
Verfahren zur nachmotorischen Abgasreinigung für pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Untersuchungen von Abgaspartikelfiltersystemen

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projekt Nr. 1323)



Augsburg, 2006

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Das Projekt wurde vom I Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing durchgeführt.

Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) finanziert und vom Landesamt für Umwelt (LfU) fachlich betreut und begleitet.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (jetzt : Bayerisches Landesamt für Umwelt)
Durchführung: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Projektleiter: Dr. Edgar Remmele
Autoren: Klaus Thuneke
Kathrin Stotz
Bearbeiter: Klaus Thuneke
Kathrin Stotz
Heiner Link
Roland Fleischmann
Florian Raba

Stand: Dezember 2004

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.):

Verfahren zur nachmotorischen Abgasreinigung für pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Untersuchungen von Abgaspartikelfiltersystemen, Augsburg, 2006

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2006

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		3
Abbildungsverzeichnis		5
Tabellenverzeichnis		8
1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung		9
2 Stand des Wissens		12
2.1 Partikelfiltersysteme		12
2.1.1 Abgaspartikel		12
2.1.2 Aufbau von Partikelfiltersystemen.....		12
2.1.2.1 Filtermedien		12
2.1.2.2 Regenerationsverfahren.....		14
2.1.2.3 Reinigung und Wartung von Partikelfiltern.....		17
2.1.3 Anforderungen an Partikelfiltersysteme		17
2.1.4 Freigaben durch Motorenhersteller		19
2.1.5 Anbieter von Partikelfiltersystemen.....		19
2.1.6 Beispiele von Partikelfiltersystemen im Praxiseinsatz.....		23
2.1.7 Untersuchungen zu Abgaspartikelfiltersystemen.....		24
2.2 Entstickungskatalysatoren		26
2.2.1 Stickstoffoxide (NO _x).....		26
2.2.2 SCR-Katalysator		27
2.2.2.1 SCR-Verfahren bei stationären Motoren		28
2.2.2.2 SCR-Verfahren bei mobilen Motoren.....		28
2.2.2.3 Aufbau eines SCR-Katalysatorensystems		29
2.2.2.4 Ablauf der Reaktion		30
2.2.3 Adsorberkatalysatoren.....		31
2.2.4 Schwefel als Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit von Katalysatoren		32
2.2.5 Anbieter von Entstickungskatalysatoren.....		33
3 Material und Methoden.....		34
3.1 Pflanzenöl-BHKW des Technologie- und Förderzentrums (TFZ)		34
3.2 Getestete Partikelfiltersysteme		37
3.2.1 Partikelfiltersystem „A“ – katalytisch beschichteter Karamik-Monolith		37
3.2.2 Partikelfiltersystem „B“ – katalytisch beschichteter Draht-/Filamentgestrickfilter.....		38
3.2.3 Partikelfiltersystem „C“ – unbeschichteter Keramik-Monolith		39
3.2.4 Partikelfiltersystem „D“ – Faserverbundfilter mit NO ₂ -Regeneration		40
3.2.5 Partikelfiltersystem „E“ – katalytisch beschichteter Faserflechtfilter.....		41
3.3 Methodisches Vorgehen beim Testbetrieb.....		43
3.3.1 Erfassung des Betriebsverhaltens.....		43
3.3.2 Erfassung des Emissionsverhaltens.....		43

4	Analysenergebnisse	47
4.1	Rapsölkraftstoff.....	47
4.2	Motoröl.....	48
4.3	Abgaspartikel.....	50
5	Ergebnisse des Testbetriebs verschiedener Partikelfiltersysteme.....	52
5.1	Betriebsverhalten	52
5.1.1	Partikelfiltersystem „A“	52
5.1.2	Partikelfiltersystem „Ba“	57
5.1.3	Partikelfiltersystem „Bb“	60
5.1.4	Partikelfiltersystem „C“	62
5.1.5	Partikelfiltersysteme „Da“ „Db“ und „Dc“	63
5.1.6	Partikelfiltersystem „E“	66
5.2	Emissionsverhalten	70
5.2.1	Partikelmasse (Staub).....	71
5.2.2	Kohlenmonoxid (CO).....	72
5.2.3	Stickstoffoxide (NO _x).....	74
5.2.4	Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C)	75
6	Diskussion	76
7	Folgerungen und Ausblick	84
8	Zusammenfassung	86
	Quellenverzeichnis.....	88
	Anhang.....	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Staubemissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittel, Minimum und Maximum mehrerer 30-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas, Normbedingungen und 5 % O ₂ -Gehalt	10
Abbildung 2:	Schema eines SCR-Katalysatorsystems	29
Abbildung 3:	Ablauf der katalytischen Reaktion	30
Abbildung 4:	Relevante Reaktionsmechanismen eines NO _x -Adsorbers	32
Abbildung 5:	Integration der Dieselpartikelfiltersysteme „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“ und „Dc“ in das Pflanzenöl-BHKW des TFZ.....	34
Abbildung 6:	Abgasheizung für Dieselpartikelfiltersystem „Db“ und „Dc“	35
Abbildung 7:	Oxidationskatalysator zur Regeneration mit NO ₂ für die Partikelfilter „Da“, „Db“ und „Dc“	35
Abbildung 8:	Veränderte Abgasführung für Partikelfilter „E“ – BHKW-Seitenansicht.....	35
Abbildung 9:	Katalysator-Partikelfilter System „A“ - keramischer Filterblock in Edelstahlgehäuse (links) - wechselseitig verschlossene Kanäle des Filterblocks (rechts).....	37
Abbildung 10:	Filtersystem „Ba“ – eingebaut (links) - Detailansicht der Austrittsseite (rechts).....	39
Abbildung 11:	Filtersystem „Bb“ – gewickeltes Draht-/Keramikfilamentgestrick.....	39
Abbildung 12:	Partikelfiltersystem „C“ – keramischer Monolith in Gehäuse für motornahe Anbringung an einem bestimmten BHKW-Typen.....	40
Abbildung 13:	Dieselpartikelfiltersystem „D“ – spiralförmig aufgewickelte Keramikfaserverbundbahn mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse	41
Abbildung 14:	Partikelfiltersystem „E“ – Schaubild (links) - Foto des Filtergehäuses in eingebautem Zustand (rechts)	42
Abbildung 15:	Abgaspartikelfiltersystem „E“ mit katalytisch beschichteten Glasfasergeflechtfilterkerzen (links und Mitte) und vorgeschaltete elektrische Abgasheizung (rechts)	42
Abbildung 16:	Schematische Darstellung des Geräteaufbaus für die Emissionsmessungen am BHKW des TFZ	44
Abbildung 17:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „A“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters	53
Abbildung 18:	Aufsicht auf den stark mit Partikel beladenen eingebauten Partikelfilter „A“ vor der dritten Reinigung	54

Abbildung 19:	Druckverlust des regenerierten Filters „A“ („Filter BHKW“) im Vergleich zu einem neuen Rußfilter gleichen Typs („Vergleichsfilter Corning“) am Filterprüfstand der HTW Dresden (Drehmoment 50 Nm, $n=1000-4000$ U/min ⁻¹ , Betriebszeit gesamt: 21 min).....	55
Abbildung 20:	Abscheidegrad des regenerierten Filters „A“ („Filter BHKW“) im Vergleich zu einem gereinigten Rußfilter gleichen Typs („Vergleichsfilter Corning“) am Filterprüfstand der HTW und am BHKW des TFZ vor der Regeneration („Abscheidegrad nach Bericht“) bei verschiedenen Temperaturstufen (Abgastemperatur vor Filter 280-480 °C, $n = 3000$ min ⁻¹)	56
Abbildung 21:	Konversion von HC und CO des Filters „A“ nach der Regeneration am Filterprüfstand der HTW („Konversion HC“, „Konversion CO“) und vor der Regeneration im BHKW des TFZ („Konversion HC nach Bericht“, „Konversion CO nach Bericht“) bei verschiedenen Temperaturstufen (Abgastemperatur vor Filter 280-480 °C, $n = 3000$ min ⁻¹).....	56
Abbildung 22:	Aufgesägter Dieselpartikelfilter „A“ mit den zerstörten Kanälen im Innern des Filters	57
Abbildung 23:	Ascherückstand aus dem Dieselpartikelfilter „A“	57
Abbildung 24:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Ba“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	59
Abbildung 25:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Bb“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	60
Abbildung 26:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „C“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters	62
Abbildung 27:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Da“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	64
Abbildung 28:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Db“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	65
Abbildung 29:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Dc“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	66
Abbildung 30:	Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „E“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters.....	68
Abbildung 31:	Oxidationskatalysator nach mechanischer Beschädigung in eingebautem (links) und ausgebautem (rechts) Zustand.....	69
Abbildung 32:	Abgaspartikelfilter „E“ mit sandartigem Material des beschädigten Oxidationskatalysators	69

Abbildung 33: Filterkerzen des Partikelfiltersystems „E“ in beladenem Zustand (links) und teilweise gereinigt (rechts)	70
Abbildung 34: Partikelmasseemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, Angaben in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O ₂)	72
Abbildung 35: Kohlenmonoxidemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, CO-Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O ₂)	73
Abbildung 36: Stickstoffoxidemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, NO _x -Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O ₂)	74
Abbildung 37: Gesamtkohlenstoffemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, Gesamt-C-Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O ₂)	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anbieter von nach VERT ¹ geprüften Partikelfiltersystemen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit).....	19
Tabelle 2:	Weitere (neben der in Tabelle 1 genannten) Anbieter von Komponenten von Partikelfiltersystemen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit)	22
Tabelle 3:	Anbieter von Entstickungskatalysatoren (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)	33
Tabelle 4:	Technische Daten des rapsölbetriebenen Versuchs-BHKW des TFZ	36
Tabelle 5:	Technische Daten der verwendeten Abgasheizungen.....	36
Tabelle 6:	Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile	45
Tabelle 7:	Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile	45
Tabelle 8:	Beschreibung der Rapsölkraftstoffproben bei den Testläufen der Partikelfilter	47
Tabelle 9:	Kraftstoffkennwerte der analysierten Rapsölkraftstoffproben (Werte, die den RK-Qualitätsstandard nicht einhalten, sind fettgedruckt).....	48
Tabelle 10:	Analysenergebnisse des bei den Untersuchungen eingesetzten Motoröls in frischem Zustand und nach 550 Stunden im Einsatz	49
Tabelle 11:	Analysenergebnisse von Ruß und Asche aus den Partikelfiltern „A“ und „E“	50
Tabelle 12:	Analysenergebnisse von Asche aus Partikelfilter „A“	51
Tabelle 13:	Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „A“	52
Tabelle 14:	Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „Ba“	58
Tabelle 15:	Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „Bb“	61
Tabelle 16:	Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „C“	62
Tabelle 17:	Ereignisse beim Einsatz der Dieselpartikelfiltersysteme (DPF) „Da“, „Db“, „Dc“	63
Tabelle 18:	Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „E“	67

1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Pflanzenölbetriebene BHKW zeichnen sich durch viele Umweltvorteile aus. Zusätzlich zur effizienten Energieumwandlung durch Kraft-Wärme-Kopplung wirkt sich die Verwendung von Pflanzenöl als Kraftstoff positiv auf die Schonung von Ressourcen und den Schutz des Klimas aus. Darüber hinaus kann Pflanzenöl durch dessen schnelle biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität vor allem in umweltsensiblen Gebieten einen entscheidenden Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz leisten. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von pflanzenölbetriebenen BHKW sind landwirtschaftlich geprägte Gebiete, in denen bei regionaler Produktion und Nutzung des Pflanzenöls sowie des Presskuchens eine hohe Ausnutzung des Energiegehalts erzielt wird und positive Impulse auf die regionale Strukturentwicklung ausgehen.

Mit der Förderung der Stromeinspeisung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), der Mineralölverknappung sowie des gestärkten Umweltbewusstseins werden pflanzenölbetriebene BHKW im unteren Leistungsbereich zunehmend nachgefragt.

Unsicherheiten bestanden lange hinsichtlich Zuverlässigkeit und Emissionsverhalten von Pflanzenöl-BHKW. Aus dem Forschungsvorhaben „Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Betriebs- und Emissionsverhalten ausgewählter bayerischer Anlagen, Schwachstellenanalyse und Bewertung“, das vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Augsburg gefördert wurde, ging hervor, dass ein störungsarmer Betrieb von Pflanzenöl-BHKW vor allem dann möglich ist, wenn der Kraftstoff bestimmte Qualitätskriterien erfüllt und wenn Anlagenkomponenten sowie Maschineninstandhaltung den pflanzenölspezifischen Anforderungen gerecht werden [23].

Für einen besonders umweltschonenden, emissionsarmen Betrieb ist der Einsatz von Oxidationskatalysatoren erforderlich, der zu einer deutlichen Minderung der CO-, HC- und Geruchsemissionen auf Konzentrationen von weit unter den Emissionsbegrenzungen für genehmigungsbedürftige BHKW (nach TA-Luft) führt. Derzeit wird im Interesse der Luftreinhaltung vor allem der Reduzierung von Stickstoffoxiden sowie gesundheitsschädlichen Partikelemissionen eine hohe Bedeutung beigemessen.

Gemäß der oben genannten Untersuchung kann der für Anlagen < 1 MW Feuerungswärmeleistung unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit in Anlehnung an die TA-Luft 2002 empfohlene Zielwert für Staubemissionen von 20 mg/Nm³ (bezogen auf 5 % O₂-Gehalt) nur eingehalten werden, wenn das BHKW über einen Abgaspartikelfilter (Rußfilter) verfügt (Abbildung 1). Mit durchschnittlich etwa 3 mg/Nm³ ist der Partikelmasseausstoß bei einem BHKW (110 kW_{el}) mit Partikelfilter deutlich niedriger als bei den BHKW ohne Filter, für die Staubemissionen von etwa 60 bis 170 mg/Nm³ ermittelt wurden. Allerdings fiel der installierte 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.

Weitere, spezielle Untersuchungen zum Einsatz von Abgaspartikelfiltersystemen bei pflanzenölbetriebenen Motoren liegen nicht vor.

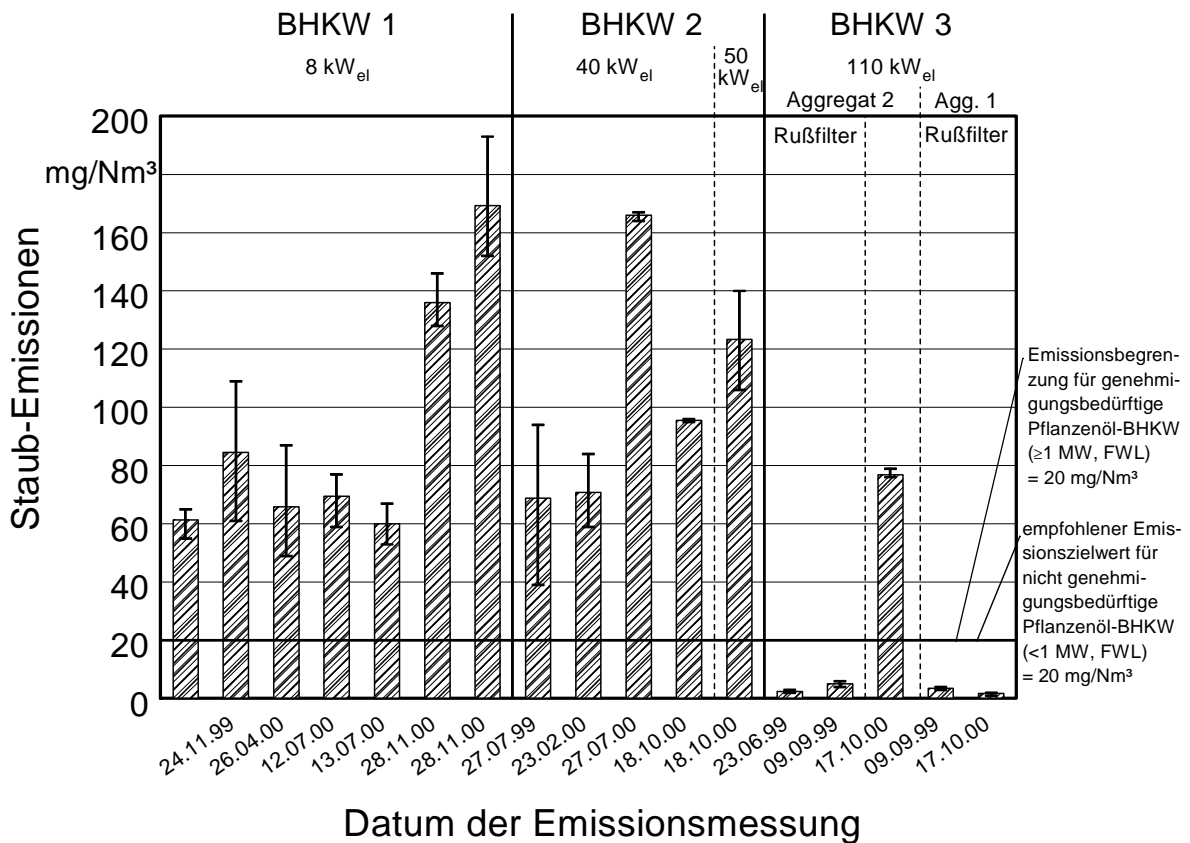


Abbildung 1: Staubemissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Nennlast, Mittel, Minimum und Maximum mehrerer 30-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas, Normbedingungen und 5 % O₂-Gehalt

Nachmotorische Verfahren zur Entstickung (NO_x-Minderung) und Partikelfilter (Staubminderung) können einen entscheidenden Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Jedoch handelt es sich dabei für Rapsölmotoren noch um kaum verbreitete Technologien. Insbesondere BHKW kleinerer Leistungen (< 100 kW_{el}) werden üblicherweise nicht mit Entstickungskatalysatoren oder Partikelfiltern ausgestattet. Hemmnisse für den Einsatz dieser Abgasreinigungssysteme sind Unsicherheiten bezüglich der Funktionstauglichkeit für kleinere Pflanzenöl-BHKW sowie die unverhältnismäßig hohen Investitionskosten. Es gilt zu klären, ob neuartige Verfahren zur Entstickung und Partikelfilter für Kraftfahrzeuge oder für andere Anwendungsbereiche, gegebenenfalls nach geringfügiger Adaption, störungsarm und kostengünstig in pflanzenölbetriebenen BHKW kleinerer Leistung eingesetzt werden können.

Ziel des Projektes ist es deshalb,

- den **Stand der Technik** von **Partikelfiltersystemen** und Verfahren zur **nachmotorischen Entstickung** (NO_x-Minderung) für die Minderung von Abgasen aus Selbstzündungsmotoren, die für den Einsatz in Stationärmotoren geringer Leistung geeignet sind, aufzuzeigen,
- die wechselseitigen **Anforderungen** der Abgasreinigungssysteme (**Partikelfilter, Entstickungskatalysator**) und **pflanzenölbetriebener BHKW** geringer Leistung zu erarbeiten,
- zwei geeignete **Partikelfiltersysteme auszuwählen** und zeitlich nacheinander am pflanzenölbetriebenen BHKW des Technologie- und Förderzentrums (8 kW_{el}) zu **installieren**,
- die **Funktion** der ausgewählten **Partikelfiltersysteme** über einen längeren Zeitraum im praktischen Einsatz am BHKW des Technologie- und Förderzentrums zu **überwachen** und dabei:
 - wichtige motorische Betriebsbedingungen (Abgasgedruck, -temperaturen) zu erfassen
 - wiederkehrende Messungen zur Ermittlung der Partikelemissionen und weiterer Abgasbestandteile (CO, NO_x, HC, CO₂/O₂) durchzuführen
 - die Betriebssicherheit, betriebstechnische Schwachstellen und die Störanfälligkeit der ausgewählten Partikelfiltersysteme zu ermitteln
 - Intervalle für Wartung bzw. Reinigung der Filter von Aschen zu ermitteln
 - eventuelle Auswirkungen der Partikelfiltersysteme auf den BHKW-Betrieb zu erfassen
- Schließlich sollen die Ergebnisse bewertet und Aussagen bezüglich der **Einsatztauglichkeit, Langzeitfunktionstüchtigkeit** sowie der **Effektivität (Abscheiderate)** von **Partikelfiltersystemen** bei **Pflanzenöl-BHKW** geringer Leistung abgeleitet werden.

Ursprünglich war es auch Ziel des Untersuchungsvorhabens, eines der zu testenden Partikelfiltersysteme nach der Überprüfung am BHKW des Technologie- und Förderzentrums an einem externen BHKW einzubauen, um zusätzliche Langzeitbetriebserfahrungen zu sammeln. Da sich im Laufe der Untersuchung herausgestellt hatte, dass kein System die dafür notwendige Betriebssicherheit aufweisen konnte, wurde in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz vereinbart, dass dafür mehrere Partikelfiltersysteme als ursprünglich geplant im Blockheizkraftwerk des Technologie- und Förderzentrums untersucht werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Partikelfiltersysteme

Partikelfiltersysteme bestehen aus dem eigentlichen Filtermedium, der Regenerationseinrichtung sowie einer Steuerungs- und Kontrolleinheit zur Überwachung der wichtigsten Funktionen.

Als übergeordnete Zielsetzung gilt die Forderung, die Schadstoffemissionen des Selbstzündungsmotors insbesondere jene mit kanzerogenem Potenzial, auf das technisch machbare Minimum nachhaltig zu reduzieren [19]. Dazu gehört insbesondere der Dieseluß, bzw. die Emission an lungengängigen Feinpartikeln.

2.1.1 Abgaspartikel

Partikel sind die nach Verdünnung des Abgases mit Luft auf einem Probenfilter bei einer Temperatur von maximal 52 °C gesammelten Stoffe im Abgas. Hierzu zählen im Wesentlichen Ruß, hochsiedende Kohlenwasserstoffe, die am Ruß angelagert sind, und bei schwefelhaltigen Kraftstoffen auch Sulfate.

Die Entstehung von Partikelemissionen hängt entscheidend vom Verbrennungsablauf ab und ist vor allem eine Funktion von Temperatur, örtlichem Brennstoff/Luftverhältnis und Druck.

Im Dieselmotor entsteht Ruß vor allem in Verbrennungszonen fetten Gemisches. Bei der Mischung von fetten rußhaltigen Gemischzonen mit sauerstoffhaltigen Zonen kommt es aber auch zur Rußoxidation, die durch hohe Temperaturen im Brennraum begünstigt wird.

Die am Ruß angelagerten Kohlenwasserstoffe entstehen durch unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes, z.B. bei Erlöschen der Flamme in besonders mageren Bereichen, in der Nähe der vergleichsweise kalten Brennraumwand sowie durch Kraftstoffrückstände an der Einspritzdüse nach Beendigung des Einspritzvorgangs.

2.1.2 Aufbau von Partikelfiltersystemen

2.1.2.1 Filtermedien

Bisher haben sich weder elektrostatische oder strömungsdynamische Verfahren noch Abgaswäscher gegenüber oberflächenreichen Strukturen durchsetzen können. Als Filtermedien eignen sich temperaturbeständige Materialien, wie Metalle und keramische Substrate oder Faserstrukturen. Folgende Filtermedien haben sich bewährt:

Keramisch-monolithische Zellenfilter

- ähnlich wie Zellenkatalysator, aber mit wechselweise verschlossenen Zellen
- große Oberfläche (1-3 m²/l)
- hohe Abscheiderate, geringer Gegendruck, niedrige Gasgeschwindigkeiten
- meist aus Cordierit (sehr gute Hitzeresistenz)
- umfangreiche Erfahrungen seit Jahrzehnten

Metall-Sinterfilter

- auf Basis metallischer Werkstoffe ähnliche Funktion wie keramischer Monolith
- verschiedene Bauformen möglich
- schwerer als Keramik aber sehr robust
- gute Wärmeleitung

Faser-Wickelfilter

- Garne aus Hochtemperaturfasern werden auf perforiertes Trägerrohr gewickelt
- Spezielle Wickeltechnik hat zu zuverlässigem Filterelement geführt

Faser-Strickfilter

- Rundgestricke aus keramischen Garnen
- Faseroberfläche ca. 200 m²/l
- mit katalytischer Beschichtung und elektrischer Innenbeheizung erhältlich

Faser-Flechtfilter

- Geflechte aus Hochtemperaturfasern auf metallischen Trägerstrukturen

Filterpapier, Filterfilz, Filtervlies

- Papierfilter, ähnlich aufgebaut wie Ansaugluftfilter
- Oberflächenfilter
- nur bei niedrigen Abgastemperaturen (max. 300 °C)
- bei höheren Temperaturen: Filze aus keramischen Fasern
- auch Vliese aus Metall-Mikrofasern

2.1.2.2 Regenerationsverfahren

Partikelfilter beladen sich solange mit Ruß, bis ein maximal zulässiger Abgasgedruck erreicht wird. Dann müssen sie regeneriert werden. Für die Regeneration sind üblicherweise Abgastemperaturen von mehr als 600 °C am Filtereintritt erforderlich [26]. Derart hohe Temperaturen werden jedoch üblicherweise nur bei hohen Drehzahlen in vollastnahen Betriebspunkten erreicht. Deshalb sind sowohl bei Motoren im mobilen Einsatz, insbesondere aber bei Aggregaten und Blockheizkraftwerken Hilfen für den Rußabbrand notwendig. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen:

- passive und aktive Regeneration, je nachdem ob die Regeneration bei bestimmten Betriebszuständen erfolgt oder durch eine Steuerung oder Regelung bei Erreichen eines eingestellten maximalen Abgasdrucks aktiv ausgelöst wird
- fahrzeuggebundene Systeme (On-Board-Systeme), bei denen alle Funktionen ohne Ausbau des Filters erfolgen
- Wechsel-Filter, die zur Regeneration ausgebaut werden müssen
- Aufsteck-Filter, die nur kurzzeitig für bestimmte Betriebsperioden genutzt werden

Für einen BHKW-Betrieb mit einer üblicherweise hohen Stundenauslastung und unbeaufsichtigten Betrieb eignen sich vor allem Systeme zur passiven oder aktiven Regeneration.

Passive Regeneration

Additivunterstützte Regeneration

Durch den Einsatz von Metalladditiven, wie z.B. Cer (Ce) oder Eisen (Fe), die üblicherweise dem Kraftstoff zudosiert werden lässt sich eine Reduzierung der Zündtemperatur von ca. 600 °C auf 350-450 °C erreichen. Bei Motoren mit niedrigeren Abgastemperaturen ist eine Regenerierung nur durch Eingriff in das Motormanagement möglich. Nachteile der additivunterstützten Regeneration ist die Notwendigkeit eines Zusatztanks mit Dosiereinrichtung sowie der zusätzliche Ascheeintrag durch das Additiv, der zu einem häufigeren Reinigen des Filters führt. Voraussetzung für die additivunterstützte Regeneration sind Filter-Systeme, die auch für die dabei entstehenden kleinen Oxidpartikel (ca. 20 nm) ausreichende Abscheideraten aufweisen. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch die katalytische Wirkung von Additiven schädliche Sekundäremissionen entstehen (Sulfate, Dioxine, Furane).

Regenerationsadditive für Dieselpartikelfilter [18]:

- *Satacen*: Grundsubstanz Ferrocen. Die katalytische Wirkung wird durch das bei der Verbrennung entstehende Eisenoxid erreicht.
- *EOLYS (DPX9)*: Grundsubstanz Cer. Die katalytische Wirkung ist durch das bei der Verbrennung entstehende Ceroxid gegeben.

- *DFX-DPF*: Grundsubstanz Cer und Platin. Katalytische Wirkung ist durch eine Verbindung von Cer und Platin (bzw. deren Oxide) gegeben, die in der Verbrennung aus den metallorganischen Vorläufersubstanzen entstehen.

CRTTM-Prinzip (Continuous Regenerating Trap)

Das CRTTM-Prinzip beruht darauf, dass in einem vorgeschalteten edelmetallbeschichteten Oxidationskatalysator vermehrt NO₂ aus dem im Abgas enthaltenen NO gebildet wird. Im Rußfilter erfolgt dann die umgekehrte Reaktion, wobei mit Hilfe des freiwerdenden Sauerstoffs der Kohlenstoff bereits bei Abgastemperaturen von ca. 280 °C kontinuierlich konvertiert wird. Damit können CO-, CH- und Partikelemissionen zu etwa 90 % vermindert werden [2]. Bei diesem passiven System ist allerdings ein Dieselmotorkraftstoff mit einem Schwefelgehalt von weniger als 10 ppm notwendig [26]. Andernfalls besteht die Gefahr der Schädigung des Katalysators und hoher Sulfat-Emissionen. Ist die NO₂-Konzentration oder die Abgastemperatur zu niedrig kann der Filter verstopfen, wohingegen bei zu hohen NO₂-Konzentrationen die Gefahr erhöhter NO₂-Emissionen gegeben ist. Ein Einsatz, bei dem das Abgas in geschlossene Räume gelangt (z.B. bei Gabelstaplern) ist daher problematisch [2].

Katalytischer Rußfilter

Beim katalytischen Rußfilter wird mit Hilfe von Übergangsmetallen die Rußabbrandtemperatur auf unter 400 °C, z.T. auch unter 350 °C abgesenkt. Wird das Temperaturniveau im laufenden Betrieb ausreichend lange erreicht, sind keine weiteren Maßnahmen notwendig (passive Regenerationsmethode). Die Regeneration an einer katalytisch beschichteten Wand erfolgt üblicherweise langsam. Um jedoch eine Beschädigung der katalytisch aktiven Oberfläche zu vermeiden, darf die maximal auftretende Temperatur 800 °C nicht überschreiten (Einhaltung einer maximal zulässigen Filterbelastung).

Aktive Regeneration

Brennerunterstützte Regeneration

Die Auslösung der brennerunterstützten Regeneration ist unabhängig von der Abgastemperatur. Durch Erfassen und Verarbeiten von Abgastemperatur, Abgasgegendruck sowie Motordrehzahl und Last wird die Regeneration gestartet, indem Kraftstoff mit Verbrennungsluft in einer kleinen Verbrennungskammer verbrannt wird und die Abgastemperatur auf die erforderlichen 650 °C gebracht wird. Beim BHKW-Betrieb erfolgt die Zuschaltung des Brenners beim Erreichen eines bestimmten Abgasdrucks und das Abschalten, wenn der Rußfilter freigebrannt ist (Dauer ca. 10 min). Anforderungen, die an eine brennerunterstützte Regeneration gestellt werden sind eine sichere und zuverlässige Regeneration, Dauerhaltbarkeit und ein geringer Energiebedarf.

Katalytische Verbrennung

Ein Oxidationskatalysator vor dem Rußfilter setzt eingespritzten Kraftstoff flammenlos um und hebt so die Abgastemperatur auf die erforderliche Regenerationstemperatur an.

Elektrische Beheizung

Hierbei wird durch eine elektrische Beheizung der Abgasstrom und der Rußfilter so weit aufgeheizt, bis die erforderliche Abbrandtemperatur erreicht ist. Ist die Abbrandtemperatur wesentlich höher als die Abgastemperatur, ist eine hohe Heizleistung erforderlich. Durch Kombination mit katalytischen Verfahren kann jedoch der Energieaufwand gemindert werden.

Gegenstrom-Abreinigung

Durch einen periodischen Druckstoß entgegen der Abgasstromrichtung wird die Filterbeladung gelöst und über eine Schleuse ausgetragen. Dieses System wird vor allem im Anlagenbau eingesetzt und wird derzeit für Fahrzeuganwendungen entwickelt.

Motorische Maßnahmen

Durch Veränderung des Einspritzzeitpunkts bei modernen Einspritzsystemen oder durch Drosselung des Gasstroms auf der Ansaug- oder Abgasseite ist eine Anhebung der Abgastemperatur um bis zu 200 K möglich.

Neben den genannten Regenerationsmethoden sind auch eine Reihe von Kombinationen möglich. Insbesondere elektrische Beheizung in Verbindung mit Kraftstoffadditiven oder einer katalytischen Beschichtung reduzieren den notwendigen Energieaufwand.

Anforderungen bei der Regeneration

- Abgastemperatur nicht zu hoch, um Materialschäden zu vermeiden
- für BHKW sind vollautomatische Rußfiltersysteme notwendig, die im laufenden Betrieb keine Eingriffe erfordern
- bei additivunterstützter Regenerierung dürfen keine schädlichen Sekundäremissionen (z.B. Schwermetalle, Metalloxide) auftreten.

2.1.2.3 Reinigung und Wartung von Partikelfiltern

Partikelfilter halten neben dem brennbaren Ruß auch unbrennbare Aschebestandteile zurück. Diese setzen den Filter im Laufe des Betriebs allmählich zu. Deshalb ist es erforderlich den Filter von Zeit zu Zeit von diesen Rückständen zu reinigen. Dies erfordert eine einfache Austauschbarkeit des Filtermediums. Daneben muss sichergestellt werden, dass die im Filter angesammelten starken Umweltgifte, wie z.B. Schwermetalle nicht in die Umgebungsluft oder das Grundwasser gelangen. Manche Hersteller empfehlen ein Rückblasen mit Luft und bringen bereits entsprechende Anschlüsse an. Andere Hersteller empfehlen das Reinigen mit Wasser oder Dampf. Die Dauer des Reinigungsintervalls ist abhängig von der Kraftstoff- und Motorölqualität, von der Betriebsart, der Filtereigenschaften und Filterauslegung. Der Wartungsumfang kann so je nach Filtersystem und Randbedingungen sehr unterschiedlich sein. Die Entsorgung der Filter sollte mit dem Lieferanten/Hersteller vereinbart sein.

2.1.3 Anforderungen an Partikelfiltersysteme

Von Seiten der Luftreinhaltung, der Motorenhersteller und der Anwender werden bestimmte Anforderungen an Partikelfiltersysteme gestellt. Diese Anforderungen sind weitgehend auch über den gesamten Einsatzzeitraum des Partikelfiltersystems zu erfüllen.

Luftreinhaltung

Filtersysteme müssen neben der Partikelmasse insbesondere auch die Partikelanzahl reduzieren. Zusätzlich könnte auch eine Reduzierung der an den Partikeln angelagerten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) erfolgen. Keinesfalls darf jedoch der Einsatz eines Abgaspartikelfiltersystems die Emission zusätzlicher, sekundärer schädlicher Abgase bewirken. Beispielsweise können durch Kupferadditive (zur Einleitung der Regenerierung) Dioxin- und Furanemissionen deutlich erhöht werden. Ebenso ist von Partikelfiltersystemen zu fordern, dass sich während der Regenerierung, die meist im Gegensatz zum längeren Rußsammelzeitraum durch kurze Abbrandphasen gekennzeichnet ist, keine Emissionsspitzen aufgrund unvollständiger Verbrennung oder Filterdurchbrüchen ergeben.

Motoren/BHKW-Hersteller

Als wichtige Anforderung an Abgaspartikelfilter-Systeme seitens des Motors ist zu beachten, dass keine hohen Abgasgedrücke aufgebaut werden, da diese zu einem Kraftstoffmehrerbrauch, zur Erhöhung von Abgasemissionen und/oder zur Verkürzung der Motorlebensdauer führen. Niedrige Abgasdrücke werden durch große Oberflächen und hohe Porosität erreicht.

Darüber hinaus sind eine Reihe weiterer wichtiger Aspekte, wie beispielsweise Baugröße, Gewicht und Schalldämmung zu beachten.

Auch eine hohe thermische Stabilität und gute Alterungsbeständigkeit sind gefordert. Eine hohe Abscheideleistung eines Filtermediums bewirkt üblicherweise auch eine verstärkte Abscheidung von Aschebestandteilen, die nicht brennbar sind, sich im Laufe der Zeit im Filter sammeln und die Luftkanäle schließen. Bei Erreichen eines bestimmten Abgasgedrucks müssen die Filter entweder sorgfältig und umweltgerecht gereinigt bzw. ausgetauscht werden können. Die notwendige Säuberung bzw. die Erneuerung des Filters ist abhängig von Kraftstoff, Schmierstoff (Motoröl), Betriebsart, Filtereigenschaften und Filterauslegung.

Anwender

Für den Anwender sind in erster Linie Investitions- und Betriebskosten sowie die Betriebssicherheit des eingesetzten Abgaspartikelfiltersystems von entscheidender Bedeutung.

Zusätzlich muss bei der Materialauswahl darauf geachtet werden, dass diese keine toxikologischen Auswirkungen auf den Menschen haben.

Wünschenswert ist es, dass die drei Elementgruppen eines Partikelfiltersystems (Filtermedium, Regenerationseinrichtung, Steuerungs- und Überwachungseinheit) von einer dafür verantwortlichen Firma geliefert, gewartet und nach Beendigung der Nutzung fachgerecht entsorgt werden.

Um einen geringen Betriebsaufwand zu gewährleisten sind hochgradig automatisierte Systeme zu fordern. Systeme, die einen höheren Aufwand für Bedienung und Wartung erfordern, müssen dies durch niedrige Investitionskosten gerechtfertigen.

