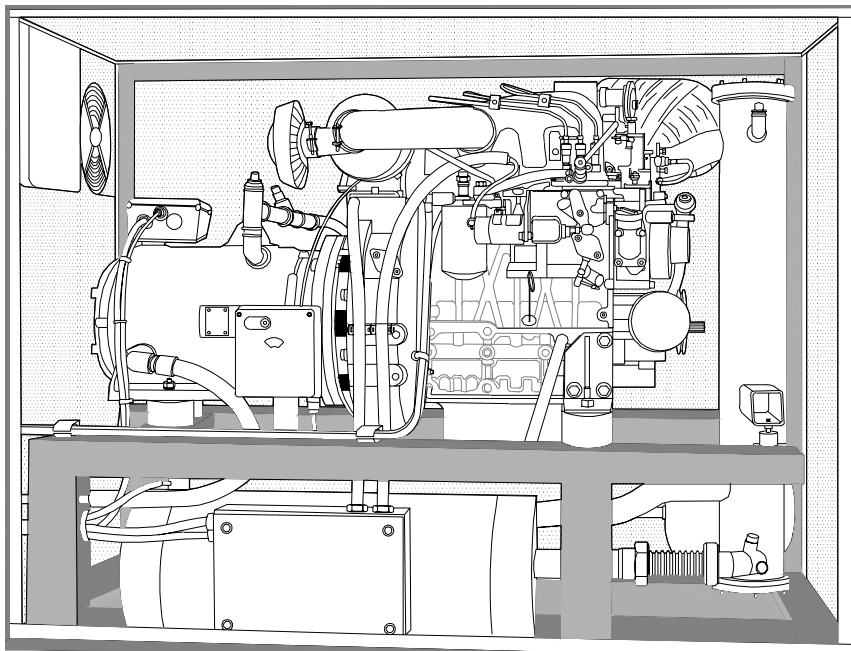


Abbildung 1: Pflanzenöl-BHKW der Landtechnik Weihenstephan - Zeichnung



Durch die Einbindung in die Strom- und Wärmeversorgung der Landesanstalt kann hier eine hohe Jahresauslastung erreicht werden. Da die Bayerische Landesanstalt für Landtechnik gleichzeitig Betreiber der Anlage ist, kann leichter auf die Anlage zugegriffen werden, um spezielle Messungen durchzuführen und unterschiedliche Betriebszustände zu simulieren. Das BHKW kann dauerhaft mit einer umfassenden Messtechnik ausgestattet werden.

Der Kraftstoff wird in der eigenen Ölgewinnungsanlage hergestellt. Dabei werden lückenlos wesentliche Verfahrenskennndaten zum Rapsanbau (Standort, Sorte, Pflanzenschutz, Düngung...), Ölsaatenlagerung, Ölgewinnung, Ölreinigung, Öllagerung und Motorbetrieb dokumentiert (Abbildung 2).

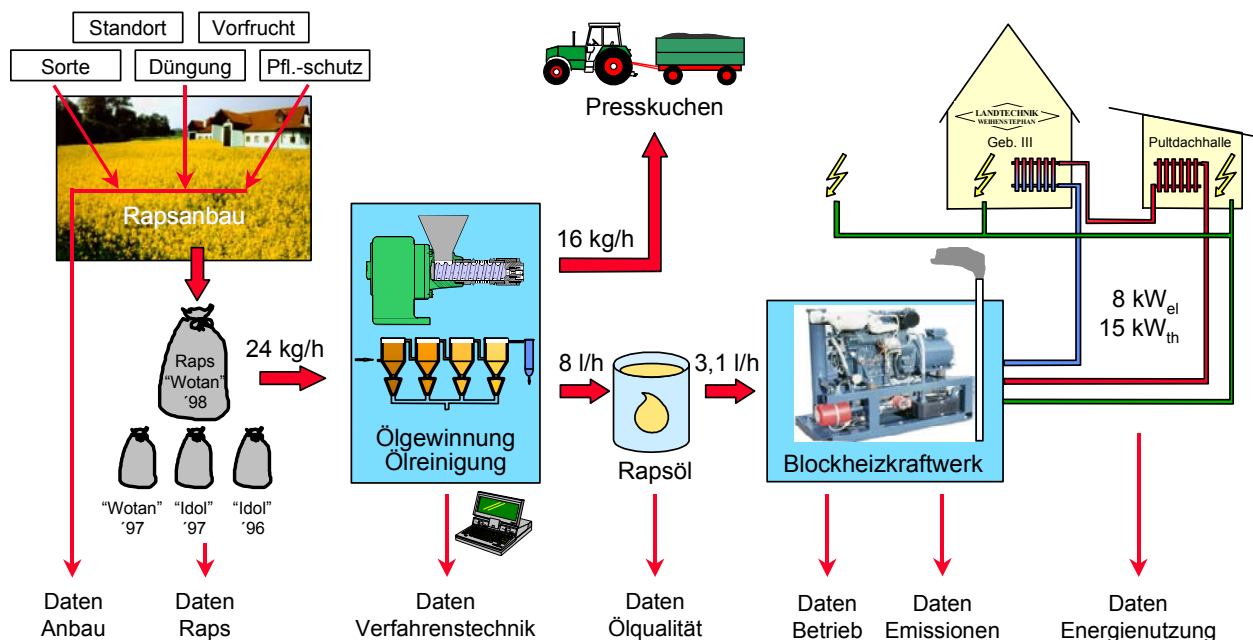


Abbildung 2: Gesamtkonzeption des Pflanzenöl-BHKW an der Landtechnik Weihenstephan – Schaubild

## **2.2 Ermittlung des Betriebsverhaltens**

Die Untersuchung des Betriebsverhaltens wurde an den ausgewählten Blockheizkraftwerken über einen Zeitraum von etwa 18 Monaten durchgeführt. Um gesicherte Aussagen zu ermöglichen, ist es erforderlich, die wesentlichen Daten regelmäßig bzw. kontinuierlich zu erfassen. Wichtig ist dabei die Dokumentation der Qualität des verwendeten Kraftstoffes und Motoröls, der Betriebsbedingungen und aller Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie eventuell auftretender Störungen, deren Ursachen, sofern bekannt, und deren Behebung. Darüber hinaus wurden auch Daten in die Auswertung mit einbezogen, die aus der Zeit vor dem eigentlichen Untersuchungsbeginn zur Verfügung standen.

### **2.2.1 Erfassung der Qualität der Betriebsstoffe**

Grundlage für die Bewertung des Betriebsverhaltens und der Emissionen ist die regelmäßige Dokumentation der Kraftstoffqualität hinsichtlich relevanter Kenngrößen. Da sich die Wechselwirkung zwischen Pflanzenölqualität und Motoröl als besonders relevant herausgestellt hat, wurden zusätzlich auch regelmäßig Motorölproben genommen und (zum Teil) analysiert, um bei eventuellen Schadensfällen, Rückschlüsse auf die Schadensursache ziehen zu können.

#### **Probenahme**

Die Art und Durchführung der Probenahme beeinflusst entscheidend die Repräsentativität der gezogenen Ölproben und somit auch die Qualität der Analyseergebnisse sowie der darauf beruhenden Aussagen. Deshalb ist es notwendig einer sorgfältigen Probenahme und -aufbewahrung einen hohen Stellenwert beizumessen. Dies gilt sowohl für Kraftstoff- als auch für Motorölproben.

Die Kraftstoffprobenahme erfolgte in Anlehnung an die Vorgehensweise bei der Probenahme von Mineralölen gemäß den Normen DIN 51 750 Teil 1 und DIN 51 750 Teil 2. In dem Forschungsvorhaben „Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW“ wurden diese Vorschriften auf ihre Anwendbarkeit bei Pflanzenölen überprüft und angepasst [7]. Die Entnahme von Motorölproben erfolgte, sofern möglich, bei betriebswarmen Motor, etwa 5 bis 10 Minuten nach dem Abstellen des Motors. Die Art der Probenahme richtete sich nach den örtlichen Gegebenheiten und erfolgte aus der Ölwanne entweder mittels

einer Handsaugpumpe durch die Peilstaböffnung oder durch Auffangen im Probehgefäß beim Ablassen des Öls aus der Ölwanne.

Neben den Proben für die Analyse wurden auch Rückstellproben gezogen, um gegebenenfalls Zweitanalysen machen zu können. Für eine Vollanalyse nach dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff wird mindestens 1 l benötigt. Die entnommenen Motorölproben weisen ein Volumen von mindestens 100 ml auf. Die Kraftstoff- und Motorölproben wurden mit dem in Anhang 1 angefügten Probenahmezettel gekennzeichnet und entsprechend beschriftet. Neben den darauf vermerkten Informationen wurde zusätzlich auch der Betriebsstundenzählerstand des Aggregats notiert.

Kraftstoffproben wurden, sofern möglich, bei neuen Kraftstofflieferungen, bei den Emissionsmessungen und wenn Auffälligkeiten beim Betrieb beobachtet wurden genommen. Als Probehgefäße für Pflanzenöl dienten Kunststoffbeutel oder Kunststoffflaschen aus Polyethylen (PE) mit 1-2 l Fassungsvermögen, für Motorölproben wurden Glasflaschen, z.T. auch PE-Flaschen von 100-200 ml Inhalt verwendet. Nach der Abfüllung wurden die Flaschen luftdicht verschlossen und dunkel bei einer geregelten Umgebungstemperatur von konstant 5 °C aufbewahrt.

### **Analysen**

Die Ölanalysen wurden von der Firma Analytik-Service-Gesellschaft (ASG) in Augsburg, einem akkreditierten Prüflabor für Pflanzenölkraftstoffe, durchgeführt. Die erfassten Kennwerte und Prüfmethode richten sich nach dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff, RK-Qualitätsstandard 05/2000 (Abbildung 3). Neben den variablen Eigenschaften wurden auch stichprobenartig die für Rapsöl charakteristischen Kenngrößen überprüft.





 	<b>LTV-Arbeitskreis Dezentrale Pflanzenölgewinnung, Weihenstephan</b>		in Zusammenarbeit mit:	
	<b>Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard)</b> 05/2000		 	
Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
<b>für Rapsöl charakteristische Eigenschaften</b>				
Dichte (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 22719
Heizwert	kJ/kg	35000		DIN 51900-3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm <sup>2</sup> /s		38	DIN EN ISO 3104
Kälteverhalten				Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen werden erarbeitet)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)				Prüfverfahren wird evaluiert
Koksrückstand	Masse-%		0,40	DIN EN ISO 10370
Iodzahl	g/100 g	100	120	DIN 53241-1
Schwefelgehalt	mg/kg		20	ASTM D5453-93
<b>variable Eigenschaften</b>				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		25	DIN EN 12662
Neutralisationszahl	mg KOH/g		2,0	DIN EN ISO 660
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	5,0		ISO 6886
Phosphorgehalt	mg/kg		15	ASTM D3231-99
Aschegehalt	Masse-%		0,01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%		0,075	pr EN ISO 12937

Abbildung 3: Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff [7]

### 2.2.2 Erfassung von Betriebskennwerten

Für die Untersuchung des Betriebsverhaltens ist es erforderlich, wichtige Betriebszustände und technische Kennwerte kontinuierlich zu erfassen. Dazu sind die BHKW mit entsprechender Messtechnik ausgestattet worden. Die Messdaten werden über einen Datalogger aufgenommen und an einen PC weitergegeben. Von einem Rechner in Weihenstephan aus wurden die Messdaten der externen BHKW etwa einmal täglich per Modem abgefragt. Bei dem BHKW, das in Weihenstephan installiert wurde, kann auf die Messdaten sowohl direkt am Erfassungsrechner als auch über das Netzwerk zugegriffen werden. Neben den kontinuierlich erfassten Größen sollten von den Betreibern alle Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten und sonstige Vorkommnisse, wie Kraftstofflieferungen, Störungen etc. in ein Logbuch eingetragen und möglichst umgehend nach Weihenstephan gemeldet werden.

#### Messstellen

Zur Überwachung und Ermittlung anlagenspezifischer Betriebsdaten wurden die in den nachfolgenden Schaubildern (Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6) aufgezeigten Messstellen in die BHKW eingebaut und mit Messfühlern ausgestattet.

#### Temperaturmessstellen

Die Öltemperatur im Tagestank (T1) soll die Lagerungsbedingungen des Kraftstoffs dokumentieren. Beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan werden zwei Edelstahltanks wechselweise zur Kraftstoffversorgung eingesetzt. Hier erfolgt die Temperaturmessung in der Kraftstoffzuleitung unmittelbar nach dem Tank. Nahe dem Kraftstofffilter befindet sich eine weitere Temperaturmessstelle (T2), um ggf. kritische Temperaturen für die Pumpfähigkeit und Filtergängigkeit des Kraftstoffs zu ermitteln. Die Temperatur des Kraftstoffs bei der Einspritzung (T3) dient dazu, die thermische Belastung des Kraftstoffs im Einspritzsystem zu charakterisieren, die sich insbesondere im Zweistrangsystem bei der Rückführung des Lecköls von den Einspritzdüsen zum Tank ungünstig auf die Ölalterung im Tagestank auswirken kann. Gleichzeitig gibt die Temperatur an den Einspritzdüsen einen Anhaltspunkt für die Viskosität des Pflanzenöls bei der Einspritzung. Da bei dieser Messstelle keine größeren Temperaturschwankungen im laufenden Betrieb zu erwarten sind, wird diese aus messtechnischen Kapazitätsgründen nur in Verbindung mit der Langzeit-Emissionsmessung erfasst.

Dagegen ist die Motoröltemperatur (T6) eine besonders wichtige Betriebsgröße, die dauerhaft erfasst wird und die Einsatzbedingungen des Motorenöls charakterisiert. Daneben können sich verändernde motorische Betriebsbedingungen an der Motoröl-

temperatur abzeichnen und gegebenenfalls Hinweise über die Ursachen von Motorschäden liefern.

Die Ansauglufttemperatur (T8) und die Umgebungslufttemperatur (T12) beschreiben die Umgebungsbedingungen am BHKW. In Weißenburg und Greußenheim wird als Umgebungstemperatur die Temperatur im Innern der Schallschutzkabine erfasst. Beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan wird die Umgebungstemperatur außerhalb der Schallschutzkabine ermittelt, da bereits die Ansauglufttemperatur (T8) die Bedingungen in der unmittelbaren Umgebung des Aggregats kennzeichnet.

Eine wichtige Zeigergröße für die Güte der Verbrennung stellt die Abgastemperatur im Krümmer unmittelbar nach dem Zylinder (T9) dar. Aus der Temperaturänderung des Abgases können Abweichungen vom typischen Motorbetrieb erkannt werden. Sie dient deshalb zur Überwachung der Betriebssicherheit. Darüber hinaus können Veränderungen bei der Zusammensetzung der Emissionen besser bewertet werden. Mithilfe der Abgastemperaturen vor und nach dem Abgaswärmetauscher (T10 und T11) können Aussagen über den Wirkungsgrad sowie dessen Veränderung über einen längeren Betriebszeitraum gemacht werden. Die Erfassung der Abgastemperatur im Kamin (T13) findet nur bei den Emissionsmessungen statt und dient bei Veränderungen im Emissionsbild zur Ermittlung von Ursachen.

Die Temperaturen des Kühl- und Heizwassers (T15-T17) vor und nach den Wärmetauschern dienen zur Bestimmung der thermischen Leistung der BHKW.

Beim BHKW in Weißenburg werden darüber hinaus die Temperatur des Kraftstoffrücklaufs (T4) und des Motoröl/Kraftstoffgemisches (T5) erfasst. Diese Messstellen und die Temperatur des frischen Motorenöls (T7) im Vorratsbehälter dienen zur Überwachung des dort integrierten Systems zur kontinuierlichen Motorenölauffrischung (Plantotronic®).

Mithilfe der beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan erfassten Heizwassertemperatur vor dem Lüfter (T14), der bei zu hoher Rücklaufemperatur als Notkühler betrieben wird, kann die effektiv genutzte Wärme berechnet werden.

### Druckmessstellen

Anhand der Veränderung des Kraftstoffdrucks am Kraftstofffilter (p1, p2) kann der Verlauf einer Filterbeladung bis zur Filterverstopfung dargestellt werden.

Durch eine Veränderung des Abgasdrucks (p5-p7) können Ablagerungen von Ruß im nachgeschalteten Abgasstrang (Oxidationskatalysator, Abgaswärmetauscher, Schall-

dämpfer) angezeigt werden. Bei steigendem Abgasgegendruck nach dem Zylinder erhöht sich einerseits die Belastung des Motors, andererseits ist mit einer Veränderung im Emissionsbild zu rechnen.

In Weißenburg werden in Zusammenhang mit dem Plantotronic<sup>®</sup>-System zusätzlich die Drücke vor und nach dem externen Gebrauchtölfilter erfasst (p3 und p4).

### Volumenströme

Der Kraftstoffvolumenstrom ( $V_1$ ) entspricht dem volumenbezogenen Kraftstoffverbrauch und ist unter anderem eine wichtige Messgröße zur Ermittlung von Wirkungsgraden und Betriebsmittelkosten. Die Volumenstromzähler befinden sich zwischen Tagestank und der Rücklaufzuführung und erfassen nur die tatsächlich entnommene Kraftstoffmenge.

Der Volumenstrom ( $V_2$ ) des aus der Ölwanne abgezogenen gebrauchten Motorenöls wird nur bei der kontinuierlichen Ölauffrischung in Weißenburg erfasst.

Zur Berechnung der abgegebenen nutzbaren Wärmemenge wird der Volumenstrom des Heizwassers ( $V_3$ ) mit einer Wasseruhr diskontinuierlich ermittelt.

### Elektrische Leistung/Arbeit

Die nutzbare elektrische Leistung des Generators ( $P_{el}$ ) wird beim BHKW in Greußenheim aus dem Schaltschrank über eine serielle Schnittstelle ausgelesen und in das Datenerfassungsprogramm übertragen. Beim BHKW in Weißenburg wurde ein Zähler zur Erfassung der elektrischen Arbeit ( $W_{el}$ ) eingebaut, da dort nicht auf eine vorhandene Leistungserfassung zugegriffen werden konnte. Die elektrische Leistung des BHKW der Landtechnik wird von der Anzeige am Schaltschrank abgelesen und durch den Stand des Einspeisestromzählers kontrolliert.

Die eingesetzten Temperaturfühler, Drucksensoren, Volumenstrommessgeräte, und des Arbeitszählers sind in Anhang 2 zusammengestellt.

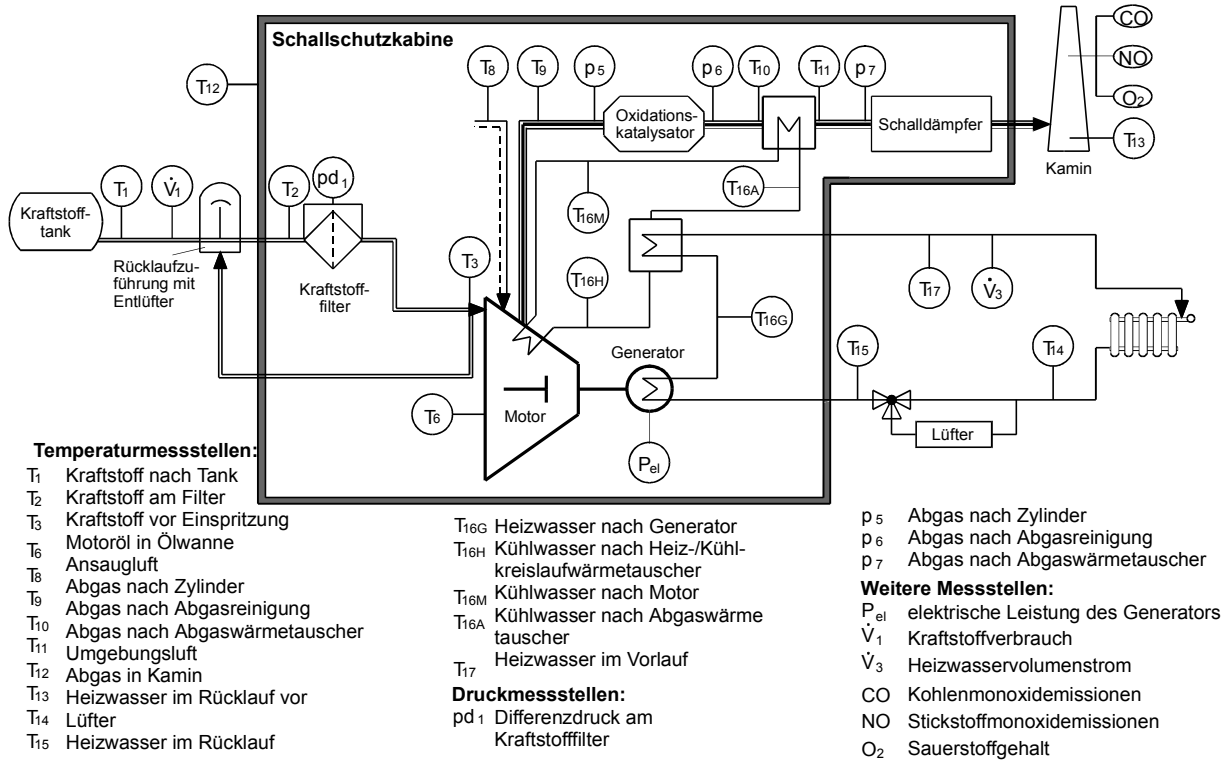


Abbildung 4: Messstellenschema BHKW Landtechnik Weihenstephan

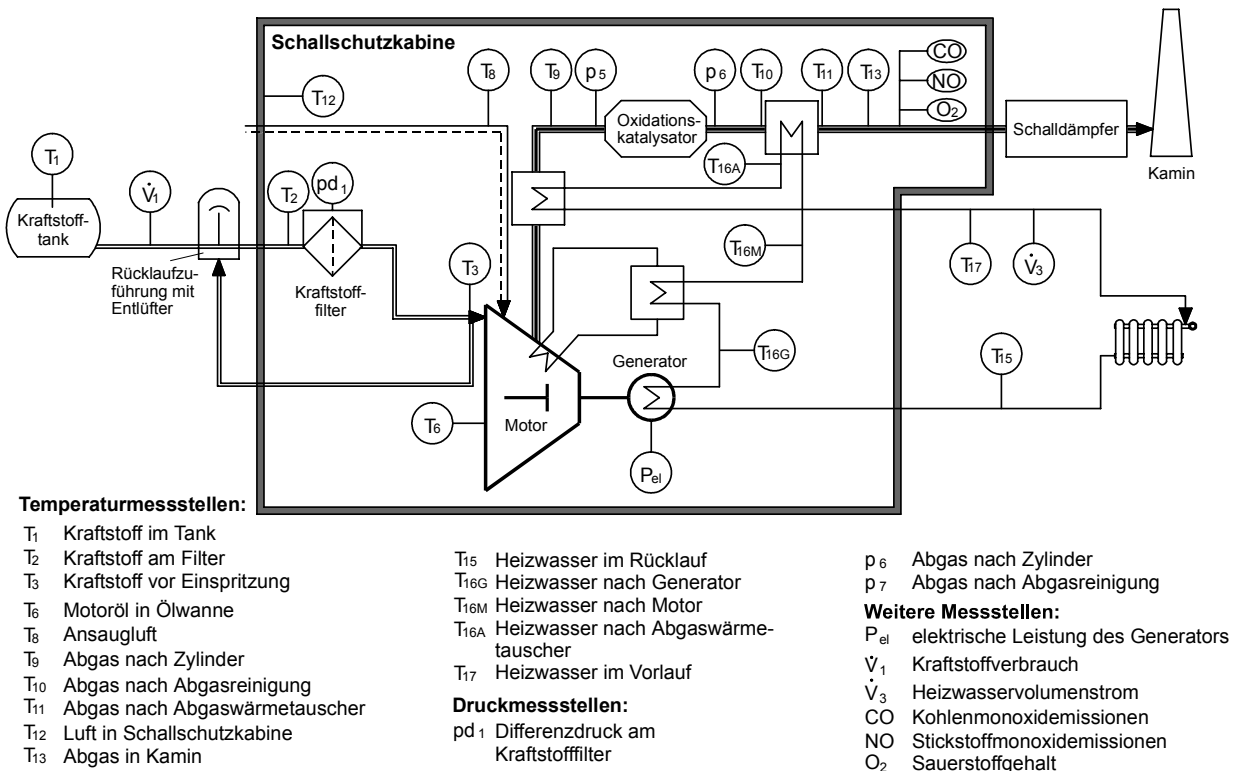


Abbildung 5: Messstellenschema BHKW Greußenheim



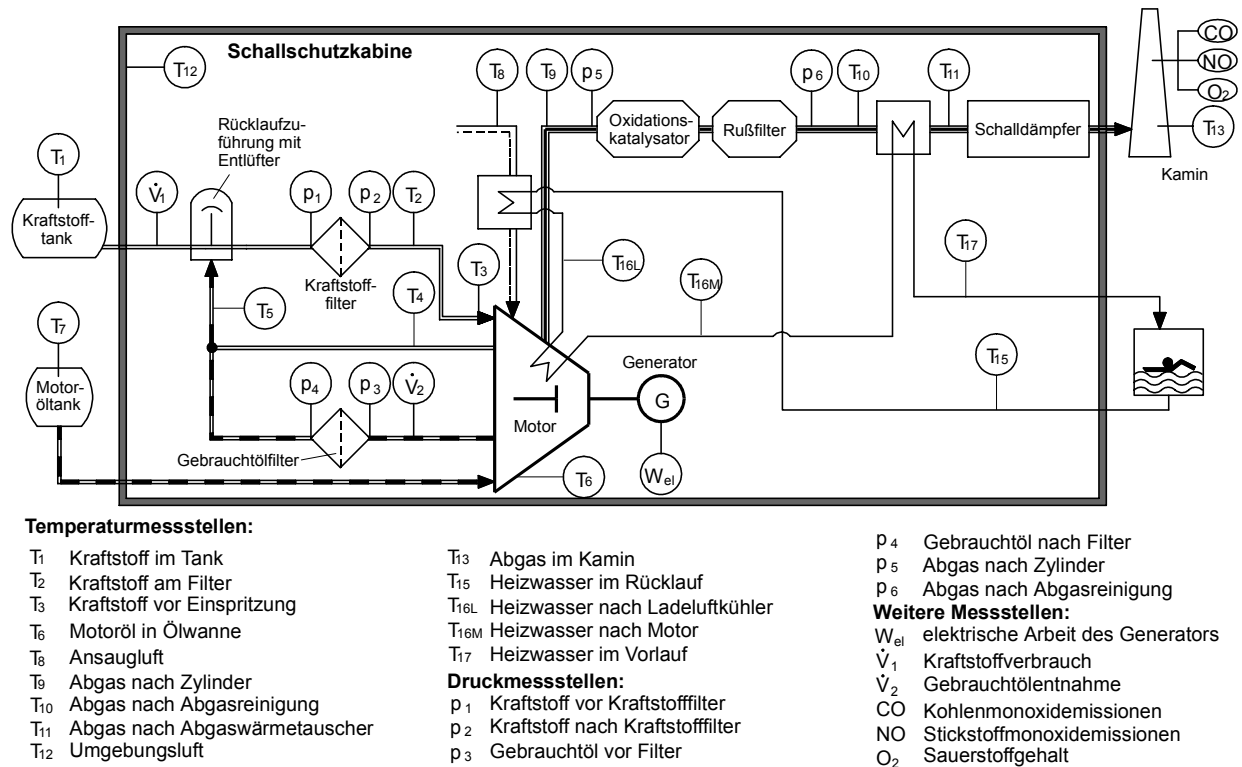


Abbildung 6: Messstellenschema BHKW Weißenburg

## Datenerfassung

Zur Messdatenerfassung werden Datalogger des Typs Hydra 2625 A der Firma FLUKE mit 21 Analogeingängen, 12 digitalen Ein-/Ausgängen und Alarmausgängen sowie einem Zählkanal verwendet. An jedem BHKW ist ein Datalogger dauerhaft zur kontinuierlichen Betriebsdatenerfassung installiert. Zusätzlich dient ein Datalogger bei den Langzeit-Emissionsmessungen zur Aufnahme der Emissionswerte und ausgewählter Betriebsdaten, die in Verbindung mit den Emissionen relevant sind bzw. nur stichprobenartig überprüft werden sollen. Die digitalen Zählgrößen werden über eine spezielle Schaltung entprellt und mithilfe einer DIO-Karte Meilhaus ME-14 vom PC erfasst (Anhang 3).

An die Schnittstelle RS 232 des Erfassungsrechners ist eine Switchbox CSD Softswitch SS 86 zur Ansteuerung weiterer 4 Schnittstellen angeschlossen, wodurch wahlweise auf einzelne oder nacheinander auf alle 4 Kanäle zugegriffen werden kann. Über eine zweite serielle Schnittstelle RS 232 des PC können die Daten über ein Modem und eine analoge TAE-Telefondose (NFN) mithilfe des Programms pcANYWHERE an die Bayerische Landesanstalt für Landtechnik nach Weißenstephan

übertragen werden. Ebenso ist eine Bildschirmanzeige und die Bedienung des Erfassungsrechners über die Arbeitsplatzrechner der Landtechnik Weihenstephan möglich.

Das Programm zur Aufzeichnung der Messgrößen wurde speziell für das Untersuchungsvorhaben programmiert. Zur Datenerfassung dient das Programm BHKW <Versionsnummer> (© B. Widmann 1999). Das Zeitintervall für die Mittelwertbildung kann frei gewählt werden, wird aber im laufenden Betrieb einheitlich auf 60 s eingestellt. In Anhang 4 sind die einzelnen Programmschritte in einem Flussdiagramm dargestellt.

### **2.2.3 Dokumentation von Wartung, Reparatur und Störungen**

Für die Dokumentation von Betriebszeiten, Wartung und Reparaturen wurden Formblätter ausgearbeitet (Anhang 5). Die Betreiber und das Wartungspersonal wurden bei einer Einweisung angehalten, regelmäßig Eintragungen zu machen. Zusätzlich zu diesem „Logbuch“ dienten auch Lieferscheine, Rechnungen von Wartungsarbeiten und Betriebsmitteleinkäufen sowie Gespräche mit Betreibern und Anlagenherstellern zur Datenerhebung.

## 2.3 Bestimmung des Emissionsverhaltens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zur Erfassung des Emissionsverhaltens der betreuten Anlagen in Weißenburg drei in Greußenheim vier und in Weihestephan sechs wiederkehrende Messungen der Abgaskomponenten Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Gesamt-Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) und Partikelmasse zusammen mit den notwendigen Nebengrößen (Temperaturen, Abgasvolumenstrom etc.) durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wird das Emissionsniveau von verschiedenen Pflanzenöl-BHKW im Praxisbetrieb hinsichtlich der wichtigsten Abgaskomponenten gezeigt.

Da BHKW-Aggregate nicht immer mit Nennlast betrieben werden, wurden bei den Anlagen in Greußenheim und Weihestephan, wo eine Leistungsregelung per Hand möglich war, Abgasemissionen bei Teillastbetrieb erfasst. Darüber hinaus wurden auch Start- und Warmlaufphasen der Motoren hinsichtlich der Abgaszusammensetzung untersucht. Bei dem modular aufgebauten BHKW in Weißenburg konnte eine Vergleichsmessung zwischen den beiden Aggregaten stattfinden. Zusätzlich wurde bei der Anlage in Weißenburg, die über einen Rußfilter verfügt, Emissionsmessungen mit und ohne Rußfilter durchgeführt, um den Partikelabscheidegrad bestimmen zu können. Dabei wurden auch die beim Abbrennen des Rußfilters (Regenerierung) entstehenden Emissionen erfasst. Zur Überprüfung der Umsetzrate von Oxidationskatalysatoren wurden beim BHKW der Landtechnik außerdem Vergleichsmessungen vor und nach dem Oxidationskatalysator durchgeführt.

Um eine mögliche Auswirkung von ausgewählten Kraftstoffkenngrößen auf die Emissionen unter Praxisbedingungen zu erkennen, wurde in einem Fall gezielt Pflanzenöl mit hoher Gesamtverschmutzung in einem anderen Fall vorgealtertes Pflanzenöl eingesetzt. Aufgrund der notwendigen Umbaumaßnahmen war dies nur bei dem BHKW der Landtechnik Weihestephan möglich.

Zusätzlich zu den oben genannten Abgaskomponenten wurden am BHKW in Weihestephan exemplarisch auch Aldehydemissionen gemessen. Zu den Aldehyden zählen sowohl gesundheitsschädliche als auch geruchsintensive Verbindungen, wodurch ihnen eine besondere Bedeutung hinsichtlich der Luftreinhaltung zukommt. Ermittelt wurden die C1-C4 Aldehyde Formaldehyd, Acetaldehyd, Propionaldehyd, Acrolein und Butyraldehyd sowohl vor als auch nach dem Oxidationskatalysator. Die Probenahme und Analyse erfolgte durch den TÜV Süddeutschland.

Neben den wiederkehrenden Einzelmessungen wurden bei jedem BHKW eine Dauermessung der Kenngrößen  $O_2$ , CO und NO kontinuierlich über einen ca. 3-4wöchigen Zeitraum durchgeführt, um Trends im Emissionsverhalten genauer erfassen zu können.

### 2.3.1 Wiederkehrende Messungen

#### Messgeräte und Messverfahren

Die Messungen wurden mit der mobilen Emissionsmessausrüstung der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt (Abbildung 7). Die damit erfassten Messgrößen sind:

- $CO_2$ , CO,  $C_nH_m$ ,  $NO_x/NO$
- Staub
- Abgastemperatur und Druck im Abgasrohr
- Luftdruck

Die Bestimmung der Abgaszusammensetzung erfolgt durch die Entnahme repräsentativer Teilgasströme aus dem Hauptgasvolumenstrom im Abgasrohr (Teilstrommethode).

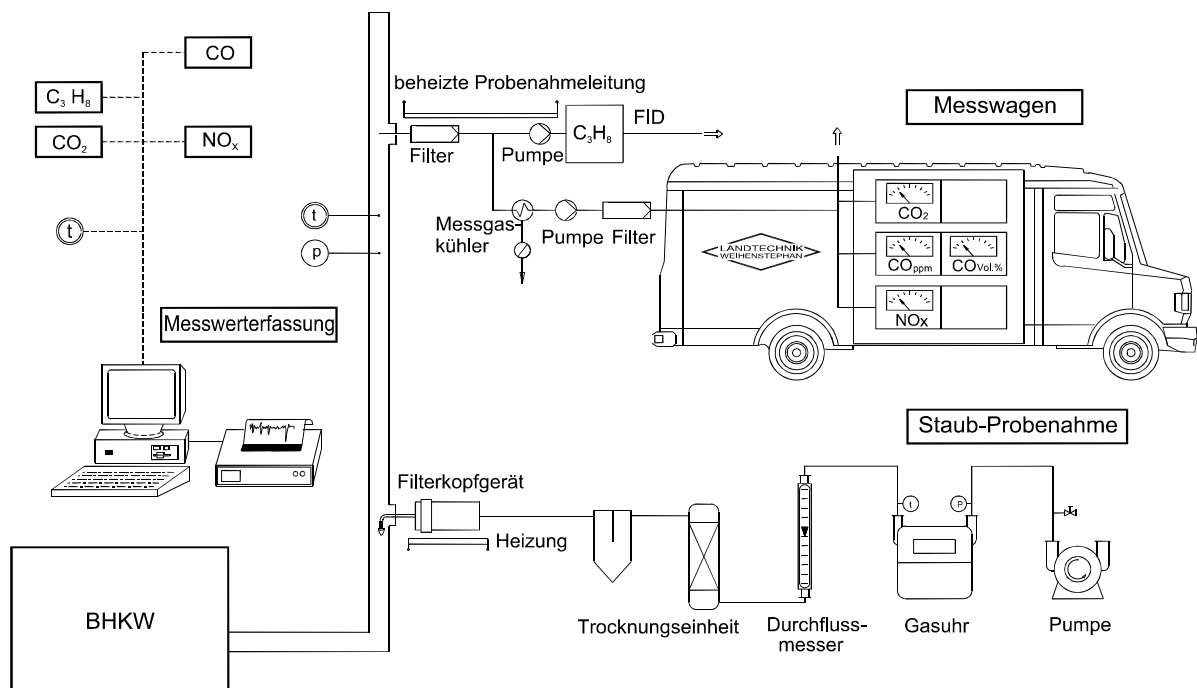


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Geräteaufbaus für die wiederkehrenden Emissionsmessungen

Die Abgasmessstellen wurden für die Anlagen in Weißenburg und Greußenheim an einem speziell für Emissionsmessungen angefertigten Kaminaufsatz angebracht (Abbildung 8). Dieser wurde für die Dauer der Messungen auf das Kaminende passgenau aufgesteckt. Die Vorlaufstrecke innerhalb des Kaminaufsatzes zur Gasberuhigung beträgt mindestens 1,2 m. Beim BHKW der Landtechnik wurden im Abgaskamin dauerhaft Messstutzen eingebaut. Die Anforderungen an eine Messstrecke gemäß Richtlinie VDI 2066 Bl.1 wurden damit erfüllt.



Abbildung 8: Kaminaufsatz bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen am BHKW in Weißenburg (links) und in Greußenheim (rechts)

Um Kondensationseffekte zu vermeiden, wird die Abgasprobenahme mit einer beheizten Probenahmesonde mit integriertem Partikelfilter und einer beheizten Probenahmeleitung (Beheizung auf ca. 180 °C) durchgeführt. Die Abgasbestandteile  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  und  $\text{NO}_x$  werden dabei während des Versuchs kontinuierlich im Teilgasvolumenstrom analysiert (extraktive Probenahme). Da den Messgeräten für die  $\text{CO}$ -,  $\text{CO}_2$ - und

NO<sub>x</sub>-Analyse trockenes und partikelfreies Abgas zugeführt werden muss, wird das Messgas in einem vorgeschalteten Kühler auf ca. 5 °C abgekühlt und in einem weiteren Partikelfilter nochmals gereinigt. Die Erfassung der C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> erfolgte im heißen und feuchten Abgas. Im Gegensatz zu den gasförmigen Emissionskomponenten wurde der Staubanteil diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme und späterer Analyse im Labor ermittelt. Die hierfür eingesetzten Messverfahren entsprechen standardisierten Verfahren und sind in DIN-Normen und VDI-Richtlinien dokumentiert. Die zur Bestimmung der Abgasbestandteile CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> und NO<sub>x</sub>/NO verwendeten Messgeräte sowie deren Messprinzipien und die bei den Messungen aktiven Messbereiche werden in Tabelle 2 zusammengestellt. Ebenso werden darin auch die zur Kalibrierung der Messgeräte eingesetzten Prüfgase und deren Konzentrationen angegeben. Die Höhe der Prüfgaskonzentration richtet sich nach den zu erwartenden Konzentrationen im Abgas und dem entsprechenden Messbereichsendwert der Messgeräte.

Tabelle 2: Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>1)</sup>
CO <sub>2</sub>	BINOS 1, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 Vol.-%	17 Vol.-% in N <sub>2</sub>
CO	BINOS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-500 ppm	450 ppm in N <sub>2</sub>
	BINOS 1, Fa. Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-2,5 Vol.-%	2,28 Vol.-% in N <sub>2</sub>
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> <sup>3)</sup>	FID 3-100, Fa. J.U.M.	Flammenionisation	0-10 ppm <sup>2)</sup> 0-100 0-1000 0-10000 0-100000	90 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> in N <sub>2</sub>
NO <sub>x</sub> /NO	Modell 951 A, Fa. Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0-10 ppm <sup>2)</sup> 0-25 0-100 0-250 0-1000 0-2500 0-10000	240 ppm NO in N <sub>2</sub>

<sup>1)</sup> relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)

<sup>2)</sup> manuelle Messbereichsumschaltung

<sup>3)</sup> Summe der flüchtigen organ. Verbindungen; Messung im feuchten Abgas gemäß VDI- Richtlinie 3481 Blatt 1

## Durchführung der Messungen

Die Emissionsmessungen an den drei ausgewählten BHKW erfolgten zwischen Juni 1999 und November 2000. Arbeitsschwerpunkt war es, das Emissionsverhalten von Praxisanlagen näher zu untersuchen. Insbesondere in Weißenburg und Greußenheim galt es deshalb die Messungen während des laufenden Betriebs durchzuführen, ohne diesen zu beeinträchtigen.

### Nennlastbetrieb

Um vergleichbare Betriebsverhältnisse an den Anlagen zu gewährleisten, wurde mit den Emissionsmessungen bei Nennlast nach einer Warmlaufphase des BHKW von mindestens einer Stunde begonnen. Während dieser Vorlaufzeit erreichte der Motor weitgehend die im Dauerbetrieb übliche Betriebstemperatur. Die gasförmigen Emissionskomponenten wurden über den gesamten Messtag kontinuierlich ermittelt. Die für die Auswertung der Messungen herangezogenen Halbstundenmittelwerte richteten sich nach der Staubprobenahme und beziehen sich auf das gleiche Zeitintervall.

### Teillastbetrieb

Die Ermittlung der Abgasemissionen bei Teillastbetrieb erfolgte in ausgewählten Fällen bei betriebswarmen Motor. Beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan wurde für den Teillastbetrieb eine Leistung von  $5 \text{ kW}_{\text{el}}$  eingeregelt. Dies entspricht etwa 62,5 % der Nennleistung. Das BHKW in Greußenheim war anfänglich so konfiguriert, dass es bei den ersten drei Emissionsmessungen dauerhaft nur mit einer Leistung von maximal  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben werden konnte, was 66,7 % der Nennleistung entspricht. Die in den Teillastversuchen eingestellten  $21 \text{ kW}_{\text{el}}$  entsprechen deshalb 52,5 % der Dauerleistung oder 35 % der Nennleistung. Eine Höherregelung auf Nennleistung ( $60 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) war nur wenige Minuten beizubehalten, weil dann das Aggregat wegen Überschreitung der programmierten zulässigen Abgastemperatur abstellte. Im Sommer 2000 wurde am Aggregat durch Eingriff in die Steuerung die Dauerleistung auf  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  erhöht, so dass die vierte Emissionsmessung mit ca. 83,3 % der Nennleistung stattfand. Während des 4. Messtags in Greußenheim wurde zum Vergleich mit den ersten drei Emissionsmessungen ein Teillastbetrieb bei  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  durchgeführt. Bei dem Aggregat in Weißenburg war kein Teillastbetrieb einstellbar.

### Anfahrt und Abfahrt

Anfahrtsversuche wurden durchgeführt, um die Emissionen in der Startphase, Abfahrtsversuche um die Emissionen beim Abstellen des Aggregats zu erfassen. Anfahrtsversuche fanden sofern möglich bei abgekühltem Motor statt und beinhalten die Abgas-

werte während der ersten halben Stunde beim und nach dem Startvorgang. Beim Abfahrtversuch wurde 2 Minuten vor Ablauf einer halben Stunde das Aggregat von Hand abgestellt und der Halbstundenmittelwert einschließlich der Nachlaufzeit des Aggregats bis hin zum Stillstand des Motors angegeben. Darüber hinaus wurden auch Versuche mit dreimaligen An- und Abstellen des Motors innerhalb von 30 min durchgeführt.

## Datenerfassung

Die kontinuierlich erfassten Messgrößen werden als Analogsignale von einem Datalogger (FLUKE HYDRA 2620A) erfasst und von einem PC zur weiteren Verrechnung und Datenspeicherung über eine serielle Schnittstelle RS 232 aufgenommen. Als Messdatenerfassungssoftware wird das an der Landtechnik Weihenstephan entwickelte Programm PSM 8.0 verwendet. Die Abtastdauer für 19 Kanäle des Dataloggers beträgt während der Messungen ca. 9 s. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wird 60 s gewählt.

### 2.3.2 Kontinuierliche Messungen

Die kontinuierliche Erfassung wichtiger Abgaskomponenten werden mit der Abgas-Messanlage für BHKW der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt. Damit werden die Abgaskomponenten O<sub>2</sub>, CO und NO erfasst. Der Aufbau der Abgas-Messanlage ist in Abbildung 9 dargestellt. Eine Beschreibung der verwendeten Emissionsmesstechnik gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip	Messbereich	Prüfgaskonzentration <sup>*)</sup>
O <sub>2</sub>	OXYNUS 100, Fa. Fisher-Rosemount	Paramagnetismus	0-21 Vol.-%	20,9 Vol.-% Luft-O <sub>2</sub>
CO	URAS 3G, Fa. Hartmann&Braun	Infrarotabsorption	0-0,01 Vol.-%	210 ppm
NO	RADAS 1G, Fa. Hartmann&Braun	UV-Resonanzabsorption	0-4 g/m <sup>3</sup>	2006 ppm

<sup>\*)</sup> relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)



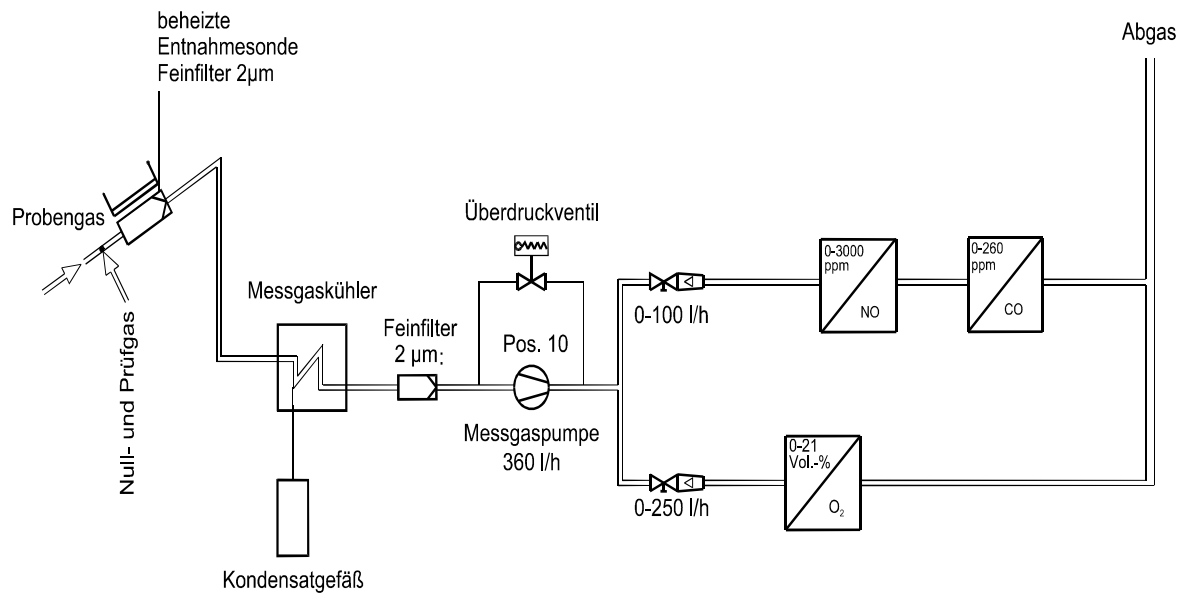


Abbildung 9: Aufbau der Abgas-Messanlage für BHKW

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die untersuchten Anlagen vorgestellt und die Ergebnisse der Ermittlung des Betriebsverhaltens sowie der Bestimmung des Emissionsverhaltens wiedergegeben. Die im Rahmen dieses Projektes erhobenen umfangreichen Messdaten, werden ergänzend zu diesem Bericht in einem Datenband zusammengestellt.

#### 3.1 Gesamtkonzeption

##### 3.1.1 BHKW Weißenburg

Das BHKW in Weißenburg befindet sich im Erdgeschoss eines Betriebsgebäudes des dortigen Freibads, dem Limesbad. Betreiber sind die Stadtwerke Weißenburg GmbH (Abbildung 10). Die Anlage besteht aus zwei baugleichen Modulen von je  $110 \text{ kW}_{el}$  und  $110 \text{ kW}_{th}$ , die zusammen in einem schallschutzgedämmten Raum aufgestellt sind, der innentemperaturabhängig belüftet wird. Die Aggregate werden bei Wärmebedarf der Schwimmbecken wärmegeführt, ansonsten stromgeführt betrieben. Der gewonnene Strom wird primär für die interne Stromversorgung des Freibads genutzt. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Außerhalb der Badesaison wird das BHKW wochentags täglich ein bis zwei Stunden über die Mittagszeit betrieben, um Stromspitzen abzufahren. Das BHKW besitzt zwei Synchrongeneratoren und kann netzunabhängig im Inselbetrieb gefahren werden.

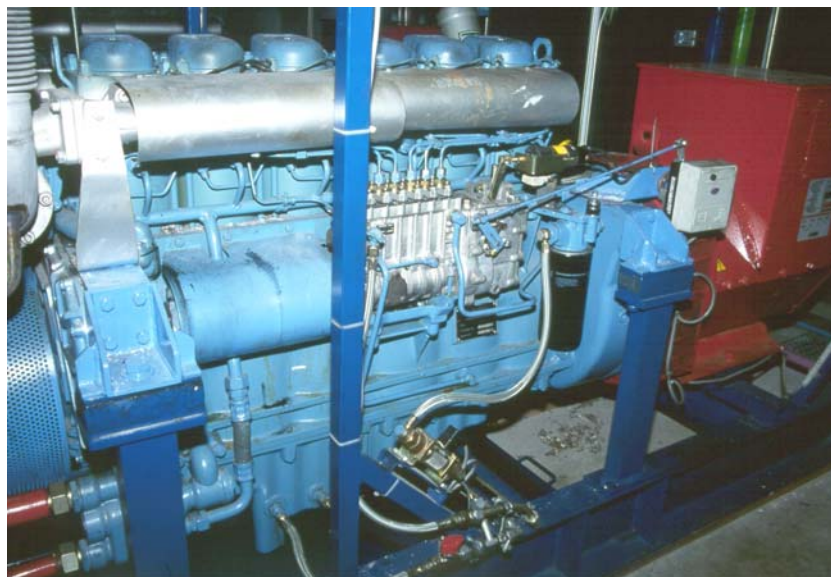


Abbildung 10: Pflanzenöl-BHKW-Aggregat in Weißenburg

Die anfallende thermische Energie von Motorkühlöl, Ladeluft und Abgas wird zum Beheizen der Schwimmbecken des anliegenden Freibades genutzt. In der Badesaison (Mitte Mai bis Mitte September) werden das Sprungbecken (456 m<sup>3</sup>), das Schwimmerbecken (1704 m<sup>3</sup>) und das Erlebnisbecken (542 m<sup>3</sup>) auf 24-25 °C, das Entspannungsbecken (542 m<sup>3</sup>) und das Plantschbecken (52 m<sup>3</sup>) auf 28-30 °C aufgeheizt. Im Winterbetrieb, wenn das Aggregat für die Spitzenstromabdeckung in Betrieb ist, dient das Sprungbeckenwasser (456 m<sup>3</sup>) zum Abführen der anfallenden Wärme. Unterstützt wird das Heizungssystem von einem Solarabsorber mit einer Gesamtfläche von 420 m<sup>2</sup> und einem gasbefeuerter Spitzenlastkessel (Brennwerttechnik) mit 460 kW Leistung. Das Warmwasser für die Duschen wird mit externen Gasthermen bereitet.

Der Rapsölkraftstoff wird von einer nahegelegenen Ölmühle bezogen. Die Ölmühle „Genossenschaft Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe e.G.“ in 91710 Gunzenhausen gewinnt den Rapsölkraftstoff im Kaltpress-Verfahren mit einer Ölprelle des Typs Reinartz AP 14/30. Die Reinigung erfolgt mit einem Ama-Niagara Filter. Der Hersteller garantiert dafür, dass das Rapsöl den RK-Qualitätsstandard erfüllt. Der Rapsölkraftstoff wird mit einem Tanklastzug über eine Strecke von ca. 30 km (einfach) frei Haus zu einem Preis von 0,90 DM/l zzgl. MwSt. (Stand 07/2000) geliefert.

Die Lagerung erfolgt in einem unterirdischen Stahltank mit einem Inhalt von 25 000 l lichtgeschützt bei einer Temperatur von ca. 10 °C. Die Lagerzeit beträgt durchschnittlich etwa 200 Tage. Durch eine Zahnradpumpe, Stahlleitungen und zwei parallel geschaltete Kraftstoffvorfilter wird der Rapsölkraftstoff in den etwa 600 l fassenden, liegend aufgestellten zylinderförmigen Tagestank geleitet, der sich im Keller des Maschinenraums des Freibads befindet. Die mittlere Verweilzeit im Tagestank beträgt ca. 3 bis 9 Tage. Die Kraftstoffzuleitung erfolgt über eine elektrische Kraftstoffförderpumpe und Stahlleitungen aus dem Untergeschoß zu den darüberliegenden, ebenerdig aufgestellten Aggregaten. Die Förderhöhe beträgt etwa 3 m. Das Pflanzenöl wird durch die Ölwanne geleitet und darin erwärmt. Zusätzlich erfolgt eine elektrische Kraftstoffvorwärmung, bevor der Kraftstoff über die Kraftstofffilterpatrone und Reiheneinspritzpumpe die Einspritzdüsen erreicht. Der überschüssige (erwärmte) Kraftstoff gelangt durch die Leckkraftstoffleitung wieder zurück in den Tagestank.

Die Verbrennungsluft wird nach dem Luftfilter im Abgasturbolader vorverdichtet und im Ladeluftkühler gekühlt. Die Abwärme wird über einen Wärmetauscher an das Heizwasser abgegeben. Der Abgasturbolader wird durch den Abgasstrom angetrieben.

Das Abgas passiert dann den Oxidationskatalysator, den Rußfilter und den Abgaswärmetauscher, bevor es über die Edelstahl-Kaminanlage durch das Dach ins Freie gelangt.

Das Verbrennungsverfahren des direkt einspritzenden „Öko-Vielstoff-Motors“ der Firma DMS (heute AMS, Antriebs- und Maschinentechnik, Schönebeck) basiert auf dem von Ludwig Elsbett entwickelten Duothermverfahren. Dabei wird der Kraftstoff durch zwei gegenüberliegende Einlochdüsen tangential in eine im Kolben befindliche halbkugelförmige Brennmulde eingespritzt. Die entstehenden Rotationskräfte sorgen dafür, dass die kältere schwerere Luft am Außenbereich des Gemischwirbels ein zum Kolben hin isolierendes Luftpolster bildet. Im Innern entsteht durch die sich dort sammelnde leichtere heiße Luft eine zentrale heiße Brennzone [2].

Der Motor ist mit einer Ölkühlanlage ausgestattet. Die Wärme wird über einen Plattenwärmetauscher an das Heizwasser übertragen. Das benötigte Öl für Kühlung und Schmierung wird aus der Ölwanne entnommen. Zusätzlich zum Motorölfilter besitzt das Aggregat einen Nebenstromölfilter. Eine automatische Ölnachfülleinrichtung mit Niveauregulierung sorgt für einen ausreichenden Motorölstand in der Ölwanne. Das frische Motoröl gelangt dabei aus einem hoch im Raum angebrachten Vorratstank über Stahlleitungen durch die Schwerkraft in die Ölwanne. Bei einem Ölwechsel wird das Gebrauchtöl über eine Handpumpe aus der Ölwanne abgezogen.

Der Öko-Vielstoffmotor kann auch mit Dieselkraftstoff betrieben werden. Dazu muss jedoch der Förderbeginn der Einspritzpumpe entsprechend angepasst werden.

Seit Juni 1999 wird das Aggregat 2, das auch Hauptgegenstand der Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens ist, im Rahmen eines anderen Vorhabens mit einem System zur kontinuierlichen Motorölauffrischung (Plantotronic®) betrieben. Dabei wird, um den Einsatz von Motoröl auf Pflanzenölbasis im Verbrennungsmotor zu ermöglichen, ein neuartiges Schmierungskonzept speziell für Dieselmotoren entwickelt. Die unbefriedigende Alterungsbeständigkeit des Schmierstoffs wird bei Vermeidung hoher Additivzugaben durch die kontinuierliche Auffrischung und den Einsatz hochwirksamer Antioxidantien ausgeglichen. Das bei der Auffrischung anfallende Gebrauchtöl wird bei diesem sogenannten Plantotronic®-Verfahren der Firma Fuchs Petrolub AG Mannheim dem Kraftstoff zugemischt und mitverbrannt. Das Gebrauchtöl wird proportional zum Kraftstoffverbrauch aus der Ölwanne abgezogen und direkt in die Kraftstoffleitung gegeben. Für das Motorenöl Plantopur auf Rapsölbasis ist eine Auffrischrate von ca. 2 % vorgesehen. Das Konzept kann unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden, nämlich als:

- kontinuierliche Ölauffrischung, die den Einsatz eines pflanzenölbasierenden Motoröls erlaubt
- automatisierten Ölwechsel, ohne Anfall von Altöl [5]

Der Gesichtspunkt eines automatisierten, kontinuierlichen Ölwechsels gewinnt bei Blockheizkraftwerken an Bedeutung, da bei Aggregaten mit hoher Auslastung häufige Motorölwechsel (ca. alle 2-3 Wochen) erforderlich sind.

Zu Prüfen wäre hierbei, ob bzw. inwieweit sich durch die Mitverbrennung des gebrauchten Motorschmieröls eine Änderung der Abgasemissionen (evtl. höhere Staubemissionen) ergeben.

Bei der Umstellung auf das Plantotronic®-Schmiersystem im Juni 1999 wurden auch bauliche Veränderungen an Aggregat 2 vorgenommen. So wurden zusätzlich eine Kraftstoffzuleitung und eine Kraftstoffförderpumpe angebracht. Die ehemalige Kraftstoffführung wurde stillgelegt. Die Leckölleitung wurde mithilfe einer Rücklaufzuführung mit Entlüfter und Filtereinsatz an die Ansaugleitung angeschlossen (Einstrangverfahren).

### 3.1.2 BHKW Greußenheim

Die wärmegeführte Anlage in Greußenheim versorgt derzeit etwa 33 Wohnhäuser im umliegenden Neubaugebiet über ein Nahwärmenetz mit Heizwärme (Abbildung 11). Der erzeugte Strom wird komplett in das Netz des übergeordneten Energieversorgungsunternehmens, des Überlandwerkes Unterfranken (ÜWU), eingespeist und fließt größtenteils ins örtliche Netz. Das Aggregat wird von einer während der Laufzeit zwangsbelüfteten Schallschutzkabine umgeben und ist in einem eigens dafür erstellten Gebäude untergebracht. Darin befindet sich auch der heizölbetriebene Spitzenlastkessel mit einer Leistung von 510 kW und ein Pufferspeicher von 2x 4000 l Inhalt. Zusätzlich befinden sich etwa 3500 l Heizwasser in der Ringleitung des Nahwärmenetzes und ca. 150 l in jedem angeschlossenen Haus. Bei einer Rücklauftemperatur von 65 °C schaltet sich das Aggregat solange zu, bis eine Rücklauftemperatur von 75 °C erreicht wird. Bis einschließlich September 2000 wurde das BHKW mit 40 kW<sub>el</sub> (entspricht ca. 67 % der Nennlast) betrieben. Aufgrund des gestiegenen Wärmebedarfs erfolgt der Betrieb des Aggregats seither mit 50 kW<sub>el</sub> (83 % der Nennlast).



Abbildung 11: Gebäude des BHKW Greußenheim bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen mit Messbus

Der Rapsölkraftstoff wird von der „Ölfruchtmühle Oberes Werntal“ in 97440 Werneck bezogen. Dort wird das Rapsöl im Kaltpress-Verfahren mit einer Reinartz AP 12 Öl-  
presse hergestellt. Über Filtration mit einer Kammerfilterpresse wird der Kraftstoff gereinigt. Die Ölmühle garantiert die Einhaltung des Qualitätsstandards für Rapsöl als Kraftstoff.

Die Lagerung des Rapsölkraftstoffes erfolgt in einem 50 000 l fassenden Erdtank. Von dort wird der Kraftstoff in das Gebäude, wo sich das BHKW befindet, gepumpt und in einem Tagestank mit einem Fassungsvermögen von ca. 100 l zwischengelagert. Eine integrierte elektrische Tankheizung erwärmt das Rapsöl dauerhaft auf ca. 30-35 °C. Der quaderförmige Tagestank enthält zusätzlich eine Kammer zur Lagerung des frischen Motorenöls.

