

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

**Untersuchungen zu Abgasemissionen  
und zum Einsatz von Partikelfiltersystemen  
bei rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken**

Klaus Thuneke

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Joachim Meyer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Hermann Auernhammer, i. R.  
2. Univ.-Prof. Dr. Roland Meyer-Pittroff, i. R.  
3. Univ.-Prof. Dr. Martin Faulstich

Die Dissertation wurde am ..... bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am ..... angenommen.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole</b> .....	<b>11</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Einheiten</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>15</b>
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>19</b>
2.1 Rapsölkraftstoff .....	20
2.2 Dieselmotor .....	25
2.3 Pflanzenölbetriebener Motor .....	29
2.4 Abgasemissionen .....	33
2.4.1 Grundlagen der Verbrennung.....	33
2.4.2 Kohlenmonoxid.....	35
2.4.3 Stickstoffoxide.....	35
2.4.4 Kohlenwasserstoffe .....	37
2.4.5 Aldehyde .....	38
2.4.6 Partikelmasse und Staub .....	38
2.4.7 Innermotorische Optimierung zur Minderung von Abgasemissionen .....	41
2.5 Abgasnachbehandlung.....	43
2.5.1 Oxidationskatalysator .....	43
2.5.2 Entstickungskatalysator.....	43
2.5.3 Partikelfiltersysteme .....	44
2.6 Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke.....	49
2.6.1 Einsatz und Betrieb .....	49
2.6.2 Vorschriften zum Immissionsschutz .....	52
2.7 Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Pflanzenöl-Motoren .....	54
2.7.1 Vergleich Pflanzenöl- und Dieselmotoren .....	54
2.7.2 Einflüsse auf die Emission bei Pflanzenölkraftstoffbetrieb.....	57
2.7.3 Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW .....	59
2.7.4 Einsatz von Partikelfiltersystemen bei Rapsölkraftstoffbetrieb.....	62
<b>3 Zielsetzung</b> .....	<b>63</b>
<b>4 Material und Methoden</b> .....	<b>65</b>
4.1 Untersuchungsvarianten .....	65
4.1.1 Ausgewählte Blockheizkraftwerke .....	71
4.1.2 BHKW-Betriebsweisen .....	72
4.1.3 Verwendete Rapsölkraftstoffe .....	74
4.1.4 Ausgewählte Dieselpartikelfiltersysteme.....	78
4.1.4.1 Partikelfilter „a“ – Keramik-Monolith beschichtet.....	78
4.1.4.2 Partikelfilter „b“ – Draht-/Keramikfilamentgestrick beschichtet.....	80
4.1.4.3 Partikelfilter „c“ – Keramik-Monolith unbeschichtet.....	81
4.1.4.4 Partikelfilter „d“ – Faserverbundfilter mit NO <sub>2</sub> -Regeneration.....	82
4.1.4.5 Partikelfilter „e“ – Faserflechtfilter beschichtet.....	83
4.1.4.6 Einbau der Dieselpartikelfiltersysteme in das BHKW A .....	84

4.2	Durchführung der Emissionsmessungen .....	86
4.2.1	Messaufbau .....	86
4.2.1.1	Erfassung der Randbedingungen .....	86
4.2.1.2	Erfassung des Emissionsverhaltens .....	87
4.2.2	Messverfahren .....	88
4.2.3	Ablauf der Emissionsmessungen .....	91
4.2.4	Auswertung .....	92
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>94</b>
5.1	Emissionsverhalten von drei Rapsöl-BHKW .....	94
5.1.1	Randbedingungen .....	94
5.1.2	Dauerlast .....	98
5.1.2.1	Kohlenmonoxid .....	98
5.1.2.2	Stickstoffoxide .....	102
5.1.2.3	Gesamt-C .....	105
5.1.2.4	Staub .....	106
5.1.2.5	Aldehyde .....	109
5.1.3	Einfluss von Teillastbetrieb .....	110
5.1.4	Einfluss der Kaltstartphase .....	118
5.1.5	Einfluss von Start/Stopp-Zyklen .....	122
5.1.6	Einfluss ausgewählter Rapsölkraftstoffeigenschaften .....	126
5.1.7	Einfluss eines Oxidationskatalysators .....	129
5.1.8	Einfluss eines Abgaspartikelfilters .....	133
5.1.9	Fazit .....	137
5.2	Emissionsverhalten eines Rapsöl-BHKW mit verschiedenen Partikelfiltersystemen .....	138
5.2.1	Betriebsverhalten und Randbedingungen .....	138
5.2.1.1	Partikelfilter „a“ – Keramik-Monolith beschichtet .....	138
5.2.1.2	Partikelfilter „b“ – Draht-/Keramikfilamentgestrick beschichtet .....	139
5.2.1.3	Partikelfilter „c“ – Keramik-Monolith unbeschichtet .....	141
5.2.1.4	Partikelfilter „d“ – Faserverbundfilter mit NO <sub>2</sub> -Regeneration .....	142
5.2.1.5	Partikelfilter „e“ – Faserflechtfilter beschichtet .....	144
5.2.2	Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Partikelfiltern .....	145
5.2.2.1	Staub .....	145
5.2.2.2	Kohlenmonoxid .....	147
5.2.2.3	Stickstoffoxide .....	149
5.2.2.4	Gesamt-C .....	150
5.2.2.5	Fazit .....	151
<b>6</b>	<b>Einordnung der Ergebnisse .....</b>	<b>152</b>
6.1	Emissionsverhalten rapsölkraftstoffbetriebener Praxis-BHKW .....	152
6.2	Abgaspartikelfiltersysteme bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW .....	157
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>160</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>164</b>
<b>9</b>	<b>Summary .....</b>	<b>167</b>
<b>10</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>170</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>179</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des Welt-Primärenergieverbrauchs von 1965 bis 2005 in Millionen Tonnen Rohöläquivalenz (nach BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2006 [18]) .....	15
Abbildung 2: Schaubild der Verbrennung von Rapsölkraftstoff in einem pflanzenöлтаuglichen BHKW .....	18
Abbildung 3: BHKW-Komponenten - Definition und Abgrenzung (nach VDI, 2004 [105]).....	19
Abbildung 4: Kinematische Viskosität von Rapsöl und Dieselkraftstoff in Abhängigkeit von der Kraftstofftemperatur (nach WIDMANN et al., 1992 [116]) .....	22
Abbildung 5: Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung (MOLLENHAUER, 1997 [80]).....	34
Abbildung 6: Funktionsschema Plantotronic <sup>®</sup> -System (nach WIDMANN et al., 2001 [114]).....	51
Abbildung 7: Strukturelle Verteilung von Pflanzenöl-BHKW in Deutschland – Bild links: BHKW-Anzahl je Leistungsklasse bez. auf die Gesamtzahl von $n = 1801$ ; Bild rechts: Installierte elektrische Leistung je Leistungsklasse bezogen auf die installierte Gesamtleistung von $P_{el} = 237$ MW (nach IE, 2006 [52]) .....	51
Abbildung 8: Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren im Vergleich zu Dieselkraftstoff (DK = 100 %) (nach TSCHÖKE, 1997 [102]) .....	55
Abbildung 9: Modell der Rapsölkraftstoffverbrennung in pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerken mit Eingangs-, Einfluss- und Zielgrößen .....	63
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen an BHKW A, B und C mit der jeweiligen Kombination der Einflussgrößen Betriebsweise, Kraftstoff und Abgasnachbehandlung.....	66
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystemen verschiedener Bauarten an BHKW A .....	67
Abbildung 12: Bild links: Draufsicht auf Katalysator-Partikelfilter-System „a“ - keramischer Filterblock mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 220 mm Länge); Bild rechts: Detailaufnahme der wechselseitig verschlossenen Kanäle.....	79
Abbildung 13: Bild links: Filtersystem „bb“ - gewickeltes Draht-/Keramikfilamentgestrick in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 200 mm Länge); Bild rechts: Draufsicht auf Filtersystem „bb“ .....	80
Abbildung 14: Draufsicht (links) und Schnittzeichnung (rechts) von Partikelfiltersystem „c“ - keramischer Monolith in speziellem Gehäuse (142 mm Durchmesser, 200 mm Länge).....	81
Abbildung 15: Bild links: Draufsicht auf Dieselpartikelfiltersystem „d“ - gewickelte Keramikfaserverbundbahn mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 200 mm Länge), Bild rechts: Detailaufnahme der wechselseitig verschlossenen Kanäle.....	82

Abbildung 16: Abgaspartikelfiltersystem „e“ mit katalytisch beschichteten Glasfasergeflechtfilterkerzen Bild links: Filterkerzen, teilweise im Gehäuse; Bild rechts: Filterkerzen ohne umgebendes Gehäuse .....	83
Abbildung 17: Abgasheizung für die Untersuchung mit Dieselpartikelfilter „d2“ und „d3“ .....	85
Abbildung 18: Veränderte Abgasführung für Partikelfiltersystem „e“ .....	85
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Geräteaufbaus für die wiederkehrenden Emissionsmessungen an den BHKW A, B und C .....	87
Abbildung 20: Kaminmessaufsatz für die wiederkehrenden Emissionsmessungen an BHKW B und C .....	88
Abbildung 21: Ereignisse an BHKW A während des Untersuchungszeitraums .....	95
Abbildung 22: Ereignisse an BHKW B während des Untersuchungszeitraums .....	96
Abbildung 23: Ereignisse an BHKW C1 während des Untersuchungszeitraums .....	96
Abbildung 24: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	98
Abbildung 25: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; angegeben als NO <sub>2</sub> , bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	103
Abbildung 26: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	105
Abbildung 27: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	107
Abbildung 28: Aldehyd-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	109
Abbildung 29: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	110
Abbildung 30: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	111
Abbildung 31: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	112
Abbildung 32: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> ) .....	113
Abbildung 33: NO <sub>x</sub> -Emission von Pflanzenöl-BHKW A bei einem Lastwechselzyklus (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	114
Abbildung 34: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	114

Abbildung 35: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	115
Abbildung 36: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	116
Abbildung 37: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	116
Abbildung 38: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	117
Abbildung 39: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B und C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	118
Abbildung 40: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B, C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> ).....	120
Abbildung 41: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B, C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> ).....	120
Abbildung 42: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B und C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	121
Abbildung 43: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	122
Abbildung 44: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	123
Abbildung 45: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	124
Abbildung 46: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	125
Abbildung 47: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	126

Abbildung 48: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	127
Abbildung 49: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	128
Abbildung 50: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	129
Abbildung 51: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	130
Abbildung 52: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	130
Abbildung 53: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	131
Abbildung 54: Aldehyd-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	132
Abbildung 55: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	134
Abbildung 56: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C mit und ohne Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	135
Abbildung 57: NO <sub>x</sub> -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	135
Abbildung 58: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt).....	136
Abbildung 59: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „a“ .....	138
Abbildung 60: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „ba“ .....	139

Abbildung 61: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „bb“ .....	140
Abbildung 62: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „c“ .....	141
Abbildung 63: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d1“ .....	142
Abbildung 64: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d2“ .....	143
Abbildung 65: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d3“ .....	144
Abbildung 66: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „e“ .....	145
Abbildung 67: Staub-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	146
Abbildung 68: CO-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	148
Abbildung 69: NO <sub>x</sub> -Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	149
Abbildung 70: Gesamt-C-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> -Gehalt) .....	150
Abbildung 71: Mittelwerte von CO, NO <sub>x</sub> , Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW A im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW <sub>FWL</sub> .....	153
Abbildung 72: Mittelwerte von CO, NO <sub>x</sub> , Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW B im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW <sub>FWL</sub> .....	153
Abbildung 73: Mittelwerte von CO, NO <sub>x</sub> , Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW C1 im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW <sub>FWL</sub> .....	154
Abbildung 74: Mittelwerte von CO, NO <sub>x</sub> , Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW C2 im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW <sub>FWL</sub> .....	154