Für eine additivabhängige Regenerierung ist eine bedarfsgerechte automatische Dosierung der Regenerationsadditive aus einem Vorratstank mit Füllmengenkontrolle zu fordern.

Technische Anforderungen nach VERT –Pflichtenheft [19]

- Abscheidegrad > 95 % für Partikel im Größenbereich 20 – 300 nm (Feststoffpartikel)
- Homologationswert für die Opazität (Trübung) bei Freibeschleunigung < 0,12 m⁻¹
- Druckverlust bei Motornennleistung > 50 mbar (unbeladener Filter) und < 150 mbar (Regeneration), max. 200 mbar
- Additivdosierung automatisch mit Abschaltung bei Filterbruch (spezielles Pflichtenheft)
- Selbstkontrolle durch Gegendruckanzeige mit Warnschwellen, Datenspeicher der Kontrollparameter (Druck, Temperatur), Abschalten der Additivierung bei Filterschäden (spezielles Pflichtenheft für Additivierung)
- Geräuschdämpfung mindestens gleichwertig einer ggf. zu ersetzenden Schalldämpfung
- Gebrauchsdauer bis zur mechanischen Reinigung des Filtermaterials von nichtbrennbaren Rückständen: > 2 000 Bh
- Wartungsintervall: > 500 Bh
- Lebensdauer: > 5 000 Bh
- Gewährleistung auf Material und Funktion: > 2 Jahre oder 1 000 Bh

- Kennzeichnungspflicht der Haupt- und Nebenkompenten des Filtersystems (dauerhaft, unverwechselbar und gut sichtbar)
- Durchströmungsrichtung ist gut sichtbar zu kennzeichnen
- Diagnosezugriff für Rohemissionsmessungen ermöglichen, durch Bereitstellung eines Stutzen (spezielles Pflichtenheft)
- Einsatz von umweltschonenden und erprobten Verfahren zur Reinigung und Entsorgung von Ascherückständen im Filtersystem (Sonderabfall)
- keine Erhöhung limitierter Abgaskomponenten gegenüber Ausgangszustand
- keine relevante Erhöhung von Sekundäremissionen

2.1.4 Freigaben durch Motorenhersteller

Sofern keine ausdrücklich freigegebenen Rußfiltersysteme verwendet werden, wird im Garantiefall der Motorenhersteller in den meisten Fällen unabhängig von der Ursache des Schadens den Garantieanspruch ablehnen. Auch werden die Hersteller der Filtersysteme kaum Gewährleistung für Schäden am Motor übernehmen, da durch den Einsatz zuverlässiger Überwachungssysteme negative Einflüsse auf den Motor ausgeschlossen werden können. Hersteller von Additiven allerdings sollten Gewährleistungen übernehmen, da ein Einfluss auf den Motor nicht generell ausgeschlossen werden kann. Für den Endkunden ist es vorteilhaft, wenn die Nachrüstung des Partikelfiltersystems bereits vor der Auslieferung des Fahrzeugs/Aggregats durch den Hersteller/Lieferanten vorgenommen wird. Eine Freigabe bestimmter Partikelfiltersysteme durch den Motorenhersteller ist anzustreben [4].

2.1.5 Anbieter von Partikelfiltersystemen

Tabelle 1: Anbieter von nach VERT¹ geprüften Partikelfiltersystemen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit) [17][18][19]

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Lkw, Bus	Schiff, Bahn	Baumaschinen	Stationärmotor	nach VERT ¹ geprüfte Filtersysteme Filterbezeichnung
ArvinMeritor TM R. Feldwisch	Auf dem Stehen 14a D-30459 Hannover Phone: ++49/(0)511/215-9092 Telefax: ++49/(0)511/215-9093 Rupert.Feldwisch@ArvinMeritor.com	x		x		Filtermedium: Corning DuraTrap™RC Regeneration: Vollstrom-Dieselmotor

¹ VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau, ein Projekt zur Untersuchung technischer Möglichkeiten zur Minimierung der Dieselpartikel-Emissionen bei bestehenden Motoren, (1994 – 1999) Gemeinschaftsprojekt der Schweiz. Unfallversicherungsanstalt (Suva), Österreichischen Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Deutschen Tiefbauberufsgenossenschaft (TBG), Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Deutschen Umweltbundesamtes (UBA) sowie einer großen Begleitgruppe der Industrie.

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Lkw, Bus	Schiff, Bahn	Baumaschinen	Stationärmotor	nach VERT ¹ geprüfte Filtersysteme Filterbezeichnung
Comela F. Scarnato	Z.I. La Ponchonnière F-69210 Sain Bel RP Systems GmbH Giebeleichstraße 76 CH-8152 Glattbrugg Phone: ++41/(0)43/3212890 Telefax: ++41/(0)43/3212892 rpsystems@bluewin.ch	x		x		Filtermedium: SiC Ibaden Regeneration: Abgasventilsystem, katalytische Kraftstoff- verbrennung, Treibstoffadditiv EOLYS
DCL International Inc. A. Drazdzewski	P.O. Box 90 Concord, Ontario Canada L4K 1B2 Phone: ++001/(0)905/660-6450 Telefax: ++001/(0)905/660-6435 info@dcl-inc.com adrazdzewski@dcl-inc.com			x	x	Filtermedium: Ibaden SiC Regeneration: Wechselfilter, Treibstoff- Additive Satacen (Fe), EOLYS (Ce) und elekt- risch im Einbau/Stillstand
Deutz AG	Deutz-Mühlheimerstr. 147-149 D-51057 Köln Phone: ++49/(0)221/8223667 Telefax: ++49/(0)221/8223663 info@deutz.de	x	x	x	x	Filtermedium: Corning DuraTrap™CO Regeneration: katalytisch= Engelhard DPX1
Dinex A/S L.C. Larsen	Fynsveg 39 DK-5500 Middelfart Phone: ++46/(0)634/12527 Telefax: ++46/(0)634/12566 LCL@DINEX.dk	x		x		Filtermedium: Corning DuraTrap™CO Regeneration: Vollstrom-Dieselmotor Wechselfilter
ECS Europe AB (Unikat) N+K Abgasreinigungs- technik W. Nowak	Box 9015 S-20039 Malmö, Schweden Phone: ++46/(0)40/6701551 gobl@lubrizol.com Gewerbstraße 1 CH-8502 Frauenfeld Phone: ++41/(0)52/7210112 Telefax: ++41/(0)52/7210113 n.k.unikat.pf@bluewin.ch	x	x	x	x	Filtersysteme: V, K18, Purifilter Filtermedien: Corning DuraTrap™CO, Ibaden SiC Regeneration: Wechselfilter, elektrisch im Einbau/Stillstand und Catalytic coating
EHC Teknik AB	Ögärdesvägen 8 S-43330 Partille, Schweden Phone: ++46/(0)31/449020 Telefax: ++46/(0)31/444980 office@ehcteknik.se	x	x	x		Filtermedium: Glasfaserwolle Regeneration: Entsorgung als brennbarer Gewerbeabfall in KVA
Endeavour Sales Ltd. A. Colamussi	Via Argine Volano 341° I-44030 Fossalta / Ferrara Phone: ++39/(0)532/879603 Telefax: ++39/(0)532/866381 arturo.colamussi@tin.it	x				Filtermedium: Papierfilter-Patrone nach Kühler, Regeneration: Entsorgung

Firma / Ansprechpartner	Adresse	Lkw, Bus	Schiff, Bahn	Baumaschinen	Stationärmotor	nach VERT ¹ geprüfte Filtersysteme Filterbezeichnung
Engelhard Sales Ltd Stephen F.Nash Baumot J. Kavena	Valley Road Cinderford U.K.-Gloucestershire GL 14 2 PB Phone: ++44/(0)1594/820-313 Telefax: ++41/(0)1594/826-013 www.engelhard.com Stephen_Nash@engelhard.com Allmendstrasse 7 CH-8320 Fehraltorf Phone: ++41/(0)1954-3434 Telefax: ++41/(0)1954-3436 j.kavena@baumot.ch	x	x	x	x	Filtertypen: DPX1 und DPX2 Filtermedien: Corning DuraTrap TM CO (z.T. mit Flow Through Vorabscheider) Regeneration: katalytische Beschichtung, elektrisch im Ein- bau/Stillstand
HJS Fahrzeugtechnik	Dieselweg 12 D-58706 Menden Phone: ++49/(0)2373/987-0 Telefax: ++49/(0)2373/987-199 entwicklung@hjs.com	x		x		<u>SMF</u> [®] : Filtermedium: Sintermetallfilter (SHW) Regeneration: Treibstoff- Additive Satacen (Fe) oder EOLYS (Ce) <u>CRT</u> [®] : Filtermedium: Corning DuraTrap TM CO Regeneration: NO ₂ aus Oxidations- katalysator
HUG Engineering AG HUG Engineering GmbH P. Christlieb	Im Geren 14 CH-8352 Rätterschen Phone: ++41/(0)52/368-2020 Telefax: ++41/(0)52/368-2010 christoph.hug@hug-eng.ch Alt Fermersleben 36 D-39122 Magdeburg Phone: ++49/(0)391/555-440 Telefax: ++49/(0)391/555-4444 hug-magdeburg@t-online.de		x		x	Filtermedium: Faserflechtfilter System Regeneration: Dieselmotor im Motor- leerlauf
HUSS Umwelttechnik GmbH	Nordostpark 74-76 D-90411 Nürnberg Phone: ++49/(0)911/6565-715 Telefax: ++49/(0)911/6565-711 h.rembor@huss-umwelt.com	x	x	x	x	Filtertypen: FxxS, FS Filtermedium: Ibdien SiC Regeneration: elektrisch, Wechselfilter Dieselmotor im Stillstand
Inteco SA L. Lämmle	Chemin Des Plantées 24 CH-1131 Tolochenaz Phone: ++41/(0)21/8011150 Telefax: ++41/(0)21/8014573 intecosa@bluewin.ch	x		x		Filtermedium: Metallfaservlies BEKI- POR [®] ST Regeneration: Treibstoff-Additiv Satacen
Johnson Matthey GmbH	Otto-Volger-Str. 9b D-65843 Sulzbach Phone: ++49/(0)6196/703832 Telefax: ++49/(0)6196/72450 werthp@matthey.com	x	x	x	x	Filtermedien: Corning DuraTrap TM CO und Ibdien SiC Regeneration: elektrisch, Treibstoff- Additive Satacen (Fe) und EOLYS (Ce), NO ₂ aus Oxidationskatalysator

Tabelle 2: Weitere (neben der in Tabelle 1 genannten) Anbieter von Komponenten von Partikelfiltersystemen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit)

BFT Bekaert Faser Vertriebs GmbH Dr. D. Hellert	Am Erbsengarten 16, D-65510 Idstein Phone: ++49/(0)6082/910614 Telefax: ++49/(0)6082/1416 hellert_dieter@bft.bekaert.com
Buck Maschinenbau GmbH A. Buck	Benzstraße 1, D-71149 Bondorf Phone: ++49/(0)7457/945711 Telefax: ++49/(0)7457/945727 buck.tsp@t-online.de
CDT Clean Diesel Technologies Inc. J. Valentine	300 Atlantic Street, Stamford, CT, 06901 USA Phone: ++1/(0)203/3277050 Telefax: ++1/(0)203/3230461
CORNING GmbH U. Zink	Abraham-Lincoln-Straße 30, D-65189 Wiesbaden Phone: ++49/(0)611/7366101 Telefax: ++49/(0)611/7366112 zinku@corning.com
ENWA GmbH B. Wälti	Stampfenbachstraße 57, CH-8006 Zürich Phone: ++41/(0)1/350-5340 Telefax: ++41/(0)1/350-5341 info@enwa.ch
GREENTOP GmbH W. Bernard	Siemensstraße 21-23, D-61267 Neu-Anspach Phone: ++49/(0)6081/4437-0 Telefax: ++49/(0)6081/4437-50 service@greenop.de
LogLink Elektronik GmbH P. Nöthiger	Fischbacherstr. 7, CH-5620 Bremgarten Phone: ++41/(0)56/6313139 Telefax: ++41/(0)56/6313143 loglink@pop.agri.ch
Oberland Mangold GmbH B. Kahlert	Amselstraße 4, D-82467 Garmisch-Partenkirchen Phone: ++49/(0)7171/401-0 Telefax: ++49/(0)7171/401-107 kahlert@oberland-mangold.de
OCTEL Deutschland GmbH W. Kalischewski	Thiesstraße 61, D-44649 Herne Phone: ++49/(0)2325/980281 Telefax: ++49/(0)2325/980289 Kalischewski@octel.de
Rhodia Terres Rares W. Naschke	Chattenpfad 8, D-85232 Taunusstein Phone: ++49/(0)6128/71432 Telefax: ++49/(0)6128/973933 w.naschke@t-online.de
TSH Tuning S. Kany	Gewerbestr. 7, D-79801 Hohentengen Phone: ++49/(0)7742/5888 Telefax: ++49/(0)7742/5403 tsh-skany@t-online.de
Twin-TEC E. Schnürer	Eduard-Rhein-Straße 21-23, 53639 Königswinter Phone: ++49/(0)2244/918040 Telefax ++49(0)2244/918370

2.1.6 Beispiele von Partikelfiltersystemen im Praxiseinsatz

Rußfilter BHKW Reichstag Berlin [13]

Fa. Siemens AG Power Generation Ceramics, Redwitz

Katalytisch beschichteter Keramikgestrick-Tiefenfilter der Firma Buck GmbH, Bondorf. Jedes Modul ist mit 20 Rußfilterelementen mit je 9 Filterkerzen ausgestattet. Die Rußfilter sind unmittelbar nach dem Motor angebracht, um durch die dort herrschenden hohen Abgastemperaturen ein möglichst vollständiges Abbrennen des Rußes zu ermöglichen. Zur Regeneration sind Abgastemperaturen von mindestens ca. 430 °C notwendig. Erfolgt ein längerer Teillastbetrieb eines Aggregats (von mehr als 12 Stunden), währenddessen die Abgastemperaturen deutlich unter den notwendigen 430 °C liegt, wird automatisch auf Volllast umgestellt, um den Rußabbrand einzuleiten.

Pkw-Rußfilter bei Peugeot 607 HDI

Im Mai 2000 wurde von PSA Peugeot Citroen der erste serienmäßig mit einem Partikelfilter ausgestattete Diesel-Pkw eingeführt. Das Partikelfiltersystem ist eine Kombination aus Oxidationskatalysator und nachgeschaltetem Siliziumcarbidfilter mit thermisch/katalytischer Regeneration (Cer). Das Cer-Additiv senkt die Regenerationstemperatur auf unter 400 °C ab. Die Filterstandzeit wird vom Hersteller mit 80 000 bis 100 000 km angegeben [2][22]. Ebenso lange reicht der Vorrat des mitgeführten Additivs (5 l in extra Tank). Wird bei erforderlicher Filterregeneration die notwendige Abgastemperatur für den Rußabbrand nicht erreicht, wird - ausgelöst durch eine Meldung der Elektronik - durch das Common-Rail-Einspritzsystem Kraftstoff während der Expansionsphase in den Brennraum dosiert, wodurch die Abgastemperatur um bis zu 100 K ansteigt. Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe werden in dem dem Rußfilter vorgeschalteten Oxidationskatalysator oxidiert, wodurch die Abgastemperatur um weitere ca. 100 K angehoben wird. Dieser Vorgang läuft automatisch, ohne Zutun des Fahrers ab, um einen hohen Bedienkomfort, niedrigen Wartungsaufwand und exakte Zudosierung des Additivs zu gewährleisten.

Der Beladungszustand des Filters wird kontinuierlich durch Messung des Abgasgedrucks überwacht.

In diversen Langzeittests wurde die Dauerhaltbarkeit dieses Partikelfiltersystems bestätigt. Die Partikelemission liegt mit ca. 0,001 g/km deutlich unter dem ab 2005 in Europa geltenden Grenzwert von 0,025 g/km [22].

2.1.7 Untersuchungen zu Abgaspartikelfiltersystemen

Die meisten aller bisherigen Untersuchungen beziehen sich auf Partikelfilter, die in Nutzfahrzeugen und Personenkraftwagen Anwendung finden. Anhand der bisherigen Erfahrungen kann keine allgemeingültige Aussage hinsichtlich der Betriebssicherheit von Partikelfiltersystemen gemacht werden. Dennoch sind zumindest in Einzelfällen sehr gute Langzeiterfahrungen dokumentiert.

VERT¹-Feldversuch

Vorschriften, wie die TRGS 554, die TA-Luft, das Filterobligatorium der Suva in der Schweiz sowie der österreichischen Gesetzgebung im Arbeitsschutzbereich erfordern die Untersuchung der Verfügbarkeit und Eignung von Rußminderungsmaßnahmen.

Ziel des VERT¹-Projektes (1994-1999) war es, den neuesten „technischen Stand“ der Rußfiltertechnologie (für Straßenfahrzeuge) zu definieren und Rußfilter zu erproben. Die Ergebnisse waren, dass Partikelfilter derzeit als die einzige effiziente Lösung zur nachhaltigen Minderung der Dieselpartikelemissionen insbesondere im Größenbereich erhöhter Lungengängigkeit (<1 µm) angesehen werden müssen. Systeme zur effizienten Partikelfiltration mit Abscheidegraden um 99 % sind verfügbar, technisch und betrieblich möglich, wirtschaftlich tragbar und im praktischen Einsatz überprüfbar [18]. Im Rahmen des VERT¹-Projekts wurde ein Pflichtenheft und ein Eignungstest erarbeitet, der in der Schweiz von verschiedenen Institutionen als einheitliche Grundlage für die Bewertung von Dieselpartikelfiltern anerkannt ist. Die meisten untersuchten Partikelfilter erfüllen die minimalen Anforderungen des Pflichtenheftes. Dennoch sind Optimierungsmaßnahmen erforderlich, um die Kriterien auch über einen längeren Betriebszeitraum einhalten zu können. Es wird gefordert die Systeme nach einem typischen Feldeinsatz von 2000 Stunden noch mal zu überprüfen.

UBA-Rußfilter-Großversuch [8]

Zwischen 1989 und 1994 wurde der Rußfilter-Großversuch des Umweltbundesamtes durchgeführt, wo 1136 Fahrzeuge (83 % Busse, 17 % LKW) mit Rußfiltern ausgestattet wurden und das Abgasverhalten sowie Betriebserfahrungen ermittelt wurden. Die Partikelrückhalterate betrug über 8266 Prüfungen gemittelt 84,3 %. Die Schwärzungszahl nach Bosch verdoppelte sich bei den Keramikwickelfiltern über den Betriebszeitraum. Allerdings konnte bei anderen Filter-Fahrzeugkombinationen über 200.000 km keine merkliche Verschlechterung anhand der Rußzahl festgestellt werden. Als Schwachstellen traten überwiegend Überhitzungen von Bauteilen wie Klappen, Düsen, Zündelektroden, Regelsysteme etc. auf.

¹ VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau, ein Projekt zur Untersuchung technischer Möglichkeiten zur Minimierung der Dieselpartikel-Emissionen bei bestehenden Motoren, (1994 – 1999) Gemeinschaftsprojekt der Schweiz, Unfallversicherungsanstalt (Suva), Österreichischen Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Deutschen Tiefbauberufsgenossenschaft (TBG), Schweiz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Deutschen Umweltbundesamtes (UBA) sowie einer großen Begleitgruppe der Industrie.

Katalytische Rußfilter für Dieselaggregate und Rapsölmotoren [10]

CLAUßEN untersucht 1997 katalytische Rußfilter für Dieselaggregate und Rapsölmotoren. Die durchgeführten Emissionsmessungen an einem Elsbettmotor ließen den Schluss zu, dass Rapsölrußpartikel gegenüber Dieseldieselrußpartikel einen wesentlich höheren Anteil an flüchtigen und löslichen Bestandteilen aufweisen. Zusätzlich wurden reaktionstechnische Untersuchungen in einer Labor-Kreislaufapparatur an verschiedenen katalytisch beschichteten und unbeschichteten Rußfiltermaterialien durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Rußfiltermaterial und Abscheideverhalten das Abbrandverhalten des Rußes stärker beeinflussen als dies zusätzliche katalytische Beschichtungen der Filteroberfläche vermögen. Das beste in diesem Forschungsvorhaben getestete Rußfiltermaterial senkte die Aktivierungsenergie der Oxidation sowohl von Diesel- als auch von Rapsölruß um etwas mehr als die Hälfte und erhöhte die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante um etwa den Faktor 16.

Betriebsverhalten von Partikelfiltern bei Verwendung von Biodiesel im Verbrennungsmotor [6]

BRAUNGARTEN und TSCHÖKE untersuchten die Eignung eines diskontinuierlich arbeitenden, kraftstoffadditivunterstützten Systems mit SiC-Partikelfilter beim Einsatz von Biodiesel (RME) und wechselweisem Dieseldieselkraftstoff- und Biodiesel-Betrieb. Schwerpunkt der Prüfstandsuntersuchungen war das Beladungs- und Regenerationsverhalten des Systems an einem modernen PKW mit elektronisch geregelter Pumpe-Düse-Einspritzung.

Es stellte sich heraus, dass das diskontinuierlich arbeitende, kraftstoffadditivunterstützte Abgasnachbehandlungssystem grundsätzlich für beide Einsatzbereiche geeignet ist. Jedoch traten bei der Beladung des Partikelfilters bei Biodiesel- gegenüber Dieseldieselkraftstoff-Betrieb erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Druckdifferenz des Partikelfilters in Abhängigkeit von der Beladezeit und der auf dem Filter gesammelten Rußmasse auf. Die Beladung des Systems mit Unterbrechungen weist bei Biodiesel- im Vergleich zum Dieseldieselkraftstoffbetrieb eine stärkere Abweichung der nach dem Neustart gemessenen Druckdifferenz gegenüber gleicher unterbrechungsfreier Beladezeit auf. Die Druckdifferenz ist bei Biodiesel-Betrieb kein Maß für die auf dem Partikelfilter angesammelte Rußmasse. So sammelt sich in der gleichen unterbrechungsfreien Beladedauer mit Biodiesel weniger Ruß an als mit Dieseldieselkraftstoff. Die Druckdifferenz des Partikelfilters ist mit Biodiesel geringer und bei gleicher Rußmasse nach unterbrechungsfreier Behandlung bei Biodiesel höher. Bei gleicher Schwärzungszahl während der Beladung würde bei Biodiesel weniger Ruß im Partikelfilter anfallen.

Die Regeneration des Partikelfilters ist bei Biodiesel tendenziell wirksamer. Die erzielte Druckdifferenz nach der Regeneration und die Gewichtserhöhung des Filters durch Asche sind geringer. Bei Vollast ist die Regeneration bei Biodiesel und bei Dieseldieselkraftstoff gegenüber den jeweiligen Regenerationsversuchen bei Teillast wirksamer.

2.2 Entstickungskatalysatoren

2.2.1 Stickstoffoxide (NO_x)

Stickstoffoxide entstehen bei Luftüberschuss durch Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen Temperaturen. Im Motor wird fast ausschließlich Stickstoffmonoxid (NO) erzeugt, das später in der Atmosphäre zu Stickstoffdioxid (NO₂) oxidiert wird. NO₂ ist ein ausgeprägtes Atem- und Reizgift und spielt zusätzlich eine wesentliche Rolle bei Versauerungsvorgängen und als Vorläufersubstanz für bodennahe Ozon.

Prinzipiell wird zwischen drei Arten von Stickstoffoxiden unterschieden.

- Brennstoff-NO
- Promptes-NO
- Thermisches-NO

Brennstoff-NO

Während des Verbrennungsprozesses bilden sich aus dem im Kraftstoff gebundenen Stickstoff einfache Amine und Cyanide. Diese sekundären Stickstoffverbindungen reagieren mit Sauerstoff weiter zu NO. Der im Rohöl vorhandene Stickstoff bleibt, wie auch der Schwefel bei der Destillation zum Großteil (~90 %) im Schweröl zurück. Außerdem werden bei den Stickstoffgehalten üblicher Dieselmotoren nur ungefähr 70 bis 80 % in NO umgewandelt. Somit kann der Beitrag der Brennstoff-NO zur gesamten Stickoxidemission heutiger Dieselmotoren vernachlässigt werden [24]. Rapsöl enthält nur sehr geringe N-Konzentrationen von wenigen ppm. Die Brennstoff-NO-Bildung spielt daher kaum eine Rolle bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff.

Promptes-NO

In der heißen Reaktionszone des Motors bildet sich durch Radikalüberschuss Promptes-NO. Entscheidend für die Bildungsrate von Promptem-NO ist die Bereitstellung von atomarem Stickstoff. Da jedoch die Reaktionszone sehr dünn ist ($d \sim 0,1$ mm), bleibt der Betrag von Promptem-NO zur Gesamtstickstoffoxidemission gering. Zusätzlich ist die Bildung von Promptem-NO weniger temperaturabhängig als die von Thermischem-NO und nimmt daher mit sinkenden Spitzentemperaturen an Bedeutung zu [5].

Thermisches-NO

Aus den Elementen N und O entsteht in einer stark endothermen Reaktion das Thermische-NO (Temperaturen > 1300 °C). Diese Reaktion läuft bei entsprechender Energiezufuhr (90,37 kJ/mol) auch in Luft ab und ist nicht an die Verbrennung eines Kraftstoffes gebunden. Dominierende Einflussfaktoren bei der Bildung von Thermischen-NO sind folgende drei Punkte:

- Temperatur
- Sauerstoffkonzentration am Ort der Verbrennung
- Verweilzeit am Ort der Verbrennung [24]

Üblicherweise sind Maßnahmen zur innermotorischen Senkung der Stickstoffoxidemission mit einem Anstieg des Kraftstoffverbrauches gekoppelt. Dies ist nicht nur ein negativer wirtschaftlicher Aspekt für den Fahrzeughalter, sondern führt gleichzeitig zu einem vermehrten Ausstoß des Treibhausgases Kohlenmonoxid (CO_2). Es gilt folglich eine Lösung zu finden, die den Ausstoß von Stickstoffoxiden einerseits senkt und andererseits nicht zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauches führt.

Neben den innermotorischen Möglichkeiten gibt es Verfahren, die die Stickstoffoxidkonzentration durch Nachbehandlung des Abgases verringern. Es sind hierzu Reduktionsmittel erforderlich, die nur mit dem Stickstoffoxid, gewissermaßen selektiv, reagieren. Als Reduktionsmittel fungieren beispielsweise Kohlenwasserstoffe (C_mH_n), Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2), die im Abgas vorhanden sind oder aber auch Ammoniak (NH_3). Bei Luftüberschuss kommt es zu einem vorzeitigen Verbrauch dieser Reduktionsmittel, da die Oxidationsreaktionen schneller ablaufen als die Reduktionsmechanismen. Prozessbedingt kommen bei Dieselmotoren nur selektive Verfahren in Frage, wie beispielsweise die selektive katalytische Reduktion (SCR) und die Adsorberkatalysatoren [24].

2.2.2 SCR-Katalysator

Die Wirksamkeit des SCR-Verfahrens (Selective Catalytic Reduction) beruht darauf, dass die im Abgas enthaltenen Stickstoffoxide durch Zugabe eines Reduktionsmittels in Gegenwart von Sauerstoff an geeigneten Katalysatoren, unter Bildung von Stickstoff und Wasser, umgesetzt werden. Reduktionsmittel, wie beispielsweise Ammoniak (NH_3), Ammoniak in wässriger Lösung oder Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) in wässriger Lösung werden eingesetzt. Laut Angaben des WKK-Verbandes (Wärme-Kraft-Koppelung) wird bei der Eindüsung einer 40-%igen wässrigen Harnstofflösung in den Abgasstrom eine NO_x -Reduktion von bis zu 99 % erreicht [25]. Andere Reduktionsmittel wie Methan (CH_4), Kohlenmonoxid (CO) oder Wasserstoff (H_2) reagieren bei den heute vorwiegend eingesetzten Katalysatoren entweder zu träge mit Stickstoffoxiden (NO_x) oder zu stark mit Sauerstoff (O_2), also nicht selektiv. Es gibt allerdings auch Ansätze mit stickstofffreien Reduktionsmitteln auf Kohlenwasserstoff (HC)-Basis.

2.2.2.1 SCR-Verfahren bei stationären Motoren

Das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion unter Verwendung vanadiumoxidhaltiger Katalysatoren hat sich vor allem als erfolgreiche Methode zur Stickstoffoxidminderung von Abgasen aus Kraftwerken und Stationärmotoren erwiesen. Dabei werden vorwiegend SCR-Katalysatoren auf Basis von Titanoxid eingesetzt, denen Oxide des Vanadiums, Wolframs oder Molybdäns zugesetzt werden. Eine Übertragung auf mobile Fahrzeuge ist aufgrund der hohen technischen Anforderungen nicht ohne weiteres möglich (vgl. 2.1.2.2). Zum einen müssen möglichst hohe NO_x -Umsätze in einem großen Temperaturbereich (250–500 °C) erreicht werden, zum anderen soll der Vanadiumoxid-Gehalt möglichst gering sein, um die thermische Stabilität der Katalysatoren zu optimieren. Dabei ist insbesondere die unzureichende Stickstoff-Selektivität bei hohen Temperaturen (> 350 °C) problematisch. Neben der Emission von giftigem Lachgas (N_2O) ist oftmals eine Oxidation des Reduktionsmittels zu beobachten, die mit einer Verminderung des NO_x -Umsatzes einhergeht [9].

2.2.2.2 SCR-Verfahren bei mobilen Motoren

Das SCR-System in Zusammenhang mit mobilen Motoren, wie beispielsweise bei Nutzfahrzeugen (LKW, Busse) besteht aus einem zusätzlichen Tank, einer elektrischen Dosiereinheit für das Reduktionsmittel sowie einem Keramik-Katalysator, der im Schalldämpfer untergebracht ist. Um die NO_x -Emissionen möglichst stark zu senken, ist es entscheidend, dass das Reduktionsmittel (beispielsweise Harnstofflösung) in allen Betriebszuständen exakt zu dosieren ist. Das Einblasen des Reduktionsmittels in den Katalysator muss in Abhängigkeit der momentanen NO_x -Emission des Motors erfolgen. Nur somit kann der Wirkungsgrad der Abgasnachbehandlung ideal ausgenutzt werden. Dementsprechend benötigt das Verfahren eine elektronische Überwachung und Regelung zur Erfassung des Motorbetriebszustandes und zur richtigen Dosierung der zuzuführenden Reduktionsmittelmenge [7]. Daimler-Chrysler gibt beispielsweise diese Menge mit im Durchschnitt 6 % des Dieselmotorkraftstoffes an [11]. Eine wichtige Voraussetzung für einen Serieneinsatz der SCR-Technologie mit dem Reduktionsmittel Harnstofflösung ist die flächendeckende Versorgung dieser Lösung. Problematisch ist der Wintereinsatz von Harnstoff-Wasserlösungen, da sie bereits bei –11 °C gefrieren. Als Alternative wird Ammoniumcarbamat genannt. Das feste Ammoniumcarbamat hat zwar einen um den Faktor 1,8 höheren Gehalt an Ammoniak, so dass das Volumen des Reduktionsmitteltanks entsprechend kleiner ausfällt, jedoch ist das Befüllen des Tanks mit einem vergleichsweise hohen Aufwand verbunden. Weitere Versuche mit Öl als Trägermedium werden durchgeführt [15].

Wird als Reduktionsmittel Ammoniak (NH_3) eingesetzt, muss ein Oxidationskatalysator nachgeschaltet werden, der den überschüssigen Ammoniak zu Stickstoff oxidiert. Kritisch zu sehen ist die Toxizität von Ammoniak, mögliche Leckagen an Tank und Leitung sind als äußerst bedenklich einzustufen. Als Alternative zu Ammoniak ist die Verwendung von Ammoniak-abgespaltenen Agenzien, wie etwa Harnstoff oder Ammoniumsalzen vorgesehen [9].

2.2.2.3 Aufbau eines SCR-Katalysatorsystems

Ein SCR-Katalysatorsystem besteht in der Regel aus mehreren hintereinander angeordneten Keramikträgern, die, in einem Metallgehäuse eingebettet und in die Abgasleitung des Fahrzeuges eingebaut sind.

Abbildung 2 stellt das Schema eines SCR-Katalysatorsystems für den mobilen Einsatz dar. Das Reduktionsmittel Ammoniak (NH_3) wird aus einer wässrigen Harnstofflösung gewonnen, die mittels einer Druckzerstäuberdüse gleichmäßig auf dem Hydrolysekatalysator verteilt wird. Die Dosierung der Harnstofflösung wird mittels eines Magnetventils, in Abhängigkeit von Last und Drehzahl der Verbrennungsmaschine, geregelt. Als Vorratsbehälter dient ein Druckbehälter, der an das gleiche Druckluftnetz wie die Zerstäuberdüse angeschlossen ist. Der optional vorgeschaltete Oxidationskatalysator dient zur Erhöhung der SCR-Aktivität bei tiefen Abgastemperaturen. Durch eine Anhebung des Stickstoffdioxidanteils im Abgas, mittels teilweiser Oxidation von Stickstoffoxid kann die Reaktionsgeschwindigkeit der SCR-Reaktion im Temperaturbereich unterhalb von ca. 300 °C deutlich gesteigert werden. Mit Hilfe des Hydrolysekatalysators gelingt die vollständige Zersetzung einer wässrigen Harnstofflösung bereits bei Temperaturen von 200 °C. Unterhalb dieser Temperatur erweist sich die Zersetzung als problematisch, da aufgrund einer unvollständigen Zersetzung unerwünschte Nebenprodukte, wie z.B. Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) entstehen. Der nachgeschaltete Oxidationskatalysator übernimmt im SCR-Katalysatorsystem die Funktion eines Ammoniak-Sperrkatalysators. Dieser verhindert, dass es bei Auftreten eines Ammoniakschlupfes (Austritt von unverbrauchtem Ammoniak bei Überdosierung) zu einer Abgabe von Ammoniak (NH_3) in die Umwelt kommt. Laborversuche haben gezeigt, dass die Oxidation des Ammoniaks bereits bei Temperaturen unterhalb von 300 °C stattfindet [9].

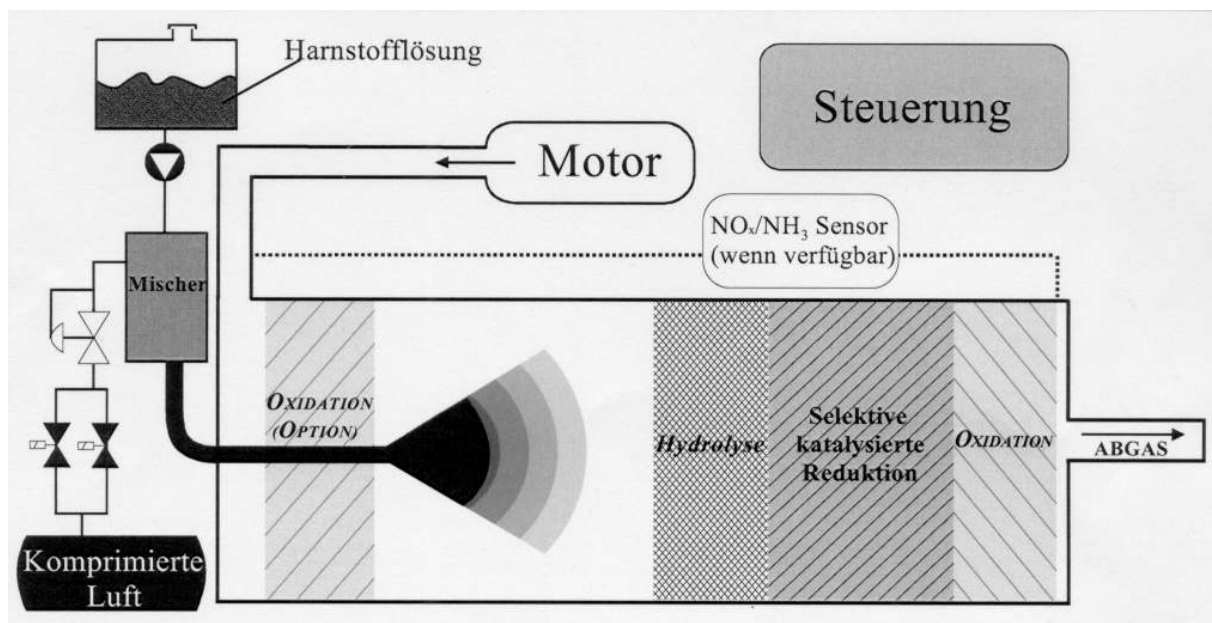
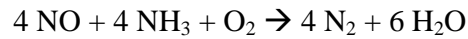


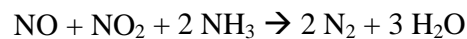
Abbildung 2: Schema eines SCR-Katalysatorsystems [9]

2.2.2.4 Ablauf der Reaktion

Die Reaktionsgleichungen, die bei der Umwandlung von Stickstoffoxid im SCR-Katalysatorsystem ablaufen, werden im Folgenden beschrieben. Der überwiegende Anteil der Stickstoffoxide, der in aller Regel als NO vorliegt, wird unter Zugabe des Reduktionsmittels Ammoniak wie folgt umgesetzt:



Ist ein Gemisch von NO und NO₂ vorhanden, läuft parallel hierzu die folgende, etwas schnellere, Reaktion ab:



Grundsätzlich können diese Reaktionen auch ohne Katalysator bei Temperaturen um ca. 900 °C stattfinden. Dabei wird jedoch ein wesentlicher Anteil des Ammoniaks zu Stickstoffoxiden verbrannt, was die Effizienz hinsichtlich des Ammoniakverbrauchs und des erreichbaren NO_x-Umsatzes stark beeinträchtigt. Das SCR-Verfahren ermöglicht die Minderung der Stickstoffoxide gemäß den oben dargestellten Reaktionsgleichungen je nach Rauchgasbedingungen und Katalysatortyp [24]. Die optimale Arbeitstemperatur dieser Katalysatoren liegt jedoch zwischen 250 °C und 450 °C, dabei werden Umsetzraten von 80 bis über 90 % erreicht [22]. Bei höheren Temperaturen erfolgt eine unerwünschte Verbrennung von NH₃ zu NO. Das SCR-Verfahren ist darüber hinaus bezüglich des Brennstoffeinsatzes und des Lastzustandes der vorgeschalteten Verbrennung extrem flexibel. Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des Reaktionsablaufes im SCR-Katalysatorsystem [16].