Der Kraftstoff wird über ein Kupferrohr etwa 10 cm über dem Boden aus dem Tages-  
tank angesaugt. Als Pumpe dient die mechanisch angetriebene Kraftstoffförderpumpe des Motors. Die Gesamtlänge der Kraftstoffzuleitung (Material: Kupfer) zwischen Tagestank und Kraftstoffförderpumpe beträgt ca. 7-8 m, davon verläuft die Leitung über eine Länge von ca. 125 cm im Boden des Raumes. Der Ölpegel des Tagestanks

liegt höher als die Kraftstoffzuführung am Aggregat. Die Kraftstoffpumpe fördert das Pflanzenöl über den Filter zur Einspritzpumpe. Das Rücklauföl gelangt über die Leckölleitung, die parallel zur Ansaugleitung verlegt ist, zurück in den Tagestank.

Die Verbrennungsluft wird außerhalb der Schallschutzkabine aus der Umgebung angesaugt und gelangt über einen Luftfilter und Turbolader in den Motor. Das Abgas wird im Krümmer durch einen Abgaskrümmerwärmetauscher vorgekühlt. Es erreicht dann den Oxidationskatalysator, anschließend den Abgaswärmetauscher mit einem Wendelsystem zur Rußabscheidung und schließlich nach dem Abgasschalldämpfer den Kamin.

Der direkt einspritzende pflanzenöлтаugliche Motor der Firma TMW, Thüringer Motorenwerke (jetzt AAN, Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen) ist wassergekühlt. Die Wärme wird mittels eines Plattenwärmetauschers vom Kühlwasser an das Heizwasser übertragen. Das Aggregat ist mit einer Einrichtung zur automatischen Ölnachfüllung mit Niveauregulierung ausgestattet. Das Motoröl gelangt dabei vom Vorrats-tank, der im Kraftstofftagestank integriert ist durch die Schwerkraft in den Motor. Zum Entfernen des Altöls aus der Ölwanne ist eine Handpumpe am Aggregat angebracht. Das Motoröl wird durch eine elektrische Vorwärmung auch bei Stillstand des Aggregats ständig auf einer Temperatur von ca. 60 °C gehalten.

Der parallel zum öffentlichen Stromnetz betriebene Asynchrongenerator ist wassergekühlt. Die Abwärme wird an das Heizwasser abgegeben.

Im Dezember 1999 wurde im Rahmen des Projektes die Kraftstoffzuleitung vom Zweistrangsystem auf Einstrangsystem umgebaut. Außerdem erfolgte im Sommer 2000 der Anbau eines Dieselvorfilters mit Schauglas vor die Kraftstoffförderpumpe.

### **3.1.3 BHKW Landtechnik Weihenstephan**

An der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein BHKW der Firma VWP mit einer elektrischen Leistung von 8 kW<sub>el</sub> und 15 kW<sub>th</sub> installiert (Abbildung 12). Der gelieferte Strom wird vollständig in das Niederspannungsnetz des TU-Campus Weihenstephan eingespeist. Die eingetauschte Wärme von Generator, Motorkühlwasser und Abgas versorgt eine angrenzende Pultdachhalle mit 2 Prüfständen, 2 Laborräumen, 1 Lackierkabine und 1 Tankraum (insgesamt 6 Heizkörper) mit Heizwärme. Überschüssige Wärme wird über einen Wärmetauscher an den Heizwasserrücklauf des Nachbargebäudes (mehrere Verwaltungs- und Büroräume, Werkstatt und Waschhalle) abgegeben. Übersteigt dennoch



die Temperatur des Rücklaufwassers, die vom BHKW-Hersteller geforderten maximalen 60 °C, z.B. wenn in den Sommermonaten keine Heizwärme benötigt wird, so wird, um den Versuchsbetrieb aufrecht zu erhalten, ein Teilstrom des Rücklaufs über einen Luftheizer, der als Notkühler eingesetzt wird, geführt und die überschüssige Wärme an die Umgebung abgegeben. Der Kraftstoff wird in der Versuchsanlage zur Pflanzenölgewinnung der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in unmittelbarer Nähe des BHKW-Standorts produziert.



Abbildung 12: BHKW der Landtechnik Weihenstephan mit Tagestank (Vordergrund) Abgasrohr und Schaltschrank



Die Kraftstofflagerung erfolgt in zwei Edelstahl tanks mit je ca. 800 l Inhalt, die wechselweise als Vorrattank und als Tagestank dienen. Die Tanks sind für den Transport mit Gabelstaplern geeignet. Nach jedem Entleeren werden die Kraftstoffbehälter gereinigt. Die Lagerung erfolgt in einer Halle bei Temperaturen, die in etwa dem stark gedämpften Temperaturverlauf der Umgebungsluft entsprechen. Die Lagerdauer ist mit maximal ca. 4 Wochen sehr kurz, da das Rapsöl bedarfsorientiert produziert wird. Zur Kraftstoffversorgung des BHKW ist der Tank in der Gebäudehülle (Container) des BHKW aufgestellt, wo Temperaturen zwischen ca. 5 und 30 °C herrschen. Die Kraftstoffentnahme erfolgt zentral am tiefsten Punkt des konischen Tankbodens. Dies wurde bewusst so gemacht, um den schlimmsten Fall abzubilden, nämlich dass die gesamte im Kraftstoff enthaltene Partikelmasse in das Kraftstoffsystem gelangt. Über lebensmitteltaugliche Schläuche gelangt der Kraftstoff über einen Vorfilter und eine Rückführeinrichtung mit Entlüfter und Filtereinsatz zur Elektro-Kraftstoffförderpumpe. Diese fördert das Pflanzenöl über einen Filtereinsatz zur Einspritzpumpe. Das Rücklauföl der Einspritzdüsen und -pumpe wird dem Vorlauf zugeführt (Einstrangverfahren).

Die Verbrennungsluft wird innerhalb der Schallschutzkapsel des BHKW über einen Luftfilter angesaugt. Im Gegensatz zu den Aggregaten in Greußenheim und Weißenburg, verfügt das BHKW in Weißenstephan nicht über einen Abgasturbolader. Ein Ventilator belüftet die Schallschutzkabine während der Motorbetriebs und einer Nachlaufzeit von mehreren Minuten. Das Abgas wird über einen Oxidationskatalysator, einen senkrecht angebrachten selbstreinigenden Abgaswärmetauscher und den Schalldämpfer über einen Edelstahlkamin ins Freie geleitet.

Der wassergekühlte 3-Zylinder Kubota Motor ist von der Firma VWP (Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie) umgerüstet worden. Die Betreuung des Aggregats erfolgt durch die Firma Konrad Weigel Energietechnik. Der Wirbelkammermotor arbeitet nach einem Dreiwirbelverbrennungssystem (TVCS, Three Vortex Combustion System) und liefert ein besonders gut aufbereitetes Luft-Kraftstoffgemisch. Ein interner Kühlwasserkreislauf nimmt die Abwärme von Motor und Abgas auf und gibt sie über einen Plattenwärmetauscher an den Heizwasservorlauf ab.

Bevor an das Heizwasser Wärme des internen Kühlkreislaufs übertragen wird durchströmt es den netzparallelbetriebenen wassergekühlten Asynchrongenerator und nimmt dessen Abwärme auf.

Seit Mai 2000 wird das Aggregat mit dem Schmiersystem Plantotronic® (kontinuierliche Ölauffrischung) betrieben (vgl. 3.1.1).

In Tabelle 4 sind die wichtigsten technischen Daten der 3 BHKW zusammengestellt.

Tabelle 4: Technische Daten der untersuchten BHKW

	<b>BHKW Weißenburg</b>	<b>BHKW Greußenheim</b>	<b>BHKW Landtechnik</b>
Anzahl der Aggregate	2	1	1
elektrische Leistung in kW <sub>el</sub>	2 x 110	60	8
thermische Leistung in kW <sub>th</sub>	2 x 110	90	15
Betriebsbeginn	Mai 1996	Juni 1997	März 1999
Betriebsstunden am 27.07.1999	2690	4759	314
Betriebsstunden am 14.12.2000	3290	10277	5165
Kraftstoffvorratstank	Stahl-Erdtank 25 000 l	Stahl-Erdtank 50 000 l	wie Tagestank
Lagerungsbedingungen	ca. 10 °C, dunkel	ca. 10 °C, dunkel	ca. 5-25 °C, dunkel
übliche Lagerungsdauer	ca. 200 Tage	ca. 200 Tage	ca. 10 Tage
Kraftstoffvorfilter vor Tagestank	Centurion E05 5µm, 2x parallel	--	--
Kraftstofftagestank	Stahlstank (600 l) zylinderförmig, liegend (l=150 cm, d=80 cm)	Stahlstank beheizt (100 l) quaderförmig (h=100 cm, b=30 cm, l=85 cm)	Edelstahlstank (800 l) zylinderförmig mit konischem Boden auf Rollen (h=150 cm, d=100 cm)
Lagerungsbedingungen	ca. 10-28 °C, dunkel	ca. 30-35 °C, dunkel	ca. 10-28 °C, dunkel
übliche Verweilzeit	ca. 3-9 Tage	ca. 2 Tage	ca. 10 Tage
Kraftstoff-Ansaugleitung	ca. 10 cm über Tagestank- boden	ca. 10 cm über Tagestank- boden	Auslauf am Tagestankboden
Leitungsführung	Rücklauf in Tagestank; Einstrangverfahren bei Agg.2 seit 6/99	Rücklauf in Tagestank; Einstrangverfahren seit 12/99	Einstrangverfahren
Rücklaufzuführung mit Entlüfter und Vorfilter (Sinterkunststoffeinsatz)	Oventrop "TOC 80"	Oventrop "TOC 80"	Oventrop "TOC 80"
Kraftstoffförderpumpe	Elektro-Zahnradpumpe Suntec AE67C 73631-C 80 l/h; seit 6/99: Elektro- Zahnradpumpe: Wagner NAE 67 (ca. 40 l/h)	Mechanische Pumpe am Aggregat	Elektro-Zahnradpumpe Scherzinger 12500 SK4/M004 (16 l/h)
Kraftstoffleitungen von Tagestank zum Aggregat	Hydraulikleitungen Stahl 15 L (d <sub>a</sub> =15 mm)	Kupferleitungen (d <sub>a</sub> =10 mm)	Flexible Lebensmittelschl. und Hydraulikleitungen
Kraftstoffvorwärmung	Elektr. in Leitung, 40 °C (Müller Coax MK10N014) & Leitung durch Ölwanne	beheizter Tagestank (ca. 35 °C)	nein
Kraftstofffilter Fabrikat/Typ	Mann/Hummel W 962 / 2	Mahle OC 33 & Filtres pur- flux Filtre A HUILE LS 415	Kubota 1663143560 & Nach- bau des Originals (Agroma)
Filterfeinheit	ca. 9 µm	ca. 13 µm	ca. 5 µm
Empfohlene Filterstandzeit	150 Bh	600 Bh	600 Bh
Einspritzpumpe	Reiheneinspritzpumpe L'Orange	Reiheneinspritzpumpe L'Orange	Mini-Pumpe (PFR 3M) Bosch
Einspritzdüsen	Einloch-Zapfendüse	Einloch-Zapfendüse Dresdner Einspritzsysteme 1824400305 entspr. SB 404	Flachsitz-Drosselzapfendüse Nippondenso OPD-Minidüse

## Fortsetzung von Tabelle 4

	<b>BHKW Weißenburg</b>	<b>BHKW Greußenheim</b>	<b>BHKW Landtechnik</b>
Verbrennungsverfahren Motor	DI	DI	IDI (Wirbelkammer)
Typ	DMS MF 6 RTA - LLK 85	TMW 4 P 13,5 A	VWP (Kubota D1703 BG)
Kühlung	ölgekühlt	wassergekühlt	wassergekühlt
Hubraum	11,8 l	5,9 l	1,7 l
Zylinder	6	4	3
eingestellte Nenndrehzahl	1500 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>
Wellenleistung	120 kW	63,8 kW	12,8 kW
Automatische Ölnachfüllung mit Niveauregulierung	ja	ja (ab ca. 12/99 von Hand)	nein
Entnahme Gebrauchtöl	Handpumpe	Handpumpe	Hahn (freier Fall)
Motoröl	Esso (bis Juni 1999) Agg.2: seit Juni 1999 Fuchs: Plantopur 5W-30	H&P WCI SAE 30 vollsyn- thetisch, Fuchs: Plantomot 5W-40 (seit 10/00)	Esso (0-600 Bh); Fuchs Titan Unic MC SAE 10W-40 (600- 3800 Bh); Fuchs: Plantopur 5W-30 (seit 3800 Bh)
Motorölfilter Fabrikat/Typ	Mann W 11 102	- Mahle OC 60 - Mann W962/6	Kubota Nr. 17321.3243.0
Filterfeinheit	12 µm	17 µm	--
Wechselintervalle	300 Bh	300 Bh	300 Bh
Nebenstromölfilter	NTZ G 26	--	--
Filterfeinheit	5µm	--	--
Generator	Synchrongenerator UCI 274 F	Asynchrongenerator WKASYG 250/4-310	Asynchrongenerator
Hersteller	Stamford	Emod	Emod
Kühlung	luftgekühlt	wassergekühlt	wassergekühlt
Nennleistung	110 kW	60 kW	8 kW
Wärmetauscher Kühlwasser	--	Plattenwärmetauscher (Höcker und Partner)	Plattenwärmetauscher
Wärmetauscher Kühlöl	Plattenwärmetauscher	--	--
Wärmetauscher Generator	--	--	--
Wärmetauscher Abgas	Röhrenwärmetauscher	Wendelwärmetauscher (Höcker und Partner)	Wendelwärmetauscher stehend (Weigel)
Wärmetauscher Abgaskrümmer	--	Röhrenwärmetauscher (Höcker und Partner)	--
Wärmetauscher Ladeluftkühler	Typ KKW-LDK 12	--	--
Oxidationskatalysator (Hersteller)	Oxidationskatalysator ORM-10-1-120 KKWFärber/Johnson Matthey	Oxidationskatalysator (Oberland Mangold)	Oxidationskatalysator (Weigel/Mercedes)
Rußfilter	Rußfilter 37113.013-486 KKW Färber	Einfacher Rußabscheider im Abgaswärmetauscher integriert	--
Rußfilterregeneration	Propangaseindüsung ab 45 mbar Druckdifferenz	(kehren von Hand)	--

## 3.2 Betriebsverhalten

### 3.2.1 Qualität der Betriebsstoffe

#### 3.2.1.1 Kraftstoff

Die drei untersuchten Blockheizkraftwerke werden mit kaltgepresstem Rapsöl von drei verschiedenen dezentralen Ölmühlen betrieben. Um bei auftretenden Betriebsstörungen mögliche Ursachen ableiten zu können, aber auch um Abgasemissionen besser beurteilen zu können, ist es erforderlich, dass die eingesetzten Kraftstoffqualitäten bekannt sind. Während des Beobachtungszeitraums wurden eine Vielzahl von Kraftstoffproben gezogen und eingelagert. Ein Teil davon wurde in einem auf Pflanzenölkraftstoffe spezialisiertem AnalySELabor hinsichtlich der wichtigsten Kenngrößen gemäß dem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (Seite 8) untersucht. Bei einigen Proben wurde im Labor der Landtechnik die Gesamtverschmutzung analysiert.

Die Ergebnisse der durchgeführten **Kraftstoffanalysen** sind in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengefasst. Analysenergebnisse von Kraftstoffkenngrößen, die die geforderten Grenzwerte des Qualitätsstandards für Rapsöl als Kraftstoff nicht einhalten, sind fettgedruckt. Kraftstoffproben, die bei Emissionsmessungen genommen wurden sind grau hinterlegt.

Die untersuchten Kraftstoffproben können die geforderten Grenzwerte der für Rapsöl **charakteristischen Eigenschaften** wie Dichte, Flammpunkt, Heizwert, Viskosität, Koksrückstand, Iodzahl und Schwefelgehalt meist erfüllen.

Am wenigsten schwanken die Kenngrößen Dichte und kinematische Viskosität. Bei allen untersuchten Kraftstoffproben waren bei der Dichte nur in zwei Fällen Abweichungen von weniger als 1 % vom häufigsten Wert von  $920 \text{ kg/m}^3$  (Grenzwert:  $900\text{--}930 \text{ kg/m}^3$ ) zu beobachten. Auch die Viskosität zeigte mit Werten zwischen  $34$  und  $37 \text{ mm}^2/\text{s}$  hohe Konstanz und erfüllt durchweg den Grenzwert von maximal  $38 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Bei der Kenngröße Flammpunkt können dagegen drei Proben aus Greußenheim mit Flammpunkten von  $187 \text{ °C}$ ,  $199 \text{ °C}$  und  $216 \text{ °C}$  nicht den geforderten Grenzwert von mindestens  $220 \text{ °C}$  einhalten. Daraufhin eingeleitete Recherchen ergaben, dass am 26.11.99 wenige Liter Heizöl in den Tagestank gefüllt wurden, da kein Pflanzenölkraftstoff mehr vorrätig war. Dies könnte möglicherweise den niedrigeren Flammpunkt von  $187 \text{ °C}$  einer Kraftstoffprobe, die im Februar 2000 allerdings fast 700 Bh später genommen wurde und den mit  $216 \text{ °C}$  ebenfalls noch unter dem Grenzwert gelegenen Flammpunkt einer Probe vom Juli 2000 (nach ca. 3000 Bh) erklären. Es ist bekannt,

dass eine Beimischung von nur ca. 0,5 % Dieselkraftstoff zu Pflanzenöl bereits zu einer Reduzierung des Flammpunkts auf deutlich unter 200 °C führt [7] und auch noch nach längerer Lagerdauer nachgewiesen werden kann. Im Gegensatz dazu wurde bei einer Kraftstoffprobe, die aus der Ansaugleitung des Tagestanks am 8.12.99 also unmittelbar nach dem Tanken mit Heizöl entnommen wurde, ein sehr hoher Flammpunkt von 250 °C bestimmt und durch Rückfrage beim Analyseinstitut bestätigt.

Tabelle 5: Kraftstoffkennwerte BHKW Weißenburg (Werte, die den RK-Qualitätsstandard nicht einhalten, sind fettgedruckt, Kraftstoffanalysen bei Emissionsmessungen sind grau hinterlegt)

Proben-code	Kraftstoffkenngrößen und Prüfverfahren													Ort der Probenahme
	Dichte (15 °C) in kg/m <sup>3</sup> DIN EN ISO 3675	Flammpunkt in °C DIN EN 22719	Heizwert in kJ/g DIN 51900-3	Kin. Viskosität (40 °C) in mm <sup>2</sup> /s DIN EN ISO 3104	lodzahl in g/100 g DIN 53241-1	Schwefelgehalt in mg/kg ASTM D 5453-93	Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662	Kokrückstand in Masse-% DIN EN ISO 10370	Neutralisationszahl in mg KOH/g DIN EN ISO 660	Oxidationsstabilität (110 °C) in h ISO 6886	Phosphorgehalt in mg/kg ASTM D 3231-99	Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245	Wassergehalt in Masse-% pREN ISO 12937	
RK-Qualitätsstandard	900-930	min. 220	min. 35	max. 38	100-120	max. 20	max. 25	max. 0,40	max. 2,0	min. 5,0	max. 15	max. 0,01	max. 0,075	--
RöWB 990623-A1	920	220	39,4	35	118	4	<b>61</b>	0,31	0,9	5,5	<1	<b>0,017</b>	0,049	Tagestank
RöWB 990825-A	--	--	37,4	--	--	3	12	0,26	0,9	6,0	6	0,004	0,058	Tagestank
RöWB 990827-A	920	226	<b>33,1</b>	34	118	3	<b>82</b>	0,34	1,1	6,6	2	0,007	0,061	Tankfahrzeug
RöWB 990831-A	--	--	--	--	--	2	<b>35</b>	0,23	1,0	5,6	10	0,002	0,060	Tagestank
RöWB 990909-A	920	223	39,4	35	114	3	22	0,32	1,0	6,2	<1	<b>0,021</b>	0,059	Tagestank
RöWB 991025-A	--	--	--	--	--	4	<b>28</b>	0,20	1,0	6,5	9	0,006	0,058	Tagestank
RöWB 991220-A	--	--	--	--	--	4	7	0,23	1,0	5,7	9	0,002	0,056	Tagestank
RöWB 000915-A3	--	--	--	--	109	6	<b>54</b>	--	1,6	4,8	<b>23</b>	--	0,079	Erdtank
Rapsöl mit 2 % Motoröl-Beimischung														
RöMöWB 990708-A	920	241	37,5	35	117	20	<b>105</b>	0,32	1,0	<b>3,0</b>	10	0,008	0,049	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 990825-A	--	--	--	--	118	<b>70</b>	<b>143</b>	0,38	1,0	5,1	1	0,006	--	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 990831-A1	--	--	--	--	117	<b>50</b>	<b>127</b>	0,37	1,0	<b>4,9</b>	5	0,001	--	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 990915-A	920	224	39,0	34	112	<b>63</b>	<b>177</b>	0,39	1,0	6,3	10	<b>0,011</b>	0,060	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 991025-A	--	--	--	--	--	<b>60</b>	<b>123</b>	0,12	1,0	5,8	15	0,007	--	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 991220-A	--	--	--	--	--	<b>61</b>	<b>94</b>	0,28	1,0	<b>4,2</b>	<b>16</b>	0,005	--	nach Kraftstofffilter
RöMöWB 001017-A	--	--	--	--	111	<b>54</b>	<b>88</b>	0,40	1,2	5,5	<b>24</b>	0,007	0,051	nach Kraftstofffilter

Tabelle 6: Kraftstoffkennwerte BHKW Greußenheim (Werte, die den RK-Qualitätsstandard nicht einhalten, sind fettgedruckt, Kraftstoffanalysen bei Emissionsmessungen sind grau hinterlegt)

Proben-code	Kraftstoffkenngrößen und Prüfverfahren													Ort der Probenahme
	Dichte (15 °C) in kg/m <sup>3</sup> DIN EN ISO 3675	Flammpunkt in °C DIN EN 22719	Heizwert in kJ/g DIN 51900-3	Kin. Viskosität (40 °C) in mm <sup>2</sup> /s DIN EN ISO 3104	Iodzahl in g/100 g DIN 53241-1	Schwefelgehalt in mg/kg ASTM D 5453-93	Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662	Koksrückstand in Masse-% DIN EN ISO 10370	Neutralisationszahl in mg KOH/g DIN EN ISO 660	Oxidationsstabilität (110 °C) in h ISO 6886	Phosphorgehalt in mg/kg ASTM D 3231-99	Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245	Wassergehalt in Masse-% prEN ISO 12937	
RK-Qualitätsstandard	900-930	min. 220	min. 35	max. 38	100-120	max. 20	max. 25	max. 0,40	max. 2,0	min. 5,0	max. 15	max. 0,01	max. 0,075	--
RöGH 990130	--	--	--	--	109	--	--	--	1,9	5,8	--	--	--	Tankwagen (Probe bei Raumtemp. gelagert)
RöGH 990522	--	--	--	--	<b>123</b>	--	--	--	<b>2,3</b>	<b>3,7</b>	--	--	--	Tankwagen (Probe bei Raumtemp. gelagert)
RöGH 990727-A3	920	228	38,2	35	<b>123</b>	4	<b>171</b>	0,29	<b>2,2</b>	<b>0,6</b>	2	0,003	0,064	Hahn am Tagestankboden
RöGH 990818-R1	920	<b>199</b>	37,9	35	114	3	<b>40</b>	0,30	<b>2,3</b>	<b>&lt;0,2</b>	16	0,050	--	Hahn am Tagestankboden
RöGH 991208-A	920	250	40,2	35	113	2	<b>44</b>	0,14	<b>2,8</b>	<b>0,5</b>	2	0,009	0,059	Ansaugleitung Tagestank
RöGH 000223-R2	--	<b>187</b>	--	--	109	5	23	--	<b>3,0</b>	<b>0,5</b>	30	--	--	nach Kraftstofffilter
RöGH 000420-A	--	--	--	--	--	5	7	--	<b>3,0</b>	<b>0,4</b>	23	--	--	vor Kraftstofffilter
RöGH 000727-A	919	<b>216</b>	37,4	36	107	6	1	0,32	<b>3,1</b>	<b>0,6</b>	1	0,008	0,069	nach Kraftstofffilter
RöGH 001018-A2	--	--	--	--	112	4	4	0,29	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	10	0,006	0,051	nach Kraftstofffilter

Eine Abweichung um etwa 5 % vom geforderten minimalen Heizwert von 35,0 kJ/g weist eine Kraftstoffprobe, die bei einer Betankung in Weißenburg im August 1999 gezogen wurde. Eine Erklärung für diesen geringfügig niedrigeren Heizwert von 33,1 kJ/g konnte auch nicht nach Rücksprache mit dem AnalySELabor gefunden werden.

Der Koksrückstand entspricht ebenfalls bei nahezu allen untersuchten Kraftstoffproben den Anforderungen des Qualitätsstandards. Lediglich sehr stark verschmutztes Rapsöl, das für Emissionsmessungen gezielt mit Partikeln angereichert wurde überschritt den Grenzwert von 0,4 Masse-% deutlich.

Tabelle 7: Kraftstoffkennwerte BHKW Landtechnik Weihenstephan (Werte, die den RK-Qualitätsstandard nicht einhalten, sind fettgedruckt, Kraftstoffanalysen bei Emissionsmessungen sind grau hinterlegt)

Proben-code	Kraftstoffkenngrößen und Prüfverfahren												Ort der Probenahme	
	Dichte (15 °C) in kg/m <sup>3</sup> DIN EN ISO 3675	Flammpunkt in °C DIN EN 22719	Heizwert in kJ/g DIN 51900-3	Kin. Viskosität (40 °C) in mm <sup>2</sup> /s DIN EN ISO 3104	Iodzahl in g/100 g DIN 53241-1	Schwefelgehalt in mg/kg ASTM D 5453-93	Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662	Koksrückstand in Masse-% DIN EN ISO 10370	Neutralisationszahl in mg KOH/g DIN EN ISO 660	Oxidationsstabilität (110 °C) in h ISO 6886	Phosphorgehalt in mg/kg ASTM D 3231-99	Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245		Wassergehalt in Masse-% pEN ISO 12937
RK-Qualitätsstandard	900-930	min. 220	min. 35	max. 38	100-120	max. 20	max. 25	max. 0,40	max. 2,0	min. 5,0	max. 15	max. 0,01	max. 0,075	--
RöLT 990412-A	920	224	38,7	35	117	3	<b>56</b>	0,29	0,7	7,9	3	0,002	0,056	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 990516-A	--	--	--	--	116	1	<b>148</b>	0,28	0,8	7,0	--	0,003	0,060	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 990610-A	920	226	38,1	35	114	4	<b>45</b>	0,27	0,7	6,9	2	0,004	0,059	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 990719-A	920	222	37,6	35	112	2	<b>58</b>	0,33	0,7	6,6	1	<b>0,011</b>	0,060	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991004-A	--	--	--	--	114	8	<b>155</b>	0,34	0,8	6,1	5	<b>0,014</b>	0,066	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991018-A	--	--	--	--	118	3	<b>305</b>	0,33	1,0	7,2	2	0,006	0,054	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991026-A	--	--	--	--	115	2	<b>121</b>	0,32	1,1	7,7	<b>19</b>	0,005	0,068	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991109-A	--	--	--	--	--	--	<b>91</b>	0,31	0,9	<b>4,1</b>	13	--	0,062	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991122-A	--	--	--	--	--	--	<b>200</b>	0,12	0,7	8,4	13	0,008	0,062	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991125-R1	--	--	--	--	--	--	<b>36</b>	0,22	0,7	8,2	13	0,001	0,047	nach Kraftstofffilter
RöLT 991125-A2	920	245	39,7	34	110	2	<b>202</b>	0,20	0,7	8,2	<b>23</b>	0,002	0,069	Tagestank Auslaufhahn
RöLT 991129-A	--	--	--	--	--	--	<b>176</b>	0,15	0,6	8,4	5	0,001	0,058	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 991214-A	--	--	--	--	--	--	<b>52</b>	0,23	0,6	8,6	2	0,003	0,058	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 000913-R	920	225	37,3	35	--	7	<b>139</b>	0,33	1,0	7,8	<b>19</b>	0,004	0,061	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 001020-A	--	--	--	--	105	--	<b>54</b>	--	1,1	6,9	<b>20</b>	--	0,047	Tank in Ölgewinnungsanlage
RöLT 001128-A1	--	--	37,3	--	106	8	<b>423</b>	0,30	1,2	7,0	<b>42</b>	0,009	0,049	nach Kraftstofffilter
RöLT 001205-A1	--	--	--	--	--	--	<b>129</b>	--	1,2	7,1	--	--	--	Kanistertank
Rapsöl mit 2 % Motoröl-Beimischung														
RöMöLT 000713-A	920	225	37,1	35	110	<b>60</b>	<b>215</b>	<b>0,46</b>	1,1	5,9	<b>27</b>	0,009	0,067	nach Kraftstofffilter
RöMöLT 000713-A2	--	--	--	--	--	--	<b>184</b>	0,36	--	--	<b>26</b>	0,009	--	vor Kraftstofffilter
Sonderkraftstoffe (stark verschmutzt bzw. vorgealtert)														
RöLT 000426-A1	920	231	37,6	34	106	6	<b>827</b>	<b>0,44</b>	0,9	5,7	1	<b>0,021</b>	0,067	nach Kraftstofffilter
RöLT 000426-A2	922	227	37,2	37	109	8	<b>5259</b>	<b>0,70</b>	1,6	<b>3,7</b>	<b>59</b>	<b>0,144</b>	<b>0,087</b>	ohne Kraftstofffilter
RöLT 001205-A2	--	--	--	--	--	--	16	--	1,2	<b>3,7</b>	--	--	--	Kanistertank
RöLT 001128-A3	--	--	37,1	--	110	3	<b>36</b>	0,33	1,2	<b>3,4</b>	10	0,002	0,055	nach Kraftstofffilter

In Greußenheim wurden im Mai und Juli 1999 eine leicht erhöhte Iodzahl von 123 g/100g in zwei Kraftstoffproben ermittelt (oberer Grenzwert: 120 g/100g). Als Ursache dafür konnte herausgefunden werden, dass im ersten Halbjahr 1999 Rapsöl aus einer erucasäuerereichen Rapssaat von der Ölmühle geliefert wurde, die naturgemäß eine höhere Iodzahl aufwies.

Der Schwefelgehalt liegt bei den Proben von naturbelassenem Rapsöl mit 1-9 mg/kg meist deutlich unter den geforderten maximalen 20 mg/kg. Lediglich Kraftstoffproben, die etwa 2 % gebrauchtes Motoröl enthalten (bei kontinuierlicher Ölauffrischung mit Plantotronic®-Schmiersystem), weisen Schwefelgehalte von ca. 50-70 mg/kg auf. Dies ist auf schwefelhaltige Additivkomponenten des Motoröls zurückzuführen, die auch rechnerisch zu diesen höheren Schwefelgehalten führen. Ziel sollte es daher sein, die Schwefel-Additivierung von Motoröl, das für die kontinuierlich Ölauffrischung verwendet wird, weiter zu reduzieren um nicht höhere Schwefel- und Staubemissionen bzw. Katalysatorschäden hervorzurufen.

Innerhalb der **variablen Eigenschaften von Rapsöl** sind beim Wassergehalt bei allen vorliegenden Analyseergebnissen nur geringfügige Schwankungen zwischen 0,049 und 0,069 mg/kg zu beobachten. Dies deutet auf gute Lagerungsbedingungen hinsichtlich einer Vermeidung des Eintrags von Wasser hin. Überschreitungen des Grenzwerts von 0,075 Masse-% gab es nur bei einer gezielt mit Schmutzpartikeln angereicherten Rapsölprobe.

Der maximal zulässige Aschegehalt im Öl von 0,01 Masse-% wird von insgesamt 31 der 38 analysierten Proben eingehalten. Ein hoher Aschegehalt im Pflanzenöl deutet in erster Linie auf mineralische Verunreinigungen hin, die bei Transport oder Lagerung eingetragen werden können. Aber auch Pflanzenöl mit einer sehr hohen Gesamtverschmutzung, wie z.B. das gezielt verschmutzte Pflanzenöl (RÖLT000426-A2) liegt mit einem Aschegehalt von 0,14 Masse-% um das 14fache über den geforderten Grenzwert.

Häufigere Grenzwertüberschreitungen als beim Aschegehalt, sind beim Phosphorgehalt zu beobachten. Zwar liegen etwa  $\frac{3}{4}$  der Rapsölproben z.T. deutlich unter den geforderten Höchstwert von 15 mg/kg, aber es wurden auch Phosphorgehalte von bis zu 59 mg/kg in Ölen mit hoher Gesamtverschmutzung ermittelt. Haupteinflussgrößen auf den Phosphorgehalt im Pflanzenöl sind Produktionsparameter, wie z.B. die Temperatur beim Abpressen. Phosphor kann sich nachteilig auf den Verbrennungsvorgang auswirken, ist in motorischen Ablagerungen nachweisbar und gilt als Katalysatorgift. Deshalb sollte der geforderte Grenzwert möglichst eingehalten werden.



Zur Beurteilung des Alterungsgrads von Pflanzenöl dient die Oxidationsstabilität. Für einen sicheren motorischen Betrieb wird ein Kraftstoff mit einer Oxidationsstabilität von mindestens 5 h gefordert. Frisches Rapsöl erreicht eine Oxidationsstabilität von mehr als 8 h. Allerdings beeinträchtigen Lagerdauer und Lagerungsbedingungen die Oxidationsstabilität mitunter erheblich. Deutlich wird dies bei den Kraftstoffproben aus Greußenheim, die aus oder nach dem beheizten Tagestank gezogen wurden, in dem Temperaturen von ca. 30-35 °C vorherrschen. Diese Rapsölproben besitzen eine äußerst niedrige Oxidationsstabilität von weniger als 1 h.

Zur Überprüfung des Einflusses von Lagerungsbedingungen auf die Oxidationsstabilität und auch um gezielt vorgealtertes Rapsöl für Emissionsuntersuchungen zu produzieren, wurden in einem Lagerungsversuch etwa 40 l Pflanzenöl in einem ca. 60 l fassenden lichtdurchlässigen Kunststoffkanister über 64 Tage bei einer mittleren Öltemperatur von 18,7 °C (Maximum: 32 °C, Minimum 8 °C) abgedeckt, aber mit der Möglichkeit zum Luftaustausch im Freien gelagert. In Abbildung 13 ist die Lagerdauer während der verschiedenen Rapsöltemperaturniveaus in einer geordneten Temperaturkurve dargestellt. Während der Lagerung sank die Oxidationsstabilität um fast die Hälfte von 6,61 h auf 3,65 h und damit unterhalb des Grenzwerts von 5 h (Tabelle 8). Eine Rückstellprobe, die zu Beginn des Alterungsversuchs genommen und bei 5 °C eingelagert wurde, wurde am Ende des Lagerungsversuchs noch einmal analysiert. Dabei wurde ebenfalls ein Rückgang der Oxidationsstabilität auf 5,81 h festgestellt allerdings in weit weniger hohem Maße, als unter Umgebungsbedingungen.

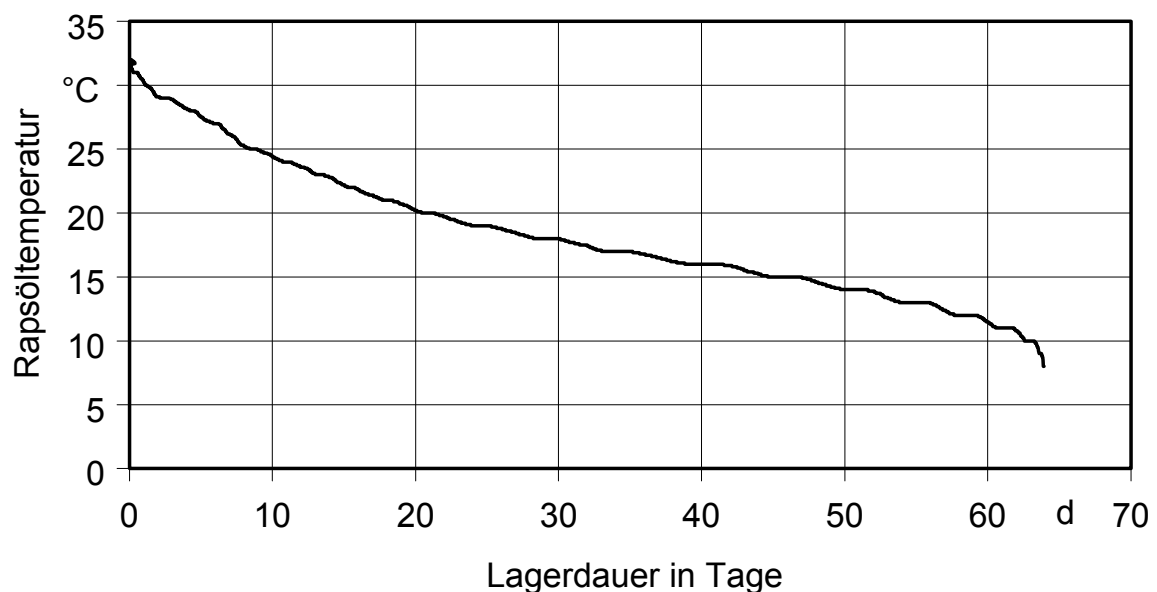


Abbildung 13: Rapsöltemperatur und Lagerdauer nach Temperaturniveau geordnet

Tabelle 8: Wichtige Kraftstoffkennwerte von Rapsölproben vor und nach einer Lagerung bei Umgebungsbedingungen und bei 5 °C

Proben-code	Oxidationsstabilität (110 °C) in h ISO 6886	kin. Viskosität (40 °C) in mm <sup>2</sup> /s DIN EN ISO 3104	Neutralisationszahl in mg KOH/g DIN EN ISO 660	Wassergehalt in Masse-% prEN ISO 12 937	Art der Probe
RöLT 000706-A	6,61	34	1,0	0,056	Ausgangsprobe Frischöl
RöLT 000913-A	3,65	35	1,1	0,065	nach 64 Tagen bei Umgebungsbed.
RöLT 000706-R	5,81	34	1,1	0,056	nach 64 Tagen bei 5 °C und dunkel

Die Neutralisationszahl ist ein Maß für den Gehalt an freien Fettsäuren im Öl. Mit steigender Neutralisationszahl nimmt der korrosive Einfluss auf Bauteile des Einspritzsystems und des Motors zu. Der im RK-Qualitätsstandard festgeschriebene Grenzwert von maximal 2,0 mg KOH/g liegt deutlich über den Neutralisationszahlen der Kraftstoffproben aus Weihenstephan und Weißenburg, die Werte von 0,6-1,6 mg KOH/g aufweisen. Dagegen überschreiten die Kraftstoffproben aus Greußenheim mit einer Neutralisationszahl von bis zu 3,1 mg KOH/g den geforderten Grenzwert um bis zu 50 %, was auf die thermische Belastung und damit eine Vorschädigung des Pflanzenölmoleküls im beheizten Tagestank zurückzuführen ist.

Unter allen Kenngrößen weicht der Gehalt an Feststoffen im Öl am häufigsten und am stärksten von dem geforderten Maximalwert gemäß RK-Qualitätsstandard ab. Der obere Grenzwert von 25 mg/kg Gesamtverschmutzung wird nur von wenigen Rapsölproben eingehalten. Dies sind Ölproben, die in Greußenheim nach dem Kraftstofffilter und in Weißenburg aus dem Tagestank genommen wurden. Bei den Kraftstoffproben der Landtechnik Weihenstephan wurden Gesamtverschmutzungen von mehr als 100 mg/kg bis hin zu über 400 mg/kg ermittelt. Diese hohen Werte können zum Teil dadurch begründet werden, dass zwischen Produktion und Nutzung des Rapsöls nur selten längere Verweilzeiten des Öls in Transport- oder Lagerungsbehälter auftreten, in denen sich die im Öl verbliebenen Partikel am Tankboden absetzen können. Da der Gesamtverschmutzung in Hinblick auf einen sicheren und wartungsarmen Betrieb von Motoren eine große Bedeutung zukommt, sind Maßnahmen zu ergreifen, die eine ausreichende Ölrinheit sicherstellen können.

### 3.2.1.2 Motoröl

Das Motoröl hat für den Motorbetrieb wichtige Hauptaufgaben [6]:

- Übertragung von Kräften
- Unschädlichmachen unerwünschter Produkte
- Verschleiß- und Korrosionsschutz
- Abdichten
- Kühlen

Um diese Funktionen zu erfüllen, hat das aus Grundöl und Zusätzen bestehende Motoröl je nach Einsatzzweck bestimmte Eigenschaften aufzuweisen. Diese können im wesentlichen in folgende Eigenschaftsgruppen zusammengefasst werden.

- Viskosität und Fließverhalten (z.B. Viskositätsindex)
- Oberflächenaktives Verhalten
- Neutralisationsvermögen

Während des Betriebs kommt es zu physikalischen und chemischen Veränderungen im Motoröl durch thermische und mechanische Beanspruchung sowie den Eintrag von Verschleißmaterialien, Ruß, Verbrennungsabgasen oder Kraftstoff. Insbesondere bei der Anreicherung von Pflanzenöl im Motoröl, z.B. bei schlechter Gemischaufbereitung, kann es zur Eindickung des Motoröls und infolge dessen zu einem Ausfall der Schmierfähigkeit kommen. Es gibt Anzeichen, dass dieser Effekt bei einer Versäuerung des Motoröls verstärkt wird. Als Ursachen für die Versäuerung sind der Eintrag von saueren (z.B. schwefelhaltigen) Verbrennungsabgasen, aber auch der Eintrag von Pflanzenöl mit einem hohen Gehalt an freien Fettsäuren (hohe Neutralisationszahl) von Bedeutung.

### BHKW Weißenburg

Beim BHKW Weißenburg wurden 7 Ölproben im Zeitraum zwischen dem 18.08.99 und 25.10.99 genommen und hinsichtlich der wichtigsten Kenngrößen analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt. Da das BHKW Weißenburg seit Juni 1999 mit einem System zur kontinuierlichen Ölauffrischung (Plantotronic®-Schmiersystem) ausgestattet ist, war innerhalb der Probenserie kein Ölwechsel erforderlich. Die Ergebnisse der Motorölanalysen sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Motorölanalysen des BHKW Weißenburg

Datum	Bh-Zähler [h]	Bh ab Umstellung auf Plantotronic®	Viskosität bei 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskosität bei 100 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskositätsindex	Basenzahl (TBN) [mg KOH/g]	ungelöste Stoffe [%]	Wassergehalt [ppm]	Rußgehalt [%]	Fe [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Al [mg/kg]	Mg [mg/kg]
Kontinuierliche Motorölauffrischung (Plantotronic®); Motoröl: Fuchs Plantopur 5W-30													
18.08.99	2771	107	52.1	10.8	204	5.2	0.09	1020	0.03	5	n.n.	n.n.	11
25.08.99	2806	142	52.6	10.8	201	5.1	0.05	458	--	5	n.n.	n.n.	13
31.08.99	2832	168	52.5	10.8	202	5.2	0.08	608	--	5	n.n.	n.n.	n.n.
09.09.99	2879	215	53.1	10.8	201	5.0	0.06	570	--	6	n.n.	n.n.	5
15.09.99	2897	233	53.2	10.8	200	5.3	0.08	785	--	6	n.n.	n.n.	5
05.10.99	2920	256	53.5	10.9	201	5.1	0.08	468	--	6	n.n.	n.n.	n.n.
25.10.99	2944	280	53.8	10.9	200	5.0	0.11	784	0.03	5	n.n.	n.n.	n.n.

n.n. = nicht nachweisbar

Das Motoröl zeigt über den Beobachtungszeitraum keine Anzeichen von signifikanter Ölalterung. Eine Öleindickung durch Polymerisation oder Verharzung ist aufgrund des lediglich geringfügigen Viskositätsanstiegs weitgehend auszuschließen. Auch die Basenzahl (Total Base Number) bleibt weitgehend konstant zwischen 5,0 und 5,3 mg KOH/g (Abbildung 14). Somit ist eine Übersäuerung des lediglich schwach additivierten Motoröls nicht gegeben. Die Verschmutzung des Motoröls ist sehr gering. Der Gehalt an ungelösten Stoffen der untersuchten Ölproben beträgt immer weniger als 0,12 Masse-%. (Abbildung 14). Auch der Rußanteil im Motoröl ist mit 0,03 Masse-% äußerst niedrig und weist auf eine saubere Verbrennung hin. Die Konzentration von Abribelementen im Motoröl (Fe, Cu, Al, Cr, Mn, Sn, Ni, Mo, Ti) liegt fast durchwegs unter 10 ppm, meist sogar unterhalb der Nachweisgrenze. Ein einsetzender Verschleiß kann demnach nicht festgestellt werden. Lediglich der Wassergehalt zeigt etwas größere Schwankungen zwischen 458 und 1020 ppm, was aber laut Motoröhersteller als unbedenklich gilt. Möglicherweise ist der Wassereintrag auf Kondensation von Luftfeuchte bei der Abkühlung des Motors zurückzuführen. In Abhängigkeit von den Betriebstemperaturen und Betriebszeiten kann der Wassergehalt im Motoröl auch wieder abnehmen, wenn Wasser bei den hohen Temperaturen aus dem Schmierkreislauf abdampfen kann [8].

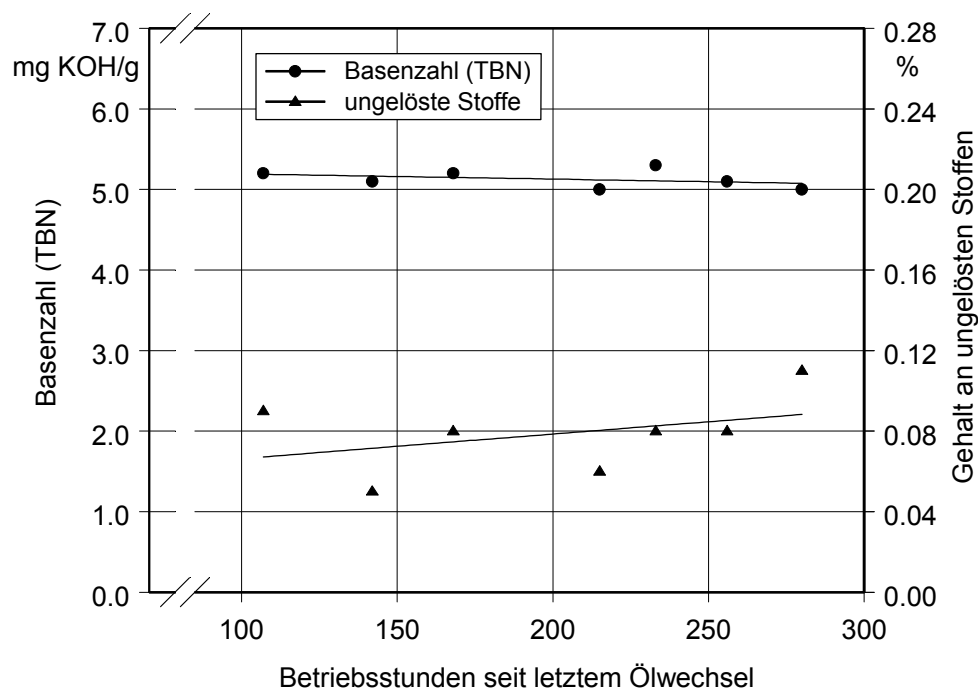


Abbildung 14: Basenzahl und Gehalt an ungelösten Stoffen im Motoröl des BHKW Weißenburg in Abhängigkeit von den Betriebsstunden

### BHKW Greußenheim

Gemäß dem Wartungsplan des Anlagenbauers (Höcker und Partner) ist für das BHKW in Greußenheim die Verwendung des Motorenöls mit der Kennung HP WCI SAE 30 vorgeschrieben. Dabei handelt es sich um ein Einbereichsmotoröl auf Esterbasis mit einer konventionellen Additivierung auf niedrigem Niveau. Ein Ölwechsel mit Ölfilterwechsel ist alle 300 Bh erforderlich. Der Motorenhersteller dagegen empfiehlt insgesamt 32 Ein- und Mehrbereichsöle von 16 verschiedenen Motorenölmarken. Der Betrieb des Aggregats erfolgte bis November 2000 mit dem Motoröl HP WCI SAE 30. Aus Kostengründen wird seit November 2000 zur Motorschmierung des BHKW das ebenfalls esterbasische Mehrbereichs-Motoröl Plantomot 5W-40 verwendet.

Analysiert wurden beim BHKW Greußenheim in erster Linie Motorölproben, die genommen wurden, als Auffälligkeiten im Betriebsverhalten des Aggregats zu beobachten waren. Zusätzlich erfolgte eine Bestimmung der wesentlichen Eigenschaften des frischen Motoröls. Alle analysierten Ölproben stammen von verschiedenen Ölwechselintervallen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Motorölanalysen des BHKW Greußenheim

Datum	Bh-Zähler [h]	Bh ab Ölwechsel [h]	Wechselintervall	Viskosität bei 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskosität bei 100 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskositätsindex	Basenzahl (TBN) [mg KOH/g]	ungelöste Stoffe [%]	Wassergehalt [ppm]	Rußgehalt [%]	Fe [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Al [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Mg [mg/kg]
Konventionelles Schmiersystem, Motoröl: H&P WCI SAE 30																
Frischöl	--	0	--	90.1	9.95	88	5.0	--	--	--	--	--	--	--	--	--
18.08.99	5000	314	a	134.1	13.46	95	5.8	3.60	1100	0.19	150	15	37	210	10	50
27.07.00	8321	190	b	103.8	11.17	92	5.2	0.32	900	0.05	20	n.n.	n.n.	11	n.n.	19
02.10.00	8700	330	c	104.8	11.35	94	5.3	0.35	600	0.05	31	n.n.	n.n.	23	n.n.	29
18.10.00	8986	280	d	110.7	11.49	89	5.2	0.50	500	0.11	22	n.n.	n.n.	15	n.n.	19

Die Probe vom 18.08.99 wurde aus der Ölwanne des Aggregats genommen, nachdem dies nach 5000 Bh einen Motorschaden durch Überhitzung erlitt (vgl. 3.2.2). Das Motoröl befand sich gemäß den Aufzeichnungen im Logbuch zu diesem Zeitpunkt etwa 314 Bh im Motor. Im Gegensatz zu Ölproben mit vergleichbarer Betriebszeit zeigt die Ölprobe vom 18.08.99 jedoch eine untypisch erhöhte Viskosität von ca. 17 % bei 100 °C. Gegenüber dem Frischöl ist dies ein Anstieg von 35 %, wodurch die Ölprobe in eine höhere Viskositätsklasse (SAE 40 statt SAE 30) einzustufen ist. Da der Motor vom Hersteller jedoch explizit auch für Öle der Klasse SAE 40 freigegeben ist, kann der Motorschaden nicht auf die Erhöhung der Viskosität zurückzuführen sein. Auch Wasser- und Rußgehalt weisen höhere Werte als üblich auf, können aber noch als wenig kritisch eingestuft werden. Das Schmutztragevermögen, nachgewiesen durch den Tüpfeltest (FLV V-05), und das Neutralisationsvermögen des Öls erwies sich als intakt. Auffällig ist jedoch die größere Menge an Verschleißelementen (Abbildung 15) und ungelösten Stoffen im Öl (Abbildung 16). Insbesondere waren auch größere bis zu 4 mm lange Partikel in der Ölprobe zu finden. Da es sich um schwarze, spröde sehr harte Teilchen mit metallischem Kern handelt, deutet dies darauf hin, dass es sich um Teilchen eines beschädigten Maschinenbauteils handelt. Anhand der analysierten Ölprobe kann die Schadensursache nicht bestimmt werden. Bei der Beurteilung der Analyseergebnisse muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Ölprobe erst bei erkaltetem Motor nach Eintreten des Schadens genommen werden konnte und demnach nur annähernd die im Motor befindliche Schmierölqualität beschreibt.

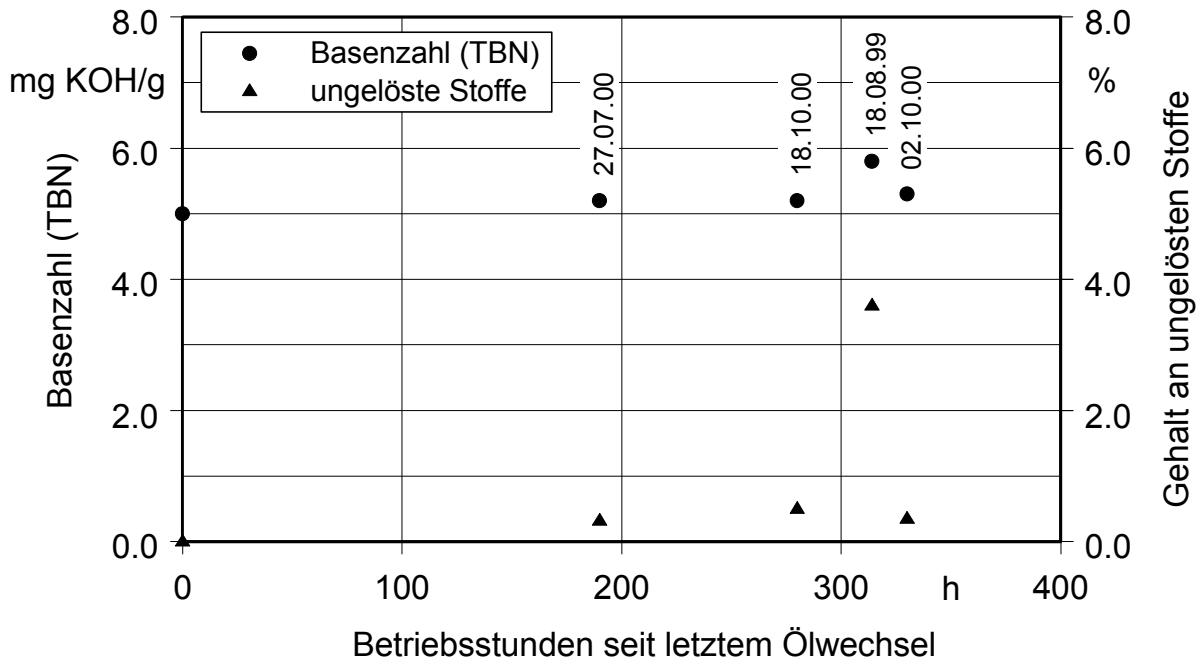


Abbildung 15: Basenzahl und Gehalt an ungelösten Stoffen im Motoröl des BHKW Greußenheim in Abhängigkeit von den Betriebsstunden (Ölproben von mehreren Ölwechselintervallen)

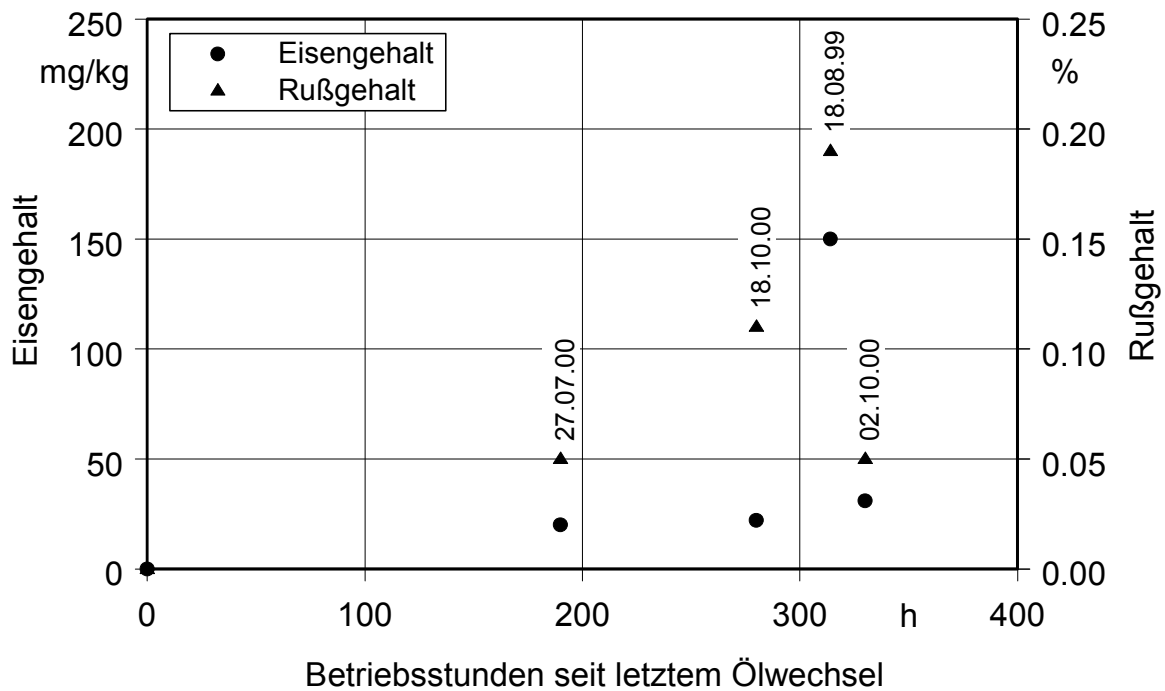


Abbildung 16: Eisen- und Rußgehalt des BHKW Greußenheim in Abhängigkeit von den Betriebsstunden (Ölproben von mehreren Ölwechselintervallen)

Die Motorölprobe vom 27.07.00 wurde während einer wiederkehrenden Emissionsmessung genommen, bei der deutlich erhöhte Partikelemissionen festzustellen waren. Betrachtet man den mit 0,05 Masse-% sehr niedrigen Rußgehalt der Probe, so deutet nichts auf eine schlechte Verbrennungsgüte hin. Im September 2000 waren am Aggregat Einspritzdüsen eingebaut, die sehr schnell verkokten (evtl. schlechtere Verbrennung oder höhere Verbrennungstemperaturen) und bereits nach ca. zwei Wochen Standzeit (ca. 200 Bh) ausgewechselt wurden. Beim nächsten Ölwechsel am 2.10.00 wurde eine Probe entnommen und analysiert. Zur Kontrolle wurde nach Austausch der Einspritzdüsen am 18.10.00 eine weitere Motorölprobe gezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei beiden Proben der Viskositätsanstieg von ca. 15 % bei 100 °C im üblichen Rahmen liegt. Auch bei anderen Parametern wie Basenzahl, Ruß- und Wassergehalt oder Verschleißelemente wurden keine Auffälligkeiten beobachtet. Ein merklicher Eintrag an Rapsölkraftstoff in das Motoröl konnte nicht festgestellt werden. Ein Eintrag von 5 % Rapsölkraftstoff in das Motoröl, z.B. aufgrund einer von defekten Einspritzdüsen hervorgerufenen schlechteren Verbrennung würde einen Anstieg des Viskositätsindex um ca. 8 bewirken. Dies trifft auf keine der untersuchten Proben zu. Somit kann kein Einfluss einer schlechteren Verbrennung auf die Qualität des Motoröls innerhalb der betrachteten Motorölstandzeiten nachgewiesen werden.

### **BHKW Weihenstephan**

Beim BHKW in Weihenstephan wurde nach zwei Ölwechselintervallen mit einem Mehrbereichsmotorenöl (15W-40) von Esso das Mehrbereichsöl Titan Unic MC 10W-40 zur Motorschmierung eingesetzt. Untersucht wurden eine Serie von 4 Gebrauchtölproben während eines Ölwechselintervalls sowie zusätzlich Zweierserien weiterer drei Ölfüllungen. Tabelle 11 zeigt, dass die gebrauchten Motoröle auch nach mehr als 400 Bh (empfohlene Ölstandzeit: 300 Bh) keine besonders starke Alterung aufweisen. Wichtige Kenngrößen für die Motorölalterung wie Viskosität und TBN (Total Base Number) verändern sich nur geringfügig.