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Kennwerte von Diesel- und Rapsölkraftstoff gemäß den entsprechenden Normen und Literaturangaben [28] [3] [26] .....	25
Tabelle 2: Emissionsbegrenzungen nach TA Luft 2002 für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige BHKW (d. h. FWL <sup>1</sup> ≥ 1 MW) [35] [119] .....	53
Tabelle 3: Orientierungs- und Zielwerte für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d. h. FWL <sup>1</sup> < 1 MW) [5] [119] .....	54
Tabelle 4: Abgasemissionskonzentrationen bei der Verwendung von zwei verschiedenen Rapsölkraftstoffen unterschiedlicher Qualität in einem BHKW des Typs Panda 10 (Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 Vol.-% O <sub>2</sub> -Gehalt, nach DOBIASCH, 2000 [29]) .....	60
Tabelle 5: Emissionskonzentrationen eines mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW mit 465 Betriebsstunden (Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O <sub>2</sub> , nach STREIT, 1998 [95]) .....	61
Tabelle 6: Ergebnisse von Emissionsmessungen an fünf verschiedenen Blockheizkraftwerken (nach PRANKL et al., 2005 [83]) .....	61
Tabelle 7: Messprogramm zur Ermittlung des Emissionsverhaltens der rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A, B und C bei Dauerlast .....	68
Tabelle 8: Messprogramm zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Emissionsverhalten der rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A, B und C .....	69
Tabelle 9: Messprogramm zur Ermittlung des Emissionsverhaltens des rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Partikelfiltersystemen .....	70
Tabelle 10: Einsatz und technische Daten der rapsölbetriebenen BHKW A, B und C .....	71
Tabelle 11: Kraftstoffkennwerte bei den Emissionsmessungen an BHKW A, BHKW B und BHKW C (Werte, die die Grenzwerte nach RK-Qualitätsstandard 05/2000 nicht einhalten, sind fett gedruckt) .....	75
Tabelle 12: Kraftstoffkennwerte bei den Emissionsmessungen mit verschiedenen Partikelfiltersystemen von BHKW A (Werte, die die Grenzwerte nach RK-Qualitätsstandard 05/2000 nicht einhalten, sind fett gedruckt) .....	77
Tabelle 13: Technische Daten der verwendeten Abgasheizungen .....	85
Tabelle 14: Messgrößen und Messstellen zur Erfassung der Betriebsdaten .....	86
Tabelle 15: Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen für die Erfassung gasförmiger Abgasbestandteile .....	89
Tabelle 16: Mess- und Analyseverfahren zur Bestimmung der Aldehyd-Emissionen an BHKW A [103] .....	91
Tabelle 17: Gasdichten der kontinuierlich erfassten Emissionsgrößen .....	93
Tabelle 18: Betriebsdaten von BHKW A während der Messungen bei Dauerlast .....	97
Tabelle 19: Betriebsdaten von BHKW B während der Messungen bei Dauerlast .....	97
Tabelle 20: Betriebsdaten von BHKW C1 während der Messungen bei Dauerlast .....	97
Tabelle 21: Staub-Minderungsraten und absolute Staub-Emissionen beim Einsatz von Partikelfiltersystemen .....	158

**Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole**

AGR	Abgasrückführung
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch
AWT	Abgaswärmetauscher
bez.	bezogen
Bh	Betriebsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	circa
CFPP	Cold Filter Plugging Point
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CP	Cloudpoint
CRT	Continuous Regenerating Trap
DIN	Deutsches Institut für Normung
<i>E</i>	Massenkonzentration von Emissionskomponenten
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<i>f</i>	Wassergehalt
FAME	Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester)
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie
FWL	Feuerungswärmeleistung
Gesamt-C	Gesamt-Kohlenstoff
g. O.	geringe Oxidationsstabilität
H	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
H <sub>u</sub>	Unterer Heizwert
H <sub>2</sub> O	Wasser
Höb.	Heizölbeimischung
h. G.	Hohe Gesamtverschmutzung
Imp.	Impulse
KOH	Kaliumhydroxid
λ	Lambda
Mg	Magnesium
max.	maximal
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
min.	minimal
N, N <sub>2</sub>	Stickstoff
n. e.	nicht ermittelt
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
O, O <sub>2</sub>	Sauerstoff
P	Phosphor

---

PAH	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
Plant.	Plantotronic®
PM	Partikelmasse
PP	Pourpoint
$\rho$	Dichte
RK	Rapsölkraftstoff
RME	Rapsölmethylester
s	Standardabweichung
SCR	Selektive katalytische Reduktion (selective catalytic reduction)
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SO <sub>3</sub>	Schwefeltrioxid
SO <sub>x</sub>	Schwefeloxide
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TOC	Total Organic Carbon
v	Variationskoeffizient
v. a.	vor allem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau: Ein Projekt zur Untersuchung technischer Möglichkeiten zur Minimierung der Diesel-Partikel-Emissionen bei bestehenden Motoren (1994-1999)
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert

**Verzeichnis der verwendeten Einheiten**

G	Gramm
GJ	Gigajoule
H	Stunde
hPa	Hektopascal
ha	Hektar
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrische Leistung
kW <sub>FWL</sub>	Kilowatt Feuerungswärmeleistung
kW <sub>th</sub>	Kilowatt thermische Leistung
l	Liter
mg	Milligramm
min	Minute
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
ms	Millisekunden
MW	Megawatt
nm	Nanometer
OE	Ölequivalent
Pa	Pascal
ppm	parts per million
s	Sekunde
t	Tonne
Vol.-%	Volumen-Prozent
µm	Mikrometer
°C	Grad Celsius



## 1 Einleitung und Problemstellung

Der Primärenergiebedarf<sup>1</sup> der Weltbevölkerung ist in den letzten Jahrzehnten aufgrund von fortschreitender Industrialisierung und Bevölkerungswachstum stark angestiegen und betrug im Jahr 2005 etwa 10,5 Mrd. t Rohöläquivalent<sup>2</sup> [18]. Zu den Ländern mit den größten Steigerungsraten gehört China, das bereits einen Anteil von 15 % am Weltprimärenergiebedarf hat [18]. Abbildung 1 zeigt, dass die weltweite Energieversorgung heutzutage überwiegend auf der Nutzung der fossil biogenen Energieträger Erdöl, Kohle und Erdgas sowie zu einem geringen Teil auf der Nutzung von Wasserkraft und der fossil mineralischen Kernenergie basiert<sup>3</sup>. Für Biomassebrennstoffe, wie Holz, fehlen belastbare statistische Verbrauchsangaben. Schätzungen gehen von einem Anteil der Holzbrennstoffe am Primärenergieverbrauch Asiens von 7 %, Lateinamerikas von 10 % und Afrikas von 40 % aus [17].

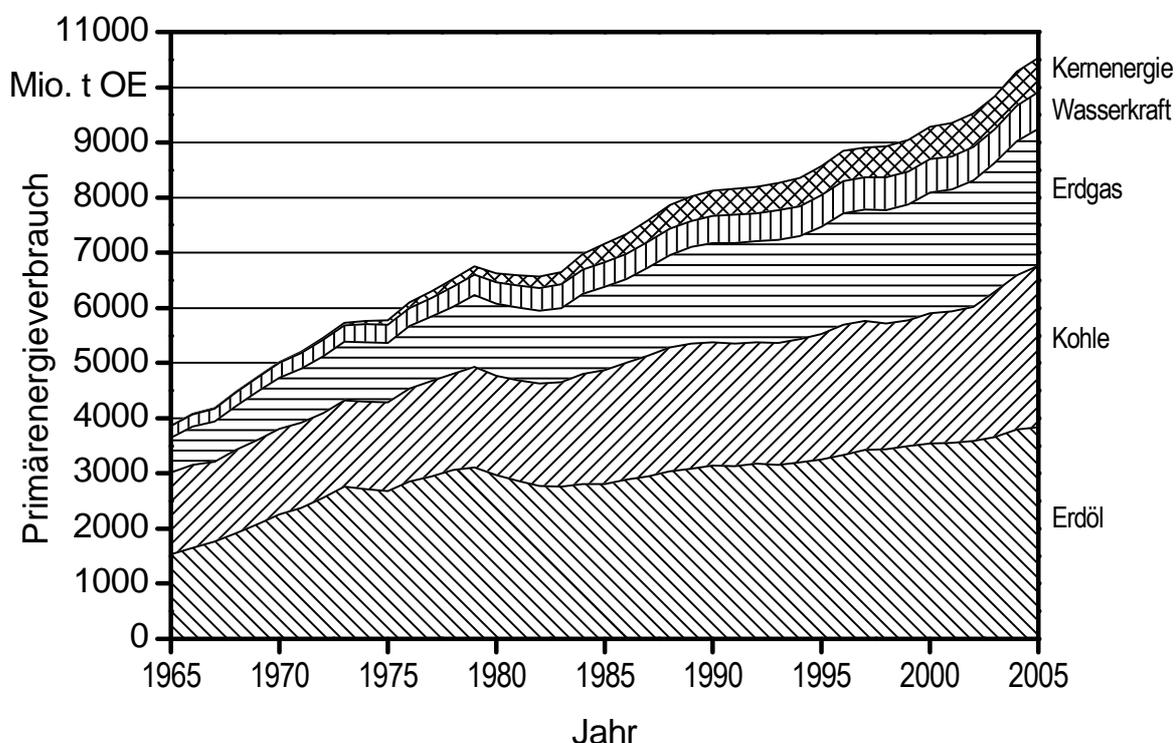


Abbildung 1: Entwicklung des Welt-Primärenergieverbrauchs von 1965 bis 2005 in Millionen Tonnen Rohöläquivalenz (nach BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2006 [18])

Fossil biogene und fossil mineralische Energieträger sind meist endliche Energievorräte, die in geologisch vergangenen Zeitaltern gebildet wurden und aufgrund des ansteigenden

<sup>1</sup> Unter Primärenergie werden Energieformen verstanden, die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurden (z. B. Rohsteinkohle, Roherdöl, Windkraft) (KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN, 2001 [54])

<sup>2</sup> 1 Tonne Rohöläquivalent (t OE) entspricht ca. 42 GJ

<sup>3</sup> Definition von Energiebegriffen in Anlehnung an KALTSCHMITT, M. und A. WIESE, 1997 [55]

Bedarfs zunehmend verknappen. Im Gegensatz dazu gelten erneuerbare Energieträger als in menschlichen Dimensionen unerschöpfliche Energiequellen [55].

Die beschränkte Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern bedingt, dass diese langfristig durch erneuerbare Energiequellen ersetzt werden müssen. Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass eine Nutzung der vorhandenen Reserven und Ressourcen angesichts der massiven Anreicherung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und der damit verbundenen Klimaänderung (Treibhauseffekt) eingeschränkt werden muss. Kurzfristig realisierbare Lösungen bestehen im Wesentlichen in der Senkung des Primärenergieverbrauchs durch Einsparung (z. B. höhere Effizienz bei den Umwandlungsketten) und in der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen kommt neben Wasserkraft, Windkraft und direkter Sonneneinstrahlung der Biomasse als weithin verfügbare, gespeicherte Energieform eine hohe Bedeutung zu. An die Produktion und die Nutzung von Biomasseenergieträgern sind Mindestanforderungen zu stellen, um eine Verschlechterung gegenüber herkömmlichen Energieträgern hinsichtlich ökologischer und gesellschaftlicher Auswirkungen auszuschließen [36].

In Deutschland wurden im Jahr 2005 4,6 % des Primärenergiebedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt [16]. Den größten Anteil nahm mit 71 % Biomasse in fester, gasförmiger und flüssiger Form ein. Auf Festbrennstoffe, die überwiegend zur Wärmegewinnung eingesetzt wurden, entfielen 44 %, auf Biogas 9 % und auf Biokraftstoffe 12 % [16]. Der Absatz von Biokraftstoffen betrug im Jahr 2006 etwa 2,8 Mio. t. Neben Biodiesel und Bioethanol hatten auch Pflanzenöle mit ca. 300 000 t einen bedeutenden Anteil daran [15].

Als flüssiger Energieträger zeichnet sich Pflanzenöl durch eine hohe Energiedichte, ähnlich der von Mineralöl aus und ist als Kraftstoff für die Nutzung in angepassten Dieselmotoren zur Erzeugung hochwertiger Energieformen, wie z. B. Strom, geeignet. Die Motortechnik und Logistik sind dieselkraftstoffähnlich, daher weit ausgereift, kostengünstig und in die Praxis eingeführt. Rapsöl, das in Mitteleuropa bedeutendste Pflanzenöl, weist besonders günstige Kraftstoffeigenschaften auf, wie z. B. eine hohe Lagerbeständigkeit bei gleichzeitig guter Kältetauglichkeit. Somit liegen für Rapsölkraftstoff auch die meisten Einsatzerfahrungen vor. Bisher konzentrierte sich die Nutzung von Rapsölkraftstoff vor allem auf den Automobil- und Nutzfahrzeugsektor, weil dort die Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Preisdifferenz zu Dieselkraftstoff am größten war. Mit Einführung des im August 2004 in Kraft getretenen novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ist Rapsölkraftstoff auch zur stationären Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW) wirtschaftlich interessant geworden, wenn neben dem Strom ein Großteil der im Verbrennungsmotor entstehenden Wärme genutzt wird. Durch diese sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung können hohe Wirkungsgrade erreicht werden.

Gemäß dem Sondergutachten „Klimaschutz durch Biomasse“ des Sachverständigenrats für Umweltfragen vom Juli 2007 sollte ein Ausbau der kombinierten Wärme- und Strom-

nutzung angesichts der guten Treibhausgas-Einsparungspotenziale auf jeden Fall angestrebt werden [92].