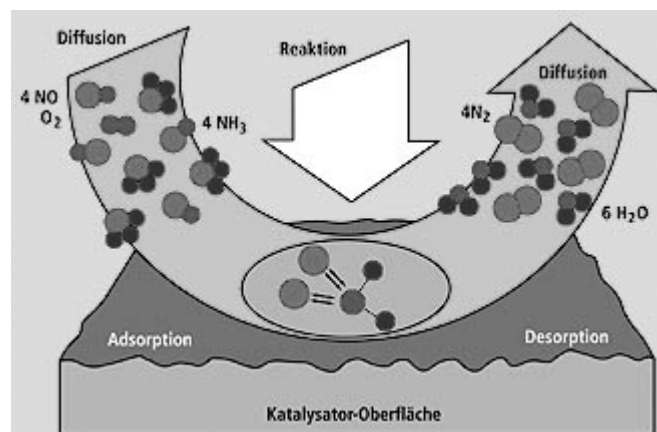
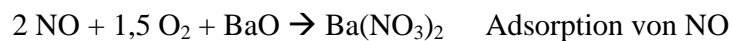


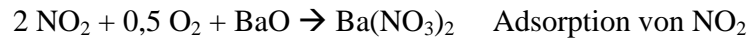
Abbildung 3: Ablauf der katalytischen Reaktion [16]

2.2.3 Adsorberkatalysatoren

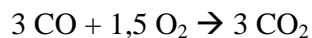
Adsorber sind Materialien, die Stickstoffoxide (NO_x) bei Luftüberschuss speichern, indem diese Moleküle an der Oberfläche adsorbiert werden. Bei unterstöchiometrischen Luftverhältnissen werden Stickstoffoxide desorbiert und reduziert. Die sauren Stickoxide haften an den basischen Oxiden des Adsorbers, z.B. Bariumoxid (BaO). Im Abgas kommen Stickstoffoxide in Form von NO und NO_2 vor. Wobei NO_2 leicht adsorbiert wird. NO dagegen wird zum einen Teil adsorbiert und zum anderen oxidiert. Die Funktionsweise von Adsorber- oder Speicherkatalysatoren funktioniert wie folgt:



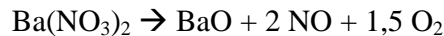
Adsorption von NO_2 :



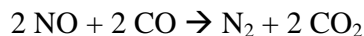
Die Adsorption von NO und NO_2 ist jeweils eine „magere“ Adsorptionsreaktionen. Die Speicherkapazität des Adsorbers ist nach einer bestimmten Aufnahme von NO bzw. NO_2 erschöpft, folglich ist ein Desorptionsprozess notwendig. Dieser Prozess benötigt Wärmezufuhr zum Lösen der Bindung, der beispielsweise aus der Verbrennung von CO oder HC gewonnen werden kann.



Diese exotherme Reaktion ermöglicht die Rückreaktion der Oxidation von NO :



Hierbei handelt es sich um eine „fette“ Desorption. Wenn diese Reaktion bei Luftmangel an der Oberfläche eines Edelmetallkatalysators (z.B. Platin) stattfindet, kann CO (oder HC aus Dieseldieselkraftstoff) als Reduktionsmittel fungieren.



Diese „fette“ Desorption läuft auch unter mageren Bedingungen ab. Jedoch müsste hierzu das NO_x zu N_2 reduziert werden, wozu Luftmangelbedingungen notwendig sind. Bei Sauerstoffüberschuss würde ein Großteil des Reduktionsmittels vorzeitig durch die schnellen Oxidationsreaktionen verbraucht. Dies erhöht den Reduktionsmittelverbrauch. Das Speichervermögen des Adsorbers ist temperaturabhängig und nimmt mit zunehmender Temperatur ab, da Bariumnitrat ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) thermisch instabil wird.

Abbildung 4 zeigt das Schema eines NO_x -Adsorbers mit allen relevanten chemischen Reaktionen zwischen Gas und Oberfläche (Desorption und Adsorption), auf der Oberfläche (Oxidation und Reduktion) und auch die diffusiven Prozesse wie Speicherung von NO_x und O_2 mit ihren jeweiligen temperaturabhängigen Reaktionsraten.

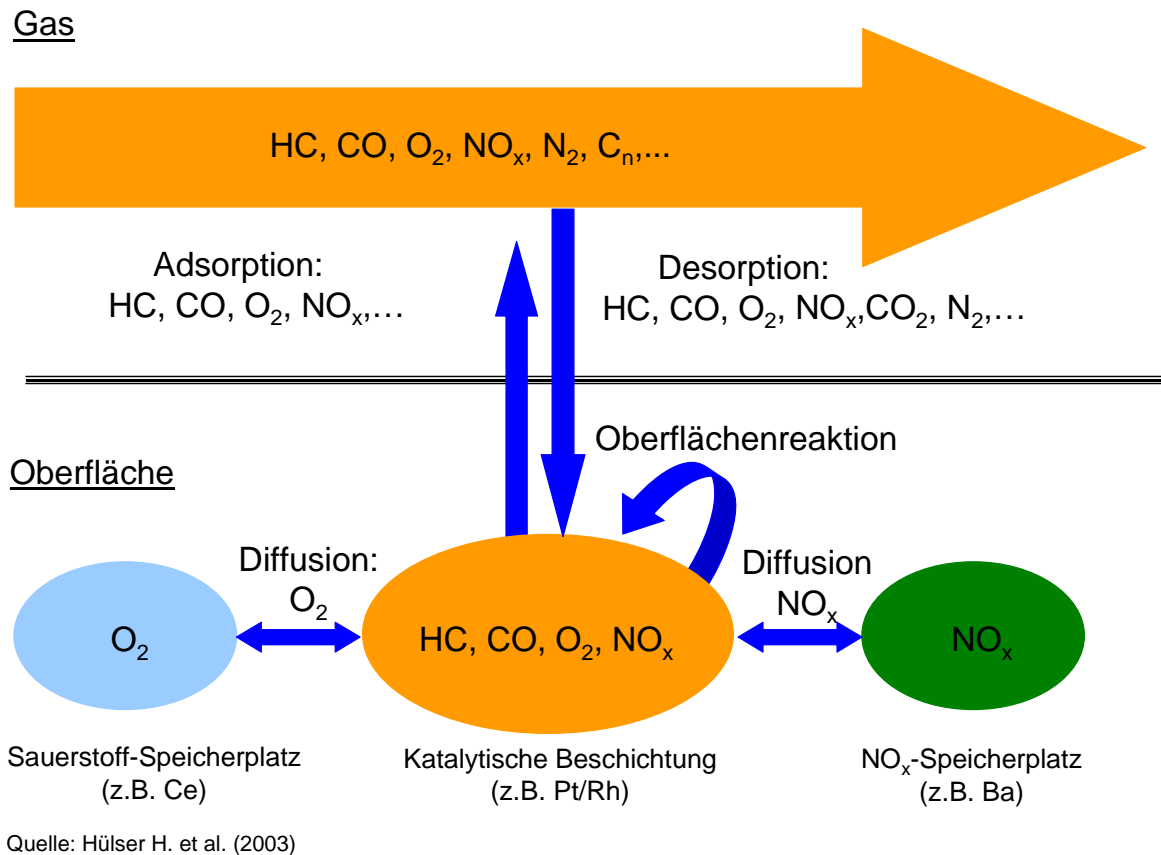


Abbildung 4: Relevante Reaktionsmechanismen eines NO_x -Adsorbers [14]

2.2.4 Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit von Katalysatoren

Die Wirksamkeit eines Katalysators kann durch Alterung, durch Verschmutzung oder durch Vergiftung beeinträchtigt werden. Der Grad der Deaktivierung von Katalysatoren ist abhängig vom Gehalt der Katalysatorgifte im Brennstoff und Motoröl aber auch von der Abgaszusammensetzung, der Abgastemperatur und der Verweilzeit des Abgases im Katalysator [3].

Die **Alterung** ist bedingt durch einen Sinterprozess der Edelmetallkristalle, der eine Verkleinerung der aktiven Oberfläche zur Folge hat. Mit steigender Temperatur nimmt die Geschwindigkeit der Alterung zu. Auch das Trägermaterial des Katalysators unterliegt einer Alterung, die ebenfalls zu einer Verkleinerung der Porenoberfläche und damit zur Abnahme der Aktivität führt [3].

Bei der **Verschmutzung** lagern sich feine Feststoffe, z.B. Aschebestandteile aus Kraftstoff und Motoröl in den Poren des Katalysators ab und vermindern somit die Katalysatoraktivität.

Eine **Vergiftung** des Katalysators erfolgt durch sogenannte Katalysatorgifte, die chemische Verbindungen mit dem Katalysator eingehen und diesen unwirksam machen. Die wichtigsten Katalysatorgifte sind Blei-, Schwefel-, Phosphor-, Arsen-, Silizium-, Halogen- (z.B. Chlor) sowie Alkalimetall- (z.B. Natrium, Kalium) und Erdalkalimetallverbindungen (z.B. Magnesium, Calcium).

Rapsölkraftstoff kann gemäß der Entwurfs-Vornorm DIN 51605 in geringen Konzentrationen Schwefel (bis max. 10 ppm), Phosphor (bis max. 12 ppm) sowie Calcium und Magnesium (bis zu einem Summenwert von max. 20 ppm) enthalten. Andere Katalysatorgifte, wie z.B. Chlor liegen bei naturbelassenem Rapsöl meist unterhalb der Nachweisgrenze und sind daher als Katalysatorgift von untergeordneter Bedeutung. Im Gegensatz dazu können Altspeisefette hohe Chlorgehalte aufweisen, die zu einer schnellen Vergiftung des Katalysators führen.

Im Beisein des Katalysatorgifts Schwefel bildet sich beispielsweise das sehr stabile Bariumsulfat aus SO₂ und Bariumoxid im Adsorberkatalysator. Als Nebenreaktion sind beim Einsatz der SCR-Verfahren die Bildung von Ammoniumsulfat ((NH₄)₃SO₄) und Ammoniumhydrogensulfat (NH₄HSO₄) möglich [21]. Diese Sulfate können kaum mehr vom Adsorber bzw. Katalysator entfernt werden und blockieren somit die für NO und NO₂ erforderlichen Plätze [24]. Kraftstoffe, die seit Januar 2003 an allen deutschen Tankstellen erhältlich sind, enthalten maximal nur noch 10 ppm Schwefel. Rapsöl besitzt üblicherweise von Natur aus Schwefelkonzentrationen von deutlich weniger als 10 ppm. Schwefelarme bzw. -freie Kraftstoffe bewirken nicht nur eine Verringerung der Schadstoffemission und verlängern die Lebensdauer von Katalysatoren, sondern tragen gleichzeitig auch zu einer Kraftstoffeinsparung von 10 bis 15 % bei [12].

Auch Phosphorverbindungen zählen zu den Katalysatorgiften. Untersuchungen mit verschiedenen phosphorhaltigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen weisen darauf hin, dass sich an den Katalysatoroberflächen stark phosphorhaltige Beläge bilden können, die zur Deaktivierung der Katalysatoren führen [4]. Kaltgepresste Rapsöle weisen üblicherweise Phosphorgehalte von bis zu 12 ppm auf. Bei unsachgerechter Produktion (z.B. Abpressen bei hohen Drücken/Temperaturen) können aber auch höhere Phosphorgehalte im Rapsölkraftstoff vorkommen. Diese gilt es hinsichtlich einer langen Katalysatorlebensdauer zu vermeiden.

2.2.5 Anbieter von Entstickungskatalysatoren

Tabelle 3: Anbieter von Entstickungskatalysatoren (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Anbieter/Ansprechpartner	Adresse
Steuler Anlagenbau GmbH&CoKG H.-J. Wagner	Georg-Steuler-Straße 1, 56203 Höhr-Grenzhausen Phone: ++49/(0)2624/13-302 Telefax: ++49/(0)2624/13-300 www.steuler.de service@steuler.de
Argillon GmbH B. Schäfer	Bahnhofstraße 43, 96257 Redwitz Phone: ++49/(0)9574/81-842 Telefax: ++49/(0)9574/81-664 http://www.sinox.com
HUG Engineering AG HUG Engineering GmbH P.Christlieb	Im Geren 14, CH-8352 Rätterschen Phone: ++41/(0)52/368-2020 Telefax: ++41/(0)52/368-2010 christoph.hug@hug-eng.ch Alt Farmersleben 36 D-39122 Magdeburg Phone: ++49/(0)391/555-440 Telefax: ++49/(0)391/555-4444

3 Material und Methoden

3.1 Pflanzenöl-BHKW des Technologie- und Förderzentrums (TFZ)

Als Versuchsmotor für die Überprüfung der Dieselpartikelfiltersysteme dient das rapsölbetriebene BHKW des Technologie- und Förderzentrums (TFZ). Die zylinderförmigen Partikelfilter mit den Kurzbezeichnungen „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“ und „Dc“ (genaue Beschreibung in Kapitel 3.2) werden vor dem Abgaswärmetauscher eingebaut, um einen möglichst hohen Anteil der Abgaswärme zur Partikelfilterregeneration nutzen zu können. Dazu wurde das rohrförmige Gehäuse, in dem sich der Abgaswärmetauscher befindet, gegen ein Gehäuse mit größerem Querschnitt ausgetauscht. Der Abgaswärmetauscher konnte wegen der größeren Querschnittsfläche verkürzt werden, so dass darüber ein Freiraum entstand, in dem die Partikelfilter eingebaut werden konnten. Die Filterkörper wurden zur Gehäusewand hin abgedichtet und in Längsrichtung mit Schrauben fixiert. Der abschraubbare Deckel am oberen Ende des Gehäuses ermöglicht einen einfachen Ein- und Ausbau der Filter (Abbildung 5).

Für die Partikelfilter „Db“ und „Dc“ wurde eine elektrische Abgasheizung konstruiert und vor dem Filter anstelle des Gehäusedeckels eingebaut (Abbildung 6). Dafür wurde auch die Abgasführung verändert, so dass der Abgasstrom in das Abgaswärmetauscher/Partikelfilter-Gehäuse nicht mehr von der Seite sondern von oben durch die Heizung gelangte. Zusätzlich wurde zur Regeneration der Filter „Da“, „Db“ und „Dc“ ein Oxidationskatalysator in das BHKW nach dem Abgaskrümmen eingebaut, für den ein spezielles Gehäuse angefertigt wurde (Abbildung 7).

Vor dem Einsatz des Partikelfiltersystems „E“ erfolgte aufgrund dessen Baugröße ein weiterer Umbau der Abgasstrecke (Abbildung 8) sowie die Anbringung einer leistungsfähigeren Abgasheizung. Die wichtigsten technischen Daten des BHKW sind in Tabelle 4, die Daten zu den Abgasheizungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

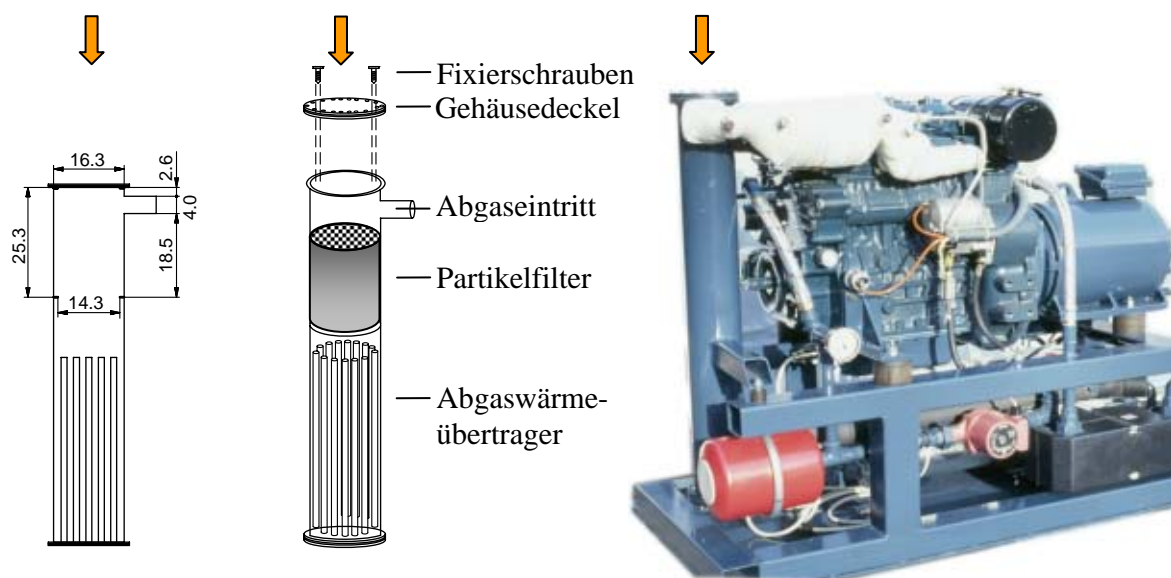


Abbildung 5: Integration der Dieselpartikelfiltersysteme „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“ und „Dc“ in das Pflanzenöl-BHKW des TFZ



Abbildung 6: Abgasheizung für Dieselpartikelfiltersystem „Db“ und „Dc“



Abbildung 7: Oxidationskatalysator zur Regeneration mit NO_2 für die Partikelfilter „Da“, „Db“ und „Dc“

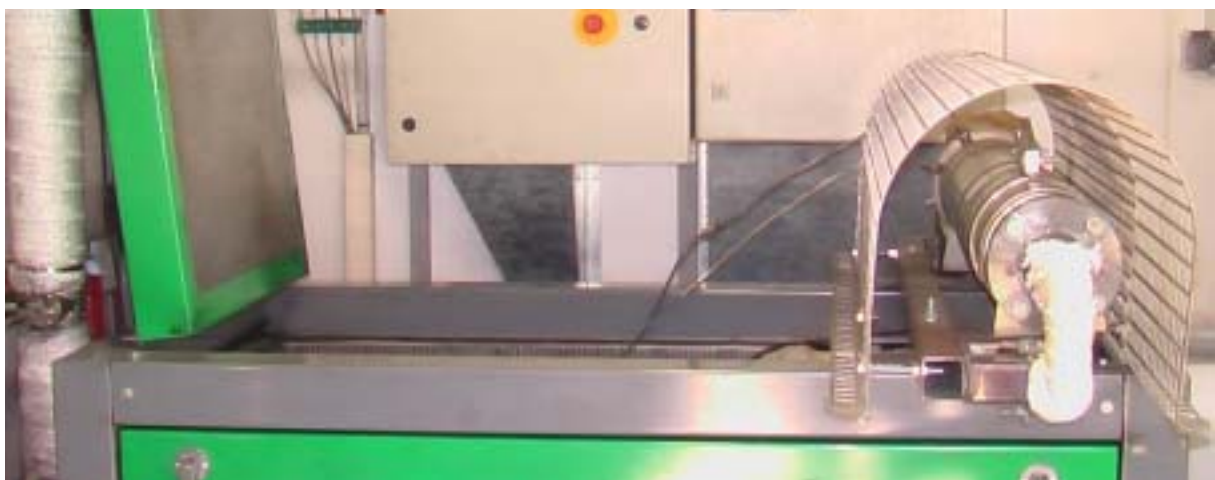


Abbildung 8: Veränderte Abgasführung für Partikelfilter „E“ – BHKW-Seitenansicht

Tabelle 4: Technische Daten des rapsölbetriebenen Versuchs-BHKW des TFZ

Motorenhersteller/ -typ	Kubota D 1703-BG, Wirbelkammer
Hubraum	1,647 l
Motorleistung	12,8 kW bei 1500 min ⁻¹
Betriebsweise	konstant 1500 min ⁻¹ , mit Generator konstant 8 kW _{el}
Kraftstoffverbrauch	ca. 3,2 l/h bei Nennleistung
Abgasvolumenstrom	90-100 m ³ /h bzw. 60 Nm ³ /h, bezogen auf trockenes und staubfreies Abgas im Normzustand (0 °C, 1013 mbar)
Abgastemperatur	ca. 370 °C
max. zulässiger Abgasgegendruck	80 mbar (Angabe des Motorenherstellers)

Tabelle 5: Technische Daten der verwendeten Abgasheizungen

Abgasheizung 1	
Einsatz bei Partikelfilter	„Db“ und „Dc“
Hersteller	Eigenbau mit Heizelementen der Firma Horst GmbH
Aufbau (Abbildung 6)	kaskadenförmig mit Abgas durchströmte beheizte Stahlplatten mit zwei Stahlhülsen, in denen sich die Heizelemente befinden
Abmessungen	Durchmesser: 200 mm, Höhe: 150 mm
Heizelement	2 Elektroheizpatronen mit je 12,5 x 130 mm und je 1000 Watt
Nenntemperatur	750 °C
Abgasheizung 2	
Einsatz bei Partikelfilter	„E“
Hersteller	Firma Siekerkotte
Aufbau Abbildung 15 (rechts)	vom Abgas durchströmtes Rohr mit Heizstäben
Abmessungen	Gesamt: Durchmesser = 150 mm, Höhe = 1340 mm Heizbereich: Durchmesser = 90 mm, Höhe = 750 mm
Heizelemente	Heizstäbe mit insgesamt 4000 Watt
Nenntemperatur	bis 1150 °C

3.2 Getestete Partikelfiltersysteme

3.2.1 Partikelfiltersystem „A“ – katalytisch beschichteter Karamik-Monolith

Das Katalysator-Partikelfiltersystem „A“ besteht aus einem keramischen „Wall Flow“ Monolith, der mit einer Kombination aus hochaktivem „Washcoat“ und einer speziellen Edelmetall-Formulierung versehen ist. Der keramische Filterblock ist in einem Edelstahl Gehäuse in einer elastischen Lagerung fixiert (Abbildung 9).

Das patentierte Abgasreinigungssystem vermindert sowohl gasförmige Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC), als auch Diesel-Partikel. Die Partikel werden dabei zunächst gefiltert und zusammen mit den gasförmigen Stoffen in oxidierender Atmosphäre zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) katalytisch umgewandelt. Die sogenannte **Oberflächenfiltration** erfolgt durch die erzwungene Durchströmung der porösen Kanalwände („Wall Flow“) des monolithischen Blocks, da die quadratischen Kanäle wechselseitig verstopft sind (Abbildung 9). Durch die feine Kanalstruktur und die dünnen Zwischenwände (0,4 mm) ergibt sich eine sehr große Filteroberfläche und damit verbunden eine hohe Speicherfähigkeit für Rußpartikel.

Das Katalysator-Partikelfiltersystem „A“ ist speziell für den Einsatz bei Abgastemperaturen unterhalb von 300 °C entwickelt worden, so dass auch Dieselmotoren mit niedrigem Belastungszyklus mit dem Filter ausgerüstet werden können. Die optimale Wirkung entfaltet der Katalysator-Rußfilter beim Motorbetrieb mit schwefelarmem Kraftstoff (S-Gehalt: 50 ppm). Er ist aber auch bei Verwendung von Kraftstoff mit höherem Schwefelgehalt bis 350 ppm einsetzbar. Aufgrund seiner hohen Aktivität ist bei Temperaturen oberhalb von 350 °C in Verbindung mit hohen Schwefelanteilen mit Bildung von Sulfaten zu rechnen. Die katalytische Beschichtung des Filters reduziert deutlich die Zündtemperatur des Dieselrußes. Damit werden die automatische und kontinuierliche Regeneration des Filters gewährleistet sowie Temperaturspitzen vermieden.

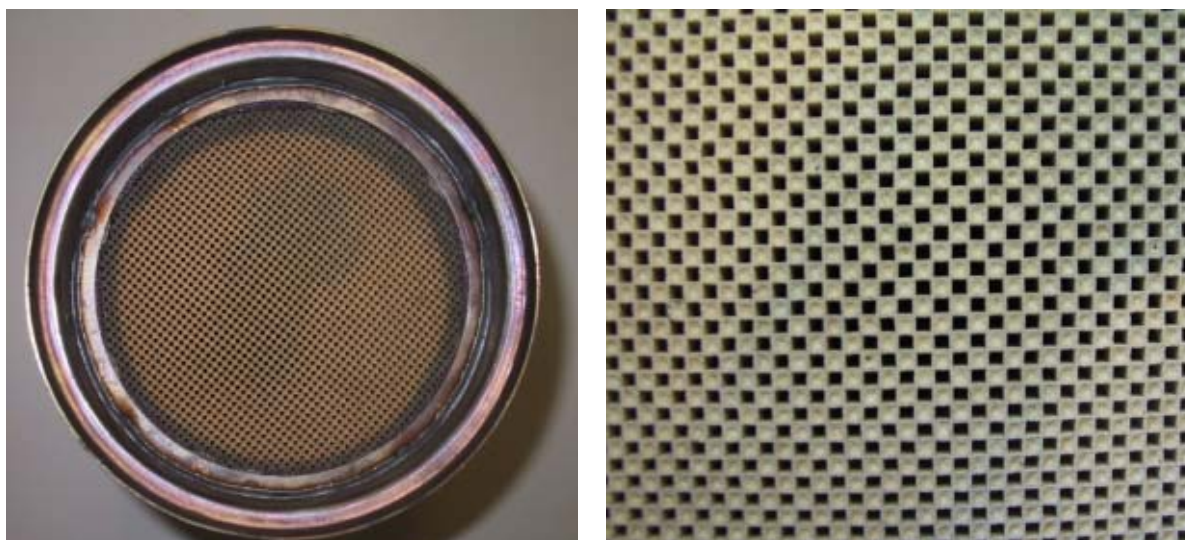


Abbildung 9: Katalysator-Partikelfilter System „A“ - keramischer Filterblock in Edelstahlgehäuse (links) - wechselseitig verschlossene Kanäle des Filterblocks (rechts)

Die vom Hersteller vorgeschriebene Reinigungsprozedur für den Katalysator-Rußfilter ist einzuhalten, um einen fehlerfreien Betrieb der Abgasreinigungsanlage zu gewährleisten. Bei nicht durchgeführter oder fehlerhafter Wartung des Systems kann die Werksgarantie erlöschen. Der Katalysator-Rußfilter „A“ muss jährlich bzw. alle 1000 Betriebsstunden (Kriterium, welches zuerst eintritt) gemäß nachfolgender Prozedur gereinigt werden:

- Vor dem Ausbau des Filterblocks ist die Austrittsseite des Filters zu markieren
- Der ausgebaute Filter wird zuerst auf der Einlassseite mit Druckluft gereinigt. Anschließend wird der Luftstrahl auf die Kanäle der Austrittsseite gerichtet, bis nur noch ein Minimum an Ruß sichtbar ist. Es wird empfohlen, diese Prozedur unter einer Absauganlage durchzuführen. Der Druckstrahl darf höchstens 100 mm an die Filteroberfläche herangeführt werden.
- Nach erfolgter Reinigung wird der Filterblock in umgekehrter Durchflussrichtung wieder eingebaut.

Anmerkung: Aus Sicht des Immissionsschutzes kann diese Vorgehensweise allerdings nicht akzeptiert werden, da es hierbei zum erhöhten Ausstoß von im Filterkörper abgelagerten Aschebestandteilen kommt!

Es wird nicht empfohlen, den Filter mit Dampf und/oder Reinigungsmitteln zu säubern, da es dadurch zu einer Deaktivierung der katalytischen Beschichtung kommen kann. Zum eigenen Schutz sind während der Reinigung Handschuhe, Atemfilter sowie eine Schutzbrille zu verwenden. Bei Wieder-Inbetriebnahme wird zuerst eine Abgasgegendruck-Messung durchgeführt und die ermittelten Werte zusammen mit den Filterdaten (Seriennummer, Produktnummer) in einem Wartungsbuch festgehalten. Nach einer erfolgten Reinigung kann es für kurze Zeit zu einem erhöhten Rußausstoß kommen.

3.2.2 Partikelfiltersystem „B“ – katalytisch beschichteter Draht-/Filamentgestrickfilter

Das Partikelfiltersystem „B“ ist ein kombiniertes Rußfilterelement aus Draht- und Keramikfilamentgestrickbahnen, die in Sandwichbauweise gewickelt werden (Abbildung 10, Abbildung 11). Die so entstehenden Filterelemente werden hintereinander oder in Reihe angeordnet, so dass variable Ausführungen realisiert werden können. Je nach Einsatzbedingungen und Anforderungen kann der Filter hinsichtlich Baugröße, Druckverlust und Abscheiderate angepasst werden. Das Drahtgestrick ist wellenförmig profiliert und erzeugt eine genau definierbare Kanalführung. Die zwischen den Drahtlagen befindlichen Filamentgestrickbahnen besitzen eine sehr große spezifische freie Oberfläche und halten die im Abgasstrom befindlichen Partikel durch Adhäsionskräfte zurück.

Die Filterelemente sind katalytisch beschichtet und ermöglichen eine Regeneration ab etwa 430 °C. Die Regeneration erfolgt kontinuierlich oder in Intervallen, z.B. durch Leistungserhöhung. Bei Abgastemperaturen ab ca. 600 °C kann auf die katalytische Beschichtung verzichtet werden. Das System arbeitet als **Tiefenfilter** mit vom Hersteller angegebenen Abscheidegraden von mehr als 90 %. Nanopartikel < 30 nm werden bis zu 99 % abgeschieden.



Abbildung 10: Filtersystem „Ba“ – eingebaut (links) - Detailansicht der Austrittsseite (rechts)



Abbildung 11: Filtersystem „Bb“ – gewickeltes Draht-/Keramikfilamentgestrick

Die Reinigung von Inertstoffen erfolgt durch Waschen mit schwacher Essigsäure. Eine Reinigung mit Druckluft schädigt den Partikelfilter und ist daher nicht geeignet. Die Temperaturbeständigkeit wird mit ca. 1000 °C angegeben. Die Entwicklung dieses Filtersystems ist noch nicht abgeschlossen. Getestet wurden zwei Partikelfiltersysteme „Ba“ (Abbildung 10) und „Bb“ (Abbildung 11) mit unterschiedlich ausgeführten Wicklungen.

3.2.3 Partikelfiltersystem „C“ – unbeschichteter Keramik-Monolith

Das Partikelfiltersystem „C“ besteht aus einem keramischen Monolith ohne katalytische Beschichtung (**Oberflächenfilter**). Deshalb erfolgt die Regeneration erst bei Temperaturen oberhalb der Selbstzündungstemperatur von Ruß von ca. 600 °C. Der Monolith wurde in ein spezielles Gehäuse integriert, um das Partikelfiltersystem motornah an einem bestimmten Stationärmotor

anbringen zu können (Abbildung 12). Das Abgas gelangt zentral in den Partikelfilter, wird dann an vier Stegen nach Außen geleitet und außerhalb des Keramikkörpers in einem Spalt an das untere, nach Außen hin verschlossene Ende geleitet. Dort wird der Abgasstrom in die entgegengesetzte Richtung gelenkt und gelangt durch die Kanalwände der wechselseitig verschlossenen Kanäle, wo die Filtration erfolgt. Das gereinigte Abgas tritt an vier Öffnungen, die kreisförmig um die Eintrittsöffnung angeordnet sind aus dem Rußfiltergehäuse aus und wird durch das anschließende Abgassystem abgeleitet. Das Reinigungsintervall wird für Pflanzenölbetrieb auf ca. 1000-2000 Bh geschätzt.



Abbildung 12: Partikelfiltersystem „C“ – keramischer Monolith in Gehäuse für motornahe Anbringung an einem bestimmten BHKW-Typen

3.2.4 Partikelfiltersystem „D“ – Faserverbundfilter mit NO₂-Regeneration

Das Dieselpartikelfiltersystem „D“ basiert auf einem neu entwickelten keramischen Faserverbundwerkstoff und arbeitet nach dem System der **Tiefenfiltration**. Die Vorteile liegen in der großen offenen Porosität des Faserwerkstoffs, die eine hohe Aufnahmekapazität bei niedrigen Druckdifferenzen gewährleistet, in der niedrigen Dichte des Werkstoffs und der hohen Effektivität insbesondere auch bei der Abscheidung von Kleinstpartikeln.

Durch die Art der Filterherstellung können wesentliche Eigenschaften des Filters, wie Druckverlust, Abscheideleistung, Aufnahmekapazität, etc. den jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Eine gewellte Bahn des Filtermediums wird auf eine dünne flache Bahn des Mediums aufgetragen und mit diesem auf einer Seite verbunden und abgedichtet. Die so erhaltene Schicht aus zwei Komponenten wird spiralförmig aufgerollt und dabei auf der gegenüberliegenden und entgegengesetzten Seite mit dem aufgerollten Teil ebenfalls dicht verbunden.

Der fertig gerollte zylindrische Filterkörper besitzt ähnlich wie die keramischen Monolithen der Filtersysteme „A“ und „C“ wechselseitig verschlossenen Kanäle. Das Abgas strömt dabei auf einer Seite in die Kanäle ein, gelangt durch die Kanalwände in die benachbarten Kanäle und von dort auf der anderen Seite wieder aus dem Filter. Der Durchmesser sowie die Länge des Zylinders ist ebenso variabel, wie die Gestaltung der Filterkanäle.

Für die Regeneration ist sowohl eine katalytische Beschichtung des Filters als auch die Integration von Heizelementen in den Filterkörper bei der Wicklung möglich. Bei den Testläufen im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms wurde die Regeneration mit Hilfe von NO_2 , (Oxidation von NO zu NO_2 in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator) realisiert.



Abbildung 13: Dieselpartikelfiltersystem „D“ – spiralförmig aufgewickelte Keramikfaserverbundbahn mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse

3.2.5 Partikelfiltersystem „E“ – katalytisch beschichteter Faserflechtfilter

Das Dieselpartikelfiltersystem „E“ ist ein hochoberflächentemporebeständiger Faserflechtfilter aus speziellen Glasfasern, die um ein metallisches Trägerrohr gewickelt sind (Filterkerze). Die Faseroberfläche ist katalytisch imprägniert, so dass die Regenerationstemperatur bei etwa 450 °C liegt. Ein Partikelfilter besteht aus mehreren solcher Filterkerzen, die in einem zylindrischen Gehäuse angeordnet sind. Der Abgasstrom gelangt in dem Gehäuse von Außen an die Filterkerzen, wo überwiegend eine **Oberflächen- teilweise aber auch eine Tiefenfiltration** stattfindet. Die Rußpartikel brennen entweder bereits auf der Oberfläche oder auf dem Weg durch das Fasergeflecht ab. Unverbrennbare Partikelbestandteile lagern sich im Gewebe ab, teilweise gelangen diese auch mit dem Abgasstrom durch den Filter hindurch. Das Partikelfiltergehäuse ist ca. 840 mm lang und hat einen Durchmesser von ca. 160 mm. Der Partikelfilter „E“ besitzt in der hier verwendeten Ausführung 6 kreisförmig angeordnete Filterkerzen mit einem Durchmesser von je ca. 45 mm und einer Länge von ca. 660 mm.