Tabelle 11: Motorölanalysen des BHKW Landtechnik Weihenstephan

Datum	Bh-Zähler [h]	Bh ab Ölwechsel [h]	Wechselintervall	Viskosität bei 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskosität bei 100 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskositätsindex	Basenzahl (TBN) [mg KOH/g]	ungelöste Stoffe [%]	Wassergehalt [ppm]	Rußgehalt [%]	Rapsölgehalt [%]	Fe [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Al [mg/kg]	Cr [mg/kg]
Konventionelle Schmierung; Motoröl: Fuchs Titan Unic MC 10W-40															
28 09 99	621	0.5	a	85.1	13.6	162	12.3	0.01	541	--	--	8	--	--	--
14 10 99	905	284	a	--	14.2	--	13.1	0.13	462	0.71	--	31	--	6	--
18 10 99	1004	99	b	87.2	14.1	166	12.9	0.03	445	0.30	--	13	5	--	--
20 10 99	1049	144	b	--	14.1	--	12.9	0.03	516	0.38	--	18	7	--	--
26 10 99	1179	274	b	88.3	14.3	167	13.3	0.03	499	0.60	--	31	6	--	--
09 11 99	1325	420	b	89.7	14.4	167	12.2	0.06	309	0.89	3	48	6	--	--
25 11 99	1598	273	c	--	14.3	--	12.4	0.04	244	0.63	3.9	30	--	--	--
30 11 99	1741	416	c	--	14.4	--	12.1	0.05	733	0.86	5.5	43	--	--	--
13 12 99	1900	159	d	--	14.6	--	11.6	0.04	228	0.34	2.3	16	--	--	--
05 01 00	2132	391	d	--	14.7	--	11.7	0.09	225	0.8	5.8	33	--	--	--
Kontinuierliche Motorölauf frischung (Plantotronic®); Motoröl: Fuchs Plantopur 5W-30															
25 05 00	3852	51	e	51.6	11.0	211	4.3	0.05	870	--	--	--	--	--	--
08 06 00	3903	102	e	52.4	11.0	208	4.0	0.08	855	--	--	--	--	--	--
15 06 00	3948	147	e	52.9	10.9	203	3.8	0.07	408	0.2	--	--	--	--	--
23 06 00	3986	185	e	52.2	10.8	203	4.4	0.07	711	0.2	--	--	--	--	--
30 06 00	4071	270	e	54.9	11.1	201	4.4	0.13	404	0.25	--	--	--	--	--
07 07 00	4157	356	e	55.3	11.2	200	4.0	0.19	--	0.3	--	12	--	--	--
28 07 00	4257	456	e	55.3	11.2	201	--	0.16	863	0.2	--	14	--	10	6

Die ungelösten Verschmutzungen liegen auf einem insgesamt niedrigen Niveau unterhalb 0,1 %. Mit zunehmender Betriebszeit steigt der Rußgehalt und der Eisengehalt linear an (Abbildung 17, Abbildung 18). Dies deutet auf eine merkliche Zunahme der Verschmutzung und des Motorverschleißes hin. Allerdings werden keine kritischen Werte erreicht. Nach ca. 400 Bh befinden sich etwa 5-6 % Rapsöl im Motorenöl (Abbildung 19). Die kontinuierliche Veränderung der untersuchten Qualitätskenngrößen über die Betriebszeit bei allen untersuchten Öfüllungen zeigt, dass keine sprunghafte Motoröalterung eingesetzt hat und erscheint deshalb bei gleichbleibenden Bedingungen nicht problematisch.

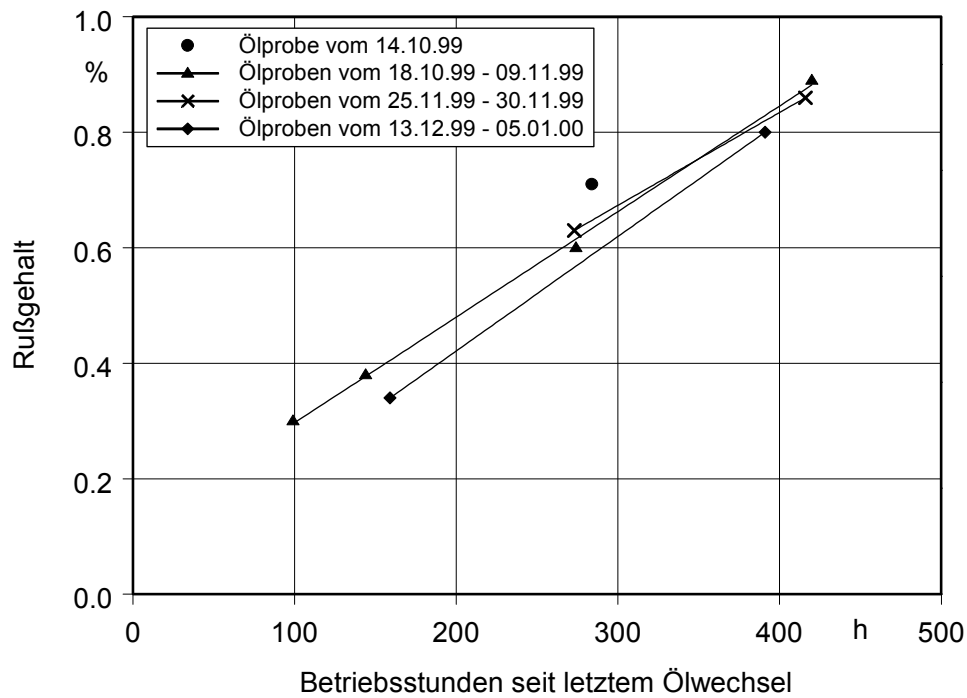


Abbildung 17: Rußgehalt im Motoröl des BHKW Landtechnik Weihenstephan in Abhängigkeit von den Betriebsstunden seit dem letzten Ölwechsel

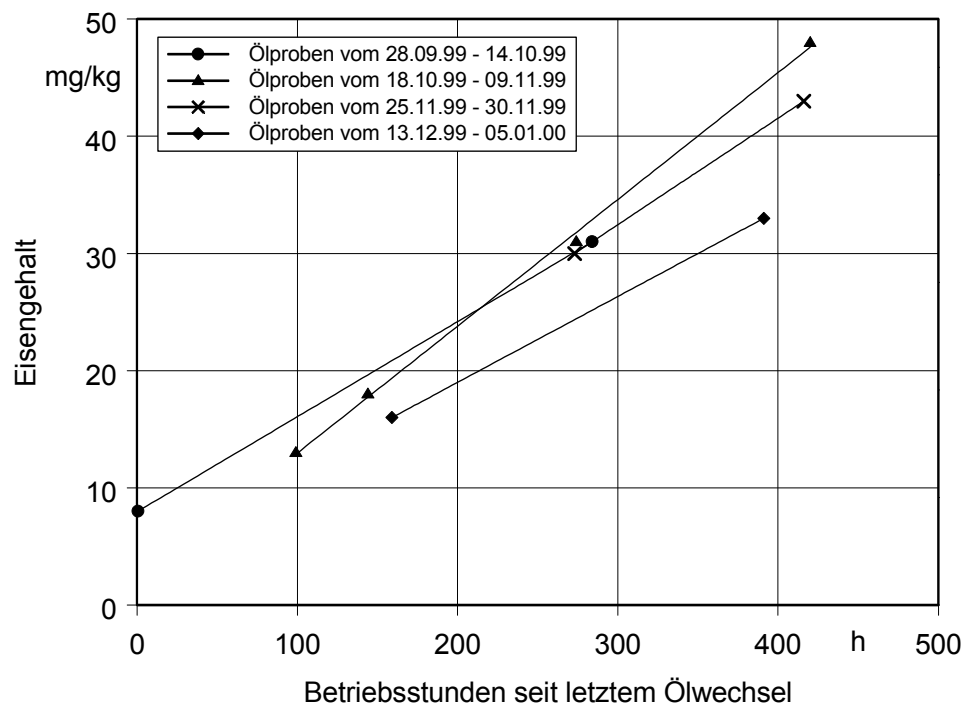


Abbildung 18: Eisengehalt im Motoröl des BHKW Landtechnik Weihenstephan in Abhängigkeit von den Betriebsstunden seit dem letzten Ölwechsel

Nach der Umrüstung des Aggregats auf das System der kontinuierliche Ölauffrischung wurde eine weitere Ölprobenserie analysiert. Dabei zeigt sich, dass bis einschließlich der Ölprobe vom 23.6.00 (185 Betriebsstunden) der Gehalt an ungelösten Stoffen des Motoröls mit deutlich unter 0,10 % sehr gering ist (Abbildung 20). Auch der Gehalt an Verschleißelementen lag bis zu diesem Zeitpunkt unter der Nachweisgrenze von 5 ppm (Tabelle 11). In der Ölprobe vom 30.6.00 konnte nach 270 Betriebsstunden erstmals ein Anstieg der ungelösten Stoffe auf 0,13 % und des Rußgehalts auf 0,25 % festgestellt werden. Bei 365 Bh wurde dann auch das Verschleißelement Eisen nachgewiesen. Gleichzeitig stieg die Verschmutzung weiter auf 0,19 % und der Rußgehalt auf 0,3 % an. Etwa 100 Bh später sank die Verschmutzung und der Rußgehalt wieder leicht ab, wohingegen die Verschleißelemente weiter zunahmen. Die Zusammensetzung der nachgewiesenen Elemente Chrom, Aluminium und Eisen deuten auf einen erhöhten Abrieb von Kolbenringen, Kolben und Lagern hin.

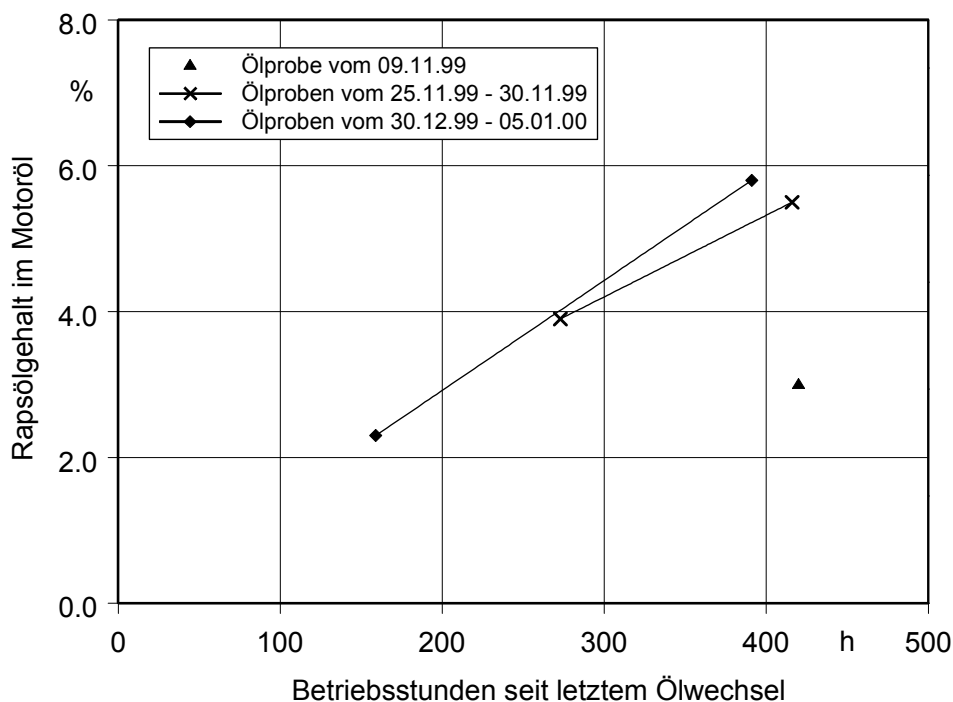


Abbildung 19: Rapsölgehalt im Motoröl des BHKW Landtechnik Weihenstephan in Abhängigkeit von den Betriebsstunden seit dem letzten Ölwechsel

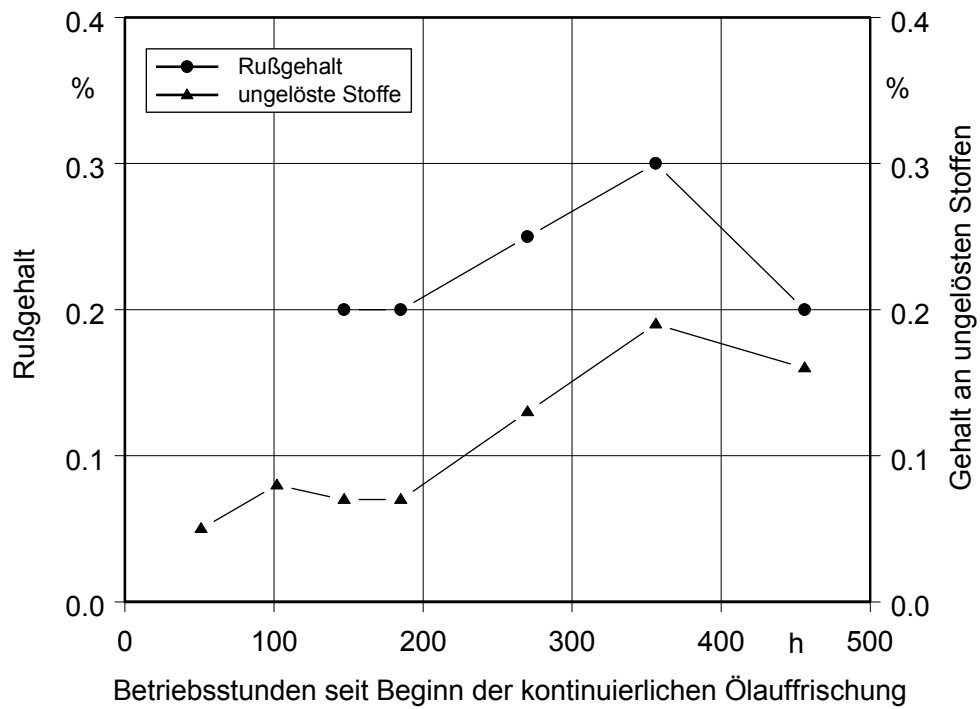


Abbildung 20: Rußgehalt und Gehalt an ungelösten Stoffen im Motoröl des BHKW Landtechnik Weihenstephan in Abhängigkeit von den Betriebsstunden seit Beginn der kontinuierlichen Ölauffrischung

### 3.2.2 Betriebskennwerte

Die Betriebskennwerte beschreiben die Einsatzbedingungen des BHKW und der Betriebsmittel wie Kraftstoff oder Motoröl. Darüber hinaus können Veränderungen während des Betriebszeitraums Hinweise auf mögliche Störungen bzw. deren Ursachen geben. Im Anhang sind die Betriebsdaten der untersuchten BHKW als Monatsmittel in Anhang 6 bis Anhang 17 zusammengefasst. Mit Ausnahme der Kraftstofftemperatur im Tank, bei der sämtliche Messwerte berücksichtigt wurden, werden bei den anderen Kenngrößen nur Messdaten dargestellt, die während des Betriebs der BHKW erfasst wurden. In den nachfolgenden Darstellungen werden neben den Monatsmittelwerten teilweise auch Stundenmittelwerte dargestellt. Da das BHKW in Weißenburg tägliche Laufzeiten von oft nur 1-3 Stunden aufweist, wurden für die Darstellung der Messergebnisse aus Weißenburg Zehntelstundenmittelwerte gewählt.

#### Kraftstofftemperatur

Der Verlauf der Kraftstofftemperatur im Tagestank über den Beobachtungszeitraum ist für alle drei untersuchten BHKW in Abbildung 21 dargestellt. Die Temperatur des Rapsöls im Tagestank des BHKW Weißenburg und Weihenstephan zeigt einen außertemperaturabhängigen Verlauf und beträgt in den Wintermonaten etwa 10-15 °C und in den Sommermonaten etwa 25 °C bis maximal 28 °C. Der Temperaturverlauf beim BHKW in Weihenstephan ist stärkeren Schwankungen unterworfen, da auch der Standort (Container) größere Temperaturspreizungen aufweist, als der Lagerkeller in Weißenburg. Zudem befindet sich die Temperaturmessstelle nicht im Tank sondern in der Kraftstoffzuleitung. Das BHKW in Greußenheim besitzt einen beheizten Tagestank. Der darin bevorratete Rapsölkraftstoff weist Temperaturen zwischen ca. 30 und 35 °C auf und ist somit ganzjährig einer deutlich höheren thermischen Belastung ausgesetzt als bei den beiden anderen BHKW.

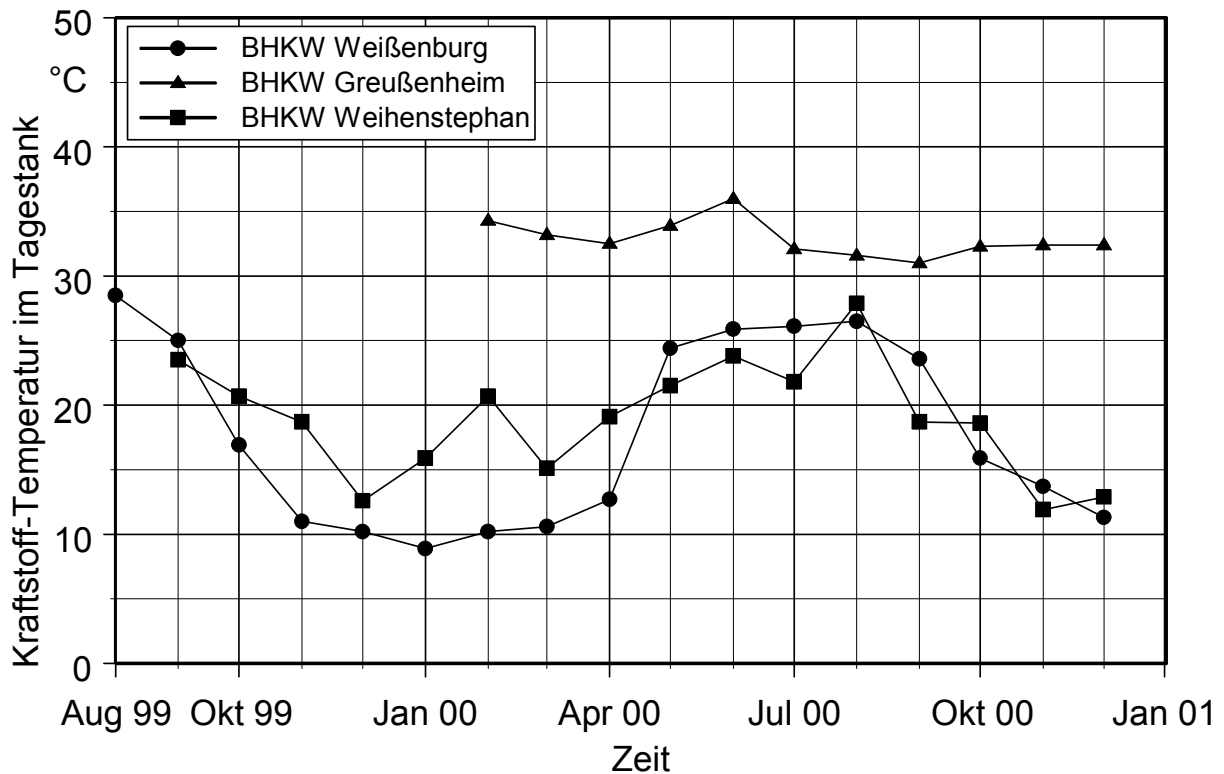


Abbildung 21: Kraftstofftemperatur im Tagestank (Monatsmittelwerte) der drei BHKW während des Untersuchungszeitraums

In Abbildung 22 sind die Rapsöltemperaturen nach dem Kraftstofffilter für das BHKW in Weihenstephan und in Greußenheim dargestellt. Die maximalen Temperaturen betragen etwa 45-50 °C in Weihenstephan und ca. 60-65 °C in Greußenheim. In den Wintermonaten gehen die Maximaltemperaturen um etwa 10-15 °C zurück. Ursache dafür sind in erster Linie die niedrigeren Umgebungstemperaturspitzen in Aggregatsnähe und weniger die Kraftstofflagerungstemperaturen, da die Kraftstofftemperatur im beheizten Tagestank in Greußenheim nur geringfügigen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist (vgl. Abbildung 21). Das BHKW in Weihenstephan besitzt keine Einrichtung zur Kraftstoffvorwärmung. Deshalb ist der Temperaturanstieg zwischen Tank und Filter zum einen auf die Übertragung der Abwärme des Aggregats an die Kraftstoffzuleitung und zum anderen auf das dem Kraftstoffvorlauf zugeführte (im Einspritzsystem erwärmte) Rücklauföl zurückzuführen.

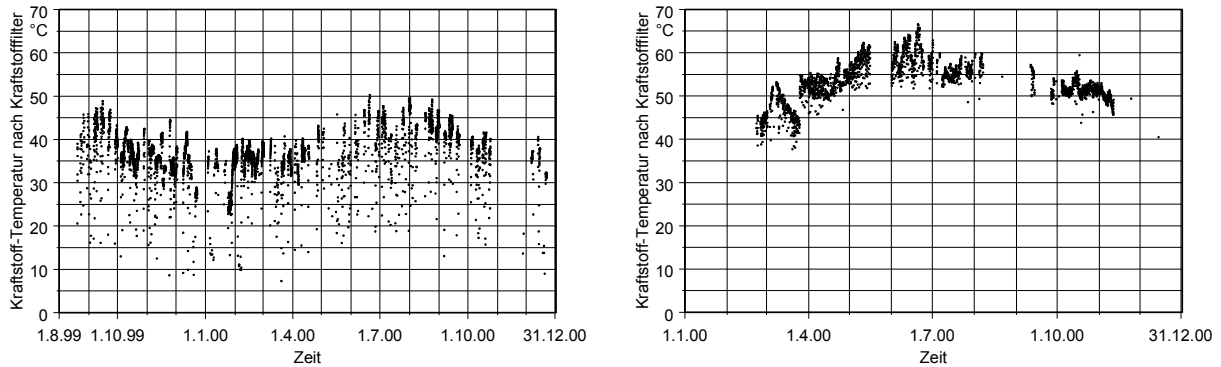


Abbildung 22: Kraftstofftemperatur nach dem Kraftstofffilter beim BHKW der Landtechnik Weißenstephan (links) und in Greußenheim (rechts)

Im Einspritzsystem kommt es zu einer weiteren Erwärmung des Rapsöls. An den Druckleitungen zwischen Einspritzpumpe und den Düsenhalterkombinationen wurden Temperaturen zwischen ca. 65 und 75 °C ermittelt (vgl. Anhang 7 und Anhang 8). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Kraftstofftemperatur mittels eines Anlegtemperaturfühlers erfasst wurde, so dass trotz guter Isolierung, die gemessene Oberflächentemperatur der Druckleitung etwas höher liegen kann, als die Rapsöltemperatur. Vergleicht man allerdings die Kraftstofftemperatur an der Einspritzdüse mit der Temperatur des Rücklauföls von Einspritzdüsen und Einspritzpumpe am Aggregat in Weißenburg so zeigt sich sogar noch eine geringfügig höhere Temperatur des Rücklauföls (Abbildung 23).

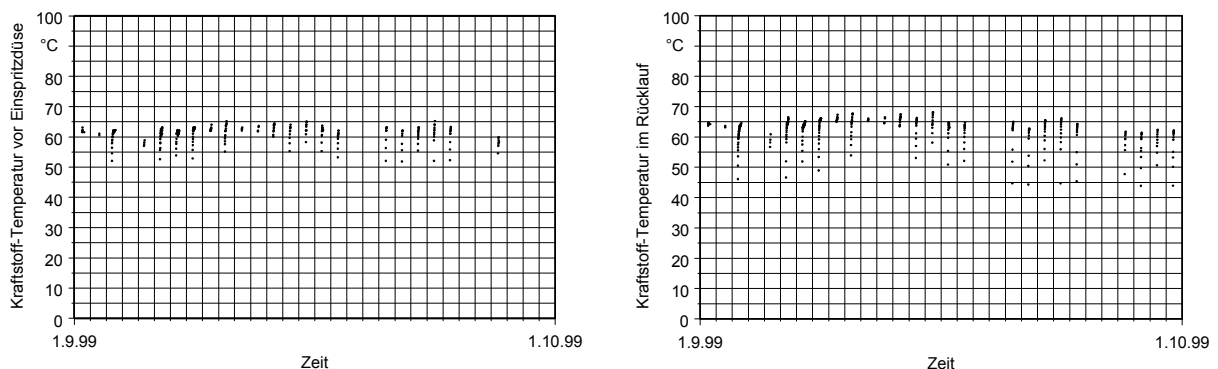


Abbildung 23: Kraftstofftemperatur an der Druckleitung zur Einspritzdüse (links) und im Kraftstoffrücklauf (rechts) am BHKW Weißenburg im September 99

### Motoröltemperatur

Die Temperatur des Motoröls in der Ölwanne ist in Abbildung 24 für alle drei BHKW dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass das BHKW in Weihenstephan und das BHKW in Weißenburg über den Beobachtungszeitraum recht konstante Motoröltemperaturen zwischen ca. 92 und 95 °C aufweisen. Demgegenüber liegen die mittleren monatlichen Motoröltemperaturen beim BHKW in Greußenheim etwa 10 °C höher und unterliegen mit Werten von ca. 102 bis 108 °C auch größeren Schwankungen.

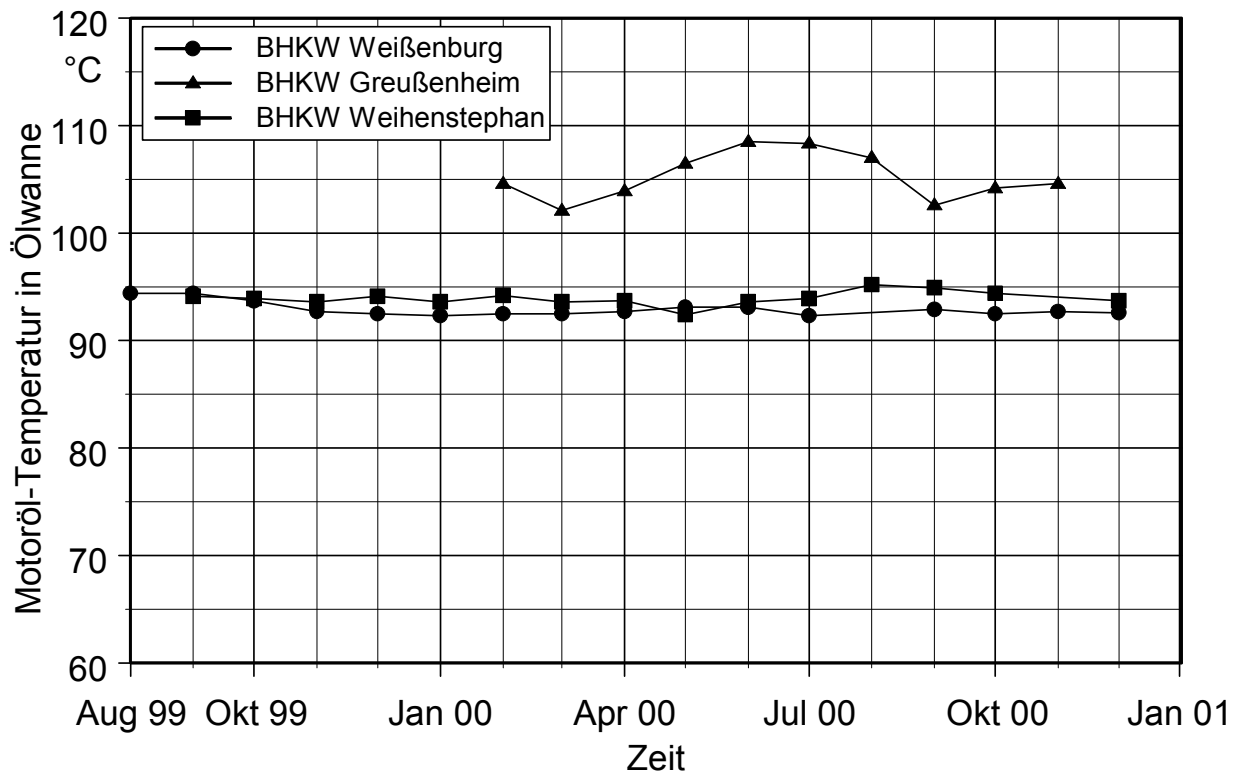


Abbildung 24: Motoröl-Temperatur in der Ölwanne (Monatsmittelwerte) der untersuchten BHKW während des Beobachtungszeitraums

Die mittleren monatlichen Umgebungslufttemperaturen in Aggregatsnähe der drei untersuchten BHKW sind in Abbildung 25 dargestellt. Sie betragen für das BHKW der Landtechnik Weihenstephan etwa 44-54 °C und für das BHKW in Greußenheim bis zum September 2000 etwa 46-52 °C. Ab Oktober 2000 ist ein deutlicher Rückgang der Umgebungstemperaturen erkennbar, der auf eine verbesserte Frischluftanströmung des Motors zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 52, Seite 83). Beim BHKW in Weißenburg, wo eine Aufzeichnung der Umgebungslufttemperatur nur im August und September 1999 erfolgte ergeben sich mit knapp über 30 °C die niedrigste Werte im



Vergleich der drei BHKW. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Weißenburg die beiden BHKW-Module in einem schallschutzisolierten Raum aufgestellt sind, der mit einer besonders leistungsfähigen temperaturgeregelten Belüftung ausgestattet ist, wohingegen die beiden kleineren Aggregate in Weihenstephan und in Greußenheim direkt von einer (belüfteten) Schallschutzkabine umgeben sind, in der sich die geringe Luftmenge schnell erwärmt.

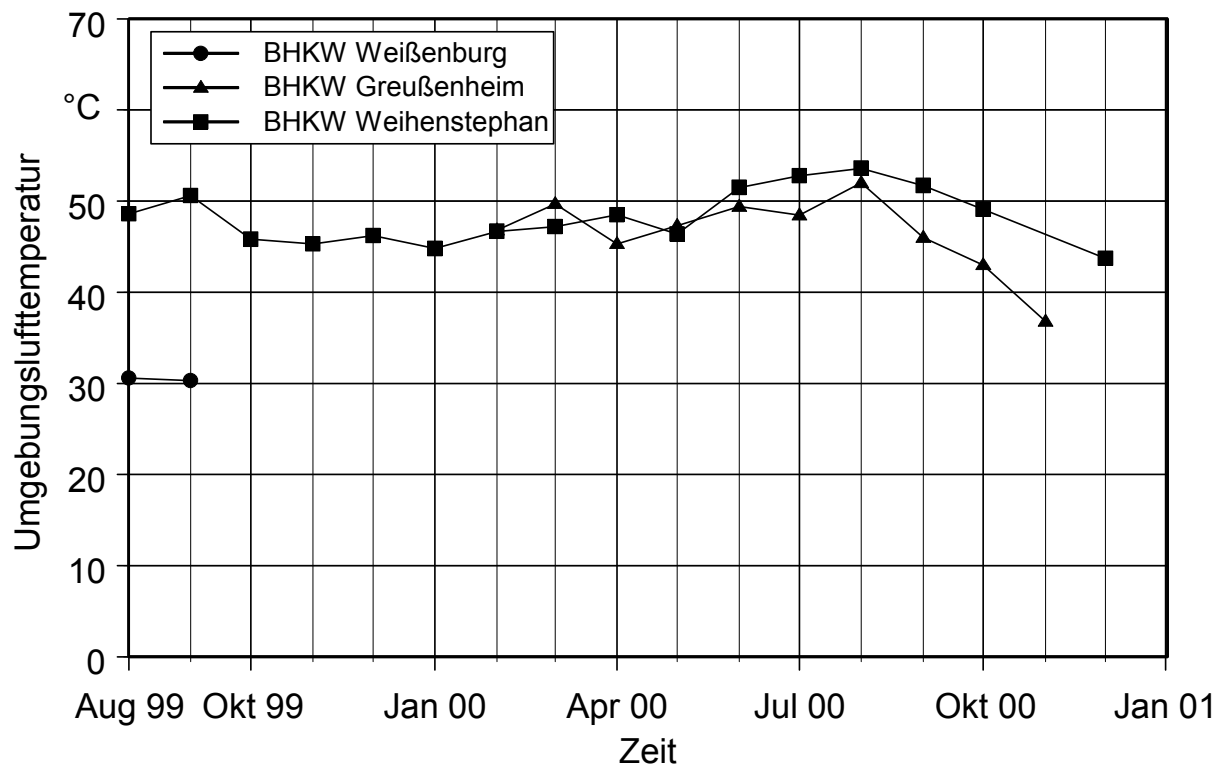


Abbildung 25: Umgebungslufttemperatur der drei untersuchten BHKW während des Beobachtungszeitraums

### Abgastemperatur

Die Abgastemperatur unmittelbar nach dem Abgaskrümmern (nach Zylinder) ist in Abbildung 26 für alle drei BHKW dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Wirbelkammermotor des BHKW der Landtechnik Weihenstephan die niedrigste Abgastemperatur besitzt, die allerdings im Laufe des Beobachtungszeitraums deutlich von etwa 330 °C auf 380 °C ansteigt. Beim BHKW in Greußenheim betragen anfänglich die mittleren monatlichen Abgastemperaturen zwischen ca. 380 °C und 400 °C. Ab Oktober 2000 werden höhere Werte von etwa 410-420 °C erreicht, was in erster Linie auf die Erhöhung der Lastleistung von erst 40 auf 50 kW<sub>el</sub> zurückzuführen ist. Zusätz-

lich muss berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zum BHKW in Weißenstephan und Weißenburg die ermittelten und in Abbildung 26 dargestellten Abgastemperaturen in Greußenheim noch höher wären, wenn das Aggregat nicht mit einem Krümmer-Wärmetauscher ausgestattet wäre, der für eine Abkühlung des Abgases (vor der Messstelle) sorgt. Die höchsten mittleren Abgastemperaturen von 450 °C bis zu 485 °C weist das mit 110 kW<sub>el</sub> leistungsstärkste Aggregat in Weißenburg auf. Gegen Ende des Beobachtungszeitraums ist allerdings ein Rückgang der Abgastemperatur erkennbar, was möglicherweise auf einen verminderten Abgasgegendruck aufgrund des Ausbaus des defekten Partikelfilters am 27.06.00 zurückzuführen ist.

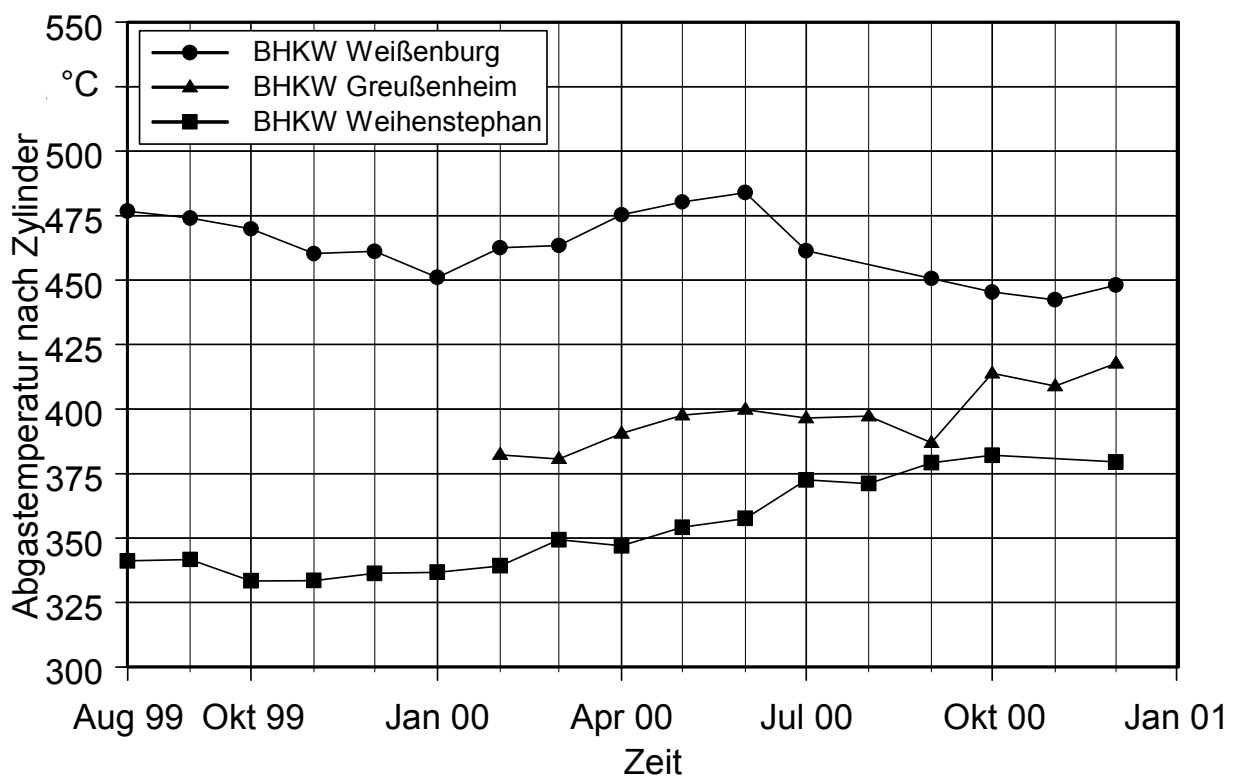


Abbildung 26: Abgastemperatur nach dem Zylinder (Monatsmittelwerte) der drei BHKW während des Untersuchungszeitraums

Da Oxidationskatalysatoren hohe Abgastemperaturen benötigen, um gute Emissionsminderungsraten zu erzielen, werden sie meist unmittelbar nach dem Abgaskrümmer in das Abgassystem eingebaut. Dies ist auch bei den drei untersuchten BHKW der Fall. Somit sind die Abgastemperaturen am Oxidationskatalysator nur geringfügig niedriger, als nach dem Zylinder. Lediglich am Aggregat in Weißenburg treten am Oxidationskatalysator phasenweise auch deutlich höhere Temperaturen mit Spitzenwerten von bis zu 700 °C auf (Abbildung 27). Dies ist während der Regenerierung des

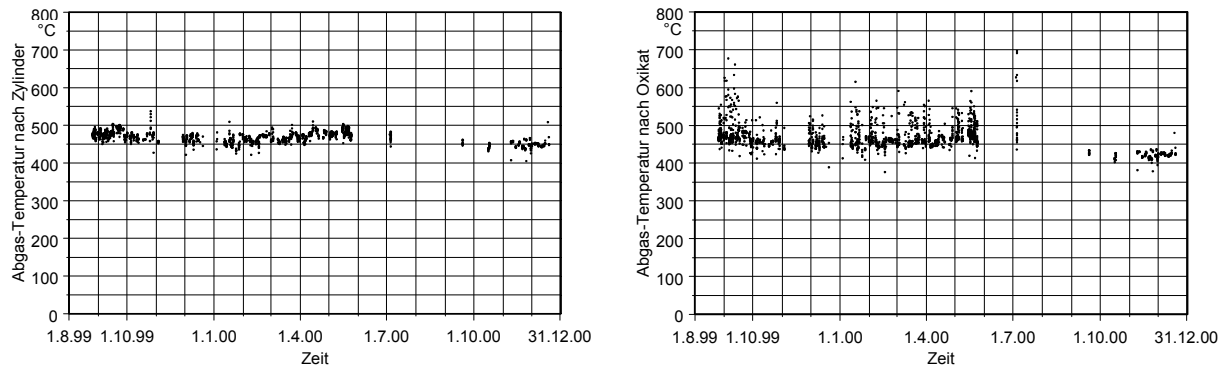


Abbildung 27: Abgas-Temperatur nach dem Zylinder (links) und nach dem Oxidationskatalysator (rechts) am BHKW in Weißenburg

unmittelbar nach dem Oxidationskatalysators anschließenden Partikelfilters der Fall, wenn mittels eingedüstem Propangas der Ruß abgebrannt wird.

In Abbildung 28 sind die Abgas-Temperaturen nach dem Wärmetauscher (ausgefüllte Symbole) und die Abgasdifferenztemperaturen am Wärmetauscher (nicht ausgefüllte Symbole) der drei BHKW dargestellt. Aus dem Verlauf der Kurven mit den ausgefüllten Symbolen wird ersichtlich, dass die Abgas-Temperatur nach dem Wärmetauscher beim BHKW in Weißenburg mit 154-194 °C am niedrigsten und beim BHKW in Greußenheim mit 234-254 °C am höchsten ist. Dazwischen liegt das BHKW in Weißenburg mit 154-194 °C. Die Abgasdifferenztemperatur am Wärmetauscher ist beim BHKW in Weißenburg mit etwa 300 °C am höchsten (nicht ausgefüllte Symbole). Ab Juli 2000 setzt ein stetiger Rückgang bis auf 227 °C am Ende der Messdatenerfassung ein. Möglicherweise zeichnet sich darin eine beginnende Verrußung der Wärmetauscherflächen ab, die durch den Ausbau des defekten Partikelfilters Ende Juni 2000 hervorgerufen worden sein kann. Beim BHKW in Weißenburg ist im Kalenderjahr 2000 ein kontinuierlicher Anstieg der Abgasdifferenztemperatur von ca. 200 auf 235 °C zu vermerken. Dies entspricht in etwa der Zunahme der Abgas-Temperatur vor dem Wärmetauscher im selben Zeitraum (vgl. Abbildung 26) und deutet auf einen leistungsfähigen Abgaswärmetauscher hin, der einen Großteil der zusätzlichen Wärmemenge im Abgas an das Kühlwasser übertragen kann. Beim BHKW in Greußenheim ist die Abgas-Temperaturerhöhung am Wärmetauscher mit etwa 135-154 °C am niedrigsten im Vergleich zu den anderen beiden BHKW.

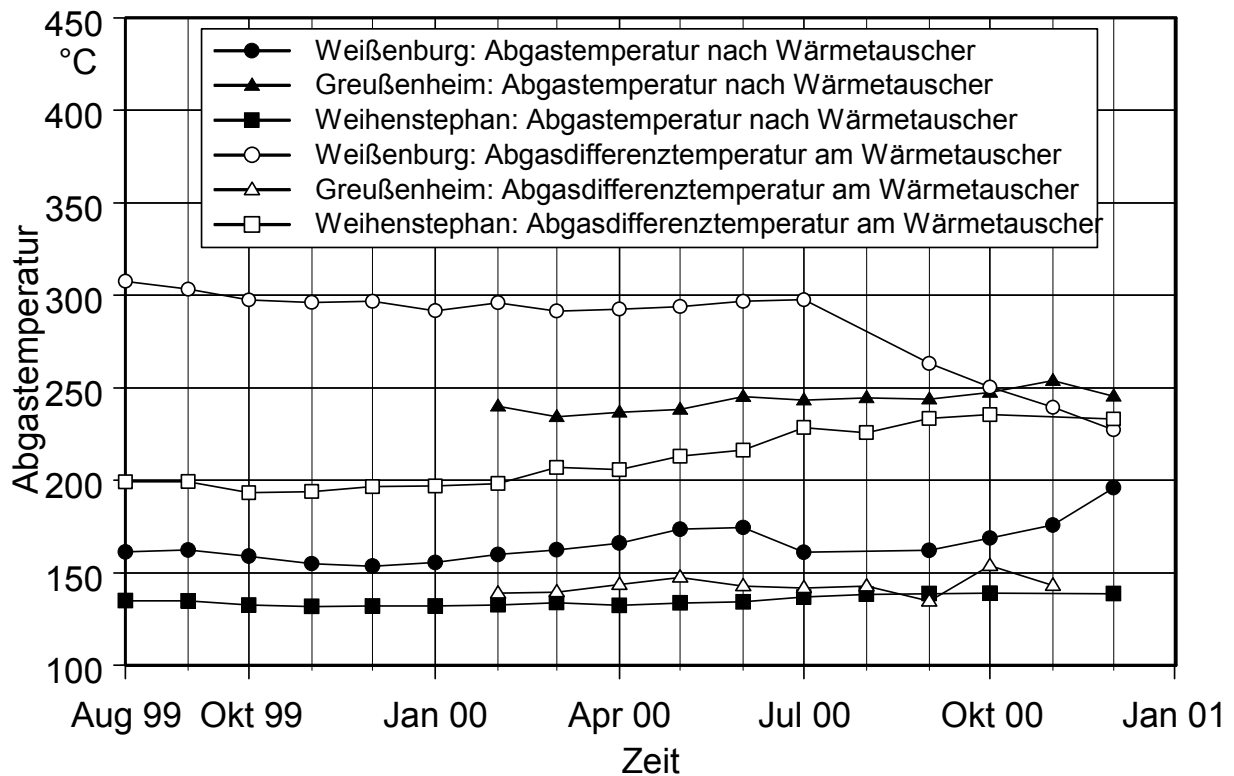


Abbildung 28: Abgastemperatur nach dem Wärmetauscher und Abgasdifferenztemperatur am Wärmetauscher der drei untersuchten BHKW

### Heizwassertemperatur

In Abbildung 29 sind die Heizwassertemperaturen im Rücklauf (vor BHKW) und im Vorlauf (nach BHKW) dargestellt. Die beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan eingeregeltte Temperaturspanne von 60 °C Rücklauftemperatur und 80 °C Vorlauftemperatur wird während des Beobachtungszeitraums sehr gut eingehalten. Beim BHKW in Greußenheim beträgt der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf bis zum September 2000 etwa 9 °C und ab Erhöhung der eingestellten Dauerleistung von 40 auf 50 kW<sub>el</sub> etwa 11 °C. Beim stromgeführten BHKW in Weißenburg wurde eine Differenz zwischen Vor- und Rücklauf von annähernd 25 °C ermittelt, allerdings auf deutlich niedrigerem Temperaturniveau im Vergleich zu den beiden anderen Aggregaten in Weihenstephan und Greußenheim. Die Heizwassertemperaturen an den einzelnen Wärmetauschern können aus Anhang 12, Anhang 13 und Anhang 14 entnommen werden.

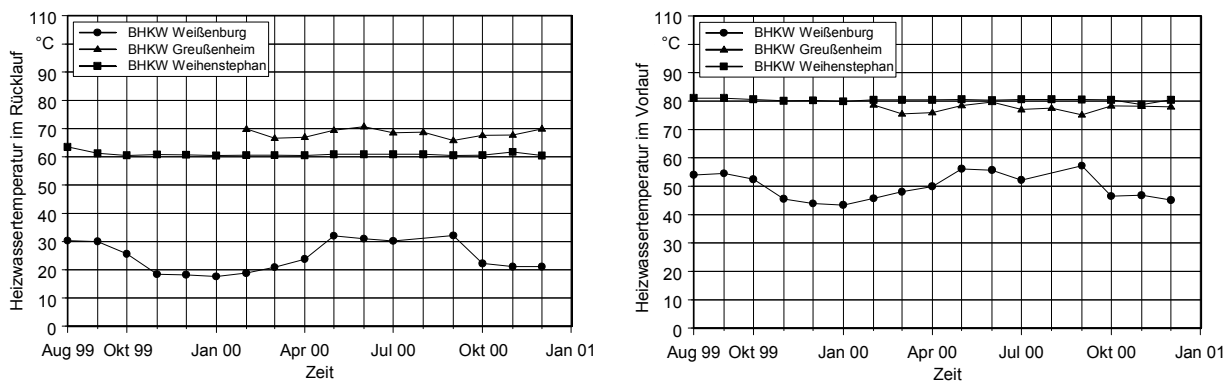


Abbildung 29: Heizwassertemperatur der drei untersuchten BHKW im Rücklauf (links) und im Vorlauf (rechts)

### Kraftstoffdruck

Der Kraftstoffdruck wurde in Weihenstephan und Greußenheim als Differenzdruck am Kraftstofffilter ermittelt. Da bei diesen Aggregaten Störungen auftraten, die in Zusammenhang mit dem Kraftstofffilter stehen, wird deshalb darauf an den entsprechenden Stellen in Kapitel 3.2.3 näher eingegangen.

Beim BHKW in Weißenburg wurde der Kraftstoffdruck vor und nach dem Kraftstofffilter getrennt voneinander erfasst. Beide Druckverläufe sind in Abbildung 30 dargestellt. Der beinahe deckungsgleiche Gang zeigt, dass während des Beobachtungszeitraums am Kraftstofffilter keine größeren Druckanstiege z.B. als Folge von Filterverstopfungen zu verzeichnen waren. Auffällig ist jedoch, dass der Kraftstoffdruck vor und nach dem Kraftstofffilter im Winter leicht abnimmt. Dieser Rückgang ist möglicherweise auf den saugseitig höheren Leistungsbedarf der Kraftstoffförderpumpe im Winter (Anstieg des Ansaugwiderstands bei kälterem Pflanzenöl) zurückzuführen.

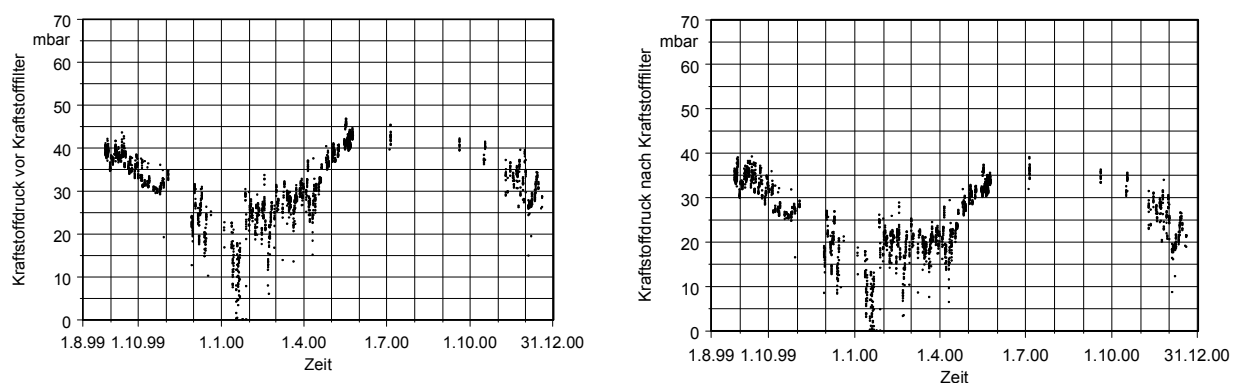


Abbildung 30: Kraftstoffdruck vor (links) und nach dem Kraftstofffilter (rechts) am BHKW in Weißenburg

### Abgasdruck

Der Abgasdifferenzdruck an der Abgasreinigung (Oxidationskatalysator-/Partikelfiltereinheit) beim BHKW in Weißenburg schwankt zwischen ca. 40 und 95 mbar (Abbildung 31). Diese großen Druckunterschiede erklären sich wie folgt: Während des Betriebs wird Ruß am Partikelfilter abgeschieden, der zu einem Anstieg des Abgasdrucks vor dem Filter führt. Wird der an der Anlage eingestellte maximale Abgasdifferenzdruck überschritten, wird ein Abbrennen des Rußes mittels Gaseindüsung eingeleitet, wodurch der Abgasdifferenzdruck wieder auf das Ausgangsniveau absinkt. Der Abgasdruck nach der Partikelfiltereinheit bleibt annähernd konstant und steigt zumindest während der ersten Monate selten über 10 mbar. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums erhöht sich der Abgasdruck geringfügig auf ca. 15 mbar, was auf den Ausbau des Partikelfilters zurückzuführen ist.

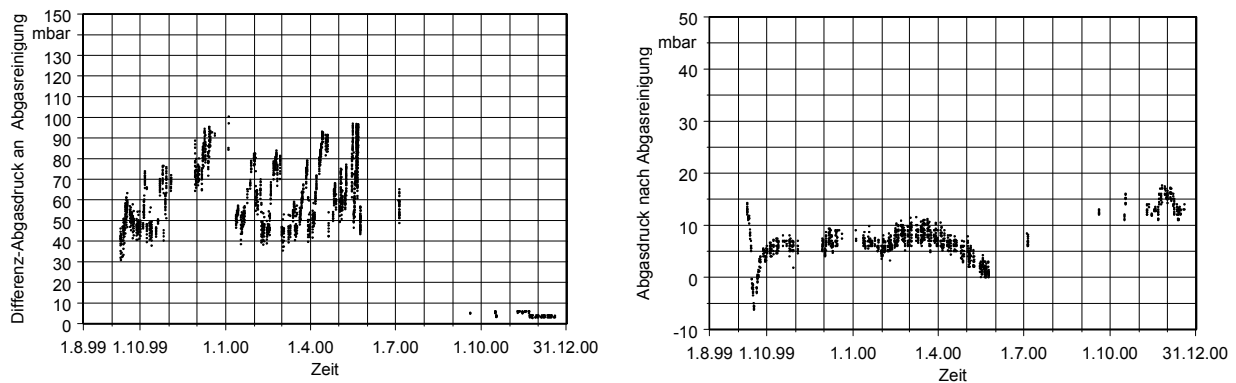


Abbildung 31: Differenz-Abgasdruck an der Oxidationskatalysator/Partikelfilter-Einheit (links) und absoluter Abgasdruck vor dem Abgaswärmetauscher (rechts) beim BHKW in Weißenburg

Das BHKW in Weißenstephan weist zu Beginn der Untersuchung einen absoluten Abgasdruck vor dem Abgaswärmetauscher von ca. 35-40 mbar auf (Abbildung 32). Im Februar 2000 ist ein deutlicher Anstieg auf Werte nahe 70 mbar zu beobachten. Anschließend geht der Abgasdruck wieder kontinuierlich zurück und pendelt sich ab Juni 2000 wieder nahe den Ausgangswerten bei etwa 40-45 mbar ein. Beim BHKW in Greußenheim konnte der Abgasgegendruck nicht erfasst werden, da die Druckaufnehmer (Messbereich 0-200 mbar) dort nur kurze Zeit funktionsfähig waren.

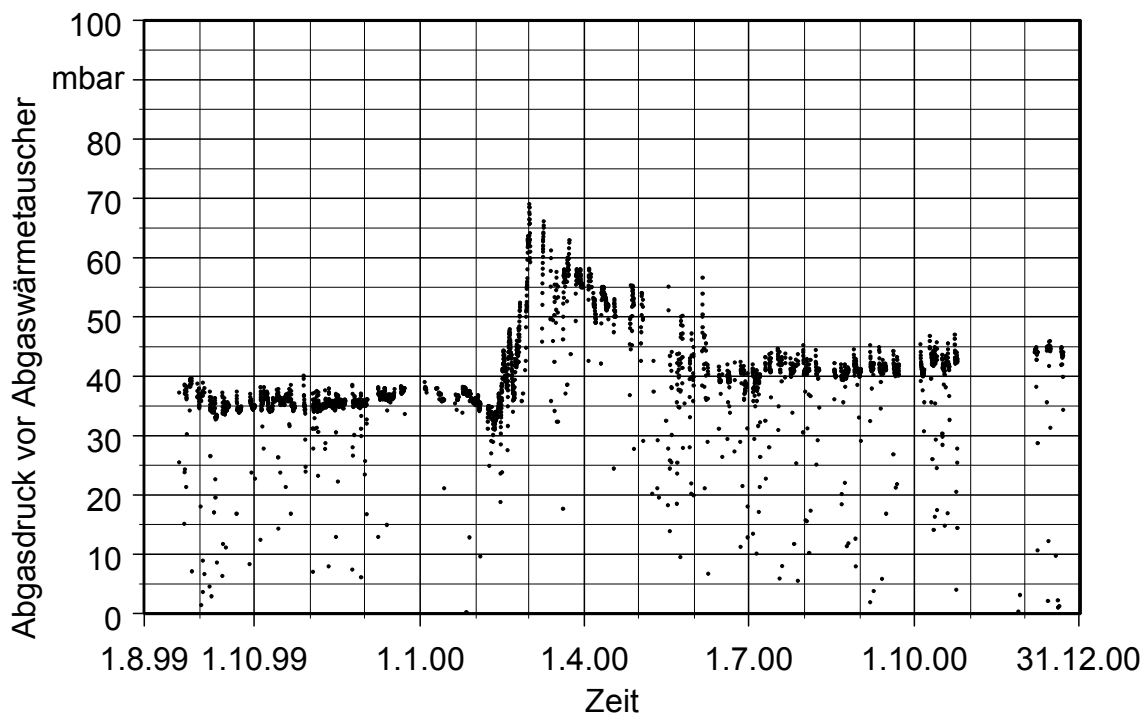


Abbildung 32: Abgasdruck vor dem Abgaswärmetauscher beim BHKW in Weihestephan

### Kraftstoffverbrauch

Die Kraftstoffverbräuche der BHKW sind in Abbildung 33 dargestellt. Für das BHKW in Weißenburg ( $110 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) ergibt sich ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von  $30,6 \text{ l/h}$  mit einer Bandbreite der Monatsmittel zwischen  $29,3$  und  $31,2 \text{ l/h}$ . Für das BHKW in Greußenheim ( $60 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) wurde während des Betriebs mit  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von  $12,9 \text{ l/h}$  ( $12,8\text{--}13,0 \text{ l/h}$ ) und ab Oktober bei einer eingestellten elektrischen Leistung von  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$   $15,8 \text{ l/h}$  ermittelt. Das BHKW der Landtechnik in Weihestephan weist einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von  $3,1 \text{ l/h}$  mit einer Schwankungsbreite der Monatsmittel von  $2,9\text{--}3,2 \text{ l/h}$  auf.

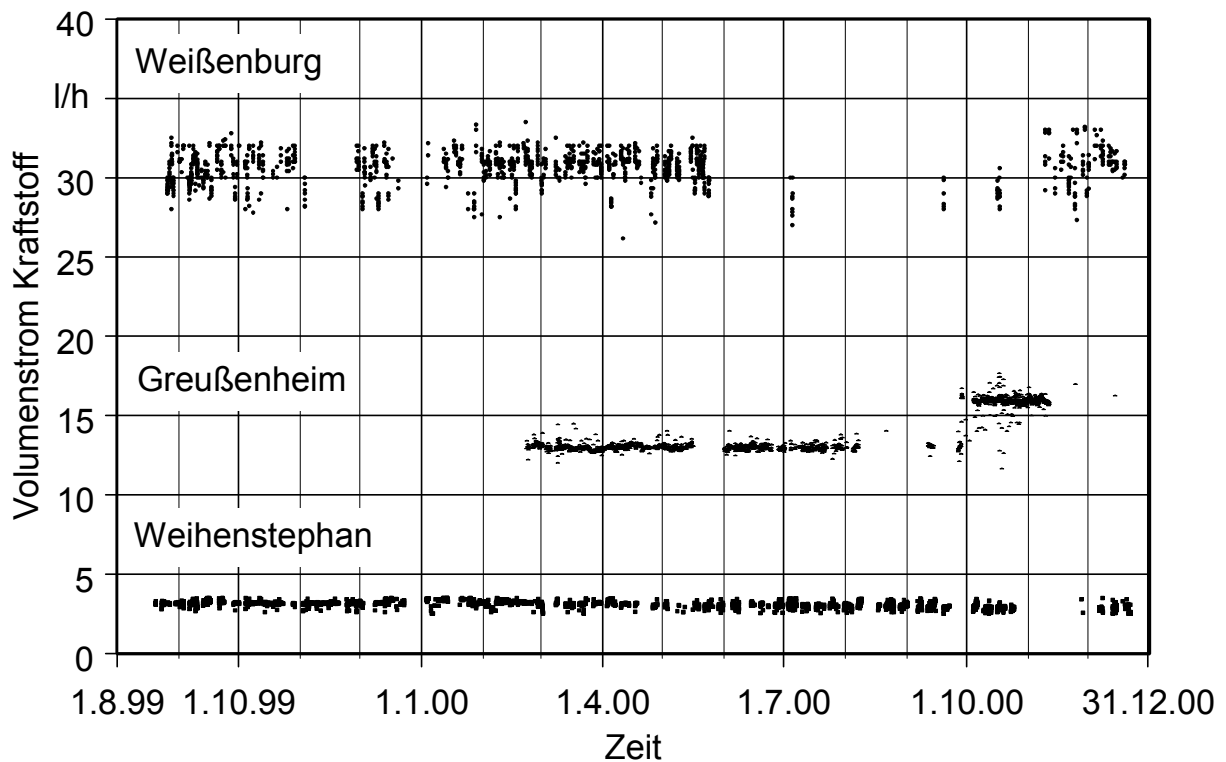


Abbildung 33: Kraftstoffverbrauch der drei untersuchten BHKW

### Elektrische Leistung

Die beim BHKW in Weißenburg und Greußenheim vom Generator erzielte elektrische Leistung ist in Abbildung 34 dargestellt. Demnach ergibt sich für das BHKW in Weißenburg eine mittlere elektrische Leistung von  $107,4 \text{ kW}_{\text{el}}$  und für das BHKW in Greußenheim  $39,8 \text{ kW}_{\text{el}}$  vor bzw.  $49,8 \text{ kW}_{\text{el}}$  nach der Leistungserhöhung.