In Deutschland sind derzeit mehr als 1800 pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke installiert. Der überwiegende Anteil davon (ca. 61 %) besitzt eine elektrische Leistung bis 100 kW [52]. Als Kraftstoff werden bei Aggregaten mit geringer Leistung fast ausschließlich Rapsöl, bei leistungsstärkeren BHKW vermehrt auch Soja- oder Palmöl eingesetzt. Einsatzgebiete für Pflanzenöl-BHKW sind vorrangig dort, wo Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (< 100 °C) zur Deckung des Heiz- oder der Prozesswärmebedarfs benötigt wird und dort, wo die spezifischen Vorteile des Pflanzenölkraftstoffs, wie hohe biologische Abbaubarkeit und geringe aquatische Toxizität, besonders zu tragen kommen. Letzteres ist beispielsweise bei der dezentralen Strom- und Wärmeversorgung in umweltsensiblen Gebieten der Fall (z. B. Natur- und Wasserschutzgebiete).

### **Problemstellung**

Rapsöl-BHKW können einen Beitrag zu einer versorgungssicheren und effizienten Energiebereitstellung mit positiven Umwelteffekten verbunden mit einer Stärkung des ländlichen Raums leisten. Neben der vielfältigen positiven Aspekte von rapsölbetriebenen BHKW sind jedoch auch schädliche Auswirkungen, wie Abgasemissionen, zu berücksichtigen. Im Interesse der Luftreinhaltung und mit steigenden Anforderungen der Abgasgesetzgebung gilt es, Schadstoffemissionen zu minimieren. Besondere Beachtung kommt derzeit den Partikel-Emissionen zu, da diese eine hohe gesundheitliche Relevanz aufweisen und durch den Einsatz von Partikelfiltersystemen drastisch reduziert werden können.

Bei Rapsöl-BHKW, die üblicherweise auf einem angepassten Serien-Dieselmotor basieren, ist der Kenntnisstand bezüglich der emittierten Abgase weitgehend unklar. Aus zahlreichen Untersuchungen zum Einsatz von Pflanzenölmotoren in mobilen Anwendungen geht hervor, dass die Verbrennung von Rapsölkraftstoff im Dieselmotor erwartungsgemäß zu einem vom Dieselbetrieb abweichenden Emissionsverhalten führen kann (KERN und WIDMANN, 1997 [58]; TSCHÖKE, 1997 [102]; WIDMANN et al., 1992 [116]; RICHTER et al., 1991 [90]). Gründe dafür sind, neben den unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften, auch die vielfältigen meist nachträglich durchgeführten Umrüstmaßnahmen am Serien-Dieselmotor zur Anpassung an den Rapsölkraftstoffbetrieb.

Um das Emissionsverhalten von Rapsöl-BHKW beurteilen zu können, sind umfassende Kenntnisse über die Verbrennung von Rapsölkraftstoff in dafür geeigneten Blockheizkraftwerken, über die Einflussgrößen sowie deren Wirkung auf die gas- und partikelförmigen Emissionen erforderlich. In Abbildung 2 ist der Prozess der Verbrennung von Rapsölkraftstoff in einem BHKW mit den Inputgrößen Rapsölkraftstoff, Verbrennungsluft und mitverbranntes Motoröl sowie den Outputgrößen Energie und Emissionen schematisch dargestellt.

Von besonderem Interesse sind diejenigen gas- und partikelförmigen Emissionskomponenten, die wegen ihres negativen Einflusses auf die Qualität der Umgebungsluft und die menschliche Gesundheit gesetzlich limitiert sind. Auch wären Kenntnisse über die Veränderung der Emissionskonzentrationen über einen längeren Betriebszeitraum hinweg je nach vorherrschenden Praxisbedingungen wünschenswert. Ungewiss ist ferner, ob und wie sich das Emissionsverhalten verschiedener Rapsöl-BHKW voneinander unterscheidet und welchen Einfluss darauf die BHKW-Betriebsweise (z. B. Teillast, Kaltstart), die Rapsölkraftstoffqualität sowie Abgasnachbehandlungssysteme nehmen.

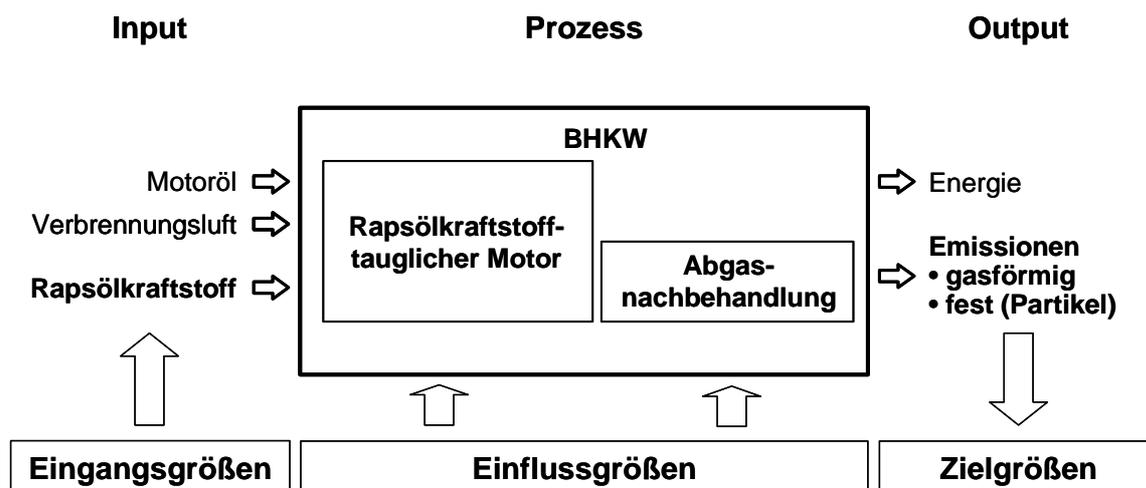


Abbildung 2: Schaubild der Verbrennung von Rapsölkraftstoff in einem pflanzenölkraftstofftauglichen BHKW

Aufgrund der großen gesundheitlichen Bedeutung von Partikel-Emissionen wäre es wissenswert, ob und in welchem Maße diese durch verfügbare Dieselpartikelfiltersysteme gesenkt werden können.

Das Schließen dieser Kenntnislücken würde Aussagen ermöglichen über die zu erwartenden Konzentrationen der wichtigsten Emissionskomponenten im Abgas von Rapsöl-BHKW sowie deren Schwankungsbreiten unter Praxisbedingungen. Auch könnten Einflüsse auf das Emissionsverhalten identifiziert und quantifiziert werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen der Luftreinhaltung könnten die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Schadstoffminderung bei Rapsöl-BHKW beurteilt und, falls erforderlich, Lösungsansätze aufgezeigt werden. Insbesondere wäre es möglich, die Effektivität und die Tauglichkeit des Einsatzes von Abgaspartikelfiltersystemen bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW einzuschätzen und den Handlungsbedarf abzuleiten.

## 2 Stand des Wissens

Ein Verbrennungsmotoren-Blockheizkraftwerk (BHKW) besteht aus einem oder mehreren BHKW-Modulen mit übergeordneter Schaltanlage, Abgasabführung, Zu- und Abluftanlage, Schallschutzdämmung und Aufstellungsraum (Abbildung 3) [105]. Hauptbestandteil eines BHKW-Moduls ist das BHKW-Aggregat, das sich aus dem Verbrennungsmotor, dem Generator mit den entsprechenden Kraftübertragungs- und Lagerungselementen zusammensetzt. Weitere Modul-Komponenten sind Wärmeübertrager, Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungseinrichtungen, Anlasser, Komponenten des Ansaug-, Abgas-, Kraftstoff- und Schmierölsystems sowie Sicherheitseinrichtungen [105].

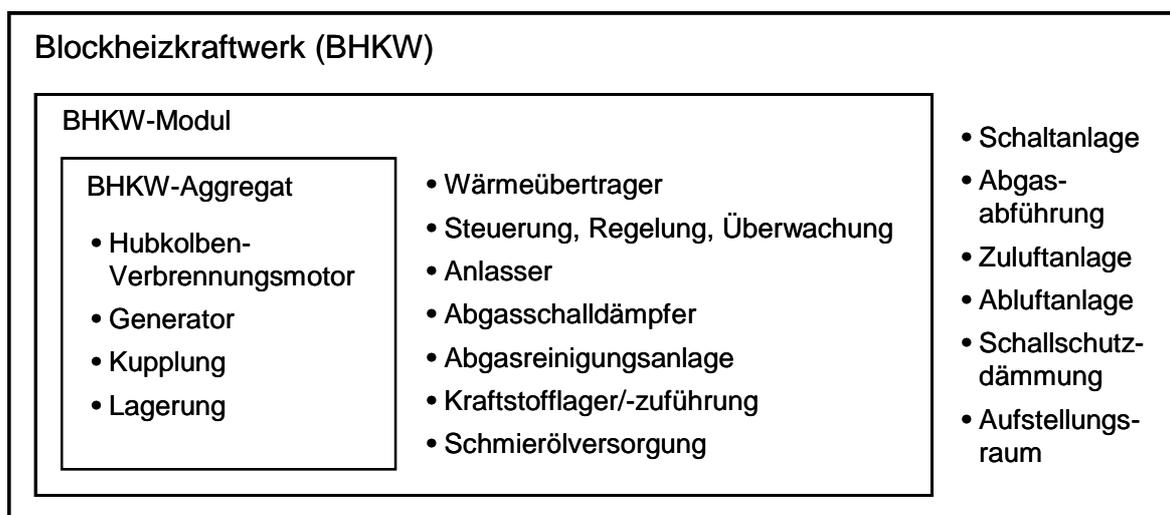


Abbildung 3: BHKW-Komponenten - Definition und Abgrenzung (nach VDI, 2004 [105])

Die mechanische Energie des Motors wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Ein Teil der bei der Verbrennung entstehenden Wärmeenergie aus den Kühlkreisläufen des Motors und dem Motorabgas wird mit Hilfe von Wärmeübertragern abgeführt und über ein Wärmeverteilungsnetz einem Verbraucher zugeführt.

Blockheizkraftwerke sind meist auf den Wärmebedarf eines Verbrauchers ausgelegt (wärmegeführt) und werden parallel zum elektrischen Netz betrieben. Daneben können sie auch stromgeführt zur völligen oder teilweisen netzunabhängigen Inselversorgung eingesetzt werden. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine sorgfältige Einbeziehung der Wärmeverbraucher bei der Auslegung der Anlage. Bei Überdimensionierung führt eine unzureichende Wärmenutzung zu ökonomischen Einbußen. Die Richtlinien VDI 3985 „Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen“ und VDI 2067 Blatt 7 (ersetzt durch Blatt 1 und Blatt 20) zur „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ stellen ebenso wichtige Planungshilfen dar wie die von der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. ASUE herausgegebenen Informationen.

Ziel des Prinzips der Kraft-Wärme-Kopplung bei Blockheizkraftwerken ist es, einen möglichst großen Anteil des Energiegehalts des zugeführten Kraftstoffs zu nutzen und damit einen Beitrag zur Schonung der Ressourcen und Minderung von Abgasschadstoffen zu leisten. Als Brennstoffe werden überwiegend Erdgas, Biogas, Heizöl und Pflanzenöle, bei letzteren insbesondere Rapsöl eingesetzt.

## 2.1 Rapsölkraftstoff

Rapsölkraftstoff nach den Anforderungen der DIN V 51605 besteht aus Pflanzenöl, hergestellt aus den Samen von Raps [28]. Raps ist in Deutschland die wichtigste Ölpflanze und wird auf mehr als 1,5 Mio. ha angebaut. Der durchschnittliche Ölertrag beläuft sich auf ca. 1300 l je Hektar bei einem Kornertrag von 3,5 t/ha, einem Ölgehalt im Samen von 43 % und einem Ölabpressgrad von 80 %. Neben der Verwendung als Energieträger, entweder als Rapsölkraftstoff ohne weitere Aufbereitung oder nach Weiterverarbeitung zu Biodiesel, wird Rapsöl unter anderem auch als Speiseöl, als Futtermittel, als Grundölkomponente zur Schmierstoffherstellung oder als Chemierohstoff genutzt.

### Herstellung von Rapsöl

Rapsölkraftstoff kann sowohl in industriellen Ölmöhlen durch Abpressen und Extrahieren mit nachgeschalteter Raffination mit Verarbeitungskapazitäten von bis zu 4000 t Ölsaats pro Tag als auch in dezentralen Kleinanlagen durch schonendes ausschließlich mechanisches Abpressen (sogenannte „Kaltpressung“) mit etwa 0,5 bis 35 t Ölsaatsverarbeitungskapazität pro Tag gewonnen werden. Die Verfahren sind in der Literatur ausführlich beschrieben, z. B. bei WIDMANN et al. (2001) [115], BRENNDÖRFER und GRAF (1995) [19], WIDMANN (1994) [113] sowie BOCKISCH (1993) [10].