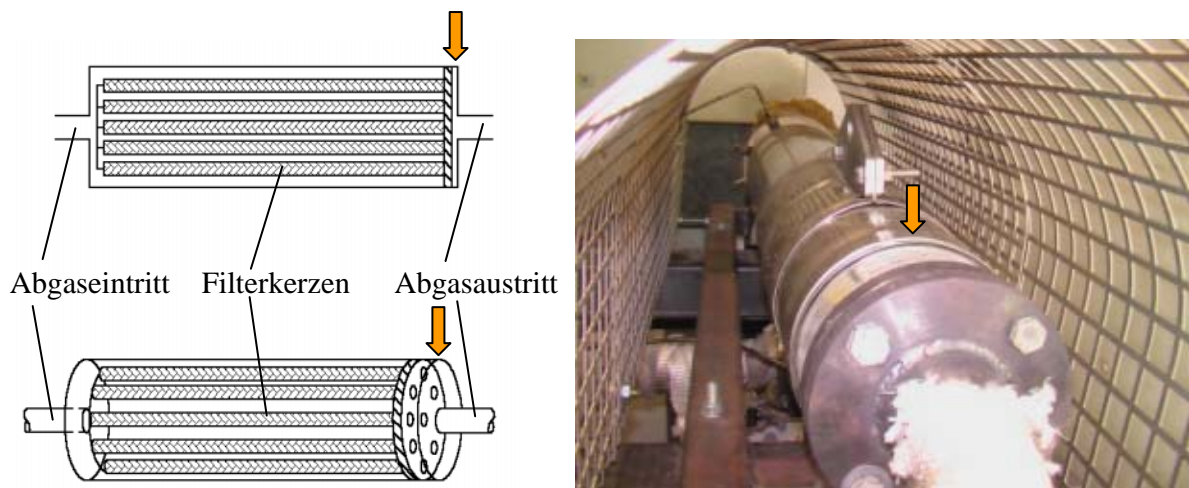


Abbildung 14: Partikelfiltersystem „E“ – Schaubild (links) - Foto des Filtergehäuses in eingebautem Zustand (rechts)



Abbildung 15: Abgaspartikelfiltersystem „E“ mit katalytisch beschichteten Glasfasergeflechtfilterkerzen (links und Mitte) und vorgeschaltete elektrische Abgasheizung (rechts).

3.3 Methodisches Vorgehen beim Testbetrieb

3.3.1 Erfassung des Betriebsverhaltens

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens werden wichtige Betriebszustände kontinuierlich erfasst. Dazu ist das BHKW mit entsprechender Messtechnik ausgestattet worden. Insbesondere werden die Abgastemperaturen vor und nach dem Partikelfilter sowie im Kamin, der Abgasgedruck (teilweise Doppelbestimmung) vor dem Partikelfilter und der Kraftstoffverbrauch überwacht. Die Messdaten werden über einen Datalogger aufgenommen, an einen PC weitergegeben, verrechnet und täglich ausgewertet. Neben den kontinuierlich erfassten Größen werden alle Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten, Störungen und sonstige Vorkommnisse in ein Logbuch eingetragen und ausgewertet.

3.3.2 Erfassung des Emissionsverhaltens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden mehrere wiederkehrende Emissionsmessungen mit verschiedenen Partikelfiltersystemen durchgeführt. Als Bezugsmessungen erfolgen zeitnah zusätzlich Emissionsmessungen ohne Filter. Dabei werden die Abgaskomponenten Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Gesamt-Kohlenstoff (Gesamt-C) und Partikelmasse (Staub) zusammen mit den notwendigen Nebengrößen (Temperaturen, Abgasvolumenstrom etc.) erfasst.

Die Emissionsmessungen werden jeweils über einen Zeitraum von mindestens zwei bis drei Stunden durchgeführt, währenddessen, neben den kontinuierlich erfassten gasförmigen Abgaskomponenten auch ca. drei bis vier Partikelmasseproben genommen werden.

Die Messungen werden überwiegend mit der mobilen Emissionsmessausrüstung der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt (Abbildung 16). Die damit erfassten Messgrößen sind:

- CO_2 , CO , Gesamt-C, NO_x/NO
- Partikelmasse
- Abgastemperatur und Druck im Abgasrohr
- Luftdruck

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

Um Kondensationseffekte zu vermeiden, wird die Abgasprobenahme mit einer beheizten Probenahmesonde mit integriertem Partikelfilter und einer beheizten Probenahmeleitung (Beheizung auf ca. $180\text{ }^\circ\text{C}$) durchgeführt. Die Abgasbestandteile CO_2 , CO , Gesamt-C und NO_x werden dabei während des Versuchs kontinuierlich im Teilgasvolumenstrom analysiert (extraktive Probenahme). Da den Messgeräten für die CO -, CO_2 - und NO_x -Analyse trockenes und partikelfreies Abgas zugeführt werden muss, wird das Messgas in einem vorgeschalteten Kühler auf ca. $5\text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt und in einem weiteren Partikelfilter nochmals gereinigt. Die Erfassung von Gesamt-C erfolgte im heißen und feuchten Abgas.

Im Gegensatz zu den gasförmigen Emissionskomponenten wird 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_2 , CO, Gesamt-C und NO_x/NO verwendeten Messgeräte sowie deren Messprinzipien und die bei den Messungen aktiven Messbereiche werden in Tabelle 6 und Tabelle 7 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.

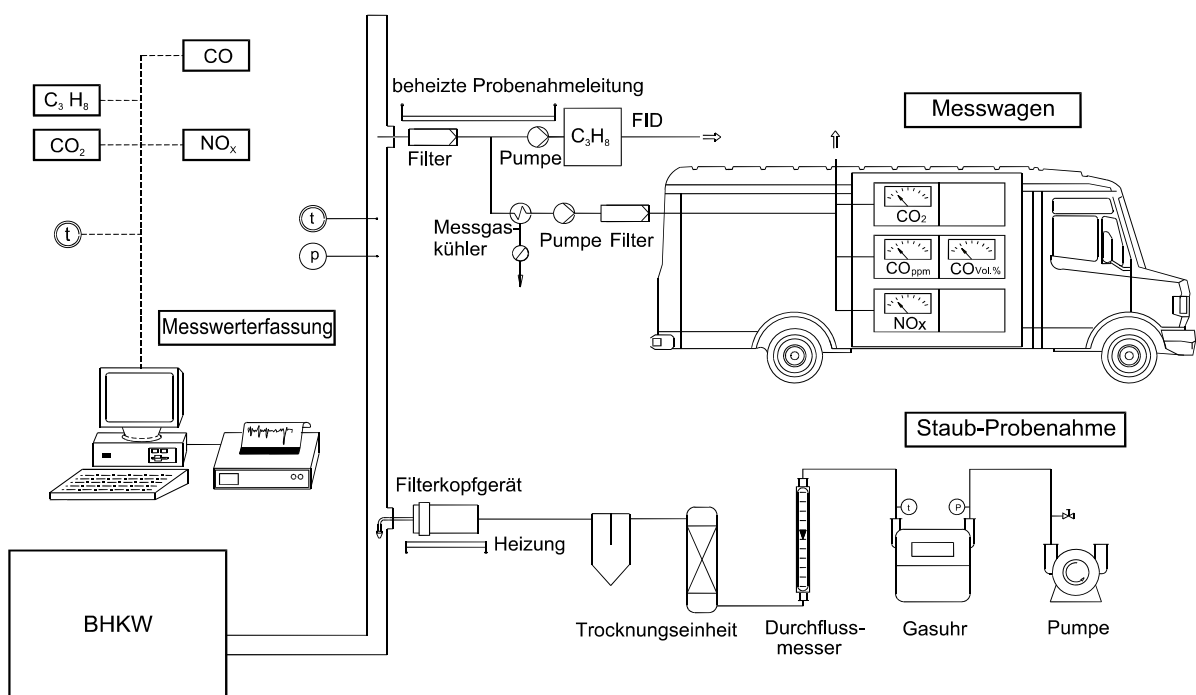


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Geräteaufbaus für die Emissionsmessungen am BHKW des TFZ

Tabelle 6: *Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile*

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

- 1) relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)
- 2) manuelle Messbereichsumschaltung
- 3) Summe der flüchtigen organ. Verbindungen; Messung im feuchten Abgas gemäß VDI- Richtlinie 3481 Blatt 1

Teilweise werden die Messungen auch mit dem Emissionsmessgerät TESTO 350 durchgeführt. Dieses Gerät analysiert nur trockenes Abgas mittels elektro-chemischer Messzellen. Es werden daher nur O₂, NO, NO₂ und CO erfasst und kein Gesamt-C. Die Partikelmasseprobenahme erfolgt wie oben wiederum nach DIN-Normen und VDI-Richtlinien.

Tabelle 7: *Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen der erfassten Abgasbestandteile*

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip	Messbereich	Prüfgas-konzentration ^{*)}
O ₂	TESTO 350 / TESTO	elektro-chemische Messzelle	0-25 Vol.-%	nicht erforderlich
CO	TESTO 350 / TESTO	elektro-chemische Messzelle	0 – 40000 ppm	nicht erforderlich
NO	TESTO 350 / TESTO	elektro-chemische Messzelle	0 – 3000 ppm	nicht erforderlich
NO ₂	TESTO 350 / TESTO	elektro-chemische Messzelle	0 – 500 ppm	nicht erforderlich

*) relative Genauigkeit des Prüfgases: ± 2 % (lt. Herstellerangabe)

Die Messstutzen für die Probenahmesonden waren im Abgaskamin eingebaut und entsprachen den Anforderungen an eine Messstrecke gemäß Richtlinie VDI 2066 B1.1.

Durchführung der Messungen

Um vergleichbare Betriebsverhältnisse an der Anlage zu gewährleisten, wurde mit den Emissionsmessungen bei Nennlast nach einer Warmlaufphase des BHKW von mindestens 2-3 Stunden begonnen. Während dieser Vorlaufzeit erreichte der Motor weitgehend die im Dauerbetrieb übliche Betriebstemperatur. Die kontinuierlich erfassten gasförmigen Emissionskomponenten und die für die Auswertung der Messungen herangezogenen Halbstundenmittelwerte der Partikelprobenahme wurden über das jeweils gleiche Zeitintervall ermittelt.

Datenerfassung

Die kontinuierlich erfassten Messgrößen der mobilen Messausrüstung 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 (jetzt TFZ) 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.

Das TESTO-Gerät hat einen integrierten Speicher. Die Abtastdauer beträgt auch hier etwa 9 s. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wird, wie bei der mobilen Messausrüstung, 60 s gewählt.

4 Analysenergebnisse

4.1 Rapsölkraftstoff

Bei den Testläufen der Partikelfiltersysteme wurde kaltgepresster Rapsölkraftstoff eingesetzt. In Tabelle 8 sind die Bezeichnungen der analysierten Proben der verschiedenen Rapsölchargen mit den Informationen zum Einsatzzeitraum, den Partikelfiltern und den Emissionsmessungen zusammengefasst. Die Ergebnisse der Rapsölanalysen sind aus Tabelle 9 zu entnehmen. Die verwendeten Rapsölkraftstoffe erfüllen weitgehend die Anforderungen des Qualitätsstandards für Rapsöl als Kraftstoff 05/2000. Allerdings lag bei zwei von sieben Proben der Kennwert Gesamtverschmutzung um etwa der Hälfte über dem geforderten Maximalwert von 25 mg/kg. Die Neutralisationszahl und Oxidationsstabilität wurde jeweils zweimal nicht eingehalten. Die für die Aschebildung relevanten Kennwerte Aschegehalt, Phosphorgehalt, Calciumgehalt und Schwefelgehalt waren hingegen nicht zu beanstanden. So liegt für alle kaltgepressten Rapsöle der Aschegehalt zwischen 0,002 und 0,009 Masse-%, der Phosphorgehalt zwischen 4 und 8 mg/kg, der Calciumgehalt zwischen 4 und 14 mg/kg und der Schwefelgehalt bei maximal 7 mg/kg. Weitere Elemente, die als Aschebildner oder Katalysatorgifte von Bedeutung sein können, wie z.B. Chlor, sind in den hier verwendeten naturbelassenen Rapsölen (anders als beispielsweise bei Altspeisefetten) gewöhnlich nicht nachweisbar.

Tabelle 8: Beschreibung der Rapsölkraftstoffproben bei den Testläufen der Partikelfilter

Rapsölprobenbezeichnung	Rapsöltank	Rapsöltank im Einsatz ab	Rapsölcharge	Partikelfilter	Filterbetriebsstunden	Emissionsmessung	BHKW-Betriebsstunden
RÖLT030131-A1	1	28.01.03	LT1	A	0-88	1, 2	6718
RÖLT030226-A	2	05.02.03	LT2	A Ba	88-185 0-119	3, 4	6860
RÖPO030325	3	25.03.03	PO1	Ba Bb C	119-133 0-26 0-23	5, 6, 7, 8, 11, 12	7034
RÖPO030527	4	27.05.03	PO1	Bb	26-208	--	7257
RÖLT031030-1	5	08.07.03	LT3	Bb Da	208-215 0-63	9, 10, 13, 14	7439
RÖOH040206-A	6	11.11.03	OH1	Db Dc	0-98 0-26	15, 16, 17	7610
	7	06.02.04	OH1	Dc E	26-37 0-134	18, 19	7811
RÖOH040602	8	12.07.04	OH2	E	134-294	--	7972
	9	29.07.04	OH2	E	294-496	20,21,22,23	8127
	10	17.08.04	OH2	E	496-628	--	8329

Tabelle 9: Kraftstoffkennwerte der analysierten Rapsölkraftstoffproben (Werte, die den RK-Qualitätsstandard nicht einhalten, sind fettgedruckt)

Kenngrößen und Prüfmethoden																				
Proben-code	Dichte (15 °C) in kg/m ³ DIN EN ISO 3675	Flammpunkt in °C DIN EN 22719	Heizwert in kJ/g DIN 51900-3	Kin. Viskosität (40 °C) in mm ² /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	(Oxid-)Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245	Wassergehalt in Masse-% prEN ISO 12937	Calciumgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	Magnesiumgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	Siliciumgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	Zinkgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	Kaliumgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	Natriumgehalt in mg/kg ICP analog prEN 14538	
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 030131-A1	--	--	--	--	--	1	35	--	3,83	5,6	8	0,002	0,041	14	1	1	<1	<1	1	1
RÖLT 030226-A	--	--	--	--	--	4	39	--	1,33	3,2	5	0,004	0,053	9	1	1	<1	<1	<1	<1
RÖPO 030325	--	--	--	--	--	6	21	--	0,81	7,9	5	0,005	0,068	5	<1	<1	<1	<1	<1	<1
RÖPO 030527	--	--	--	--	--	7	9	--	0,80	6,7	4	0,006	0,073	4	<1	<1	<1	<1	<1	<1
RÖLT 031030-1	--	--	--	--	--	4	15	--	2,62	3,0	7	0,009	0,057	13	1	<1	<1	1	<1	<1
RÖOH 040206-A	--	--	--	--	--	<0,5	13	--	1,25	6,0	4	0,008	0,041	9	0,5	<1	<1	1,4	<1	<1
RÖOH 040602	920	282	37,6	35,1	112	3	16	0,31	1,03	8,2	5	0,005	0,062	12	1,2	--	--	--	--	--

4.2 Motoröl

Als Motoröl wurde während des gesamten Untersuchungszeitraums ein Produkt der Firma Fuchs Petrolub mit der Bezeichnung Turbo 4000 MC Synthese SAE 10W-40 verwendet. Die Analysenergebnisse einer Frischölprobe und einer Probe nach 555 Betriebsstunden (BHKW-Betriebsstundenzähler 8079 bis 8634) sind in Tabelle 10 aufgeführt. Das Motoröl weist nach 555 Betriebsstunden einen deutlich höheren Calcium- und Phosphorgehalt auf, als das Frischöl. Dies kann auf den Eintrag von Rapsöl in das Motoröl und damit auch gleichzeitig auf den Eintrag der Elemente Ca und P zurückgeführt werden. Allerdings erscheint die Erhöhung insbesondere des Calciumwertes um fast 50 % als extrem hoch. Ein weiterer Grund für den Anstieg könnte auch eine fortgeschrittene Alterung des Motoröls sein, durch die sich ein Umbau der im Motoröl enthaltenen Additivkomponenten ergeben haben könnte. Unterstützt wird diese Annahme durch den starken Anstieg der Eisenkonzentration im Motoröl, wohingegen andere Verschleißelemente weitgehend unverändert bleiben. Dies lässt auf eine erhöhte korrosive Wirkung des gebrauchten Motoröls durch Versäuerung schließen, was sich zusammen mit dem Anstieg der Viskosität als

erstes Anzeichen einer Motorölpolymerisation deuten lässt und zu einer inhomogenen Verteilung der Additivelemente im Gebrauchtöl führt. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in dem Untersuchungsvorhaben „Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren“ gemacht.

Tabelle 10: *Analysenergebnisse des bei den Untersuchungen eingesetzten Motoröls in frischem Zustand und nach 550 Stunden im Einsatz*

Parameter	Einheit	Motoröl Fuchs Turbo 4000 MC Synthese SAE 10W-40 Frischöl	Motoröl Fuchs Turbo 4000 MC Synthese SAE 10W-40 555 Stunden im Einsatz
Verschleiß			
Eisen	mg/kg	0	209
Chrom	mg/kg	0	10
Zinn	mg/kg	0	0
Aluminium	mg/kg	0	16
Nickel	mg/kg	0	0
Kupfer	mg/kg	0	6
Blei	mg/kg	0	4
Molybdän	mg/kg	2	1
PQ- Index	-	ok	29
Verunreinigung			
Silizium, Staub	mg/kg	2	11
Kalium	mg/kg	6	55
Natrium	mg/kg	5	10
Wasser		< 0,1%	< 0,1%
Glykol		negativ	negativ
Kraftstoff	%	-	0,8
Ruß	%	-	3,15
Ölzustand			
Viskosität 40°C	mm ² /s	83,62	116,71
Viskosität 100°C	mm ² /s	13,13	17,52
Viskositätsindex	-	158	166
Oxidation	A/cm	-	26
Nitration	A/cm	-	27
Sulfation	A/cm	-	47
Additive			
Calcium	mg/kg	3 371	4 924
Magnesium	mg/kg	245	277
Bor	mg/kg	419	282
Zink	mg/kg	1 310	1 467
Phosphor	mg/kg	1 191	1 459
Barium	mg/kg	0	0
Basenreserve			
TBN	mgKOH/g	12,21	10,5

4.3 Abgaspartikel

Die Zusammensetzung der Abgaspartikel wurde bei drei Proben analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Eine Ascheprobe („Rückstand 1“) stammt aus dem Dieselpartikel-filtersystem „A“ (Kapitel 5.1.1 und Abbildung 23), zwei weitere Proben aus dem Partikelfilter „E“. Eine dieser Proben („Rückstand 2“) ist der vor der vierten Filterreinigung bei 423 Betriebs-stunden gewonnene Rückstand an den Filterkerzen. Bei der zweiten Probe („Rückstand 3“) wurde vorher eine Teilprobe von „Rückstand 2“ extern im Muffelofen über ca. 4 Stunden auf 700 °C aufgeheizt, so dass der darin enthaltene Rußanteil verbrannte.

Die in den Rückständen enthaltenen Elemente mit den höchsten Massenkonzentrationen sind Phosphor und Calcium mit 93 000 bzw. 76 000 mg/kg, gefolgt von den Elementen Zink, Schwefel und Magnesium (Tabelle 11) mit bis zu 17 000 mg/kg. Phosphor, Calcium und Magnesium stammen teilweise aus mitverbrannten Additiven des Motorenöls und teilweise aus dem Rapsöl-kraftstoff. Schwefel ist ebenfalls im Rapsölkraftstoff in geringen Mengen enthalten, wohingegen Zink überwiegend aus dem Motorenöl stammt.

„Rückstand 3“ weist bei vielen Kennwerten eine um den Faktor 1,4 bis 1,6fach höhere Element-konzentration gegenüber „Rückstand 2“ auf. Dies ist auf den in „Rückstand 3“ nicht vorhandenen Rußanteil und der damit höheren Konzentration nicht brennbarer Aschebestandteile zurückzuführen.

Tabelle 11: Analysenergebnisse von Ruß und Asche aus den Partikelfiltern „A“ und „E“

Probennr.	Rückstand 1	Rückstand 2	Rückstand 3
Element	Ascherückstand „Filter A“	Ruß und Asche 11.08.04 „Filter E“	Asche 11.08.04 „Filter E“
Prüfmethode	Röntgenfluoreszenz	ICP	ICP
Einheit	µg/g	mg/kg	mg/kg
Bor	--	145	261
Barium	392	91	116
Cobalt	13	5	7
Chrom	232	199	131
Kupfer	333	444	747
Mangan	399	426	635
Natrium	< 1 200	530	896
Nickel	7	32	56
Blei	129	31	52
Aluminium	< 76	1 200	598
Schwefel	15 270	5 800	9 100
Phosphor	6 928	57 200	93 300
Zink	17 130	6 400	9 400
Magnesium	< 200	8 100	11 000
Kalium	4 527	1 100	183
Calcium	76 320	16 900	15 600
Eisen	3 265	1 100	303

Tabelle 12: Analyseergebnisse von Asche aus Partikelfilter „A“

Element	Ascherückstand „Filter A“	Element	Ascherückstand „Filter A“
Prüfmethode	Röntgenfluoreszenz	Prüfmethode	Röntgenfluoreszenz
Einheit	µg/g	Einheit	µg/g
Silber	< 2	Rubidium	19
Arsen	12	Antimon	9
Bismut	75	Selen	117
Brom	< 1	Silicium	< 55
Cadmium	11	Zinn	51
Chlor	< 15	Strontium	309
Cäsium	< 1	Tantal	< 14
Gallium	60	Tellur	< 11
Germanium	4	Thorium	< 3
Hafnium	42	Titanium	107
Quecksilber	< 10	Tallium	< 5
Iod	< 8	Uran	< 6
Indium	< 3	Vanadium	27
Lanthan	30	Wolfram	< 39
Molybdän	< 7	Yttrium	9
Niobium	< 3	Zirconium	1 671

5 Ergebnisse des Testbetriebs verschiedener Partikelfiltersysteme

5.1 Betriebsverhalten

5.1.1 Partikelfiltersystem „A“

Das Dieselpartikelfiltersystem „A“ wurde am 16.01.2003 in das Blockheizkraftwerk (BHKW) des TFZ eingebaut und war insgesamt 182 Betriebsstunden im Einsatz. Die wichtigsten Ereignisse während dieser Zeit sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „A“

Datum	Betriebsstunden des DPF „A“	Ereignis
16.01.03	0	Einbau DPF „A“, BHKW gestartet
30.01.03	3	Emissionsmessung
02.02.03	85	BHKW abgestellt
03.02.03	85	Ausbau DPF, Reinigung mit Druckluft, Einbau in umgekehrter Durchströmungsrichtung, BHKW gestartet
06.02.03	156	BHKW abgestellt, Ausbau DPF, Reinigung mit Druckluft, Einbau in umgekehrter Durchströmungsrichtung, BHKW gestartet
07.02.03	163	BHKW abgestellt, Ausbau DPF
11.02.03	163	Reinigung durch Ausbrennen im Muffelofen bei 700 °C, Einbau in umgekehrter Durchströmungsrichtung, BHKW gestartet
12.02.03	171	BHKW abgestellt,
17.02.03	171	Reinigung mit Druckluft, Einbau in umgekehrter Durchströmungsrichtung BHKW gestartet
18.02.03	182	BHKW abgestellt, Ausbau DPF „A“

Etwa drei Betriebsstunden nach dem Einbau wurden Emissionsmessungen durchgeführt, um das Abgasverhalten des BHKW mit dem Dieselpartikelfilter „A“ im Neuzustand zu ermitteln. Die Ergebnisse der Emissionsmessung sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Der Abgasgegendruck (absoluter Druck vor dem Partikelfilter) stieg nach dem Einschalten des Aggregats kurzzeitig auf ca. 75 mbar an und fiel mit zunehmender Abgastemperatur und dem dabei einsetzenden Rußabbrand wieder auf ca. 50 mbar ab (Abbildung 17). Auf diesem Druckniveau von 50 mbar bewegte sich dann der Abgasgegendruck etwa 20 Betriebsstunden lang, bevor dieser dann auf etwa 65 mbar anstieg und dort weitere 40 h verblieb. Nach insgesamt 70 Betriebsstunden nahm dann innerhalb von 15 h der Abgasdruck kontinuierlich bis auf ca. 140 mbar zu. Da der Motorenhersteller einen maximalen Abgasgegendruck von 80 mbar zulässt, wurde das BHKW abgestellt, der Partikelfilter ausgebaut und extern von Hand gereinigt (Filterreinigung 1, Abbildung 17). Zur Filterreinigung wurde entsprechend der Wartungsanleitung des Herstellers der Partikelfilter mit Druckluft ausgeblasen (Kapitel 3.2.1). Dabei wurde eine erhebliche Rußbelastung des Dieselpartikelfilters „A“ festgestellt.

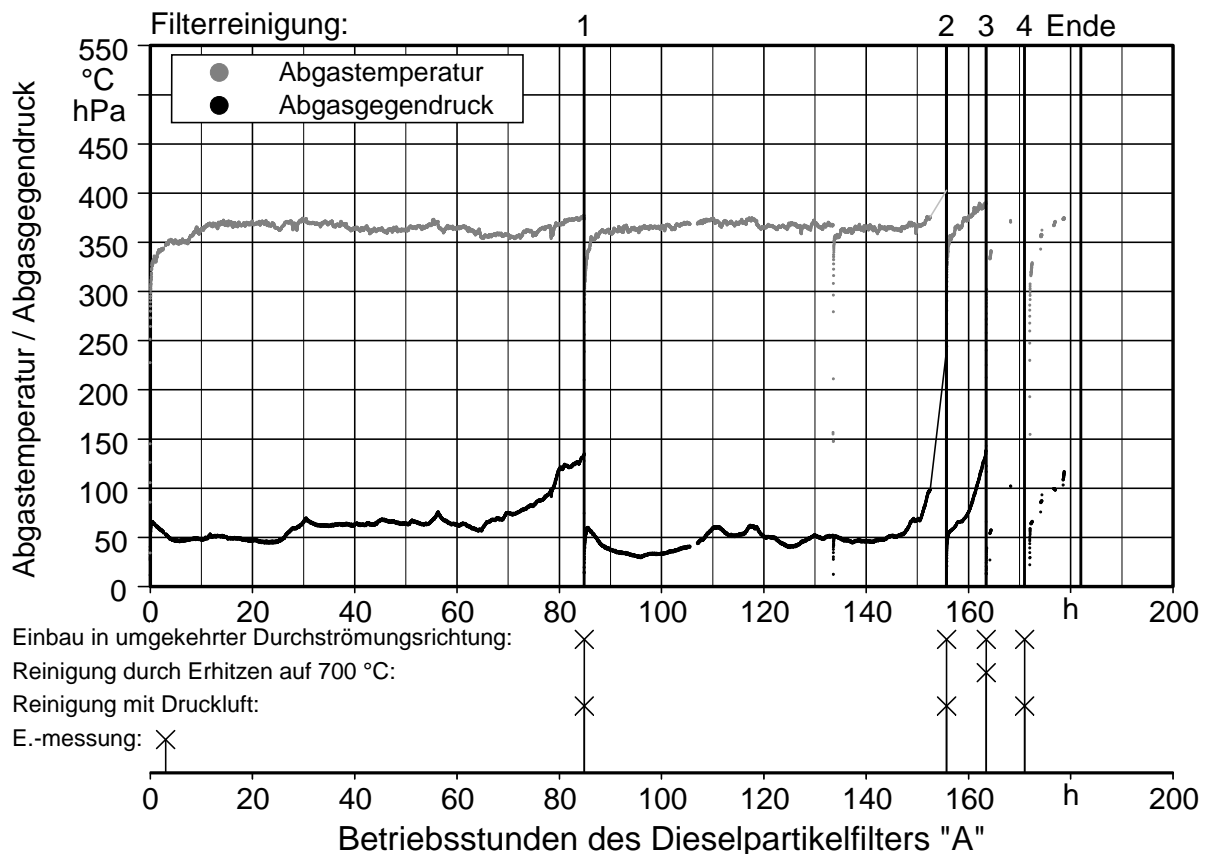


Abbildung 17: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „A“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

Nach dieser Reinigung (Filterreinigung 1) wurde der Partikelfilter gemäß den Angaben des Herstellers in umgekehrter Durchflussrichtung wieder eingebaut und das BHKW gestartet. Der Abgasgegendruck betrug ähnlich wie zu Beginn unmittelbar nach dem Einschalten ca. 65 mbar und sank binnen 10 h kontinuierlich auf etwa 40 mbar ab. Innerhalb von 12 h stieg dann der Abgasgegendruck wieder auf ca. 50-60 mbar an (Abbildung 17). Auf diesem Niveau blieb der Abgasdruck etwa 36 h weitgehend konstant, nahm aber dann nach insgesamt ca. 60 Einsatzstunden seit der Reinigung binnen etwa 10 Stunden von 50 auf nahezu 250 mbar zu. Daraufhin wurde das BHKW aufgrund des hohen Abgasgegendrucks abgestellt, der Partikelfilter ausgebaut und wieder mit Druckluft gereinigt (Filterreinigung 2, Abbildung 17). Auch bei dieser Reinigung wurde eine erhebliche Rußbelastung des Filters festgestellt.

Nach Einbau des Partikelfilters in erneut umgekehrter Durchströmungsrichtung (Durchströmung wie beim neuen Filter mit 0 Betriebsstunden) stieg der Abgasdruck bereits innerhalb von ca. 7 h von etwa 50 mbar auf 140 mbar an. Daraufhin wurde der Partikelfilter wieder ausgebaut, wobei ebenso wie schon bei den beiden vorangegangenen Reinigungsunterbrechungen wieder eine starke Rußbelastung festgestellt werden konnte, die zu einer deutlichen Verengung der Querschnitte der Filterkanäle führte (Abbildung 18). Nach Rücksprache mit dem Filterhersteller wurde der Partikelfilter in einem Muffelofen etwa drei bis vier Stunden auf 700 °C erhitzt, um den im Filter befindlichen Ruß zu verbrennen.

Der Wiedereinbau erfolgte in abermals umgekehrter Durchflussrichtung. Trotz des externen Abrensens des Rußes im Ofen konnte beim erneuten Testbetrieb keine längere Standzeit erreicht werden. Bereits nach 8 h war der Filter wieder überladen und wurde mit Druckluft gereinigt.

Schließlich wurde nach ca. weiteren 11 Betriebsstunden der Dieselpartikelfilter „A“ nach insgesamt 182 Betriebsstunden aufgrund des wiederum stark angestiegenen Abgasgedrucks an den Filterlieferanten zur Überprüfung zurückgesandt.

Ab ca. 150 Filtereinsatzstunden war mehrmals die Datenaufzeichnung ausgefallen. Dies erklärt den geradlinigen Anstieg der Kurven in Abbildung 17 vor der zweiten Reinigung, sowie die Datenlücken ab ca. 163 Filtereinsatzstunden. Durch den Austausch des Datenerfassungsrechners konnte der Fehler behoben werden.

Das Dieselpartikelfiltersystem „A“ wurde vom Anbieter zur Analyse an ein Prüflabor gegeben. Nachfolgend sind die Ergebnisse aus dem Untersuchungsbericht dargestellt.

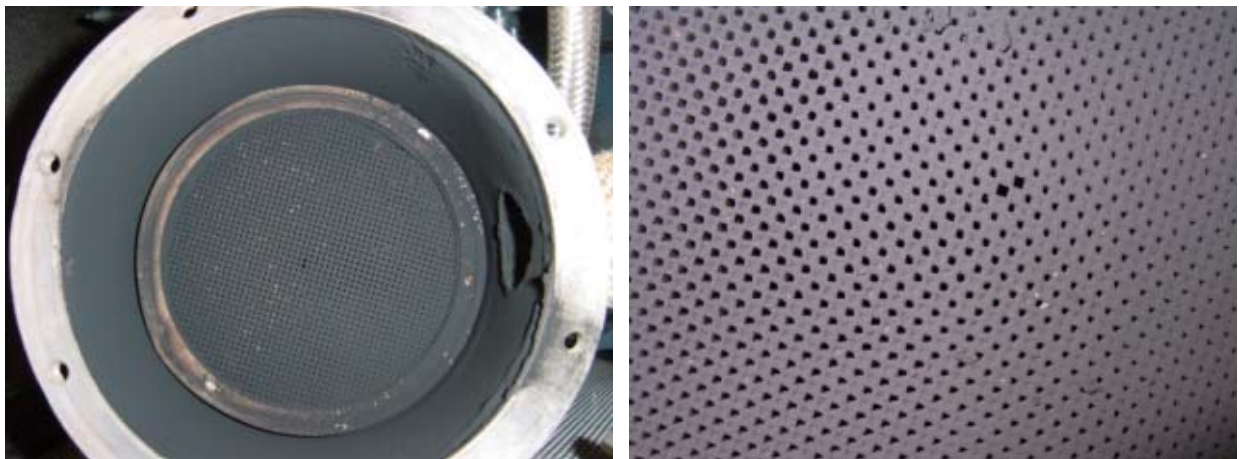


Abbildung 18: Aufsicht auf den stark mit Partikel beladenen eingebauten Partikelfilter „A“ vor der dritten Reinigung

Analyse des Rußfilters auf dem Prüfstand

Kurzbericht über die Regeneration und Beurteilung eines Partikelfilters am FiF der HTW Dresden, Dresden, 15.05.2003, (P. REINHARDT)

Der in stark berußtem Zustand angelieferte Filter „A“ soll regeneriert werden. Anschließend ist im Motorbetrieb das Ergebnis bezüglich Druckverlust, Abscheidegrad und Wirksamkeit der katalytischen Beschichtung zu beurteilen.

Regeneration (Freibrennen des Filters)

Im Anlieferungszustand hatte der berußte Filter einschließlich Gehäuse ein Gewicht von 2754,6 g. Nach der Regeneration im Muffelofen bei 650 °C wies der Filter noch ein Gewicht von

2713,8 g auf. Damit beträgt die umgesetzte Beladung 40,8 g. Diese Beladung ist ungewöhnlich hoch. Die nachfolgende Entaschung zeigte eine ungewöhnliche Struktur der ausfallenden Asche, wobei deren Gewicht mit 0,2 g bestimmt wurde (Abbildung 23).

Prüfstandsuntersuchung

Dazu wurde das Filter-Gehäuse aufgeschnitten und der Monolith in einem zur Motorausrüstung passenden Gehäuse neu gepackt. Als Motor stand ein Dieselmotor PSA DW12TED4/L4 mit Turboaufladung zur Verfügung. Der Motor weist bei einem Hubraum von 2179 cm³ eine Leistung von 97,5 kW auf. Der Druckverlust wurde bei einer Last von 50 Nm in einem Drehzahlbereich von 1000 bis 4000 min⁻¹ bestimmt. Die Beurteilung der abgasrelevanten Kenngrößen erfolgt bei einer Drehzahl von 3000 min⁻¹ bei Abgastemperaturen vor Filter von 280 bis 480 °C im Abstand von 50 °C. Zum Vergleich wurde sowohl die Rohemission ohne Filter als auch ein vergleichbarer regenerierter CORNING-Monolith ohne Beschichtung gefahren.

Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt. Der Druckverlust des BHKW-Filters liegt deutlich unter dem vergleichbaren Corning-Monolithen (Abbildung 19). Da auch der Rußabscheidegrad mit 20 – 30 % sehr niedrig liegt, ist zu folgern, dass der Monolith innere Beschädigungen aufweist (Abbildung 20, Abbildung 22). Äußere Beschädigungen, welche die genannte Wirkung hervorrufen könnten, sind nicht erkennbar. Die Konversion von CO mit 80 – 84 % stimmt mit dem im Bericht des TFZ angegebenen Wert gut überein, die HC-Konversion liegt mit 50 – 60 % etwas niedriger (Abbildung 21). Damit ist die Wirksamkeit der Beschichtung nahezu erhalten geblieben.