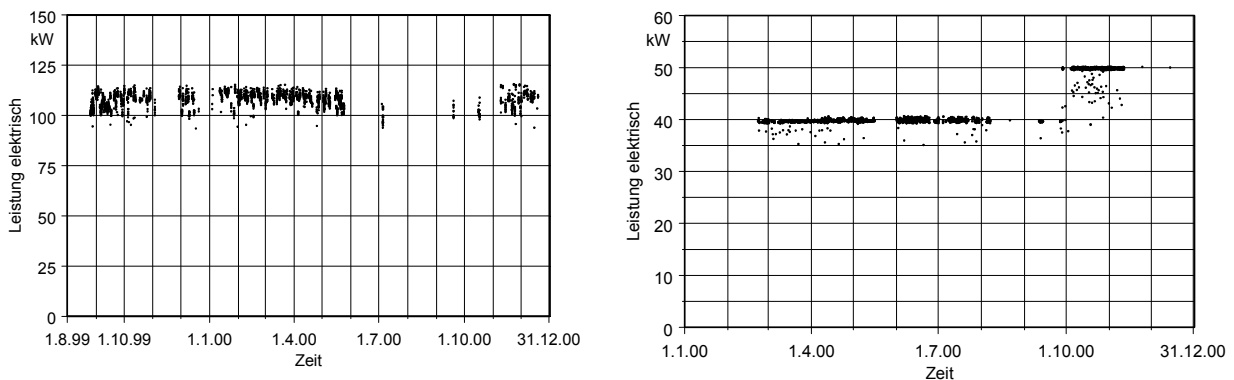


Abbildung 34: Abgegebene elektrische Leistung des Generators des BHKW in Weißenburg (links) und des BHKW in Greußenheim (rechts)



### Wirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad zusammen, die aus den Quotienten der elektrischen bzw. thermischen Leistung und der eingesetzten Brennstoffwärmeleistung gebildet werden. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 35, Abbildung 36, Abbildung 37) sind der elektrische Wirkungsgrad sowie der Gesamtwirkungsgrad als Zehntelstundenmittelwerte beim BHKW in Weißenburg und als Stundenmittelwerte bei den anderen beiden BHKW über den Untersuchungszeitraum aufgetragen.

Demnach weisen die BHKW in Weißenburg und Greußenheim mit 36 bzw. 32 % höhere elektrische Wirkungsgrade als das BHKW in Weihenstephan (ca. 26 %) auf. Die Unterschiede erklären sich v.a. durch die effizientere Brennstoffenergieumsetzung von direkteinspritzenden sowie großvolumigen und leistungsstarken Motoren. Beim BHKW in Greußenheim ist ein geringfügiger Anstieg des elektrischen Wirkungsgrades um etwa einen Prozentpunkt ab der Umstellung des Dauerbetriebs von 40 auf 50 kW<sub>el</sub> zu beobachten. Bei Nennlastbetrieb (60 kW<sub>el</sub>) könnte sich der elektrische Wirkungsgrad des Aggregats vermutlich nochmals leicht erhöhen.

Der Gesamtwirkungsgrad beträgt während des Beobachtungszeitraums für das Aggregat in Weißenburg etwa 70 bis 80 %, für das Aggregat in Greußenheim etwa 67 bis 72 % und für das BHKW in Weihenstephan meist mehr als 90 %. Die Schwankungsbreiten der Einzelmesswerte ergeben sich unter anderem aus den wechselnden Betriebsbedingungen. So kann sich z.B. die Temperaturdifferenz des Heizwassers zwischen Vor- und Rücklauf vor allem in den Warmlaufphasen oder bei unterschiedlicher Wärmeabnahme der angeschlossenen Verbraucher mitunter stark verändern. Beim BHKW in Weißenburg macht sich außerdem der Einfluss der Partikelfilterregenerierung bemerkbar, während dieser der Abgasstrom von außen durch die Zugabe von brennbarem Gas aufgeheizt wird, bevor dieser den Abgaswärmetauscher passiert. Deshalb wurde die thermische Leistung des BHKW Weißenburg tendenziell etwas zu hoch ermittelt. Als weitere Ursache für uneinheitliche Mittelwerte kommen Messunsicherheiten in Betracht. Dies gilt insbesondere für das BHKW der Landtechnik Weihenstephan, wo Gesamtwirkungsgrade von über 90 % erreicht wurden, die kaum realistisch erscheinen. Auch nach sorgfältiger Überprüfung der aufgenommenen Daten konnte keine Erklärung für diese Abweichung gefunden werden. Möglicherweise ist die zur Erfassung des Heizwasservolumenstroms eingesetzte Wasseruhr mit einem konstanten Fehlerfaktor behaftet. Um dies zu überprüfen ist ein Eingriff in die Wärmeanbindung vorzunehmen.

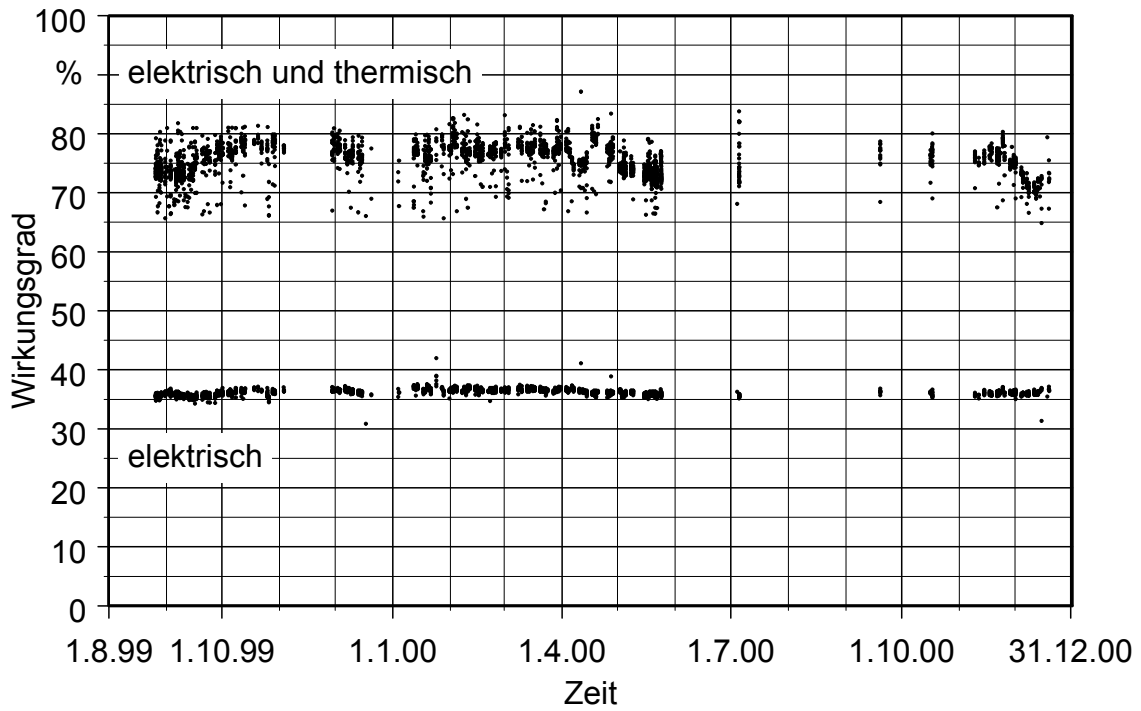


Abbildung 35: Elektrischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad des BHKW in Weißenburg (Zehntelstundenmittelwerte)

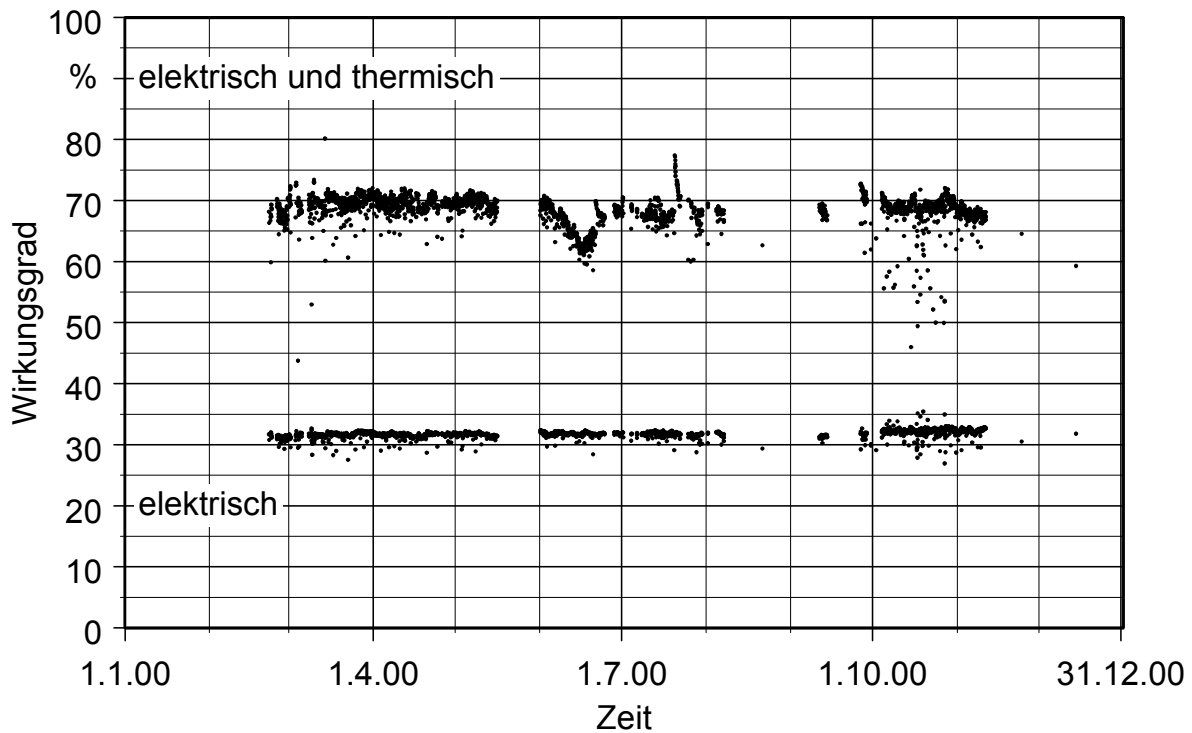


Abbildung 36: Elektrischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad des BHKW in Greußenheim (Stundenmittelwerte)

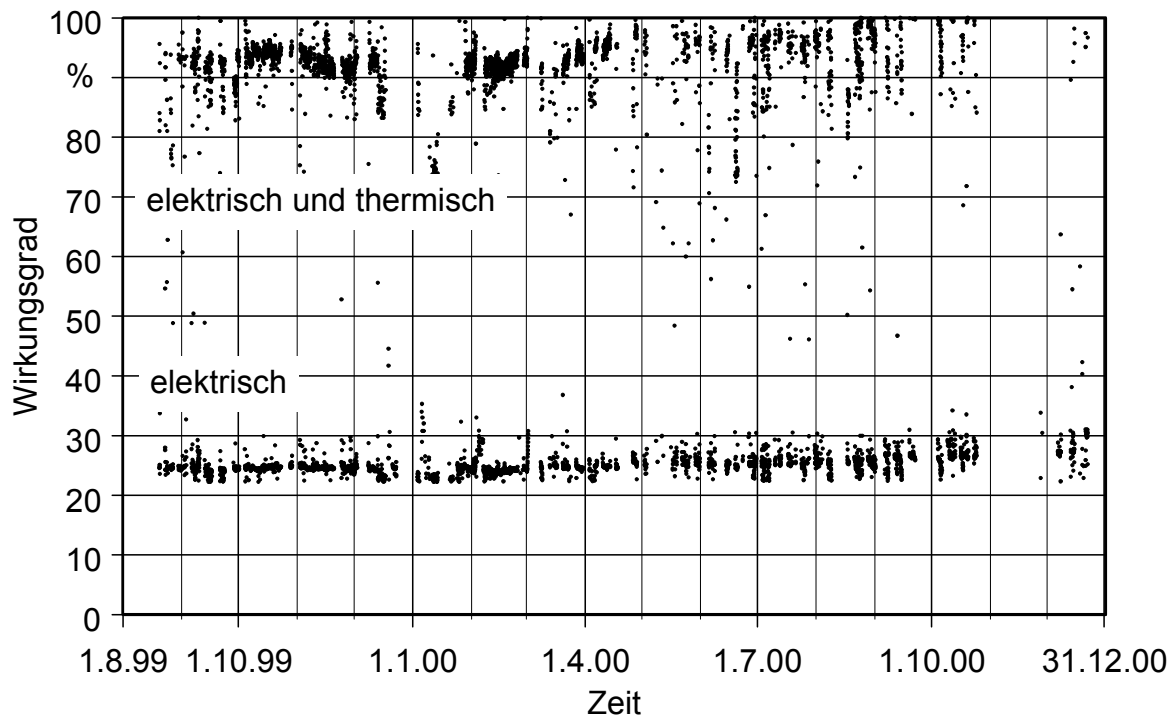


Abbildung 37: Elektrischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad des BHKW in Weihenstephan (Stundenmittelwerte)

### 3.2.3 Instandhaltung

Zur Optimierung von Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit spielt die Instandhaltung der Aggregate eine wesentliche Rolle. Unter Instandhaltung werden die Maßnahmen **Inspektion**, **Wartung** und **Instandsetzung** zusammengefasst [6]. Die Inspektion geht häufig mit Wartung und Instandsetzung einher.

#### 3.2.3.1 Wartung und Inspektion

Wartungsarbeiten und Inspektionen sind gemäß den in den Bedienungsanleitungen der Aggregatehersteller angegebenen Wartungsplänen von geschultem Fachpersonal durchzuführen. Um eventuelle Garantieansprüche geltend machen zu können, darf während der Garantiezeit häufig nur Kundendienstpersonal des Herstellers mit Wartungs- und Reparaturarbeiten betraut werden.

## Wartung

Die Wartungspläne für die drei untersuchten BHKW sind in Tabelle 12 auszugsweise zusammengestellt. Darüber hinaus sind weitere Wartungsarbeiten in den Betriebsanleitungen aufgeführt. Besonders hervorzuheben sind Funktionsüberprüfungen von Kontrollleuchten und Anzeigegeräten, die regelmäßige Überwachung von Betriebsdaten auf Anzeigegeräten sowie Sichtkontrollen auf Mängel (z.B. Undichtigkeit) der Anlagenbauteile. Die Art und Häufigkeit der durchzuführenden Wartungsarbeiten unterscheiden sich bei den drei BHKW (Tabelle 12). Dabei weichen die Angaben der Anlagenbauer oft auch von den Empfehlungen der Motorenhersteller ab. Maßgeblich hierfür sind Ausführung der Anlage, Komponentenwahl, verwendete Betriebsmittel, Betriebsweise, installierte Anlagenüberwachung und bisherige Erfahrungen.

Tabelle 12: Art und Häufigkeit durchzuführender Wartungsarbeiten an den drei untersuchten BHKW (Angaben der Motorenhersteller in Klammern) (Auszug aus den Betriebsanleitungen)

Art der Wartungsarbeit	Häufigkeit der Arbeiten in Betriebsstunden [h]		
	Weißenburg	Greußenheim	Landtechnik
Motorölstand kontrollieren	täglich	--	150
Kühlwasser kontrollieren	täglich	--	150
Dichtheit der Leitungen prüfen	150	--	150
Motoröl wechseln	150 (600)	300	300 (150)
Motorölfilter wechseln Nebenstromfilter wechseln	150 (600)	300	300
Kraftstofffilter wechseln	150 (bei Bedarf)	600	600 (400)
Kraftstoffvorfilter reinigen	(150)	--	--
Vorfilter der Kraftstoffförderpumpe reinigen	(150)	--	--
Luftfilter prüfen, ggf. wechseln	täglich bei Bedarf	600	900
Ventilspiel prüfen, ggf. einstellen	(300)	600	900 (800)
Einspritzpumpe prüfen, ggf. einstellen	(1200)	1200	--
Einspritzdüsen prüfen/abdrücken	1200	1200	900
Abgaswärmetauscher reinigen	bei Bedarf	1200	bei Bedarf
Batterie prüfen	150	--	300 (100)
Kompression messen	--	4800	--
Kraftstoffpumpe erneuern	--	4800	--

Bei vielen Aggregaten wird bei Überschreiten einer bestimmten Betriebsstundenzahl auf eine anstehende Wartung durch eine Anzeige oder Warnlampe hingewiesen. Für die Durchführung regelmäßiger Wartungsarbeiten ist meist örtliches Wartungspersonal zuständig. Größere Inspektionen, Wartungen und Reparaturen erledigen, je nach Art und Umfang der Arbeiten, Fachfirmen aus der Region oder Kundendienstpersonal der Anlagenbauer bzw. Motorenhersteller.

### Inspektion

Unter „Logbucheinträge“ werden im Folgenden alle routinemäßigen und außerordentlichen Inspektionen zusammengefasst, bei denen entweder Störungen registriert bzw. behoben wurden, sowie Ereignisse, die den Einsatz von Personal erforderten (wie z.B. Kraftstofflieferungen). Mithilfe der Aufzeichnungen in den Logbüchern können Betriebszeitkurven ermittelt werden, anhand der der Verlauf der Betriebsstunden während des gesamten Betriebszeitraums der BHKW abgebildet werden kann. Während der ersten Monate nach Betriebsbeginn wies das Aggregat in **Weißenburg** hohe Laufzeiten auf, was in Abbildung 38 anhand des flachen Kurvenverlaufs bis etwa 1000 Betriebsstunden erkennbar ist.

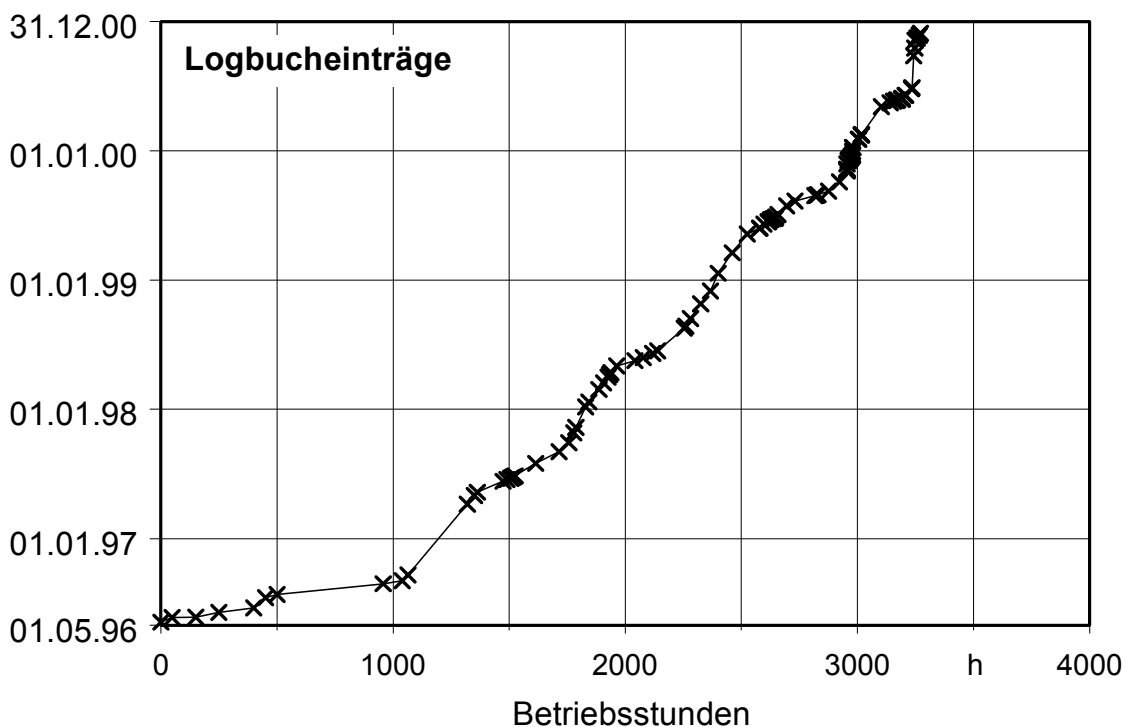


Abbildung 38: Betriebsstundenverlauf während des Betriebszeitraums mit dokumentierten Ereignissen (Logbucheinträge) beim BHKW Weißenburg

Im Winterhalbjahr dagegen, wenn das Aggregat lediglich zur Spitzenstromabdeckung betrieben wird, werden nur wenige Betriebsstunden erreicht. In den Sommermonaten der darauffolgenden Jahre erhöht sich die Nutzungsdauer des Aggregats gegenüber dem Winterbetrieb, erreicht aber nicht die hohe Auslastung des ersten Betriebshalbjahres. Dies ist zum Teil auf die nachträglich installierte Kollektorfläche im Freibad zurückzuführen, die zusätzlich Wärme für die Schwimmbeckenbeheizung liefert. Eine regelmäßige Aufzeichnung von BHKW spezifischen Ereignissen erfolgt seit Juni 1997.

Im Gegensatz zu Weißenburg erhöht sich die durchschnittliche tägliche Laufzeit des Aggregats in **Greußenheim** mit zunehmenden Betriebsstunden, was an dem flacher werdenden Verlauf der Kurve in Abbildung 39 zu sehen ist. Aufgrund des steigenden Wärmebedarfs der neu an die Wärmeversorgung angeschlossenen Wohnhäuser erhöht sich die Auslastung des BHKW. Die Anzahl der dokumentierten Ereignisse hat in Greußenheim Ende 1999 stark zugenommen. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass seit diesem Zeitpunkt eine routinemäßige Inspektion der Anlage mit entsprechender Aufzeichnung erfolgt.

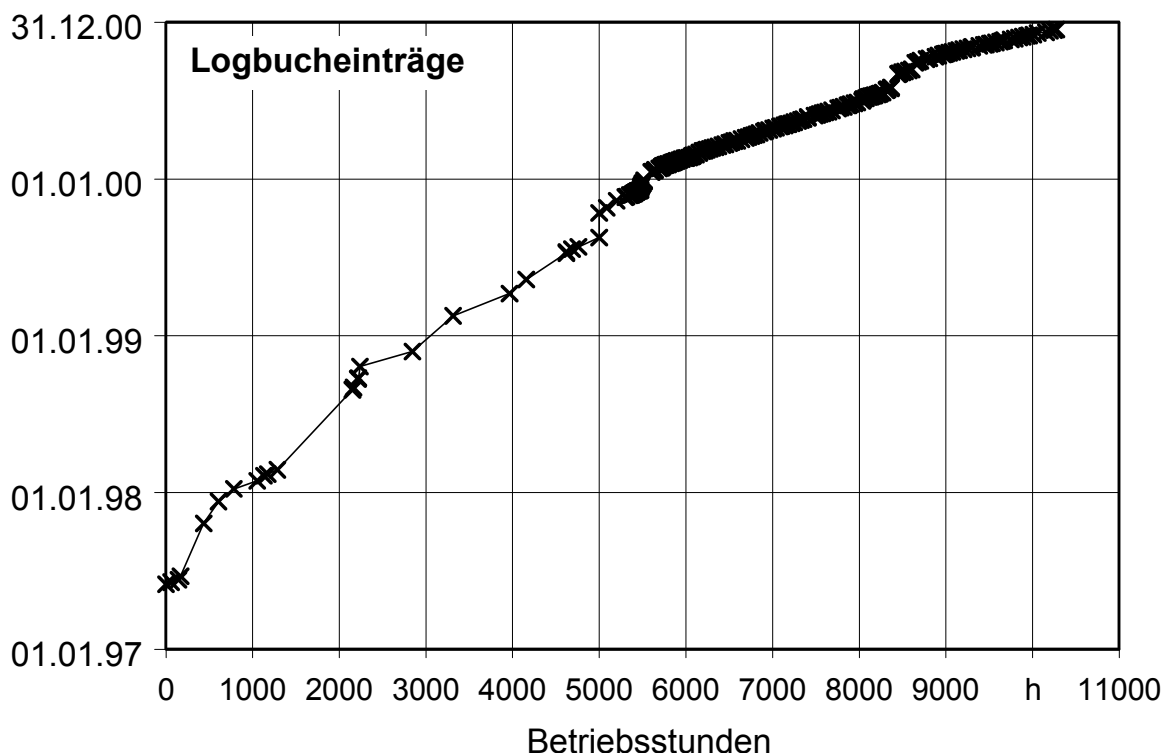


Abbildung 39: Betriebsstundenverlauf während des Betriebszeitraums mit dokumentierten Ereignissen (Logbucheinträge) beim BHKW Greußenheim

Das BHKW in **Weihenstephan** weist einen weitgehend linearen Betriebszeitenverlauf auf mit einem leichten Rückgang der Auslastung im Frühjahr 2000 (Abbildung 40). Seit Beginn der Inbetriebnahme werden die beobachteten Ereignisse regelmäßig in ein Logbuch eingetragen.

Vergleicht man die Häufigkeit der Logbucheinträge der drei BHKW miteinander, so sind die unterschiedlichen Laufleistungen der Aggregate zu berücksichtigen. Die Häufigkeit der dokumentierten Ereignisse weist darauf hin, dass eine regelmäßige Betreuung der BHKW notwendig ist. Auch bei Aggregaten mit geringer täglicher Auslastung sind Routine-Inspektionen in kurzen Intervallen erforderlich, um rechtzeitig Maßnahmen zur Beseitigung von Störungen einleiten zu können.

Art und Umfang der am häufigsten aufgetretenen Störungen sowie die erforderlichen Reparaturen werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

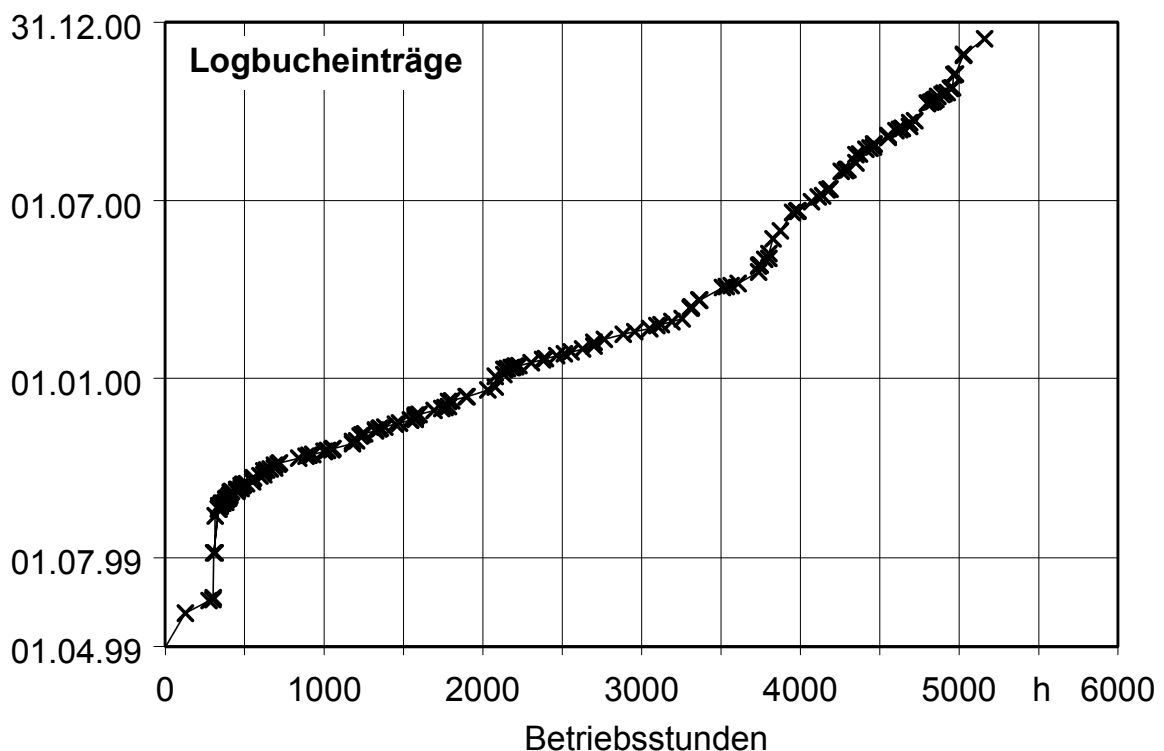


Abbildung 40: Betriebsstundenverlauf während des Betriebszeitraums mit dokumentierten Ereignissen (Logbucheinträge) beim BHKW Weihenstephan

### 3.2.3.2 Störungen und Reparaturen

#### **BHKW Weißenburg**

##### Verunreinigung von Kraftstoff

Im Juni 1996 fielen in Weißenburg nach etwa 400 Bh beide BHKW-Aggregate aufgrund von verstopften Kraftstofffiltern aus. Nach Analyse des Kraftstoffs stellte sich heraus, dass das im Mai gelieferte Pflanzenöl Stärkekörner enthielt. Zur Verunreinigung kam es beim Transport im Tankfahrzeug, das zuvor Schlempe geladen hatte. Die Vermischung von Stärke und Pflanzenöl erforderten die Instandsetzung des gesamten kraftstoffführenden Systems. Neben der Entleerung und Reinigung der Tankanlagen, mussten auch Einspritzpumpen, Ventile, Kraftstofffilter sowie Dichtungen kraftstoffführender Komponenten erneuert werden. Zusätzlich wurden laut Aussagen des BHKW-Anlagenbauers durch den Staubabrieb im Abgas die Beschichtungen der Oxidationskatalysatoren längerfristig so weit geschädigt, dass der Austausch der Oxidationskatalysatoren erforderlich wurde. Gemäß den Angaben des Herstellers konnten in den Partikelfiltern Rückstände von Stärke nachgewiesen werden, wodurch eine Reinigung der Partikelfilter veranlasst wurde. Die gesamte Schadensbehebung erstreckte sich über einen Zeitraum von ca. 80 Tagen. Die dafür anfallenden Kosten beliefen sich auf nahezu 100.000.- DM. Die beiden Aggregate konnten sofern es die Reparaturarbeiten zuließen, im Notbetrieb gefahren werden.

##### Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem

Im Juni 1997 trat die Fehlermeldung „Kraftstoffmangel“ auf, obwohl die Kraftstofffilter kurz zuvor erneuert wurden. Als Ursache wurden bei der Wartung am 21.6.97 Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem festgestellt, so dass Kraftstoffleitungen abgedichtet werden mussten.

##### Kraftstoffförderpumpe

Die Kraftstoffförderpumpe musste am 2.5.1997 nach ca. 1350 Bh repariert werden, was auf Spätfolgen des Schadens durch die Stärke im Kraftstoff zurückgeführt werden kann.



### Einspritzpumpe

Das BHKW Weißenburg ist mit einer Reiheneinspritzpumpe der Firma L'Orange ausgestattet. Diese wurde beim Schadensfall „Stärke im Kraftstoff“ nach 450 Bh ausgetauscht.

### Drehzahlregelung

Wie in Abbildung 41 zu sehen ist, zeigte das Aggregat 2 im Juni 1997 mehrmals die Fehlermeldung „Überdrehzahl“ beim Abschalten des Motors an. Am 25.06.97 war dann das Zuschalten des Generators aufgrund ungenügender Synchronisation nicht mehr möglich. Der Motorhersteller stellte daraufhin am 27.06. die Motordrehzahl an beiden Aggregaten entsprechend ein.

Bei ca. 2600 Betriebsstunden meldete das Aggregat innerhalb von 4 Wochen mindestens fünfmal den Fehler „Überdrehzahl“. Zur Beseitigung der Störung wurde der Drehzahlregler an der Einspritzpumpe am 24.6.99 überprüft und neu eingestellt.

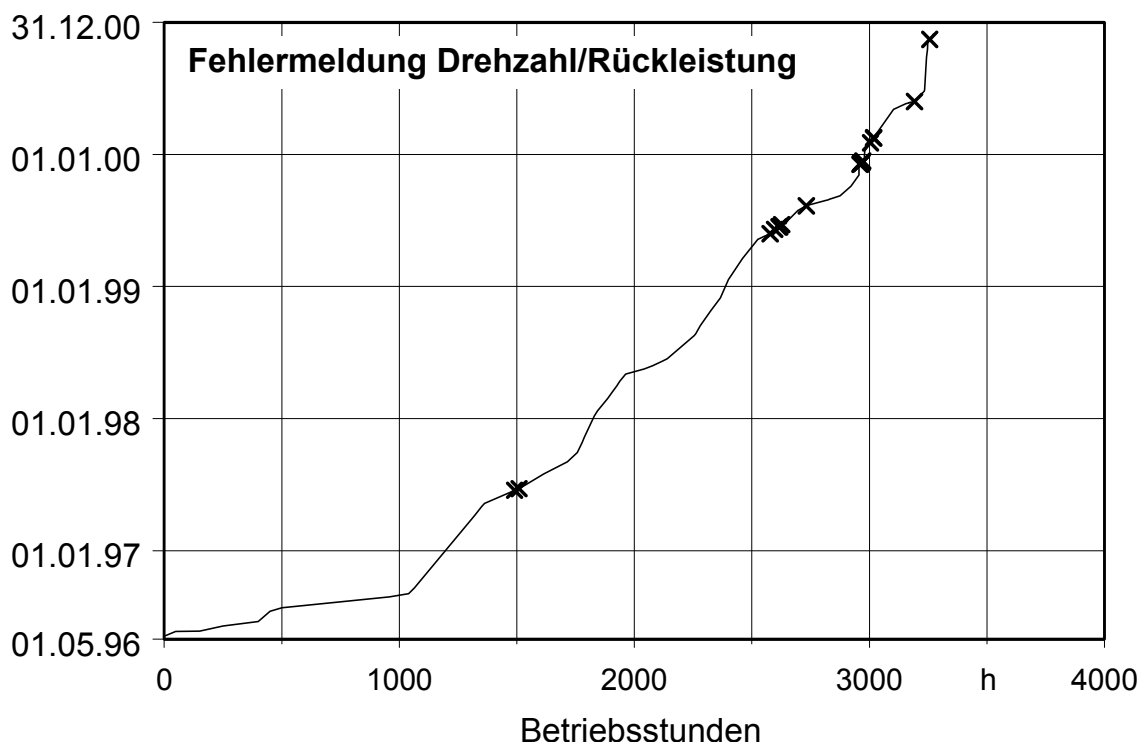


Abbildung 41: Häufigkeit der Fehlermeldung Drehzahl/Rückleistung über den Betriebszeitraum beim BHKW Weißenburg

Bereits im Dezember 1999 trat dann kurz nach erfolgter Einstellung der Einspritzpumpe am 25.11.99 wiederum die Fehlermeldung Überdrehzahl gehäuft auf. Dies deutet darauf hin, dass der Drehzahlregler der Einspritzpumpe die geforderte Drehzahl nicht beibehalten kann, was zum Abschalten des Aggregats führt. Während des Abstellvorgangs, kann es kurzzeitig dazu kommen, dass der Generator den Motor antreibt und deshalb gleichzeitig die Fehlermeldung „Generatorrückleistung“ erscheint. Durch erneutes Einstellen der Einspritzpumpe und Reparatur der Regelstange konnte der Fehler behoben werden. Allerdings traten auch im Kalenderjahr 2000 wiederholt Störungen beim Einregulieren der Drehzahl auf. Im November 2000 musste deshalb bei 3271 Bh wiederum die Einspritzpumpe eingestellt werden.

Die Drehzahlregelung erfolgt am BHKW Weißenburg mechanisch über die Kraftstoffdosierung des Einspritzsystems. Der bei der eingebauten L'Orange Einspritzpumpe eingesetzte Fliehkraftregler verschleißt laut Auskunft eines Fachkundendienst vergleichsweise stark, was ein häufiges Nachjustieren erfordert.

#### Undichtigkeiten im Luft-Abgassystem

Am Aggregat 1 wurden nach 1029 Bh Undichtigkeiten am Rußfilter beseitigt. Bei 1460 Bh (Aggregat 1) und bei 1363 Bh (Aggregat 2) wurden während einer großen Wartung erneut beide Rußfilter abgedichtet. Zusätzlich wurden bei diesem Kundendienst auch die Luftschläuche an den Abgasturboladern erneuert.

#### Partikelfilter (Rußfilteranlage)

Nach der Meldung einer Störung der Rußfilteranlage wurde am 3. September 1997 der defekte Druckmessumformer am Aggregat 1 ersetzt. Dabei wurde auch ein weißes Granulat entdeckt, das sich im Partikelfilter abgelagert hat. Ein Elementscreening des Rückstandes ergab einen Gehalt von 1,5 Masse-% an Calcium und 1,3 Masse-% an Phosphor sowie 0,6 Masse-% Zink und 0,2 Masse-% Magnesium. Zusätzlich wurden auch noch eine Vielzahl weiterer Elemente wie Eisen, Kupfer, Chrom, Kalium mit Anteilen von 0,01 bis 0,03 Masse-% nachgewiesen. Die Zusammensetzung der gefundenen Elemente deutet darauf hin, dass diese unter anderem auf Motorenverschleiß oder auf verbrannte Additivkomponenten aus dem Motoröl zurückzuführen sind. Außerdem können diese Ablagerungen (insbesondere Phosphor) von Verbrennungsrückständen des Pflanzenölkraftstoffs stammen, da diese z.B. auch in Abgasanlagen von Pflanzenölbrennern nachgewiesen wurden.

Am häufigsten traten Störungen beim BHKW in Weißenburg bei der Rußfilterregenerierung auf. Ab etwa 2600 Bh erfolgte fast täglich eine Störmeldung, die die Rußfilterregenerierung betraf (Abbildung 42). Eine Fehleranzeige erfolgt, wenn der Abgasdiffe-

renzdruck nach der Regenerierung zu hoch oder das Intervall zwischen zwei Regenerierungen zu klein ist. Laut Anlagenbeschreibung wird die Fehlermeldung Rußfilter-Regenerierung dann ausgelöst, wenn der Abgasdifferenzdruck am Rußfilter 5 Minuten lang größer als 39 mbar ist oder die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Regenerierungen weniger als 240 min beträgt. Durch die Ansammlung der oben genannten unverbrennbaren granulatartigen Rückstände im Rußfilter kann der Abgasgedruck derart zunehmen, dass die Intervalle zwischen zwei Rußfilterregenerierungen immer kürzer werden, solange bis das Aggregat ständig den Fehler „Rußfilter-Regenerierung“ meldet. Dann ist der Ausbau des Rußfilters und eine Reinigung von Hand unumgänglich.

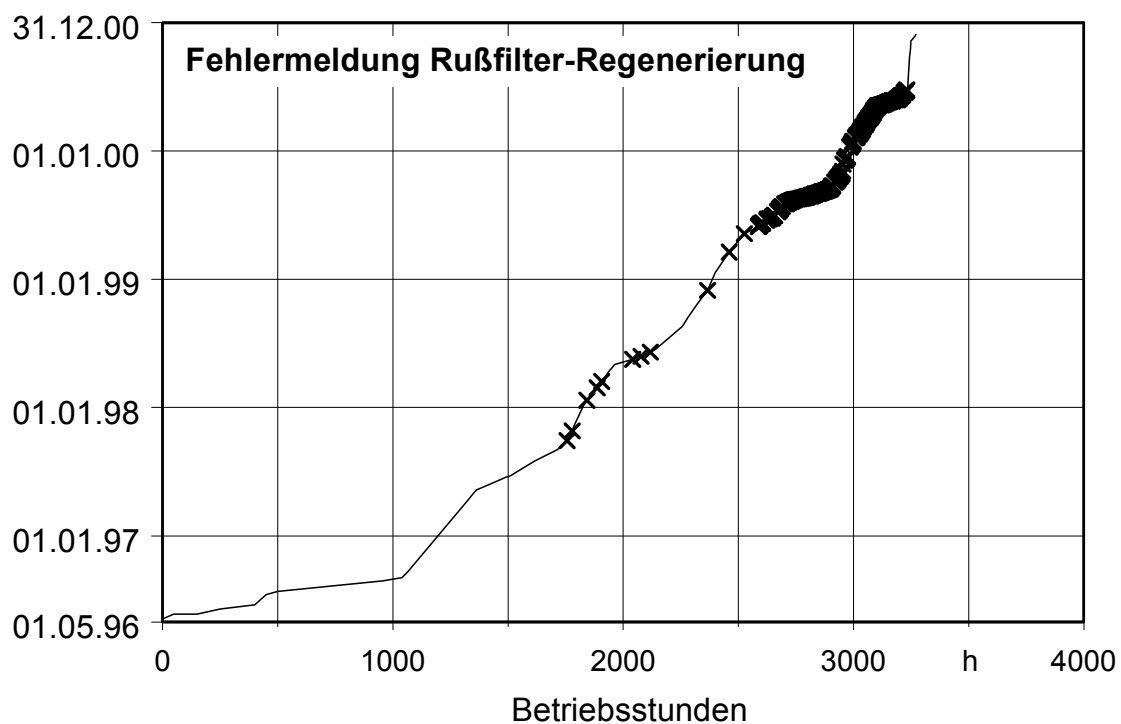


Abbildung 42: Häufigkeit der Fehlermeldung Rußfilterregenerierung über den Betriebszeitraum beim BHKW Weißenburg

In Abbildung 43 ist die Intervallzeit zwischen zwei Rußfilterregenerierungen über den Beobachtungszeitraum zwischen ca. 2600 und 3200 Betriebsstunden dargestellt. Während dieser Zeit wurde die Mindestintervallzeit von 240 min nahezu immer unterschritten, was zur Anzeige des Fehlers führte. Mehrmals wurde der Rußfilter während dieser Zeit ausgebaut und von Hand gereinigt, wodurch die Regenerierungsintervalle wieder kurzzeitig anstiegen.

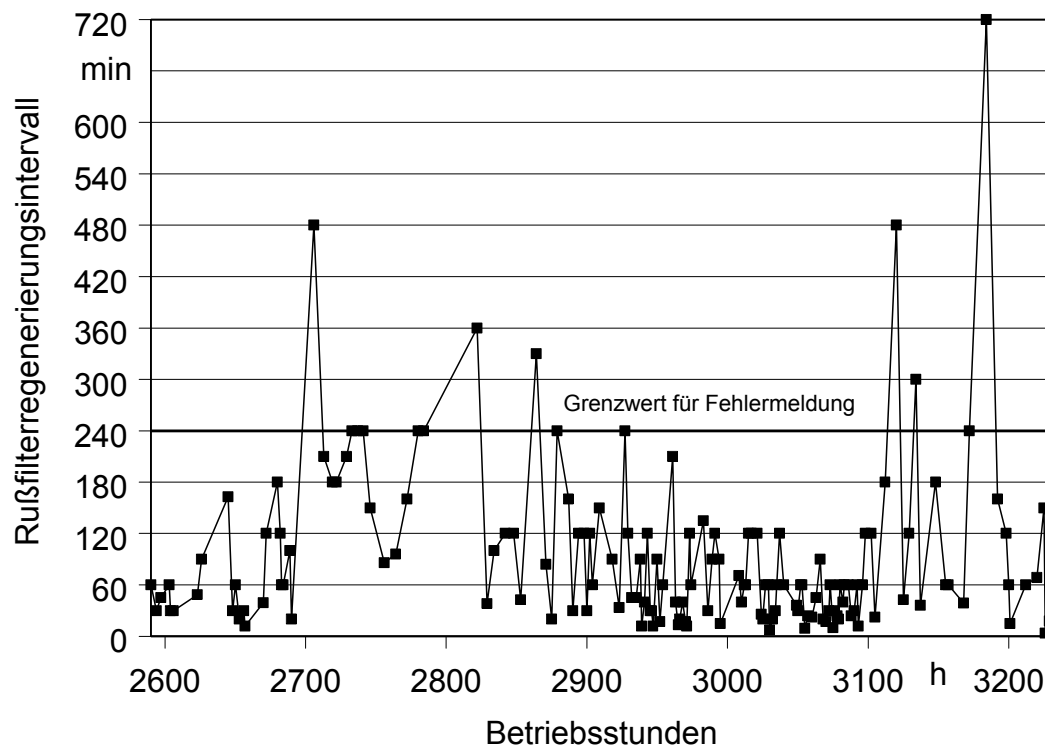


Abbildung 43: Zeitintervall zwischen zwei Rußfilterregenerierungen beim BHKW Weißenburg

Zusätzlich zur Fehlermeldung Regenerierung, trat zwischen 2970 Bh und 2980 Bh sowie zwischen 3140 Bh und 3200 Bh regelmäßig die Fehlermeldung Abgasdruck auf, was auf eine Erhöhung des Abgasgedrucks über den zulässigen Wert von 67 mbar zurückzuführen ist (Abbildung 44).

Ursache für den erhöhten Abgasdruck vor dem Rußfilter ist geschmolzenes metallisches Filtermaterial, das die Strömungskanäle verengt bzw. verschließt. Wie in Abbildung 45 zu sehen ist, treten diese Schmelzablagerungen nach Außen und verkleinern den Durchströmungsquerschnitt sichtbar um insgesamt ca. 5 % (ca. 60 cm<sup>2</sup>). Es ist davon auszugehen dass der Rußfilter im Innern noch stärker geschädigt ist und geschmolzenes Filtermaterial den Strömungsquerschnitt weiter verengt.

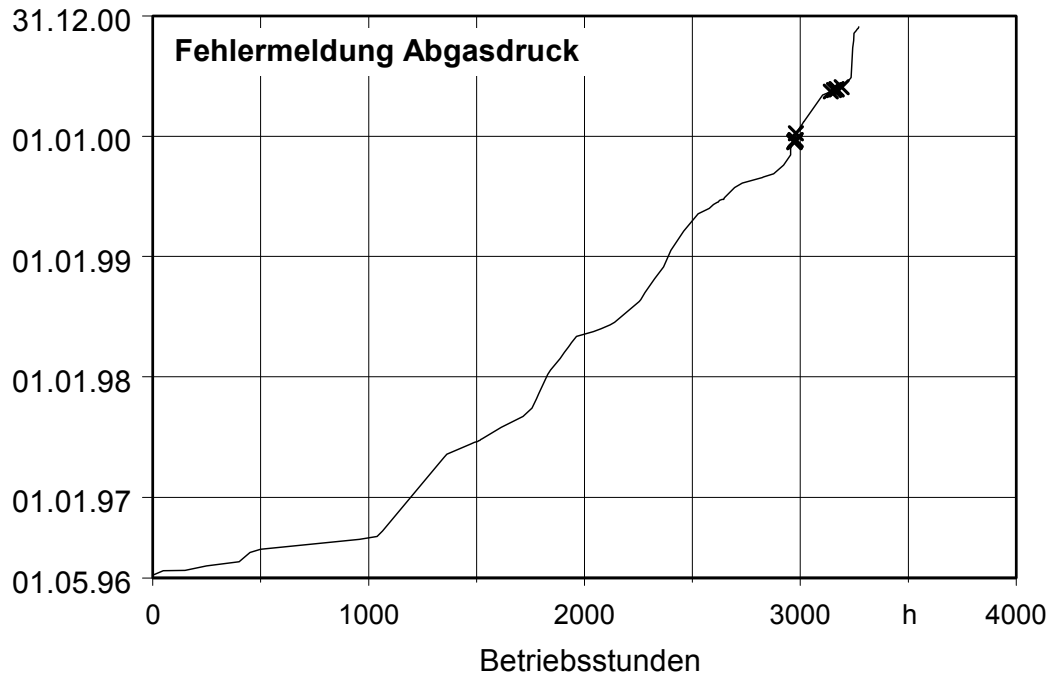


Abbildung 44: Häufigkeit der Fehlermeldung Abgasdruck über den Betriebszeitraum (BHKW Weißenburg)



Abbildung 45: Rußfiltereinsatz des BHKW Weißenburg mit Schmelzablagerungen in den Randbereichen

Derartige Schmelzablagerungen am Rußfilter könnten infolge der rapiden Querschnittsvergrößerung des Abgasstrangs vor dem Rußfilter entstanden sein, die für eine niedrigere Abgasgeschwindigkeit im Randbereich verantwortlich sind. Dort können sich verstärkt Ruß und die oben beschriebenen granulatartigen Verbrennungsrückstände ablagern. Die Ablagerungen wiederum vermindern weiter die Strömungsgeschwindigkeit und führen zum Anstieg des Abgasdrucks vor dem Filter. Die Folge sind kürzere Regenerierungsintervalle und häufigere Gaseindüsung, während der die Abgastemperatur auf bis zu 700 °C ansteigt. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere im Randbereich des Rußfilters lokal noch höhere Abbrandtemperaturen über einen längeren Zeitraum herrschen, da dort der Kühleffekt des Abgases wegen der schlechteren Durchströmung geringer ist und oft auch mehr Ruß angelagert ist, als in zentrumsnahen Bereichen. Dauerhafte Hitzebelastung bzw. örtliche Überhitzung führt schließlich zum Schmelzen des Metalls. Ähnlich, wenn auch weniger drastisch, zeigt sich dieses Schadbild auch am Partikelfilter des zweiten Aggregats (Modul 1). Zum Austausch der beiden Rußfiltereinsätze liegt ein Kostenangebot in Höhe von ca. 35.000 DM vor. Vorerst wurde am 27.06.00 der Rußfiltereinsatz des Aggregats 2 bei 3235 Bh ausgebaut. Seitdem wird dieses Aggregat ohne Partikelfilter betrieben. Generell sind v.a. bei Pflanzenöl-BHKW ausgereifte Rußfiltersysteme gefordert, die besonders hitzebeständig, gut regenerierbar und wartungsfreundlich sind.

#### Undichtigkeiten im Kühlkreislauf

Bei etwa 1500 Betriebsstunden war ein ständiger Verlust von Wasser des Heizkreislaufes zu bemerken, was wöchentlich ein Nachfüllen erforderte. Bei der Wartung am 21.06.97 wurde daraufhin die Leckage eines Sicherheitsventils im Heizwasserkreislauf erkannt und beseitigt.

#### Kühlkreislauf

Ebenfalls im Juni 1997 wurde bemerkt, dass nach dem Abstellen der Aggregate die Rücklaufwassertemperatur auf bis zu 75 °C anstieg. Grund dafür war, dass die Pumpen des Wasserkreislaufs beim Abschalten des BHKW ebenfalls abgestellt wurden. Die notwendige Wärmeabfuhr des sich nur langsam abkühlenden Motors war nicht mehr gegeben. Deshalb wurde fortan eine Nachlaufzeit der Wasserpumpen eingestellt.

#### Batterie

Am Aggregat 1 musste nach 1029 Bh das Ladegerät für die Starterbatterie ausgetauscht werden.

### Anlasser

Im November 1999 zeigte Aggregat 2 die Störung „Fehlstart“ an und konnte nicht mehr gestartet werden. Das Gewinde am Drehzahlverstellregler war verschlissen, so dass keine Drehzahlregelung mehr erfolgte. Ebenso fehlten 3 Zähne am Starterritzel. Auch der Zahnkranz am BHKW-Motor war verschlissen. Ursache könnte laut Auskunft des Kundendienstes eine zu geringe Spannung der Starterbatterie gewesen sein, aufgrund der die Schubbewegung beim Einspuren unterbrochen wurde. Bei erneuten Einspurversuchen war es dann möglich, dass durch die Drehbewegung des Startermotors das Starterritzel und der Zahnkranz am BHKW-Modul beschädigt wurden.

### **BHKW Greußenheim**

#### Flockenförmige Rückstände im Kraftstoff

Fehlermeldungen am BHKW in **Greußenheim** betrafen vorrangig die Kraftstoffversorgung. Ab etwa 5400 Bh schaltete das Aggregat mehrfach wegen Kraftstoffmangel ab (Abbildung 46).

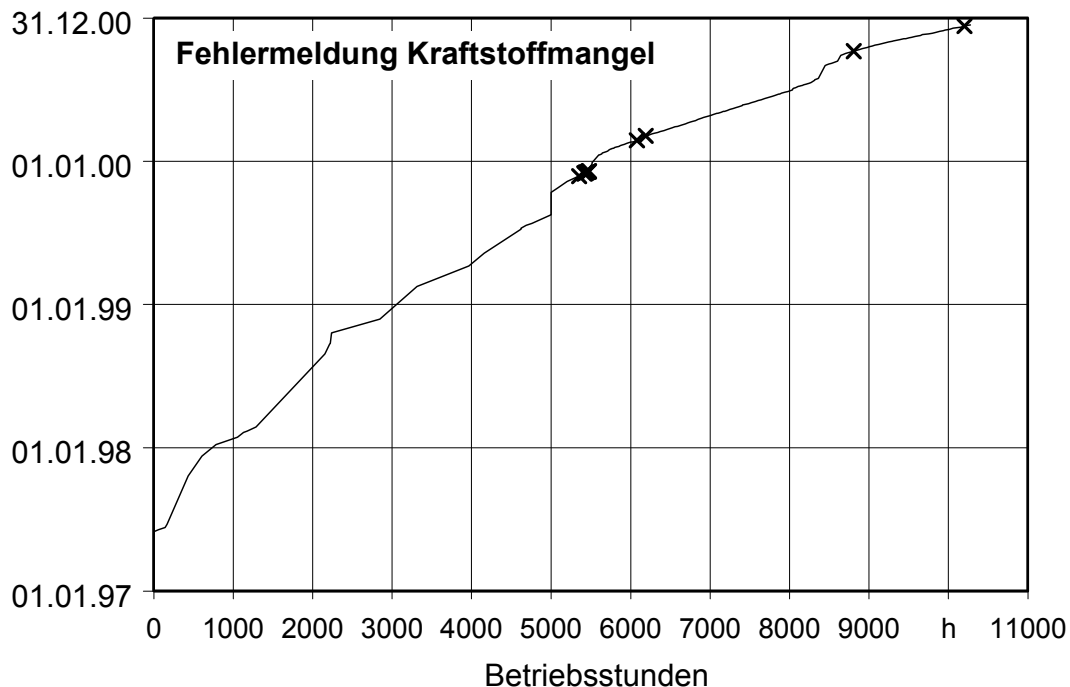


Abbildung 46: Häufigkeit der Fehlermeldung Kraftstoffmangel über den Betriebszeitraum beim BHKW Greußenheim

Bei den nächsten Startvorgängen musste von Hand die Kraftstoffförderpumpe betätigt werden, damit für den Startvorgang ausreichend Kraftstoff zur Verfügung stand. Das Aggregat lief während dieser Zeit innerhalb einer Woche täglich etwa nur 8 Stunden, bevor es wieder wegen Kraftstoffmangel abschaltete. Beim Reinigen der Kraftstoffförderpumpe wurden flockenförmige dunkle Rückstände entdeckt. Daraufhin wurde ein Dieselfilter mit Schauglas vor die Kraftstoffförderpumpe angebaut, in dem sich weiterhin mehrere bis zu ca. 1 cm große Teilchen, die in den Kraftstoffleitungen mitgeführt wurden, ansammelten und täglich entfernt werden mussten (Abbildung 47). Eine Ursache für das gehäufte Auftreten der Flocken im Pflanzenöl könnte sein, dass nachdem am 24.11.99 das Aggregat wegen Kraftstoffmangel abgestellt hat, geringe Mengen Heizöl EL in den Vorratstank gegeben wurde. Dadurch könnten sich Ablagerungen im Tagestank und in den Leitungen gelöst haben, die zur Verstopfung von Filter und Pumpe führten. Möglicherweise konnten diese Ablagerungen auch aufgrund des sinkenden Pegelstands im Tagestank in die Ansaugleitung gelangt sein. Am 25. März wurde der Kraftstofffilter gewechselt. Ab diesem Zeitpunkt stellte sich ein deutlich niedrigerer Kraftstoffdruck ein (Abbildung 48).



Abbildung 47: Flockenförmige Ablagerungen im Kraftstoffvorfilter vor der mechanischen Kraftstoffförderpumpe am BHKW Greußenheim



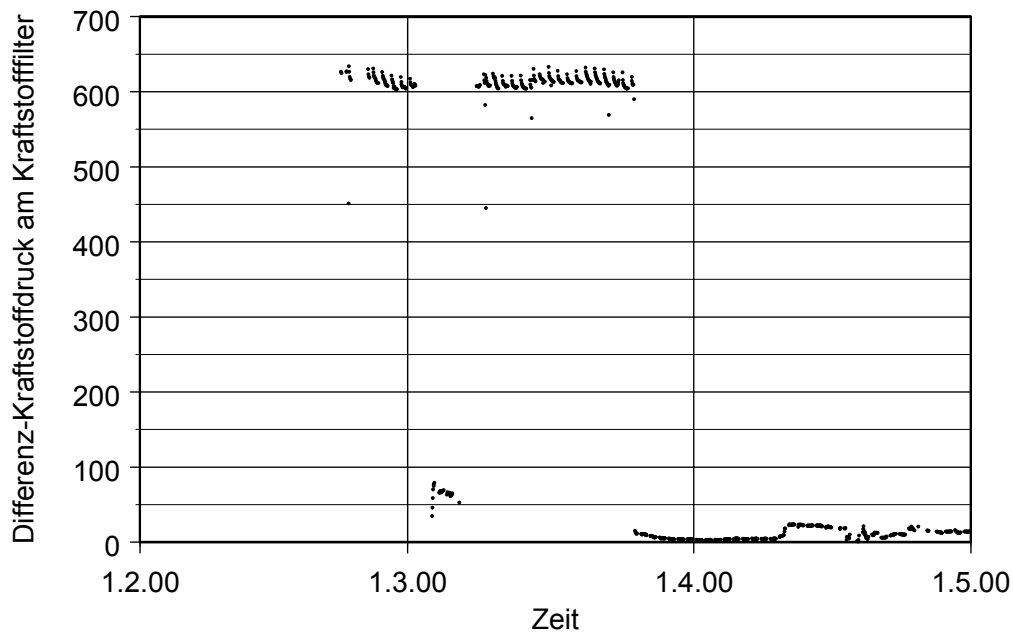


Abbildung 48: Differenz-Kraftstoffdruck am Kraftstofffilter beim BHKW Greußenheim

### Kraftstoffleitungen

Beim BHKW in Greußenheim führte eine mangelhafte Kraftstoffzuführung mehrfach zu Problemen. Neben der Verstopfung von Kraftstoffleitungen durch gelöste Ablagerungen wurde auch immer wieder Lufteintrag in die Kraftstoffzuleitung festgestellt. Bei 1130 Bh konnte das Aggregat nicht gestartet werden. Nach einer Entlüftung von Kraftstoffpumpe und Leitungen war die Störung behoben. Das Abdichten und Entlüften der Kraftstoffleitungen war noch mehrmals erforderlich. Dies brachte jedoch nicht immer den gewünschten Erfolg. So wurden z.B. bei 5352 Bh die Kraftstoffleitungen abgedichtet und entlüftet. Wenige Betriebsstunden später bei 5402 Bh wurden dann die Kraftstoffleitungen teilweise erneuert. Die ungenügende Treibstoffversorgung kann mitunter auch auf die oben genannten flockenförmigen Bestandteile im Pflanzenöl zurückzuführen sein. Dennoch wurden bisher mindestens viermal Teile der Kraftstoffleitungen ausgetauscht, da sie undicht waren und auf der Saugseite der Kraftstoffförderpumpe Luft eintrat. Auch diese Maßnahmen konnten trotz regelmäßiger Kraftstofffilterwechsel im Turnus von ca. 300 Bh die immer wieder auftretenden Störungen in der Kraftstoffzufuhr nicht dauerhaft beseitigen.

### Kraftstoffförderpumpe und Einspritzsystem

Bei 2152 Bh war die Elektro-Kraftstoffpumpe, die das Pflanzenöl aus dem Vorratstank in den Tagestank fördert, defekt und wurde daraufhin ausgetauscht. Daneben musste auch einmal bei 5200 Bh die mechanische Kraftstoffpumpe aufgrund eines Schadens ersetzt werden.