Da bei der dezentralen Rapsölgewinnung auf eine Raffination verzichtet wird, nehmen die Qualität der Ölsaats, das Herstellungsverfahren sowie die Lagerungsbedingungen des Öls wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Rapsöls. Untersuchungen zeigen, dass bei Rapsölkraftstoff aus dezentralen Ölmöhlen insbesondere die Kennwerte Gesamtverschmutzung und Oxidationsstabilität größeren Schwankungen unterliegen [87].

### Zusammensetzung und Eigenschaften von Rapsöl

Pflanzliche Öle bestehen vorwiegend aus Triglyceriden. Glyceride sind Ester aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin und in der Regel drei Fettsäuren (Triglyceride), in seltenen Fällen auch ein bis zwei Fettsäuren (Mono- und Diglyceride). Letztere stellen jedoch ebenso wie die nicht an ein Triglycerid gebundenen freien Fettsäuren bereits Spaltprodukte von Abbaureaktionen dar. Die Fettsäuren sind aus Kohlenstoffketten aufgebaut und

können gesättigt (keine Doppelbindung zwischen benachbarten C-Atomen), bzw. je nach Anzahl der Doppelbindungen einfach oder mehrfach ungesättigt sein. Die Anteile der vorkommenden Fettsäuren an der gesamten Fettsäuremenge eines Öls werden als Fettsäuremuster bezeichnet [115] [10].

Rapsöl besteht zu 77 bis 78 Gew.-% aus Kohlenstoff, zu 11 bis 12 % aus Wasserstoff und zu 10 bis 11 % aus Sauerstoff. Rapsölkraftstoff ist schnell biologisch abbaubar und weist eine sehr geringe aquatische Toxizität im Vergleich zu Diesel- oder Ottokraftstoffen auf. Pflanzenöle sind innerhalb von 21 Tagen zu über 95 % biologisch abgebaut (gemäß CEC L-33-A-94) und gelten als "nicht wassergefährdend" [1].

Bei der Lagerung von Rapsölkraftstoff können Umsetzungsvorgänge stattfinden. Diese sind abhängig von der Vorgeschichte des Öls und den herrschenden Lagerungsbedingungen (u. a. Tankmaterial, Temperatur, Sauerstoffeintrag, Belichtung, Wasserzutritt) [115]. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Autoxidations-, Hydrations- und Polymerisierungsprozesse, die durch geeignete Lagerbedingungen minimiert werden können. Unter günstigen Bedingungen ist Rapsölkraftstoff etwa bis zu 12 Monaten lagerfähig [86].

### **Qualitätsanforderungen an Rapsölkraftstoff**

Untersuchungen zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff werden bei REMMELE (2002) [85] beschrieben. Die Ergebnisse wurden im RK-Qualitätsstandard 05/2000, der auch als „Weihenstephaner Standard“ bekannt ist, zusammengefasst. Darin sind die Qualitätsanforderungen an Rapsölkraftstoff anhand von Kenngrößen mit den dazugehörigen Prüfmethoden und Grenzwerten definiert. Dieser RK-Qualitätsstandard bildete die Grundlage für die Erarbeitung der Vornorm DIN V 51605 für Rapsölkraftstoff [28].

Ähnlich wie in den Normen für Dieselmotorkraftstoff (DIN EN 590), Heizöl extra leicht (DIN 51603-1) sowie Fettsäuremethylester als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge (DIN EN 14214) bzw. als Heizölersatz (DIN EN 14213) sind in der Vornorm DIN V 51605 die Mindestanforderungen an Rapsöl für die Verwendung als Kraftstoff in pflanzenöлтаuglichen Motoren zusammengestellt. Da für andere Pflanzenöle bislang noch sehr wenige Erfahrungen für den Einsatz in pflanzenöлтаuglichen Motoren vorliegen, ist die Vornorm ausschließlich für eine Rohstoffquelle nämlich Rapsöl gültig. Ferner wird der Anwendungsbereich auf pflanzenöлтаugliche Motoren beschränkt, für nicht adaptierte Motoren werden keine Aussagen getroffen. Gemäß der Vornorm DIN V 51605 kann die Herstellung von Rapsölkraftstoff durch mechanische Extraktion sowohl ohne als auch mit Lösemittelextraktion erfolgen. Eine vorangegangene Nutzung des Rapsöls (z. B. als Frittieröl) darf hingegen nicht erfolgt sein. Falls eine Vergällung von Rapsöl notwendig ist, wenn z. B. Rapssaat von Stilllegungsflächen verarbeitet wird, ist eine Beimischung von Rapsölmethylester nach DIN EN 14214 von bis zu 2,9 Vol.-% gestattet. Dieselmotorkraftstoff darf ebenso wenig zugemischt werden, wie Additive, durch die die Einstufung „nicht wassergefährdend“ von Rapsölkraftstoff beeinträchtigt wird. Im Gegensatz zu Dieselmotorkraftstoff mit einer Vielzahl an

beigemischten Wirkstoffkomponenten wird Rapsölkraftstoff üblicherweise nicht additiviert. Folgende Eigenschaften werden in der DIN V 51605 festgelegt [28] [85] [100] [88]:

Die **Dichte** von Rapsölkraftstoff ist weitgehend genetisch fixiert und dient zur Unterscheidung verschiedener Pflanzenöle sowie von Mischungen mit anderen Kraftstoffen. Rapsöl weist eine Dichte von etwa  $920 \text{ kg/m}^3$  bei  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  auf.

Der **Flammpunkt** nach Pensky-Martens ist die Temperatur, bei der entflammbare Dämpfe gebildet werden. Mit zunehmendem Anteil an freien Fettsäuren sinkt der Flammpunkt. Rapsöl hat einen Flammpunkt von ca.  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , der eine hohe Lagerungs- und Transportsicherheit gewährleistet. Bereits geringe Vermischungen mit ca. 0,5 Masse-% Dieseldieselkraftstoff führen zu einer Unterschreitung des Grenzwerts von  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  [85]. Deshalb dient der Flammpunkt auch zur Identifizierung von Beimischungen anderer Kraftstoffe. Der höhere Flammpunkt weist auf ein verändertes Siedeverhalten von Rapsöl im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff hin. Dieses ist durch einen Siedebeginn auf hohem Temperaturniveau (ca.  $300$  bis  $320 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und ein rasches Siedende bei ca.  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  gekennzeichnet [116].

Die **kinematische Viskosität** von Rapsöl bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt ca.  $35 \text{ mm}^2/\text{s}$  und ist damit etwa zehn mal so hoch wie von Diesel. Die höhere Viskosität erfordert eine Anpassung des Kraftstoff- und Einspritzsystems eines Serien-Dieselmotors, um eine ausreichende Fließ- und Pumpfähigkeit sowie ein gutes Zerstäubungsverhalten zu gewährleisten. Die Viskosität von Rapsöl nimmt, wie in Abbildung 4 dargestellt, mit steigender Temperatur ab, erreicht aber erst bei ca.  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  annähernd den Wert von Dieseldieselkraftstoff.

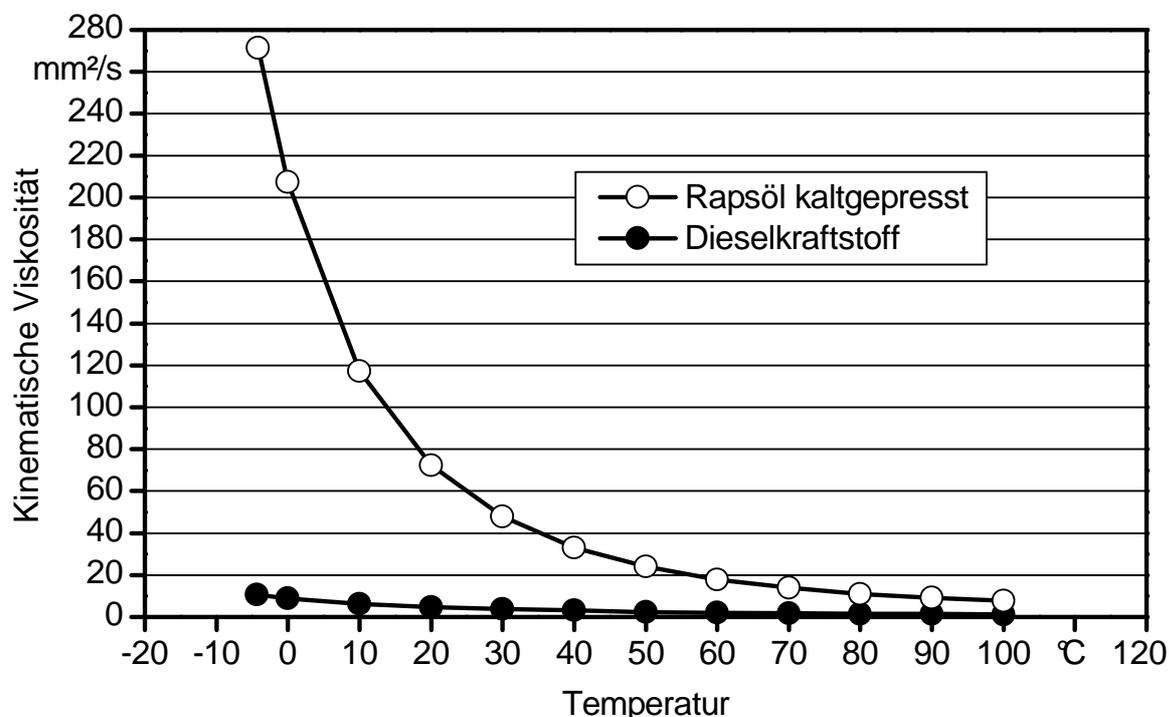


Abbildung 4: Kinematische Viskosität von Rapsöl und Dieseldieselkraftstoff in Abhängigkeit von der Kraftstofftemperatur (nach WIDMANN et al., 1992 [116])

Der **Heizwert** eines Kraftstoffs beschreibt dessen Energiegehalt. Rapsöl hat einen unteren Heizwert ( $H_u$ ) von ca. 37,5 MJ/kg [28]. Der für die motorische Verbrennung relevante volumenbezogene Heizwert ist aufgrund der höheren Dichte des Pflanzenöls mit ca. 34,5 MJ/l nur um etwa 3 bis 4 % geringer als der Heizwert für Dieselmotor mit 35,7 MJ/l [3]. Folglich ist der spezifische Kraftstoffverbrauch eines optimierten Pflanzenölmotors rechnerisch nur geringfügig höher als bei einem Dieselmotor.

Das bei Dieselmotor angewandte Prüfverfahren zur Bestimmung der **Zündwilligkeit** (Cetanzahl) ist für Rapsölkraftstoff nur bedingt aussagekräftig, da die verwendeten Prüfmotoren nicht pflanzenöлтаuglich sind. Derzeit wird ein neues motorunabhängiges Prüfverfahren, angelehnt an die Ermittlung der Cetanzahl von Schweröl, erprobt. Die bisher gemessenen Cetanzahlen von Rapsölkraftstoff liegen bei etwa 40 [2] [85]. Dieselmotor nach DIN EN 590 weist dagegen eine Cetanzahl von mindestens 51 auf [26].

Der **Koksrückstand** beschreibt die Tendenz eines Kraftstoffs, bei der Verbrennung kohlenstoffhaltige Rückstände zu bilden. Anders als bei Dieselmotor und FAME, bei denen der Koksrückstand durch Verschwelen der letzten 10 % des Destillationsrückstandes bestimmt wird, wird bei Rapsöl die Gesamtprobe verwendet. Rapsöl gemäß DIN V 51605 weist einen Koksrückstand von max. 0,40 Masse-% auf.

Die **Iodzahl** ist ein Maß für die mittlere Anzahl an Doppelbindungen der Fettsäuremoleküle und charakterisiert die Art des Pflanzenöls. Pflanzenöle mit hohen Iodzahlen sind meist weniger alterungsbeständig und neigen deshalb eher zum Verharzen sowie zur Bildung von Ablagerungen im Motor als Pflanzenöle mit niedrigen Iodzahlen. Rapsöl ist bei einer Iodzahl von ca. 95 bis 120 g/100 g in kühler, dunkler Umgebung und bei Vermeidung von oxidationsfördernden Bedingungen weitgehend lagerstabil.

Aufgrund des von Natur aus sehr niedrigen **Schwefelgehalts** von Pflanzenöl werden bei der Verbrennung nur geringe Mengen an Schwefeloxiden ( $SO_x$ ) und partikelgebundenen Sulfaten freigesetzt. Schwefelarmer Kraftstoff sichert langfristig hohe Umsetzungsraten von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Aldehyd-Emissionen in Oxidationskatalysatoren. Der Grenzwert für Rapsölkraftstoff wurde deshalb auf maximal 0,001 Masse-% (= 10 mg/kg) festgesetzt.

Die **Gesamtverschmutzung** beschreibt den Massenanteil ungelöster Feststoffe (Partikel) im Kraftstoff. Hohe Feststoffgehalte im Kraftstoff führen zu Verstopfungen von Filtern und erhöhen die Gefahr von Schäden im Einspritzsystem und Ablagerungen im Brennraum, weshalb dieser Kenngröße eine hohe Bedeutung beizumessen ist. Der Grenzwert von maximal 24 mg/kg wird in der Praxis öfters nicht eingehalten.