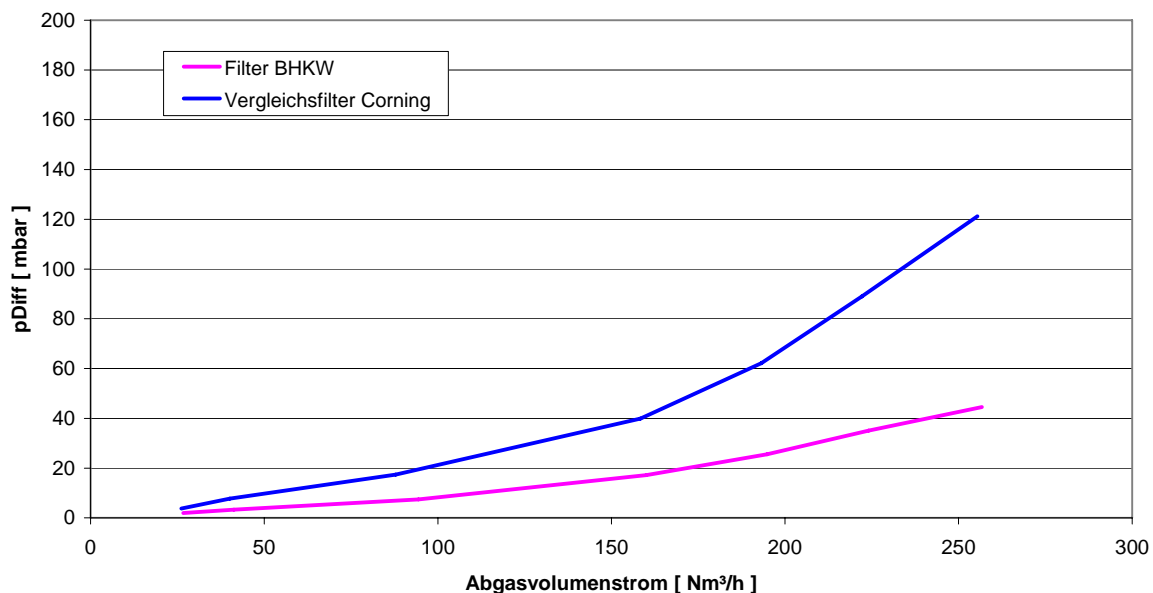


Abbildung 19: Druckverlust des regenerierten Filters „A“ („Filter BHKW“) im Vergleich zu einem neuen Rußfilter gleichen Typs („Vergleichsfilter Corning“,) am Filterprüfstand der HTW Dresden (Drehmoment 50 Nm, $n=1000-4000$ U/min⁻¹, Betriebszeit gesamt: 21 min) Quelle: HTW Dresden

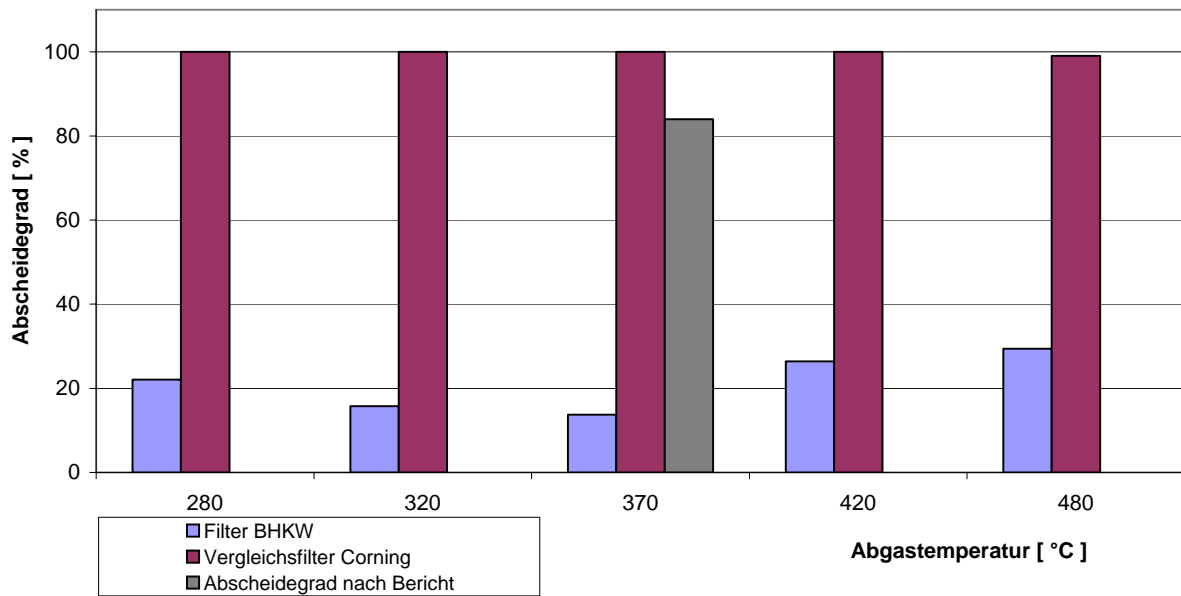


Abbildung 20: Abscheidegrad des regenerierten Filters „A“ („Filter BHKW“) im Vergleich zu einem gereinigten Rußfilter gleichen Typs („Vergleichsfilter Corning“) am Filterprüfstand der HTW und am BHKW des TFZ vor der Regeneration („Abscheidegrad nach Bericht“) bei verschiedenen Temperaturstufen (Abgastemperatur vor Filter 280-480 °C, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) Quelle: HTW Dresden, 15.05.2003

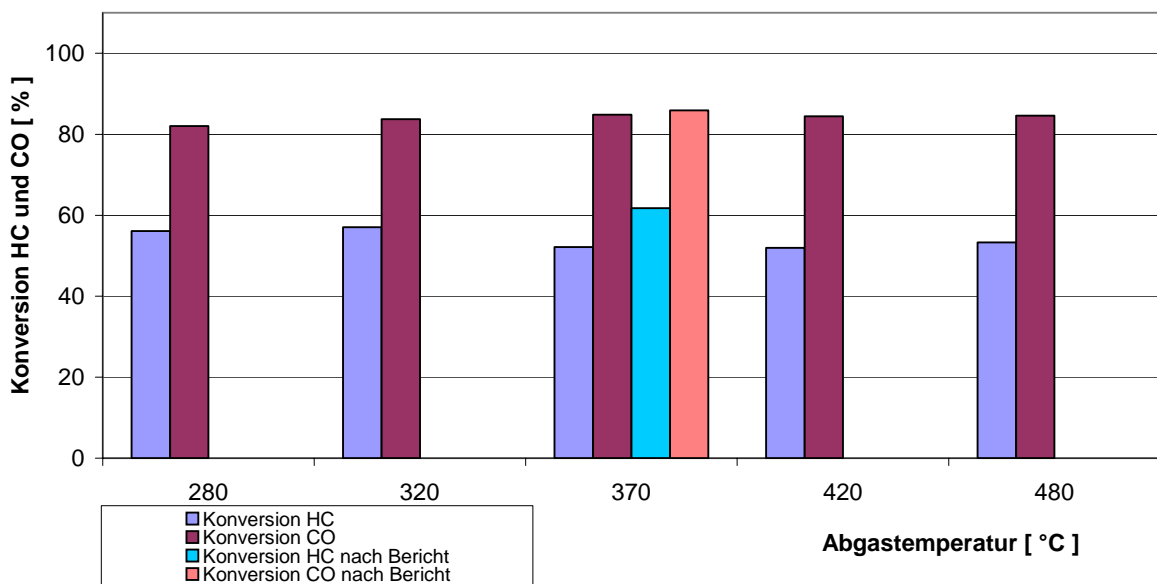


Abbildung 21: Konversion von HC und CO des Filters „A“ nach der Regeneration am Filterprüfstand der HTW („Konversion HC“, „Konversion CO“) und vor der Regeneration im BHKW des TFZ („Konversion HC nach Bericht“, „Konversion CO nach Bericht“) bei verschiedenen Temperaturstufen (Abgastemperatur vor Filter 280-480 °C, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) Quelle: HTW Dresden, 15.05.2003

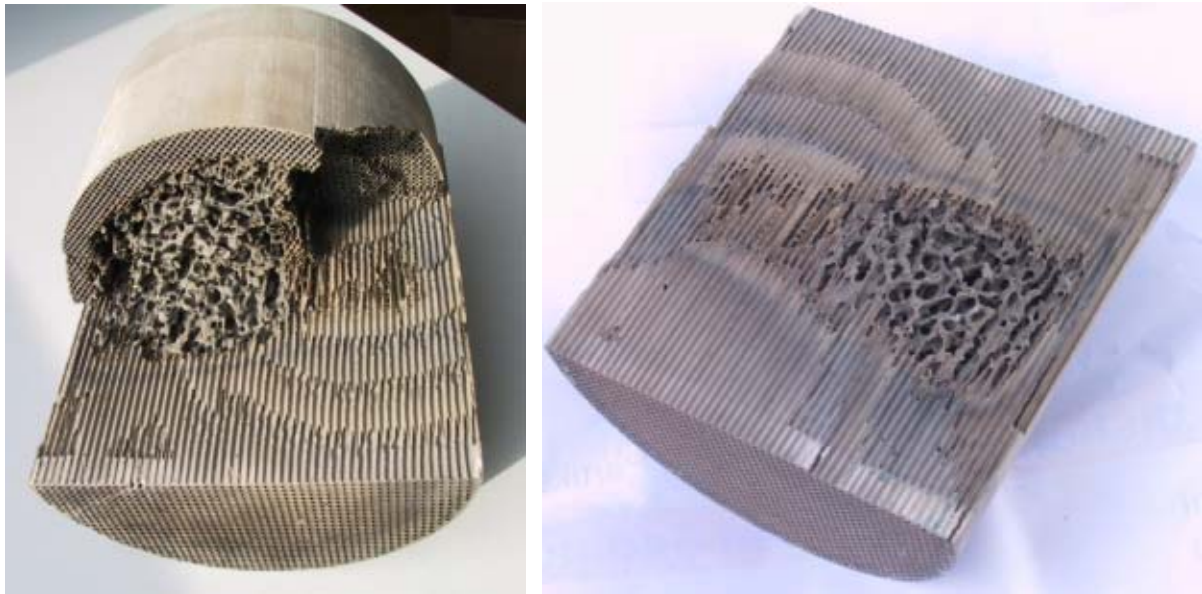


Abbildung 22: Aufgesägter Dieselpartikelfilter „A“ mit den zerstörten Kanälen im Innern des Filters



Abbildung 23: Ascherückstand aus dem Dieselpartikelfilter „A“

5.1.2 Partikelfiltersystem „Ba“

Das Partikelfiltersystem „Ba“ war insgesamt 133 Betriebsstunden im Einsatz. Die wichtigsten Ereignisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst und zusammen mit Abgasgegendruck und Abgastemperatur in Abbildung 24 dargestellt.

Um die vom Hersteller für das Dieselpartikelfiltersystem „Ba“ geforderte Abgastemperatur von ca. 420 °C für die Filterregeneration zu erreichen, wurde mehrmals die Leistung des BHKW auf 9 kW_{el} erhöht. Zwar konnte durch diese Maßnahme die Abgastemperatur von ca. 380 °C auf 425 °C angehoben werden, dies war aber gleichzeitig auch mit einem Anstieg des Abgasge-

gendrucks um ca. 20 mbar verbunden. Der erwünschte Rußabbrand und eine dadurch hervorgerufene Absenkung des Abgasgedrucks konnte nicht erreicht werden.

Das BHKW wurde aufgrund des bereits nach wenigen Betriebsstunden auf ca. 120-150 mbar gestiegenen Abgasgedrucks nur während des Tages eingeschaltet, wo eine ständige Kontrolle des Abgasdrucks möglich war. Von einem durchgehenden BHKW-Betrieb mit dem Filter „Ba“ wurde aufgrund der Gefährdung der Betriebssicherheit des BHKW abgesehen.

Emissionsmessungen mit dem Dieselpartikelfilter „Ba“ fanden nach 4 und 125 Filtereinsatzstunden statt. Die Ergebnisse der Emissionsmessung sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Tabelle 14: Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „Ba“

Datum	Betriebsstunden des DPF „Ba“	Ereignis
24.02.03	0	Einbau DPF „Ba“, BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} zur Veränderung der Abgastemperatur, BHKW zweimal zwischendurch abgestellt (einmal von Hand, einmal automatisch wegen zu hoher Abgastemperatur), BHKW abgestellt
25.02.03	4	Ausbau DPF für Emissionsmessung ohne Filter, Einbau DPF, BHKW gestartet, Emissionsmessung mit Filter, BHKW abgestellt
26.02.03	9	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
27.02.03	19	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
05.03.03	27	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
06.03.03		BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW automatisch abgestellt (zu hohe Abgastemperatur)
07.03.03	46	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
10.03.03	52	BHKW gestartet, abgestellt, Motorölwechsel, BHKW gestartet, abgestellt
11.03.03	60	BHKW gestartet, abgestellt, gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
12.03.03	63	BHKW gestartet, abgestellt, Ausbau DPF, Ausbrennen des DPF im Muffelofen bei ca. 700 °C, Einbau Metallring und Dichtung zur besseren Fixierung und Abdichtung des DPF
Filterreinigung 1		
13.03.03	65	BHKW gestartet, abgestellt, Ausbau Metallring und Dichtung (da sehr hoher Abgasgedruck), BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
14.03.03	74	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
18.03.03	77	Einbau Dichtung (Rußfilter - Abgasrohr), Isolierung des Abgasrohrs außen, BHKW gestartet, BHKW abgestellt
19.03.03	83	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
20.03.03	91	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
21.03.03	101	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
24.03.03	107	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
25.03.03	117	BHKW gestartet, abgestellt, BHKW gestartet, abgestellt
26.03.03	125	BHKW gestartet, Emissionsmessungen mit DPF, BHKW abgestellt, Ausbau Rußfilter
27.03.03	133	BHKW gestartet (ohne DPF), Emissionsmessungen (ohne DPF)

Nach etwa 60 Bh erfolgte ein starker Anstieg des Abgasgedrucks von ca. 150 auf bis zu 200 mbar. In Absprache mit dem Filterhersteller wurde der Filter daraufhin ausgebaut und im Muffelofen auf ca. 700 °C erhitzt, um evtl. im Filter abgelagerten Ruß abzubrennen. Beim anschließenden Einbau wurde eine zusätzlich Abdichtung und Fixierung des Filters realisiert, die aufgrund des schnell ansteigenden Abgasdrucks nochmals modifiziert wurde. Des weiteren erfolgte eine zusätzliche Isolierung des Abgassystems, um eine möglichst hohe Abgastemperatur zur kontinuierlichen Rußverbrennung im Partikelfilter zu erreichen. Zwar war nach der Reinigung des Filters kurzzeitig eine Absenkung des Abgasgedrucks zu beobachten. Jedoch bereits nach 15 Betriebsstunden war das Druckniveau vor der Filterreinigung wieder erreicht. Das Dieselpartikelfiltersystem „Ba“ wurde - nach Rücksprache mit dem BHKW-Hersteller - trotz deutlich überhöhtem Abgasgedruck von mehr als 250 mbar (obere Grenze des Messbereichs) noch weitere 56 h betrieben. Aufgrund unzureichender Emissionswerte und deutlich zu hohem Abgasdruck wurde die Untersuchung mit dem Partikelfiltersystem „Ba“ nach insgesamt 133 h beendet. Schließlich wurde der Filter dem Hersteller zur Optimierung zurückgesandt.

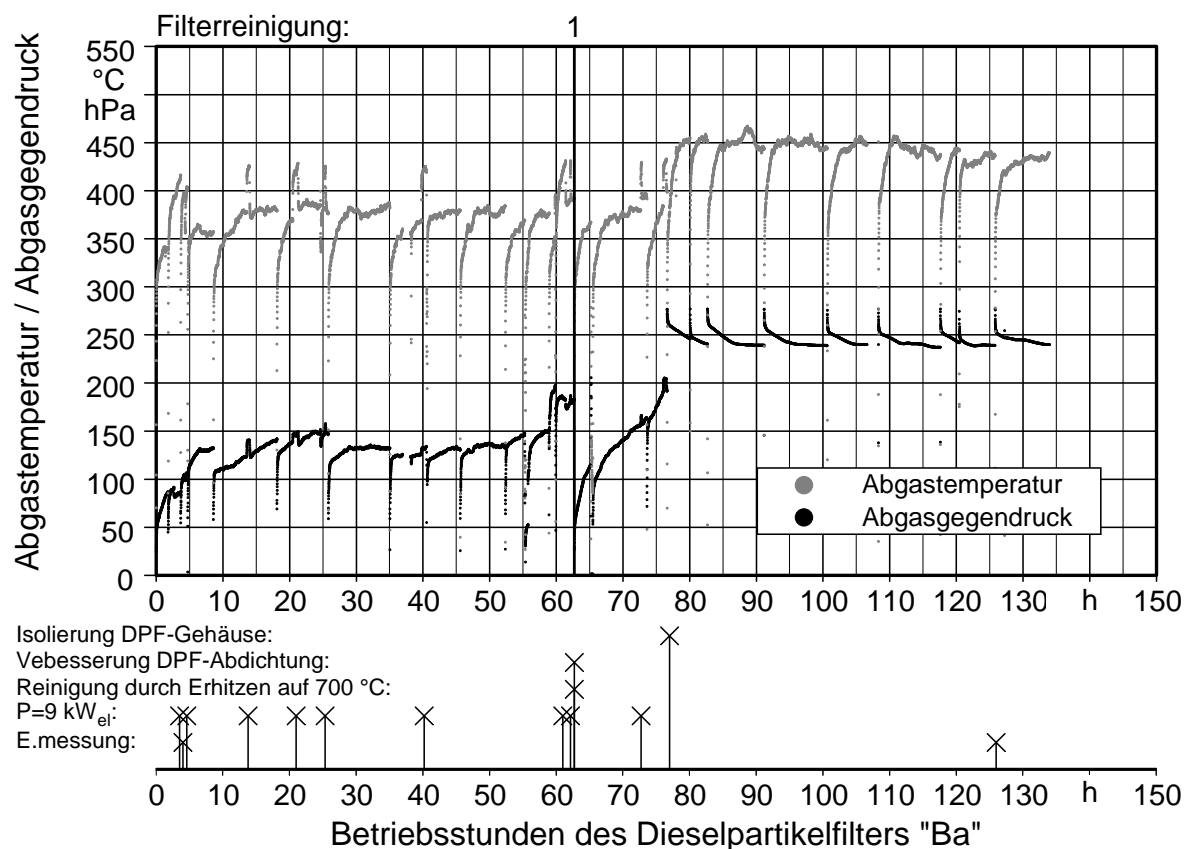


Abbildung 24: Abgastemperatur, Abgasgedruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Ba“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

5.1.3 Partikelfiltersystem „Bb“

Das optimierte Dieselpartikelfiltersystem „Bb“ (gleicher Hersteller wie Partikelfilter „Ba“) wurde am 07.05.2003 in das BHKW des TFZ eingebaut (Tabelle 15). Am 12.05. nach ca. 9 Bh wurden die ersten Emissionsmessungen durchgeführt. Während der ersten Betriebstage traten immer wieder Störungen am BHKW auf, die zum automatischen Abstellen des BHKW führten. Hauptgründe dafür waren meist sehr hohe Abgas- oder Motortemperaturen, die sich aufgrund des von Beginn an sehr hohen Abgasgedrucks von mehr als 250 mbar (Messbereichsendwert des Drucksensors) einstellten. Um das BHKW dennoch weiter betreiben zu können, wurde die Leistung mehrmals auf 5 kW_{el} reduziert. Das Abgasgedruckverhalten entspricht in etwa dem des ersten Partikelfiltersystems „Ba“. Während der Untersuchung wurden Abgastemperaturen von ca. 500 °C und mehr erreicht (Abbildung 25). Um das BHKW dennoch betreiben zu können, wurde die Wärmeabfuhr verbessert und die Sicherheitsabschaltung bei zu hohen Abgas- und Motortemperaturen in Absprache mit dem BHKW-Hersteller auf höhere Temperaturniveaus angehoben. Nach ca. 210 Filtereinsatzstunden fanden die zweiten Emissionsmessungen mit dem Partikelfilter „Bb“ statt, bevor dieser ausgebaut und dem Hersteller zurückgesandt wurde. Die wichtigsten Ereignisse und Betriebsdaten sind in Abbildung 25 und Tabelle 15 zusammengefasst.

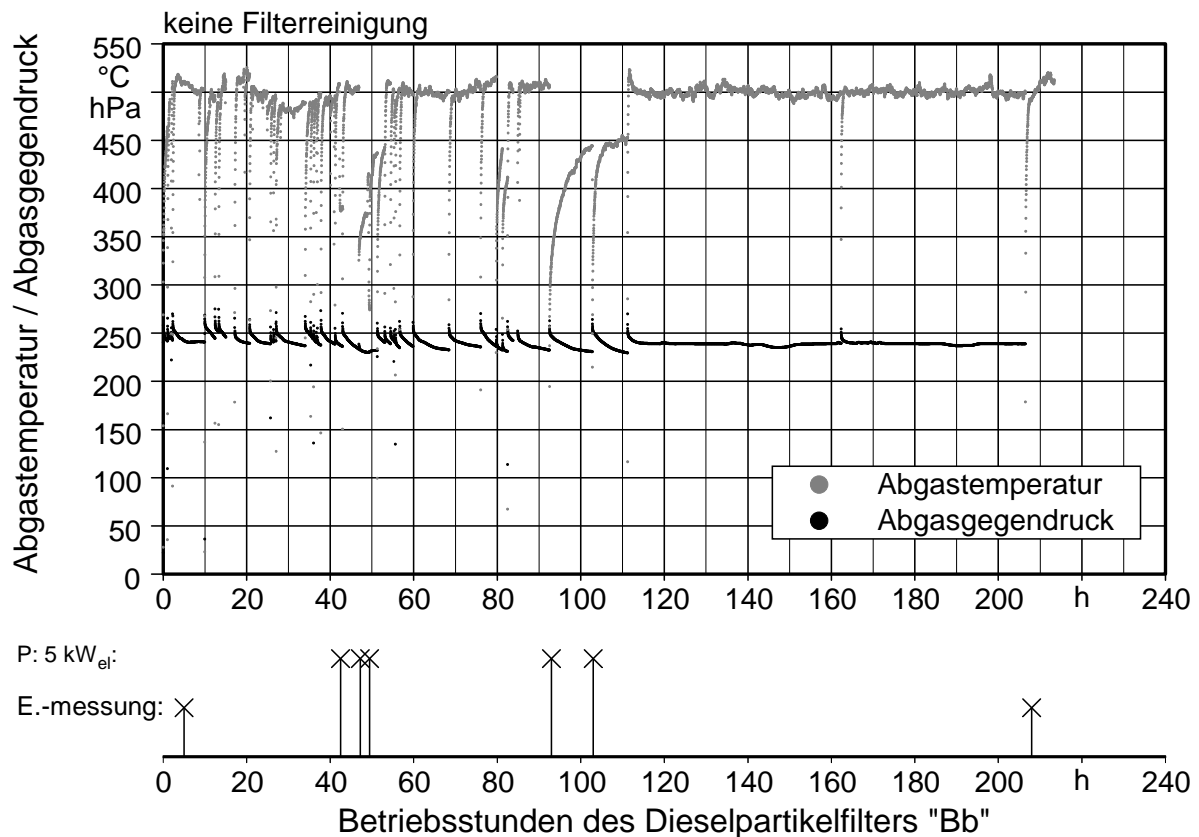


Abbildung 25: Abgastemperatur, Abgasgedruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Bb“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

Tabelle 15: Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „Bb“

Datum	Betriebsstunden des DPF „Bb“	Ereignis
07.05.03	0	Einbau DPF „Bb“, BHKW gestartet, BHKW zweimal automatisch abgestellt wegen zu hoher Motor- und Abgastemperatur
08.05.03	2	BHKW gestartet, BHKW zweimal automatisch wegen zu hoher Abgastemperatur abgestellt
09.05.03	3	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen zu hoher Motortemperatur abgestellt
12.05.03	5	BHKW gestartet, Emissionsmessungen, BHKW abgestellt
13.05.03	12	Ausbau DPF für Emissionsmessungen ohne Filter
22.05.03	12	Einbau DPF „Bb“, BHKW gestartet, BHKW abgestellt
23.05.03	14	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Rück-/Minderlast abgestellt
26.05.03	15	Kraftstoffleitungen entlüftet, BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Rück-/Minderlast abgestellt, Kraftstofffilter gewechselt, BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Rück-/Minderlast abgestellt
27.05.03	26	BHKW gestartet, abgestellt, Tankwechsel, BHKW gestartet, BHKW zweimal automatisch wegen Motortemperatur abgestellt
28.05.03	34	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt
02.06.03	35	BHKW gestartet, BHKW fünfmal automatisch wegen Motortemperatur abgestellt, Notkühler gereinigt, Wärmeabnahme verbessert, BHKW gestartet
03.06.03	38	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt, Leistung auf 5 kW _{el} abgesenkt, BHKW abgestellt
04.06.03	47	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt, Leistungsvariation 5 kW _{el} /6 kW _{el} BHKW abgestellt
05.06.03	54	BHKW gestartet, Leistung auf 6 kW _{el} abgesenkt, BHKW abgestellt
10.06.03	55	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt
11.06.03	56	BHKW gestartet, abgestellt, Ölwechsel, BHKW dreimal gestartet und abgestellt (einmal automatisch wegen zu hoher Motortemperatur)
16.06.03	61	BHKW gestartet, abgestellt
17.06.03	70	BHKW gestartet, abgestellt
18.06.03	77	BHKW gestartet, abgestellt
23.06.03	81	BHKW gestartet, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt, BHKW gestartet, Leistung auf 6 kW _{el} abgesenkt, BHKW abgestellt
24.06.03	89	BHKW gestartet, BHKW dreimal automatisch wegen Motortemperatur abgestellt, BHKW gestartet, Leistung auf 6 kW _{el} abgesenkt, Ausfall der Messdatenerfassung, BHKW abgestellt
25.06.03	99	BHKW gestartet, Leistung auf 5 kW _{el} abgesenkt, BHKW abgestellt
30.06.03	112	BHKW gestartet, Leistung auf 5 kW _{el} abgesenkt, BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt
01.07.03	117	BHKW gestartet
03.07.03	164	BHKW abgestellt, Öl und Kühlwasserstände kontrolliert, BHKW gestartet
06.07.04	208	BHKW automatisch wegen Motortemperatur abgestellt wegen Fehler „Rück- Minderlast“
08.07.04	210	Kraftstofftank gewechselt, BHKW gestartet, Emissionsmessung mit DPF „Bb“, BHKW abgestellt
09.07.04	214	BHKW gestartet, Emissionsmessungen ohne DPF „Bb“, BHKW abgestellt

5.1.4 Partikelfiltersystem „C“

Das Partikelfiltersystem „C“ wurde über 23 Betriebsstunden am BHKW des TFZ im Einsatz überprüft. Die wichtigsten Einsatzdaten sind in Tabelle 16 und Abbildung 26 zusammengefasst. Der Abgasgegendruck betrug bereits kurz nach dem Motorstart über 250 mbar. Entsprechend stieg auch die Abgastemperatur binnen weniger Betriebsstunden auf über 500 °C an. Am 20.05.2003 wurden nach ca. 16 Betriebsstunden Emissionsmessungen durchgeführt (Kapitel 5.2). Anschließend wurde der Abgaspartikelfilter „C“ wieder ausgebaut, da dieser als unbeschichteter Filter Abgastemperaturen zur Regenerierung von bis zu ca. 600 °C benötigt.

Tabelle 16: Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „C“

Datum	Betriebsstunden des DPF „C“	Ereignis
15.05.03	0	Einbau DPF „C“, BHKW gestartet, BHKW automatisch abgestellt wegen zu hoher Motortemperatur, BHKW gestartet, abgestellt
16.05.03	6	BHKW gestartet, abgestellt
19.05.03	9	DPF aus-/eingebaut zur Kontrolle, BHKW gestartet, BHKW zweimal automatisch abgestellt wegen zu hoher Motortemperatur
20.05.03	16	BHKW gestartet, Emissionsmessungen, BHKW abgestellt
21.05.03	23	Ausbau DPF „C“, Emissionsmessungen ohne Filter, BHKW abgestellt

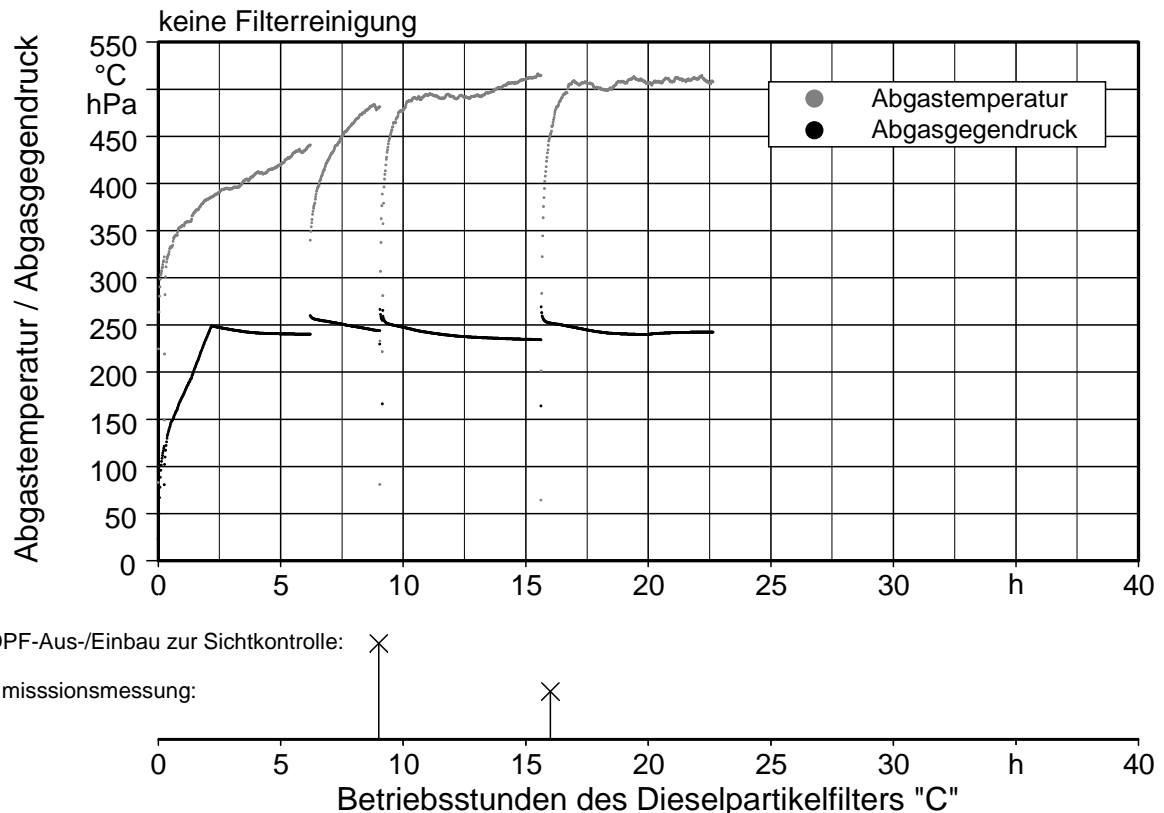


Abbildung 26: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „C“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

5.1.5 Partikelfiltersysteme „Da“ „Db“ und „Dc“

Vor dem Einsatz der Dieselpartikelfiltersysteme „Da“ „Db“ und „Dc“ wurde ein zweiter Notkühler am BHKW installiert, um die durch den höheren Abgasgegendruck bedingte zusätzliche Wärmemenge abzuführen. Dies war insbesondere durch die heißen Umgebungstemperaturen im Sommer 2003 notwendig geworden. Zusätzlich erfolgte der Einbau eines Oxidationskatalysators, mit Hilfe dessen der Großteil des im Abgas enthaltenen NO zu NO₂ oxidiert werden kann. Durch NO₂ wird dann die Temperatur für die Rußoxidation im Dieselpartikelfilter gesenkt. Das Partikelfiltersystem „D“ wurde mit drei baugleichen Ausführungen („Da“, „Db“ und „Dc“) getestet. Die wichtigsten Ereignisse beim Einsatz der drei Filter, sowie die ermittelte Abgastemperatur und der Abgasgegendruck werden in Tabelle 17 sowie in Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 aufgezeigt.

Beim Partikelfilter „Da“ stieg während der ersten 10 Stunden der Abgasgegendruck langsam von ca. 25 auf 50 mbar an. Auf diesem Niveau blieb dann der Abgasgegendruck nahezu weitere 10 h. Zwischen 20 und 30 Stunden kam es dann zu einem Anstieg des Abgasgegendrucks von etwa 50 auf 100 mbar. Danach folgte innerhalb weiterer 15 Filtereinsatzstunden ein Druckanstieg von 100 auf ca. 220 mbar. Zwischen der 55. und 65. Betriebsstunde stieg der Abgasgegendruck dann deutlich langsamer auf etwa 225 mbar an, bevor der Filter ausgebaut wurde. Zusammen mit dem Abgasdruck erhöhte sich auch die Abgastemperatur von etwa 300 °C bei einem Druck von 50 mbar bis hin zu etwas weniger als 350 °C bei einem Abgasgegendruck von 225 mbar.

Tabelle 17: Ereignisse beim Einsatz der Dieselpartikelfiltersysteme (DPF) „Da“, „Db“, „Dc“

Datum	Betriebsstunden von „Da“, „Db“, „Dc“	Ereignis
22.09.03	0	Einbau eines zusätzlichen Notkühlers
22.10.03	0	Einbau eines Oxidationskatalysators
5.1.5.1.1 DPF „Da“		
28.10.03	0	Einbau DPF „Da“, BHKW gestartet, abgestellt
29.10.03	5	BHKW gestartet, Emissionsmessungen
31.10.03	63	BHKW abgestellt
5.1.5.1.2 DPF „Db“		
11.11.03	0	Einbau einer elektrischen Abgasheizung
26.01.04	0	DPF „Db“ eingebaut, BHKW gestartet, abgestellt
27.01.04	3	BHKW gestartet, Ausfall Datenaufzeichnung, BHKW abgestellt
28.01.04	11	BHKW gestartet, abgestellt
29.01.04	17	BHKW gestartet
30.01.04	46	BHKW abgestellt
02.02.04	46	BHKW gestartet
04.02.04	98	Emissionsmessungen mit und ohne DPF „Bb“
5.1.5.1.3 DPF „Dc“		
05.02.04	0	Einbau DPF „Dc“, BHKW gestartet, Emissionsmessungen, BHKW abgestellt
06.02.04	26	BHKW abgestellt, Ausbau DPF „Dc“, Reinigung mit Druckluft,
25.02.04	30	Einbau DPF „Dc“, BHKW gestartet, Leistung: 9 kW _{el} BHKW automatisch abgestellt
26.02.04	33	BHKW gestartet, BHKW abgestellt, DPF „Dc“ ausgebaut, Filter mit Druckluft gereinigt, BHKW gestartet, BHKW abgestellt

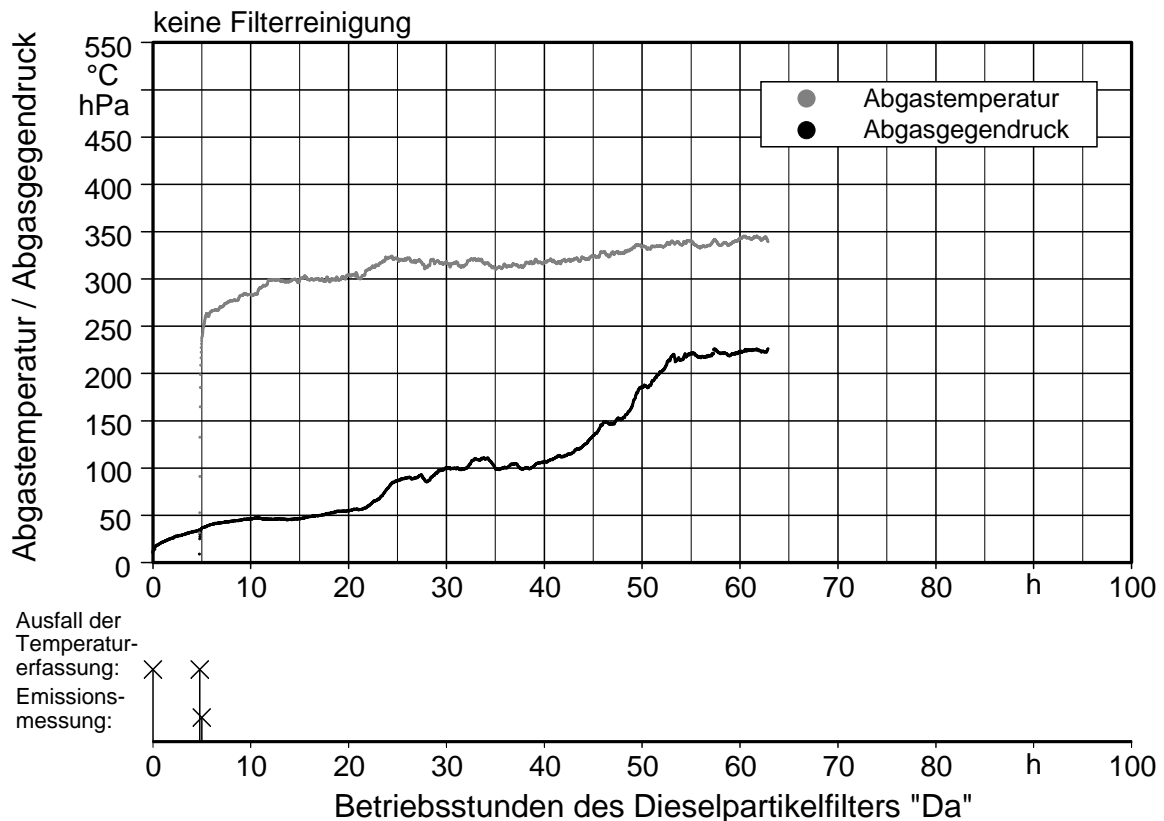


Abbildung 27: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Da“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

Emissionsmessungen mit dem Filter „Da“ fanden nach etwa fünf Betriebsstunden statt. Die Ergebnisse der Emissionsmessung sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Am 6.11.03 wurde eine Abgasheizung unmittelbar vor dem Dieselpartikelfilter eingebaut, um insgesamt höhere Abgastemperaturen insbesondere auch schon während der Warmlaufphase des BHKW erreichen zu können.