### Einspritzsystem

Auch an den Druckleitungen zwischen Einspritzpumpe und Düsenhaltern wurden jeweils an den Verschraubungen Rückstände von Pflanzenöl sichtbar, die auf Leckagen hindeuten (Abbildung 49). Zwar ist dies nicht unbedingt als schwerwiegende Schwachstelle des Einspritzsystems zu sehen, dennoch können aber verharzte Pflanzenölrückstände im Einspritzsystem (z.B. bei längerem Aggregatstillstand) zu Verstopfungen oder auch zu erhöhtem Verschleiß von Pumpenbauteilen oder Düsen führen.

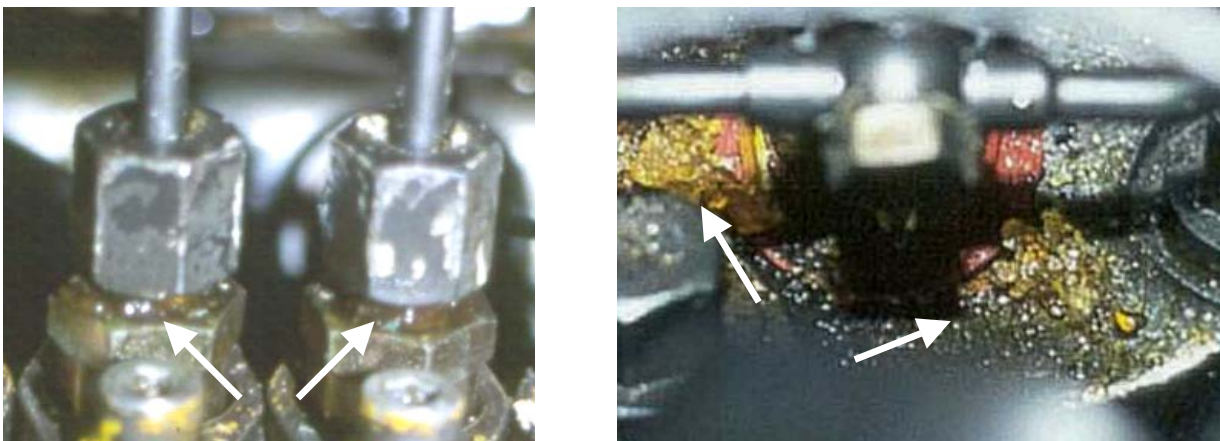


Abbildung 49: Pflanzenölrückstände an den Einspritz-Druckleitungen (links) und Düsenhaltern (rechts) beim BHKW Greußenheim

Die Einspritzdüsen des BHKW in Greußenheim wurden im Beobachtungszeitraum sechsmal erneuert. Auffällig dabei sind die beiden kurzen Wechselintervalle zwischen ca. 7500 und 8700 Bh. Dies war erforderlich, da die Einspritzdüsen bereits nach wenigen Einsatzstunden starke Rußanlagerungen und Verkokungen zeigten (Abbildung 50). Zudem waren Blaufärbungen an den Düsen erkennbar, die auf eine starke thermische Belastung hindeuten. Alle Einspritzdüsensätze, die bisher verwendet wurden sind gleicher Bauart, so dass der höhere Verschleiß weniger auf das Düsenmaterial, als vielmehr auf eine schlechtere Verbrennung (Rußablagerung, Verkokung) oder auf eine verminderte Wärmeabfuhr (Blaufärbung, Verkokung) zu-

rückzuführen sein kann. Beim Wechsel der Einspritzdüsen wurde vom Durchführenden auch ein Festsitzen der Düsenadel in der Führung bemerkt. Laut Auskunft eines Angestellten der Gemeinde Greußenheim, war nach Einbau der Düsen nach zwei Tagen eine stärkere Rauchfahne am Schornstein sichtbar, was ebenfalls auf ein verschlechtertes Verbrennungsverhalten schließen lässt.

### Drehzahlregelung

Am BHKW in Greußenheim wurde mehrmals die Drehzahlregelung an der Einspritzpumpe eingestellt, nachdem das Aggregat bei 783 Bh nicht startete, ein anderes Mal bei 1285 Bh zu geringe Leistung brachte (ca. 50 % der eingestellten Nennleistung) und bei 8448 Bh mehrfach wegen Abgas- und Motorübertemperatur abschaltete. Im September 2000 konnte wieder die Leistung des BHKW nicht konstant gehalten werden. Laut Aussagen eines Angestellten der Gemeinde Greußenheim war die Regelstange zur Drehzahlregulierung an der Einspritzpumpe defekt und musste deshalb ausgetauscht werden.

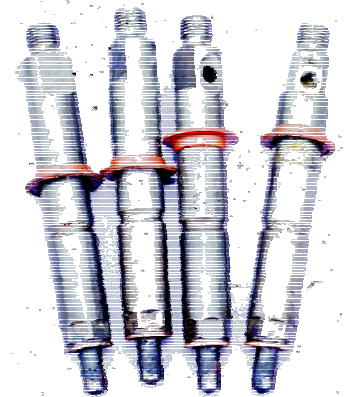
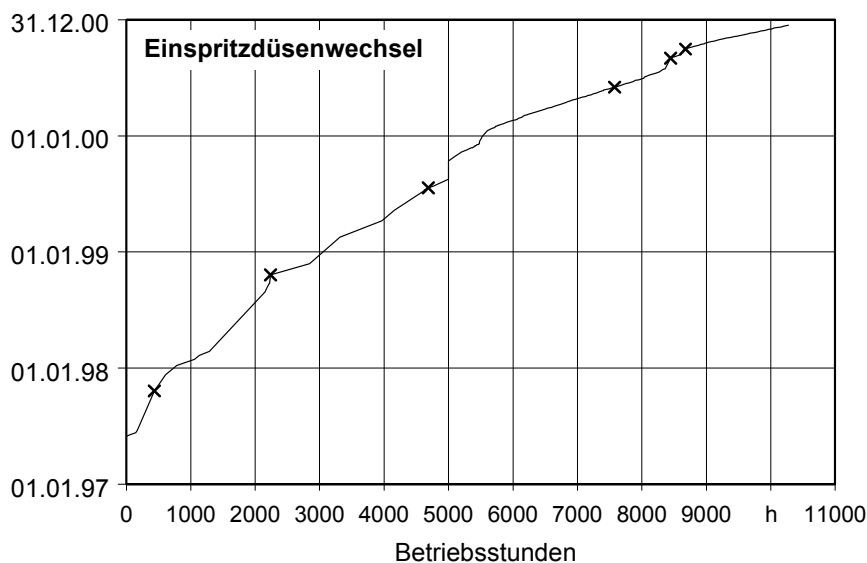


Abbildung 50: Häufigkeit des Einspritzdüsenwechsel (links) und Düsenhalterkombinationen mit verkokten Düsen (rechts) am BHKW in Greußenheim

### Schmierölversorgung

Bei 60 Bh erlitt die Ölpumpe des BHKW in Greußenheim einen Lagerschaden, so dass ein Austausch erforderlich wurde. Bei 4600 Bh wurde der Öldruckmanometer aufgrund von zu großen Ungenauigkeiten am Anzeigergerät gewechselt.

Während des Betriebszeitraums musste mehrfach die Vorrichtung zur automatischen Ölnachfüllung instandgesetzt werden, da ein ausreichendes Nachfließen des Schmieröls nicht immer gewährleistet war. Bei 2240 Bh wurde deshalb der Füllstandsgeber der automatischen Ölnachfüllung ausgetauscht. Auch das Entlüftungsventil des Schmieröl-Vorratstanks wurde einmal gewechselt. Sowohl das Befüllen mit frischem, als auch das Abpumpen (Handpumpe) von gebrauchtem Motoröl war immer wieder mit Schwierigkeiten verbunden, so dass die Einrichtung zur automatischen Ölnachfüllung zeitweise nicht einsatzfähig war. Der Ölwechsel und das Auffüllen von Frischöl erfolgte während dieser Zeit herkömmlich von Hand.

#### Motorschaden durch Überhitzung

Am 16. August 1999 stellte das Aggregat mit der Fehlermeldung „Öldruckmangel“ ab und lies sich nicht mehr starten. Laut Auskunft von Wartungspersonal waren kurz zuvor Klappergeräusche am Motor zu vernehmen. Am 18. August fand dann ein vor Ort Termin mit der Landtechnik Weihenstephan, dem Betreiber und Anlagenbauer statt, wo auch Kraftstoff- und Motorölproben entnommen wurden.

Im Herbst 2000 wurde der Motor nach Klärung der Kostenübernahme vom Motorenhersteller geöffnet und begutachtet. Im Gutachten des Motorherstellers heißt es, dass der Pflanzenölmotor trotz Ölanbackungen im Kurbelgehäuse, wie sie bei der Übersäuerung des Schmieröls infolge von Kraftstoffeintrag hervorgerufen werden können, noch gute Laufbilder der Lagertechnik zeigte. Im Kühlwasserraum des Kurbelgehäuses und an den Laufbuchsen war ein starker Rostansatz durch die Nichtverwendung der empfohlenen Kühlmittelzusätze gegen Korrosion, Kavitation und Kälte entstanden. Während des Motorbetriebs kam es zu einer starken Ausdehnung des Kolbengleitschuhs aus Aluminium, was durch die Überhitzung des Kühlmediums, infolge von Kühlwassermangel, Kochen des Kühlmediums und einer veränderten Strahlungswärmeabfuhr der Außenhaut durch zu hohe Umgebungstemperatur ( $> 45\text{ °C}$ ) hervorgerufen wurde. Die permanente Überhitzung des Aluminiumteiles führte an einem Zylinder schrittweise zum Ausbrechen der Lauffläche, was die Klappergeräusche verursachte. Durch den Überhitzungsschaden und den Folgeereignissen sind Kolben, Laufbuchsen, Zylinderköpfe, Stößelstangen, Pleuelstangen und diverse Dichtungen teilweise zu erneuern. Für den zukünftigen Betrieb empfiehlt der Motorenhersteller den ordnungsgemäßen Einsatz der Betriebsmittel (Kühlmedium, Schmieröl) und eine Kühlwassertemperaturspreizung von weniger als  $7\text{ °C}$  einzuhalten. Die Umgebungstemperatur des Motors ist unter  $45\text{ °C}$  zu halten [4].

Bei diesem Schadensfall wurde auch festgestellt, dass die Einspritzpumpe vom Schmierölkreislauf getrennt war. Das Schmieröl in der Einspritzpumpe war pastös. Diese Schmieröleindickung könnte möglicherweise als Folge von Rapsöleintrag über die Pumpenelemente entstanden sein.

Die Motorölprobe, die nach dem Schadensfall von der Landtechnik Weihenstephan genommen und zur Analyse gegeben wurde, lässt in Übereinstimmung mit dem Schadensbefund nicht den Schluss zu, dass aufgrund ungenügender Motorenölqualität der Schaden eingetreten wäre (Kapitel 3.2.1.2). Die bei der Schadensanalyse beobachteten Ölanbackungen können auf eine Übersäuerung des Schmieröls zurückgeführt werden. Zwar wurde bei den untersuchten Motorölproben kein übermäßiger Kraftstoffeintrag und keine bedenkliche Motorölübersäuerung festgestellt, aber die in Greußenheim aus der Kraftstoffversorgung entnommenen Pflanzenölproben weisen durchweg eine hohe Neutralisationszahl und damit einen hohen Anteil an freien Fettsäuren auf (vergleiche 3.2.1.1). Deshalb ist es wahrscheinlich, dass auch bereits beim Eintrag geringer Mengen von Pflanzenöl mit einer hohen Neutralisationszahl ins Motoröl Folgeerscheinungen wie Ölanbackungen oder Schmieröleindickung begünstigt werden.

Kurz vor Eintritt des Motorschadens musste trotz der am BHKW installierten automatischen Schmierölnachfüllung immer wieder Motoröl in nicht unerheblichen Mengen (mehrere Liter) von Hand nachgefüllt werden. Die automatische Schmierölnachfüllung wurde zwar am 15.07.99 bei 4620 Bh eingestellt, funktionierte aber laut Auskunft eines Angestellten der Gemeinde Greußenheim nicht ordnungsgemäß. Durch Markierung des Frischölpegels am Füllstandsanzeiger des Schmierölvorrattanks konnte herausgefunden werden, dass kein Schmieröl in die Ölwanne nachfloss und demzufolge der Füllstand im Motor abnahm. Seither wird das frische Motoröl herkömmlich, d.h. am Öleinfüllstutzen in den Motor aus einem Kanister eingefüllt.

### Motortemperatur

Im Juli und August 2000 zwischen ca. 8000 Bh und 8370 Bh, also während des Zeitraums, in dem Einspritzdüsen nach nur kurzer Standzeit ausgetauscht werden mussten, schaltete das BHKW wegen Abgas-/Motorübertemperatur mehrere Male ab (Abbildung 51). Die Motoröltemperatur kurz vor dem Abschalten erreichte an der Temperaturmessstelle in der Ölwanne Spitzenwerte von ca. 110-111 °C. Die Abgastemperatur unmittelbar nach dem Zylinder stieg dabei auf ca. 403 °C an. Daraufhin wurden verschiedene Wartungsarbeiten wie Luftfilterwechsel, Kraftstofffilterwechsel, Motoröl- und Motorölfilterwechsel, Reinigung des Abgaswärmetauschers durchgeführt, die jedoch längerfristig erfolglos blieben. Erst nach einer größeren Wartung am

01.09.00, bei der die Einspritzpumpe und Ventile eingestellt und die Einspritzdüsen erneuert wurden, wurde die Störmeldung Abgas-/Motorüber Temperatur nicht mehr registriert. Da jedoch die neuen Einspritzdüsen bereits nach weniger als 300 Bh wieder auf eine thermische Überbeanspruchung hindeuteten wurden im September 2000 Maßnahmen zur besseren Wärmabfuhr ergriffen. So wurde die Leistung des Ventilators zur Kabinenbelüftung erhöht und die Luftanströmung des Motors durch ein längs über dem Aggregat angebrachtes Abluftrohr verbessert (Abbildung 52). Zusätzlich wurde der Wärmeüberträger zwischen Motorkühlwasser und Heizkreislauf gereinigt. Die darin enthaltenen Metallschlammablagerungen deuten darauf hin, dass die Anlage zeitweise entweder mit zu wenig Korrosionsschutzmittel im Kühlwasserkreislauf betrieben wurde, oder dass Unverträglichkeiten zwischen Korrosionsschutzmittel und Maschinenbauteilen bestehen bzw. bestanden haben. Seit Reinigung des Kühlwasserwärmetauschers und Verbesserung der Kabinenbelüftung, traten keine weiteren Störungen mehr auf, die auf Über Temperatur zurückgeführt werden können.

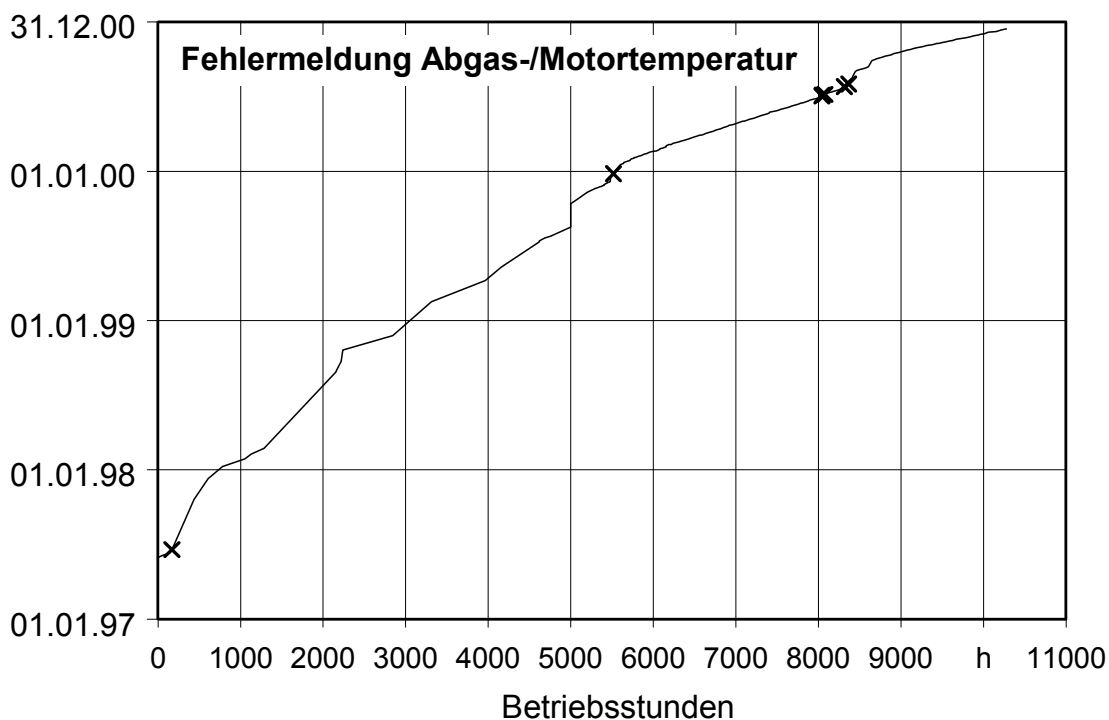


Abbildung 51: Häufigkeit der Fehlermeldung Abgas-/Motortemperatur über den Betriebszeitraum beim BHKW Greußenheim

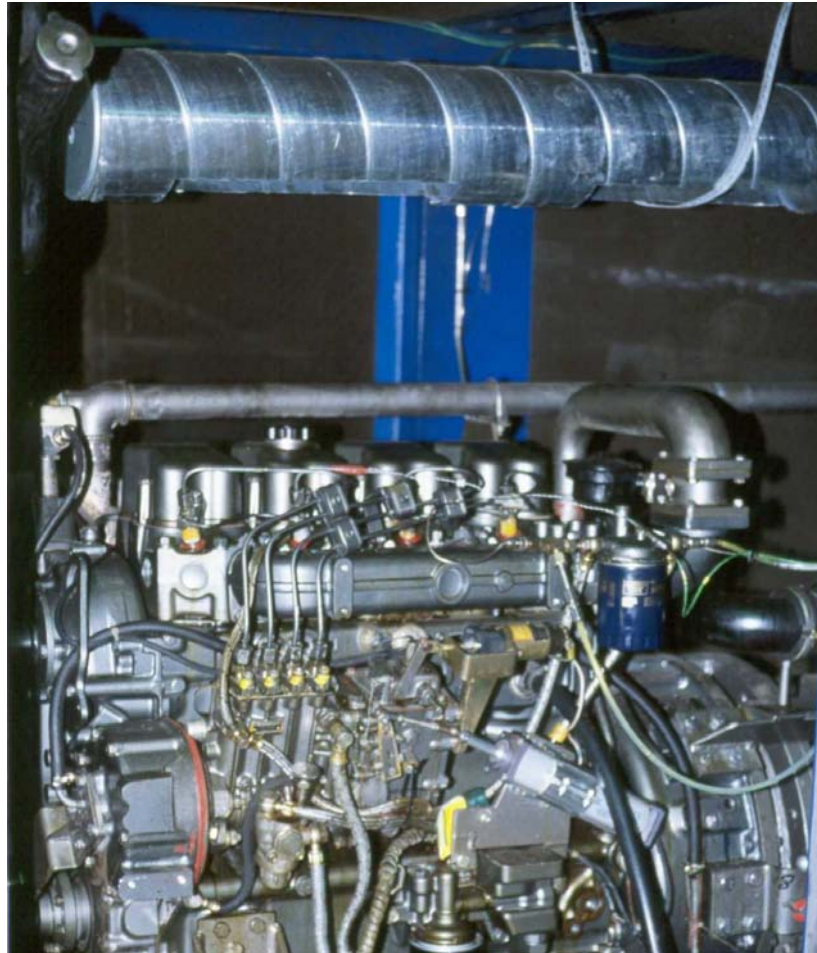


Abbildung 52: Verbesserte Frischluftanströmung des Aggregats in Greußenheim durch ein zusätzlich angebrachtes Entlüftungsrohr

### Abgassystem

Am Abgasleitungssystem traten zweimal Materialschäden aufgrund thermischer und mechanischer Belastung auf. Bei etwa 2200 Bh zeigte ein Kompensator des Abgasrohrs vermutlich wegen starker Vibrationen einen Riss. Auch am Schalldämpfer wurde im Sommer 2000 bei etwa 8000 Bh ein Riss bemerkt. Ein Grund dafür kann eine ungenügende Kompensation von Hitzeverformungen im Abgasstrang sein.

Nach etwa 600 Bh wurde am 12.12.97 der ursprünglich eingebaute Abgaswärmetauscher durch einen leistungsfähigeren Wärmetauscher ersetzt.

### Batterie

Das Ladegerät der Starterbatterie war bei 780 Bh defekt. Eine erneute Instandsetzung von Ladegerät und Starterbatterie war bei 4600 Bh fällig.

## Landtechnik Weihenstephan

### Kraftstofffilter

Beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan erfolgte bis zum Betriebsstundenstand von ca. 3300 häufig die Fehlermeldung Kraftstoffdruck (Abbildung 53). Das Aggregat konnte dann noch wenige Betriebsstunden mit dieser Fehlermeldung betrieben werden, schaltete aber meist bald mangels Kraftstoff ab. Grund dafür war das frühzeitige Verstopfen des Kraftstofffilters. Bis zum 14.03.00 bei 3314 Bh musste insgesamt 19mal der Kraftstofffilter gewechselt werden. Die durchschnittliche Filterstandzeit betrug etwa 175 Bh. In vier Fällen waren die Kraftstofffilter bereits nach weniger als 100 Bh verstopft. Keiner der Filter erreichte annähernd das gemäß Wartungsplan vorgeschriebene Wechselintervall von 600 Bh. Die maximale Filterstandzeit betrug während dieser Zeit 319 Bh.

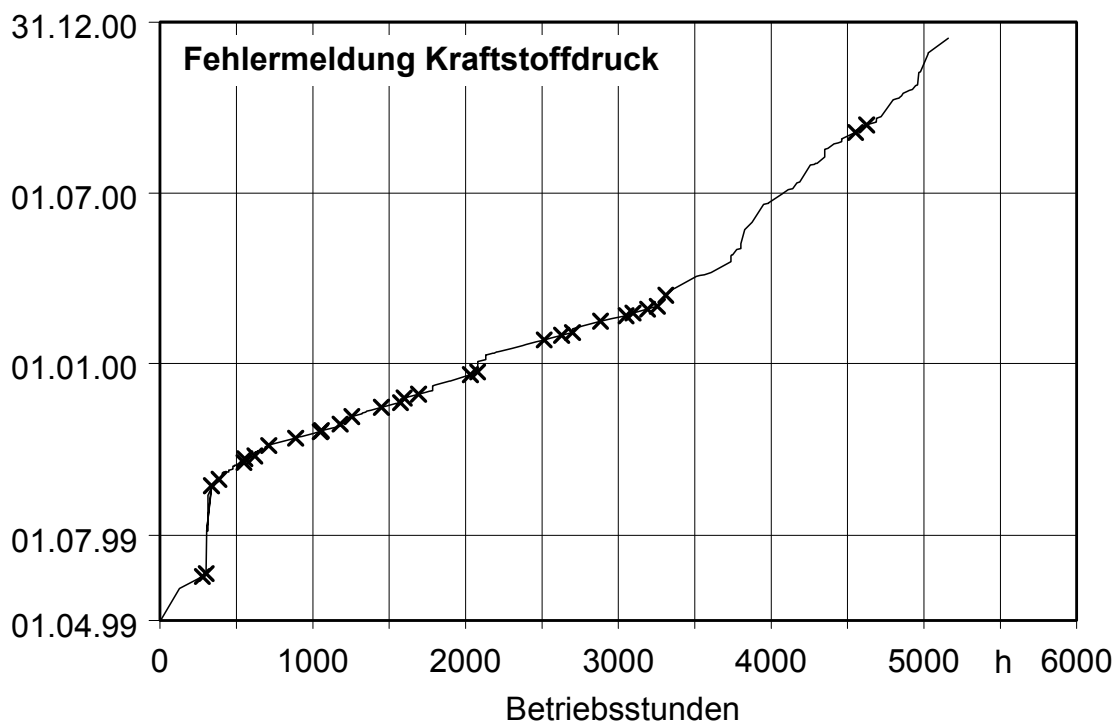


Abbildung 53: Häufigkeit der Fehlermeldung Kraftstoffdruck über den Betriebszeitraum beim BHKW Landtechnik Weihenstephan

Am 14.03.00 wurde ein Nachbau des bis dahin verwendeten originalen Wechselfilters eingebaut, der laut Vertriebsfirma die gleichen Spezifikationen aufweist. Von da ab erhöhten sich die Filterstandzeiten beträchtlich, so dass ein Austausch gemäß dem im



Wartungsplan angegebenen Intervall von 600 Bh erfolgen konnten, ohne dass eine Störung eintrat. Testweise wurde ein Filter solange nicht ausgetauscht bis bei 4553 Bh nach 727 Einsatzstunden das Aggregat „Kraftstoffdruckmangel“ anzeigte. Daraufhin wurde noch einmal ein Originalfilter eingebaut, der sich wie die ersten bereits nach kurzer Zeit (72 Bh) wieder zusetzte. Dies deutet auf eine schlechtere Filterwirkung des Nachbaus hin. Da die Filterqualität aber dennoch ausreichend erscheint wird nunmehr das BHKW mit dem Nachbau des Originalfilters betrieben.

Die zunehmende Schmutzbeladung der Kraftstofffilter wird durch den Anstieg des Differenzdrucks von nahe 0 mbar (neuer Kraftstofffilter) auf ca. 630 mbar deutlich (Abbildung 54). Bei den Original-Wechseln wird rasch der maximale Druck erreicht, wohingegen bei dem Nachbaufilter über viele Einsatzstunden hinweg ein weitgehend konstanter Druck herrscht. Erst bei fortgeschrittener Filterstandzeit kommt es dann allerdings zu einem rapiden Druckanstieg, bis der Austausch aufgrund mangelnder Kraftstoffversorgung notwendig wird.

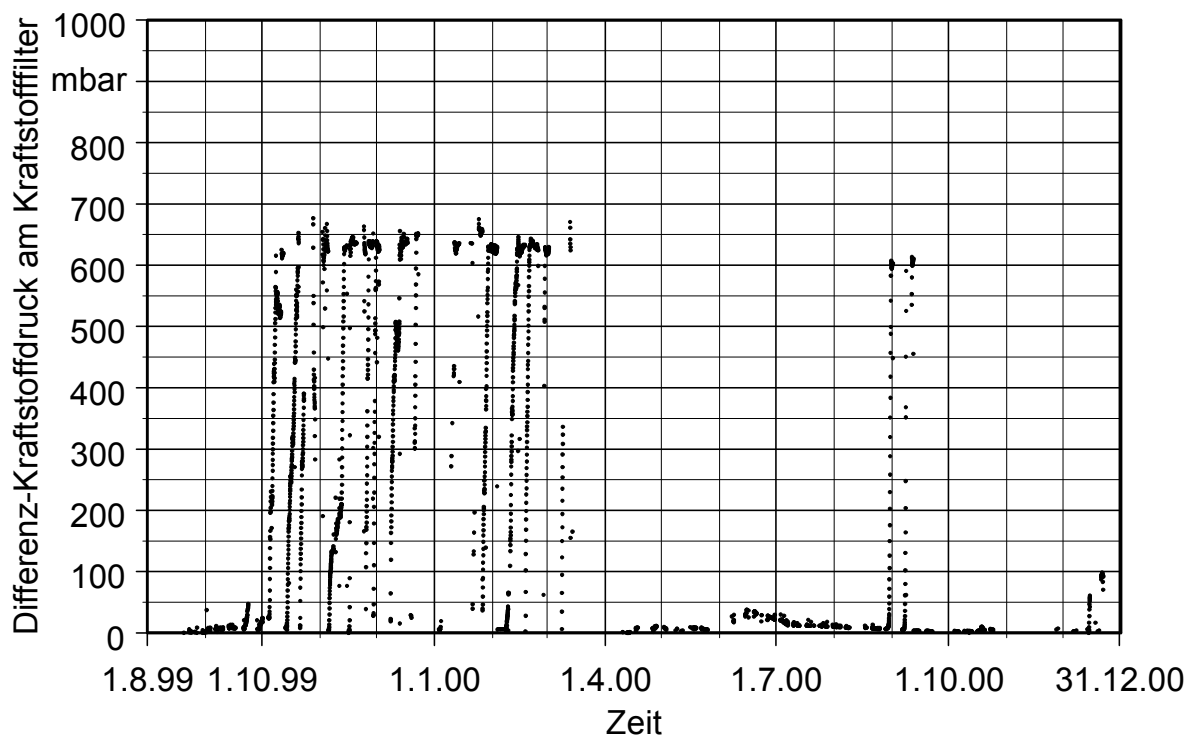


Abbildung 54: Kraftstoff-Differenzdruck an verschiedenen Kraftstofffiltern des BHKW Landtechnik Weihenstephan

Die häufigen Filterverstopfungen können darin begründet liegen, dass das eingesetzte Rapsöl zum Teil hohe Partikelgehalte aufwies (vgl. Kapitel 3.2.1.1). Partikel, die im Rapsöl enthalten sind, stammen vorrangig aus Saatbestandteilen, die beim Abpressen der Saat ins Öl gelangen und im anschließenden Öltreinigungsprozess nicht zurückgehalten werden. Im Kraftstofftank sedimentieren diese Partikel in tiefere Schichten. Da beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan die Kraftstoffentnahme bewusst an der tiefsten Stelle des Vorratstanks erfolgt, um Schlammabfuhr am Tankboden zu vermeiden, gelangen Verunreinigungen auch vermehrt in die Kraftstoffzuführung.

### Motor

Die Fehlermeldung „Abgastemperatur“ trat das erste Mal im März 2000 bei 3361 Bh auf. Bis zum Oktober 2000 (4958 Bh) wurde insgesamt 23mal eine zu hohe Abgastemperatur registriert. Während dieses Zeitraums (ca. 1600 Bh) nahm die Häufigkeit der Störungen „Abgastemperatur“ ständig zu (Abbildung 55).

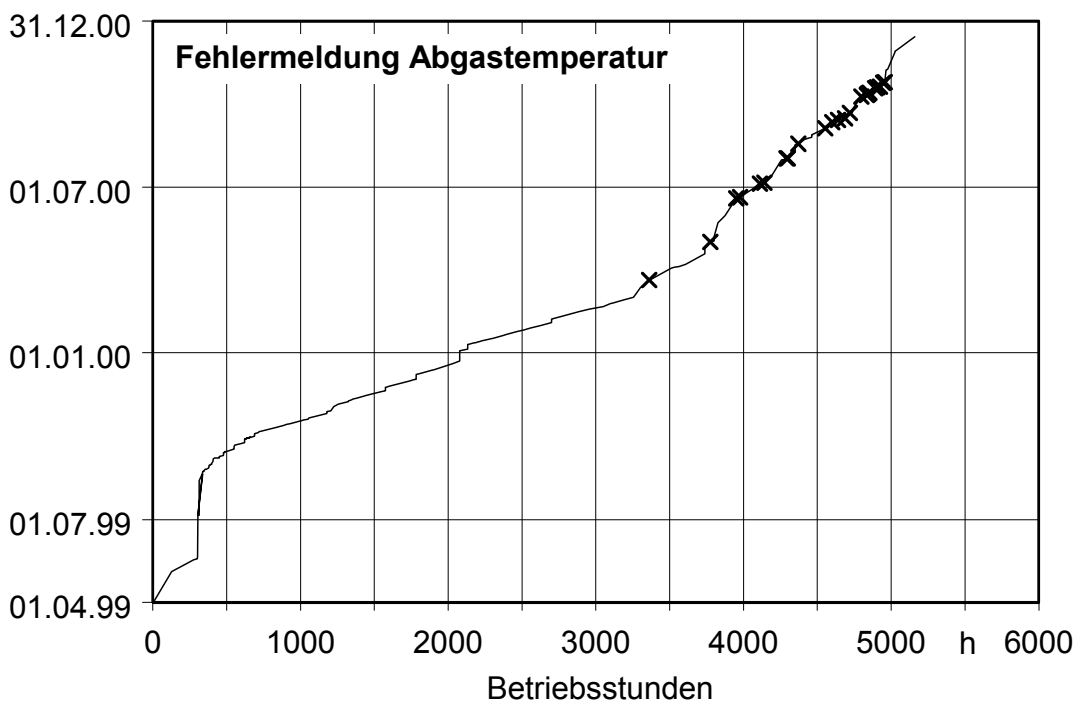


Abbildung 55: Häufigkeit der Fehlermeldung Abgastemperatur über den Betriebszeitraum beim BHKW Landtechnik Weihenstephan

In Abbildung 56 ist die Abgastemperatur im Abgaskrümmen (nach Zylinder) während des Beobachtungszeitraums dargestellt. dabei stieg die Abgastemperatur während des Motorbetriebs von anfänglich ca. 340 °C bis auf etwa 380 °C im Herbst 2000 an (vgl. Anhang 11).

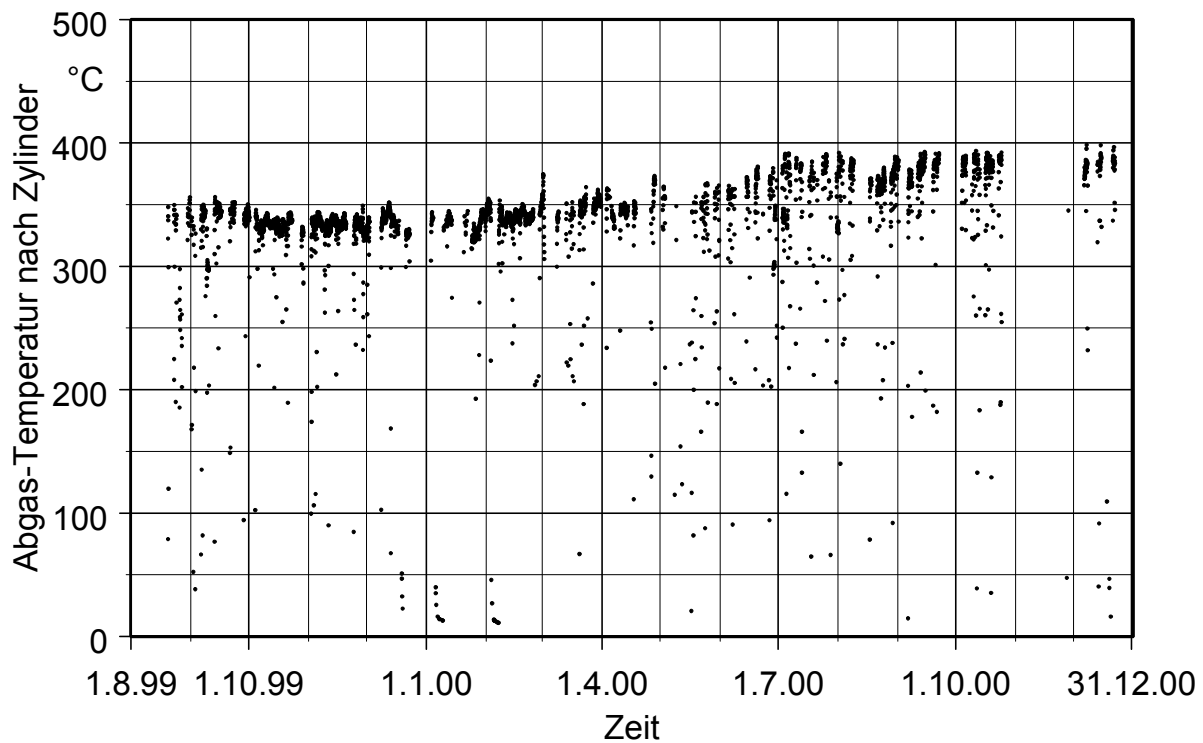


Abbildung 56: Abgastemperatur im Abgaskrümmen beim BHKW Weihenstephan

Ein leichter kontinuierlicher Anstieg der Abgastemperatur mit zunehmenden Betriebsstunden ist laut Auskunft des Motorenherstellers nicht außergewöhnlich. Beispielsweise kann eine Erhöhung der Abgastemperatur durch erhöhten Abgasdruck infolge von Rußablagerungen im Abgassystem verursacht werden. Gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.2 stieg der Abgasgegendruck beim BHKW in Weihenstephan während des Beobachtungszeitraums um etwa 10 % von durchschnittlich ca. 45 mbar im August 1999 auf etwa 50 mbar im Oktober 2000 an. Bereits im Februar und März 2000 wurden die beiden höchsten Monatsmittelwerte mit 55,4 bzw. 52,1 mbar registriert. Ab April 2000 beträgt der mittlere monatliche Abgasgegendruck weitgehend einheitlich ca. 50 mbar. Etwa zeitgleich mit den höheren Abgasdruck erfolgte zwischen Februar und März 2000 ein über die jahreszeitlichen Schwankungen hinausgehender Anstieg der mittleren Abgastemperatur von 339 auf 349 °C. Im weiteren Verlauf stieg die Abgas-

temperatur trotz konstanten Abgasgegendrucks weiter an, so dass weitere mögliche Ursachen betrachtet werden müssen. Das Ventilspiel wird seit Inbetriebnahme des BHKW regelmäßig überprüft und musste während des gesamten Beobachtungszeitraums von mehr als 5000 Bh kaum nennenswert nachgestellt werden. Ein Anstieg der Abgastemperatur kann auch auf die Bildung von Ablagerungen im Brennraum und an den Ventilen sowie auf einsetzenden Motorenverschleiß hindeuten. Letzteres könnte sich auch durch den zunehmenden Gehalt an ungelösten Stoffen und Verschleißelementen im Motoröl zwischen Mai und Juli 2000 (Tabelle 11, Seite 45) abzeichnen und möglicherweise in Zusammenhang mit der Umstellung auf das Plantotronic®-Schmiersystem gesehen werden. Bei einer Inspektion durch den Motorenhersteller im August 2000 wurden deshalb unter anderem der Düsendruck und das Spritzbild der Einspritzdüsen, die Kompression sowie die Blow-By-Rate überprüft. Dabei ergaben sich keine Anzeichen, die auf einen verstärkten Motorverschleiß hindeuteten. In Absprache mit dem Motorenhersteller wurde die maximale Abgastemperatur zur Auslösung der Störmeldung am 07.11.2000 bei 4965 Bh von 400 °C auf 420 °C erhöht, da dieser Temperaturbereich immer noch als unkritisch zu betrachten ist. Daraufhin waren keine Störmeldungen wegen zu hoher Abgastemperatur mehr zu verzeichnen (Abbildung 55). Hinweise dazu, ob die Abgastemperatur weiter ansteigt und ob sich ein erhöhter Motorenverschleiß bestätigt, werden durch die weitere Beobachtung des BHKW Aggregats erwartet. Darüber hinaus ist eine Öffnung des Motors mit Beurteilung eventueller Verschleißerscheinungen und Ablagerungen geplant.

#### Kupplung Generatorantrieb

Insgesamt zweimal nämlich am 08.12.99 (1784 Bh) und 17.08.00 (4350 Bh) musste die Kupplung, die zur Kraftübertragung zwischen Motor und Generator dient, gewechselt werden, da diese verschlissen war (Abbildung 57). Als Grund wurde unpassende Materialhärte bzw. Materialschwäche festgestellt. Beim zweiten Kupplungsschaden erfolgte der Einbau einer metallverstärkten Kupplung anderer Bauart. Laut Hersteller des Aggregats sind Kupplungsschäden dieser Art untypisch und weitere Fälle auch nicht bekannt.

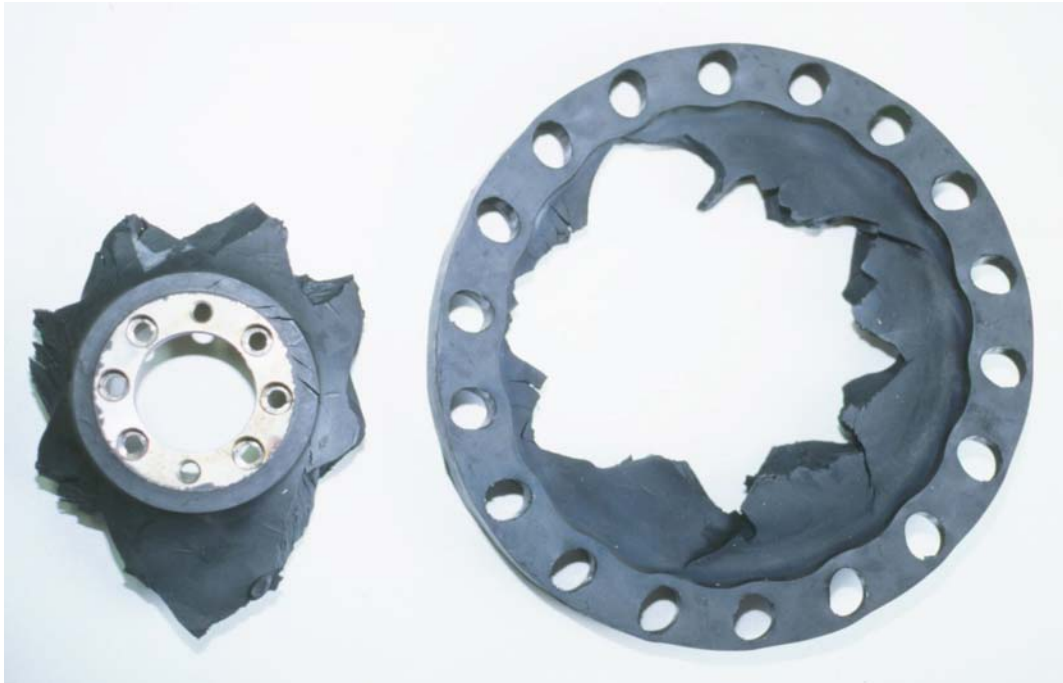


Abbildung 57: Defekte Kupplung zur Kraftübertragung zwischen Motor und Generator am BHKW der Landtechnik Weihenstephan

Im Juni und August 2000 erfolgte insgesamt fünfmal die Fehlermeldung „Synchronisationszeit überschritten“. Dies bedeutet, dass der Generator aufgrund unzureichender Synchronisation nicht automatisch, sondern nur manuell zugeschaltet werden konnte. Die Ursache dafür war eine veränderte Einstellung der Synchronisationseinrichtung.

Weitere Störungen am BHKW der Landtechnik Weihenstephan waren ein korrodierter Druckaufnehmer für die Überwachung des Kühlwasserdrucks, sowie ein undichtes Ventil des Kühlwasserausgleichsbehälters.

### 3.3 Emissionsverhalten

Die Ergebnisse der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Emissionsmessungen sind in den Tabellen in Anhang 18, Anhang 19 und Anhang 20 dargestellt. Nachfolgend erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse zuerst für die untersuchten BHKW einzeln und abschließend im Vergleich.

#### 3.3.1 BHKW Weißenburg

##### Wiederkehrende Messungen

Das BHKW Weißenburg umfasst zwei baugleiche Aggregate mit einer elektrischen und thermischen Leistung von jeweils 110 kW. Beide Aggregate sind mit einem Oxidationskatalysator und Partikelfilter ausgestattet. Die Regenerierung des Partikelfilters erfolgt durch Abbrennen des Rußes. Dazu wird, sobald der Abgasdifferenzdruck (nach/vor Partikelfilter) auf mehr als 45 mbar ansteigt, Propangas in den Abgasstrom vor der Abgasreinigungseinheit (Oxidationskatalysator und Rußfilter) eingeleitet.

Hauptgegenstand der Untersuchungen am BHKW in Weißenburg ist das Aggregat 2. Zusätzlich wurden aber auch in ausgewählten Fällen vergleichsweise die Abgasemissionen des Aggregats 1 bestimmt. Neben dem üblichen Nennlastbetrieb wurden Emissionen auch während der Start- und Warmlaufphase (Anfahrt) sowie bei der Regenerierung des Partikelfilters ermittelt.

In Abbildung 58 sind die an den drei Messtagen für die untersuchten Betriebsweisen ermittelten Abgaskonzentrationen der Komponenten Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), Gesamt-Kohlenwasserstoffe (HC) und Staub (=Partikelmasse) des Aggregats 2 als dunkelgraue Balken und des Aggregats 1 als hellgraue Balken dargestellt. Die Balkenhöhe entspricht dem gemittelten Wert aus allen Halbstundenmittelwerten eines Messtags. Die Streuungen der einzelnen Halbstundenmittelwerte sind als Minimum-Maximum Fehlerbalken aus Abbildung 58 ersichtlich.

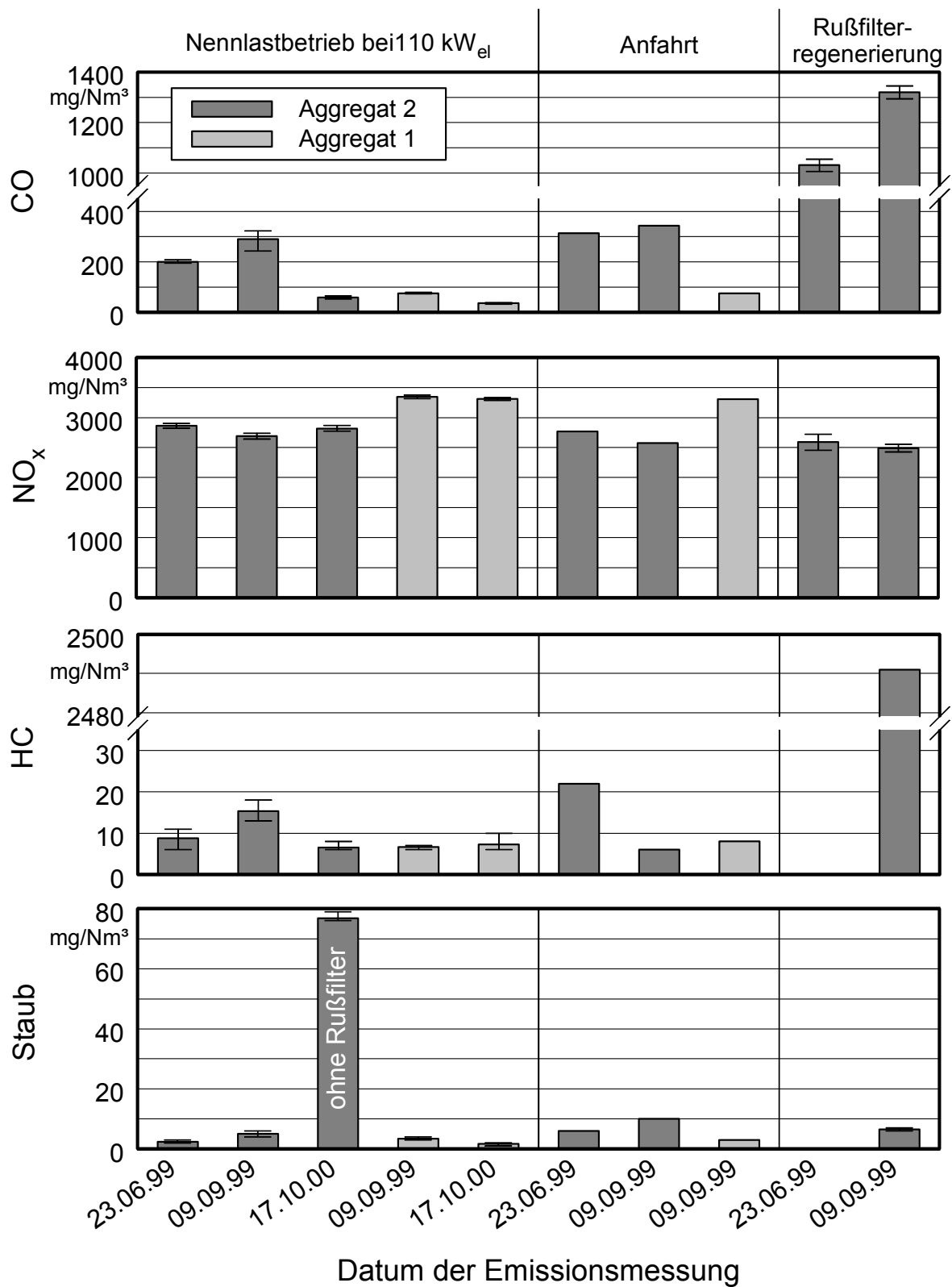


Abbildung 58: Ergebnisse der Emissionsmessungen am BHKW Weißenburg (Nennleistung: 110 kW<sub>el</sub>) - Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Im **Nennlastbetrieb** ist bei den CO-Emissionen des Aggregats 2 vom ersten (23.06.99) zum zweiten Messtag (09.09.99) ein Anstieg um fast 50 % von ca. 200 mg/Nm<sup>3</sup> auf 291 mg/Nm<sup>3</sup> zu beobachten, was auf eine schlechtere Verbrennungsgüte hinweisen kann (Abbildung 58). Die Kohlenmonoxidemissionen von Aggregat 1 betragen dagegen bei der Messung vom 09.09.99 mit durchschnittlich 76 mg/Nm<sup>3</sup> nur etwa ein Viertel der CO-Emissionen von Aggregat 2. Als Ursache für den Anstieg der CO-Emissionen zwischen dem ersten und zweiten Messtag bei Aggregat 2, sowie für die höheren Emissionen im Vergleich zu Aggregat 1, könnte die zwischenzeitlich erfolgte Umstellung von der konventionellen Motorenschmierung auf das System Plantotronic<sup>®</sup> vermutet werden. Hierbei wird zur Schmierung ein pflanzenölbasierendes, nur gering additiviertes Motoröl verwendet (vgl. Kapitel 3.1.1). Während des Betriebs werden davon etwa 2 % des Kraftstoffverbrauchs kontinuierlich aus der Ölwanne abgezogen und dem Kraftstoff zudosiert. Allerdings lagen bei der dritten Messung am 17.10.00 die CO-Emissionen mit ca. 60 mg/Nm<sup>3</sup> trotz Plantotronic<sup>®</sup> auf deutlich niedrigerem Niveau, als am zweiten und auch am ersten Messtag, als noch eine konventionelle Motorenschmierung erfolgte. Möglicherweise könnte auch der defekte Partikelfilter am Aggregat 2 durch den angestiegenen Strömungswiderstand im Abgassystem (vergleiche Kapitel 3.2.3) zu den im Vergleich zu Aggregat 1 deutlich höheren CO-Emissionen geführt haben. Infolge des ersatzlosen Ausbaus des defekten Rußfilters am 27.6.00 und des damit verbundenen Rückgangs des Abgasgedrucks konnten am dritten Messtag (17.10.00) dann die deutlich niedrigeren CO-Emissionen ermittelt werden, die sich auch in einem Anstieg der Sauerstoffkonzentration bemerkbar machten (vgl. Anhang 18). Darüber hinaus wurden am 27.6.00 auch die Oxidationskatalysatoren an beiden Modulen durch neuwertige Katalysatoren mit einer größeren katalytisch wirksamen Oberfläche ausgetauscht, wodurch auch der Rückgang der Emissionen zwischen der Messung am 09.09.99 und 17.10.00 an Aggregat 1 erklärt werden kann.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen, angegeben als NO<sub>2</sub>, betragen für das Aggregat 2 bei Nennlast an allen drei Messtagen fast konstant zwischen 2690 und 2860 mg/Nm<sup>3</sup>. Dagegen weist das Aggregat 1 mit ca. 3300 mg/Nm<sup>3</sup> um etwa 1/5 höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen auf. Grund dafür könnte eine voneinander abweichende Motoreneinstellung (z.B. Einspritzzeitpunkt) der beiden Module sein, die sich auch in den niedrigeren CO-Emissionen von Aggregat 1 bemerkbar macht. Eine Abweichung des O<sub>2</sub>-Gehalts im Abgas oder der Abgastemperatur am Kamin konnte nicht festgestellt werden.

Die HC-Emissionen betragen etwa 7-15 mg/Nm<sup>3</sup>. Wie bei den CO-Emissionen wurde der höchste Wert von 15 mg/Nm<sup>3</sup> am Aggregat 2 bei der zweiten Messung ermittelt.



Entsprechend wurde auch am dritten Messtag ein Rückgang der Gesamtkohlenwasserstoff-Konzentration im Abgas unter den Wert vom ersten Messtag auf das niedrige Emissionsniveau ( $7 \text{ mg/Nm}^3$ ) von Aggregat 1 verzeichnet (vgl. Abbildung 58).

Bedingt durch das Vorhandensein eines Partikelfilters liegen die Staubemissionen des BHKW Weißenburg bei Nennlast mit meist weniger als  $5 \text{ mg/Nm}^3$  besonders niedrig. Eine deutlich höhere Staubkonzentration von ca.  $75 \text{ mg/Nm}^3$  wurde lediglich am 17.10.00 im Abgasstrom von Aggregat 2 nach Ausbau des Partikelfilters ermittelt. Die Abscheiderate des Partikelfilters liegt demnach bei mindestens 93 %.

Beim Kaltstart des BHKW mit Warmlaufphase (**Anfahrt**) sind im Vergleich zum Nennlastbetrieb bei betriebswarmen Motor erwartungsgemäß höhere Kohlenmonoxid- und Staubemissionen festzustellen (vgl. Abbildung 58). Mit zunehmender Abgastemperatur gehen die CO-Emissionen wieder zurück. So wurde bei einer mittleren Abgastemperatur am Kamin von  $106 \text{ °C}$  am 23.06.99 ein Anstieg um ca. 57 % und bei einer mittleren Abgastemperatur von  $115 \text{ °C}$  am 09.09.99 um nur mehr 18 % gegenüber dem Betrieb bei Nennlast (Abgastemperatur am Kamin ca.  $153\text{-}159 \text{ °C}$ ) verzeichnet. Der Anfahrversuch bei Aggregat 1, der am 09.09.99 bei betriebswarmen Motor erfolgte, brachte keine Veränderung der CO-Emissionen. Die Staubemissionen verhalten sich beim BHKW Weißenburg während der Anfahrt wie die CO-Emissionen. Für die während der Warmlaufphase geringfügig niedrigeren  $\text{NO}_x$ -Emissionen kann die insgesamt tiefere Verbrennungstemperatur ausschlaggebend sein. Uneinheitlich verhalten sich dagegen die Kohlenwasserstoffe. So konnte während der Warmlaufphase bei Aggregat 2 gegenüber dem Nennlastbetrieb sowohl eine Verdopplung (23.06.99) als auch eine Halbierung (09.09.99) der HC-Konzentration im Abgas festgestellt werden, jedoch auf einem insgesamt niedrigem Emissionsniveau nur wenig über der Nachweisgrenze von etwa  $3 \text{ mg/Nm}^3$ .

Während der **Regenerierung des Partikelfilters** erfolgt eine drastische Erhöhung der CO- und HC-Konzentration im Abgas. Die Halbstundenmittelwerte von CO liegen dabei um etwa das 5-20fache und von HC sogar um das 150-300fache über den Emissionswerten, wenn keine Regenerierung erfolgt (Abbildung 58). Die Dauer einer Regenerierung beträgt ca. 5 Minuten für die Eindüsung des Propangases zum Abbrennen des Rußes. Nach weiteren ca. 5-7 Minuten erreichen die Abgastemperatur und die Schadstoffkonzentration im Abgas in etwa wieder die Ausgangswerte (vor der Regenerierung). Der deutliche Anstieg von CO- und HC-Emissionen während der Regenerierung deutet darauf hin, dass das eingedüste Propangas nur sehr unvollständig verbrennt. Deshalb sollte sofern möglich die bei der Regenerierung eingedüste

Propangasmenge reduziert werden. Die Staubemissionen bleiben während des Ab Brennens des Partikelfilters nahezu unverändert bei deutlich unter 10 mg/Nm<sup>3</sup>, bei den Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) ist ein geringfügiger Rückgang um ca. 10 % zu ver zeichnen.

### Langzeit-Messungen

Bei den Langzeit-Emissionsmessungen im September 1999 wurden beim BHKW in Weißenburg während einer Programmlaufzeit von 35,2 h eine durchschnittliche CO-Konzentration von 309 mg/Nm<sup>3</sup> (bezogen auf 5% O<sub>2</sub>-Gehalt) bei einer Standardabweichung von 42 ermittelt (Tabelle 13).

Tabelle 13: Ergebnisse der Langzeitemissionsmessung am BHKW (Aggregat 2) in Weißenburg

	O <sub>2</sub> in %	CO <sub>2</sub> in %	CO in mg/Nm <sup>3</sup> **)	NO in mg/Nm <sup>3</sup> **)
Mittelwert <sup>*)</sup>	9,6	8,5	309	2318
Standardabweichung <sup>*)</sup>	1,0	0,8	42	356

<sup>\*)</sup> Programmlaufzeit: 35,2 h

<sup>\*\*)</sup> bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Das Ergebnis zeigt gute Übereinstimmung mit dem bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen im September ermittelten CO-Wert von 291 mg/Nm<sup>3</sup>. In Abbildung 59 sind die CO-Konzentrationen über den Erfassungszeitraum dargestellt.

Demnach schwanken die CO-Emissionen über den Beobachtungszeitraum zwischen ca. 250 und 400 mg/Nm<sup>3</sup>. Auch innerhalb eines Tages können kurzzeitig ähnlich starke Emissionsunterschiede auftreten, was in erster Linie auf die unterschiedlichen Betriebsbedingungen bei Start, Warmlauf und Regenerierung des Partikelfilters zurückzuführen ist.

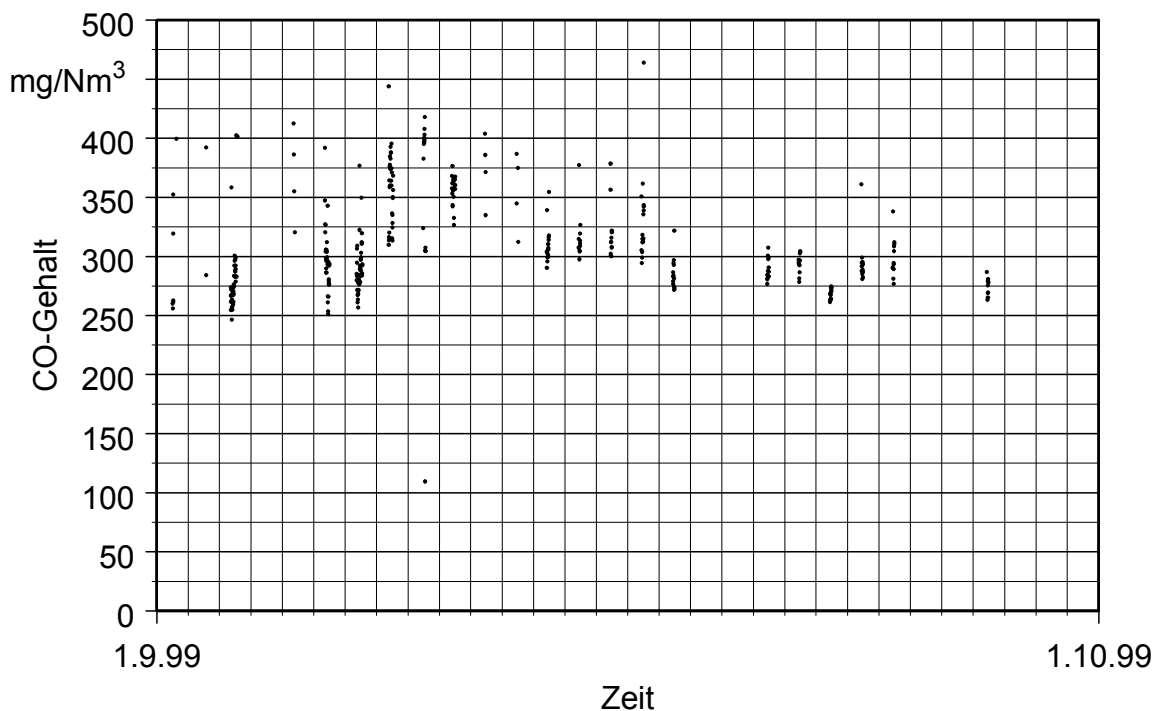


Abbildung 59: CO-Konzentration im Abgas am BHKW (Aggregat 2) Weißenburg, Langzeitmessung – Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>

Die mittleren NO-Emissionen (angegeben als NO) betragen 2318 mg/Nm<sup>3</sup> (unter Normbedingungen, bei 5% O<sub>2</sub>-Gehalt) mit einer Standardabweichung von 356 (Tabelle 13). Die Schwankungsbreite der NO-Emissionen liegt etwa zwischen ca. 500 und 2700 mg/Nm<sup>3</sup>, wobei Werte unter 1000 mg/Nm<sup>3</sup> lediglich an einem Tag, nämlich dem 09.09.99 gemessen wurden, an dem auch wiederkehrende Emissionsmessungen stattfanden und auf die Kalibrierung der Messausrüstung zurückzuführen sind. NO-Konzentrationen zwischen ca. 1300 und 2200 mg/Nm<sup>3</sup> treten vereinzelt aber regelmäßig auf und ergeben sich während der Anfahrt- und Abfahrtphase des Aggregats (vgl. Abbildung 60). Gegen Ende des Beobachtungszeitraums wurde ein geringfügiger Anstieg der NO-Konzentration im Abgas um ca. 10 % bemerkt.