Die **Säurezahl** (auch Neutralisationszahl) ist ein Maß für den Anteil freier Fettsäuren im Pflanzenöl. Sie wird beeinflusst durch die Qualität der Rapssaat und den Alterungsgrad des Öls. Wasser und Mikroorganismen führen zu einer hydrolytischen Abspaltung von

Fettsäuren und damit zu einem Anstieg der Säurezahl. Neben Korrosion, Verschleiß und Rückstandsbildung im Motor besteht bei Kraftstoffen mit hoher Säurezahl verstärkt die Gefahr einer frühzeitigen Erschöpfung des Motoröls, wodurch die Motorölstandzeit verkürzt bzw. Motorschäden verursacht werden. Deshalb sollte die Säurezahl von Rapsölkraftstoff nach DIN V 51605 den Wert von 2,0 mg KOH/g nicht überschreiten.

Die **Oxidationsstabilität** kennzeichnet den oxidativen Alterungsgrad des Kraftstoffs. Hohe Temperaturen und Sauerstoffeintrag bei der Lagerung beschleunigen den Verderb, der üblicherweise mit einem Anstieg der Viskosität einhergeht. Dabei entstehen unlösliche Verbindungen, die in Filtern und Leitungen zu Verstopfungen führen können. Erfolgt ein Eintrag von vorgealtertem Rapsölkraftstoff ins Motoröl, kann es verstärkt zu Wechselwirkungen zwischen Kraftstoff und Motoröl kommen, die die Schmierfähigkeit des Motoröls beeinträchtigen [99]. Die Oxidationsstabilität von Rapsölkraftstoff sinkt bei unsachgemäßer Lagerung schnell unterhalb des gemäß DIN V 51605 geforderten Grenzwerts von mindestens 6,0 h ab.

**Phosphor** liegt in Pflanzenölen in Form von Phospholipiden vor. Neben Hydratisierbarkeit und Minderung der Oxidationsstabilität ist Phosphor in Ablagerungen im Motor oder in Abgasnachbehandlungssystemen (z. B. Rußfilter) nachweisbar. Da Phosphor als Katalysatorgift wirkt, gilt es, den Gehalt im Kraftstoff zu begrenzen. Der Phosphorgehalt im Rapsöl ist abhängig vom Raffinationsgrad und liegt bei nicht raffiniertem Rapsöl bei der Verwendung von ausgereifter Saat und entsprechender Prozessführung bei der Herstellung unter dem in der Vornorm DIN V 51605 geforderten Grenzwert von 12 mg/kg [112].

Der Gehalt an **Calcium und Magnesium** im Kraftstoff begünstigt, ähnlich wie der Phosphorgehalt, Ablagerungen im Brennraum und führt zur „Vergiftung“ des Katalysators und Verstopfung von Rußfiltern. Der Calcium- und Magnesiumgehalt im Rapsöl korreliert mit dem Phosphorgehalt [87] und kann wie dieser durch Raffination gemindert werden. Bei der Ölerzeugung in dezentralen Anlagen wird der nach DIN V 51605 geforderte Grenzwert für den Summengehalt an Calcium und Magnesium von 20 mg/kg durch eine entsprechend schonende Verarbeitung von gut ausgereifter Rapssaat erreicht.

Der **Aschegehalt** beschreibt den Anteil anorganischer Feststoffe, wie z. B. Staub im Kraftstoff. Hohe Aschegehalte können zu erhöhtem Verschleiß im Kraftstoff- und Einspritzsystem führen. Deshalb wird in der Vornorm DIN V 51605 der Aschegehalt auf 0,01 Masse-% begrenzt.

Der **Wassergehalt** von Rapsölkraftstoff wird durch die Feuchte der Ölsaaten beeinflusst und kann vor allem auch bei unsachgemäßer Lagerung des Öls über den Grenzwert von 0,075 Masse-% gemäß DIN V 51605 ansteigen. Bei niedrigen Temperaturen kann freies Wasser durch Gefrieren zu Filterverstopfungen führen. Darüber hinaus kommt es in Lagergefäßen bevorzugt an der Grenzschicht zwischen Wasser und Kraftstoff zum Wachstum von Mikroorganismen, die wiederum die Ölalterung beschleunigen.

Zur Charakterisierung des **Kälteverhaltens** von Dieselkraftstoffen stehen verschiedene Kennwerte, wie Cloudpoint (CP), Cold-Filter-Plugging-Point (CFPP) oder Pourpoint (PP) zur Verfügung. Die hierzu verwendeten Prüfverfahren sind nicht zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Rapsöl geeignet, da der Übergang von der flüssigen in die feste Phase im Vergleich zu Dieselkraftstoff unterschiedlich verläuft. Ein geeignetes Prüfverfahren zur Beschreibung der Wintertauglichkeit eines rapsölkraftstofftauglichen Motors steht derzeit nicht zur Verfügung [85].

Rapsölkraftstoff weist grundsätzlich ähnliche Eigenschaften wie Dieselkraftstoff auf, so dass der Einsatz in Selbstzündungsmotoren möglich ist [81]. Dennoch bestehen auch wesentliche Unterschiede. Tabelle 1 stellt ausgewählte Eigenschaften von Dieselkraftstoff und Rapsölkraftstoff einander gegenüber. Von Dieselkraftstoff unterscheidet sich Rapsöl unter anderem durch dessen Sauerstoffgehalt, die höhere Viskosität und den höheren Flammpunkt, so dass der Einsatz in konventionellen Dieselmotoren wegen unzureichender Pumpfähigkeit, ungünstigem Brennverlauf oder verstärkter Rückstandsbildung langfristig nicht möglich ist. Darüber hinaus kann es zu einer Verschlechterung des Emissionsverhaltens in nicht angepassten Motoren kommen (Kapitel 2.7.1). Aus diesen Gründen ist für die Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff entweder eine chemische Veränderung des Rapsöls, wie bei der Umesterung zu Rapsölmethylester (Biodiesel), oder eine Anpassung der Motorentechnik an die Anforderungen des Rapsöls erforderlich.

Tabelle 1: Ausgewählte Kennwerte von Diesel- und Rapsölkraftstoff gemäß den entsprechenden Normen und Literaturangaben [28] [3] [26]

Kenngröße	Einheit	Dieselmkraftstoff (DIN EN 590)	Rapsölkraftstoff (DIN V 51605)
Zusammensetzung C:H:O	Masse-%	87:13:0	77:12:11
Dichte (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	820 - 845	900 - 930
Viskosität <sup>1)</sup> (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	2,0 - 4,5	max. 36
Flammpunkt	°C	über 55	min. 220
Heizwert massebezogen	MJ/kg	ca. 43,0 <sup>2)</sup>	ca. 37,5
Heizwert volumetrisch	MJ/l	ca. 35,7 <sup>3)</sup>	ca. 34,5

<sup>1)</sup> kinematische Viskosität

<sup>2)</sup> BASSHUYSEN VAN und SCHÄFER (2004) [3]

## 2.2 Dieselmotor

„Dieselmotor wie Ottomotor sind prinzipiell Energiewandler, die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie in mechanische Energie (Nutzarbeit) wandeln, indem sie die im Motor durch Verbrennung freigesetzte Wärme einem thermodynamischen Kreisprozess zuführen und als Druck-Volumen-Arbeit nutzen“ (MOLLENHAUER, 2002 [81]). Der Verbrennung geht die Aufbereitung des Kraftstoffs voraus, um ein zündfähiges Gemisch aus Kraftstoffdampf und Verbrennungsluft zu erhalten. Bei Ottomotoren geschieht dies durch Vergaser

oder Einspritzen in das Saugrohr außerhalb des Brennraums (äußere Gemischbildung), bei Dieselmotoren wird der Kraftstoff direkt in den Brennraum, in dem sich hoch verdichtete und erwärmte Luft befindet, eingespritzt (innere Gemischbildung). Die Verbrennungsluft im Brennraum wird entweder angesaugt oder durch Aufladung eingebracht. Zur vollständigen Verbrennung von 1 kg Kraftstoff werden in etwa 14,5 kg Luft benötigt [3]. Dieses sogenannte stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis wird auch als Lamda ( $\lambda$ ) = 1 bezeichnet. Dieselmotoren werden mit „Luftüberschuss“ betrieben. Das Luft-Kraftstoff-Verhältnis beträgt bei Vollast etwa  $\lambda = 1,05$  bis  $1,20$  (bei aufgeladenen Motoren mit Ladeluftkühlung auch darüber) und nimmt mit abnehmender Last bis zu einem Wert von ca.  $\lambda = 8$  zu [3]. Das komplexe technische System „Dieselmotor“ setzt sich aus mehreren Teilsystemen zusammen unter vermehrter Einbindung elektrischer und elektronischer Komponenten [81]:

- Kraftstoffsystem,
- Einspritzsystem,
- Aufladesystem,
- Verbrennungssystem,
- Abgassystem,
- Mechanische Systeme,
- Schmiersystem,
- Kühlsystem.

Durch entsprechende Ausgestaltung von **Brennraum**, **Verbrennungsluftzufuhr** und **Einspritzsystem** können Dieselmotoren hinsichtlich Drehmomentverlauf und Kraftstoffverbrauch, aber insbesondere auch hinsichtlich des Abgasverhaltens optimiert werden. Ziel ist eine möglichst gute Gemischbildung zur Erlangung eines hohen Wirkungsgrads und niedriger Abgasemissionen.

## **Brennraum**

Hinsichtlich der Gestaltung des Brennraums lassen sich Dieselmotoren zwischen Motoren mit unterteiltem Brennraum und indirekter Einspritzung des Kraftstoffs in eine Nebenkammer und Motoren mit nicht unterteiltem Brennraum und direkter Einspritzung in die Kolbenmulde unterscheiden.

Beim indirekt einspritzenden Verfahren verläuft die Verbrennung in zwei Stufen. Der Kraftstoff wird in eine Nebenkammer (Vor- oder Wirbelkammer), die sich im Zylinderkopf befindet, mithilfe von Zapfendüsen (Düsenöffnungsdruck ca. 100 bis 140 bar) eingebracht. Bei einsetzender Verbrennung erhöht sich der Druck, so dass der Kammerinhalt (je nach Lastzustand des Motors: verbrannter, teilverbrannter und unverbrannter Kraftstoff) in die Hauptkammer strömt. Dort wird das Gemisch mit der darin befindlichen Luft verwirbelt, wodurch sich die Verbrennung fortsetzen kann.

Der Verbindungskanal vom Wirbelkammermotor ist im Gegensatz zum Vorkammermotor so gestaltet, dass die bei der Kompression einströmende Luft Wirbel bildet. Vorkammern sind dagegen zum Hauptbrennraum hin mit einem löchrigen Boden versehen, wodurch eine gute Vermischung mit der Luft im Hauptbrennraum erreicht werden kann. In der Mitte der Vorkammer kann eine Prallfläche platziert sein, die den auftreffenden Kraftstoffstrahl zerteilt und intensiv mit Luft durchmischt. Zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens werden Glühkerzen in den Nebenkammern angebracht, die als Starthilfe dienen.

Die gestufte Verbrennung bei der indirekten Einspritzung führt zu niedrigen Geräusch- und Geruchsstoff-Emissionen sowie zu einem vergleichsweise geringen Ausstoß an Stickstoffoxiden, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. Die Partikel-Emissionen sind jedoch im Vergleich zur direkten Einspritzung meist höher [81] [80].

Für die Umrüstung auf den Betrieb mit Rapsölkraftstoff bieten Vor- und Wirbelkammermotoren aufgrund des großvolumigen Brennraums, der starken Verwirbelung des Kraftstoff/Luft-Gemisches und der relativ langen Verweilzeit des Kraftstoffs in der Brennkammer Vorteile gegenüber Direkteinspritzern. Untersuchungen von RICHTER et al. (1991) [90] zeigen, dass Dieselmotoren mit Kammerbrennverfahren und großen Zylindereinheiten für den Langzeitbetrieb mit Rapsöl geeignet sind. Auch MAURER (2000) [73] stellt fest, dass allein durch periphere Umrüstmaßnahmen Nebenkammerdieselmotoren pflanzenöltauglich gemacht werden können. Deshalb werden heute noch vielfach Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung, nach meist nur geringfügigen Anpassungen, als zuverlässige Antriebsaggregate für kleine rapsölkraftstoffbetriebene Blockheizkraftwerke eingesetzt.