Der Dieselpartikelfilter „Db“ wurde am 26.01.04 eingebaut und in Betrieb genommen. Innerhalb der ersten 50 Betriebsstunden war ein Abgasgegendruck zwischen etwa 50 und 80 mbar zu verzeichnen. Ab der 50. Betriebsstunde kam es zu einem langsamen Anstieg des Abgasdrucks, der nach weiteren ca. 48 Betriebsstunden einen Wert von ca. 150 mbar annahm. Die Abgastemperatur schwankte bei Dauerbetrieb nur wenig und lag ab etwa der 20. Betriebsstunde bei ca. 380 °C.

Am 04.02.04 fanden nach insgesamt etwa 95 Betriebsstunden die Emissionsmessungen mit dem Partikelfiltersystem „Db“ statt (Kapitel 5.2). Anschließend wurde der Filter ausgebaut.

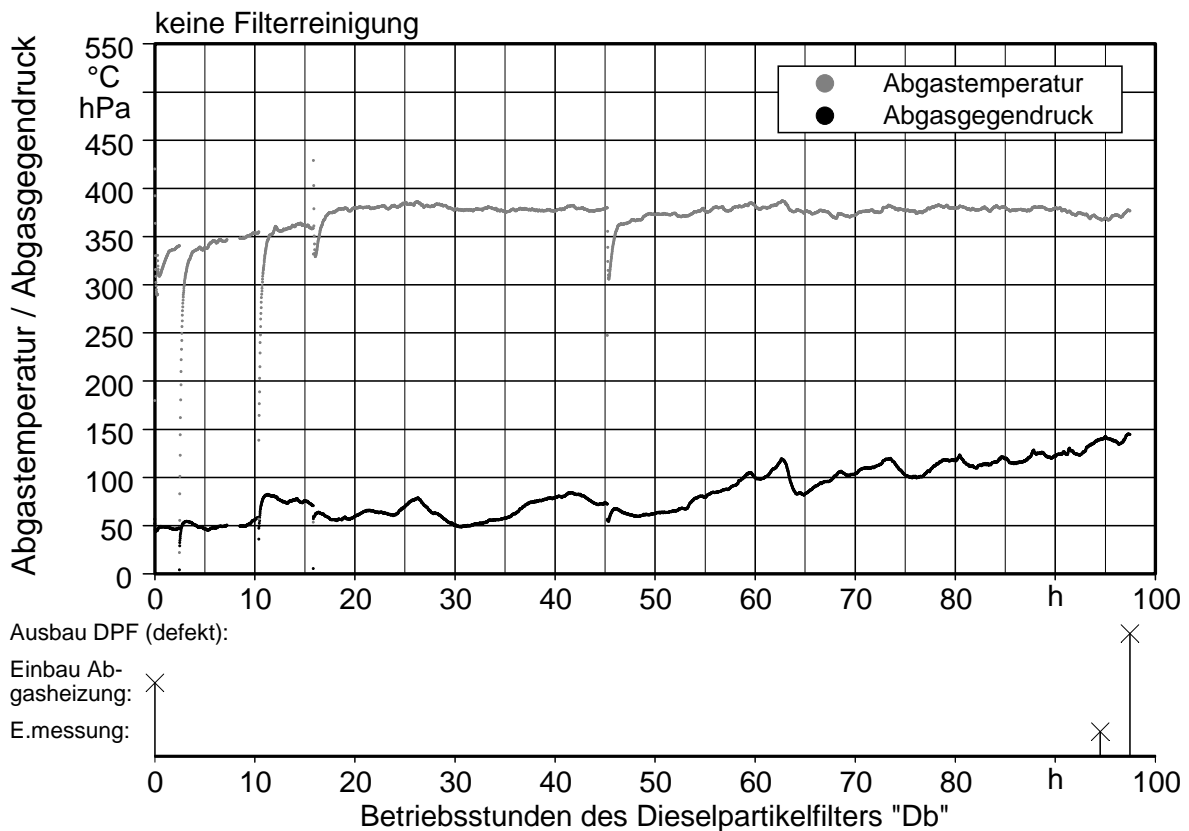


Abbildung 28: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Db“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

Der Partikelfilter „Dc“ wurde am 05.02.04 eingebaut und war bis zum 26.02.04 insgesamt etwa 36 Betriebsstunden im Einsatz. Bereits während der ersten 26 Betriebsstunden erfolgte ein Druckanstieg von ca. 25 auf ca. 250 mbar. Im gleichen Zeitraum lag die Abgastemperatur bei etwa 370-380 °C. Der Filter wurde ausgebaut, von Hand mit Druckluft gereinigt und anschließend wieder in das BHKW eingebaut. Innerhalb der darauffolgenden 9 Stunden kam es zu einem sehr schnellen Druckanstieg von anfänglich 30 auf 180 mbar. Die Abgastemperatur nahm auf ca. 420 °C zu. Wegen des schnellen Druckanstiegs wurde der Filter wieder ausgebaut und mit Druckluft gereinigt. Nach Wiedereinbau des Filters wurde dieser noch ca. 1,5 Stunden betrieben, wobei sich wieder ein sehr schneller Druckanstieg auf bis zu 200 mbar abzeichnete. Schließlich wurde die Untersuchung mit dem Filter „Dc“ beendet.

Die Emissionsmessungen mit dem Filter „Dc“ fanden am 05.02.04 nach einer Einsatzstunde statt.

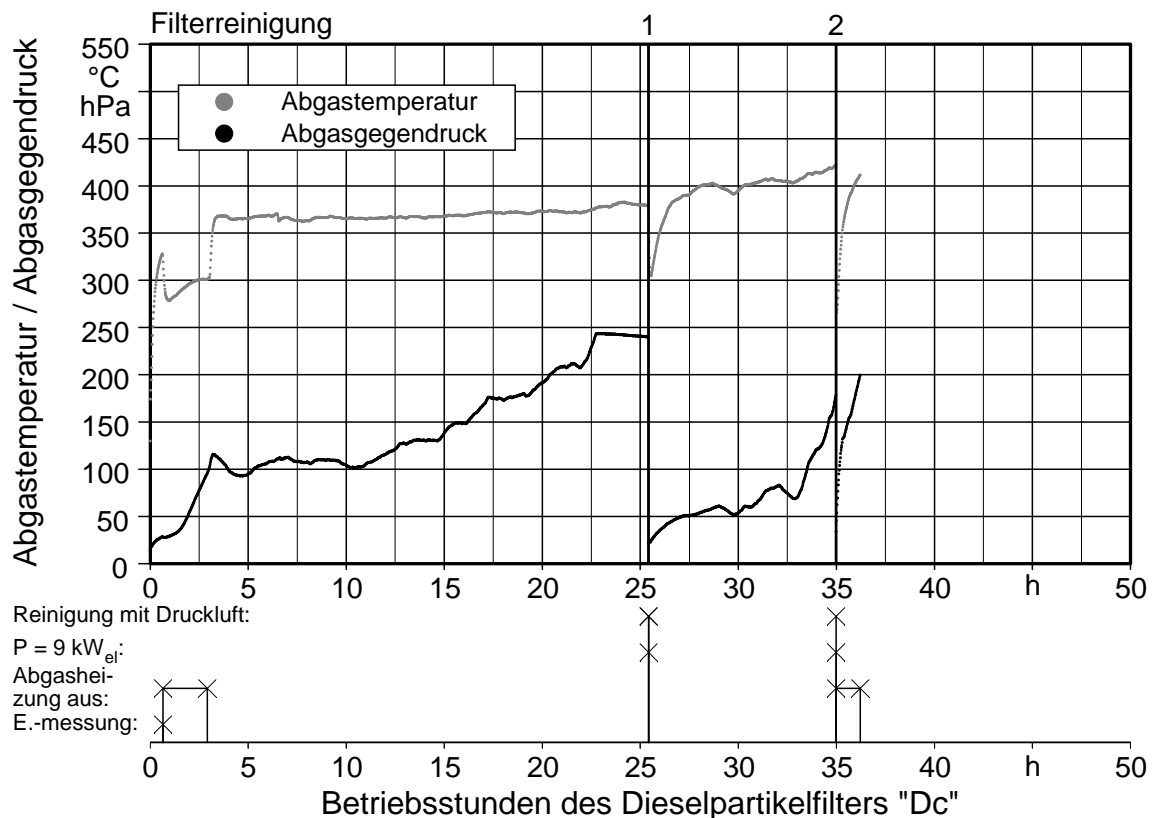


Abbildung 29: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „Dc“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

5.1.6 Partikelfiltersystem „E“

Bevor das Dieselpartikelfiltersystem „E“ in das BHKW des TFZ eingebaut wurde, war ein Umbau der Abgasstrecke aufgrund der Baugröße des Filters erforderlich. Zusätzlich wurde eine leistungsfähige Abgasheizung integriert, da das Partikelfiltersystem „E“ laut Herstellerangaben eine Abgastemperatur von ca. 450 °C zur Filterregeneration benötigt.

Das Partikelfiltersystem „E“ wurde insgesamt 628 Stunden am BHKW des TFZ betrieben (Tabelle 18, Abbildung 30). Während dieser Zeit erfolgte sechs mal eine Reinigung von Hand durch Absaugen oder Waschen in kaltem Wasser. Zu Beginn der Untersuchungen mit dem Filter „E“ stieg bereits kurz nach dem Einschalten des BHKW der Abgasdruck auf nahezu 150 mbar an. Mit steigender Abgastemperatur jedoch sank der Druck wieder auf weniger als 50 mbar ab. Das BHKW wurde anfänglich nur tagsüber betrieben, um zum einen den Filter im Betrieb überwachen zu können und zum anderen um eine Überhitzung der Abgasheizung im Falle einer automatischen Abschaltung des BHKW verhindern zu können. Bis zur ersten Filterreinigung nach 122 Stunden, stieg der Abgasdruck immer wieder nach dem Einschalten des Aggregats deutlich an und ging mit steigender Abgastemperatur auch wieder zurück. Nach 122 Betriebsstunden allerdings war trotz Abgastemperaturen von bis zu 500 °C keine Minderung des Abgasdrucks mehr zu beobachten. Daraufhin wurde der Filter ausgebaut und gemäß Rücksprache mit dem Hersteller geöffnet, die Filterkerzen abgesaugt und wieder in die Abgasstrecke des BHKW eingebaut.

Tabelle 18: Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems (DPF) „E“

Datum	Betriebsstunden des DPF „E“	Ereignis
	0	Umbau Abgasheizung
28.05.04	0	Emissionsmessung ohne DPF, Einbau DPF, BHKW gestartet, Emissionsmessungen mit DPF, BHKW abgestellt
01.06.04	2	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
02.06.04	9	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
03.06.04	18	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
04.06.04	23	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
07.06.04	27	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
08.06.04	29	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
09.06.04	37	BHKW gestartet, Leistungsvariation 6 kW _{el} /7 kW _{el} , BHKW abgestellt
11.06.04	43	BHKW gestartet, BHKW abgestellt
14.06.04	45	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
15.06.04	52	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
16.06.04	61	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
17.06.04	69	Abgasheizungsüberwachung eingebaut, BHKW gestartet, BHKW abgestellt
18.06.04	77	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
21.06.04	84	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
22.06.04	92	BHKW gestartet, Leistungsvariation 5 kW _{el} /7 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
23.06.04	104	BHKW gestartet, Leistungsvariation 6 kW _{el} /7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
24.06.04	113	BHKW gestartet, Leistungsvariation 6 kW _{el} /7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
25.06.04	119	Isolation Abgasrohr, BHKW gestartet, Leistungsvariation 4 kW _{el} /5 kW _{el} /6 kW _{el} /7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt, DPF ausgebaut, gereinigt durch Absaugen, DPF eingebaut
29.06.04	123	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , Abgasheizung aus- und eingeschalten, BHKW abgestellt
30.06.04	126	BHKW gestartet, Leistungsvariation 8 kW _{el} /9 kW _{el} , BHKW abgestellt
01.07.04	134	BHKW gestartet, BHKW zweimal abgestellt, zweimal gestartet, abgestellt
12.07.04	139	BHKW gestartet, Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt
13.07.04	150	BHKW gestartet, Leistungsvariation 6 kW _{el} /7 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt, DPF ausgebaut, Oxidationskatalysator defekt, Oxikatmaterial im DPF abgelagert, Riss im Abgaskrümmen, Abgaskrümmen erneuert, Oxikat nicht mehr eingebaut, DPF gereinigt durch Absaugen und Waschen, DPF eingebaut
14.07.04	157	BHKW gestartet, Leistungsvariation 2 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el} , BHKW abgestellt
15.07.04	158	BHKW gestartet, Leistungsvariation 4 kW _{el} /8 kW _{el} /9kW _{el}
16.07.04	183	BHKW abgestellt
19.07.04	188	BHKW gestartet
20.07.04	208	Datenaufzeichnung kurzzeitig ausgefallen
21.07.04	232	BHKW abgestellt, gestartet, abgestellt, DPF „E“ ausgebaut, gereinigt (Absaugen und Waschen), eingebaut
27.07.04	240	BHKW gestartet, Leistungsvariation 5 kW _{el} /8 kW _{el} , BHKW abgestellt, Ölwechsel, BHKW gestartet
29.07.04	288	Leistungsvariation 5 kW _{el} /8 kW _{el} , Kraftstofftankwechsel
30.07.04	311	BHKW abgestellt
03.08.04	316	BHKW gestartet, abgestellt, Wasser im Kraftstoffsystem durch Rückstand im Tank, Kraftstoffsystem gespült, BHKW gestartet
06.08.04	386	BHKW abgestellt
09.08.04	391	BHKW gestartet
10.08.04	413	Leistungsvariation 7 kW _{el} /8 kW _{el} , Emissionsmessungen, BHKW abgestellt
11.08.04	423	DPF „E“ ausgebaut, gereinigt (Absaugen und Waschen), eingebaut, Emissionsmessungen mit und ohne DPF „E“
12.08.04	445	Emissionsmessungen mit DPF „E“
13.08.04	471	BHKW abgestellt
16.08.04	471	BHKW gestartet, abgestellt, gestartet
19.08.04	543	BHKW abgestellt, DPF „E“ ausgebaut, gereinigt (Absaugen und Waschen), eingebaut
24.08.04	543	BHKW gestartet
27.08.04	628	BHKW abgestellt

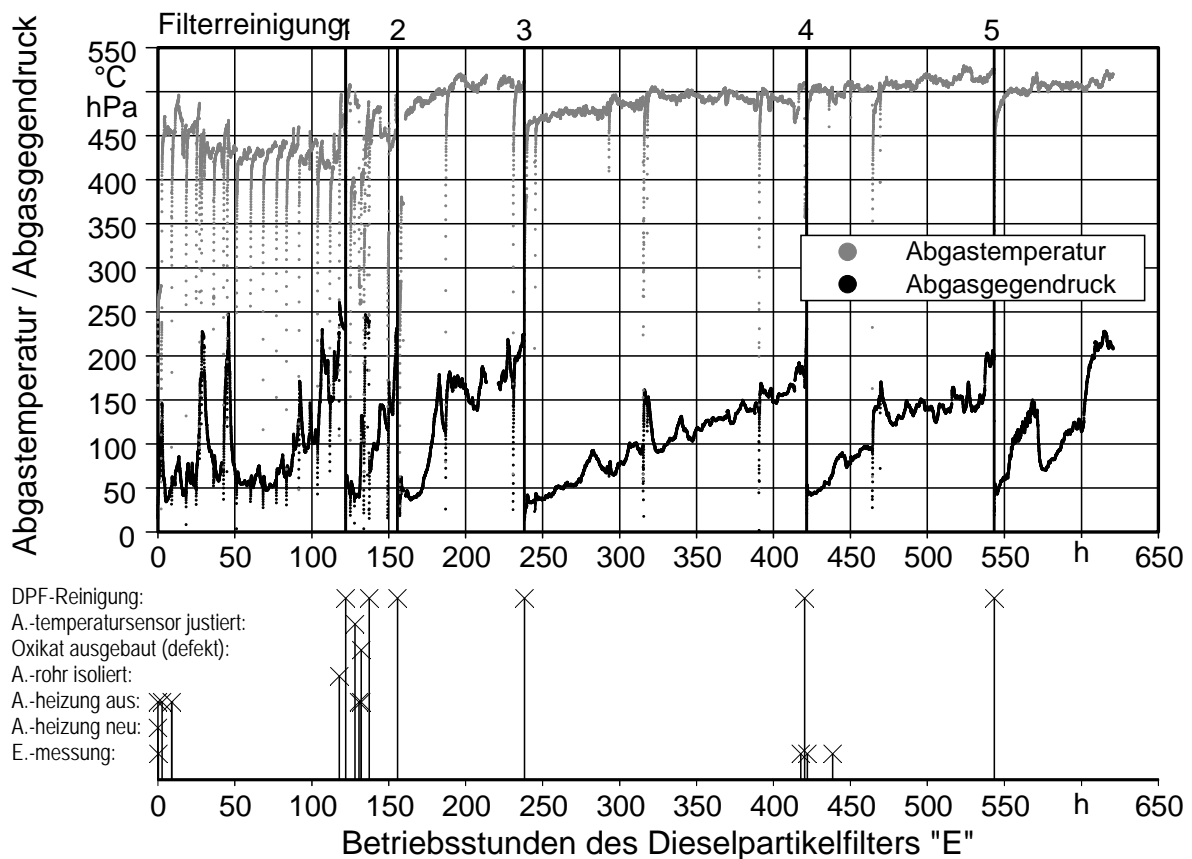


Abbildung 30: Abgastemperatur, Abgasgegendruck und Ereignisse beim Einsatz des Dieselpartikelfiltersystems „E“ bezogen auf die Betriebsstunden des Filters

Nach der Reinigung war der Abgasdruck wieder auf etwa 50 mbar abgefallen und lag damit in etwa so hoch wie im neuen Zustand. Allerdings stieg der Abgasgegendruck bereits innerhalb von 34 Betriebsstunden wieder deutlich an, so dass eine erneute Filterreinigung bei insgesamt 156 Filtereinsatzstunden notwendig wurde. Dabei wurde bemerkt, dass sich ein große Menge von ca. 700 g an sandartigem Material im Filtergehäuse angesammelt hatte. Da dieses sowohl aufgrund des Aussehens als auch aufgrund der kurzen Betriebszeit nicht aus dem Kraftstoff oder Motoröl stammen konnte, wurde vermutet, dass dieses Material vom Oxidationskatalysator stammen musste. Beim Ausbau des Oxidationskatalysators wurde diese Vermutung bestätigt. Dieser war zerbrochen und löste sich durch Reibungskräfte, hervorgerufen durch Motorvibrationen und Abgasstrom auf (Abbildung 31). So gelangte feines sandartiges Material bis zum Dieselpartikelfilter, wo es sich ablagerte (Abbildung 32). Die Reinigung erfolgte durch Absaugen des Filtermaterials und durch Waschen der Filterkerzen in Wasser. Anschließend wurde der Dieselpartikelfilter wieder eingebaut. Beim Ausbau des Oxidationskatalysators wurde bemerkt, dass sich im Abgaskrümmen ein Riss gebildet hatte aus dem Abgas entweichen konnte. Der Abgaskrümmen wurde erneuert und nach Rücksprache mit dem Filterhersteller wurde beschlossen auf einen Oxidationskatalysator für die weiteren Untersuchungen zu verzichten.

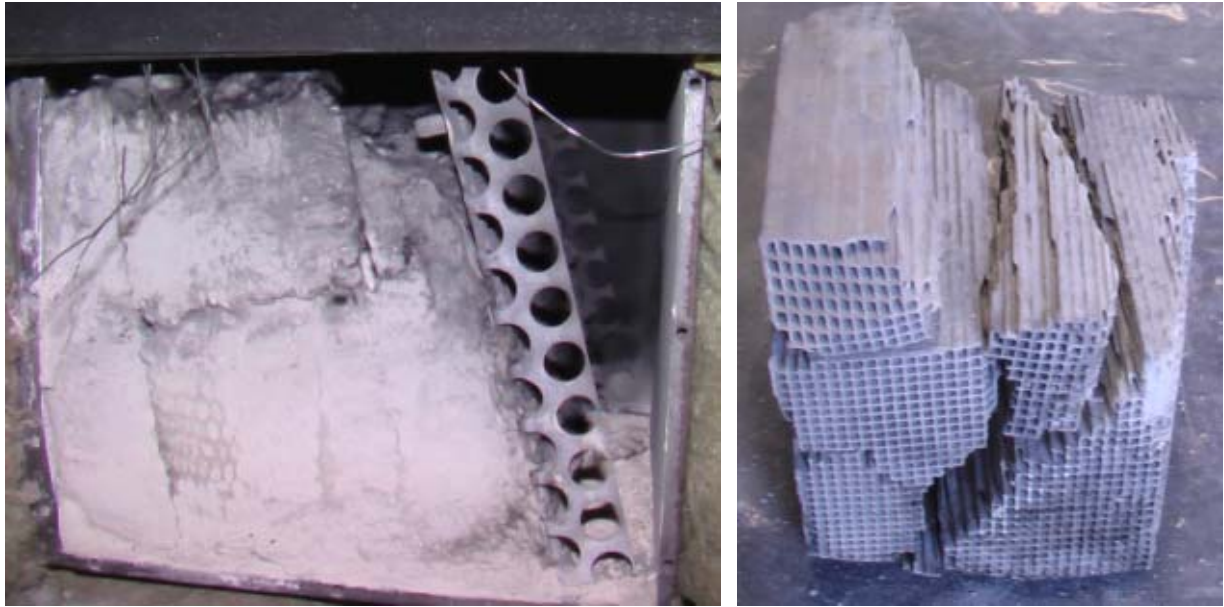


Abbildung 31: Oxidationskatalysator nach mechanischer Beschädigung in eingebautem (links) und ausgebautem (rechts) Zustand



Abbildung 32: Abgaspartikelfilter „E“ mit sandartigem Material des beschädigten Oxidationskatalysators

Der Abgasdruck konnte durch die Reinigung des Partikelfiltersystems „E“ wieder auf weniger als 50 mbar Druck gesenkt werden. Innerhalb von 82 Betriebsstunden stieg der Abgasdruck wieder auf über 200 mbar an. Durch verbesserte Isolierung der Abgasstrecke konnte die Abgastemperatur auf Werte von mehr als 500 °C erhöht werden. Bei etwa 238 Filterbetriebsstunden wurde die dritte Filterreinigung durch Absaugen und Waschen der Filterkerzen vorgenommen.



Abbildung 33: Filterkerzen des Partikelfiltersystems „E“ in beladenem Zustand (links) und teilweise gereinigt (rechts)

In der darauffolgenden Betriebszeit zwischen der 238. und 422. Betriebsstunde des Filters „E“ stieg der Abgasdruck langsam und gleichmäßig von ca. 40 auf 200 mbar an. Dies war mit insgesamt 184 Stunden auch die längste Betriebszeit aller im Rahmen dieser Untersuchung getesteten Dieselpartikelfilter. Der Filter wurde wieder ausgebaut, gereinigt (Absaugen, Waschen) und wieder eingebaut (Abbildung 33).

Es folgten noch einmal zwei Betriebsintervalle von 121 und 85 Bh mit Partikelfiltersystem „E“, bevor die Untersuchungen mit diesem nach insgesamt 628 Bh einstweilen eingestellt wurden.

5.2 Emissionsverhalten

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen aller getesteten Dieselpartikelfiltersysteme sind in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Durch die Dieselpartikelfiltersysteme werden neben den Partikelmasseemissionen auch weitere Emissionskomponenten, insbesondere Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff aber auch Stickstoffoxide durch die katalytischen Rußfilterbeschichtungen und die Veränderung des Abgasgedrucks beeinflusst.

Die Balken in Abbildung 34 bis Abbildung 37 entsprechen den aus n aufeinanderfolgenden Messungen gemittelten Halbstundenmittelwerten ohne bzw. mit Dieselpartikelfiltersystem. Die Fehlerbalken geben den Bereich zwischen dem niedrigsten und dem höchsten ermittelten Halbstundenmittelwert an. Eine Beschreibung der als „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ bezeichneten Partikelfiltersysteme erfolgt in Kapitel 3.2.

5.2.1 Partikelmasse (Staub)

Die Staubemissionen von mit Rapsöl betriebenen BHKW können mit den getesteten Dieselpartikelfiltersystemen zum Teil deutlich reduziert werden. Der angestrebte Zielwert für Staubemissionen (20 mg/Nm^3) wird in 9 von 13 Fällen unterschritten (Abbildung 34). Sofern dieser Zielwert eingehalten wird, können im Vergleich zum Betrieb ohne Dieselpartikelfilter Reduktionsraten von 74 bis 98 % erreicht werden.

Die größte Effektivität weist Partikelfilter „Bb“ im neuen Zustand auf, durch den die Staubemissionen von 89 mg/Nm^3 (Messung 7) auf 2 mg/Nm^3 (Messung 8) gesenkt werden konnten. Nach ca. 220 Betriebsstunden sank jedoch im Vergleich zum Neuzustand die Staubreduktion durch Filter „Bb“ von 98 auf 57 % (Messung 10). Ursache dafür war ein Schaden am Filter, der auf Grund von zu hohem Abgasgegendruck und/oder eines werksseitigen Defekts aufgetreten war.

Mit dem Partikelfilter „Ba“ wurden nach 127 Bh bei Messung 6 sogar höhere Staubemissionen als ohne Partikelfilter (Messung 5) ermittelt. Ursache dafür war eine Filterverstopfung, die einen hohen Abgasgegendruck mit starker Motorbelastung und höheren Partikelmasseemissionen als ohne Filter nach sich zog. Hinzu kam, dass gleichzeitig die Abscheideleistung ungenügend war, was auch schon bei der ersten Messung mit dem Filter „Ba“ im neuen Zustand festgestellt wurde.

Mit den baugleichen Partikelfiltern „Da“ und „Dc“ wurden im Neuzustand gute Abscheideleistungen erzielt (Messung 14 und 17). Mit dem ebenfalls baugleichen Filter „Db“ lagen allerdings nach ca. 95 Betriebsstunden (Messung 15) die Partikelmasseemissionen mit mehr als 30 mg/Nm^3 deutlich über den geforderten Zielwert von 20 mg/Nm^3 . Dies ist wahrscheinlich auf eine mechanische Beschädigung des Filters zurückzuführen, die sich im eingebauten Zustand während des Betriebs ergeben hatte.

Die Partikelmasseemissionen mit den Filtersystemen „A“ und „C“ im Neuzustand (Messungen 2 und 12) lagen bei etwa 10 mg/Nm^3 . Im Vergleich dazu lagen die Partikelmasseemissionen ohne Filter bei ca. 55 und 71 mg/Nm^3 (Messungen 1 und 11). Emissionsmessungen nach mehreren Filtereinsatzstunden wurden bei diesen beiden Systemen nicht durchgeführt, da Filter „A“ eine erhebliche innere Beschädigung erfuhr und Partikelfiltersystem „C“ aufgrund seiner Ausführung (keine katalytische Beschichtung und damit keine Regeneration) nicht für einen Langzeiteinsatz geeignet war.

Die Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „E“ fanden im Neuzustand (Messung 19), nach ca. 413 Bh, bzw. 181 Bh nach der dritten Reinigung (Messung 20), nach 423 Bh, bzw. 0 Bh nach der vierten Reinigung (Messung 22) und nach 445 Bh, bzw. 22 Stunden nach der vierten Reinigung (Messung 23) statt. Bei allen vier Messungen lagen die Partikelmasseemissionen mit ca. 9 bis 18 mg/Nm^3 unter dem geforderten Zielwert von 20 mg/Nm^3 und deutlich unter den Partikelmasseemissionen ohne Partikelfilter von ca. 90 mg/Nm^3 . Die niedrigste Partikelmassereduzierung mit Filter „E“ im Vergleich zur Referenzmessung ohne Partikelfilter schlechteste Abscheiderate wurde bei Messung 20 unmittelbar vor der vierten Filterreinigung ermittelt. Dies ist möglicherweise auf den hohen Abgasgegendruck bei hoher Filterbelastung und der dadurch erhöhten Partikelmasseemissionen zurückzuführen. Zudem gelangen mit steigendem Druckgefälle am Filter zunehmend mehr Partikel mit dem Abgasstrom durch das Filtermedium, was sich bei der Emis-

onsmessung bemerkbar macht. Eine Verschlechterung der Abscheideleistung des Filters konnte während des Beobachtungszeitraums nicht festgestellt werden. Bei Messung 23 etwa 22 Bh nach der vierten Filterreinigung wurden mit dem Partikelfiltersystem „E“ sogar die niedrigsten Partikelmasseemissionen ermittelt.

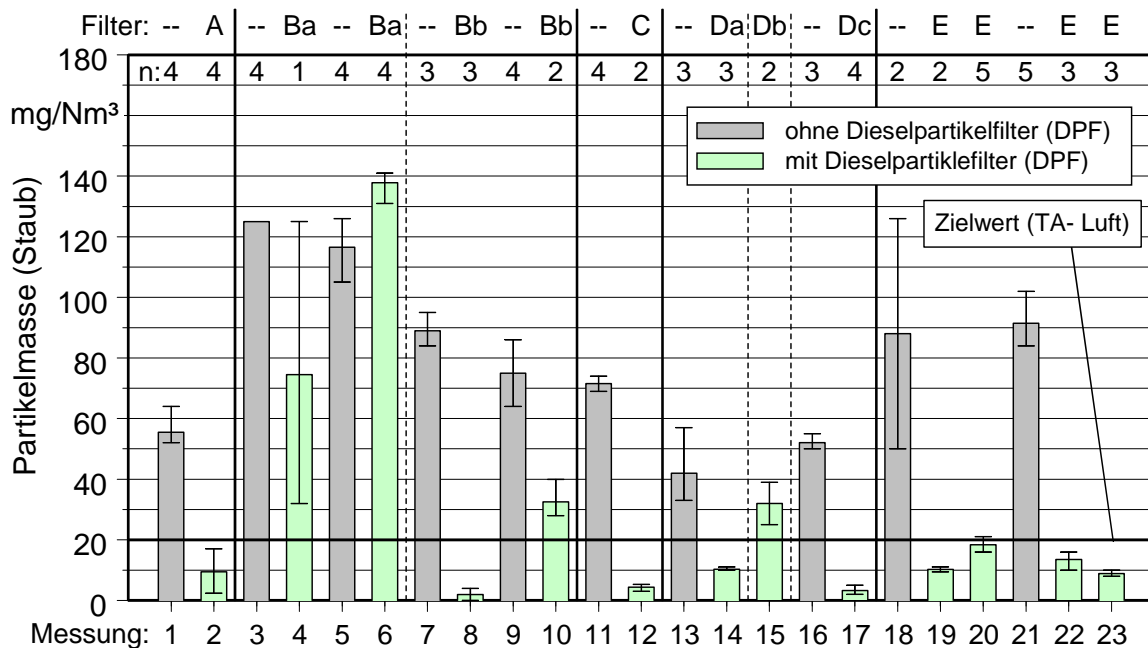


Abbildung 34: Partikelmasseemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, Angaben in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O₂)

5.2.2 Kohlenmonoxid (CO)

Die bei den 23 Emissionsmessungen ermittelten Kohlenmonoxidemissionen sind in Abbildung 35 dargestellt. Auffällig sind dabei die hohen Schwankungsbreiten zwischen den einzelnen Messungen. Insbesondere bei den Messungen 13 bis 19 sind die CO-Konzentrationen im Abgas am niedrigsten, unabhängig davon, ob ein Partikelfilter eingebaut war (Messungen 14, 15, 17, 19) oder nicht (Messungen 13, 16, 18). Dies liegt daran, dass nur während dieses Zeitraums ein Oxidationskatalysator eingebaut war, der zur verstärkten Oxidation von NO zu NO₂ diente, um damit eine kontinuierliche Regeneration des Partikelfilters „D“ erreichen zu können. Mit Hilfe dieses Oxidationskatalysators konnten die CO-Konzentrationen auf ca. 10-60 mg/Nm³ reduziert werden. Die Kohlenmonoxidemissionen lagen damit höchstens auf 20 % des für diese Anlagengröße gültigen Orientierungswertes der TA-Luft von 300 mg/Nm³.

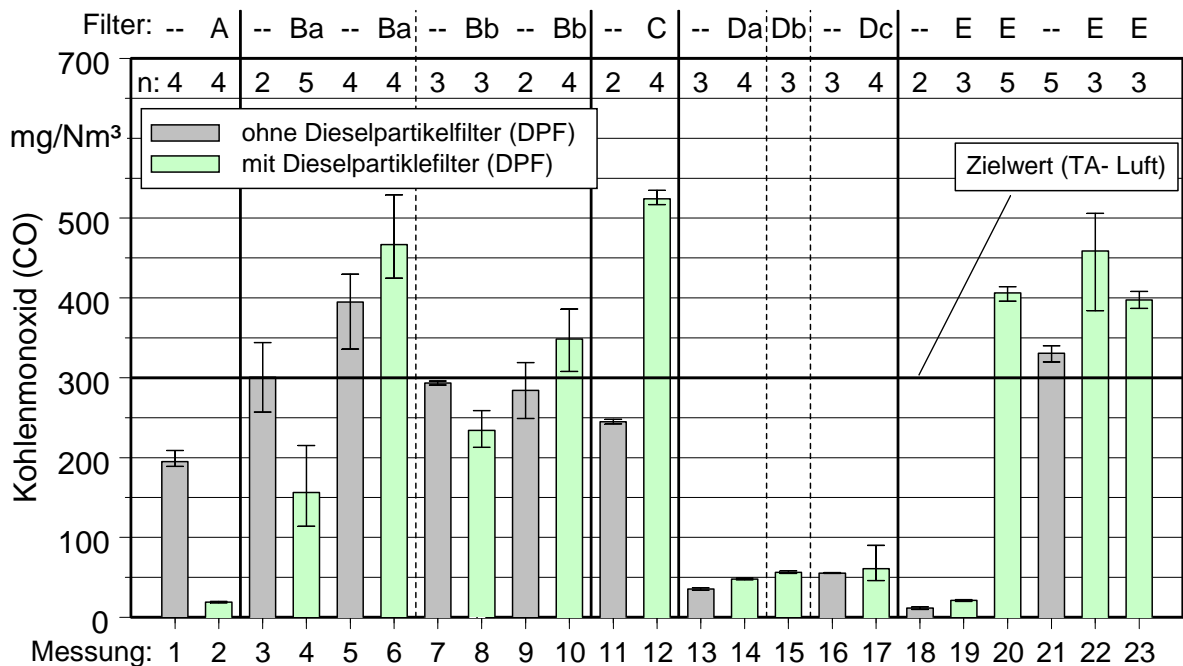


Abbildung 35: Kohlenmonoxidemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, CO-Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O₂)

Auf ebenso niedrigem Niveau, nämlich ca. 20 mg/Nm³, lagen die Kohlenmonoxidemissionen bei der Messung 2 mit dem Dieselpartikelfilter „A“, der mit einer hochaktiven katalytischen Beschichtung zur Reduzierung der Rußabbrandtemperatur (Regenerierung) versehen war. Die CO-Emissionen verringerten sich mit Dieselpartikelfilter „A“ um fast 90 % des Wertes ohne Partikelfilter (Messung 1).

Auch die Filter „Ba“, „Bb“ und „E“ besaßen laut Herstellerangaben eine katalytische Beschichtung zur Senkung der Rußabbrandtemperatur, die aber nur im Falle des Filters „Ba“ und „Bb“ im jeweils neuen Zustand (Messung 4 und 8) zu einer geringfügigen Minderung der CO-Emissionen führte. Bereits nach wenigen Einsatzstunden war auch bei diesen beiden Filtern ebenso wie bei dem Filtersystem „E“ eine Erhöhung der CO-Emissionen zwischen ca. 20 und 40 % (Messungen 6, 10, 20, 22, 23) im Vergleich zum BHKW-Betrieb ohne Partikelfiltersystem (Messungen 5, 9, 11, 21) zu verzeichnen. Die katalytischen Beschichtungen der hier getesteten Filter können insbesondere bei beladenen Filtern (mit Ausnahme des Partikelfilters „A“) zu keiner Verbesserung der CO-Emissionen verglichen mit dem Betrieb ohne Filter beitragen. Der Einbau eines Partikelfilters ohne zusätzlichen Oxidationskatalysator führt also meist zu höheren CO-Emissionen, so dass der Orientierungswert nach TA-Luft von 300 mg/Nm³ häufig überschritten wird.

Der höchste Anstieg der CO-Emissionen ist mit Partikelfiltersystem C zu beobachten, das ohne katalytische Beschichtung zu mehr als einer Verdopplung der Kohlenmonoxidemissionen im Abgas im Vergleich zu BHKW-Betrieb ohne Partikelfiltersystem führte.

5.2.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Die bei den Messungen mit und ohne Dieselpartikelfilter ermittelten Stickstoffoxidemissionen sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Konzentrationen schwanken zwischen ca. 1500 und 2200 mg/Nm³. Damit wird der Orientierungswert für Stickstoffoxidemissionen nach TA-Luft in Höhe von 3000 mg/Nm³ durchweg deutlich unterschritten.