Abbildung 60: NO-Emissionen bei den Daueremissionsmessungen am BHKW Weißenburg im September 1999– Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>

### 3.3.2 BHKW Greußenheim

Das BHKW in Greußenheim besitzt eine Nennleistung von 60 kW<sub>el</sub>. Als elektrische Dauerleistung wurde anfangs allerdings nur 40 kW<sub>el</sub> eingestellt, da noch wenige Verbraucher an das Wärmenetz angeschlossen waren. Aufgrund des gestiegenen Wärmebedarfs durch neue Wärmeabnehmer, wird das Aggregat seit Oktober 2000 mit einer Dauerleistung von 50 kW<sub>el</sub> betrieben. Zur Überprüfung der Abgasemissionen im Teillastbetrieb, kann die elektrische Leistung des Generators bis auf 20 kW<sub>el</sub> herabge-regelt werden. Das BHKW besitzt einen Oxidationskatalysator, jedoch keinen Partikel-filter. Der Abgaswärmetauscher dient gemäß den Angaben des Herstellers auch als einfacher Rußabscheider, der entsprechend der Wartungsanweisung des Herstellers von Hand zu kehren ist.

Im Herbst 1999 ereignete sich bei 5000 Bh ein Motorschaden infolge von Überhitzung (vgl. Kapitel 3.2.3). Seither wird das BHKW mit einem baugleichen neuen Austausch-motor betrieben.

Die Ergebnisse der vier wiederkehrenden Emissionsmessungen am BHKW in Greußenheim sind in Abbildung 61 zusammengefasst.

Bei einer **Dauerleistung von 40 kW<sub>el</sub>** betragen die CO-Emissionen bei den ersten drei Messungen im Mittel etwa 40-50 mg/Nm<sup>3</sup> allerdings mit größeren Abweichungen bei den Halbstundenmittelwerten (vergleiche Fehlerbalken in Abbildung 61).

Ebenso einheitlich verhalten sich die HC-Emissionen. Diese liegen im Durchschnitt etwa bei 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

Im Gegensatz zu Kohlenmonoxid und den Kohlenwasserstoffen ist bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen eine Abnahme über die drei Messtage von 3500 über 2800 auf 2500 mg/Nm<sup>3</sup> zu verzeichnen. Der Rückgang um ca. 20 % zwischen dem ersten und zweiten Messtag ist vermutlich im Wesentlichen auf den Austausch des defekten Motors zurückzuführen. Ähnlich hohe Stickstoffoxidemissionen zwischen 2845 und 3551 mg/Nm<sup>3</sup> wurden am selben Motor auch bei Emissionsmessungen der TÜV Ecoplan Umwelt GmbH, die im Auftrag des BayLfU 1997 durchgeführt wurden, ermittelt [12].

Am 27.07.99 und 23.02.00 wurden Staubkonzentrationen im Abgas von ca. 70 mg/Nm<sup>3</sup> ermittelt, wohingegen bei der dritten Messung am 27.07.00 mit 160 mg/Nm<sup>3</sup> eine mehr als doppelt so hohe Staubkonzentration feststellbar war. Dieser Anstieg ist wahrscheinlich nicht auf eine verminderte Wirkung des (einfachen) Rußabscheiders zurückzuführen, da dieser erst 50 Betriebsstunden vor der Emissionsmessung gereinigt wurde. Auch bei der Reinigung im Abgaskanal zurückgebliebene und im Abgasstrom mitgeführte Rußpartikel dürften nach 50 Bh keine merkliche Erhöhung der Staubemissionen mehr verursacht haben. Die Kraftstoffqualität unterscheidet sich bei den verschiedenen Emissionsmessungen nur geringfügig. Deshalb ist der Anstieg der Staubemissionen möglicherweise auf die motorische Verbrennung zurückzuführen. Die Entstehung von Partikeln (Ruß und angelagerte, hochsiedende Kohlenwasserstoffe) bei der Verbrennung hängt im wesentlichen von der Temperatur, dem Druck und dem örtlichen Brennstoff/Luftverhältnis ab. Zwar schaltete das Aggregat im Juli 2000 mehrmals wegen Motor-/Abgasübertemperatur auf Störung, dennoch kann anhand der aufgenommenen Betriebsdaten der Anstieg der Staubemissionen nicht auf veränderte Verbrennungstemperaturen zurückgeführt werden. Da in Verbrennungszonen fetten Gemisches die Rußbildung begünstigt wird, ist wahrscheinlich eine schlechtere Zerstäubung bzw. Verbrennungsqualität, z.B. durch verkockte oder verharzte Einspritzdüsen, für die höheren Staubemissionen verantwortlich. Diese Vermutung kann dadurch bestätigt werden, dass während der Emissionsmessung im

Juli 2000 Einspritzdüsen eingebaut waren, die aufgrund starker Verkokungen nach nur wenigen Einsatzstunden ausgetauscht werden mussten.

Die Umstellung des Aggregats von 40 auf **50 kW elektrische Dauerleistung** ergab eine deutliche Absenkung der CO-Emissionen von ca. 50 auf 15 mg/Nm<sup>3</sup> (Abbildung 61). Trotz der um ca. 25 °C höheren Verbrennungstemperaturen beim Betrieb mit 50 kW<sub>el</sub> wurden auch niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen (ca. 2300 mg/Nm<sup>3</sup>) als bei den drei vorangegangenen Messtagen ermittelt. Auch die Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas wies am 18.10.00 beim Betrieb mit 50 kW<sub>el</sub> niedrigere Werte als mit 40 kW<sub>el</sub> auf. Demnach schneidet der Motorbetrieb mit 50 kW<sub>el</sub> hinsichtlich der Abgasemissionen deutlich besser ab, als mit 40 kW<sub>el</sub>, was auf eine vollständigere Verbrennung bei 50 kW<sub>el</sub> gegenüber 40 kW<sub>el</sub> schließen lässt. Möglicherweise könnte eine Umstellung des Dauerteillastbetriebs von 50 kW<sub>el</sub> auf den vorgesehenen Nennlastbetrieb (60 kW<sub>el</sub>) den Trend hin zu niedrigeren Emissionen fortsetzen.

Die Staubemissionen waren mit 120 mg/Nm<sup>3</sup> im Vergleich zu den beiden ersten Messungen bei 40 kW<sub>el</sub> etwa doppelt so hoch, betrug aber am 18.10.00 nach erfolgtem Wechsel der Einspritzdüsen und nach Einstellen des Förderzeitpunktes sowie der Ventile nur mehr 70 % der Staubemissionen vom 27.07.00 (mit defekten Einspritzdüsen).

Beim **Teillastbetrieb mit 40 kW<sub>el</sub>** am 18.10.00 lagen die CO- und HC-Emissionen geringfügig höher und die NO<sub>x</sub>- und Staubemissionen etwas niedriger als bei 50 kW<sub>el</sub>. Vergleicht man den Teillastbetrieb mit 40 kW<sub>el</sub> am 18.10.00 mit dem Dauerbetrieb bei 40 kW<sub>el</sub> früherer Messungen, so ergibt sich für CO und NO<sub>x</sub> eine Verringerung, für HC keine Veränderung und für Staub ein Rückgang gegenüber dem 27.07.00 (defekte Einspritzdüsen) aber ein Anstieg im Vergleich zum 27.07.99 und 23.02.00.

Ein **Teillastbetrieb mit 21 kW<sub>el</sub>** am 27.07.99 hatte eine mehr als Verdreifachung der CO-Emissionen und mehr als Verzehnfachung der HC-Emissionen zur Folge, was auf niedrigere Verbrennungs- und Abgastemperaturen (infolge davon: geringerer Umsetzungsgrad im Oxidationskatalysator) und auf eine erhöhte Menge an unverbrannten oder teilverbrannten Kraftstoffbestandteilen im Abgas zurückzuführen ist.

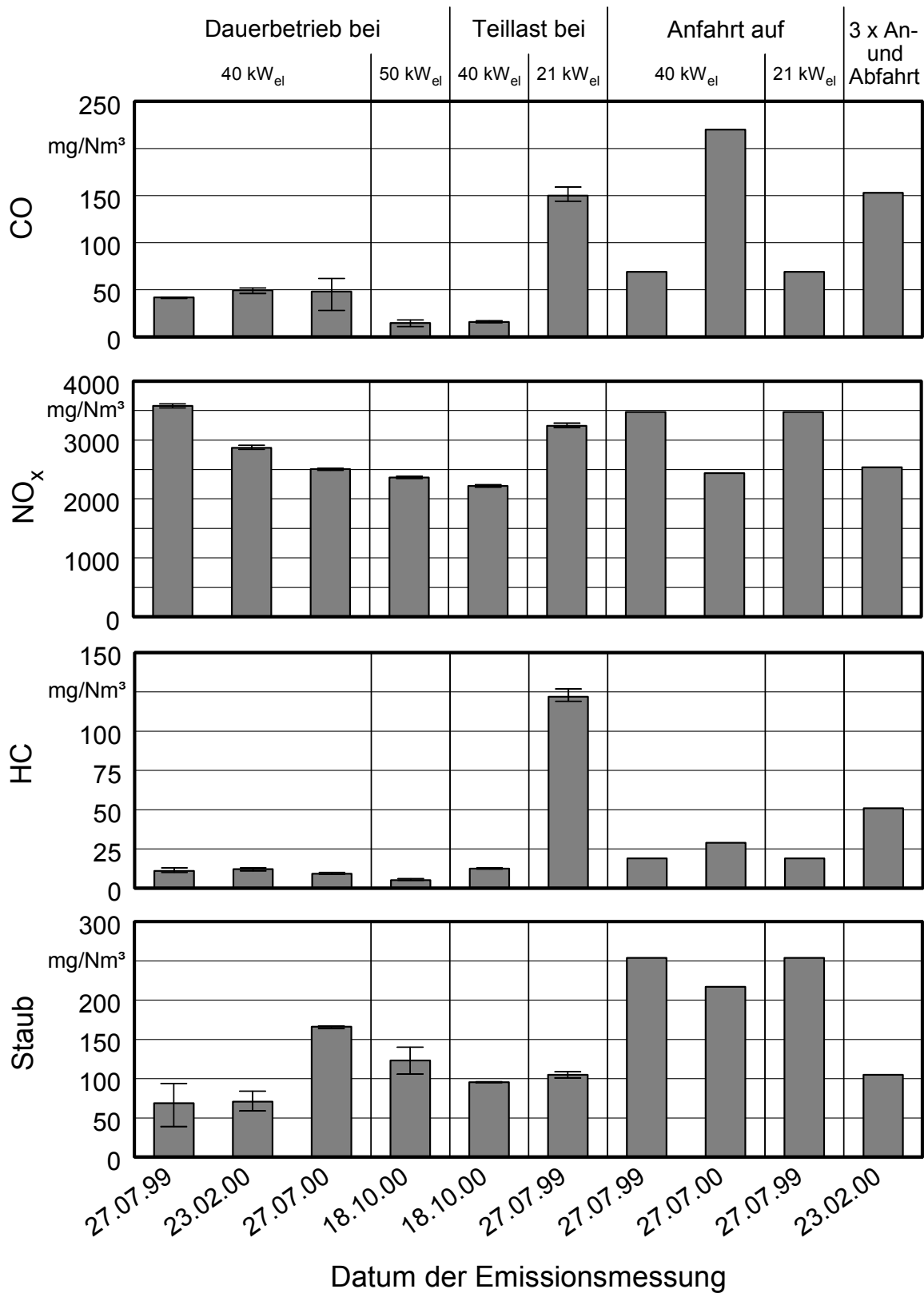


Abbildung 61: Ergebnisse der Emissionsmessungen am BHKW Greußenheim (Nennleistung: 60 kW<sub>el</sub>) - Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

**Anfahrtsphasen** bewirken beim BHKW in Greußenheim einen Anstieg der CO-, HC- und Staubemissionen, die in etwa dem 2-4fachen des Dauerbetriebs entsprechen. Die Stickstoffoxidemissionen während der Anfahrt entsprechen dagegen durchweg den Emissionen im Dauerbetrieb.

### Langzeit-Messungen

Bei den Langzeit-Emissionsmessungen im Februar/März und April/Mai 2000 wurden beim BHKW in Greußenheim während einer Programmlaufzeit von 316 h eine durchschnittliche CO-Konzentration von 9,5 mg/Nm<sup>3</sup> (bezogen auf 5% O<sub>2</sub>-Gehalt) bei einer Standardabweichung von 11,6 ermittelt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Ergebnisse der Langzeitemissionsmessung am BHKW Greußenheim

	O <sub>2</sub> in %	CO <sub>2</sub> in %	CO in mg/Nm <sup>3</sup> **)	NO in mg/Nm <sup>3</sup> **)
Mittelwert <sup>*)</sup>	11,1	7,5	9,5	2223
Standardabweichung <sup>*)</sup>	0,5	0,4	11,6	161

<sup>\*)</sup> Programmlaufzeit: 316 h

<sup>\*\*)</sup> bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Die mittleren CO-Emissionen, liegen mit 9,5 mg/Nm<sup>3</sup> bei den Langzeitmessungen deutlich niedriger, als bei den ersten drei wiederkehrenden Messungen, wo Werte zwischen ca. 42 und 49 mg/Nm<sup>3</sup> ermittelt wurden. Abweichungen der Messergebnisse voneinander können sich aufgrund der unterschiedlichen Messgasentnahmestellen der beiden Messeinrichtungen ergeben haben. Zudem liegen die ermittelten CO-Konzentrationen auf insgesamt niedrigem Niveau im unteren Messbereich, wo messverfahrensbedingt die Ergebnisse stärker voneinander abweichen können. In Abbildung 62 sind die CO-Konzentrationen über den Erfassungszeitraum dargestellt. Demnach schwanken die CO-Emissionen über den Beobachtungszeitraum zwischen ca. 0 und 50 mg/Nm<sup>3</sup>.

Die NO-Emissionen (angegeben als NO) betragen bei den Langzeitmessungen im Mittel etwa 2223 mg/Nm<sup>3</sup> (unter Normbedingungen, bei 5% O<sub>2</sub>-Gehalt) bei einer Standardabweichung von 161 (Tabelle 14). Die Schwankungsbreite der NO-Emissionen liegt etwa zwischen ca. 1800 und 2700 mg/Nm<sup>3</sup> (Abbildung 63).



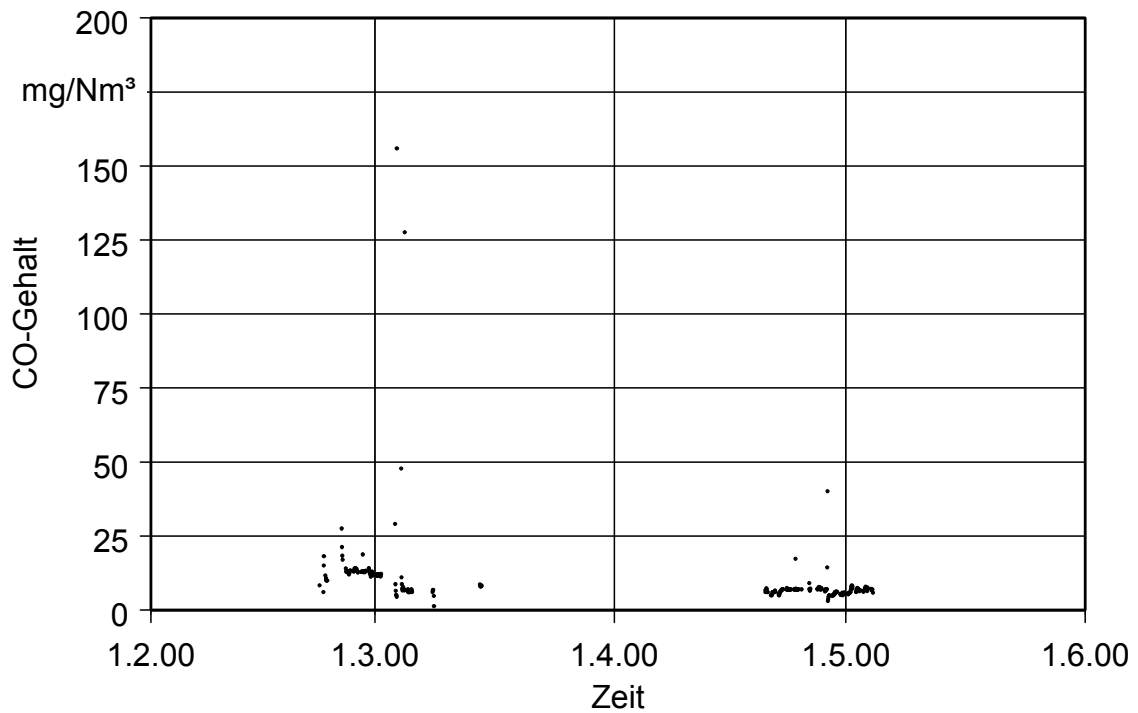


Abbildung 62. CO-Konzentration im Abgas am BHKW Greußenheim, Langzeitmessung – Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>

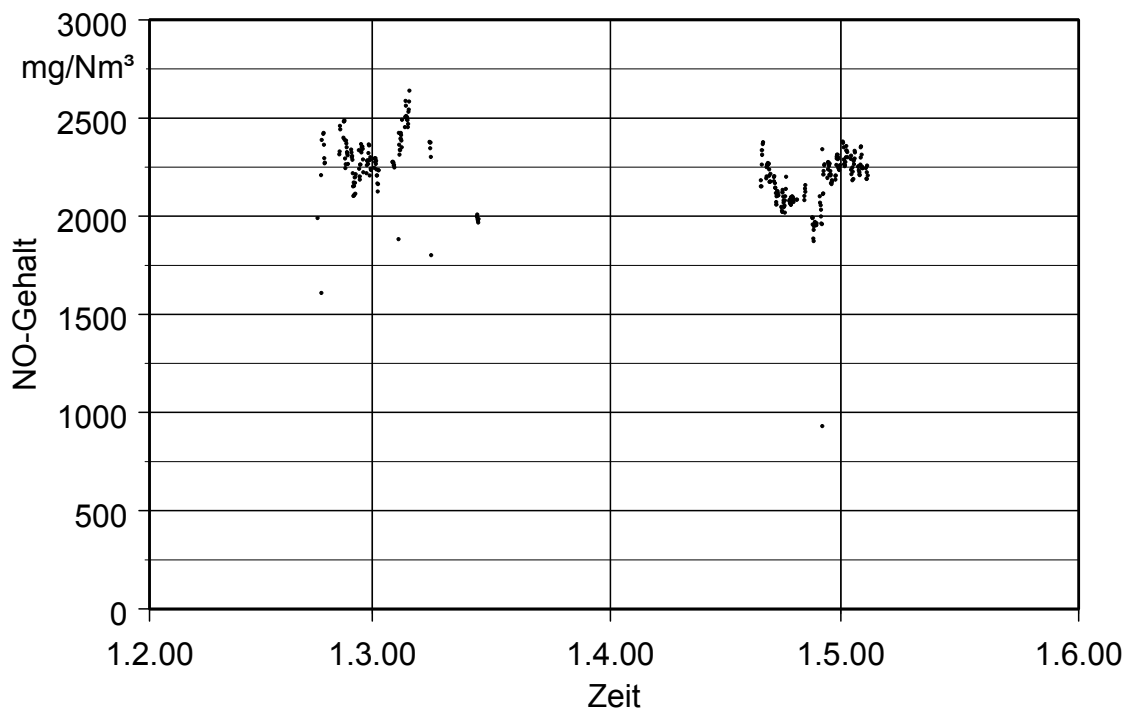


Abbildung 63: NO-Konzentration im Abgas am BHKW Greußenheim, Langzeitmessung – Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>

### 3.3.3 BHKW Landtechnik Weihenstephan

Das BHKW der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Weihenstephan wird mit einer Nennleistung von 8 kW<sub>el</sub> betrieben. Es können auch an diesem Aggregat, wie beim BHKW in Greußenheim Teillaststufen eingestellt werden. Das BHKW wurde am 03.05.00 von einer herkömmlichen Motorenölschmierung auf ein System mit kontinuierlicher Ölauffrischung umgestellt (Plantotronic®). Seither wird wie beim BHKW in Weißenburg dem Kraftstoff etwa 2 % gebrauchtes Motoröl aus der Ölwanne zudosiert und mitverbrannt.

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind in Abbildung 64 zusammengefasst.

Die CO-Emissionen bei **Nennlastbetrieb** liegen im Mittel bei etwa 20 mg/Nm<sup>3</sup> mit Schwankungen zwischen ca. 10 und 40 mg/Nm<sup>3</sup>. Die Halbstundenmittelwerte eines Messtages unterliegen nur einer geringen Streuung (Abbildung 64), wohingegen die Halbstundenwerte unterschiedlicher Messtage größeren Streuungen unterworfen sind. So sind beispielsweise die CO-Emissionen am 13.07.00 etwa 50 % höher als bei den Messungen am Vortag (12.7.00), ohne dass sich Bedingungen entscheidend geändert hätten. Lediglich der Luftfilter wurde zwischen den beiden Messtagen erneuert. Insgesamt befinden sich die CO-Emissionen jedoch auf sehr niedrigem Niveau. Erstaunlicherweise wurden mit einem im Labor hergestellten stark verschmutzten Kraftstoff der den Grenzwert der Gesamtverschmutzung des RK-Qualitätsstandards um mehr als das 200fache übersteigt die niedrigsten CO-Emissionen gemessen. Die CO-Emissionen waren hier in etwa nur halb so hoch wie bei den am gleichen Versuchstag durchgeführten Emissionsmessungen mit einem deutlich weniger verschmutzten Rapsöl.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen betragen über die gesamte Beobachtungszeit bei Nennlastbetrieb nahezu konstant etwa 2000 mg/Nm<sup>3</sup>.

Auf insgesamt niedrigem Niveau befinden sich die HC-Emissionen. Sie betragen ca. 2-7 mg/Nm<sup>3</sup> und steigen tendenziell mit zunehmenden Betriebsstunden leicht an, was mitunter auf eine Verschlechterung der Verbrennung, z.B. durch Ablagerungen an Düsen und Ventilen hindeuten könnte.

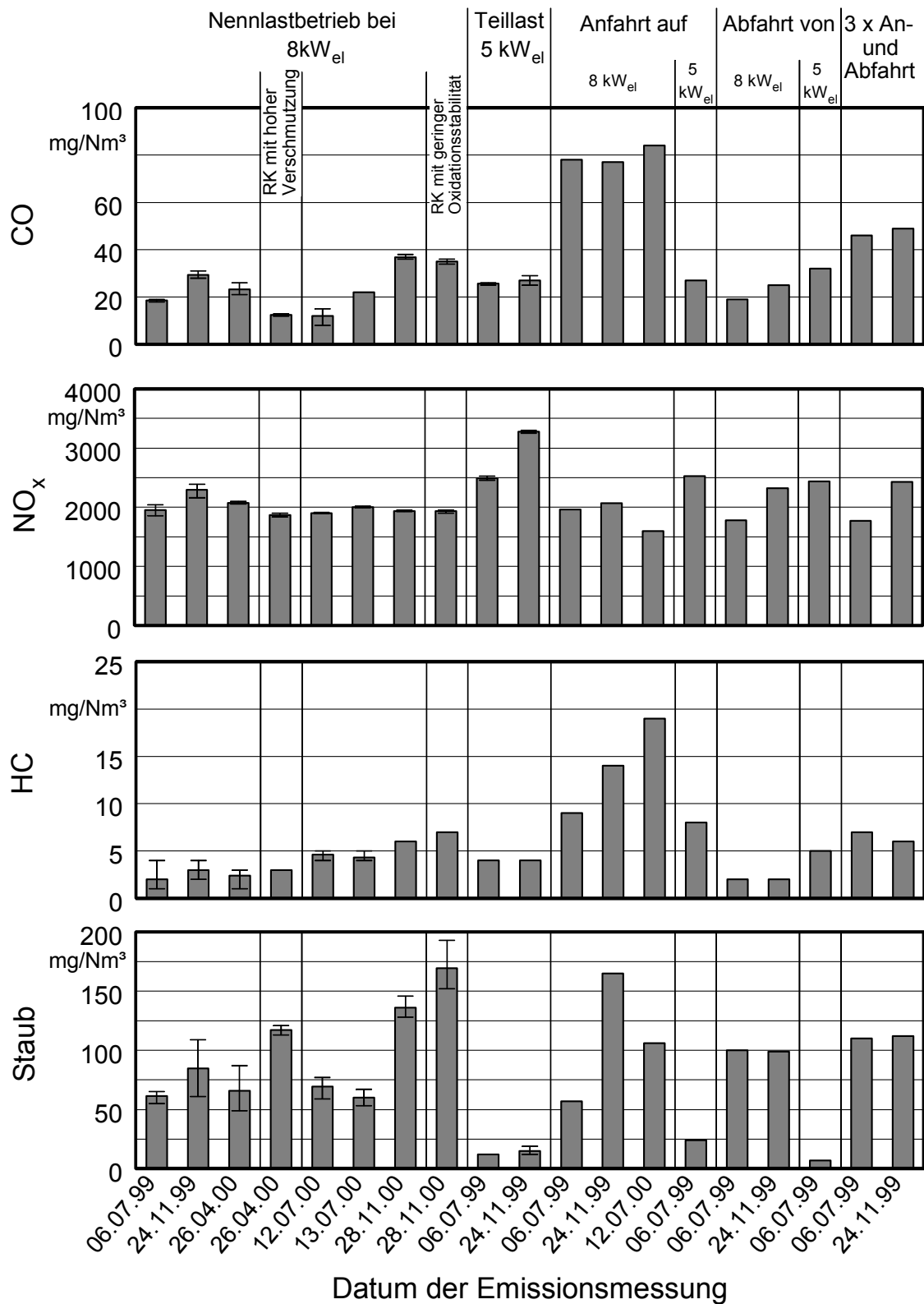


Abbildung 64: Ergebnisse der Emissionsmessungen am BHKW LT Weihenstephan (Nennleistung: 8 kW<sub>el</sub>) - Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Die Staubemissionen betragen beim BHKW in Weihenstephan zwischen 60 und 170 mg/Nm<sup>3</sup> und sind größeren Schwankungen auch innerhalb eines Versuchstages unterworfen, als andere Emissionskomponenten. Besonders hohe Staubemissionen traten beim Einsatz des stark verschmutzten und auch vorgealterten Rapsöls mit geringer Oxidationsstabilität auf. Allerdings wurden auch bei nicht oxidativ vorgeschädigtem Kraftstoff am 28.11.00 mit ca. 130 mg/Nm<sup>3</sup> sehr hohe Staubemissionen ermittelt, so dass nicht zwingend ein Einfluss der Oxidationsstabilität auf die Höhe der Staubemissionen abgeleitet werden kann. Vielmehr sind die im Vergleich zu den früheren Messtagen deutlich höheren Staubemissionen am 28.11.00 wahrscheinlich auf eine schlechtere Verbrennungsgüte zurückzuführen.

Ein **Teillastbetrieb** mit 5 kW<sub>el</sub> ergibt gegenüber dem Betrieb mit 8 kW<sub>el</sub> nahezu unveränderte CO-Emissionen einen Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen um etwa 25-30 % und etwas höhere HC-Emissionen, die aber immer noch weniger als 5 mg/Nm<sup>3</sup> betragen. Im Gegensatz dazu wurden bei Teillast (5 kW<sub>el</sub>) sehr niedrige Staubkonzentrationen von ca. 10-15 mg/Nm<sup>3</sup> im Abgas festgestellt. Dies entspricht etwa 1/6 der bei Nennlast (8 kW<sub>el</sub>) emittierten Staubmenge. Die Staubemissionen nehmen mit sinkender Last ab, was auf eine bessere Rußoxidation durch den höheren Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft hindeutet (vgl. Anhang 20) und sich auch bei den An- und Abfahrversuchen bei Teillast bestätigt.

Beim BHKW der Landtechnik sind die CO- und HC-Emissionen während der **Anfahrt** (Start und Warmlauf) im Vergleich zum Nennlastbetrieb etwa 3-4mal so hoch und die Staubemissionen in etwa gleich bis doppelt so hoch. Die Stickstoffoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) sind in der Start- und Warmlaufphase des Motors bei der ersten Messung am 06.07.00 unverändert, bei der zweiten (24.11.99) und dritten (12.07.00) Messung etwas geringer (ca. 10 %) als bei Nennlast.

Das Abstellen des Motors zwei Minuten vor Ende der 30-Minuten-Messung (**Abfahrt**) wirkt sich bei den betrachteten Halbstundenmittelwerten kaum auf die CO-, die NO<sub>x</sub> oder die HC-Emissionen aus. Jedoch wurden um etwa 20-40 % höhere Staubemissionen mit Werten von ca. 100 mg/Nm<sup>3</sup> im Vergleich zum stationären Nennlastbetrieb ermittelt.

Eine **dreimalige An- und Abfahrt** des betriebswarmen Motors innerhalb von 30 Minuten bewirkt einen Anstieg der CO-, HC- und Staubemissionen im Vergleich zu Nennlast. Dagegen verhalten sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen uneinheitlich. Diese sind bei der ersten Messung bei dreimaligem An- und Abfahren des Motors innerhalb einer

halben Stunde etwas niedriger als bei Nennlastbetrieb, wohingegen sie bei der zweiten Messung am 24.11.99 geringfügig höher liegen.

Neben den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten wurden am BHKW der Landtechnik auch die **Aldehydemissionen** bei der Verwendung von zwei unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten vor und nach dem Oxidationskatalysator bestimmt. Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse der Messungen, die vom TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb GmbH durchgeführt wurden. Die Rohgasemissionen (vor Oxikat) sind als dunkelgraue Balken, die Reingasemissionen (nach Oxikat) als hellgraue Balken dargestellt. Aus Abbildung 65 wird ersichtlich, dass die Konzentration aller untersuchten Aldehydkomponenten im Abgas durch den Oxidationskatalysator stark abnimmt. Sie beträgt im Reingas für Formaldehyd ca. 1,1 mg/Nm<sup>3</sup>, für Acrolein ca. 0,8 mg/Nm<sup>3</sup>, für Acetaldehyd ca. 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> und für Propionaldehyd weniger als 0,2 mg/Nm<sup>3</sup>. Bei drei der sechs Propionaldehydmessungen wurde die Nachweisgrenze von 0,05 mg/Nm<sup>3</sup> unterschritten. Die Konzentration von Butyraldehyd lag bei allen Messungen unter der Nachweisgrenze.

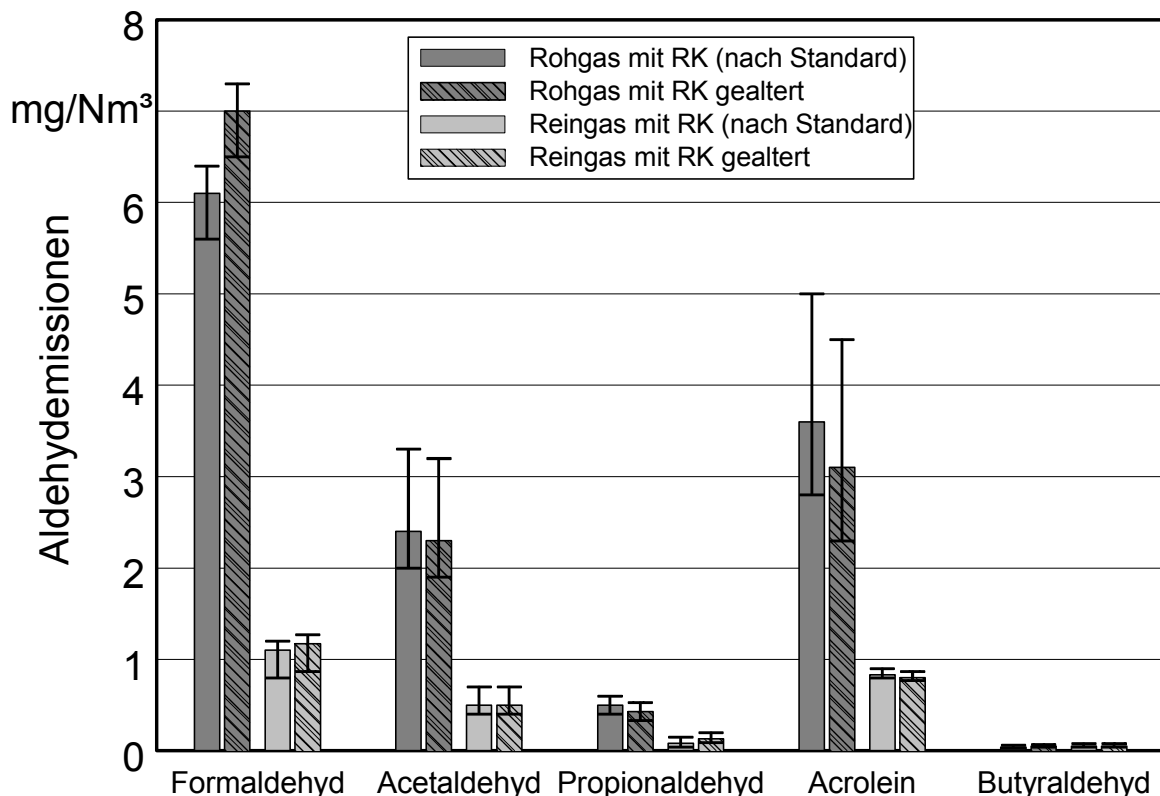


Abbildung 65: Aldehydemissionen bei Nennlast, Mittelwert, Minimum, Maximum von 30-Minuten-Mittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Beim Einsatz eines oxidativ vorgeschädigten Kraftstoffs (Ergebnisse dazu sind als schraffierte Balken dargestellt) ist kaum eine Veränderung der Aldehydemissionen zu beobachten. Lediglich rohgasseitig können beim Einsatz des gealterten Rapsöls im Mittel leicht höhere ( $0,9 \text{ mg/Nm}^3$ ) Formaldehydemissionen beobachtet werden, die jedoch durch den Oxidationskatalysator auf für ungealterte Öle übliche Werte reduziert werden. Dagegen sind die Konzentrationen der Komponenten Acrolein um ca.  $0,5 \text{ mg/Nm}^3$  und Acetaldehyd sowie Propionaldehyd jeweils ca.  $0,1 \text{ mg/Nm}^3$  niedriger als bei frischem Rapsöl mit hoher Oxidationsstabilität. Es könnte also eine tendenzielle Verlagerung der Emissionen von den längerkettigen Aldehyden (C2-C4) zum kürzerkettigen Formaldehyd (C1) stattgefunden haben. Allerdings ist diese Veränderung im Emissionsbild nicht signifikant, da sie im Bereich der Messunsicherheit von etwa  $0,5 \text{ mg/Nm}^3$  liegt. Im Reingas können bei den Aldehydemissionen keine Unterschiede zwischen den Rapsölen mit niedriger und hoher Oxidationsstabilität beobachtet werden.

Oxidationskatalysatoren sind heute weit verbreitet und in allen drei untersuchten BHKW eingebaut. Zur Überprüfung der Umsetzungsrate wurden beim BHKW der Landtechnik Weihenstephan mehrere Emissionsmessungen im Roh- und Reingas durchgeführt. Für die einzelnen Emissionskomponenten wurden die in Abbildung 66 dargestellten Minderungsraten erzielt. Die höchsten Emissionsminderungen ergeben sich für Kohlenmonoxid mit fast 90 %, für die Aldehydkomponenten mit ca. 75 – 85 % und für die Gesamtkohlenwasserstoffe mit etwa 70 %, was die Forderung nach Einsatz von Oxidationskatalysatoren bei Pflanzenöleinsatz u.a. zur Geruchsminderung bestätigt. Auch bei den NO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen war ein geringfügiger Rückgang erkennbar.

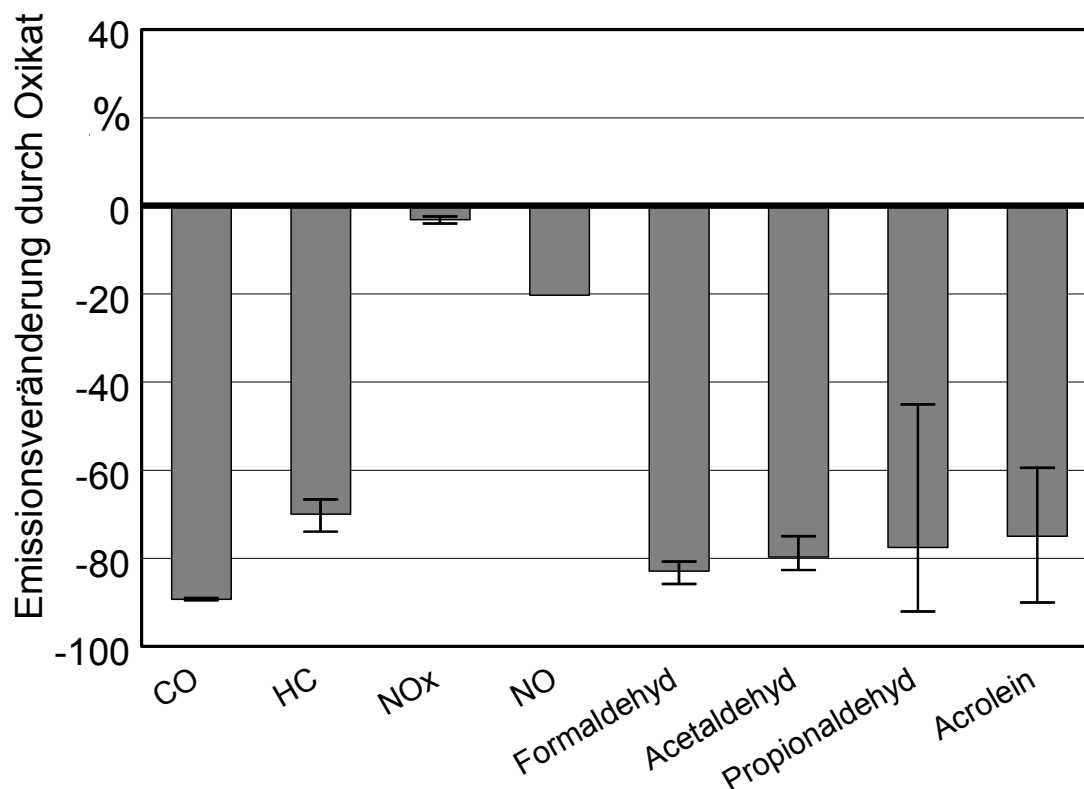


Abbildung 66: Umsetzungsrate des Oxidationskatalysators des BHKW Landtechnik Weihenstephan

#### Langzeit-Emissionsmessung:

Bei den Langzeit-Emissionsmessungen im November 1999 bis Januar 2000 wurden beim BHKW in Weihenstephan während einer Programmlaufzeit von 304 h eine durchschnittliche CO-Konzentration von 4,9 mg/Nm<sup>3</sup> (bezogen auf 5% O<sub>2</sub>-Gehalt) bei einer Standardabweichung von 16,1 mg/Nm<sup>3</sup> ermittelt (Tabelle 15).

Tabelle 15: Ergebnisse der Langzeitemissionsmessung am BHKW in Weihenstephan

	O <sub>2</sub> in %	CO <sub>2</sub> in %	CO in mg/Nm <sup>3</sup> **)	NO in mg/Nm <sup>3</sup> **)
Mittelwert <sup>*)</sup>	9,8	8,4	4,9	1341
Standardabweichung <sup>*)</sup>	1,1	0,8	16,1	312

<sup>\*)</sup> Programmlaufzeit: 304 h

<sup>\*\*)</sup> bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Die mittleren CO-Emissionen, liegen mit  $4,9 \text{ mg/Nm}^3$  bei den Langzeitmessungen deutlich niedriger, als bei den wiederkehrenden Messungen, wo Werte zwischen ca. 12 und  $37 \text{ mg/Nm}^3$  ermittelt wurden. Dies ist vorwiegend auf die Verwendung unterschiedlicher Messverfahren zurückzuführen, die bei sehr niedrigen Emissionswerte (unterer Messbereich) ähnlich wie bei den Messungen am BHKW in Greußenheim von einander abweichende Ergebnisse liefern können. In Abbildung 67 sind die CO-Konzentrationen während des Erfassungszeitraums dargestellt. Demnach schwanken die CO-Emissionen zwischen ca. 0 und  $5 \text{ mg/Nm}^3$  mit nur vereinzelt Werten darüber, was auf einen sehr gut arbeitenden Oxidationskatalysator hinweist.

Die mittleren NO-Emissionen (angegeben als  $\text{NO}_2$ ) betragen  $1341 \text{ mg/Nm}^3$  (unter Normbedingungen, bei 5%  $\text{O}_2$ -Gehalt) bei einer Standardabweichung von  $312 \text{ mg/Nm}^3$  (Tabelle 14). Die Schwankungsbreite der NO-Emissionen (angegeben als NO) liegt etwa zwischen ca. 1200 und  $1600 \text{ mg/Nm}^3$  und stimmt mit den stichpunktartigen NO-Messungen bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen von 1320 bzw.  $1568 \text{ mg/Nm}^3$  überein (Abbildung 68 und Anhang 20).

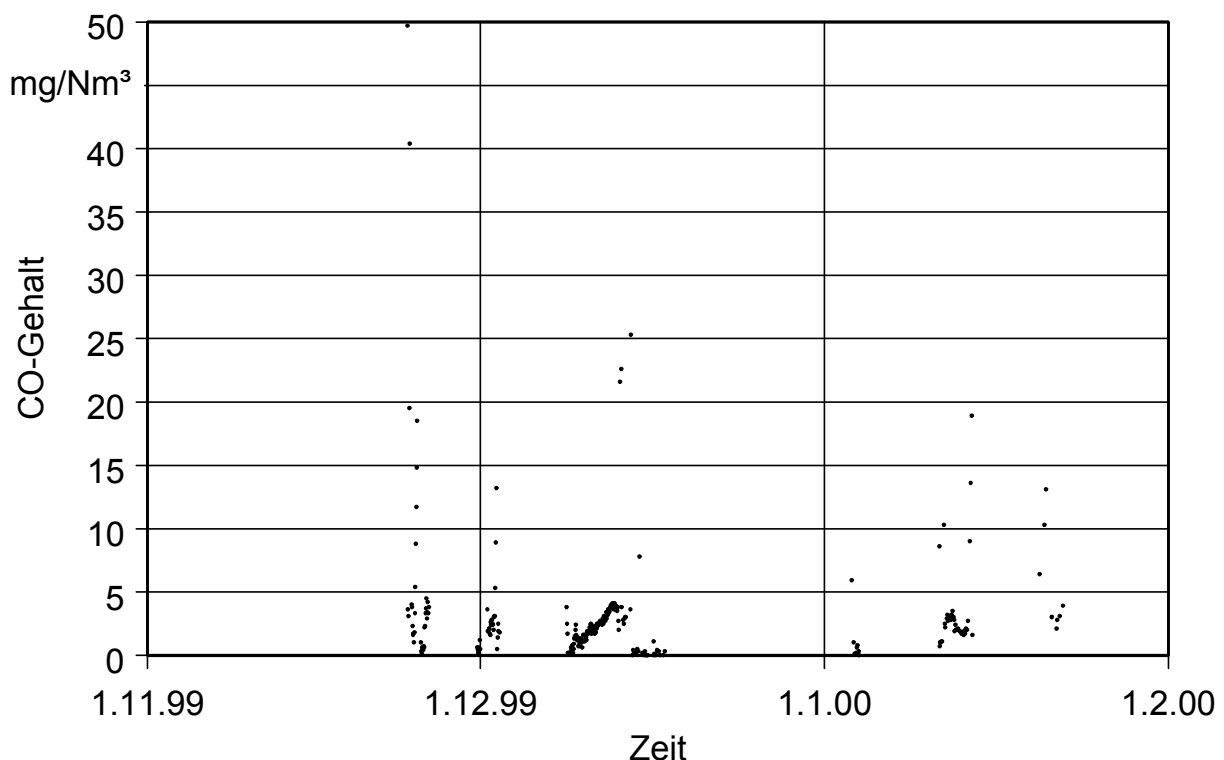


Abbildung 67: CO-Konzentration im Abgas am BHKW Weihenstephan, Langzeitmessung – Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1013 mbar) und 5 %  $\text{O}_2$



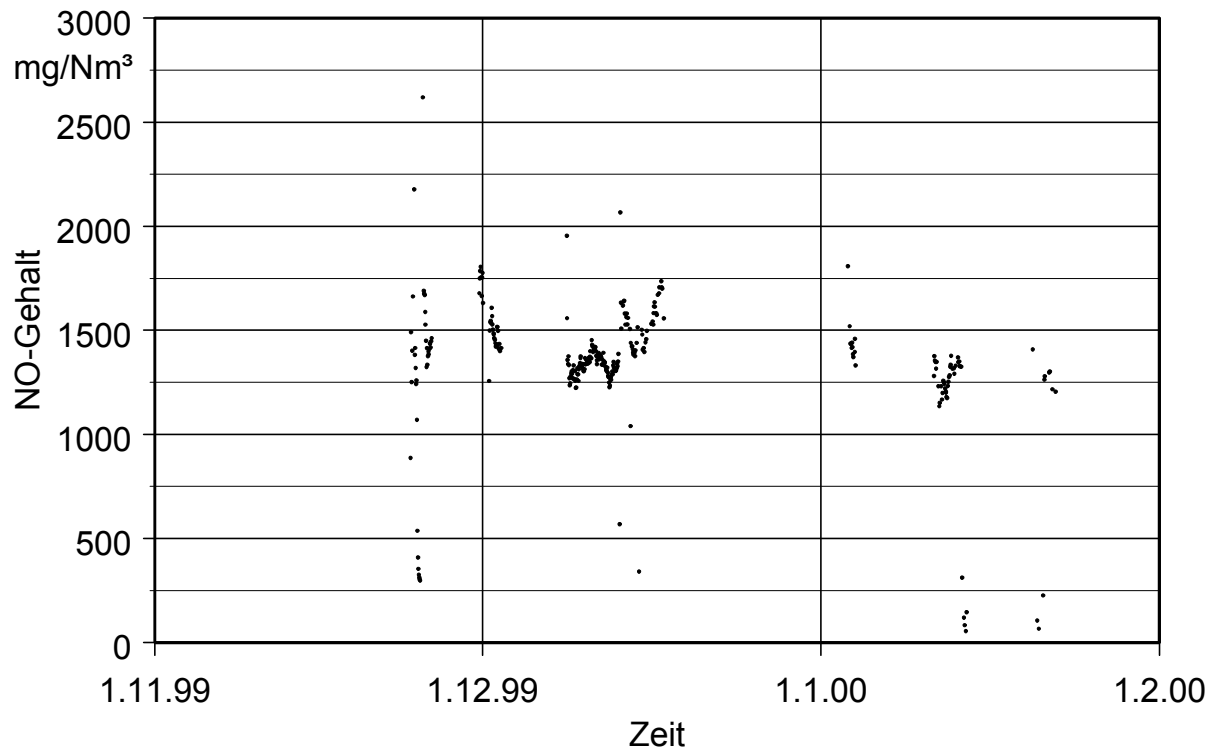


Abbildung 68: NO-Konzentration im Abgas am BHKW Weihenstephan, Langzeitmessung – Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>

### 3.3.4 Vergleich und Einordnung des Emissionsverhaltens

Die Einordnung der ermittelten Abgasemissionen soll anhand der **immissionsschutzrechtlichen Anforderungen** erfolgen. Diese werden nachfolgend kurz erläutert.

Zur Begrenzung der Emissionen sind für immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtige BHKW die Emissionsbegrenzungen der TA Luft 86 [3] bzw. die sich hieraus ableitenden Werte der Konkretisierung der Dynamisierungsklauseln vom 06.08.1991 und des StMLU-Schreibens (UMS) (zum Rußfiltereinsatz bei stationär betriebenen Dieselmotoren; Az. 8267-7/84-41178) vom 29.11.1996 heranzuziehen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Wichtige immissionsschutzrechtliche Vorschriften für genehmigungsbedürftige Verbrennungsmotoranlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung (FWL) (Selbstzündungsmotoren)

Schadstoff	Vorschrift	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,65 g/Nm <sup>3</sup>
Staub	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	≥ 1 MW	≤ 0,13 g/Nm <sup>3</sup> (alter Grenzwert), Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1 (1991 Länderausschuß für Immissionsschutz (LAI))	≥ 1 MW	50 mg/Nm <sup>3</sup> durch motor. Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
		< 1 MW	Zielwert: 80 mg/Nm <sup>3</sup> durch motor. Maßnahmen, Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben
	UMS <sup>**)</sup> vom 26.11.96	≥ 1 MW	20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern
< 1 MW		Zielwert: 20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit	
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	TA Luft 86, Nr. 3.3.1.4	< 3 MW	≤ 4,0 g/Nm <sup>3</sup> , Ausschöpfung motorischer und anderer dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen
	Konkretisierung der Dynamisierung, Nr.3.3.1.4.1	≥ 1 MW	Zielwert: 1,0 g/Nm <sup>3</sup> durch den Einsatz von Entstickungskatalysatoren (SCR)
krebserzeugende Stoffe	TA Luft 86, Nr. 2.3	≥ 1 MW	Minimierungsgebot (Einsatz von Rußfiltern)
organische Stoffe	TA Luft 86, Nr. 3.1.7	≥ 1 MW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoffe der Klasse I: 20 mg/Nm<sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 0,1 kg/h)</li> <li>• Stoffe der Klasse II: 0,10 g/Nm<sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 2 kg/h)</li> <li>• Stoffe der Klasse III: 0,15 g/Nm<sup>3</sup> (bei einem Massenstrom ≥ 3 kg/h)</li> </ul>

<sup>\*)</sup> bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

<sup>\*\*)</sup> Schreiben des StMLU

Daraus lassen sich die derzeit geforderten Emissionsgrenzwerte für den Pflanzenölbetrieb ableiten (Tabelle 17). Für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) kleiner 1 MW sind derzeit keine allgemeingültigen Vorschriften zur Emissionsbegrenzung einschlägig. Im Rahmen einer Neuauflage der TA-Luft wird jedoch auch die Einführung von Emissionsbegrenzungen für stationäre Verbrennungsmotoranlagen mit einer FWL < 1 MW diskutiert. Emissionsbegrenzungen werden auch für diese Anlagen - unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff (Diesel, Heizöl oder Pflanzenöl) - aus Sicht des Immissionsschutzes für erforderlich gehalten (Tabelle 18).

Tabelle 17: Emissionsbegrenzungen für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Pflanzenöl-BHKW (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung  $\geq 1$  MW) [1],[15]

Schadstoff	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	$\geq 1$ MW	$\leq 0,65$ g/Nm <sup>3</sup>
Staub	$\geq 1$ MW	20 mg/Nm <sup>3</sup> entsprechend UMS v. 26.11.1996 (derzeit nur durch den Einsatz von Rußfiltern sicher zu gewährleisten)
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	$\geq 1$ MW	$\leq 1,0$ g/Nm <sup>3</sup> (durch SCR oder motorische Maßnahmen)
Gerüche/HC	$\geq 1$ MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

<sup>\*)</sup> bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Tabelle 18: Empfohlene Emissionsbegrenzungen (derzeitige Orientierungswerte) für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d.h. Gesamtfeuerungswärmeleistung < 1 MW) [15]

Schadstoff	FWL	Anforderung <sup>*)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	< 1 MW	$\leq 0,65$ g/Nm <sup>3</sup>
Staub	< 1 MW	Zielwert: 20 mg/Nm <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	$\geq 500$ kW < 1 MW	$\leq 2,5$ g/Nm <sup>3</sup> , (durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
	< 500 kW	$\leq 3,0$ g/Nm <sup>3</sup> , (Zielwert 2,5 g/Nm <sup>3</sup> , durch motorische Maßnahmen analog EURO II)
Gerüche/HC	< 1 MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

<sup>\*)</sup> bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

In Abbildung 69 sind die **Kohlenmonoxidemissionen** (CO) der wiederkehrenden Emissionsmessungen der drei BHKW dargestellt. Die zum Vergleich herangezogene Emissionsbegrenzung nach TA-Luft von  $650 \text{ mg/Nm}^3$  (5 %  $\text{O}_2$ ) für Anlagen größer  $1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$  wurde von allen BHKW durch die installierten Oxidationskatalysatoren um mindestens die Hälfte unterschritten. Die CO-Emissionen der BHKW in Weihenstephan und Greußenheim liegen sogar durchweg unter 10 % der geforderten  $650 \text{ mg/Nm}^3$ . Das Aggregat 2 des BHKW in Weißenburg hingegen schnitt bei der ersten und zweiten Messung mit mittleren CO-Emissionen von ca.  $200\text{--}291 \text{ mg/Nm}^3$  aufgrund eines wenig effektiven Oxidationskatalysators und hohen Abgasgegendrucks (defekter Partikelfilter) deutlich schlechter ab. Allerdings konnten nach dem Ausbau des defekten Partikelfilters und dem Austausch des Oxidationskatalysators am 17.10.00 ein starker Rückgang der CO-Emissionen auf etwa  $60 \text{ mg/Nm}^3$  festgestellt werden.

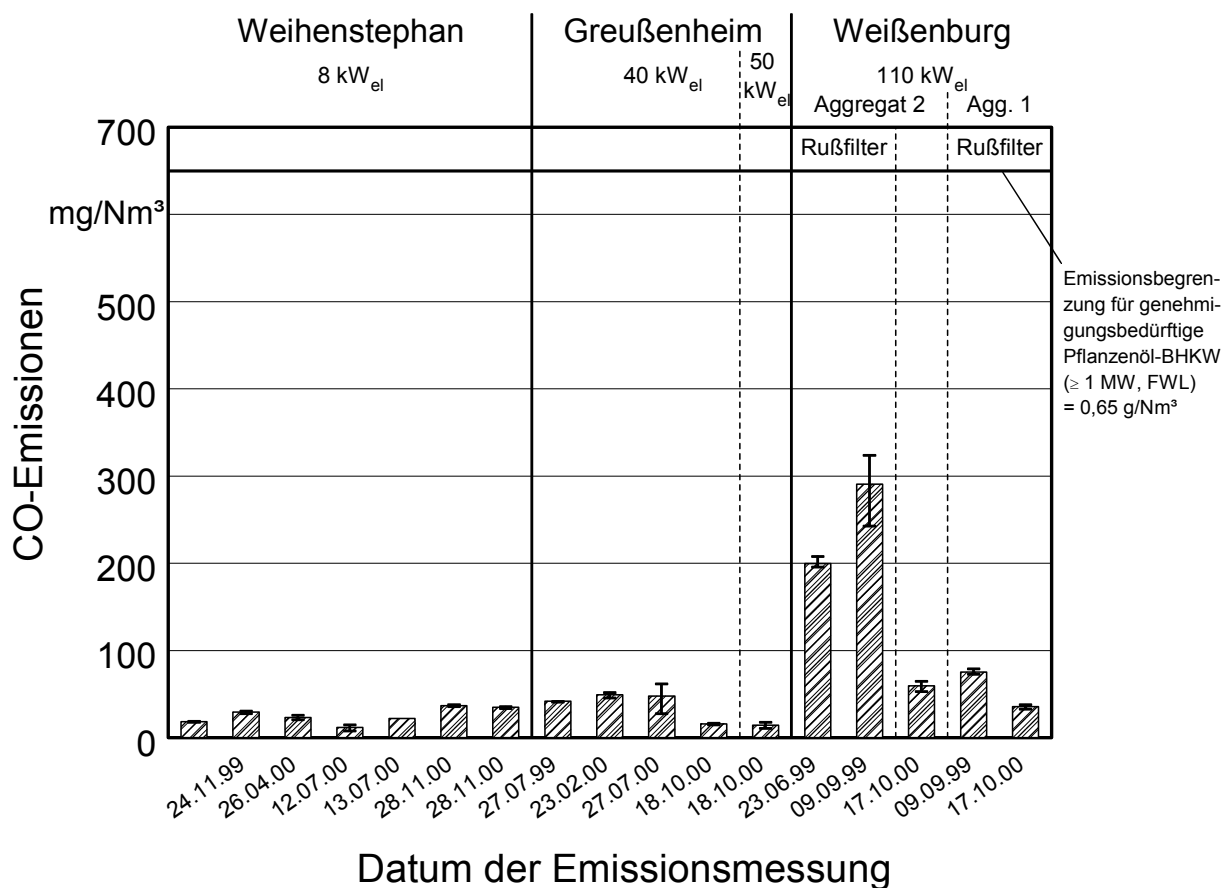


Abbildung 69: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittelwert, Minimum, Maximum von 30-Minuten-Mittelwerten, bez. auf trockenes Abgas unter Normbedingungen ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1013 \text{ mbar}$ ) u. 5 %  $\text{O}_2$ -Gehalt

Die **Stickstoffoxidemissionen** ( $\text{NO}_x$ ) liegen bei allen drei Aggregaten zwischen ca. 2000 und 3500  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  und damit unter der Emissionsbegrenzung von 4000  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  nach TA-Luft 86, die erst für Anlagen größer 1  $\text{MW}_{\text{FWL}}$  gültig ist (Abbildung 70). Der Zielwert von 1000  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  gemäß Konkretisierung der Dynamisierungsklausel vom 06.08.91 [10] wird jedoch bei keiner der durchgeführten Messungen an den drei ausgewählten Anlagen erreicht. Besonders bei größeren Aggregaten ( $> 1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$ ), wo der Minderung von Stickstoffoxidemissionen besondere Beachtung geschenkt wird, sind daher Maßnahmen wie Abgasrückführung oder Abgasreinigung, z.B. durch den Einsatz von Denox-Katalysatoren in Betracht zu ziehen. Bei Motoren kleinerer Leistung sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch motorische Maßnahmen entsprechend dem Stand der Technik zu mindern. Die im Vergleich zu den beiden direkteinspritzenden Motoren in Greußenheim und Weißenburg niedrigeren Stickstoffoxidemissionen beim BHKW Weihenstephan begründen sich durch das Wirbelkammer-Verbrennungsverfahren, das durch eine geringere  $\text{NO}_x$ -Bildung gekennzeichnet ist.