Beim Direkteinspritzer wird der Kraftstoff direkt in den Brennraum, der aus einer Mulde im Kolben und dem Raum zwischen Kolben und Zylinderwand gebildet wird, eingebracht. Das Oberflächen/Volumen-Verhältnis des Brennraums eines direkt einspritzenden Motors ist um ca. 30 bis 40 % kleiner als bei einem Nebenkammermotor. Die Wärmeverluste über die Brennraumwand werden somit gering gehalten. Dies und die fehlenden Strömungswiderstände zwischen Neben- und Hauptkammer ergeben einen um ca. 15 bis 20 % geringeren Kraftstoffverbrauch der Motoren mit direkter Einspritzung. Als Starthilfe dient wie beim Nebenkammermotor häufig eine Glühkerze, die in die Kolbenmulde hineinragt. Aufgrund des höheren Wirkungsgrads und mit Fortentwicklung der Einspritz- und Aufladetechnik, die die Einsatzgebiete des Direkteinspritzers erweiterte, werden Vor- und Wirbelkammermotoren mehr und mehr vom Markt verdrängt [81] [80].

### **Verbrennungsluftzufuhr**

Saugmotoren, die die Verbrennungsluft durch Unterdruck in die Brennkammer strömen lassen, sind heute den aufgeladenen Motoren weitgehend gewichen. Durch die gezielte Turboaufladung des Brennraums mit Verbrennungsluft lassen sich der nutzbare Motordrehzahlbereich vergrößern und Vorteile hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen erzielen.

## Einspritzsystem

Einspritzsysteme bestehen aus mehreren konstruktiven Gruppen, die durch ein Regelungs- und Steuerungssystem, das bei konventionellen Dieselmotoren überwiegend mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch und heute vorwiegend elektronisch arbeitet, kontrolliert. Kolbenpumpen erbringen die erforderliche Einspritzleistung (Zerstäubungsarbeit an der Düse) und arbeiten entweder zeitsynchron mit dem Kolbenhub oder erzeugen den Druck in einem Hochdruckspeicher zeitlich unabhängig von der Einspritzung. Nach MOLLENHAUER (2002) [81] werden folgende Arten von Einspritzpumpen eingesetzt:

- Reiheneinspritzpumpe,
- Verteilereinspritzpumpe,
- Pumpe-Düse-Einheit,
- Einzelzylinderpumpe oder Steckpumpe oder Pumpe-Leitung-Düse,
- Hochdruckspeicher-Systeme (Common-Rail).

Durch einen Spritzversteller wird der Förderbeginn und damit der Einspritzzeitpunkt eingestellt. Über Druckleitungen gelangt der Kraftstoff zu den Einspritzventilen (Einspritzdüsen), in denen die Aufbereitung des Kraftstoffsprays erfolgt. Direkt einspritzende Motoren sind meist mit Mehrlochdüsen, Nebenkammer-Motoren mit Drosselzapfendüsen ausgestattet. Die Ausführung der Einspritzdüse und ihre Anordnung beeinflusst die Qualität von Einspritzung und Verbrennung. Die Gleichmäßigkeit des Strahlbildes gilt als wesentlicher Punkt zum Erreichen guter Abgaswerte. Strahlwinkel und damit auch der Strahlaufreffpunkt in der Kolbenmulde führen bereits bei minimalen Abweichungen zu einer deutlichen Veränderung des Emissionsbilds. Bei kleinen Einspritzmengen ist der effektive Abspritzdruck relativ niedrig, was dazu führt, dass die Gemischbildung nur schwach ausgeprägt ist und es zu verstärkter Rußbildung kommt [81].

Moderne Hochdruckeinspritzsysteme führen zu einer feinen Zerstäubung des Kraftstoffstrahls und können den steigenden Anforderungen an einen Dieselmotor hinsichtlich hoher Leistung und großem Drehmoment bei niedrigem Kraftstoffverbrauch und geringen Abgasemissionen gerecht werden. Common-Rail-Einspritzsysteme zum Beispiel sind dadurch gekennzeichnet, dass der Kraftstoff in einer unter hohem Druck stehenden zentralen Kraftstoffverteilerleiste (Hochdruckrail) über elektronisch geregelte Einspritzdüsen direkt in den Brennraum gespritzt wird. Dabei fördert eine Hochdruck-Kolbenpumpe den Kraftstoff in die Kraftstoffverteilerleiste. Der Druck in der Kraftstoffverteilerleiste wird durch einen von der Motorsteuerung angesteuerten Druckregler unabhängig von den Einspritzvorgängen eingestellt. Durch Injektoren, die vom Motorsteuergerät angesteuert werden, gelangt der Kraftstoff in den Brennraum des Motors. Moderne sogenannte Piezoinjektoren ermöglichen Mehrfacheinspritzungen pro Einspritzzyklus durch ein schnelles Öffnen und Schließen der Düsennadel wodurch eine Verbesserung des Emissionsverhaltens erreicht werden kann [3] [81].

Dieselmotoren sind weit verbreitet und haben ein hohes Entwicklungsniveau erreicht. Insbesondere stationäre Industriemotoren für den Heizöl- oder Dieselkraftstoffbetrieb sind als Basismotor zur mechanischen Energieerzeugung in Pflanzenöl-BHKW gut geeignet, weil sie wichtige Anforderungen, wie hohe Lebensdauer und guter Wirkungsgrad, erfüllen.

### 2.3 Pflanzenölbetriebener Motor

Pflanzenölmotoren unterscheiden sich von konventionellen Dieselmotoren dahingehend, dass das gesamte Motorsystem auf die speziellen Eigenschaften des Pflanzenölkraftstoffs abgestimmt ist. Diese Anpassungen können bereits bei der Motorenkonstruktion im Werk oder auch nachträglich am Serien-Dieselmotor erfolgen. Die in Kapitel 2.1 beschriebenen Unterschiede zwischen Rapsöl- und Dieselkraftstoff führen dazu, dass insbesondere das Kraftstoff- und Einspritzsystem anzupassen sind.

HOPP (2005) [48] untersuchte das Einspritzverhalten bei der Verwendung von Rapsöl in einem im Serienzustand belassenen Common-Rail-Dieselmotor des Typs OM611 der Firma Daimler Chrysler mit 92 kW Nennleistung. Die Ergebnisse zeigen, dass Rapsölkraftstoff einen längeren Zündverzug als Dieselkraftstoff aufweist und verstärkt zu Rußablagerungen im Brennraum führt. Bei der Voreinspritzung zerstäubt Rapsölkraftstoff kaum, wohingegen bei der Haupteinspritzung der Einspritzstrahl ähnliche Konturen wie bei Dieselkraftstoff aufweist. Die Strahlkegelwinkel von Rapsölkraftstoff sind jedoch kleiner, woraus eine geringere Strahloberfläche und ein kleineres durch den Einspritzstrahl erfasstes Brennraumvolumen resultiert. Außerdem sind bei Rapsölkraftstoff im nicht angepassten Motor größere Tropfen und eine schlechtere Gemischbildung festzustellen.

Generell führen Kraftstoffe mit hohen Viskositäten, wie z. B. Rapsölkraftstoff, in konventionellen Dieselmotoren zu einer schlechten Zerstäubungsqualität während des Einspritzvorgangs [81]. Darüber hinaus treten beim Betrieb von Rapsölkraftstoff in nicht angepassten Motoren Verkokungen an den Einspritzdüsen und in den oberen Ringnuten der Kolben auf. Daraus resultierende Probleme können die Zunahme der Ablagerungsbildung im Brennraum, Kraftstoffeintrag ins Schmieröl sowie die Verschlechterung des Abgasemissionsverhaltens sein [90].

JURISCH und MEYER-PITTRUFF (1994) [53] stellen fest, dass Ablagerungen beim Pflanzenölbetrieb verhindert werden können, wenn die Verbrennung an den veränderten Zündverzug und die Einspritzstrahl-Auflösung des Pflanzenölkraftstoffs angepasst wird. Daneben ist das Kraftstoffsystem hinsichtlich Dimensionierung, Toleranzen und Materialien abzustimmen. Auch sind Vorkehrungen für den sicheren Kaltstart zu treffen. Die im Jahre

1994 verfügbaren pflanzenöлтаuglichen Motoren werden mit ihren Konstruktionsmerkmalen wie folgt zusammengefasst [32] [21] [53]. Dies sind Motoren der Firmen

**Elsbett** mit Direkteinspritzung, Duotherm-Verbrennungsverfahren, einem zweigeteilten Gelenkkolben, einer Ölkühlung und der im Zylinder integrierten Einspritzelemente,

**DMS** (Dieselmotoren- und Gerätebau GmbH Schönebeck) mit einem weiterentwickelten Duotherm-Verbrennungsverfahren von Elsbett mit zwei gegenüberliegenden Einspritzdüsen und Pendelschaftkolben,

**TMW** (Thüringer Motorenwerke GmbH) mit direkter Einspritzung, einem hoch temperaturbeständigen Ferrotherm-Kolben, Einloch-Einspritzdüsen und Pflanzenölvorwärmung,

**KHD** (Klöckner-Humboldt-Deutz) des Typs FL 912W mit Wirbelkammer. Der luftgekühlte Motor arbeitet nach der Deutz-Zweistufenverbrennung<sup>®</sup>. Für die Verwendung von Rapsölkraftstoff wird der Motor unter anderem mit einem zweiten Kraftstoffsystem ausgerüstet, in dem sich Dieselmotorkraftstoff befindet, der für den Kaltstartvorgang sowie zur Spülung des Einspritzsystems vor dem Abstellen des Motors verwendet wird,

**MWM** (Motoren-Werke Mannheim, Deutz-MWM) der Baureihe D 916 mit Vorkammer und Wasserkühlung. Bei BIRKNER (1995) [8] wird die Weiterentwicklung des Deutz-MWM Motors D 916 hinsichtlich Dauerstandfestigkeit, Alltagstauglichkeit und niedriger Schadstoffemissionen beschrieben. Dazu wurden weitreichende Änderungen an der Brennraumgeometrie und am Einspritzsystem vorgenommen und Komponenten, wie Abgasurbolader, Ladeluftkühlung, Oxidationskatalysator und Rußfilter, integriert, so dass die Einhaltung der Abgasgrenzwerte nach EURO III möglich war.

Alle hier genannten Firmen haben Motorentypen angeboten, die als Antriebsaggregate für pflanzenöлтаuglichen BHKW verwendet wurden. Der Leistungsbereich erstreckte sich dabei zwischen ca. 5 und 300 kW. Die meisten dieser Motoren werden jedoch heute nicht mehr gebaut. Eine ausführliche Übersicht des Wissensstands zu pflanzenöлтаuglichen Motoren erfolgt bei REMMELE (2002) [85] und WIDMANN (2001) [115].

Bedingt durch die in jüngster Zeit stark angestiegene Nachfrage nach pflanzenöлтаuglichen Motoren gibt es derzeit eine Vielzahl von Firmen, die Umrüstungen von Pkw, Nutzfahrzeugen und Blockheizkraftwerken für den Betrieb mit Pflanzenöl (überwiegend Rapsölkraftstoff) anbieten. Die Umrüstmaßnahmen unterscheiden sich je nach Anbieter zum Teil erheblich voneinander und können von nur geringfügigen Veränderungen am Serien-Dieselmotor bis hin zu weitgehenden Motor-Neuentwicklungen reichen. Insgesamt sind heute nach eigenen Recherchen mindestens 66 Firmen bekannt, die eigene Lösungen für die Umrüstung auf den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff anbieten [97]. Etwa 40 davon haben auch pflanzenöлтаugliche Blockheizkraftwerke im Angebot. Die tatsächliche Anzahl von Anbietern mit eigenen Konzepten ist jedoch schwer zu ermitteln, da auf dem noch sehr jungen Markt eine große Dynamik herrscht und einige Werkstätten auch Lizenz-

nehmer anderer Umrüster sind. So gehen andere Quellen auch von mehr als 50 Anbietern von pflanzenöлтаuglichen BHKW aus [38].

Für BHKW-Anwendungen stehen derzeit mehrere rapsöлтаugliche Motortypen zur Verfügung. Kleinere BHKW mit einer Leistung bis zu etwa 30 kW<sub>el</sub> werden meist mit umgerüsteten herkömmlichen Stationärdieselmotoren betrieben. Bewährt haben sich unter anderem Wirbelkammermotoren des Herstellers Kubota oder Direkteinspritzer des Herstellers Hatz. Pflanzenölmotoren für mittlere und größere BHKW bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 400 kW werden in der Regel mit Direkteinspritzung vielfach auf Basis von MAN-, Deutz- oder Scania-Motoren angeboten.

Die bei der Umrüstung durchgeführten technischen Veränderungen am Motorsystem werden in der Regel nicht im Detail offengelegt. Zudem erfolgt eine stetige Fortentwicklung der Systeme. Eine vollständige Marktübersicht von Umrüstetechniken ist deswegen kaum möglich. Nachfolgend werden einige bei einer Umrüstung auf Pflanzenölbetrieb durchgeführte Änderungen am Motorsystem beschrieben. Grundsätzlich lassen sich Ein- und Zweitanksysteme (bzw. Ein- und Zweikraftstoffsysteme) unterscheiden.