Eine deutliche Beeinflussung der Stickstoffoxidemissionen durch das Partikelfiltersystem konnte unabhängig von der Art des Partikelfiltersystems nur bei den Emissionsmessungen festgestellt werden, bei denen ein hoher Abgasgegendruck von ca. 200 mbar und mehr herrschte. So wurden bei den Messungen 6, 8, 10, 12, und 20 mit ca. 1500-1600 mg/Nm³ die niedrigsten NO_x-Konzentrationen ermittelt, die um bis zu einem Viertel unterhalb des Wertes ohne Partikelfilter lagen. In den anderen Fällen kam es lediglich entweder zu einem leichten Rückgang oder zu einem geringfügigen Anstieg der Stickstoffoxide mit Partikelfilter im Vergleich zu den Messungen ohne Partikelfilter.

Eine Abnahme von NO_x mit steigendem Abgasgegendruck erklärt sich dadurch, dass bedingt durch den Rückstau des Abgases im Krümmer, die Abgase den Verbrennungsraum nicht vollständig verlassen können und so zu einem geringeren Sauerstoffangebot im Brennraum und niedrigeren Temperaturspitzen führt. Beides sind Faktoren, die der NO_x-Bildung entgegenwirken.

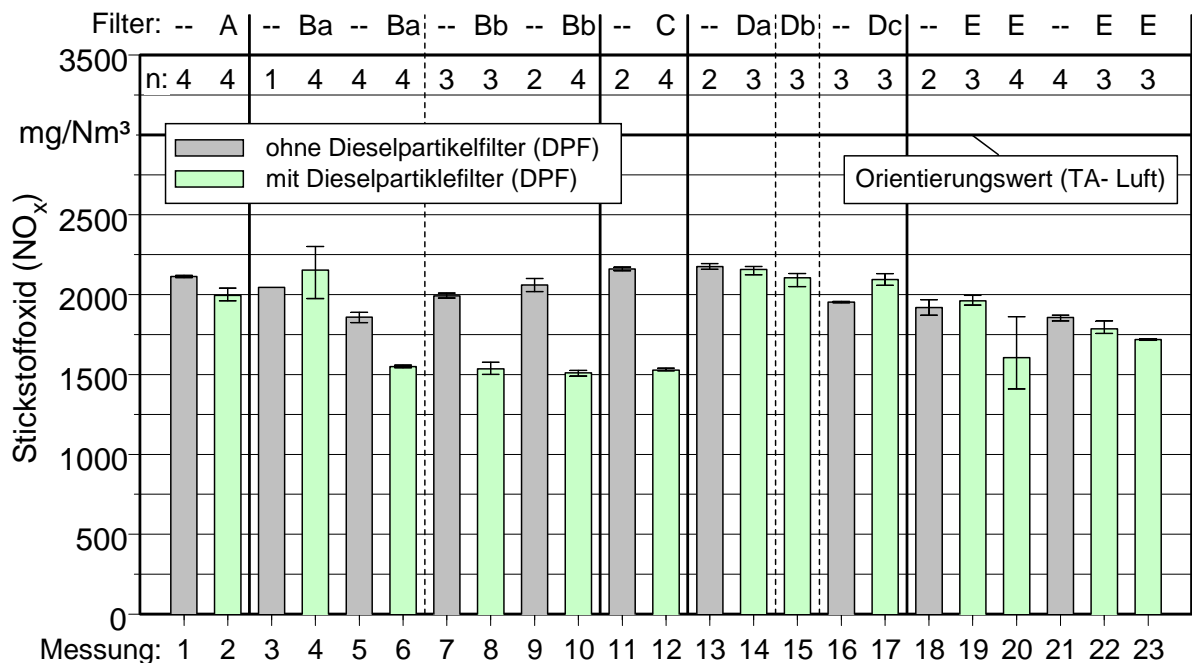


Abbildung 36: Stickstoffoxidemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, NO_x-Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O₂)

5.2.4 Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C)

Die Gesamtkohlenstoffemissionen sind in Abbildung 37 dargestellt. Bei den Messungen 7 bis 12 sowie 18 und 19 wurden keine Gesamtkohlenstoffemissionen bestimmt. Die Gesamtkohlenstoffkonzentrationen liegen zwischen ca. 2,5 und 17,5 mg/Nm³ und verhalten sich in der Tendenz ähnlich wie die Partikelmassemissionen ohne aber Aufschluss über die Absolutwerte geben zu können.

Filter „Ba“ sowie die baugleichen Filter „Da“ und „Dc“ verhalten sich uneinheitlich auf die Gesamtkohlenstoffemissionen, wohingegen Filter „E“ zu einem leichten und der mit einer hochaktiven katalytischen Beschichtung versehene Filter „A“ zu einem deutlichen Rückgang auf etwa ein Fünftel des Ausgangswertes ohne Filter führte.

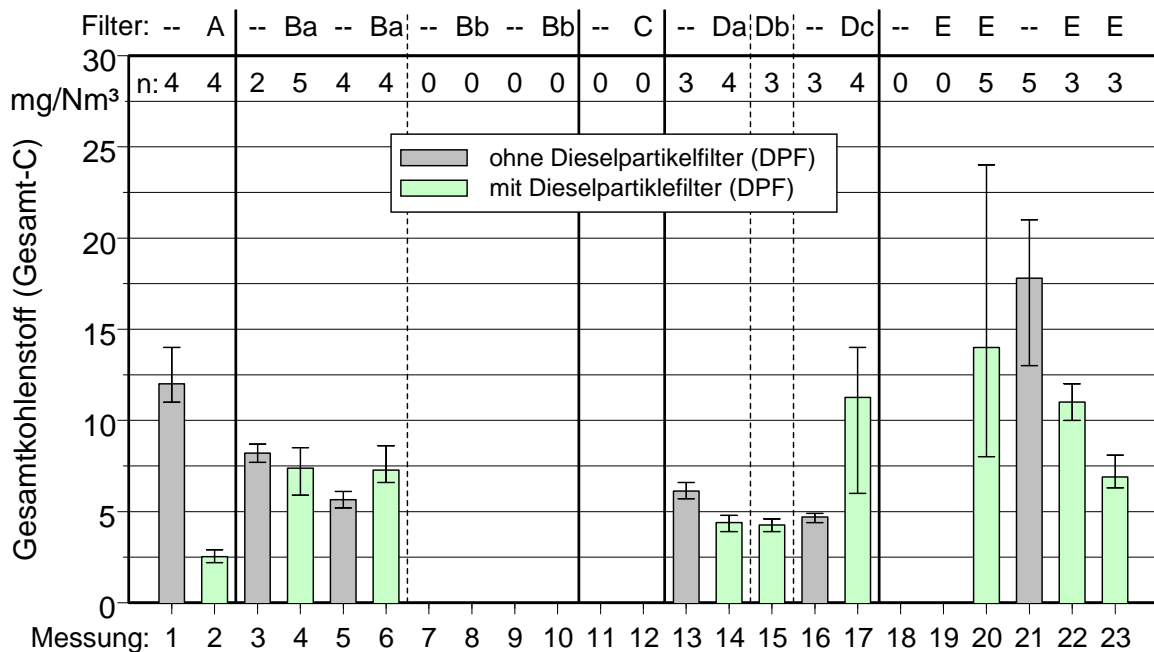


Abbildung 37: Gesamtkohlenstoffemissionen eines rapsölbetriebenen BHKW ohne und mit Dieselpartikelfilter „A“, „Ba“, „Bb“, „C“, „Da“, „Db“, „Dc“ und „E“ (n Halbstundenmittelwerte, Gesamt-C-Konzentration in Milligramm pro Normkubikmeter (trockenes Abgas unter Normbedingungen 0 °C, 1013 mbar) bezogen auf 5 % O₂)

6 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden unterschiedliche Partikelfiltersysteme von fünf verschiedenen Herstellern im Praxiseinsatz überprüft. Die Partikelfiltersysteme sind primär für den Einsatz von Dieselkraftstoff konzipiert worden und wurden nicht speziell für den Einsatz von Rapsöl angepasst. Mit den Partikelfilterherstellern wurden bereits im Vorfeld die speziellen Einsatzbedingungen in dem für die Untersuchung verwendeten rapsölbetriebenen BHKW diskutiert. Neben Abgasvolumenstrom und Partikelmasseemissionen wurden auch die typischen Kraftstoffkennwerte von Rapsöl berücksichtigt. Erfahrungen mit dem Einsatz von Partikelfiltersystemen bei Biodiesel oder Rapsöl lagen in noch geringem Umfang bei zwei Herstellern vor.

Einbau, Betrieb und Wartung der Partikelfiltersysteme erfolgte in enger Abstimmung mit dem Hersteller. Da die eingesetzten Filtersysteme unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Regenerationstemperatur aber auch der Baugröße aufwiesen, war ein mehrmaliger Umbau des BHKW notwendig. So wurden zwei verschiedenartige Abgasheizungen integriert, die ausschließlich zu Versuchszwecken für Untersuchungen mit höheren Abgastemperaturen eingesetzt wurden. Es ist nicht beabsichtigt, dass derartige elektrische Heizsysteme im Praxisdauereinsatz verwendet werden sollen. Daneben wurde ein spezieller Oxidationskatalysator eingebaut sowie diverse weitere Umgestaltungen an der Abgasstrecke vorgenommen. Außerdem war es notwendig, einen zusätzlichen Lüfter in das BHKW einzubauen, der in den Sommermonaten für eine ausreichende Abfuhr der anfallenden Wärme sorgte. Sofern möglich wurde das BHKW mit den Partikelfiltern durchgehend betrieben. Allerdings war dies nicht immer möglich, wenn z.B. aufgrund eines hohen, bzw. schnell ansteigenden Abgasgedrucks die Betriebssicherheit des BHKW gefährdet war. In diesen Fällen wurde das BHKW nachts und an Wochenenden abgeschaltet.

Die Abgasemissionen des mit Rapsöl betriebenen BHKW wurden jeweils ohne und mit eingebautem Partikelfilter bestimmt. Die beiden korrespondierenden Messungen fanden entweder an einem Tag oder an unmittelbar aufeinanderfolgenden Tagen statt. Eine alternative - hier nicht durchgeführte - Messanstellung, bei der die Emissionen im Roh- und Reingas gleichzeitig gemessen werden, ist zwar zur Prüfung von Abgaspartikelfiltern geeignet, die Ergebnisse jedoch sagen nur bedingt etwas über die Minderungsrate emittierter Stäube und anderer Emissionskomponenten bei der Verwendung von Abgaspartikelfiltern in pflanzenölbetriebenen BHKW aus. Grund dafür ist, dass die Rohgasemissionen (vor dem Partikelfilter) stark durch den Partikelfilter selbst (Druckverlust) beeinflusst werden und insbesondere bei hohem Druckverlust nicht mit den Emissionen ohne eingebautem Partikelfilter verglichen werden können.

Nachfolgend werden die wichtigsten Untersuchungsergebnisse für die verschiedenen getesteten Partikelfiltersysteme diskutiert.

Das **Partikelfiltersystem „A“** wurde ausgewählt, da das Filtermedium (Keramikmonolith) in der Praxis weit verbreitet ist und sowohl bezüglich der Baugröße als auch den Kosten für kleine Stationäraggregate geeignet ist. Der Keramikmonolith des Filtersystems „A“ ist zudem mit einer hochaktiven katalytischen Beschichtung versehen, die laut Herstellerangaben eine Filterregeneration bei Temperaturen von weniger als 300 °C ermöglicht, so dass dieser auch bei niedrigen Abgastemperaturen, wie sie für langsamlaufende Stationärmotoren typisch sind, eingesetzt werden

kann. Die niedrige Regenerationstemperatur ermöglicht auch eine flexiblere Positionierung des Filters in der Abgasstrecke, was insbesondere bei Nachrüstungen von Bedeutung ist. So kann in vielen Fällen auch eine weniger motornahe Anbringung erfolgen, ohne dass aufgrund der Abgaswärmeverluste eine externe Energiezuführung zur Regeneration erforderlich wäre.

Das Partikelfiltersystem „A“ war insgesamt 182 Betriebsstunden im Einsatz. Die längsten Intervalle ohne externe Reinigung waren mit 85 bzw. 70 Betriebsstunden die beiden ersten (je ein Intervall in jede Durchströmungsrichtung des Filters). Dabei stieg der Abgasgegendruck von ca. 50 mbar auf 140 mbar im ersten bzw. 250 mbar im zweiten Intervall an. In den darauffolgenden drei Betriebsintervallen stieg der Abgasgegendruck bereits innerhalb von maximal 10 Betriebsstunden auf Werte bis zu 200 mbar an. Dies weist darauf hin, dass zumindest bei den ersten beiden Intervallen die Regeneration des Partikelfilters gut funktionierte. Allerdings sammelte sich während dieser Zeit eine größere Menge an unverbrennbaren Aschen im Filter an, die bei der externen Reinigung (Ausblasen mit Druckluft) nicht entfernt werden konnten. Diese Rückstände führten möglicherweise in der Folge zu dem beobachteten schnellen Druckanstiegen durch Zusetzung des Filters.

Bei den Emissionsmessungen nach 3 Betriebsstunden zeigte sich, dass die Konzentrationen aller ermittelten Abgaskomponenten (CO, HC, NO_x und Staub) beim Einsatz des Partikelfilters „A“ niedriger waren als ohne Filter, so dass die für diese Anlagengröße geltenden Orientierungs- und Zielwerte nach TA-Luft unterschritten wurden. Bei den Stickstoffoxiden war der Rückgang von 2100 mg/Nm³ auf 2000 mg/Nm³ erwartungsgemäß am niedrigsten. Eine Abnahme von NO_x kann durch den höheren Abgasgegendruck erklärt werden, der bei eingebautem Partikelfilter herrscht. Ein gewisser Rückstau des Abgases führt dann - ähnlich wie bei der Abgasrückführung - zur Minderung von NO_x. Deutlich hingegen war der Rückgang bei CO von 200 auf 20 mg/Nm³ bei Gesamt-C von 12 auf 2,5 mg/Nm³ und bei Staub von 55 auf 10 mg/Nm³, was auf die hochaktive katalytische Beschichtung des Keramikfilters und ein gutes Partikelrückhaltevermögen hindeutet. Auffällig war, dass die Staubemissionen über den Messtag hinweg abnahmen. So fielen die Halbstundenmittelwerte von anfänglich 17 mg/Nm³ auf etwa 2 mg/Nm³ bei der letzten Messung ab. Dies deutet auf eine verstärkte Filterwirkung durch zunehmende Partikelablagerung im Filtermedium hin.

Nach ca. 182 Stunden wurde der Filter ausgebaut und an den Hersteller zur Überprüfung gesandt. Dabei wurde eine hohe Rußbelastung von ca. 40 g festgestellt. Unverbrennbare Aschebestandteile machten etwa 0,2 g aus. Die gewonnene Asche zeigte eine ungewöhnliche Spiralform. Die Asche setzte sich hauptsächlich aus den Elementen Calcium, Zink, Schwefel und Phosphor etwa in den Verhältnissen Ca : Zn : S : P = 11,0 : 2,5 : 2,2 : 1,0 zusammen.

Innerhalb der 182 Betriebsstunden wurden etwa 600 l bzw. 550 kg Rapsöl verbraucht. Bei einem Calciumgehalt von 14 mg/kg Rapsöl beträgt bei einer unterstellten vollständigen Umsetzung ohne Verluste, die Masse des im Abgas mitgeführten Kraftstoffcalciums etwa 7,7 g. Die Laboranalyse der aus dem Partikelfiltersystem „A“ gewonnenen 0,2 g Asche ergab eine absolute Masse von lediglich ca. 15 mg Calcium. Das heißt, dass sich nur etwa 0,2 Masse-% des Brennstoffcalciums in der aus dem Partikelfilter gewonnenen Asche befanden. Der größte Teil wurde entweder nicht im Partikelfilter zurückgehalten oder bei den Reinigungsmaßnahmen entfernt. Außerdem dürfte es

durch den abwechselnd in umgekehrter Durchströmungsrichtung eingebauten Filterkörper zu einem Austrag eines Großteils der im jeweils vorangegangenen Intervall angesammelten Asche gekommen sein.

Unverbrennbare Aschebestandteile gelangen nicht nur durch die Verbrennung des Kraftstoffs in das Abgas, sondern auch durch mitverbranntes Motorenöl. Bei einer Calciumkonzentration im Motorenöl von ca. 3000 mg/kg und einem angenommenen Motorölverbrauch von ca. 1 l auf 1000 Betriebsstunden würde innerhalb von 182 Bh zusätzlich etwa 0,5 g Calcium unter der Annahme einer kompletten Umsetzung ohne Massenverlust im Abgas enthalten sein. Das Calcium aus dem Motoröl macht bei diesem Berechnungsbeispiel demnach etwa 6,5 % des aus dem Kraftstoff stammenden Calciums im Abgas aus.

Partikelfilter „A“ fiel bei der Überprüfung im Labor durch einen niedrigeren Druckverlust auf, als ein vergleichbarer Filterkörper. Daraufhin wurde der nach Außen intakt aussehende Filterkörper aufgesägt. Im Innern wies der Filter etwa eine tennisballgroße völlige Zerstörung der Strömungskanäle auf. Die Zerstörung war wahrscheinlich aufgrund von Hitze entstanden, die sich bei der Filterregeneration entweder im normalen Betrieb oder extern im Muffelofen ergeben hat.

Aufgrund des schnellen Druckanstiegs nach der Reinigung, ist anzunehmen, dass durch Ascheansammlung die katalytische Schicht des Rußfilters belegt war und der anfallende Ruß bei der vorherrschenden Abgastemperatur von ca. 370 °C nicht mehr regeneriert werden konnte. Dies führte zur Beladung des Filterkörpers mit erheblichen Rußmengen, welche bei der Entzündung im Innern des Filters zur Überhitzung führten.

Die Untersuchungen mit dem Filtersystem „A“ wurden eingestellt, weil zum einen die Filterreinigungsintervalle mit weniger als 100 Bh relativ kurz waren und zum anderen die Gefahr weiterer Filterzerstörungen aufgrund unzureichender Hitzebeständigkeit zu groß waren.

Das **Partikelfiltersystem „Ba“** wurde ausgewählt, da laut Herstellerangaben der Filter eine gute Hochtemperaturbeständigkeit und eine hohe Ascheaufnahmefähigkeit bietet sowie eine einfache Entaschung ermöglicht. Durch unterschiedlich gestaltete Wicklungsarten kann der Filter den jeweiligen Anforderungen hinsichtlich Abscheidegrad, Ascheaufnahmefähigkeit und Druckverlust optimiert werden. Der Filter ist katalytisch beschichtet und ermöglicht dadurch eine Rußabbrandtemperatur von ca. 420 bis 430 °C. Dieses Temperaturniveau kann beim Versuchs-BHKW bei höheren Abgasgedrücken erreicht werden. Somit sollte die Regeneration des Filters mit zunehmender Rußbeladung und steigender Abgastemperatur automatisch in Gang gesetzt werden. Da der Filter als Tiefenfilter arbeitet und der Filteraufbau (integriertes Drahtgeflecht) auch bei beladenem Filter einen Kontakt der katalytischen Schicht mit heißem Abgas gewährleistet, ist ein ständiger Wechsel von Beladungszyklen und Regeneration möglich. Zur Unterstützung kann durch Leistungserhöhung des BHKW die Abgastemperatur auf das für den Rußabbrand erforderliche Niveau gehoben werden. Der Filter entspricht hinsichtlich Baugröße und Preis den Anforderungen für die Anwendung in leistungsschwächeren Aggregaten.

Insgesamt war das Partikelfiltersystem „Ba“ 133 Stunden im Einsatz. Nach 63 Betriebsstunden war eine externe Reinigung des Filters notwendig, da der Abgasgedruck auf bis zu 200 mbar angestiegen war. Trotz mehrmaliger Abgastemperaturerhöhung auf die erforderliche Rußabbrand-

temperatur durch Leistungsanhebung von 8 kW_{el} auf 9 kW_{el} war keine Abgasgegendruckminderung, die auf eine Regenerierung hingedeutet hätte, zu beobachten. Im Gegenteil, die Leistungsanhebung war immer auch mit einem Anstieg des Abgasgegendrucks verbunden. Eine Rußfilterregeneration fand also nicht, bzw. nicht in dem gewünschten Maße statt. Der Abgasgegendruck war bereits nach wenigen Betriebsstunden deutlich über 100 mbar angestiegen und sank auch bis zur ersten Filterreinigung nicht mehr ab. Nach der Filterreinigung lag der Abgasgegendruck ähnlich wie im neuen Zustand bei etwa 60 mbar, stieg aber innerhalb nur weniger Betriebsstunden auf über 200 mbar an. Dies deutet darauf hin, dass der Filter bereits mit unverbrennbaren Aschebestandteilen beladen war, die den hohen Gegendruck verursachten. Dennoch wurde der Filter in Absprache mit dem BHKW-Hersteller trotz eines Abgasdrucks von ca. 250 mbar weiter betrieben. Dabei stieg die Abgastemperatur auf ca. 450 °C an, ohne dass eine Minderung des Abgasgegendrucks eintrat. Da der Messbereich der verwendeten Drucksensoren bei 250 mbar endete wurde ein zusätzliches Druckmessgerät mit größerem Messbereich angeschlossen. Gegen Ende der Untersuchung mit Partikelfilter „Ba“ wurde ein inakzeptabel hoher Abgasgegendruck von bis zu 700 mbar ermittelt.

Emissionsmessungen wurden am 25.02.2003 sowie am 26. und 27.03.2003 durchgeführt. Bei der ersten Messung mit Partikelfilter „Ba“ im Neuzustand wurde im Vergleich zum BHKW-Betrieb ohne Partikelfilter eine Minderung der CO-Emissionen um 50 % von ca. 300 mg/Nm^3 auf 150 mg/Nm^3 erreicht. Die Gesamt-C-Emissionen blieben nahezu unverändert (leichter Rückgang von 8,2 auf $7,4 \text{ mg/Nm}^3$) ebenso wie die NO_x -Emissionen (geringfügiger Anstieg von 2050 auf 2150 mg/Nm^3). Die Staubemissionen gingen nach Einbau des Partikelfilters von ca. 125 mg/Nm^3 im Mittel auf 60 % des Wertes (75 mg/Nm^3) zurück, was auf eine sehr schlechte Filterwirkung hindeutet. Allerdings war auch hier, wie schon bei der ersten Emissionsmessung mit Partikelfilter „A“ ein stetiger Rückgang der Halbstundenmittelwerte für Staub über den Messtag zu beobachten. So gingen die Halbstundenmittelwerte, bedingt durch die verbesserte Filterwirkung der sich im Filter ablagernden Partikel von zuerst 125 über 99 und 42 auf schließlich 32 mg/Nm^3 zurück. Bei der zweiten Emissionsmessung nach 125 Betriebsstunden wurden überraschenderweise höhere CO-, Gesamt-C und Staubemissionen mit Partikelfilter im Vergleich zum Betrieb ohne Filter beobachtet. Dies erklärt sich durch die hohe Motorbelastung aufgrund des sehr hohen Abgasgegendrucks von mehr als 250 mbar bei der Verwendung des Partikelfilters. Trotz katalytischer Beschichtung lagen hierbei die Emissionskonzentrationen von CO, Gesamt-C und Staub über den Werten ohne Partikelfilter (bei ca. 30 mbar Abgasgegendruck). Die hohen Staubemissionen können außerdem daraufhin deuten, dass der Filter - evtl. in Folge des hohen Gegendrucks - beschädigt war und so das Abgas diesen teilweise ungefiltert passieren konnte. Allerdings war kein signifikanter Rückgang des Abgasdrucks festgestellt worden. Die NO_x -Emissionen waren unter den gegebenen Bedingungen erwartungsgemäß mit eingebautem Filter (1540 mg/Nm^3) niedriger als ohne (1860 mg/Nm^3).

Aufgrund des schlechten Abgasverhaltens wurde das Partikelfiltersystem dem Hersteller zurückgegeben. Dieser bot ein zweites Partikelfiltersystem mit einer hinsichtlich eines niedrigeren Druckverlusts verbesserten Wicklung des Filtergeflechts (Typ „Bb“) an.

Das **Partikelfiltersystem „Bb“** verursachte von Beginn an einen Abgasgegendruck von mehr als 250 mbar. Demnach brachte die neue Wicklung des Filters eher eine Verschlechterung hinsichtlich des Druckverlusts. Trotzdem wurde das Aggregat mit dem Partikelfiltersystem „Bb“ 214 Stunden betrieben. Dabei musste immer wieder die Leistung vermindert werden, da das BHKW oft aufgrund zu hoher Abgas- oder Motortemperatur auf Störung lief. Grund dafür war neben der hohen Belastung des Aggregats durch den hohen Abgasgegendruck auch die sehr hohen Außentemperaturen während der Untersuchung im Sommer 2003, die nach Abschluss der Untersuchungen mit Partikelfiltersystem „Bb“ den Einbau eines zusätzlichen Kühlers (Lüfter) erforderten.

Die Emissionsmessungen mit dem Partikelfiltersystem „Bb“ zu Beginn der Untersuchung zeigen einen Rückgang der Emissionen gegenüber den Messungen ohne Abgaspartikelfilter bei allen erfassten Abgaskomponenten (CO, NO_x und Staub). Die Minderung bei CO beträgt, etwa 20 % und bei NO_x etwa 25 %. Die Staubemissionen sinken bei der Verwendung des Partikelfilters „Bb“ von ca. 90 mg/Nm³ auf 2 mg/Nm³. Dies ist mit 98 % die höchste Partikelmassereduzierung, die im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens erzielt werden konnte.

Bei der zweiten Emissionsmessungen mit Filter „Bb“ nach insgesamt ca. 210 Einsatzstunden allerdings nahmen die Partikelmasseemissionen im Vergleich zum BHKW-Betrieb ohne Filter auf ca. 57 % ab. Ein Grund dafür ist wiederum der sehr hohe Abgasgegendruck, der sich innerhalb der ca. 210 Betriebsstunden aufgebaut hatte. Vermutlich sind die hohen Partikelmasseemissionen in Höhe von 32,5 mg/Nm³ trotz Partikelfilter nicht nur auf höhere Rohgasemissionen sondern auch auf eine Verschlechterung der Filtereffektivität zurückzuführen. Die Untersuchungen mit dem Filtersystem „Bb“ wurden daraufhin eingestellt.

Das **Dieselpartikelfiltersystem „C“** ist ebenfalls wie das System „A“ ein keramischer Monolith, allerdings ohne katalytische Beschichtung. Der Filter wurde in die Untersuchung miteinbezogen, weil mit diesem in zwei rapsölbetriebenen Aggregaten mit 5-6 kW_{el} positive Erfahrungen hinsichtlich langer Reinigungsintervalle von über 1000 Betriebsstunden vorliegen. Allerdings sind bei weiteren rapsölbetriebenen Aggregaten gleichen Typs auch negative Erfahrungen bekannt, die einen Ausbau des Filters erforderten, da es andernfalls zu einer starken Überhitzung des Motors kommt. Eine Abgasgegendrucküberwachung ist bei diesen Aggregaten nicht vorhanden. Das Gehäuse des Filters ist speziell auf den Aggregate-Typ abgestimmt, so dass der Partikelfilter direkt an den Abgasaustritt des Motors anschließen kann. Die Regeneration erfolgt durch eine phasenweise Anhebung der Leistung, so dass eine Abgastemperatur von über 600 °C erreicht wird. Eine Filterreinigung wird durchgeführt, wenn das Aggregat wegen zu hoher Abgas- bzw. Motortemperaturen vermehrt auf Störung läuft.

Beim BHKW, das im Rahmen dieser Untersuchung verwendet wurde, lagen die Abgastemperaturen mit Filtersystem „C“ bei maximal ca. 520 °C. Dies liegt unterhalb der Abgastemperatur für den Rußabbrand von ca. 600 °C, so dass keine Regenerierung stattfinden konnte. Der Rußfilter war daher nur 23 Bh im Einsatz, weil der Abgasgegendruck entsprechend schnell mit zunehmender Beladung während der ersten ca. zwei Betriebsstunden von ca. 50 auf 250 mbar anstieg.

Emissionsmessungen wurden nach 16 Betriebsstunden durchgeführt. Diese ergaben einen Anstieg der CO-Emissionen um mehr als das Doppelte von ca. 250 auf 520 mg/Nm³. Dies ist wie bei den

anderen Filtersystemen auch hier wieder auf die stärkere Belastung des Motors infolge des hohen Abgasgedrucks des Filters zurückzuführen. Da das Partikelfiltersystem „C“ aber im Gegensatz zu den anderen Systemen keine katalytische Beschichtung aufweist, kommt es auch zu keiner vermehrten Oxidation des Kohlenmonoxids. Der Orientierungswert für CO-Emissionen von 300 mg/Nm³ wird also mit dem Partikelfilter „C“ deutlich überschritten. Zur Reduzierung der CO-Emissionen wäre ein dem Partikelfilter vor- oder nachgeschalteter Oxidationskatalysator sinnvoll. Aufgrund des hohen Abgasdrucks sinken die NO_x-Emissionen von ca. 2160 auf 1530 mg/Nm³. Die Staubreduktion durch den Partikelfilter „C“ beträgt 95 %. Die absolute Staubkonzentration im Abgas nimmt von 72 auf 4 mg/Nm³ ab. Das Partikelabschneidungsvermögen des Filters ist demnach sehr gut, zumal davon auszugehen ist, dass mit eingebautem Partikelfilter der Staubgehalt im Rohgas deutlich höher ist als ohne Partikelfilter. Weil Partikelfiltersystem „C“ nicht ohne weitere Maßnahme zur Absenkung der Rußabbrandtemperatur eingesetzt werden kann, wurden die Untersuchungen mit Partikelfilter „C“ nicht weitergeführt.

Die **Partikelfiltersysteme „Da“ „Db“ und „Dc“** sind baugleiche zylinderförmige Verbundfaserfilterkörper, die sich derzeit noch in Entwicklung befinden. Aufgrund der hohen Ascheaufnahmekapazität eignet sich das Filtersystem insbesondere auch für die Anwendung von Rapsöl, welches Aschebildner, wie Ca und P enthält. Aufgrund der niedrigen Kosten und kleinen Baugröße ist dieser Filtertyp auch für die Anwendung in kleinen Pflanzenöl-BHKW geeignet. Zur Regenerierung sind unterschiedliche Verfahren anwendbar. Eine katalytische Beschichtung des Filters ist beispielsweise ebenso möglich wie der Einbau von Heizelementen in den Filterkörper. In Absprache mit dem Filterhersteller wurde aber vereinbart die Regeneration mittels NO₂, das in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator in ausreichender Konzentration aus NO gebildet werden kann, erfolgen soll. Dieser Entscheidung ging eine Analyse der NO/NO₂-Konzentrationen im Abgas des Versuchs-BHKW voraus. Der Vorteil dieses Rußabbrandverfahrens mit NO₂ ist, dass auf aufwändige katalytische Beschichtungen des Filterkörpers verzichtet werden kann und somit ein kostengünstiger Austausch des Filters möglich ist. Zudem ist das niedrige Abgastemperaturniveau des rapsölbetriebenen BHKW günstig für hohe NO₂-Raten, wodurch die Regeneration positiv beeinflusst wird.

Nach Einbau des Oxidationskatalysators wurde zuerst der Filter „Da“ im BHKW im Dauerbetrieb getestet. Während der absolvierten 63 Betriebsstunden stieg der Abgasgedruck zunächst langsam (gut funktionierende Regeneration) und ab ca. 40 Stunden dann schneller (Verschluss der Abgaskanäle durch Inertanteile und Ruß) von ursprünglich 25 auf 225 mbar an. Da der Abgasgedruck ab der ca. 55. Betriebsstunde bei einer, bedingt durch den Abgasgedruck angestiegenen Abgastemperatur von ca. 340 °C nicht mehr weiter anstieg, wurde angenommen, dass der Rußabbrand bei dieser höheren Temperatur wieder effektiver ist. Da ein NO₂ unterstützter Rußabbrand nur sehr langsam vonstatten geht und deshalb kontinuierlich erfolgen muss, wurde eine elektrische Abgasheizung konstruiert, die unmittelbar vor dem Rußfilter in das Abgassystem des BHKW eingebaut wurde. Diese sollte im laufenden Betrieb, vor allem aber auch bereits in der Anfangsphase der Beladung eine möglichst hohe Regenerierungsrate durch höhere Abgastemperaturen gewährleisten. In der Praxis könnte eine Temperaturerhöhung auch durch eine andere Positionierung des Filters im Abgassystem oder durch andere Maßnahmen, wie verbesserte Isolierung, etc. erreicht werden ohne dass dafür eine elektrische Aufheizung notwendig wäre. Beim Aus-

bau des Filters „Da“ wurde beobachtet, dass sich auf den an der Einströmseite verschlossenen Kanälen sowie auf den Stegen zwischen den Strömungskanälen eine mehrere Millimeter dicke Rußschicht aufgebaut hatte, die teilweise auch die Strömungskanalöffnungen dazwischen verstopfte.

Der Filter „Db“ wurde mit der selbst konstruierten Abgasheizung und folglich höheren Abgastemperaturen (350 °C – 380 °C) betrieben. Binnen 98 Stunden stieg der Abgasgegendruck von ca. 50 mbar auf ca. 150 mbar an, was darauf hindeutete, dass die Abgastemperaturerhöhung ein gegenüber Filter „Da“ längeres Betriebsintervall ermöglichte. Allerdings wurden bei den Emissionsmessungen nach etwa 94 Stunden mehrere kleine Aufwölbungen des Filtermediums auf der Abgaseintrittsseite beobachtet, so dass auch ein darüber hinausgehender Schaden am Filterkörper nicht ausgeschlossen werden konnte. Dies bestätigte sich auch bei den Emissionsmessungen mit Filter „Db“, bei denen die Partikelmasseemissionen mit 32 mg/Nm³ deutlich über den Werten der baugleichen Filter „Da“ (11 mg/Nm³) und „Dc“ (3,3 mg/Nm³) lagen.

Daraufhin wurde der Filter „Db“ aus- und der Filter „Dc“ eingebaut. Letzterer führte bereits nach 26 Bh zu einem Anstieg des Abgasgegendrucks von ca. 25 auf 250 mbar. Auch eine Reinigung mit Druckluft führte zu keiner längeren Filterstandzeit. Nach bereits weniger als 10 weiteren Betriebsstunden war der Druck wieder auf 180 mbar angestiegen. Nach einer weiteren Reinigung des Filters mittels Druckluft stieg der Abgasgegendruck innerhalb von weniger als 2 h bereits auf mehr als 200 mbar an, worauf die Untersuchungen eingestellt wurden.

Trotz hohem Ascheaufnahmevermögen konnten die baugleichen Partikelfiltersysteme „Da“, „Db“ und „Dc“ die Erwartungen bezüglich der Standzeit beim Einsatz im rapsölbetriebenen BHKW des TFZ nicht erfüllen. Selbst wenn durch eine verbesserte Filterreinigung längere Betriebszeiten nach der Reinigung möglich wären, sind auch die im neuen Zustand erreichte Intervalle von weniger als 100 Stunden für einen Praxiseinsatz zu kurz.

Die Emissionsmessungen fanden mit Filter „Da“ nach 5 Betriebsstunden, mit Filter „Db“ nach 94 Betriebsstunden und mit Filter „Dc“ nach einer Betriebsstunde statt. Die Staubreduktion mit Partikelfilter betrug bei Filter „Da“ 66 % und bei Filter „Dc“ 94 %. Die absoluten Partikelmasseemissionen lagen bei diesen beiden Filtern deutlich unterhalb des Zielwerts. Lediglich Partikelfilter „Db“ war aufgrund der Beschädigung wenig effektiv. Die CO-Emissionen waren mit durchweg ca. 50 mg/Nm³ auf niedrigem Niveau, was auf den vorgeschalteten Oxidationskatalysator zurückzuführen ist. Bei den NO_x-Emissionen wurde tendenziell eine leichte Erhöhung mit Partikelfilter beobachtet, die jedoch von untergeordneter Bedeutung ist.

Dieselpartikelfiltersystem „E“ unterscheidet sich von den anderen getesteten Filtersystemen durch seine Bauweise. Hierbei werden mehrere in einem Gehäuse angeordnete Filterkerzen von außen mit dem Abgas angeströmt, wodurch sich eine große Oberfläche ergibt. Mit größeren Filtersystemen von ähnlicher Bauart wie Filtersystem „E“ wurden zum Teil positive Erfahrungen mit pflanzenölbetriebenen BHKW höherer Leistung gemacht. Die Regeneration wird durch eine katalytische Beschichtung der Filterkerzen unterstützt. Die Regenerationstemperatur beträgt ca. 420 °C. Um diese Temperaturen zu gewährleisten musste für die Untersuchungen eine externe

elektrische Abgasheizung eingebaut werden. Aufgrund der großen Baugröße des Filters war eine Umgestaltung der Abgasführung notwendig.