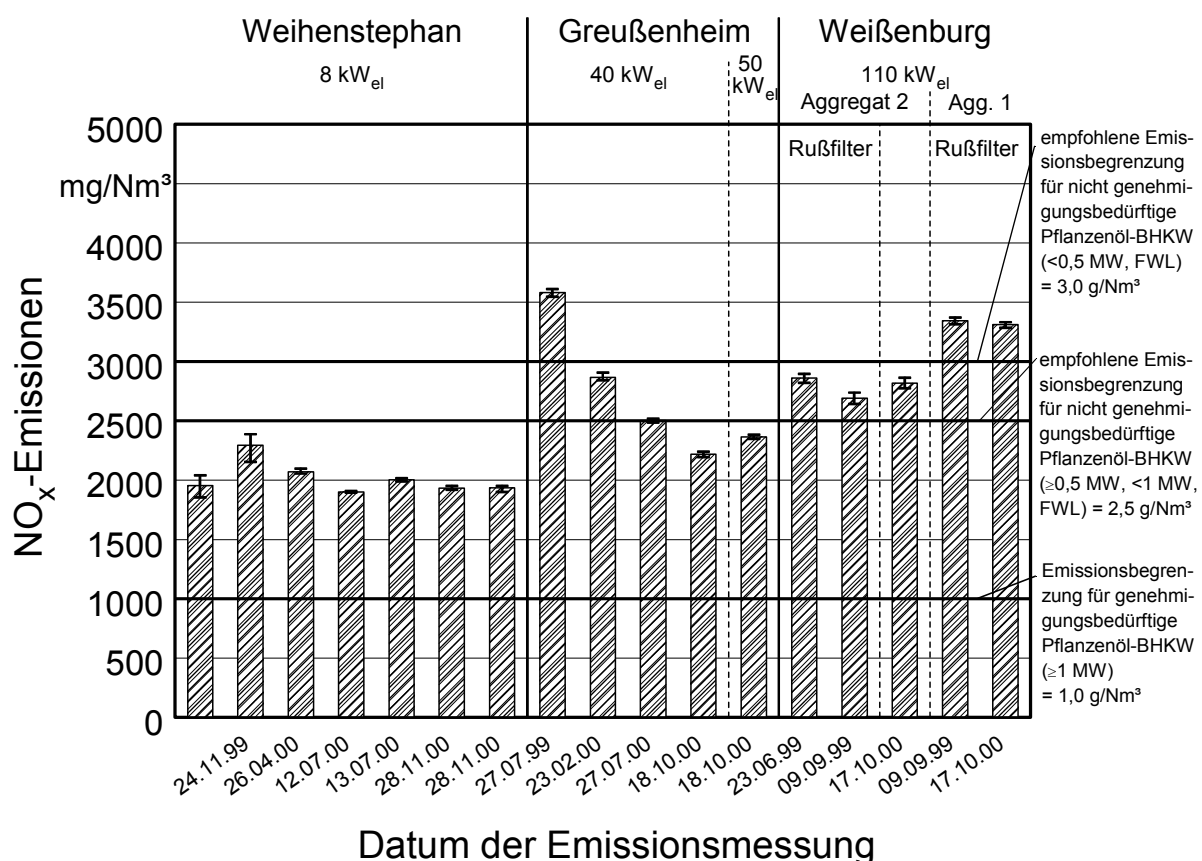


Abbildung 70:  $\text{NO}_x$ -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittelwert, Minimum, Maximum von 30-Minuten-Mittelwerten, bez. auf trockenes Abgas unter Normbedingungen ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1013 mbar) u. 5 %  $\text{O}_2$ -Gehalt

Bei den **Staubemissionen** zeigen sich im Gegensatz zu den anderen Emissionskomponenten größere Schwankungsbreiten der Halbstundenmittelwerte sowohl innerhalb eines Messtags als auch im Vergleich mehrerer Messtage (vgl. Abbildung 71). Beim BHKW in Weißenburg sind die Staubemissionen wegen des dort eingebauten Partikelfilters mit 2-6 mg/Nm<sup>3</sup> am niedrigsten. Das BHKW erfüllt also auch den Zielwert nach TA-Luft von 20 mg/Nm<sup>3</sup> gemäß dem Schreiben des StMLU vom 26.11.96 [11]. Ohne Partikelfilter dagegen nimmt der Staubgehalt im Abgas auf nahe 80 mg/Nm<sup>3</sup> zu. Der empfohlene Zielwert der neuen TA-Luft von 20 mg/Nm<sup>3</sup>, gültig für Anlagen kleiner 0,5 MW FWL wurde von keinem BHKW (ohne Partikelfilter) erreicht. Es erscheint unwahrscheinlich, dass dieser Zielwert allein durch motorische Maßnahmen (z.B. durch optimierte Einspritzdüsen und -systeme) erreicht werden kann.

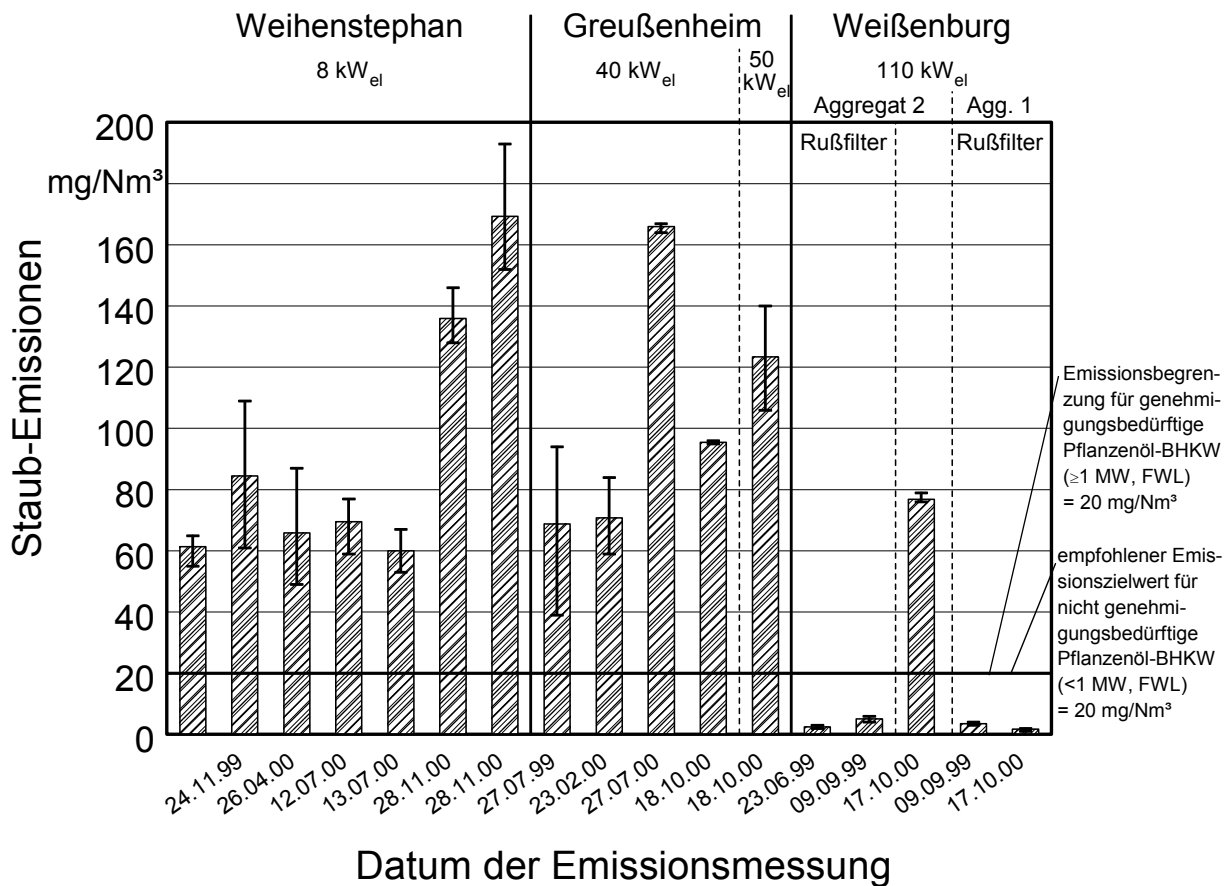


Abbildung 71: Staubemissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittelwert, Minimum, Maximum von 30-Minuten-Mittelwerten, bez. auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) u. 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

In Abbildung 72 sind die **Gesamtkohlenwasserstoffemissionen** (HC) dargestellt. Dabei wurden am BHKW mit 8 kW<sub>el</sub> nur sehr geringe HC-Emissionen von weniger als 4 mg/Nm<sup>3</sup> ermittelt. Die beiden anderen BHKW mit 60 und 110 kW<sub>el</sub> emittieren im Mittel etwa zwischen 9 und 15 mg/Nm<sup>3</sup>. Die deutlich niedrigere Abgastemperatur von ca. 116 °C beim BHKW der Landtechnik (8 kW<sub>el</sub>) im Vergleich zum BHKW in Greußenheim (ca. 200 °C) und in Weißenburg (156 °C) könnte allerdings darauf hindeuten, dass beim BHKW der Landtechnik ein Teil der Kohlenwasserstoffe bei den geringeren Temperaturen im bzw. nach dem Wärmetauscher kondensiert und sich an Rußpartikeln im Abgasstrom anlagert.

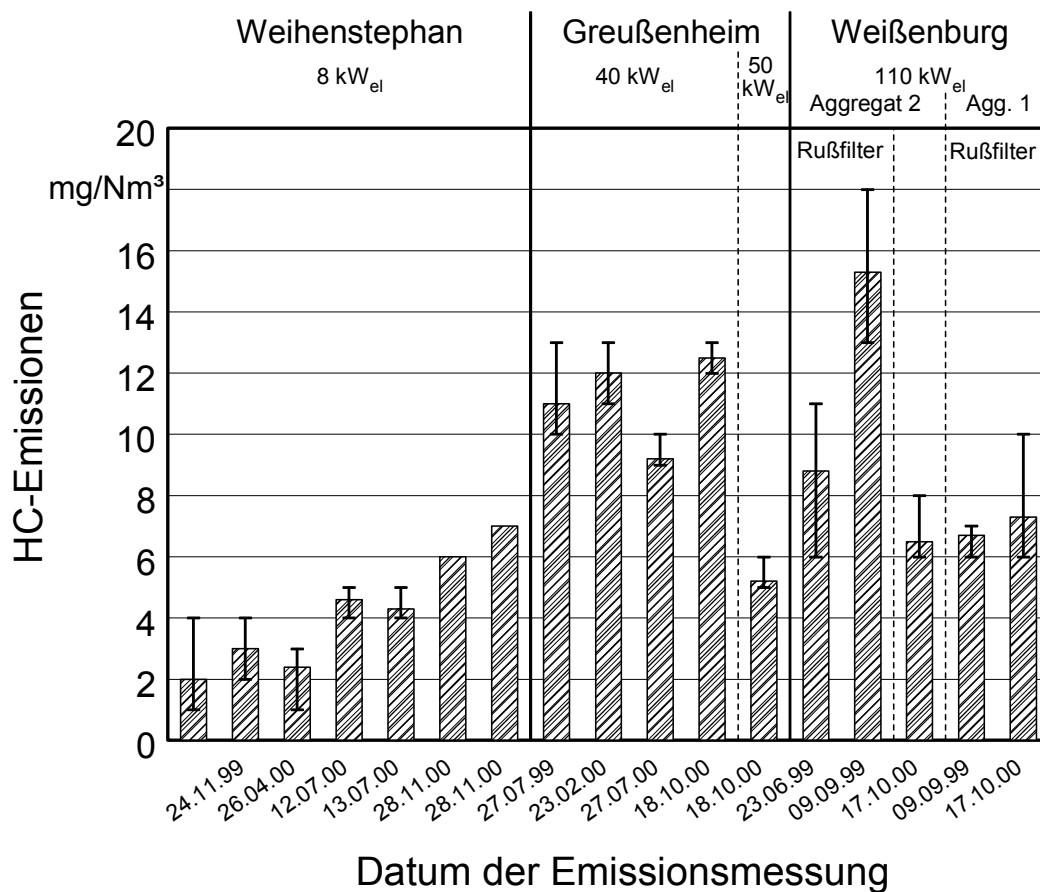


Abbildung 72: Kohlenwasserstoffemissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittelwert, Minimum, Maximum von 30-Minuten-Mittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

## 4 Schwachstellenanalyse, Bewertung, Lösungsansätze

Im Kapitel 3.2.3 sind die während des Beobachtungszeitraums aufgetretenen Störungen der drei untersuchten BHKW dargestellt. Darauf aufbauend werden nachfolgend Schwachstellen, sofern sich Zusammenhänge mit dem verwendeten Kraftstoff oder dem eingesetzten pflanzenöлтаuglichen Motor ableiten lassen, entlang der Nutzungskette aufgezeigt, mögliche Ursachen analysiert und bewertet. Dabei werden auch Hinweise gegeben, die zur Vermeidung von pflanzenölspezifischen Störungen beitragen können. Weitere über diesen Bericht hinausgehende Hilfestellungen zur Planung und zum Betrieb eines Pflanzenöl-BHKW werden in dem „Leitfaden Pflanzenöl-BHKW“, der auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellt worden ist, gegeben.

### Pflanzenölqualität

Von Seiten des Motors sowie der Peripheriekomponenten (z.B. Einspritz- und Kraftstoffförderpumpe, Einspritzdüsen) werden zur Aufrechterhaltung der Funktionssicherheit bestimmte Ansprüche an die Kraftstoffqualität gestellt. Wichtige Qualitätsmerkmale von Pflanzenöl sind entweder durch die Ölsaart vorgegeben oder werden durch eine Vielzahl von Verfahrensparametern bei der Ölgewinnung und Ölreinigung bestimmt.

Eine unzureichende Partikelabscheidung bei der Ölreinigung führt üblicherweise zu einer hohen Gesamtverschmutzung im Pflanzenöl, wodurch verstärkt Verstopfungen von Leitungen, Filtern und Düsen sowie Schäden im Einspritzsystem hervorgerufen werden können. Bei einem der drei untersuchten Aggregate mussten häufig Kraftstofffilter gewechselt werden, was sowohl auf den erhöhten Gehalt an Partikeln im Rapsöl als auch auf die Art des eingesetzten Kraftstofffilters zurückgeführt werden kann. Bei der Verwendung von Rapsöl mit niedrigerem Feststoffgehalt und insbesondere auch durch den Austausch des Kraftstofffilters (gleicher Typ, anderer Hersteller) konnte die Filterstandzeit deutlich erhöht werden. Die Spezifikation der verwendeten Kraftstofffilter (v.a. Filterfeinheit) muss aber in jedem Fall den Anforderungen des Aggregats entsprechen, um nicht durch ungenügende Filterleistung Störungen im Einspritzsystem oder Ablagerungen im Motor zu verursachen. Oft werden auch Motorölfilter als Kraftstofffilter für Pflanzenöl eingesetzt.

Verstopfungen im Kraftstoffsystem eines BHKW traten durch Verunreinigungen des Rapsöls mit stärkehaltiger Schlempe auf, die das Transportfahrzeug zuvor geladen hatte. Daraufhin war eine umfangreiche Reinigung von Kraftstofftanks und Kraftstoffleitungen sowie die Erneuerung vieler kraftstoffführender Komponenten (Kraftstofffil-



ter, Einspritzpumpe, Einspritzdüsen) notwendig. Auch wurde eine Reinigung des Oxidationskatalysators und des Partikelfilters veranlasst.

Restmengen von Lösungsmittel und eine unzureichende Raffination von extrahiertem Pflanzenöl (nicht bei Kaltpressung in dezentralen Anlagen) können zu einem sprunghaften Anstieg der Abgastemperatur, einem unkontrollierten Verbrennungsverlauf und zur Bildung von Ablagerungen im Brennraum führen. Dies wurde bei einem BHKW beobachtet, das nicht im Rahmen dieses Vorhabens untersucht wurde.

Die hier beschriebenen Störungen (Filterverstopfungen, veränderter Verbrennungsverlauf) treten oft unmittelbar oder kurz nach der Verwendung des Kraftstoffs von unzureichender Qualität auf und können deshalb meist auf die Höhe oder die Art der Verunreinigung zurückgeführt werden. Schwieriger gestaltet es sich im Praxisbetrieb, aufgrund des Zusammenspiels verschiedener Einflussfaktoren und den erst später erkennbaren Folgen, einen erhöhten Verschleiß, Ablagerungen oder Korrosionen im Motor und den Peripheriekomponenten auf bestimmte Kraftstoffkennwerte zurückzuführen. Dennoch können anhand bisheriger Betriebserfahrungen mit Pflanzenölmotoren aber auch mit konventionell betriebenen Dieselmotoren wichtige Zusammenhänge zwischen Kraftstoffkennwerten und Langzeitschäden abgeleitet werden.

Die für einen langfristig störungsarmen Betrieb notwendigen Mindestanforderungen für fossile Kraftstoffen, wie Heizöl oder Dieselmotorkraftstoff aber auch für FAME (Biodiesel) werden in Normen oder Normentwürfen definiert. Die Mindestanforderungen für Rapsöl als Kraftstoff, dem bei uns am stärksten verbreiteten Pflanzenöl mit den meisten Einsatzerfahrungen, wurden in Anlehnung an andere Kraftstoffnormen im Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff (RK-Qualitätsstandard 05/2000) festgeschrieben (Abbildung 3) [7]. Dieser basiert auf umfangreichem Wissen einer Vielzahl von Experten.

Für einen störungsarmen Betrieb mit Rapsöl ist es deshalb empfehlenswert, dass der RK-Qualitätsstandard als Basis für Qualitätsvereinbarungen beim Vertrieb von Rapsöl zugrundegelegt wird. Der Ölproduzent und Lieferant muss dann durch entsprechende qualitätssichernde Maßnahmen die Einhaltung der im RK-Qualitätsstandard angegebenen Grenzwerte gewährleisten und eine Verunreinigung des Rapsöls mit Fremdstoffen ausschließen. Da bekannt ist, dass andere Pflanzenöle zum Teil Eigenschaften besitzen, die die Eignung als Kraftstoff beeinträchtigen, sollten diese nicht verwendet werden, sofern der Motorenhersteller nicht ausdrücklich eine Freigabe erteilt. Beispielsweise können die im Sonnenblumenöl enthaltenen Wachse bei tieferen Temperaturen kristallisieren und Kraftstofffilter verstopfen. Gleiches gilt für Pflanzenölmil-

schungen oder Abfallöle und -fette, z.B. aus der Lebensmittelindustrie. Letztere sind häufig stark schwankenden Qualitäten unterworfen und können sich hinsichtlich Fließverhalten, Korrosivität und Lagerungsstabilität, sowie durch evtl. darin enthaltenen Verunreinigungen (z.B. NaCl) problematisch auf den BHKW-Betrieb und die Emissionen auswirken. Außerdem handelt es sich hierbei um das Verbrennen von Abfällen, für das die Anforderungen der „Siebzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe - 17. BImSchV)“ [9] zu beachten ist. Können die Abfälle nicht als Heizöl EL ähnlich eingestuft werden, haben die emissionsbegrenzenden Anforderungen an den Motor die entsprechenden Vorgaben der 17. BImSchV zu erfüllen. Vorgaben die von Motoren üblicherweise nicht erfüllt werden können. Um die Einhaltung der erforderlichen Rapsölqualität zu überprüfen, sollten neben routinemäßigen Sicht- und Geruchskontrollen, bei Bedarf (z.B. in Verdachtsfällen oder bei Betriebsstörungen) die wichtigsten variablen Eigenschaften von Rapsöl, wie Gesamtverschmutzung, Neutralisationszahl, Oxidationsstabilität, Phosphorgehalt und Wassergehalt untersucht werden. Für die Kenngrößen Gesamtverschmutzung, Neutralisationszahl und Wassergehalt stehen Schnelltests zur Verfügung, die bei der Firma ASG<sup>1</sup> erhältlich sind. Die Schnelltests dienen lediglich zur ersten Einschätzung, ob die Kraftstoffprobe die Grenzwerte der entsprechenden Kenngrößen einhält. Zur genaueren Bestimmung ist eine Analyse im Labor gemäß den im RK-Qualitätsstandard angegebenen Prüfmethoden unumgänglich.

Um Verstopfungen im Einspritzsystem zu vermeiden und frühzeitigem Verschleiß oder Schäden an Motor und der Peripherie vorzubeugen, sollte also Rapsöl verwendet werden, das die im RK-Qualitätsstandard festgelegten Mindestanforderungen erfüllt und keine Fremdstoffe enthält. Zur Sicherheit können zusätzlich zu den herkömmlichen Kraftstofffiltern Vorfilter (vorzugsweise mit Schauglas) angebracht werden, die eventuelle Verunreinigungen im Pflanzenöl zurückhalten und dadurch Schäden am Aggregat verhindern.

#### Beimischung anderer Kraftstoffe

Die Beimischung von fossilen Kraftstoffen (z.B. Heizöl, Dieselmotorkraftstoff) oder Biodiesel zu Pflanzenöl verringert die Lagerfähigkeit des Mischkraftstoffes. Kraftstoffmischungen können bei längerer Lagerungsdauer in Vorratsbehältern aufgrund von Dichteunterschieden Schichten ausbilden, an deren Grenzflächen es unter bestimmten Bedingungen zum Wachstum von Mikroorganismen kommen kann. Diese führen in Anwe-

---

<sup>1</sup> Analytik-Service Gesellschaft mbH, Feldstraße 16-20, 86156 Augsburg

senheit von Wasser zur hydrolytischen Abspaltung freier Fettsäuren. Derart vorge-schädigtes Öl weist eine hohe Neutralisationszahl auf und kann korrosiv auf Anlagen-bauteile wirken. Zudem besteht verstärkt die Gefahr, dass, wenn unverbrannter Kraft-stoff (mit einem hohen Gehalt freier Fettsäuren) über Zylinderwände oder verschlisse-ne bzw. defekte Kraftstoffförder- oder Einspritzpumpen in das Schmieröl gelangt, das Motoröl eindickt und es dadurch zu schweren Motorschäden kommt.

Neben der Problematik der verringerten Lagerungsstabilität können durch die Zugabe von Heizöl oder Biodiesel zum Rapsöl eventuelle Rückstände in Leitungen und Tanks gelöst werden, die dann Leitungen, Pumpen und Filter verstopfen. Bei einem Wech-selbetrieb mit anderen Kraftstoffen (z.B. Biodiesel) können unterschiedlich quellende Dichtungsmaterialien Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem verursachen.

Darüber hinaus ist der Einspritzverlauf bei Pflanzenölmotoren üblicherweise speziell auf die typischen Kraftstoffmerkmale von Pflanzenöl abgestimmt. Andere Kraftstoffe erfordern für einen optimalen und emissionsarmen Betrieb meist eine andere Moto-reneinstellung.

Schließlich entstehen beim Einsatz von schwefelhaltigen, fossilen Kraftstoffen (z.B. Heizöl) Schwefelverbindungen im Abgas, die die katalytisch aktive Schicht des Oxida-tionskatalysators überziehen und zu einer nachlassenden Umsetzungsrate führen. Dies führt dazu, dass schädliche Abgaskomponenten wie Kohlenmonoxid, Kohlen-wasserstoffe und Aldehyde vermehrt in die Umwelt gelangen.

Um nicht aufgrund von Versorgungsschwierigkeiten kurzfristig Heizöl nachtanken zu müssen, sollte für einen ausreichenden Rapsölvorrat gesorgt werden. Der Abschluss von Lieferverträgen mit Ölproduzenten gewährt üblicherweise ein hohes Maß an Versorgungssicherheit. Des weiteren können Vermischungen von Kraftstoffen ausge-schlossen werden, wenn gebrauchte Vorrattanks, die bereits für die Lagerung ande-rer Kraftstoffe (z.B. Heizöl) verwendet wurden und für Pflanzenöl weitergenutzt werden sollen, vollständig entleert und gesäubert werden.

Auch sollte von einer Beimischung bereits geringer Mengen Dieselkraftstoff oder Heizöl z.B. zur Verbesserung der Kältetauglichkeit im Winter abgesehen werden, da sonst eine Besteuerung des gesamten Mischkraftstoffs als Mineralöl fällig wird . Eine frostfreie Aufstellung des Lagertanks und eine ausreichende Dimensionierung von Leitungsquerschnitten und Pumpenleistungen gewährleisten einen sicheren Betrieb im Winter. Da eine Ausscheidung von Paraffinen bei Pflanzenöl nicht stattfindet, kann einmal fest gewordenes Pflanzenöl nach Überschreiten des Schmelzpunkts, entspre-chende Pumpfähigkeit vorausgesetzt, ohne Einschränkungen weiter verwendet wer-

den. Dies gilt in besonderem Maße für reines Rapsöl, wo im Gegensatz zu anderen Pflanzenölen eine Kristallisation von Wachsen nicht zu befürchten ist.

### Lagerung

Ungünstige Einflüsse bei der Pflanzenölbevorratung führen zu einer verringerten Lagerungsstabilität. Faktoren wie Wärme, Licht oder Verschmutzungen im Tank verursachen im Beisein von Sauerstoff, Wasser und Mikroorganismen eine Veränderung der Molekülstruktur des Pflanzenöls. Sowohl der peroxidische Einbau von Sauerstoff als auch eine Abspaltung von Fettsäuren sind Auslöser für eine frühzeitige Alterung des Kraftstoffs. Durch katalytisch wirkende Materialien, wie Kupfer werden diese Alterungsprozesse noch verstärkt. Als Folge kommt es zu Molekülvernetzungen (Polymerisation) und schließlich zur Verharzung.

Eines der in diesem Vorhaben untersuchten BHKW ist mit einem ständig auf ca. 30-40 °C beheizten Tagestank ausgestattet. Obwohl die durchschnittliche Lagerungsdauer des Rapsöls in diesem Tank bei hoher Auslastung des Aggregats weniger als 24 h beträgt, steigt die Neutralisationszahl stark an, während gleichzeitig die Oxidationsstabilität drastisch abnimmt, so dass beide Kenngrößen die Grenzwerte gemäß RK-Qualitätsstandard nicht mehr einhalten.

Stark vorgealtertes und polymerisiertes Pflanzenöl kann im nachgeschalteten Kraftstoffsystem vermehrt zu Verstopfungen von Leitungen und Filtern und erhöhtem Verschleiß im Einspritzsystem beitragen. Zudem besteht verstärkt die Gefahr, dass bei Anreicherung im Schmieröl schwere Motorschäden infolge einer Motoröleindickung auftreten (siehe oben). Oxidativ geschädigter Kraftstoff und Sedimentablagerungen führen im Tank dazu, dass auch frischer Kraftstoff, der neu in den Tank hinzugegeben wird, schneller altert. Oxidative Veränderungen des Kraftstoffs sind auch bei Dieselmotorkraftstoff und Heizöl bekannt, allerdings in geringerem Umfang, was wesentlich auf die Zugabe von Oxidationsinhibitoren in der Raffinerie zurückzuführen ist. Deshalb ist beim üblicherweise nicht additivierten Pflanzenöl verstärkt auf die richtigen Lagerungsbedingungen zu achten, um nachteilige Folgeerscheinungen auszuschließen.

Zur Vermeidung frühzeitiger Alterung empfiehlt sich insbesondere bei längerer Lagerdauer die Verwendung von Erdtanks aus Stahl. Ist der Einbau eines Erdtanks nicht möglich, sollten kühle und dunkle Lagerungsbedingungen gewährleistet sein. Werden Tankbeschichtungen verwendet, so ist die Verträglichkeit mit Pflanzenöl sicherzustellen. Bei der Befüllung sollte darauf geachtet werden, dass ein zu starker Sauerstoffeintrag in das Pflanzenöl vermieden wird. Sofern möglich erscheint es günstig, das Pflanzenöl an der Tankinnenwand abfließen zu lassen.

Es ist darauf zu achten, dass das Eindringen von Wasser und Schmutz durch dicht schließende Tanks vermieden wird. In jedem Fall sollten Tanks einfach zu entleeren und zu reinigen sein. Diese Maßnahmen gelten auch für Tagestanks. Durch Reinigen der Tankbehälter werden Sedimente am Tankboden entfernt, die sonst die Qualität des Pflanzenöls während der Lagerung mindern oder in die Kraftstoffzuführung gelangen und Störungen verursachen können. Beheizte Tagestanks sind wegen der hohen thermischen Belastung des Pflanzenöls unbedingt zu vermeiden. Um eine ausreichende Fließfähigkeit des Pflanzenöls selbst bei niedrigen Umgebungstemperaturen aufrechtzuerhalten sollten deshalb, wie bereits oben erwähnt, Kraftstoffleitungen und Pumpen großzügig ausgelegt werden. Außerdem empfiehlt es sich, den Kraftstoffrücklauf nicht zurück in den Tank, sondern durch Rückführeinrichtungen (oft mit Entlüftung und Filtereinsatz - aus dem Heizungsbau) wieder in den Vorlauf zu führen. Dadurch kann vermieden werden, dass das im Einspritzsystem erwärmte Rücklauföl zurück in den Tagestank gelangt und dort die Oxidation des frischen Kraftstoffs fördert.

#### Kraftstoffzuführung

Eine unzureichende Kraftstoffversorgung war wiederholt die Ursache von Störungen an einem der untersuchten Pflanzenölaggregate. Gründe dafür können sein, dass die kraftstoffführenden Komponenten hinsichtlich Materialauswahl und Dimensionierung nicht den spezifischen Anforderungen des Pflanzenöls entsprechen. Kraftstoffleitungen und andere ölführende Bauteile aus Kupfer bzw. Kupferlegierungen führen vor allem bei längeren Verweilzeiten des Pflanzenöls (z.B. bei Stillstand des Aggregats) zur vorzeitigen Alterung des Kraftstoffs und zur Bildung von Rückständen. Bei fortschreitender Leitungsquerschnittsverengung kann es dazu kommen, dass die geförderte Pflanzenölmenge nicht mehr für den Motorbetrieb ausreicht. Dies ist um so eher der Fall, wenn sich im Pflanzenölstrom transportierte Rückstände im Filter ansammeln. Auch der Eintrag von Luft durch schlecht abdichtenden Leitungsverbindungen kann bei längeren saugseitigen Leitungen oder größeren Saughöhen Kraftstoffversorgungsschwierigkeiten auslösen. Außerdem führen undichte Kraftstoffleitungen zum Austritt von Pflanzenöl, das dann besonders in der Umgebung von heißen Motorbauteilen Rückstände bildet.

Zur Vermeidung von Aggregatsstillstandzeiten bedingt durch mangelhafte Kraftstoffversorgung ist die Verwendung von elektrisch betriebenen Kraftstoffförderpumpen empfehlenswert. Die mechanischen Förderpumpen am Aggregat können vor allem dann eine sichere Kraftstoffversorgung nicht gewährleisten, wenn lange Leitungen auf der Saugseite überwunden werden müssen. Eine ausreichende Pumpenleistung (ca. 50 % mehr als der Kraftstoffverbrauch bei Nennlast), sowie entsprechend dimensio-

nierte Kraftstoffleitungen von mindestens ca. 10 mm Durchmesser bei Kraftstoffdurchflüssen von ca. 3-30 l haben sich bewährt. Es gilt, Leitungen und Verschraubungen aus Metallen wie Kupfer oder Messing zu vermeiden. Stahl oder besser Edelstahl sind besser für Pflanzenöl geeignet. Als flexible Verbindungen können Hydraulikschläuche z.B. aus NBR verwendet werden, die ebenfalls beständig gegenüber Pflanzenöl sind. Die Leitungsführung ist so zu gestalten, dass enge Biegeradien vermieden werden, um ein Ansammeln von möglichen Rückständen auszuschließen. Falls Leitungen erneuert werden müssen, ist es von Vorteil, wenn diese auf Putz und möglichst gut zugänglich verlegt sind.

#### Einspritzpumpe und Drehzahlregelung

Das gesamte Einspritzsystem insbesondere aber Einspritzpumpen und Einspritzdüsen mit schnell wechselndem Druckauf- und -abbau werden durch die höhere Viskosität von Pflanzenöl meist stärker belastet als bei Dieselbetrieb. Hinzu kommt, dass beim Betrieb mit Pflanzenöl häufig ein höherer Düsenabspritzdruck eingestellt wird.

Die Drehzahlregelung erfolgt über die Kraftstoffdosierung des Einspritzsystems meist mithilfe von mechanischen Reglern. Die Einspritzpumpen der Firma L'Orange, die bei zwei der drei untersuchten BHKW eingesetzt werden, erforderten ein mehrmaliges Nachjustieren während des Beobachtungszeitraums, nachdem die Aggregate entweder wegen zu geringer Leistung oder wegen Überdrehzahl auf Störung schalteten.

Die Einspritzpumpen sollten deshalb von hoher Qualität hinsichtlich Werkstoffauswahl und Verarbeitung sein, um einem dauerhaften Betrieb standzuhalten. Gemäß den Aussagen von Umrüstfirmen haben sich Einspritzpumpen der Firma Bosch für den dauerhaften Einsatz mit Pflanzenöl meist als tauglicher erwiesen als Pumpen anderer Hersteller. Zur Vermeidung von Korrosionen und Verklebungen in Einspritzpumpen, sollte nur Kraftstoff mit hoher Oxidationsstabilität, geringem Wassergehalt und niedriger Neutralisationszahl eingesetzt werden. Insbesondere bei längeren Stillstandzeiten des Aggregats besteht die Gefahr des Verklebens oder Verlackens von vorgealtertem Pflanzenöl im Einspritzsystem. Zwar kann bei entsprechender baulicher Ausführung der Kraftstoffzuführung (z.B. zweiter Tank) ein kurzer Spüllauf mit Heizöl unmittelbar vor dem Abstellen des Motors ein Verkleben des Einspritzsystems vorbeugen, aber dabei kann es verstärkt zu weiteren Problemen, wie unter „Beimischung anderer Kraftstoffe“ beschrieben, kommen (z.B. Leckagen von Dichtungen, Minderung der Umsetzungsrate von Abgaskatalysatoren).

### Einspritzdüsen

Einspritzdüsen sind für die dosierte Einspritzung, Kraftstoffaufbereitung, den Einspritzverlauf und das Abdichten gegen den Brennraum verantwortlich. Beim Betrieb des Motors kommt es in Abhängigkeit von der Düsenbauart, der Betriebsweise, der Verbrennungstemperatur und nicht zuletzt der Kraftstoffqualität zu Verkokungen an den Düsenöffnungen.

Die Einspritzdüsen wurden bei einem Aggregat im Beobachtungszeitraum mehrfach meist routinemäßig erneuert. Zwei mal war ein Wechsel aber in sehr kurzen Abständen von deutlich weniger als 1000 Bh notwendig, da die Einspritzdüsen starke Rußanlagerungen und Verkokungen aufwiesen, was auf eine schlechtere Verbrennung zurückzuführen sein kann. Außerdem waren Blaufärbungen an den Düsen erkennbar, die auf eine starke thermische Belastung hindeuten. Beim Wechsel der Einspritzdüsen wurde laut Auskunft des Durchführenden die Schwergängigkeit einer Düsennadel bemerkt. Da Undichtigkeiten an den Düsenhaltern beobachtet wurden und an den Austrittsstellen des Pflanzenöls galertartige Verharzungen sichtbar wurden, ist es vorstellbar, dass es auch in der Düse zur Verklebung der Düsennadel durch Pflanzenölrückstände gekommen sein kann. Eine ungenügende Kraftstoffzerstäubung bzw. das Nachtropfen von Pflanzenöl bei schlecht abdichtenden Düsen könnte zu einer schlechteren Verbrennung und infolge dessen zu verstärkter Rußbildung und Verkokung geführt haben. Als weitere Ursache dafür ist auch eine hohe thermische Beanspruchung der Düsen, evtl. verbunden mit einer Materialverformung denkbar. Hohe Umgebungstemperaturen am Aggregat, durch unzureichende Motorbelüftung, ein hoher Abgasgegendruck oder eine verminderte Wärmeabfuhr durch die Kühlkreisläufe könnten zu dieser höheren Temperaturbelastung geführt haben. Undichte Einspritzdüsen können aufgrund der schlechteren Verbrennung zu einer Anreicherung von Pflanzenöl im Schmieröl führen. Zwar war im vorliegenden Fall kein übermäßiger Ruß- oder Pflanzenöleintrag im Motoröl nachweisbar, aber Erfahrungen an einem anderen BHKW belegen, dass infolge nachtropfender Einspritzdüsen ins Schmieröl gelangtes Rapsöl zur Motoröleindickung und schweren Motorschäden durch Kolbenfresser führen kann.

Zur Vermeidung von thermischer Überbeanspruchung und Verkokungen an Einspritzdüsen ist für eine ausreichende Wärmeabfuhr durch eine effektive Belüftung des Aggregats und saubere Wärmetauscherflächen zu achten. Darüber hinaus sollte der maximal zulässige Abgasgegendruck nicht durch den Strömungswiderstand an Abgaswärmetauscher oder Abgasreinigungssystemen überschritten werden. Eine kontinuierliche Drucküberwachung wäre daher empfehlenswert. Ein wichtiger Anhaltspunkt

für die Bildung von Ablagerungen stellen Qualitätsmerkmale des Kraftstoffs dar. Deshalb sollte Pflanzenöl mit einer geringen Gesamtverschmutzung, niedrigem Koksrückstand und einer hohen Oxidationsstabilität verwendet werden.

Auch die Gefahr von Verstopfungen oder erhöhtem Verschleiß an Einspritzdüsen kann durch die Verwendung von Rapsöl gemäß dem RK-Qualitätsstandard minimiert werden. Eine regelmäßige Kontrolle des Einspritzzeitpunkts, des Düsenabspritzdrucks und des Spritzbilds hilft Schäden infolge fehlerhafter Düsen zu vermeiden. Insbesondere bei verändertem Erscheinungsbild der Abgasfahne (verstärkte Raumentwicklung) ist eine Überprüfung des Einspritzsystems ratsam. Für einen wartungsarmen Betrieb sollten nur hochwertige Einspritzsysteme eingesetzt werden, die sich bei Pflanzenölmotoren bewährt haben.

### Motor

Neben Schmieröleindickung kann Überhitzung des Motors eine weitere Ursache von schweren Motorschäden von Pflanzenölaggregaten sein. Bei einem der untersuchten BHKW wurde nach ca. 5000 Bh ein Motorschaden wegen Überhitzung festgestellt. Dazu kam es als Folge von Kühlwassermangel, Korrosion an den Kühlwasserwärmetauscherflächen sowie verminderter Strahlungswärmeabfuhr aus der Schallschutzkabine. Da die Überhitzung in erster Linie auf unzureichende Wartung zurückzuführen ist, kann dieser Motorschaden nicht der Pflanzenöltechnologie angelastet werden.

Dennoch wird häufig davon ausgegangen, dass die Verbrennungstemperaturen in Pflanzenölmotoren üblicherweise etwas höher sind, als bei dieselbetriebenen Motoren. Verantwortlich hierfür wird unter anderem der im Pflanzenölmolekül enthaltene Sauerstoff gemacht. Aus diesem Grund sollten motorische Bauteile thermisch hoch belastbar sein. Zusätzlich muss eine ausreichende Wärmeabfuhr durch Einhaltung des maximal zulässigen Abgasgedrucks, eine leistungsfähige Belüftung des Motors sowie saubere Wärmetauscherflächen mit ausreichenden Kühl- und Korrosionsschutzmittel im Kühlkreislauf sichergestellt sein. Überschüssige Wärme ist auch nach Abstellen des Aggregats durch entsprechende Nachlaufzeiten von Wasserpumpen und Lüftern abzutransportieren.

### Motorölqualität

Das Motorenöl ist nicht nur Schmierstoff, sondern hat weitere wichtige motorische Aufgaben, wie die Übertragung von Kräften, Unschildlichmachen unerwünschter Produkte, Verschleißschutz, Korrosionsschutz, Abdichten und Kühlen. Während des Betriebs kommt es zu Veränderungen im Motoröl, die auf die thermische und mecha-



nische Beanspruchung sowie auf den Eintrag von Verschleißmaterialien, Ruß, Verbrennungsabgasen oder Kraftstoff zurückzuführen sind.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnten keine außergewöhnlichen Veränderungen im Motoröl nachgewiesen werden, die auf Störungen oder Schwachstellen hingedeutet hätten.

Allerdings ist bekannt, dass es bei starker Anreicherung von Pflanzenöl im Motoröl, z.B. infolge häufiger Kaltstarts, starkem Motorverschleiß, defekten oder verschlissenen Pumpenelementen von motorölgeschmierten Kraftstoffförder- und Einspritzpumpen binnen kurzer Zeit zu einer Schmieröleindickung kommen kann, die schwere Motorschäden hervorruft. Deshalb gilt es die gemäß Wartungsplan vorgegebenen Ölwechselintervalle unbedingt einzuhalten. Vorrichtungen zur automatischen Schmierölnachfüllung verlängern bei Pflanzenölmotoren keinesfalls das Ölwechselintervall noch ersetzen sie eine regelmäßige Ölstandskontrolle am Aggregat, da es im Falle von unzureichendem Ölnachfluss, zu erheblichen Motorschäden kommen kann.

Beim neuartigen Schmierungskonzept Plantotronic<sup>®</sup> erfolgt ein kontinuierlicher Motorölwechsel. Dabei wird eine definierte Menge an gebrauchtem Motoröl (ca. 2 % des Kraftstoffverbrauchs) aus der Ölwanne entnommen und dem Kraftstoff vor der Verbrennung zudosiert. Die ständige Ölauffrischung ermöglicht die Verwendung eines gering additivierten Motoröls auf Pflanzenölbasis und ersetzt herkömmliche Motorölwechsel. Dadurch kann der Wartungsaufwand vor allem bei gut ausgelasteten BHKW (ca. alle 2 Wochen Ölwechsel) deutlich reduziert werden. Das Plantotronic<sup>®</sup>-Schmiersystem zeichnete sich während des Untersuchungsvorhabens durch eine hohe Funktionssicherheit bei gleichbleibend guter Schmierölqualität und ohne erkennbaren Einfluss auf das Betriebs- und Emissionsverhalten der Pflanzenöl-BHKW aus. Ob durch die kontinuierliche Ölauffrischung auch die Gefahr von Schmieröleindickung bei Pflanzenölmotoren verringert wird, bleibt abzuwarten. In jedem Fall könnte aber eine bei einem solchen System eingesetzte automatische Schmierölüberwachung (z.B. automatische Ölstandskontrolle) den Eintrag kritischer Kraftstoffmengen ins Motoröl erkennen und dadurch Motorschäden verhindern. Eine Weiterentwicklung des Systems Plantotronic<sup>®</sup> zur Serienreife für BHKW erscheint vielversprechend und ist aus Gründen der Anwender- und Umweltfreundlichkeit sowie verbesserter Betriebssicherheit wünschenswert.

### Abgasemissionen

Trotz einer Reihe von Umweltvorteilen beim Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff, wie z.B. Boden- und Gewässerschutz, Regenerierbarkeit und geringem CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Atmosphäre, sind auch ebenso wie bei Dieselmotoren Abgasemissionen aufgrund ihrer schädlichen Auswirkung zu minimieren.

Die Ergebnisse der Abgasmessungen zeigen, dass alle drei untersuchten BHKW, obwohl für diese Leistungsgrößen derzeit keine Emissionsauflagen erfüllt werden müssen, die zum Vergleich herangezogenen derzeitigen Orientierungswerte (vgl. Tabelle 16, Tabelle 17, Tabelle 18) weitgehend einhalten. Der Zielwert für Staub von 20 mg/Nm<sup>3</sup>, der durch den Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit gefordert wird, wird bei der Anlage in Weißenburg (mit Rußfilter) durchwegs eingehalten. Allerdings traten bei diesem BHKW häufig Störungen am Partikelfilter auf. So stieg der Abgasdruck am Filtereinsatz aufgrund von Kanalwandverschmelzungen dauerhaft an, weshalb Regenerationen sehr früh eingeleitet wurden. Während der Regenerationsphase (Eindüsung von Propangas in das Motorabgas vor dem Partikelfilter) kam es zu stark erhöhten Emissionen von CO und vor allem an HC sowie zur weiteren thermischen Schädigung des Partikelfiltereinsatz, so dass dieser ausgebaut werden musste.

Die empfohlene Emissionsbegrenzung für Stickstoffoxidemissionen von 3,0 g/Nm<sup>3</sup> bei Anlagen < 500 kW Feuerungswärmeleistung, der von Seiten der Luftreinhaltung hohe Bedeutung beigemessen wird, konnte von den Aggregaten weitgehend eingehalten werden. Der Zielwert für diese Anlagengröße (2,5 g/Nm<sup>3</sup>), der durch motorische Maßnahmen analog EURO II erreicht werden soll, konnte nur von dem nach dem Wirbelkammer-Verbrennungsverfahren arbeitenden BHKW in Weißenstephan sicher eingehalten werden. Weiterführende deutliche Verbesserungen können vermutlich nur durch den Einsatz von Entstickungskatalysatoren erreicht werden, die derzeit vor allem bei kleineren Motoren noch wenig verbreitet sind und erhebliche Investitionskosten verursachen.

Da in Zukunft mit einer strengeren Abgasgesetzgebung zu rechnen ist, die sowohl niedrigere Emissionsbegrenzungen als auch eine Erweiterung der Gültigkeit für Anlagen kleiner 1 MW<sub>FWL</sub> beinhalten kann, wird dem Einsatz von Partikelfiltern und ggf. zusätzlich Entstickungskatalysatoren vor allem bei leistungsstärkeren Aggregaten zukünftig eine größere Bedeutung zukommen. Insbesondere bei kleineren Anlagen ist jedoch bei schärferen Grenzwerten die Verhältnismäßigkeit der erforderlichen Minderungsmaßnahmen zu beachten. Der Einsatz von Oxidationskatalysatoren bei Motorbetrieb mit Pflanzenölkraftstoff ist hingegen zwingend erforderlich.

In Tabelle 19 werden abschließend die wichtigsten in Zusammenhang mit dem Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff zu sehenden Ergebnisse der Schwachstellenanalyse zusammengefasst. Es sei darauf hingewiesen, dass manche der beobachteten Störungen auch beim Betrieb konventioneller Dieselmotoren auftreten können und nicht ausschließlich auf die genannten Ursachen zurückzuführen sind. Ziel des Vorhabens war es nicht, motorische Schwachstellen aufzudecken, sondern vielmehr Betriebsstörungen, die sich aufgrund des Zusammenwirkens von Kraftstoffqualität und Peripheriekomponenten ergaben, zu analysieren und hierzu Lösungsansätze für die aufgetretenen Probleme anzubieten.

In diesem Zusammenhang wird nochmals auf den im Rahmen des Projektes erstellten „Leitfaden pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke“ hingewiesen, in dem versucht wurde, basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens das für den dauerhaften, störungsarmen Betrieb von Pflanzenöl-BHKW auf niedrigem Emissionsniveau erforderliche Wissen zusammenzufassen.

Tabelle 19: Aufgetretene Störungen an drei pflanzenölbetriebenen BHKW, mögliche Ursachen und Lösungsansätze

aufgetretene Störungen	mögliche Ursachen	Anzahl der von der Störung betroffenen BHKW <sup>1)</sup>	Häufigkeit der Störung je betroffenen BHKW	Instandsetz.-aufw. <sup>3)</sup>	Lösungsansätze, Vermeidung
Kraftstoffmangel durch Verstopfung von Kraftstofffiltern, Kraftstoffleitungen und Einspritzdüsen	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Partikelgehalt im Pflanzenöl</li> <li>ungeeignete Kraftstofffilter</li> </ul>	1	häufig	gering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapsöl mit niedriger Gesamtverschmutzung, gemäß RK-Qualitätsstandard</li> <li>Vorfilter einbauen, schwimmende Entnahme</li> <li>anderen zugelassenen Filtertyp (z.B. Motorenölfilter) verwenden</li> </ul>
	Eintrag von Fremdstoffen bei Transport oder Lagerung	1	selten	hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapsöl nach RK-Qualitätsstandard</li> <li>Qualitätskontrolle und Rückstellproben</li> <li>Vorfilter einbauen</li> </ul>
	Verharzungen durch vorgealtertes Pflanzenöl	1	wiederholt	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>kühle, dunkle, trockene u. saubere Lagerung</li> <li>Tanks aus Stahl od. beständigen Kunststoffen</li> <li>keine beheizten Tagestanks</li> <li>Rücklaufzuführung (Einstrangverfahren)</li> </ul>
	Lösung von Rückständen in Tanks u. Leitungen z.B. durch Heizöl, Biodiesel	1	selten	gering (mittel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>für ausreichend Pflanzenölvorrat sorgen</li> <li>regelmäßig Tanks reinigen</li> <li>gebrauchte Tanks vor der Befüllung entleeren und reinigen</li> </ul>
Kraftstoffmangel durch Lufteintrag	hohe saugseitige Strömungswiderstände	1	häufig	gering (mittel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>leistungsstarke Elektro-Kraftstoffförderpumpe</li> <li>richtige Leitungsquerschnitte kurze saugseitige Leitungslängen und geringe Saughöhen</li> </ul>
Minderleistung oder Überdrehzahl	Einspritzpumpe verstellt	2	wiederholt	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>bewährte hochwertige Einspritzpumpe verwenden</li> <li>Wartungsintervall einhalten</li> </ul>
Einspritzdüse verkocht, verfärbt, verklebt (evtl. dunkle Abgasfahne erkennbar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Koksrückstand im Pflanzenöl</li> <li>schlechte Motoreinstellung</li> <li>hohe thermische Belastung</li> </ul>	1	selten	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapsöl nach RK-Qualitätsstandard</li> <li>Wärmeabfuhr durch Belüftung und saubere Wärmetauscherflächen</li> <li>richtige Einstellung des Einspritzdrucks und -zeitpunkts</li> <li>max. Abgasgegendruck nicht überschreiten</li> <li>geeignete hochwertige Düsen einsetzen</li> </ul>
Anstieg der Motor-/Abgastemperatur	Ablagerungen an Ventilen und Düsen	2	häufig	mittel (hoch)	<ul style="list-style-type: none"> <li>richtige Motoreinstellung (Düsen, Ventile etc.)</li> <li>Rapsöl nach RK-Qualitätsstandard</li> <li>max. Abgasgegendruck nicht überschreiten</li> </ul>
Schäden an der Kraftstoffförderpumpe	hohe Beanspruchung	2	selten	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapsöl nach RK-Qualitätsstandard</li> <li>auf ausreichende Leistung u. Materialbeständigkeit der Pumpe achten</li> </ul>
Motorschaden durch Überhitzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kühlwassermangel</li> <li>hohe Umgebungstemperatur</li> <li>Wärmetauscherflächen korrodiert</li> </ul>	1	selten	hoch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmeabfuhr durch Aggregatbelüftung, saubere Kühlmittelwärmetauscher</li> <li>ausreichend Kühl- und Korrosionsschutzmittel</li> </ul>
sichtbare Ruß- bzw. dunkle Abgasfahne	Einspritzdüse verklebt, bzw. geschädigt	1	selten	mittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einspritzdüse warten ggf. erneuern</li> </ul>

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Nutzung von Pflanzenöl als Kraftstoff weist unbestrittene Umweltvorteile auf. Ungeachtet der gerade in jüngster Zeit vornehmlich positiven Erfahrungen im mobilen Einsatzbereich, gelten pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke oft als störanfällig und wenig praxistauglich. Dabei wird auf Beispielfälle hingewiesen, wo infolge von Motorschäden Pflanzenöl-BHKW nach nur wenigen Betriebsstunden ausfielen. Jedoch gibt es auch eine Vielzahl von pflanzenölbetriebenen BHKW, vornehmlich im unteren Leistungsbereich, die im Praxisbetrieb ihre Einsatztauglichkeit unter Beweis stellen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass Betriebsstörungen von Pflanzenöl-BHKW, sofern sie nicht durch Mängel, wie herkömmlicher Verschleiß oder unzureichende Wartung hervorgerufen werden, häufig in Zusammenhang mit der Kraftstoffversorgung stehen und daher als pflanzenöltypisch einzuordnen sind. Neben kleineren Störungen, die lediglich ein Wechseln der Kraftstofffilter oder Reinigen von Kraftstoffleitungen erfordern, können z.B. eine Verunreinigung des Pflanzenöls mit Fremdstoffen auch größere Schäden nach sich ziehen, die eine umfangreiche Instandsetzung des BHKW erfordern. Zur Vermeidung dieser Störungen gilt es, wie bei anderen Kraftstoffen bestimmte Mindestanforderungen, die von der Anlagentechnik an das Pflanzenöl gestellt werden, zu erfüllen. Diese Mindestanforderungen wurden für Rapsöl als Kraftstoff erarbeitet und sind im RK-Qualitätsstandard zusammengefasst. Die darin festgesetzten Grenzwerte sollten als Qualitätsvereinbarung beim Vertrieb von Rapsöl zugrunde gelegt werden und sind bis zur Verbrennung im Motor, also auch während der Lagerung vor Ort einzuhalten. Da sich abzeichnet, dass Pflanzenöl mit niedriger Oxidationsstabilität und hoher Neutralisationszahl verstärkt zu Ablagerungen und Korrosionen in der Kraftstoffzuleitung und im Einspritzsystem führt, sollte eine frühzeitige Ölalterung durch kühle und dunkle Lagerungsbedingungen unterbunden werden. Aus gleichen Gründen sollte eine Mischung mit anderen Kraftstoffen (z.B. Biodiesel, Heizöl), der Eintrag von Wasser und die Verwendung von Leitungen aus katalytisch wirksamen Metallen (Kupfer, Messing) vermieden werden.

Zwar war es im Rahmen der Untersuchung an Praxisanlagen aufgrund des Zusammenspiels einer Vielzahl von Einflussgrößen nicht immer möglich, eine unmittelbare oder gar quantifizierbare Einwirkung unterschiedlicher Faktoren (z.B. Rapsölqualität) auf die Betriebssicherheit der BHKW zu ermitteln, aber es konnten wichtige Zusammenhänge zwischen der Nutzung von Pflanzenöl und der installierten Technik abgeleitet werden. Dies geschah durch eine Gegenüberstellung von Art und Häufigkeit der

Störungen an den BHKW mit den anlagenspezifischen Einsatzbedingungen unter Miteinbeziehung von Kenntnissen über Eigenschaften und das Verhalten von Pflanzenöl.

Bei den durchgeführten Emissionsmessungen ergaben sich zum Teil große Bandbreiten des Emissionsniveaus aller untersuchten Schadstoffe (CO, NO<sub>x</sub>, Staub und HC) bei einzelnen BHKW an verschiedenen Messtagen und auch zwischen den drei BHKW. Den größten Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen im Abgas haben Abgasreinigungstechnologien. Durch Oxidationskatalysatoren können beachtliche Minderungsraten für CO, HC und Aldehyde von 70 bis 90 % erzielt werden. Der Einsatz von Partikelfiltern kann einen Rückgang des Staubaustoßes um mehr als 90 % bewirken. Allerdings sind für Partikelfilter hohe Anforderungen an deren Funktionstüchtigkeit zu stellen, um den motorischen Betrieb nicht durch erhöhten Abgasgedruck zu beeinträchtigen. Darüber hinaus ist der Einsatz von Partikelfiltersystemen häufig mit hohen Investitionskosten behaftet und deshalb gerade bei kleineren Anlagen noch wenig verbreitet. Emissionsunterschiede sind ebenso bei wechselnden Betriebsbedingungen wie Kaltstartphasen oder Teillastbetrieb erkennbar. Auch eine hohe Gesamtverschmutzung und niedrige Oxidationsstabilität des Pflanzenöls scheinen sich im Emissionsbild niederzuschlagen. Bei den Messungen im Praxisbetrieb mit wechselnden Randbedingungen ist der Einfluss der untersuchten Kraftstoffqualitäten allerdings weniger signifikant, als z.B. Anlagentechnik, Anlagenwartung und Betriebsweise.

Die drei ausgewählten Anlagen bilden hinsichtlich installierter Technik und Leistung einen guten Querschnitt über den derzeitigen Stand der Pflanzenöl-BHKW-Technik. Allerdings stellen die während des Untersuchungszeitraums von etwa 18 Monaten gewonnenen Ergebnisse nur einen Ausschnitt dar und können nicht allgemeingültig auf andere Anlagen übertragen werden. Dennoch geben die ermittelten Betriebsdaten, die Analyse der Betriebssicherheit und die Emissionsmessungen einen guten Anhaltspunkt zur Charakterisierung des Betriebs- und Emissionsverhaltens von Pflanzenöl-BHKW. Darüber hinaus liefern sie Hinweise zur Optimierung des Einsatzes von Pflanzenöl-BHKW hinsichtlich eines emissionsarmen und sicheren Betriebs.

Sinnvoll erscheint es nun die beobachteten Schwachstellen an den drei untersuchten Aggregate so weit wie möglich abzustellen und danach weitere Betriebserfahrungen zu sammeln, um die im Rahmen dieser Arbeit herausgefundenen Hinweise auf die wechselseitige Beeinflussung von Kraftstoff und Anlagenkomponenten zu verifizieren. Bei einer weiteren Beobachtung der Anlagen wären auch Aussagen über die tatsächliche Laufleistung bei bekannten Einsatzbedingungen von Pflanzenöl-BHKW möglich.

Außerdem könnten weitere Schwachstellen erkannt werden, die sich mitunter erst bei höherer Betriebsstundenzahl bemerkbar machen. Deshalb sollten insbesondere Störungen und deren Ursachen weiter dokumentiert und aufbereitet werden, um sie dann Interessierten zugänglich zu machen. Es wäre darüber hinaus wünschenswert dass darin auch zusätzlich zu erhebende Betriebserfahrungen anderer pflanzenölbetriebener BHKW eingingen.

Neben weiteren Praxiserfahrungen ist auch die gezielte Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Pflanzenöleigenschaften und Anlagenbauteilen wünschenswert, um sowohl den Kraftstoff, bzw. die an ihn gestellten Mindestanforderungen, als auch BHKW-Bauteile weiter zu optimieren. Beispielsweise könnten Einspritzsysteme unter Prüfstandsbedingungen hinsichtlich der Auswirkung von relevanten Pflanzenölkenngrößen, wie Gesamtverschmutzung oder Neutralisationszahl auf den Verschleiß von Pumpenelementen oder die Neigung zur Bildung von Ablagerungen untersucht werden. In diesem Zusammenhang wäre es wichtig, auch neue Hochdruckeinspritzsysteme wie z.B. Common-Rail auf Ihre Anwendbarkeit mit Pflanzenöl zu prüfen, da davon auszugehen ist, dass sich dadurch mittels guter Zerstäubung und anpassbarem Einspritzverlauf eine Verbesserung der Verbrennung und damit eine geringere Neigung zur Bildung von Ablagerungen im Motor mit niedrigeren Abgasemissionen erzielen lassen. Wünschenswert wäre es darüber hinaus, Systeme zur frühen Erkennung des überhöhten Eintrags von Pflanzenöl ins Motoröl (z.B. bei Verschleiß der Pumpenelemente von Einspritzpumpen oder bei Festsitzen von Düsenadeln) zu finden, um Motorschäden durch Schmieröleindickung zu verhindern.

Pflanzenöl-BHKW erfüllen vielfach die derzeitigen Emissionsbegrenzungen gemäß TA-Luft. Da aber eine weitere Reduzierung luftverunreinigender und gesundheitsgefährdender Stoffe anzustreben ist, sollten Maßnahmen zur Minderung von Abgasemissionen nicht unterbleiben. Da sich gezeigt hat, dass Partikelfilter einen entscheidenden Beitrag dazu leisten können, sollten verschiedene Filtersysteme getestet werden, die sich für einen Einbau auch in kleineren BHKW eignen. Zusätzlich bleibt dann zu untersuchen, ob Art und Menge bestimmter Inhaltsstoffe des Pflanzenöls wie z.B. der Phosphorgehalt verstärkt zu Ablagerungen bzw. zu Schäden an Partikelfiltern führen.

## 6 Zusammenfassung

Pflanzenölbetriebene BHKW zeichnen sich durch eine Reihe von Umweltvorteilen aus. Neben einer effizienten Energieumwandlung durch Kraft-Wärme-Kopplung trägt Pflanzenölkraftstoff durch dessen schnelle biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität entscheidend zum Boden- und Gewässerschutz bei. Deshalb eignet sich der Einsatz vor allem dort, wo Kraftstoff durch Unfälle und Leckagen bei Transport und Lagerung vermehrt in die Umwelt gelangen kann und wo beim Austritt von Dieselmotorkraftstoff oder Heizöl beträchtliche Schäden entstehen können, wie z.B. im Alpengebiet oder in Wasserschutzgebieten. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von pflanzenölbetriebenen BHKW sind ländliche Gebiete, in denen bei regionaler Produktion und Nutzung des Pflanzenöls sowie des Presskuchens durch den niedrigen Transportaufwand eine hohe Ausnutzung des Energiegehaltes im Rapsöl erzielt wird und positive Impulse auf die Strukturentwicklung im ländlichen Raum ausgehen. Durch die Förderung der Stromeinspeisung im Rahmen des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes, der Mineralölverknappung sowie des gestärkten Umweltbewusstseins werden pflanzenölbetriebene BHKW im unteren Leistungsbereich zunehmend nachgefragt. Für einen wirtschaftlichen und umweltschonenden Betrieb ist jedoch ein störungsarmer Betrieb mit niedrigen Abgasemissionen grundlegende Voraussetzung.