Beim Zweitanksystem wird das Fahrzeug bzw. Aggregat mit einem zusätzlichen Kraftstofftank sowie weiteren Kraftstoffsystemkomponenten ausgestattet. Dadurch kann der Motor mit einem bei niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu Rapsölkraftstoff besser zündenden Kraftstoff (zumeist Diesel oder Biodiesel) für die Kaltstart- und Warmlaufphase versorgt werden. Sobald die Motorbetriebstemperatur erreicht ist, erfolgt die Kraftstoffversorgung aus dem Haupttank mit Rapsölkraftstoff. Vor dem Abstellen des Motors ist wieder auf die Versorgung mit dem Zusatzkraftstoff umzustellen, damit die Einspritzleitungen und Düsen gespült werden und leicht zündender Kraftstoff für den neuen Startvorgang zur Verfügung steht. Die Kraftstoff-Umschaltung erfolgt meist mithilfe einer elektronischen Steuerung. Derartige Zweitanksysteme sind oft zusätzlich mit einer Kraftstoffvorheizung sowie weiteren Umrüstungs-Maßnahmen, die bei Eintanksystemen angewendet werden, ausgestattet [85] [115] [53].

Eintanksysteme kommen hingegen ohne zweiten Kraftstoffkreislauf aus. Die Anpassungen sind daher insbesondere bei modernen direkt einspritzenden Motoren meist aufwändiger, da auch im kalten Betriebszustand eine gute Zerstäubung und Zündung des zähflüssigeren Rapsölkraftstoffs gewährleistet werden muss. Durch Veränderungen am Kraftstoff- und Einspritzsystem, an den Ventilen, an Kolben und Zylinderkopf sowie durch Eingriffe in das Motormanagement können indirekt und direkt einspritzende Serien-Dieselmotoren mit Eintanksystemen entsprechend den Anforderungen des Rapsölkraftstoffs umgerüstet werden [85] [115] [53].

Sowohl bei Zweitank- als auch bei Eintanksystemen können je nach Motortyp und Umrüstkonzept folgende technische Anpassungen in unterschiedlichen Kombinationen vorgenommen werden [85] [100]:

- Austausch nicht pflanzenölverträglicher Materialien, wie Schläuche und Dichtungen,
- Austausch von Kraftstoffleitungen gegen Leitungen mit größeren Querschnitten,
- Austausch von Kraftstofffiltern und/oder Einbau eines zusätzlichen Kraftstofffilters,
- Austausch der Kraftstoffförderpumpe gegen eine Pumpe mit höherer Leistung; bei Stationärmotoren: Einbau einer elektrisch angetriebenen Förderpumpe,
- Austausch der Einspritzpumpe gegen eine hochviskositätstolerante Pumpe
- Austausch oder Modifikation der Einspritzdüsen,
- Verwendung alternativer beständigerer Materialien für Kolben und Zylinderkopf,
- Austausch bzw. Modifikationen der Vorglüheinrichtung (längere Glühdauer und/oder Anordnung so, dass der eingespritzte Kraftstoffstrahl auf die Glühkerze auftrifft, wo dieser sich erwärmt und besser zerstäubt wird),
- Kraftstoffvorwärmung an Leitungen, Filtern, Pumpen, Düsen entweder elektrisch oder durch kühlwasser- bzw. öldurchflossene Wärmeübertrager,
- externe Vorwärmung des Motors durch Aufheizen des Motorkühlwassers während der Kaltstart- und Warmlaufphase mit Hilfe einer brennstoffbetriebenen Standheizung oder elektrisch,
- Modifikation des Brennraums,
- Modifikation von Ein- und Auslassventilen,
- Rückführung des Leck- und Rücklaufkraftstoffs in den Vorlauf (evtl. Entgasung),
- Erhöhung des Einspritzdrucks,
- Anpassung des Einspritzzeitpunkts bzw. des Kraftstoffförderbeginns,
- Einbau von Komponenten zur Kraftstofferkennung bei Wechselbetankungen und
- Eingriff in das Motormanagement.

Die Auswahl von technisch ausgereiften Motorbauteilen in hoher Verarbeitungsqualität ist in Hinblick auf die allgemein stärkere Beanspruchung der Materialien (höhere Viskosität und Verbrennungstemperatur des Rapsölkraftstoffs) sinnvoll. Unbedingt zu vermeiden sind die Verwendung von katalytisch wirksamen Materialien, wie z. B. Kupfer bzw. kupferhaltige Legierungen, um einer Erhöhung der Säurezahl und Absenkung der Oxidationsstabilität des Rapsöls vorzubeugen [115].

Vorteilhaft hinsichtlich der Umrüstung auf Pflanzenölbetrieb können moderne Hochdruckeinspritzsysteme, wie z. B. Pumpe-Düse- oder Common-Rail-Systeme, sein, da bei diesen deutlich mehr Möglichkeiten zur Optimierung des Brennverlaufs gegeben sind als bei Einspritzsystemen mit niedrigem Druck [81] [66]. Vor allem durch elektronisch geregelte Einspritzsysteme besteht bei Pflanzenölbetrieb ein großes Optimierungspotenzial, wenn im gesamten Motorkennfeld exakte Einspritzraten in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel eingestellt werden können [8]. Bei Kenntnis der Unterschiede im Einspritzverhalten von Rapsöl- und Diesekraftstoff bei Common-Rail-Dieselmotoren ist die gezielte Einflussnahme auf den Motorprozess möglich [48].

## 2.4 Abgasemissionen

### 2.4.1 Grundlagen der Verbrennung

Bei der dieselmotorischen Verbrennung wird, wie auch bei anderen Verbrennungskraftmaschinen, die im zugeführten Kraftstoff gebundene Energie durch Oxidation mittels des in der Verbrennungsluft enthaltenen Sauerstoffs freigesetzt. Die Verbrennung der Kraftstoffbestandteile erfolgt dabei unvollständig und verlustbehaftet. Somit befinden sich neben den Produkten Kohlendioxid, Wasser, Stickstoffoxide und - bei der Verbrennung von schwefelhaltigem Kraftstoff - Schwefeldioxid auch teilverbrannte und unverbrannte Stoffe, wie Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe sowie Rußpartikel, im Abgas [3] [81].

Die dieselmotorische Gemischbildung und Verbrennung kann, wie in Abbildung 5 dargestellt, in mehrere Einzelvorgänge untergliedert werden. Der Kraftstoff wird gegen Ende des Kompressionstaktes in den Brennraum gespritzt, in dem sich hoch verdichtete Luft befindet. Der Einspritzverlauf und damit auch der Verbrennungsvorgang hängt wesentlich von der konstruktiven Ausführung der Einspritzanlage ab. Der Kraftstoff gelangt zunächst als Strahl in den Zylinder, wo er dann durch innere Pulsationskräfte und Luftreibung in kleine Kraftstofftröpfchen zerstäubt wird, die sich je nach Größe und Geschwindigkeit weiter teilen. Die Kraftstoffteilchen erwärmen sich an der erhitzten Luft, wobei sich um sie eine Kraftstoffdampfhülle bildet. Diese vermischt sich mit der umgebenden Luft, wodurch ein zündfähiges Gemisch entsteht. Die Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Zündung (ca. 1 bis 2 ms) wird Zündverzug genannt, der in den physikalischen und den chemischen Anteil unterschieden wird. Letzterer umfasst die unmittelbar vor der Zündung ablaufenden Reaktionen und wird insbesondere durch die Kraftstoffeigenschaften sowie den im Brennraum herrschenden Druck und die Temperatur beeinflusst. Da die Gemischbildung und die Dauer des Zündverzugs bereits maßgebliche Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen haben, können Faktoren, wie

- Kraftstoffqualität,
- Kraftstofftemperatur,
- Einspritzdruck und Einspritzzeitpunkt
- Druck und Temperatur der Luft im Brennraum,
- Vermischung der Luft mit Restgas und
- die Ladungsbewegung im Brennraum

für die Optimierung des Verbrennungsprozesses im Dieselmotor ausschlaggebend sein.

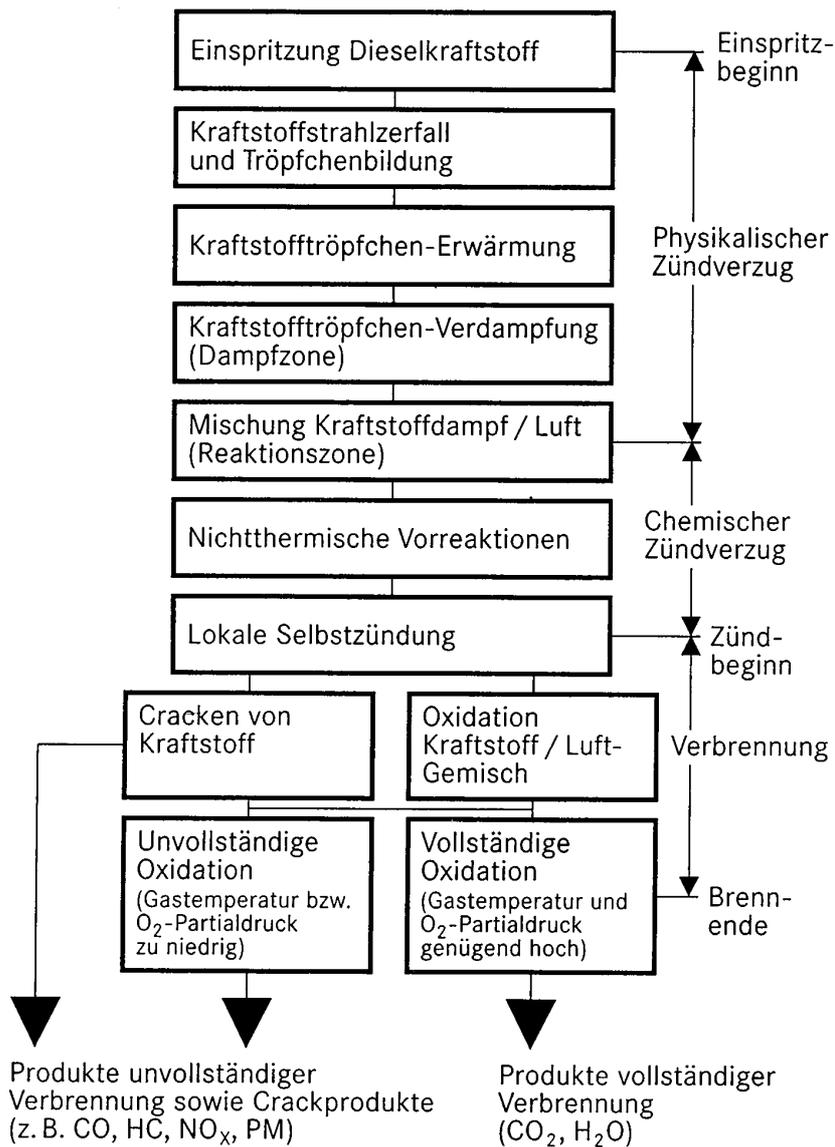


Abbildung 5: Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung (MOLLENHAUER, 1997 [80])

Diese Parameter verändern sich in Abhängigkeit von Last und Drehzahl des Motors. Konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung der Verbrennung sind:

- Verbrennungsverfahren und Brennraumform,
- Verdichtungsverhältnis,
- Ventilsteuerzeiten,
- Kühlmitteltemperatur,
- Einlasskanalgestaltung.

Während der Anfangsphase der Zündung wird weiter Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt, was zu einer inhomogenen Ladungs- und Temperaturverteilung im Brennraum führt, die sich während des Brennverlaufs ständig ändert. Bei lokalem Sauerstoffmangel oder

niedrigem Temperaturniveau kommt es dabei zur unvollständigen Verbrennung von hochsiedenden Kohlenwasserstoffen. Je nach eingesetztem Kraftstoff, Brennverfahren, innermotorischer Gemischbildung, den örtlichen Luftverhältnissen und ggf. Ablagerungen an Ventilen und der Einspritzdüse bilden sich Abgasemissionen aus Produkten vollständiger und unvollständiger Verbrennung. Eine Übersicht über die Entstehung und die Wirkung der wichtigsten Abgaskomponenten erfolgt z. B. bei MUNACK et al. (2005) [82], MOLLENHAUER (2002) [81], WARNATZ et al. (2001) [109], KLINGENBERG (1996) [61] und TER RELE et al. (1994) [98].

Für einige Abgaskomponenten wurden Mitte der 1960er Jahre in den USA und Mitte der 1970er Jahre in Europa erstmals Emissionsgrenzwerte festgelegt, die seither in regelmäßigen Zeitabständen verschärft werden. Sie gelten für die sogenannten „gesetzlich limitierten“ Abgaskomponenten (CO, NO<sub>x</sub>, HC und Partikel). Die nicht in der Gesetzgebung aufgenommenen Komponenten werden als „nicht limitierte“ Komponenten bezeichnet. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Aufteilung in limitierte und nicht limitierte Komponenten Überschneidungen auftreten.