Der Filter war bis zum Abschluss der Untersuchung ca. 628 Betriebsstunden im Einsatz. Während dieser Zeit wurde der Filter fünfmal ausgebaut und gereinigt. Die Reinigung der Filterkerzen erfolgte durch absaugen und Waschen in klarem Wasser. Die Intervalle zwischen zwei Filterreinigungen betragen ca. 100 – 200 Betriebsstunden. Lediglich nach der zweiten Reinigung musste der Filter bereits nach ca. 34 Stunden ausgebaut und gereinigt werden, weil der Oxidationskatalysator Schaden genommen hatte und dabei abgebröseltes Material im Abgasstrom bis zum Partikelfilter mitgeführt wurde, wo es sich ablagerte. Der Schaden des Oxidationskatalysators war vermutlich aufgrund zu geringer Dämpfung hervorgerufen worden. Ein Zusammenhang mit dem Betrieb des Partikelfiltersystems besteht nicht. Bei der Filterreinigung von Partikelfilter „E“ können auch Aschebestandteile effektiv entfernt werden, so dass auch noch nach mehreren Reinigungsprozeduren der Druckanstieg ähnlich verläuft, wie im Neuzustand.

Das Partikelfiltersystem „E“ zeichnete sich durch einen weitgehend störungsfreien Betrieb bei vergleichsweise langsamen Abgasgedruckanstieg aus. Dennoch konnten auch mit diesem Filter nicht die gewünschten langen Intervalle von bis zu ca. 1000 Bh oder mehr zwischen zwei Filterreinigungen erreicht werden. Auch hier ist die Ascheaufnahmekapazität nicht ausreichend, um den Filter „E“ in dieser Ausführung bei rapsölbetriebenen BHKW kleiner Leistung wartungsarm und praxistauglich einzusetzen. Eine Vergrößerung des Durchmessers und die zusätzliche Anbringung von weiteren Filterkerzen könnte zu einer deutlichen Verlängerung der Standzeit beitragen. Bei Aggregaten mit Abgastemperaturen von weniger als 420 °C wäre anstatt einer Abgasheizung eine bei niedrigeren Temperaturen aktive katalytische Beschichtung möglich.

Die Emissionsmessungen mit Filter „E“ zeigen, dass der Zielwert für Staubemissionen an allen Messtagen eingehalten werden konnte. Auch nach insgesamt 423 Betriebsstunden waren die Emissionen mit Partikelfilter um 90 % niedriger als ohne Partikelfilter, was auf ein langanhaltendes gutes Abscheidevermögen des Filters hinweist.

Die CO-Emissionen liegen mit ca. 400 mg/Nm³ trotz katalytischer Beschichtung des Partikelfilters „E“ deutlich über dem Orientierungswert (TA-Luft) von 300 mg/Nm³. Zu Beginn der Untersuchung mit dem Filtersystem „E“ lagen die CO-Emissionen noch unter 20 mg/Nm³, was an dem zu dieser Zeit noch intakten vorgeschalteten Oxidationskatalysator lag. Die NO_x-Emissionen waren durchweg unter 2000 mg/Nm³ und lagen erwartungsgemäß an Messtagen mit höherem Abgasgedruck niedriger als an Messtagen mit geringem Abgasgedruck. Die Gesamt-C Emissionen lagen beim Partikelfilter „E“ mit 7 bis 13 mg/Nm³ im üblichen Bereich.

7 Folgerungen und Ausblick

Dieselpartikelfiltersysteme können effektiv die Partikelmasseemissionen von rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken mindern, so dass der angestrebte Zielwert für Staubemissionen von 20 mg/Nm^3 eingehalten werden kann. Jedoch ist bei fehlerhaften oder stark beladenen Partikelfiltern auch mit einer Erhöhung der Abgasemissionen von Partikelmasse, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen zu rechnen.

Katalytische Partikelfilterbeschichtungen können zu einer Minderung der CO-Emissionen in ähnlich hohem Maße beitragen, wie dies Oxidationskatalysatoren vermögen. Allerdings ist dies nur bei besonders wirksamen Beschichtungen der Fall. Andere Systeme führen zu keiner Reduzierung der CO-Emissionen, so dass der Orientierungswert nach TA-Luft mit einem Partikelfilter nicht immer eingehalten wird. Bei solchen Filtern ist deshalb der Einsatz eines vorgeschalteten Oxidationskatalysators unumgänglich.

Die Stickstoffoxidemissionen werden durch die Partikelfiltersysteme kaum beeinflusst. Bei ansteigendem Gegendruck jedoch kommt es üblicherweise zu einem leichten Rückgang von NO_x .

Bei allen im Rahmen dieser Untersuchung getesteten Dieselpartikelfiltersystemen sind externe Reinigungsmaßnahmen in Abständen von etwa 200 Betriebsstunden oder weniger erforderlich. Die angestrebten Wartungs- bzw. Reinigungsintervalle von mindestens 1000 Stunden konnten von keinem der getesteten Filter erreicht werden. Ursachen dafür sind die im Filter abgeschiedenen Aschen, die entweder selbst zu erhöhten Abgasgedrücken führen oder die katalytische Beschichtung belegen und so die Regeneration beeinträchtigen. Bei Filterkörpern mit wechselseitig verschlossenen Strömungskanälen können sich Partikel auf der Einströmseite ablagern und mehrere Millimeter dicke Schichten aufbauen, die die Kanalquerschnitte verengen bzw. verschließen. Eine starke Rußbelastung des Filters kann auch durch häufige Kaltstartphasen hervorgerufen werden, in denen die für den Rußabbrand erforderliche Abgastemperatur nicht erreicht wird.

Am besten bewährt hat sich ein Filtersystem mit großer Anströmoberfläche (Filterkerzen). Außerdem sollten Partikelfilter insbesondere auch bei rapsölbetriebenen BHKW eine hohe Ascheaufnahmekapazität gewährleisten und gleichzeitig über einen niedrigen Druckverlust verfügen.

Neben Betriebsweise und konstruktiver Ausführung der Filter, beeinflussen auch die Rapsölkraftstoff- und Motoröleigenschaften die Filterstandzeit. Analysen von Ascherückständen zeigen, dass die im Rapsöl und Motoröl vorkommenden Elemente Calcium und Phosphor mit zu deren Hauptbestandteilen gehören. Daneben spielen auch Elemente wie z.B. Zink aus dem Motoröl eine Rolle. Eine Minimierung dieser und weiterer aschebildender Elemente im Kraftstoff und Motoröl ist deshalb anzustreben. Seit kurzem befinden sich auch aschebildnerarme (zinkfreie) Motorenöle im Handel.

Um den Wartungsaufwand bei der externen Reinigung von Partikelfiltersystemen in Pflanzenöl-BHKW zu reduzieren, ist eine einfache Beseitigung der abgeschiedenen Aschen erforderlich. Beispielsweise könnten Systeme zur Entaschung, die mit Druckstößen in die umgekehrte Durchströmungsrichtung den Filter von Rückständen befreien und dann die Partikel abgesaugt oder über eine Schleuse ausgetragen werden zur Wartungsfreundlichkeit beitragen. Außerdem wäre eine

parallele Anordnung von zwei abwechselnd durchströmten Partikelfiltern hilfreich, um Reinigungsmaßnahmen auch bei laufendem BHKW mit einer gewissen zeitlichen Flexibilität durchführen zu können. Der geringere Wartungsaufwand, sowie die Minimierung von Ausfallzeiten könnten dabei höhere Investitionskosten solcher Systeme kompensieren.

Eine Überwachung der Partikelfiltersysteme im laufenden Betrieb ist unumgänglich. Durch Überwachung des Abgasdrucks können Rückschlüsse auf die Filterbeladung und Motorbelastung gezogen werden. Darüber hinaus ist von Zeit zu Zeit die Abscheideleistung des Filters sowie dessen Unversehrtheit zu überprüfen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass - entsprechend der Aufgabenstellung - verschiedene Partikelfiltersysteme, die für Motoren mit Dieselbetrieb konzipiert worden waren hier in einem mit Rapsölkraftstoff betriebenen Aggregat kostengünstig ohne weitere Anpassung eingesetzt wurden. Dies erklärt die meist nur kurzen Filterstandzeiten.

Um Dieselpartikelfiltersysteme zukünftig auch bei kleineren rapsölbetriebenen Aggregaten effektiv und ohne übermäßigen Wartungsaufwand einsetzen zu können sind weitere Untersuchungen erforderlich. Insbesondere sind dies:

- Entwicklung von Partikelfiltern mit hohem Ascheaufnahmevermögen und großer Anströmoberfläche (z.B. Kerzenfilter mit größerer Anzahl an Filterkerzen)
- Verbesserung der Wartungsfreundlichkeit der Filtersysteme (z.B. durch einfachere Zugänglichkeit des Filtermediums in eingebautem Zustand)
- Vereinfachung der Entaschung des Filters (z.B. durch Druckstöße in entgegengesetzter Strömungsrichtung oder kontinuierliche Entaschung durch Abstreifelemente oder Vibrationen und Ascheaustrag durch Absaugen oder über eine Schleuse bei eingebautem Filter). Hierzu müssten praxistaugliche Vorrichtungen geschaffen werden, die den Anforderungen einer Praxisanlage, wie z.B. Gasdichtheit, gerecht werden.
- Untersuchung zur Anordnung zweier parallel geschalteter Filter für abwechselnden Betrieb
- Untersuchung zur Anbringung der katalytischen Beschichtung am Filtermedium dergestalt, dass es nicht zu einer Belegung mit Ruß und damit Inaktivierung der katalytischen Schicht kommen kann, z.B. solange bei Kaltstarts noch nicht die notwendige Regenerationstemperatur erreicht ist. Beispielsweise könnte eine katalytische Beschichtung unmittelbar vor der eigentlichen Filteroberfläche auf einem in den Abgasstrom mehrere Millimeter hineinragenden grobporigen Körper (z.B. Drahtgeflecht) aufgebracht werden.
- Identifizierung der Aschebildner in Kraftstoff und Motoröl, Vergleich mit Dieselkraftstoff und Rapsölmethylester durch Kraftstoff- und Ascheanalysen (dazu Testläufe auf einem Filterprüfstand); Überprüfung des Einsatzes aschebildnerarmer Motorenöle
- Bei genauen Kenntnissen über die Eigenschaften der Abgaspartikel: Ableitung der Anforderungen an das Filtermaterial und den Aufbau. Beispielsweise können größere Kanalquerschnitte einer Verstopfung des Filtermediums an der Einströmseite entgegenwirken.

Erst wenn weitere Fragen zur Ascheherkunft und den Partikeleigenschaften geklärt sind, wenn eine Optimierung eines Filtersystems hinsichtlich des Einsatzes bei rapsölbetriebenen Motoren erfolgt und die Wartungsfreundlichkeit verbessert worden ist, kann der Einsatz von Abgaspartikelfiltersystemen in rapsölbetriebenen Aggregaten mit niedriger Leistung generell empfohlen werden.

8 Zusammenfassung

Pflanzenöлтаugliche Blockheizkraftwerke (BHKW) werden derzeit stark nachgefragt. Gründe dafür sind zum einen der gestiegene Heizölpreis und zum anderen die erhöhte Stromeinspeisevergütung von bis zu 19,5 €Cent pro Kilowattstunde nach dem Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien („Erneuerbare-Energien-Gesetz“) [1]. Gemäß §1 Abs. 1 ist es Zweck des „Erneuerbaren-Energien-Gesetzes“ „... im Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, Natur und Umwelt zu schützen, einen Beitrag zur Vermeidung von Konflikten um fossile Energieresourcen zu leisten und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien zu fördern.“

Trotz der vielfältigen Vorteile, die die Nutzung von Rapsölkraftstoff in BHKW mit sich bringt, ist es – ebenso wie beim Einsatz von Dieselkraftstoff bzw. Heizöl – notwendig, gesundheitsrelevante Abgaskomponenten, insbesondere Partikelemissionen zu minimieren. Emissionsmessungen zeigen, dass der aus Gründen der Luftreinhaltung angestrebte Zielwert für Partikelmasseemissionen (Staub) von 20 mg/Nm³ dann eingehalten werden kann, wenn Abgaspartikelfiltersysteme eingesetzt werden.

Zum Einsatz von Abgaspartikelfiltersystemen bei Pflanzenöl-Motoren niedriger Leistung ist bisher noch wenig bekannt. Deshalb war es Ziel einer Forschungsarbeit, die vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Augsburg und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München gefördert wird, aussichtsreiche Dieselpartikelfiltersysteme in einem mit Rapsöl betriebenen BHKW geringer Leistung zu untersuchen und dabei wichtige Betriebs- und Emissionsdaten zu ermitteln, um Ergebnisse zur Einsatztauglichkeit und dem Partikelmasseminderungs-potenzial dieser Abgasreinigungstechnologie zu erlangen.

Ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerk (8 kW_{el}, 15 kW_{th}) wurde mit fünf verschiedenen Abgaspartikelfiltersystemen, die für den Einsatz von mit Dieselkraftstoff betriebenen Motoren entwickelt worden waren, zeitlich nacheinander ausgerüstet. Mit jedem dieser Partikelfiltersysteme erfolgte eine Daueruntersuchung, bei der die Abgaskomponenten Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C) und Partikelmasse (Staub) wiederholt erfasst und relevante Betriebsparameter, wie Abgastemperaturen und Abgasdrücke kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Daneben wurden Wartungsarbeiten am Partikelfilter, wie z.B. die Reinigung von abgelagerten, unverbrennbaren Aschen dokumentiert. Auch wurden Kraftstoff- und Motoröleigenschaften sowie die Partikelzusammensetzung bestimmt.

Die Staubemissionen von mit Rapsöl betriebenen BHKW können mit den getesteten Dieselpartikelfiltern zum Teil deutlich reduziert werden. Der angestrebte Zielwert für Staubemissionen (20 mg/Nm³) wird in 9 von 13 Fällen unterschritten. Sofern dieser Zielwert eingehalten wird, können im Vergleich zum Betrieb ohne Dieselpartikelfilter Reduktionsraten von 74 bis 98 % erreicht werden. Die größte Effektivität weist Partikelfilter „Bb“ im neuen Zustand auf, durch den die Staubemissionen von 89 mg/Nm³ (Messung 7) auf 2 mg/Nm³ (Messung 8) gesenkt wurden. Nach 220 Betriebsstunden sank jedoch die Staubreduktion durch Filter „Bb“ von 98 auf nur noch

57 % ab. Ursache dafür ist ein Schaden am Filter, der auf Grund von zu hohem Abgasgedruck und/oder eines werkseitigen Defekts aufgetreten ist. Mit Partikelfilter „Ba“ wurden nach 132 Bh bei Messung 6 sogar höhere Staubemissionen als ohne Partikelfilter ermittelt. Ursache dafür ist eine Filterverstopfung, die einen hohen Abgasgedruck mit starker Motorbelastung nach sich zieht, was zu einem höheren Rußausstoß führt.

Ein Anstieg des Abgasgedrucks von etwa 40 auf über 250 mbar ist auch bei funktionierender kontinuierlicher Regeneration (Rußabbrand) bei allen getesteten Dieselpartikelfiltersystemen innerhalb von weniger als 200 Betriebsstunden zu beobachten. Als Ursache dafür kann unter anderem ein erhöhter Ascheausstoß auf Grund des im Rapsölkraftstoff enthaltenen Calciums und Phosphors (je ca. 5 - 15 ppm) gesehen werden. Aber auch Additivelemente aus dem Motorenöl wurden in den Ascherückständen in hohen Konzentrationen nachgewiesen. Ein hoher Abgasgedruck führt zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch, zu stärkerer Motorbelastung sowie zum Anstieg der Abgasemissionen und Abgastemperatur. Eine externe Filterreinigung ist dann unumgänglich, die aber nicht immer zu der erwünschten möglichst vollständigen Entaschung des Filters führt.

Durch die Verwendung von Partikelfiltern mit hohen Ascheaufnahmekapazitäten und großen Anströmoberflächen, durch Reduzierung aschebildender Elemente im Rapsölkraftstoff und Motoröl sowie durch eine wartungsfreundlichere Gestaltung der Filterreinigung könnte die Praxistauglichkeit von Dieselpartikelfiltersystemen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff erheblich verbessert werden. Aufgrund der Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen ist festzustellen, dass erst nach erfolgter Optimierung und gegenseitiger Abstimmung des Gesamtsystems Partikelfiltersystem, Kraftstoff, Motoröl und Motor eine Nachrüstung von Abgaspartikelfiltersystemen in rapsölbetriebenen Aggregaten mit niedriger Leistung empfohlen werden kann. Hierzu besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Angeichts der stark steigenden Anzahl pflanzenölbetriebener BHKW sowie den hohen Staubbinderungsraten, die, wie in der vorliegenden Untersuchung gezeigt wurde, beim Einsatz von Partikelfiltersystemen an rapsölbetriebenen Aggregaten erzielt werden können, ist eine schnelle Klärung offener Fragen anzustreben. So sollten im Rahmen von Prüfstandsuntersuchungen an Partikelfiltersystemen mit diesel-, biodiesel- und rapsölbetriebenen Motoren die kraftstoffspezifischen Abgas- und Partikeleigenschaften (Zusammensetzung, Größenverteilung, Feinstaubanteil, etc.) ermittelt werden, um daraus die Anforderungen an Abgasreinigungssysteme bei Pflanzenölbetrieb ableiten zu können. Eine dahingehende Untersuchung wurde vom TFZ Straubing in Zusammenarbeit mit der HTW Dresden beim Bayerischen Landesamt für Umweltschutz beantragt.

Quellenverzeichnis

- [1] ANONYMUS (2004): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21. Juli 2004, (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), BGBl, Teil I Nr. 40 v. 31.07.2004, Seite 1918 ff.
- [2] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (2002): Information über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs Stand März 2002. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Augsburg. Internet: www.bayern.de/lfu (21 Seiten)
- [3] BASSHUYSEN, R. VAN und F. SCHÄFER (HRSG.) (2004): Lexikon Verbrennungsmotor. Der Verbrennungsmotor von A – Z. ATZ/MTZ Fachbuch. Vieweg Verlag Wiesbaden. ISBN 3-528-03903-5, 1078 Seiten
- [4] BECK, J.; UNTERBERGER, S. und K.R.G. HEIN: Deactivation Mechanisms of SCR Catalysts During the Co-Combustion of Bio-Residues. Applied Catalysis B: Environmental, Volume 49, Issue 1, 20 April 2004, Pages 15-25
- [5] BORN, C.: Schadstoffreduzierung am DI-Dieselmotor durch Emulsionseinspritzung; <http://www.itm.rwth-aachen.de/Downloadarea/Dissertationen/CarolineBornDiss.pdf>
- [6] BRAUNGARTEN, G. und H. TSCHÖKE: Das Betriebsverhalten von Partikelfiltern bei Verwendung von Biodiesel im Verbrennungsmotor, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (16 Seiten)
- [7] BREUER, K.-H.(1999): Abgasnachbehandlung im Rahmen der Dieselmotor-Entwicklung und Geräte-Nachrüstung; Tagungsband: Feinpartikelemission von Verbrennungsmotoren – Haus der Technik e.V., Essen
- [8] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) (2000): Partikelfilter für schwere Nutzfahrzeuge, Umwelt-Materialien Nr. 130 Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern
- [9] BURKHARDT, A.: Stickstoffminderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zur Struktur und Acidität vanadiumoxidhaltiger Katalysatoren; <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=/2001/chemie/4>
- [10] CLAUßEN, M. (1997): Katalytische Rußfilter für Diesellaggregate und Rapsölmotoren, Bd. 29.: CUTEK-Schriftenreihe (58 Seiten)
- [11] DAIMLER-CHRYSLER: Aktuelles vom 30.07.2002; http://www.mblkw.de/aktuelles_30_07_2002.htm
- [12] DEUTSCHE UMWELTHILFE E.V.: DUH-Initiative für “Saubere Kraftstoffe“ – Schwefeldfreie Otto- und Dieselmotorkraftstoffe; <http://www.duh.de/pa041-d.htm>
- [13] HEINZ, A.; R. HARTMANN; G. HITZLER und G. BAUMBACH (2002): Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin, Bd. 89. Berlin: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (182 Seiten)
- [14] HÜLSER H.; T. CARTUS; C. RODUNER und U. PFAHL (2003): Elektronik ermöglicht Innovationen in der Motorenentwicklung, MTZ, 64. Jahrgang, Januar 2003, S. 30 - 37

-
- [15] HÜTHWOHL, G. und B. MAURER (1999): Partikelfiltertechnik heute und morgen. In: (Hrsg.): Feinpartikel-Emissionen von Verbrennungsmotoren, Essen: Haus der Technik e.V.
- [16] KWH Katalysatoren GmbH; <http://www.k-w-h.com/zeronox-d.html>
- [17] MAYER A. (2000): Geprüfte Partikelfilter-Systeme für Dieselmotoren für den Vollzug des Suva-Filterobligatoriums und der LRV 98 in der Schweiz, Bundesanstalt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.), Bern
- [18] MAYER A. (2001): Geprüfte Partikelfilter-Systeme für Dieselmotoren Vollzugsunterlagen des Suva-Filterobligatoriums und der LRV 98 in der Schweiz, Bundesanstalt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.), Bern
- [19] MAYER, A. (2005): VERT-Filterliste - Geprüfte und erprobte Partikelfilter-Systeme für die Nachrüstung von Dieselmotoren. Bundesanstalt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.), Bern
- [20] MILLER, K.; W. HABERKAMP, K. BADEAU, G. LIU, R. SHIRK and T. WOOD (2002): Design, Development and Performance of a Composite Diesel Particulate Filter. SAE Technical Papers Series 2002-01-0323, SAE Publications Group, U.S.A. (11 Seiten)
- [21] NEUENDORF, S.(1994): Experimentelle Untersuchung zur Minderung der Partikel- und Stickoxidemission aus PKW-Dieselmotoren mit Oxidationskatalysatoren und selektiver katalytischer Reaktion; Dissertation, Clausthal-Zellerfeld
- [22] SEGUELONG, T. und W. NASCHKE (2002): Serieneinsatz eines Dieselpartikelfilters in Kombination mit einem im Kraftstoff gelösten Katalysator auf Ceriumbasis. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 63, Nr. 3, S. 186-192
- [23] THUNEKE, K.; H. LINK; B. WIDMANN und E. REMMELE (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke - Abschlussbericht, Bd. Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern 175. München: Hrsg. und Druck Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München (159 Seiten)
- [24] WÄCHTER, W.: Die Umweltrelevanz des Dieselmotors; fvkma.tu-graz.ac.at/ie4/VO_2002.pdf
- [25] WÄRMEKRAFTKOPPLUNG - FACHVERBAND: Emissionen; <http://www.waermekraftkopplung.ch/technik/emissionen.shtml> vom 16.01.2003
- [26] ZELENKA, P. und C. TELFORD (2002): Entwicklung eines Partikelfiltersystems für Nutzfahrzeuge mit brennerunterstützter Regeneration. MTZ 9/2002 63. Jhg. (S. 684-690)

Anhang

Emissionsmessungen Rußfilter

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kWel	CO mg/Nm ³	CnHm mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	NO mg/Nm ³	Staub mg/Nm ³	O2 %	CO2 %	Abgas-temp. °C	Messdauer min	
BHKW TFZ (Nennleistung: 8 kWel)												
29.01.2003	Rußfilter A ausgebaut											
	Nennlast 1	8	189	11	2106		64	10,3	8,0	119	30	
	Nennlast 2	8	190	11	2121		54	10,3	8,1	120	31	
	Nennlast 3	8	191	12	2121		52	10,3	8,1	122	31	
	Nennlast 4	8	209	14	2109		52	10,4	8,0	122	31	
	Mittelwert	8	195	12	2114	--	56	10,3	8,1	121	31	
30.01.2003	Rußfilter A neu											
	Nennlast 1	8	18	2,9	1961		17	10,2	8,2	118	30	
	Nennlast 2	8	19	2,6	1971		12	10,2	8,1	118	29	
	Nennlast 3	8	19	2,4	2010		6,3	10,4	8,0	113	30	
	Nennlast 4	8	20	2,2	2041		2,4	10,6	7,9	118	31	
	Mittelwert	8	19	3	1996	--	9	10,4	8,1	117	30	
25.02.2003	Rußfilter Ba ausgebaut											
	Nennlast 1	8	344	8,7		1761		10,7	7,7	123	30	
	Nennlast 2	8	257	7,7	2046		125	10,9	7,7	121	30	
		Mittelwert	8	300,5	8,2	2046	--	125	10,8	7,7	122	30
	Rußfilter Ba neu											
	Nennlast 1	8	215	5,9	1975		125	10,8	7,7	123	30	
	Nennlast 2	8	214	6,7	2109		99	10,9	7,6	127	30	
	Nennlast 3	8	120	7,9	2228		42	11,1	7,5	127	31	
	Nennlast 4	8	119	8,5	2302		32	11,2	7,4	127	28	
	Nennlast 5	8	114	7,9		2235		11,4	7,3	128	26	
	Mittelwert	8	156,4	7,4	2154	2235	75	11	8	126	29	
26.03.2003	Rußfilter Ba nach 127 Bh											
	Nennlast 1	8	529	8,6	1554		139	8,5	9,4	231	24	
	Nennlast 2	8	448	6,8	1559		141	8,6	9,3	232	25	
	Nennlast 3	8	466	7,1	1546		140	8,6	9,3	232	25	
	Nennlast 4	8	425	6,6	1542		131	8,7	9,3	234	25	
	Mittelwert	8	467	7,3	1550	--	138	8,6	9,3	232	25	
27.03.2003	Rußfilter Ba ausgebaut											
	Nennlast 1	8	384	6,1	1890		126	10,5	8,0	185	25	
	Nennlast 2	8	430	5,8	1825		115	10,3	8,1	186	25	
	Nennlast 3	8	429	5,5	1841		121	10,2	8,2	187	24	
	Nennlast 4	8	336	5,2	1881		105	10,1	8,2	187	24	
	Mittelwert	8	395	5,7	1859	--	117	10,3	8,1	186	25	
12.05.2003	Rußfilter Bb neu											
	Nennlast 1	8	259	--	1502		1,7	7,2	10,4	207	30	
	Nennlast 2	8	230	--	1578		4	7,2	10,4	206	30	
	Nennlast 3	8	213	--	1528		0	7,2	10,5	206	31	
	Mittelwert	8	234	--	1536	--	1,9	7,2	10,4	206	30	
13.05.2003	Rußfilter Bb ausgebaut											
	Nennlast 1	8	293	--	1989		84	10,0	8,3	153	30	
	Nennlast 2	8	291	--	1978		88	9,9	8,4	153	30	
	Nennlast 3	8	296	--	2010		95	9,9	8,4	157	30	
	Mittelwert	8	293	--	1992	--	89,0	9,9	8,4	154	30	

Emissionsmessungen Rußfilter

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Leistung kWel	CO mg/Nm ³	CnHm mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	NO mg/Nm ³	Staub mg/Nm ³	O2 %	CO2 %	Abgas-temp. °C	Messdauer min
20.05.2003	Rußfilter C neu										
	<i>Nennlast 1</i>	8	526	--	1540		5,3	7,0	10,6	199	29
	<i>Nennlast 2</i>	8	535	--	1523		5	7,0	10,6	200	29
	<i>Nennlast 3</i>	8	518	--	1526		4,3	7,0	10,6	200	29
	<i>Nennlast 4</i>	8	517	--	1525		3	7,0	10,6	200	29
	Mittelwert	8	524	--	1529	--	4,4	7,0	10,6	200	29
21.05.2003	Rußfilter C ausgebaut										
	<i>Nennlast 1</i>	8	248	--	2149		69	8,1	10,2	142	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	242	--	2173		74	8,1	10,2	143	30
	Mittelwert	8	245	--	2161	--	72	8,1	10,2	143	30
08.07.2003	mit Rußfilter Bb										
	<i>Nennlast 1</i>	8	344	--	1490		40	7,0	10,6	182	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	308		1523		28	7,0	10,6	184	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	386	--	1506		33	6,9	10,6	186	30
	<i>Nennlast 4</i>	8	356	--	1526		29	6,9	10,7	189	30
	Mittelwert	8	349	--	1511	--	32,5	7,0	10,6	185	30
09.07.2003	ohne Rußfilter										
	<i>Nennlast 1</i>	8	249	--	2102		64	10,0	8,3	117	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	319	--	2019		86	9,9	8,4	119	30
	Mittelwert	8	284	--	2061	--	75,0	10,0	8,4	118	30
28.10.2003	ohne Rußfilter am Kamin										
	<i>Teillast 1</i>	8	37	5,3	2079	--	--	10,8	7,7	139	2
	<i>Teillast 2</i>	7	38	5,4	2481	--	--	12,3	6,6	135	2
	<i>Teillast 3</i>	6	39	5,8	2855	--	--	13,3	5,8	123	2
	<i>Teillast 4</i>	5	44	7,7	3212	--	--	14,2	5,1	115	2
	<i>Teillast 5</i>	4	52	9,6	3455	--	--	15,0	4,5	107	2
	<i>Teillast 6</i>	2	208	19	3581	--	--	16,4	3,5	98	2
	Mittelwert	5	70	9	2944	--	--	13,7	5,5	120	2
28.10.2003	ohne Rußfilter am Kamin										
	<i>Teillast 1</i>	8	37	5,7	--	1365	--	10,8	7,7	139	2
	<i>Teillast 2</i>	7	37	5,3	--	1859	--	12,3	6,6	132	2
	<i>Teillast 3</i>	6	39	5,8	--	2302	--	13,3	5,8	120	2
	<i>Teillast 4</i>	5	43	7,7	--	2727	--	14,1	5,2	112	2
	<i>Teillast 5</i>	4	53	10	--	3120	--	15,0	4,5	104	2
	<i>Teillast 6</i>	2	266	21	--	3357	--	16,4	3,5	92	2
	Mittelwert	5	79	9	--	2455	--	13,7	5,6	117	2
28.10.2003	ohne Rußfilter vor Abgaswärmetauscher										
	<i>Teillast 1</i>	8	33	7,2	2104	--	--	11,1	7,5	234	2
	<i>Teillast 2</i>	7	34	9	2380	--	--	12,3	6,6	211	2
	<i>Teillast 3</i>	6	37	11	2733	--	--	13,3	5,8	183	2
	<i>Teillast 4</i>	5	47	14	3069	--	--	14,4	5,0	160	2
	<i>Teillast 5</i>	4	69	18	3247	--	--	15,0	4,5	144	2
	<i>Teillast 6</i>	2	563	39	3386	--	--	16,4	3,5	113	2
	Mittelwert	5	131	16	2820	--	--	13,8	5,5	174	2

Emissionsmessungen Rußfilter

Messdatum (lfd. Nr.)	Versuchsvariante	Lei- stung kWel	CO mg/Nm ³	CnHm mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	NO mg/Nm ³	Staub mg/Nm ³	O2 %	CO2 %	Ab- gas- temp. °C	Mess- dauer min
28.10.2003	ohne Rußfilter vor Abgaswärmetauscher										
	<i>Teillast 1</i>	8	33	6,8	--	1293	--	11,2	7,4	241	2
	<i>Teillast 2</i>	7	33	8,4	--	1709	--	12,4	6,5	216	2
	<i>Teillast 3</i>	6	37	10	--	2224	--	13,5	5,7	189	2
	<i>Teillast 4</i>	5	45	13	--	2629	--	14,4	5,0	165	2
	<i>Teillast 5</i>	4	65	18	--	2919	--	15,1	4,5	148	2
	<i>Teillast 6</i>	2	491	36	--	3109	--	16,4	3,5	118	2
Mittelwert	5	117	15	--	2314	--	13,8	5,4	180	2	
28.10.2003	ohne Rußfilter										
	<i>Nennlast 1</i>	8	34	6,6	2194	--	36	11,0	7,5	137	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	35	6,1	2158	--	33	11,0	7,5	137	29
	<i>Nennlast 3</i>	8	37	5,7	--	1391	57	10,8	7,7	138	30
Mittelwert	8	35	6,1	2176	1391	42	10,9	7,6	137	30	
29.10.2003	mit Rußfilter Da neu										
	<i>Nennlast 1</i>	8	48	4,8	2176	--	10	11,0	7,6	128	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	49	4,7	2170	--	10	10,8	7,7	129	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	47	4,2	2124	--	11	10,7	7,8	130	30
	<i>Nennlast 4</i>	8	47	3,9	--	1389	--	10,5	7,9	131	22
Mittelwert	8	48	4,4	2157	1389	11,0	10,8	7,8	130	28	
04.02.2004	mit Rußfilter Db										
	<i>Nennlast 1</i>	8	56	4,6	2133	--	--	10,2	8,1	194	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	55	4,3	2133	--	25	10,2	8,2	194	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	58	3,9	2050	--	39	10,0	8,3	196	31
Mittelwert	8	56	4,3	2105	--	32,0	10,1	8,2	195	30	
04.02.2004	ohne Rußfilter										
	<i>Nennlast 1</i>	8	56	4,4	1959	--	50	10,2	8,2	158	25
	<i>Nennlast 2</i>	8	55	4,8	1949	--	55	10,2	8,2	159	29
	<i>Nennlast 3</i>	8	55	4,9	1952	--	51	10,2	8,2	159	26
Mittelwert	8	55	4,7	1953	--	52,0	10,2	8,2	159	27	
05.02.2004	mit Rußfilter Dc neu										
	<i>Nennlast 1</i>	8	46	13,0	2131	--	--	10,5	8,0	131	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	53	14,0	2093	--	5	10,2	8,2	134	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	55	12,0	2060	--	3	10,0	8,3	136	30
	<i>Nennlast 4</i>	8	90	6,0	--	1874	2	9,7	8,6	153	30
Mittelwert	8	61	11,3	2095	1874	3,3	10,1	8,3	139	30	
28.05.2004	ohne Rußfilter E neu										
	<i>Nennlast 1</i>	8	13	--	1871	--	126	10,9	7,6	112	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	10	--	1967	--	50	11,0	7,6	112	30
Mittelwert	8	12	--	1919	--	88,0	11	8	112	30	
28.05.2004	mit Rußfilter E neu										
	<i>Nennlast 1</i>	8	21	--	1955	--	11	10,9	7,6	104	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	20	--	1995	--	9,4	10,8	7,7	113	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	22	--	1935	--	--	10,6	7,8	114	30
Mittelwert	8	21	--	1962	--	10,2	10,8	7,7	110	30	

Emissionsmessungen Rußfilter

Messdatum (Ifd. Nr.)	Versuchsvariante	Lei- stung kWel	CO mg/Nm ³	CnHm mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	NO mg/Nm ³	Staub mg/Nm ³	O2 %	CO2 %	Ab- gas- temp. °C	Mess- dauer min
10.08.2004	mit Rußfilter E nach 420 Bh kurz vor Reinigungsintervall (180 mbar Abgasgegendruck)										
	180 Bh nach letzter Reinigung										
	<i>Nennlast 1</i>	8	413	12,0	1409	--	16	9,1	9,0	171	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	414	11,0	1862	--	20	9,0	9,1	172	31
	<i>Nennlast 3</i>	8	399	15,0	1592	--	19	9,0	9,1	172	30
	<i>Nennlast 4</i>	8	410	24,0	1560	--	16	9,0	9,1	173	30
	<i>Nennlast 5</i>	8	396	8,0	--	1875	21	8,9	9,1	174	30
Mittelwert	8	406	14,0	1606	1875	18,4	9	9	172	30	
11.08.2004	ohne Rußfilter E										
	<i>Nennlast 1</i>	8	340	13,0	1836	--	102	9,6	8,6	127	30
	<i>Nennlast 2</i>	8	320	16,0	1871	--	87	9,7	8,5	128	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	324	18,0	1850	--	84	9,7	8,5	129	30
	<i>Nennlast 4</i>	8	329	21,0	1871	--	90	9,7	8,5	131	30
	<i>Nennlast 5</i>	8	340	21,0	--	1869	94	9,7	8,5	132	30
	Mittelwert	8	331	17,8	1857	1869	91,4	10	9	129	30
11.08.2004	mit Rußfilter E nach 422 Bh kurz nach Reinigungsintervall (50 mbar Abgasgegendruck)										
	<i>Nennlast 1</i>	8	384	12,0	1836	--	15	9,6	8,6	152	29
	<i>Nennlast 2</i>	8	506	11,0	1757	--	16	9,5	8,7	164	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	486	10,0	1764	--	10	9,5	8,7	165	30
	Mittelwert	8	459	11,0	1786	--	13,5	9,5	8,7	160	30
12.08.2004	mit Rußfilter E nach 441 Bh, 20 Bh nach Reinigungsintervall (81 mbar Abgasgegendruck)										
	<i>Nennlast 1</i>	8	387	6,3	1722	--	9	9,2	8,9	174	29
	<i>Nennlast 2</i>	8	398	6,3	1714	--	8	9,2	8,9	175	30
	<i>Nennlast 3</i>	8	408	8,1	1723	--	10	9,2	8,9	176	31
	Mittelwert	8	398	6,9	1720	--	8,9	9,2	8,9	175	30