Um den Stand des Einsatzes pflanzenöлтаuglicher Motoren für BHKW hinsichtlich Technik und Abgasemissionen aufzuzeigen, wurde eine vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (BayLfU) und dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStLU) geförderte Untersuchung mit dem Titel: *„Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen - Literatur- und Technologieübersicht, Datenbank“* durchgeführt [13]. Darin wurden Wissenslücken hinsichtlich der Bandbreite emissionsrelevanter Abgaskomponenten von Pflanzenöl-BHKW aufgezeigt. Ziel dieses, daran anschließenden Forschungsvorhabens war es deshalb, umfangreiche Kenntnisse über das Abgasemissionsverhalten von Pflanzenöl-BHKW im praktischen Einsatz zu erlangen aber auch eventuelle technische Schwachstellen, die in der Vergangenheit für mehrere Ausfälle verantwortlich gemacht wurden, aufzudecken.

Dazu wurden wichtige Betriebsdaten sowie Störungen von drei pflanzenölbetriebenen BHKW mit elektrischen Nennleistungen von 8 kW, 60 kW und 110 kW an verschiedenen Standorten in Bayern über einen Zeitraum von bis zu 18 Monaten erfasst und ausgewertet.



Die Ergebnisse zeigen, dass Störungen gehäuft bei der Kraftstoffversorgung auftreten. Hohe Feststoffgehalte oder Fremdstoffe im Pflanzenöl führten mehrfach zu Betriebsstörungen, die dann entweder aufwendige Wartungsarbeiten (z.B. häufigere Filterwechsel) mit sich brachten oder in einem Fall sogar eine umfassende Erneuerung des Kraftstoffsystems erforderten. Durch die Verwendung von Rapsöl gemäß dem RK-Qualitätsstandard 05/2000, in dem wichtige Mindestanforderungen für Rapsöl als Kraftstoff festgeschrieben sind, können derartige Störungen weitgehend verhindert werden.

Doch nicht nur Verunreinigungen im Pflanzenöl können Schwierigkeiten bei der Kraftstoffversorgung des Motors bereiten, sondern auch eine ungeeignete Dimensionierung und Positionierung der Kraftstoffförderpumpe, die Verwendung katalytisch wirkender Leitungsmaterialien oder vorgealtertes Rapsöl, wie es z.B. durch den Einsatz von beheizten Tagestanks begünstigt wird. Dagegen können kühle und dunkle Lagerungsbedingungen eine schnelle Oxidation und Polymerisation des Rapsöls verhindern und zu einer sicheren Kraftstoffversorgung beitragen.

Da Pflanzenöl aufgrund seiner höheren Viskosität und Verharzungsneigung sowie dem meist erforderlichen höheren Einspritzdruck im allgemeinen zu einer stärkeren Belastung des Einspritzsystems führt, sollten nur hochwertige Einspritzpumpen und Einspritzdüsen bewährter Hersteller verwendet werden. Darüber hinaus vermindert Pflanzenöl mit einer hohen Oxidationsstabilität, niedriger Neutralisationszahl und geringem Wassergehalt mögliche Verschleißerscheinungen von kraftstoffführenden Bauteilen.

Pflanzenölmotoren sind durch häufig höhere Verbrennungstemperaturen des Kraftstoffs gekennzeichnet. Deshalb erscheint es wichtig, besonderes Augenmerk auf eine effiziente Kühlung des Aggregats zu legen, um Motorschäden durch Überhitzung zu vermeiden. Eine leistungsfähige Aggregatbelüftung, saubere Wärmetauscherflächen und ausreichende Mengen des eingesetzten Kühlmediums (Kühlwasser, Motoröl) tragen wesentlich zur Betriebssicherheit bei.

Der Betrieb von Pflanzenöl-BHKW erfordert ebenso wie andere motorisch betriebene BHKW einen gewissen Kontroll- und Wartungsaufwand. Zwar sorgen vielfach automatische Sicherungs- und Überwachungseinrichtungen für die Anzeige von Störursachen und übernehmen auch das automatische Abschalten bei kritischen Betriebszuständen, aber dennoch können sie regelmäßige Routinekontrollen von Fachpersonal nicht ersetzen. Für einen erfolgreichen Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist daher - neben eines fortschrittlichen und umfassenden Motorüberwachungssystems - fachkundiges,

eingewiesenes und interessiertes Bedienungspersonal in hohem Maße ausschlaggebend. Nur so können Störungen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Ein störungsarmer Betrieb von Pflanzenöl-BHKW ist in erster Linie also dann möglich, wenn der Rapsölkraftstoff bestimmte Qualitätskriterien erfüllt, wenn die kraftstoffführenden Komponenten des BHKW für Pflanzenöl ausgelegt sind und wenn Überwachungs- und Instandhaltungsmaßnahmen von fachkundigem Personal ausgeführt werden, das eine gewisse Identifikation mit der Anlage mitbringt.

Trotz oben genannter Umweltvorteile beim Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff, sind schädliche Auswirkungen von Abgasemissionen zu berücksichtigen. Im Rahmen des Vorhabens wurden deshalb an den drei BHKW die Konzentrationen emissionsrelevanter Abgaskomponenten wie Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), Gesamtkohlenwasserstoffe (HC) und Staub an wiederkehrenden Messtagen erhoben. Zusätzlich wurden Kohlenmonoxid und Stickstoffmonoxid bei allen BHKW über mehrere Wochen sowie einmal die geruchsrelevanten Aldehyde an einem ausgewählten BHKW im Abgas bestimmt.

Zwar sind BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) von weniger als 1 MW, wie sie auch Gegenstand der Untersuchung waren, derzeit immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig, dennoch erscheint es sinnvoll, zur Einordnung der Ergebnisse die Emissionsbegrenzungen der einschlägigen Vorschriften heranzuziehen (derzeitige Orientierungswerte) und zu berücksichtigen.

Alle BHKW weisen gemittelt über mehrere Einzelmessungen (0,5h-Mittel) aller Messstage Kohlenmonoxidemissionen (CO) von ca. 24-183 mg/Nm<sup>3</sup> auf und liegen damit deutlich unter der Emissionsbegrenzung gemäß TA-Luft von 650 mg/Nm<sup>3</sup>. Die vergleichsweise niedrigen CO-Emissionen sind ebenso wie die als niedrig einzustufenden organischen Kohlenwasserstoffverbindungen von 4-11 mg/Nm<sup>3</sup> in erster Linie auf die Verwendung von Oxidationskatalysatoren zurückzuführen, womit Umsetzungsraten von ca. 70-90 % erzielt werden. Die Minderung der Aldehydemissionen durch den Oxidationskatalysator beträgt ebenfalls etwa 80 %, wodurch sich Konzentrationen von ca. 1,1 mg/Nm<sup>3</sup> für Formaldehyd, 0,8 mg/Nm<sup>3</sup> für Acrolein und 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> für Acetaldehyd im Abgas ergeben.

Oxidationskatalysatoren werden heute vielfach eingesetzt und weisen einen hohen Entwicklungsstand auf. Da diese für den Einsatz von Pflanzenöl wegen dessen gerin-

gem Schwefelgehalt besonders geeignet sind und zu einer deutlichen Verringerung von CO, HC und vor allem auch von Aldehyden (und damit auch Gerüchen) beitragen, sollte auf ihren Einsatz nicht verzichtet werden.

Bei den Stickstoffoxidemissionen ist bekanntermaßen ein durch das Verbrennungsverfahren bedingter Unterschied zwischen dem Aggregat mit Wirbelkammer und den beiden Motoren mit Direkteinspritzung erkennbar. Ergeben sich für das BHKW mit Wirbelkammermotor etwa 2000 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> im Abgas, so sind es bei den direkt einspritzenden Motoren etwa 2800-3300 mg/Nm<sup>3</sup>. Der Vergleichswert TA-Luft 86 von 4000 mg/Nm<sup>3</sup> wird damit von allen BHKW eingehalten. Allerdings kann der Zielwert gemäß TA-Luft 86 und der derzeitige Grenzwert von 1000 mg/Nm<sup>3</sup> (gültig für Anlagen > 1MW<sub>FWL</sub>) voraussichtlich nur durch nachmotorische Maßnahmen (Entstickungskatalysatoren) erreicht werden.

Für die Staubemissionen beträgt der derzeit zu fordernde (für größere Anlagen gültige) Emissionswert 20 mg/Nm<sup>3</sup>. Zur Begrenzung von Staubemissionen stellen Partikelfilter eine wirkungsvolle Maßnahme dar. Mit durchschnittlich etwa 3 mg/Nm<sup>3</sup> ist der Partikelmasseausstoß bei einem BHKW mit Partikelfilter deutlich niedriger als bei den anderen beiden BHKW ohne Filter, für die Staubemissionen von etwa 80 bzw. 100 mg/Nm<sup>3</sup> ermittelt wurden. Allerdings fiel der Partikelfilter im Praxiseinsatz durch eine hohe Störanfälligkeit infolge von Verschmelzungen der Strömungskanäle auf, was zu zahlreichen Störungen im Anlagenbetrieb führte. Die Regenerierungsphasen des Partikelfilters führten zudem zu hohen CO- und HC-Emissionsspitzen.

Entstickungskatalysatoren und Partikelfilter können wie Oxidationskatalysatoren ebenfalls einen entscheidenden Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Jedoch handelt es sich bei ersteren für Rapsölmotoren noch um weniger verbreitete Technologien, die z.T. mit hohen Investitionskosten behaftet sind. Deshalb ist insbesondere bei kleineren Anlagen die Verhältnismäßigkeit des Einsatzes zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei BHKW die Vergleichswerte nach TA-Luft 86, gültig für Anlagen größer 1 MW, FWL einhalten. Jedoch ist derzeit eine verschärfte Abgasgesetzgebung (neue TA Luft) sowohl hinsichtlich der Emissionsbegrenzungen als auch in Bezug auf eine Erweiterung der Gültigkeit für Anlagen kleiner 1 MW, FWL zu rechnen. Aus den bisweilen deutlichen Unterschieden im Emissionsbild bei einem Aggregat an verschiedenen Messtagen als auch zwischen den einzelnen BHKW kann auf weiteres Optimierungspotential geschlossen werden. Neben den besonders wirksamen nachmotorischen und den motorischen Emissionsminderungsmaßnahmen, sollte auch einer hinsichtlich den Abgasemissionen verbesserten Pflanzenölqualität

Bedeutung zukommen, wenn es gilt, die Umweltvorteile von Rapsöl-BHKW in Zukunft noch stärker zu nutzen.


Die bisherigen Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass bei sorgfältiger Planung, Ausführung und Betriebsüberwachung unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen von Rapsöl, ein störungsarmer und umweltschonender Betrieb von Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken gewährleistet werden kann.

## Quellenverzeichnis

- [1] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LfU) (2001): Mustergutachten zum Immissionsschutz für stationäre Dieselmotore, Augsburg; Stand 2001
- [2] ELSBETT: <http://www.elsbett.de/>
- [3] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27. Februar 1986 (GMBI. S. 95, ber. S. 202)
- [4] KAMPMANN, H.-J. (2001): AAN-Bericht 03/01, Motorbefundung
- [5] LUTHER, R. (1999): Einsatz von Pflanzenölen in Motorenölen. In: Gülzower Fachgespräch: Statusseminar "Biologisch schnell abbaubare Schmier- und Verfahrensstoffe". Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., S. 125-141
- [6] MOLLENHAUER, K. (1997): Handbuch - Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag (1029 Seiten)
- [7] REMMELE, E.; K. THUNEKE; B. WIDMANN; T. WILHARM und H. SCHÖN (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - Endbericht zum Forschungsvorhaben., Bd. "Gelbes Heft" Nr. 69. München: Hrsg. und Druck: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (217 Seiten)
- [8] SEYFERT, C.: diverse Prüfgutachten und mündliche Mitteilungen
- [9] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 17. BImSchV - Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe vom 23. November 1990 (BGBl. I S.2545, ber. S.2832; 1999 S.186; 2000 S.632; 27.7. 2001 S. 1950)
- [10] StMLU (1991): Bekanntmachung vom 06.08.1991 Nr. 8221-333-37615 (AllMBI Nr.22/191, S.634)
- [11] StMLU (1996): Schreiben vom 26.11.1996, Az.: 8267-7/8441178 zum Vollzug des BImSchG, Rußfiltertechnologie bei stationären Selbstzündungsmotoren
- [12] STREIT, A. und H. FRIEß (1998): Emissionsuntersuchungen an einem stationären Rapsöl-Blockheizkraftwerk - Ergebnisse einer Grundsatzuntersuchung. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Energetische Nutzung von Pflanzenölen., S. 113-133
- [13] THUNEKE, K. und C. KERN (1998): Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW-Motoren in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen und Eigenschaften der Pflanzenölkraftstoffe sowie Abgasreinigungssystemen -Literatur- und Technologieübersicht. Abschlußbericht: Bayerische Landesanstalt für Landtechnik (Freising-Weißenstepahn) (105 Seiten)
- [14] WEIGEL, K.: diverse mündliche Mitteilungen
- [15] ZELL, B. (2000): Bayer. Landesamt für Umweltschutz „Emissionsauflagen und Genehmigungspraxis bei Biogas- und Pflanzenöl-BHKW“, Zweites Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg; 23.11.00 in Staffelstein

## Anhang

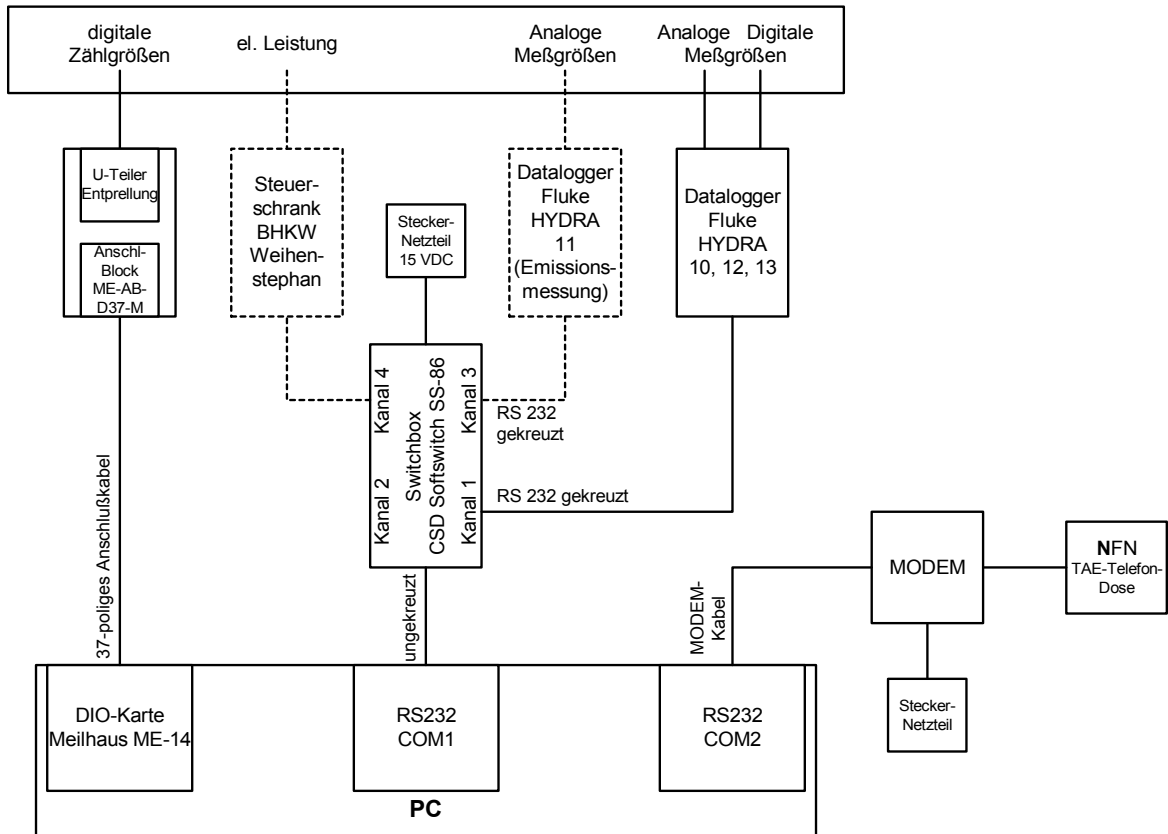
### Anhang 1: Formular zur Kennzeichnung von Ölproben

Anschrift des Probenehmers: .....	
.....	
.....	
.....	
<b>Probe-Nr.:</b> .....	
aus Lieferung von: .....	
entnommen aus (Behälter und Nr.): .....	
Produktionszeitpunkt: .....	
Art der Probenahme:	
<input type="checkbox"/> Oberflächenprobe	<input type="checkbox"/> Allschichtenprobe
<input type="checkbox"/> Obenprobe	<input type="checkbox"/> Hauptstromprobe
<input type="checkbox"/> Oberschichtprobe	<input type="checkbox"/> Nebenstromprobe
<input type="checkbox"/> Mittelschichtprobe	<input type="checkbox"/> Sammelprobe
<input type="checkbox"/> Unterschichtprobe	<input type="checkbox"/> Durchschnittsprobe
<input type="checkbox"/> Bodenprobe	<input type="checkbox"/> .....
<input type="checkbox"/> Auslaufprobe	.....
Erzeugnis / Sorte: .....	
Menge (Volumen und Anzahl Proben): .....	
Probenahmegerät: .....	
Probenahmeort: .....	
Genaue Bezeichnung der	
Probenahmestelle: .....	
.....	
Datum: .....	Uhrzeit: .....
Unterschrift des Probenehmers: .....	
 99 1ER 051	

## Anhang 2: Messeinrichtungen zur Erfassung der Betriebsdaten

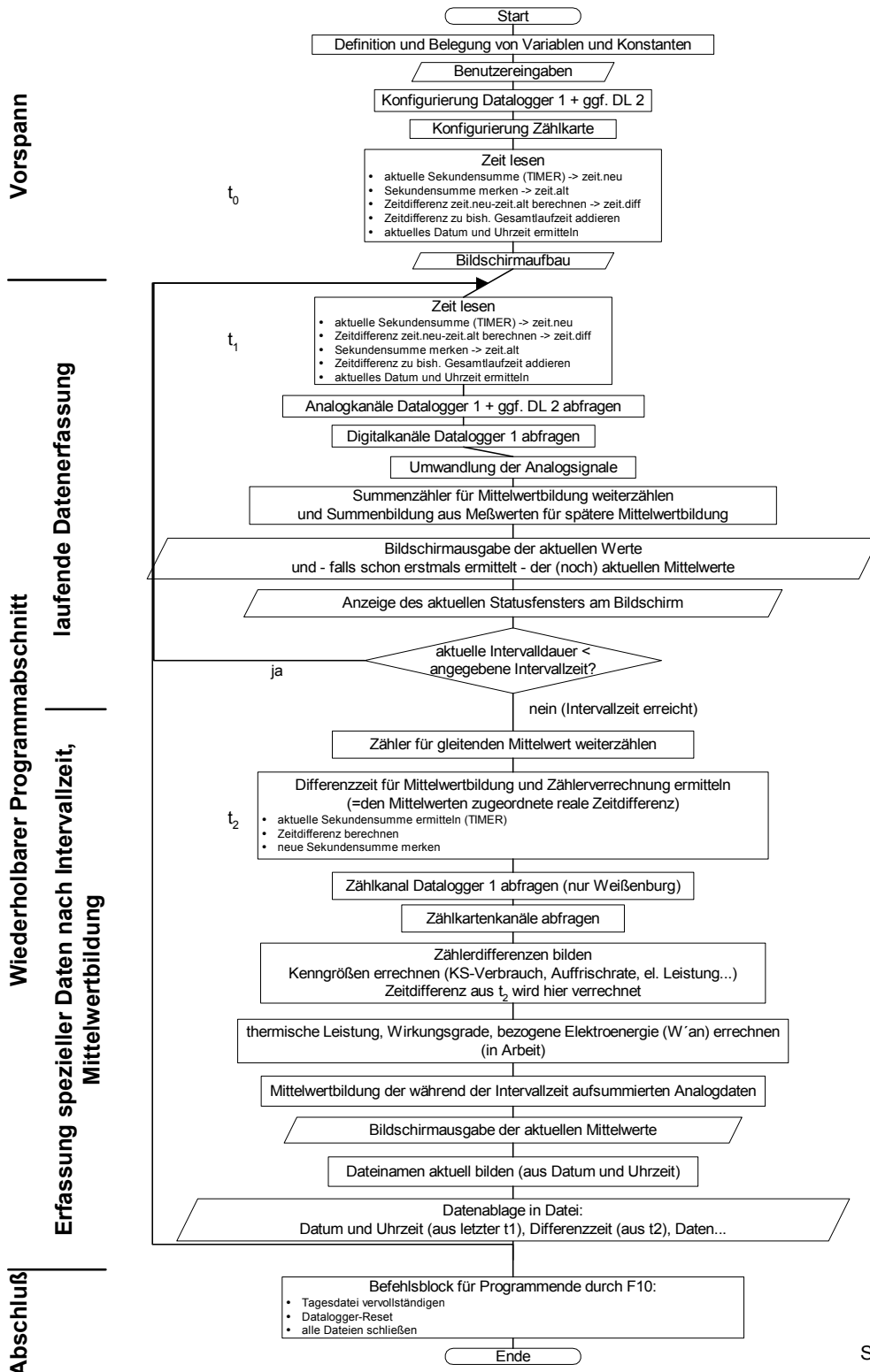
Kenngröße	Bez.	Messstelle	BHKW			Messgerät
			Weihen- stephan	Greußen- heim	Weißen- burg	
<b>Temperaturen</b>						
Kraftstoff	<b>T1</b>	Kraftstofftank	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T2</b>	am Kraftstoff-Filter	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T3</b>	vor Einspritzdüse	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T4</b>	Rücklauf			x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T5</b>	Rücklauf vor Tigerloop			x	Mantel-Thermoelement Typ K
Motoröl	<b>T6</b>	Ölwanne	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T7</b>	Frischöltank			x	Mantel-Thermoelement Typ K
Verbrennungs- luft/Abgas	<b>T8</b>	Ansaugluft	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T9</b>	Abgas nach Zylinder	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T10</b>	Abgas nach Abgasreinigung	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T11</b>	Abgas nach Wärmetauscher	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T12</b>	Umgebungsluft	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T13</b>	Abgas bei Entnahmesonde	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Heiz-/Kühl- wasser	<b>T14</b>	Rücklauf Heizwasser vor Lüfter	x			PT100/2
	<b>T15</b>	Rücklauf Heizwasser	x			PT100/2
	<b>T16G</b>	Heizwasser nach Generator-WT	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T16L</b>	Wasser nach Ladeluftkühler-WT			x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T16H</b>	Wasser nach Heiz-Kühl-Kreislauf-WT	x			Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T16M</b>	Wasser nach Motor-WT	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T16K</b>	Wasser nach Abgas-Krümmen-WT		x		Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T16A</b>	Wasser nach Abgaswärmetauscher	x			Mantel-Thermoelement Typ K
	<b>T17</b>	Vorlauf Heizungswasser	x			PT100/2
			x	x	Mantel-Thermoelement Typ K	
<b>Drücke</b>						
Kraftstoff	<b>p1</b>	Kraftstoff vor Kraftstofffilter			x	Druckaufnehmer 0-10 bar
	<b>p2</b>	Kraftstoff nach Kraftstofffilter			x	Druckaufnehmer 0-10 bar
	<b>pd1</b>	Differenzdruck Kraftstofffilter	x	x		Druckaufnehmer 0-500 mbar
Motoröl	<b>p3</b>	Gebrauchtöl vor Gebrauchtölfilter			x	Druckaufnehmer 0-700 mbar
	<b>p4</b>	Gebrauchtöl nach Gebrauchtölfilter			x	Druckaufnehmer 0-700 mbar
Verbrennungs- luft/Abgas	<b>p5</b>	Abgas nach Motor	x	x	x	Druckaufnehmer 0-200 mbar
	<b>p6</b>	Abgas nach Abgasreinigung	x	x	x	Druckaufnehmer 0-200 mbar
	<b>p7</b>	Abgas nach Wärmetauscher	x			Druckaufnehmer 0-200 mbar
<b>Sonstige Meßgrößen</b>						
Kraftstoffvolu- menstrom	<b>V1</b>	Kraftstoffverbrauch	x			Epi-Flowmeter 3-007 (560 Imp./l)
				x	x	Brooks LS 4550 (200 Impulse/l)
						Brooks LS 4550 (200 Impulse/l)
Heizwasservolu- menstrom	<b>V3</b>	Heizwasser	x			diskont. Pollux Wasseruhr
				x		diskont. Pollux Wasseruhr
					x	diskont. Panametrics PT 868
el. Leistung	<b>PeI</b>	gelieferte el. Leistung BHKW	x			diskont. aus Schaltschrank
					x	Sensorsignal (Schaltschrank)
el. Arbeit	<b>Wout</b>	gelieferte el. Arbeit BHKW			x	Zähler
	<b>Win</b>	bezogene Arbeit	x			diskont. Zähler

Anhang 3: Aufbau der Datenerfassungsgeräte





Anhang 4: Aufbau des Datenerfassungsprogramms für BHKW



Anhang 5: „Logbuch“ - Formblatt für das BHKW Weißenburg

Datum	Uhrzeit	Aggregat	Betriebs- stunden (Zählerstand)	Motoröl- temp.	Motoröl- druck	Ereignisse, Maßnahmen
		1				
		2				
		1				
		2				
		1				
		2				
		1				
		2				
		1				
		2				
		1				
		2				

**Ereignisse:**

- Kraftstofflieferung, Motoröllieferung
- Wartung, Reparatur, Reinigung
- Sonstiges (Störungen, Leckagen, etc.)

**bitte dokumentieren:**

- ⇒ - Datum, Uhrzeit, Lieferant, Herkunft, Sorte Menge
- ⇒ - Art der Arbeiten und verwendeten Ersatzteile
- ⇒ - Art, Maßnahmen

**Maßnahmen:**

- ⇒ - frühzeitige Mitteilung an die Landtechnik W'stephan für Probenahme
- ⇒ - evtl. Kopien von Lieferscheinen, Rechnungen in Logbuch abheften
- ⇒ - evtl. Kopien von Lieferscheinen, Rechnungen in Logbuch abheften
- ⇒ - Mitteilung an die Landtechnik W'stephan

Anhang 6: Temperaturen von Kraftstoff und Motoröl des BHKW in Weißenburg  
(Monatsmittelwerte)

Weißenburg	TKraftstoff im Tagestank in °C		TKraftstoff am Filter in °C		TKraftstoff im Rücklauf in °C		TMotoröl in Ölwanne in °C	
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max
Jul 99	25,9	29,4	46,2	50,5	63,4	69,8	94,5	101,8
Aug 99	28,5	35,9	46,4	52,2	63,9	69,6	94,4	114,6
Sep 99	25,0	31,7	45,7	49,7	63,5	68,5	94,4	97,6
Okt 99	16,9	20,6	40,5	49,5	54,1	64,9	93,7	118,6
Nov 99	11,0	15,7	37,7	42,2	38,8	55,5	92,7	94,5
Dez 99	10,2	12,0	37,3	46,1	43,7	60,4	92,5	110,6
Jan 00	8,9	10,5	35,5	45,5	26,9	63,3	92,3	103,5
Feb 00	10,2	11,6	37,9	44,6	47,1	59,5	92,5	94,6
Mrz 00	10,6	12,3	38,8	46,0	47,3	61,5	92,5	119,1
Apr 00	12,7	20,1	37,9	46,1	45,9	64,8	92,7	118,3
Mai 00	24,4	33,1	45,3	50,7	63,3	68,6	93,1	95,1
Jun 00	25,9	31,2	45,4	52,2	63,1	69,2	93,1	104,3
Jul 00	26,1	33,7	48,0	52,0	64,0	66,6	92,3	93,9
Aug 00	26,5	31,3	--	--	--	--	--	--
Sep 00	23,6	30,2	46,4	47,2	64,4	66,3	92,9	93,5
Okt 00	15,9	23,4	45,5	47,4	62,4	65,2	92,5	94,0
Nov 00	13,7	17,4	41,8	57,2	55,7	65,8	92,7	118,0
Dez 00	11,3	13,7	38,1	51,4	43,5	59,4	92,6	--

Anhang 7: Temperaturen von Kraftstoff und Motoröl des BHKW in Greußenheim  
(Monatsmittelwerte)

Greußenheim	TKraftstoff im Tagestank in °C		TKraftstoff am Filter in °C		TKraftstoff vor Einspritzdüse in °C		TMotorenöl in Ölwanne in °C	
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max
Feb 00	34,3	41,1	44,1	64,5	62,8	--	105	107
Mrz 00	33,2	41,8	47,7	56,0	59,4	68,7	102	106
Apr 00	32,5	41,5	52,9	62,3	59,3	65,9	104	107
Mai 00	33,9	37,2	57,4	62,4	63,8	68,3	107	110
Jun 00	36,0	40,8	58,5	66,7	64,4	72,1	109	113
Jul 00	32,1	35,0	54,7	68,6	61,5	68,3	108	111
Aug 00	31,6	36,9	57,7	67,6	63,3	66,5	107	109
Sep 00	31,0	39,4	52,9	59,8	58,4	63,3	103	109
Okt 00	32,3	40,1	51,4	62,8	56,9	68,5	104	110
Nov 00	32,4	39,5	49,5	53,4	55,4	60,3	105	112

Anhang 8: Temperaturen von Kraftstoff und Motoröl des BHKW in Weihenstephan (Monatsmittelwerte)

Landtechnik	TKraftstoff nach Tagestank in °C		TKraftstoff am Filter in °C		TKraftstoff vor Einspritzdüse in °C		TMotoröl in Ölwanne in °C	
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max
Sep 99	23,5	35,0	42,4	48,9			94,1	95,3
Okt 99	20,7	30,7	36,4	42,9			93,9	95,9
Nov 99	18,7	25,4	35,2	44,6	73,0	74,7	93,6	99,8
Dez 99	12,6	27,9	34,9	41,7	74,6	78,0	94,1	95,7
Jan 00	15,9	24,6	33,7	39,1	73,0	75,5	93,6	95,0
Feb 00	20,7	26,3	35,7	40,1	--	--	94,2	95,4
Mrz 00	15,1	28,9	35,6	42,0	--	--	93,6	100,0
Apr 00	19,1	33,4	37,0	43,2	--	--	93,7	95,2
Mai 00	21,5	39,3	35,6	48,4	--	--	92,4	96,8
Jun 00	23,8	39,6	42,3	51,1	--	--	93,6	99,6
Jul 00	21,8	38,8	42,4	49,5	--	--	93,9	99,7
Aug 00	27,9	39,5	43,3	49,9	--	--	95,2	100,0
Sep 00	18,7	33,5	41,1	45,9	--	--	94,9	96,8
Okt 00	18,6	30,5	37,4	42,2	--	--	94,4	96,0
Nov 00	--	--	--	--	--	--	--	--
Dez 00	12,9	27,7	32,8	40,8	--	--	93,7	95,1

Anhang 9: Temperaturen von Ansaugluft und Abgas des BHKW in Weißenburg (Monatsmittelwerte)

Weißenburg	TAnsaugluft vor Luftfilter in °C	TAbgas nach Zylinder in °C	TAbgas nach Oxikat in °C	TAbgas nach AWT in °C
	Median	Median	Median	Median
Aug 99	28,1	476,7	468,7	161,2
Sep 99	27,7	474,0	465,6	162,2
Okt 99	21,9	469,8	456,5	159,0
Nov 99	20,0	460,2	451,0	154,9
Dez 99	16,3	461,1	450,3	153,5
Jan 00	12,6	451,0	447,1	155,5
Feb 00	20,3	462,6	455,8	159,8
Mrz 00	21,2	463,4	453,9	162,4
Apr 00	23,2	475,3	458,6	166,1
Mai 00	27,2	480,3	467,5	173,6
Jun 00	27,9	483,9	471,2	174,4
Jul 00	27,8	461,4	458,7	161,1
Aug 00	--	--	--	--
Sep 00	27,4	450,6	425,4	162,1
Okt 00	27,7	445,4	419,1	168,7
Nov 00	25,7	442,4	415,2	175,8
Dez 00	23,0	448,0	423,3	196,0

Anhang 10: Temperaturen von Ansaugluft und Abgas des BHKW in Greußenheim (Monatsmittelwerte)

Greußenheim	TUmgebungsluft in °C	TAnsaugluft vor Luftfilter in °C	TAbgas nach Zylinder in °C	TAbgas nach Oxikat in °C	TAbgas nach AWT in °C
	Median	Median	Median	Median	Median
Feb 00	46,8	26,0	382	379	240
Mrz 00	49,7	29,1	381	374	234
Apr 00	45,3	31,8	391	380	237
Mai 00	47,3	39,4	398	386	238
Jun 00	49,4	38,0	400	388	245
Jul 00	48,5	34,3	396	385	243
Aug 00	52,0	37,5	397	387	245
Sep 00	46,0	19,9	387	378	244
Okt 00	43,0	14,7	414	401	247
Nov 00	36,8	11,7	409	397	254
Dez 00	--	--	--	--	--

Anhang 11: Temperaturen von Ansaugluft und Abgas des BHKW in Weißenstein (Monatsmittelwerte)

Landtechnik	TAnsaugluft vor Luftfilter in °C		TAbgas nach Zylinder in °C		TAbgas nach Oxikat in °C		TAbgas nach AWT in °C	
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max
Aug 99	48,6	63,1	341	361	334	354	135	144
Sep 99	50,6	67,8	341	362	334	355	134	144
Okt 99	45,8	57,0	333	348	326	341	133	137
Nov 99	45,3	59,9	334	367	326	353	132	139
Dez 99	46,2	57,4	336	355	329	347	132	136
Jan 00	44,8	50,3	337	356	329	349	132	137
Feb 00	46,7	56,2	339	372	331	362	133	138
Mrz 00	47,2	54,5	349	392	341	383	134	142
Apr 00	48,5	54,2	347	376	338	371	132	140
Mai 00	46,4	55,6	354	371	347	363	134	139
Jun 00	51,5	66,5	358	383	351	375	134	142
Jul 00	52,8	60,0	373	395	365	387	137	146
Aug 00	53,6	66,7	371	395	364	389	138	147
Sep 00	51,7	56,7	379	396	372	391	139	146
Okt 00	49,1	59,9	382	398	374	395	139	145
Nov 00	--	--	--	--	--	--	--	--
Dez 00	43,7	59,0	380	410	372	399	139	144



Anhang 14: Temperaturen des Heizwassers des BHKW in Weihenstephan (Monatsmittelwerte)

Landtechnik	THeizwasser im Rücklauf vor Notkühler in °C		THeizwasser im Rücklauf in °C		THeizwasser nach Motor in °C		THeizwasser nach AWT in °C		THeizwasser im Vorlauf in °C	
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max	Median	Max
Aug 99	77,5	84,7	63,5	70,1	79,4	86,8	81,5	89,0	81,0	89,0
Sep 99	75,0	84,8	61,2	70,3	79,2	87,4	81,3	89,5	81,0	89,5
Okt 99	67,4	76,0	60,5	65,7	78,7	81,3	80,8	83,3	80,6	82,8
Nov 99	62,1	70,7	60,8	63,2	78,5	87,3	80,6	89,3	80,1	90,5
Dez 99	62,2	72,0	60,7	64,4	78,7	80,5	80,8	81,8	80,2	80,9
Jan 00	61,3	65,4	60,4	62,3	78,4	79,4	80,5	81,5	79,9	80,8
Feb 00	65,2	76,8	60,6	64,0	78,8	80,4	80,9	81,7	80,4	81,8
Mrz 00	66,2	78,3	60,6	81,1	78,6	87,8	80,8	89,3	80,4	88,4
Apr 00	66,8	77,1	60,5	67,9	78,6	80,8	80,8	83,0	80,4	83,5
Mai 00	71,0	81,8	60,9	68,7	78,7	84,3	81,0	86,4	80,6	86,2
Jun 00	69,4	84,6	60,9	70,1	78,5	86,5	80,9	88,9	80,3	88,8
Jul 00	72,1	83,7	60,9	71,5	78,6	85,3	81,1	88,0	80,6	87,4
Aug 00	71,9	82,0	60,9	72,2	78,8	86,0	81,4	88,6	80,6	88,1
Sep 00	66,2	73,3	60,5	64,8	78,7	81,1	81,3	83,8	80,5	82,8
Okt 00	65,1	76,2	60,6	67,1	78,6	81,1	81,2	83,2	80,4	82,1
Nov 00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Dez 00	63,8	70,5	60,4	63,7	78,6	81,2	81,2	82,8	80,4	82,3

Anhang 15: Abgasdrücke des BHKW in Weissenburg (Monatsmittelwerte)

Weissenburg	PAbgas vor AGR in mbar		PAbgas vor AWT in mbar		PAbgas Diff nach/vor AWT in mbar
	Median	Max	Median	Max	Median
Sep 99	51,5	67,1	5,2	16,0	45,2
Okt 99	57,7	86,7	5,8	10,3	51,2
Nov 99	76,3	100,6	6,3	8,1	70,7
Dez 99	87,0	111,9	6,7	9,9	79,7
Jan 00	59,4	112,3	6,5	9,8	52,8
Feb 00	64,8	92,4	6,9	11,4	58,3
Mrz 00	57,9	91,0	8,2	12,8	48,9
Apr 00	70,2	99,2	6,3	10,7	65,5
Mai 00	71,8	102,7	1,6	7,9	69,5
Jun 00	72,6	99,6	2,4	10,4	68,2
Jul 00	60,7	98,2	6,2	9,3	54,2
Aug 00	--	--	--	--	--
Sep 00	17,4	18,4	12,2	13,5	4,9
Okt 00	18,9	20,4	15,1	16,5	4,0
Nov 00	18,4	21,8	13,5	18,7	3,8
Dez 00	16,6	20,8	13,7	17,7	3,1

## Anhang 16: Abgasdrücke des BHKW in Weihenstephan (Monatsmittelwerte)

Landtechnik	PAbgas vor AGR in mbar		PAbgas vor AWT in mbar		PAbgas nach AWT in mbar		PAbgas Diff nach/vor AWT in mbar
	Median	Max	Median	Max	Median	Max	
Aug 99	45,8	47,8	36,7	40,5	7,6	8,9	29,2
Sep 99	44,7	48,0	34,6	40,3	7,3	8,9	27,3
Okt 99	44,2	46,8	35,8	41,2	5,5	6,7	30,4
Nov 99	43,3	46,5	35,3	39,2	4,5	5,8	30,8
Dez 99	43,0	46,1	36,7	39,0	4,3	5,6	32,5
Jan 00	49,1	82,2	36,8	40,6	4,1	5,3	32,7
Feb 00	55,4	78,7	37,7	63,8	3,8	5,8	34,0
Mrz 00	52,1	63,3	57,3	70,2	3,7	8,4	53,6
Apr 00	51,0	60,1	53,2	58,7	3,6	4,6	49,6
Mai 00	47,4	63,3	43,8	60,3	3,3	5,1	40,5
Jun 00	49,9	63,1	39,6	--	9,0	10,8	30,6
Jul 00	51,4	55,7	40,7	47,5	8,5	10,1	32,3
Aug 00	51,8	55,4	40,8	45,2	8,5	9,9	32,3
Sep 00	50,8	53,7	41,3	47,7	7,7	8,9	33,6
Okt 00	49,6	52,7	42,0	50,7	7,4	8,6	34,7
Nov 00	--	--	--	--	--	--	--
Dez 00	--	--	44,1	50,5	7,4	8,2	36,7

## Anhang 17: Elektrische Leistung und Kraftstoffverbrauch der drei untersuchten BHKW (Monatsmittelwerte)

	Weißenburg		Greußenheim		Landtechnik	
	el. Leistung in kW	Kraftstoff-Verbrauch in l/h	el. Leistung in kW	Kraftstoff-Verbrauch in l/h	el. Leistung in kW	Kraftstoff-Verbrauch in l/h
Aug 99	105,7	30,6	--	--	8	3,2
Sep 99	106,5	30,7	--	--	8	3,1
Okt 99	109,3	31,0	--	--	8	3,2
Nov 99	108,9	31,0	--	--	8	3,2
Dez 99	107,4	30,3	--	--	8	3,2
Jan 00	111,6	31,0	--	--	8	3,2
Feb 00	110,1	31,0	39,9	13,0	8	3,2
Mrz 00	109,0	30,7	39,8	12,8	8	3,2
Apr 00	108,8	31,0	39,8	13,0	8	3,1
Mai 00	106,1	30,4	39,8	13,0	8	3,1
Jun 00	107,5	31,3	39,8	12,9	8	3,1
Jul 00	--	--	39,9	12,9	8	3,1
Aug 00	--	--	39,8	12,8	8	3,0
Sep 00	103,4	29,6	40,0	13,0	8	2,9
Okt 00	101,8	29,3	49,8	15,8	8	2,9
Nov 00	105,6	30,1	49,8	15,8	--	--
Dez 00	109,7	31,2	--	--	--	--



Anhang 18: Ergebnisse der Emissionsmessungen BHKW Weißenburg - Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kW <sub>el</sub>	CO mg/Nm <sup>3</sup>	CnHm mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	NO mg/Nm <sup>3</sup>	Staub mg/Nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas- temp. °C	Mess- dauer min	Rußfilt. Rege- nerier. Anzahl
<b>BHKW Weißenburg (Nennleistung: 110 kW<sub>el</sub>)</b>												
<b>23.06.99</b> (1/3)	<b>Aggregat 2</b>											
	Anfahrt Nennlast	110	314	22	2768	--	6	10.6	7.8	106	26	0
	Nennlast 1	110	200	8	2899	--	3	10.5	7.9	151	32	0
	Nennlast 2	110	208	6	2858	--	3	10.5	7.9	156	30	0
	Nennlast 3	110	197	11	2870	--	2	10.7	7.8	163	30	0
	Nennlast 4	110	198	10	2822	--	2	10.7	7.7	164	30	0
	Nennlast 5	110	196	9	--	2682	2	10.8	7.7	160	29	0
	<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>200</b>	<b>9</b>	<b>2862</b>	<b>--</b>	<b>2</b>	<b>10.6</b>	<b>7.8</b>	<b>159</b>	<b>30</b>	<b>0</b>
	Regeneration 1	110	1030	485	2704	--	--	10.2	8.1	165	30	1
	Regeneration 2	110	1006	505	2718	--	--	10.2	8.1	166	30	1
	Regeneration 3	110	1054	602	2458	--	--	10.4	8.0	168	30	1
	Regeneration 4	110	1035	541	2487	--	--	10.4	8.0	169	30	1
	<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>1031</b>	<b>533</b>	<b>2592</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>10.3</b>	<b>8.1</b>	<b>167</b>	<b>30</b>	<b>1</b>
<b>09.09.99</b> (2/3)	<b>Aggregat 2</b>											
	Anfahrt Nennlast	110	343	6	2572	--	10	10.2	8.1	115	30	0
	Nennlast 1	110	306	15	2688	--	4	10.3	8.1	159	30	0
	Nennlast 2	110	324	13	2644	--	5	--	8.1	156	30	0
	Nennlast 3	110	243	18	2740	--	6	10.6	7.8	143	30	0
	<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>291</b>	<b>15</b>	<b>2691</b>	<b>--</b>	<b>5</b>	<b>10.5</b>	<b>8.0</b>	<b>153</b>	<b>30</b>	<b>0</b>
	Regeneration 1	110	1345	2552	2468	--	5	11.3	8.5	162	30	1
	Regeneration 2	110	1294	2429	2526	--	6	9.8	8.4	168	30	1
	<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>1320</b>	<b>2491</b>	<b>2497</b>	<b>--</b>	<b>6</b>	<b>10.6</b>	<b>8.5</b>	<b>165</b>	<b>30</b>	<b>1</b>
	<b>Aggregat 1</b>											
	Anfahrt Nennlast	110	76	8	3305	--	3	10.4	8.0	137	33	0
	Nennlast 1	110	79	7	3373	--	4	10.6	7.9	142	30	0
	Nennlast 2	110	75	7	3317	--	3	10.6	7.8	142	34	0
Nennlast 3	110	73	6	--	3186	--	10.7	7.8	142	6	0	
<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>76</b>	<b>7</b>	<b>3345</b>	<b>--</b>	<b>4</b>	<b>10.6</b>	<b>7.8</b>	<b>142</b>	<b>23</b>	<b>0</b>	
<b>17.10.00</b> (3/3)	<b>Aggregat 2 (Rußfilter ausgebaut)</b>											
	Nennlast 1	110	61	8	2830	--	76	11.3	7.3	158	30	0
	Nennlast 2	110	53	6	2867	--	76	11.3	7.3	162	25	0
	Nennlast 3	110	59	6	2775	--	79	11.2	7.4	163	30	0
	Nennlast 4	110	65	6	2804	--	76	11.3	7.3	167	31	0
	<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>60</b>	<b>7</b>	<b>2819</b>	<b>--</b>	<b>77</b>	<b>11.3</b>	<b>7.3</b>	<b>163</b>	<b>29</b>	<b>0</b>
	<b>Aggregat 1</b>											
	Nennlast 1	110	33	6	3318	--	2	10.7	7.8	156	30	0
	Nennlast 2	110	37	6	3333	--	2	10.6	7.8	156	31	0
	Nennlast 3	110	38	10	3288	--	1	10.3	8.0	168	30	0
<b>Mittelwert</b>	<b>110</b>	<b>36</b>	<b>7</b>	<b>3313</b>	<b>--</b>	<b>2</b>	<b>10.5</b>	<b>7.9</b>	<b>160</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	

Anhang 19: Ergebnisse der Emissionsmessungen BHKW Greußenheim - Halbstundenmittelwerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

Messdatum (lfd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kW <sub>el</sub>	CO mg/Nm <sup>3</sup>	CnHm mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	NO mg/Nm <sup>3</sup>	Staub mg/Nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas- temp. °C	Mess- dauer min
<b>BHKW Greußenheim (Nennleistung: 60 kW<sub>el</sub>)</b>											
27.07.99 (1/4)	Anfahrt Nennlast	40	69	19	3478	--	254	11.2	7.4	164	30
	Nennlast 1	40	42	13	3582	--	94	11.3	7.3	198	30
	Nennlast 2	40	42	10	3612	--	39	11.2	7.3	200	29
	Nennlast 3	40	42	10	3548	--	61	11.3	7.3	201	30
	Nennlast 4	40	41	11	3587	--	81	11.3	7.3	202	30
	<b>Mittelwert</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>11</b>	<b>3582</b>	<b>--</b>	<b>69</b>	<b>11.3</b>	<b>7.3</b>	<b>200</b>	<b>30</b>
	Anfahrt Teillast	21	128	56	3086	--	115	14.7	4.7	152	30
	Teillast 1	21	144	119	3216	--	109	14.5	4.9	144	30
	Teillast 2	21	147	121	3228	--	106	14.5	4.9	149	30
	Teillast 3	21	159	127	3286	--	101	14.5	4.9	149	30
	<b>Mittelwert</b>	<b>21</b>	<b>150</b>	<b>122</b>	<b>3243</b>	<b>--</b>	<b>105</b>	<b>14.5</b>	<b>4.9</b>	<b>147</b>	<b>30</b>
	Lastwechsel 1	20	180	140	3254	--	--	14.6	4.8	149	2
		25	102	95	3550	--	--	13.6	5.5	152	2
		30	75	63	3749	--	--	12.9	6.1	156	2
	35	67	54	3790	--	--	12.0	6.8	164	2	
	40	63	51	3746	--	--	11.2	7.4	173	2	
	45	61	55	3813	--	--	10.2	8.1	185	2	
Lastwechsel 2	20	80	80	--	2953	--	14.6	4.8	172	2	
	24	81	72	--	3159	--	13.8	5.4	168	2	
	30	64	50	--	3339	--	12.9	6.1	168	2	
	35	57	39	--	3346	--	12.0	6.8	172	2	
	40	55	32	--	3280	--	11.2	7.4	178	2	
	45	57	32	--	3331	--	10.3	8.0	188	2	
23.02.00 (2/4)	Nennlast 1	40	46	13	2909	--	84	12.3	6.6	206	30
	Nennlast 2	40	48	13	2867	--	64	12.2	6.6	208	29
	Nennlast 3	40	50	12	2844	--	71	12.2	6.6	208	30
	Nennlast 4	40	51	11	2845	--	76	12.3	6.5	207	29
	Nennlast 5	40	52	11	--	2370	59	12.4	6.5	206	30
	<b>Mittelwert</b>	<b>40</b>	<b>49</b>	<b>12</b>	<b>2866</b>	<b>--</b>	<b>71</b>	<b>12.3</b>	<b>6.6</b>	<b>207</b>	<b>30</b>
	3x An- u. Abfahrt	40	153	51	2542	--	105	13.9	5.4	170	30
Lastwechsel	21	169	83	1881	--	--	15.1	4.5	146	2	
	25	89	52	2165	--	--	14.2	5.1	151	2	
	29	69	39	2340	--	--	13.7	5.5	157	2	
	38	61	42	2504	--	--	12.6	6.3	167	2	
	41	58	39	2602	--	--	12.1	6.7	178	2	
	60	55	19	3242	--	--	9.5	8.6	206	2	
27.07.00 (3/4)	Anfahrt Nennlast	40	220	29	2439	--	217	12.3	6.5	140	19
	Nennlast 1	40	28	10	2521	--	164	11.7	7.0	204	30
	Nennlast 2	40	32	9	2504	--	165	11.7	7.0	206	30
	Nennlast 3	40	57	9	2487	--	167	11.7	7.0	207	29
	Nennlast 4	40	62	9	--	--	167	11.7	7.0	207	30
	Nennlast 5	40	62	9	--	2052	167	11.7	7.0	208	31
	<b>Mittelwert</b>	<b>40</b>	<b>48</b>	<b>9</b>	<b>2504</b>	<b>--</b>	<b>166</b>	<b>11.7</b>	<b>7.0</b>	<b>206</b>	<b>30</b>
18.10.00 (4/4)	Nennlast 1	50	18	6	2375	--	106	11.0	7.5	226	30
	Nennlast 2	50	12	5	2354	--	120	11.0	7.6	228	25
	Nennlast 3	50	11	5	2363	--	138	10.9	7.6	228	25
	Nennlast 4	50	17	5	2385	--	140	11.0	7.5	228	21
	Nennlast 5	50	15	5	2351	--	113	11.0	7.5	227	29
	<b>Mittelwert</b>	<b>50</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>2366</b>	<b>--</b>	<b>123</b>	<b>11.0</b>	<b>7.5</b>	<b>227</b>	<b>26</b>
	Nennlast 1	40	17	13	2197	--	95	12.4	6.5	197	30
Nennlast 2	40	15	12	2242	--	96	12.5	6.4	202	30	
<b>Mittelwert</b>	<b>40</b>	<b>16</b>	<b>13</b>	<b>2220</b>	<b>--</b>	<b>96</b>	<b>12.5</b>	<b>6.5</b>	<b>200</b>	<b>30</b>	

Anhang 20: Ergebnisse der Emissionsmessungen BHKW Weihenstephan - Emissionswerte bez. auf trockenes Abgas unter Normbed. (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt (Teil 1/2)

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kW <sub>el</sub>	CO mg/Nm <sup>3</sup>	CnHm mg/N <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	NO mg/Nm <sup>3</sup>	Staub mg/Nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abg.-temp. °C	Messdauer min	
<b>BHKW Landtechnik Weihenstephan (Nennleistung: 8 kW<sub>el</sub>)</b>												
<b>06.07.99</b> <b>(1/6)</b>	Anfahrt Nennlast	8	78	9	1965	--	57	11.0	7.6	90	30	
	<i>Nennlast 1</i>	8	18	4	2043	--	55	10.5	7.9	116	29	
	<i>Nennlast 2</i>	8	19	< 2	1974	--	65	10.4	8.0	119	29	
	<i>Nennlast 3</i>	8	19	< 1	1937	--	--	10.3	8.1	119	29	
	<i>Nennlast 4</i>	8	18	< 1	1856	--	64	10.3	8.1	119	29	
	<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>1953</b>	<b>--</b>	<b>61</b>	<b>10.4</b>	<b>8.0</b>	<b>118</b>	<b>29</b>	
	Abfahrt	8	19	< 2	1780	--	100	10.8	7.7	120	29	
	3x An- u. Abfahrt	8	46	7	1767	--	110	12.6	6.3	98	29	
	Anfahrt Teillast	5	27	8	2525	--	24	13.7	5.5	95	30	
	<i>Teillast 1</i>	5	25	4	2524	--	--	13.6	5.6	99	29	
	<i>Teillast 2</i>	5	26	4	2492	--	12	13.7	5.5	98	28	
	<i>Teillast 3</i>	5	26	4	2459	--	12	13.7	5.5	98	29	
	<b>Mittelwert</b>	<b>5</b>	<b>26</b>	<b>4</b>	<b>2492</b>	<b>--</b>	<b>12</b>	<b>13.7</b>	<b>5.5</b>	<b>98</b>	<b>29</b>	
	Abfahrt Teillast	5	32	5	2439	--	7	13.8	5.4	98	28	
<b>24.11.99</b> <b>(2/6)</b>	Anfahrt Nennlast	8	77	14	2068	--	165	11.2	7.4	76	30	
	<i>Nennlast 1</i>	8	31	4	2157	--	109	11.2	7.4	103	30	
	<i>Nennlast 2</i>	8	28	3	2388	--	61	11.1	7.5	116	29	
	<i>Nennlast 3</i>	8	30	< 3	2288	--	83	11.0	7.5	118	30	
	<i>Nennlast 4</i>	8	28	< 2	2348	--	85	11.1	7.5	118	30	
	<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>29</b>	<b>3</b>	<b>2295</b>	<b>--</b>	<b>85</b>	<b>11.1</b>	<b>7.5</b>	<b>114</b>	<b>30</b>	
	Abfahrt	8	25	< 2	2319	--	99	11.0	7.6	119	28	
	3x An- u. Abfahrt	8	49	6	2428	--	112	13.6	5.6	101	29	
	<i>Teillast 1</i>	5	29	4	3298	--	19	13.9	5.3	95	30	
	<i>Teillast 2</i>	5	27	4	3255	--	12	13.9	5.3	97	30	
	<i>Teillast 3</i>	5	25	4	3281	--	13	14.0	5.3	97	30	
	<b>Mittelwert</b>	<b>5</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>3278</b>	<b>--</b>	<b>15</b>	<b>13.9</b>	<b>5.3</b>	<b>96</b>	<b>30</b>	
	Lastwechsel 1	8	52	3	2298	--	--	11.7	7.0	97	2	
		7	58	3	2635	--	--	12.8	6.2	99	2	
		6	64	4	2910	--	--	13.7	5.5	96	2	
		5	72	4	3121	--	--	14.4	5.0	93	2	
		4	85	7	3294	--	--	15.2	4.4	89	2	
		2	288	24	3538	--	--	16.7	3.2	79	2	
Lastwechsel 2	8	51	4	--	1580	--	11.7	7.0	94	2		
	7	57	4	--	1819	--	12.7	6.2	99	2		
	6	64	4	--	2336	--	13.7	5.5	98	2		
	5	72	5	--	2758	--	14.5	4.9	94	2		
	4	83	6	--	3030	--	15.1	4.4	91	2		
	2	258	24	--	3518	--	16.8	3.2	81	2		
<b>26.04.00</b> <b>(3/6)</b>	<i>Nennlast 1</i>	8	26	3	2059	--	69	10.3	8.0	121	30	
	<i>Nennlast 2</i>	8	24	< 3	2058	--	66	10.3	8.0	121	30	
	<i>Nennlast 3</i>	8	23	< 3	2093	--	87	10.3	8.1	121	29	
	<i>Nennlast 4</i>	8	22	< 2	2099	--	49	10.4	8.0	120	30	
	<i>Nennlast 5</i>	8	21	< 1	2057	--	58	10.3	8.1	121	28	
	<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>23.2</b>	<b>2.4</b>	<b>2073</b>	<b>--</b>	<b>66</b>	<b>10.3</b>	<b>8.0</b>	<b>121</b>	<b>29</b>	
	<b>Messung vor (Rohgas) und nach (Reingas) Oxikat</b>											
	vor Oxikat	8	181	12	2115	--	--	10.7	7.8	117	70	
	nach Oxikat	8	19	4	2066	--	--	10.6	7.8	115	46	
	Umsetzung	--	90%	67%	2%	--	--	--	--	--	--	
	<b>Kraftsstoff mit besonders hoher Gesamtverschmutzung</b>											
	<i>Nennlast 1</i>	8	13	< 3	1836	--	113	10.5	7.9	116	30	
	<i>Nennlast 2</i>	8	12	3	1900	--	121	10.4	8.0	117	29	
<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>12.5</b>	<b>3.0</b>	<b>1868</b>	<b>--</b>	<b>117</b>	<b>10.5</b>	<b>8.0</b>	<b>117</b>	<b>30</b>		

Anhang 21: Ergebnisse der Emissionsmessungen BHKW Landtechnik Weihenstephan - Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt (Teil 2/2)

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kW <sub>el</sub>	CO mg/Nm <sup>3</sup>	CnHm mg/Nm <sup>3</sup> <sub>s</sub>	NO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	NO mg/Nm <sup>3</sup>	Staub mg/Nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas-temp. °C	Messdauer min
<b>BHKW Landtechnik Weihenstephan (Nennleistung: 8 kW<sub>el</sub>)</b>											
<b>12.07.00</b> <b>(4/6)</b>	Anfahrt Nennlast (NL)	8	84	19	1599	--	106	10.9	7.6	58	11
	Nennlast 1	8	15	5	1897	--	74	10.4	8.0	120	30
	Nennlast 2	8	14	5	1911	--	75	10.3	8.0	123	30
	Nennlast 3	8	13	5	1896	--	77	10.2	8.1	125	30
	Nennlast 4	8	10	4	1898	--	62	10.2	8.1	126	30
	Nennlast 5	8	8	4	1901	--	59	10.2	8.2	126	30
	<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>1901</b>	<b>--</b>	<b>69</b>	<b>10.3</b>	<b>8.1</b>	<b>124</b>	<b>30</b>
<b>13.07.00</b> <b>(5/6)</b>	Nennlast 1	8	22	4	2018	--	67	10.6	7.9	123	30
	Nennlast 2	8	22	4	1991	--	58	10.5	7.9	124	30
	Nennlast 3	8	22	4	1997	--	53	10.5	7.9	124	29
	Nennlast 4	8	22	5	--	1320	62	10.4	8.0	125	30
		<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>22</b>	<b>4</b>	<b>2002</b>	<b>--</b>	<b>60</b>	<b>10.5</b>	<b>7.9</b>	<b>124</b>
<b>Messung vor (Rohgas) und nach (Reingas) Oxikat</b>											
	vor Oxikat 1	8	217	23	2056	--	--	11.0	7.5	117	30
	vor Oxikat 2	8	225	23	--	1968	--	10.9	7.6	121	30
	nach Oxikat 1	8	24	7	1974	--	--	10.9	7.6	118	29
	nach Oxikat 2	8	24	6	--	1568	--	11.0	7.5	120	30
	Umsetzung	--	89%	72%	4%	20%	--	--	--	--	--
<b>28.11.00</b> <b>(6/6)</b>	Nennlast 1	8	38	6	1954	--	128	11.1	7.4	116	30
	Nennlast 2	8	36	6	1922	--	134	11.0	7.5	117	25
	Nennlast 3	8	36	6	1922	--	146	10.9	7.6	117	30
		<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>37</b>	<b>6</b>	<b>1933</b>	<b>--</b>	<b>136</b>	<b>11.0</b>	<b>7.5</b>	<b>117</b>
<b>Kraftsstoff mit geringer Oxidationsstabilität (gealtert)</b>											
	Nennlast 1	8	36	7	1946	--	152	11.0	7.5	118	30
	Nennlast 2	8	35	7	1902	--	163	10.9	7.6	120	29
	Nennlast 3	8	34	7	1954	--	193	10.9	7.6	120	30
	<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	<b>35</b>	<b>7</b>	<b>1934</b>	<b>--</b>	<b>169</b>	<b>10.9</b>	<b>7.6</b>	<b>119</b>	<b>30</b>