#### **2.4.2 Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid (CO) ist ein farb- und geruchloses Gas, das sich stärker an das Hämoglobin des Blutes bindet als Sauerstoff und dadurch toxisch auf den menschlichen Organismus wirkt. Länger anhaltende Konzentrationen von mehr als 50 mg/m<sup>3</sup> können zu Herz-Kreislauf-Beschwerden, Kopfschmerzen und Übelkeit führen [4]. Kohlenmonoxid entsteht durch unvollständige Verbrennung und hängt vom Luftverhältnis und den Gemischbildungsparametern Drall und Einspritzung im Brennraum ab [81]. Bei Nebenkammer-Brennverfahren ist die Emission von CO oft niedriger als bei Motoren mit Direkteinspritzung, weil die starke Verwirbelung des Brennstoff-/Luftgemisches eine intensive Nutzung des Sauerstoffangebots ermöglicht (Kapitel 2.2). Die CO-Emissionen sind stark drehzahlabhängig, insbesondere dann, wenn die Gemischbildung stark auf luftseitige Faktoren (z. B. Drall) beruht.

#### **2.4.3 Stickstoffoxide**

Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) werden als Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) zusammengefasst. Sie entstehen als Nebenprodukte vollständiger Verbrennung bei Luftüberschuss durch Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen Temperaturen. Im Motor wird neben geringen Mengen an Stickstoffdioxid und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) fast ausschließlich Stickstoffmonoxid gebildet, das später in der Atmosphäre zu Stickstoffdioxid oxidiert wird. NO ist in den vorkommenden Konzentrationen normalerweise nicht gesundheitlich relevant. NO<sub>2</sub> ist dagegen ein ausgeprägtes Atem- und Reizgift, spielt eine we-

sentliche Rolle bei Versauerungsvorgängen durch Bildung von Salpetersäure und salpetriger Säure und ist als Vorläufersubstanz für bodennahes Ozon von Bedeutung. Eine Übersicht zur Stickstoffoxid-Bildung geben WARNATZ et al., 2001 [109]. Prinzipiell werden zwischen drei Arten der Entstehung von Stickstoffoxiden unterschieden:

### **„Brennstoff-NO“**

Während des Verbrennungsprozesses bilden sich aus dem im Kraftstoff gebundenen Stickstoff sekundäre Stickstoffverbindungen, die mit Sauerstoff weiter zu NO reagieren. Aufgrund niedriger Stickstoffgehalte von ca. 50 mg/kg im Dieselkraftstoff kann der Beitrag von „Brennstoff-NO“ zur gesamten Stickstoffoxid-Emission heutiger Dieselmotoren vernachlässigt werden. Rapsöl enthält noch geringere Mengen an Stickstoff von etwa 10 mg/kg, so dass die „Brennstoff-NO“-Bildung bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff ebenso keine Bedeutung hat.

### **„Thermisches NO“**

Aus den Elementen Stickstoff und Sauerstoff entsteht in einer stark endothermen Reaktion bei sehr hohen Temperaturen von über 2200 K „Thermisches NO“ [81]. Die dominierenden Einflussfaktoren bei der Bildung von „Thermischem NO“ sind Temperatur, Sauerstoffkonzentration am Ort der Verbrennung und Verweilzeit am Ort der Verbrennung.

### **„Promptes NO“**

Die Reaktion von Brennstoffradikalen mit dem Stickstoff der Verbrennungsluft führt zur Bildung von „Promptem NO“. Da die Bildungsmechanismen der Brennstoffradikale sehr komplex sind, konnte eine vollständige Erforschung der Entstehung von „Promptem NO“ noch nicht erfolgen. Brennstoffreiche Bedingungen begünstigen jedoch die Entstehung. „Promptes NO“ entsteht bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen, allerdings in vergleichbar geringen Mengen.

Stickstoffoxid-Emissionen von Dieselmotoren können durch die Begrenzung der Verbrennungstemperatur, z. B. durch spätes Einspritzen, rasches Expandieren oder Ladeluftkühlung sowie durch die Reduzierung des Sauerstoffgehalts in der Verbrennungsluft (z. B. Abgasrückführung) gesenkt werden. Üblicherweise sind aber Maßnahmen zur innermotorischen Senkung der Stickstoffoxid-Emission mit einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs gekoppelt. Es gilt folglich eine Lösung zu finden, die den Ausstoß von Stickstoffoxiden einerseits senkt und andererseits nicht zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs führt.

Eine solche Möglichkeit bieten Verfahren, die die Stickstoffoxidkonzentration durch Nachbehandlung des Abgases verringern. Dazu sind Reduktionsmittel erforderlich, die

nur mit dem Stickstoffoxid, also selektiv, reagieren. Als Reduktionsmittel fungieren z. B. Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Wasserstoff, die im Abgas vorhanden sind oder aber auch Ammoniak, das ins Abgas eingebracht werden muss.

Bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff sind meist höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu verzeichnen als bei Dieselmotorkraftstoff. Dies kann auf den vorhandenen Sauerstoff im Kraftstoff und auf ein schnelleres Durchbrennen des Kraftstoffs aufgrund der geringeren Temperaturspanne zwischen Siedebeginn und Siedeende (Kapitel 2.1) zurückgeführt werden [94].

#### 2.4.4 Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe (HC) im Abgas setzen sich aus unverbrannten Kraftstoffbestandteilen und teilweise oxidierten Produkten zusammen. Sie entstehen bei ungenügender Aufbereitung des Brennstoffs und dadurch bedingtem späten und unvollständigen Abbrand [81]. Auch Kraftstoff, der (z. B. aufgrund einer falschen Auslegung des Einspritzsystems) am Ende des Einspritzvorgangs in den Brennraum gelangt („Nachspritzer“) und nur teilweise verbrennt, führt vermehrt zu HC-Emissionen. Hohe Verbrennungstemperaturen begünstigen ein vollständigeres Verbrennen der Kraftstoffbestandteile, woraus eine entsprechend niedrige HC-Konzentration im Abgas resultiert. Kohlenwasserstoffe entstehen also insbesondere durch unvollständige Verbrennung des Kraftstoffs aber auch von mitverbranntem Motorenöl aufgrund folgender Ursachen:

- Erlöschen der Flamme in besonders mageren Bereichen bei sinkender Temperatur im Brennraum während der Expansion,
- Erlöschen der Flamme in der Nähe kalter Brennraumwände,
- Verlangsamtes Abdampfen des Kraftstoffs von Brennraumwänden ,
- Kraftstoffrückstände an der Einspritzdüse nach Beendigung des Einspritzvorgangs,
- Unvollständiges Verbrennen von Motoröl, das von den Ventilschäften und vom Zylinderrohr in den Brennraum gelangt [50].

Zu den Kohlenwasserstoff-Emissionen gehören sowohl gesättigte Kohlenwasserstoffe, wie Alkane, die toxikologisch meist wenig relevant sind, als auch ungesättigte Kohlenwasserstoffe, wie die kettenförmigen Alkene und Alkine sowie die ringförmigen Aromaten (z. B. Benzol), deren Vertreter häufig eine kanzerogene Wirkung aufweisen. Eine wichtige Untergruppe der Aromaten sind die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), zu denen Komponenten gehören, die ebenfalls als kanzerogen eingestuft werden. Neben der gesundheitlichen Relevanz können Kohlenwasserstoffe auch atmosphärisch wirksam sein und zur Sommersmogbildung beitragen [82].

### 2.4.5 Aldehyde

Aldehyde bestehen aus einer Kohlenwasserstoffkette und einer endständigen Carbonyl-Gruppe. Sie sind ein Zwischenprodukt bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen und entstehen wie diese in Abhängigkeit von der Temperatur und der Last im Verbrennungsmotor. Die Aldehydkonzentration im Abgas verhält sich deshalb ähnlich der von unverbrannten Kohlenwasserstoffen [84]. Aldehyd-Emissionen setzen sich aus einer Mischung von Aldehyden unterschiedlicher Molekülgrößen und Konzentrationen zusammen. Dabei gilt, dass mit steigender Anzahl von C-Atomen die gemessene Konzentration im Abgas sinkt. Niedermolekulare Komponenten, wie Formaldehyd ( $C_1$ ), Acetaldehyd ( $C_2$ ) und Acrolein ( $C_3$ ), sind daher von besonderer Bedeutung. Aldehyde sind Geruchsträger und werden für den typischen Abgasgeruch bei der Verbrennung von Pflanzenölkraftstoffen verantwortlich gemacht [4]. Daneben wurde für Formaldehyd bei Inhalationsversuchen eine kanzerogene Wirkung an Ratten und Mäusen festgestellt [45]. Zwar gehören Aldehyde chemisch gesehen nicht zu den Kohlenwasserstoffen, sie werden aber bei der Bestimmung der Gesamt-C-Emissionen mittels Flammenionisation (FID) miterfasst.

### 2.4.6 Partikelmasse und Staub

„Luftverunreinigende Partikel aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte“ sind nach der Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG [91] all die festen und flüssigen Stoffe, die bei einer Temperatur von höchstens 325 K (52 °C) nach Verdünnung der Motorabgase mit gefilterter reiner Luft an einem besonderen Filter abgeschieden werden. Durch die Temperaturbegrenzung soll sichergestellt werden, dass alle höhersiedende z. T. gesundheitsschädliche Kohlenwasserstoffe mit erfasst werden. Bei stationären Motoranlagen hingegen werden die Partikel-Emissionen als Gesamt-Staub im heißen Abgas nach der VDI Richtlinie 2066 bestimmt. Hierbei wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasvolumenstrom geschwindigkeitsgleich entnommen und die partikelförmigen Stäube an speziellen Filtern abgeschieden.

Partikel bestehen im Wesentlichen aus elementarem Kohlenstoff (Ruß), Schwefelverbindungen (v. a. Sulfate), kondensierten Wassertröpfchen, Metallverbindungen und organischen Verbindungen aus teil- oder unverbrannten Kohlenwasserstoffen [3] [81] [109] [61].

Ruß-Emissionen entstehen bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffmangel. Zwar erfolgt der Betrieb von Dieselmotoren unter Luftüberschuss, aber infolge der inhomogenen Gemischaufbereitung kommt es im Brennraum lokal zu Sauerstoffdefiziten. Ausgehend von Kohlenwasserstoffen bildet sich das reaktionsfreudige Zwischenprodukt Acetylen, welches eine zentrale Rolle beim Reaktionsablauf einnimmt. Mit zunehmendem Zusammenschluss von Acetylenmolekülen nimmt der Kohlenstoffanteil unter Wasserstoffabspaltung zu bis sich daraus neben zyklischen und polyzyklischen aromatischen

Kohlenwasserstoffen (PAK, englisch: PAH) die sogenannten Rußkerne bilden. Die etwa 0,001 bis 0,01  $\mu\text{m}$  großen Rußkerne vereinigen sich zunächst zu sogenannten „primären Rußpartikeln“ von 0,01 bis 0,05  $\mu\text{m}$  Durchmesser, bevor daraus durch Zusammenlagerung größere Partikel von ca. 0,05 bis 0,10  $\mu\text{m}$  entstehen können [81] [61]. Im Dieselmotor entsteht Ruß hauptsächlich 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. Bei hohen Drehzahlen verringern sich die Ruß-Emissionen, weil

- der Einspritzdruck und damit die Kraftstoffzerstäubung zunimmt, was zu einer weniger inhomogenen Mischung führt und
- die Wärmeverluste bei der Kompression geringer und somit die Temperaturen höher sind, die die Rußoxidation verbessern.

Sulfate entstehen durch die Oxidation des im Kraftstoff enthaltenen Schwefels. Da Rapsölkraftstoff von Natur aus nahezu schwefelfrei ist, sind Emissionen von Schwefelverbindungen, ähnlich wie bei schwefelfreiem Dieselkraftstoffen, von untergeordneter Bedeutung. Ein geringer Schwefelgehalt im Kraftstoff ist auch für die Langzeitwirksamkeit von Abgaskatalysatoren maßgeblich, so dass davon auch indirekt CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen beeinflusst werden können [68] [117]. Darüber hinaus werden moderne Steuersysteme, z. B. Bord-Diagnose-Systeme durch Schwefelverbindungen im Abgas gestört, wodurch die Katalysatorüberwachung fehlerhaft sein kann [39].

Metallverbindungen sind Partikel, die entweder unmittelbar aus dem Motor stammen oder bei der Verbrennung von Motoröl- und Kraftstoffadditiven entstehen.

Bei Kraftstoffen mit niedriger Cetanzahl, wie z. B. Rapsölkraftstoff, ergibt sich im Motorbetrieb ein längerer Zündverzug. Dies führt vor allem bei Teillast zu einer weiteren Ausbreitung des Kraftstoffstrahls vor dem Beginn der Verbrennung. Dadurch treten verstärkt Zonen mit mageren Gemischen außerhalb des Strahlkerns auf, die nicht vollständig verbrennen und so die Entstehung von Kohlenwasserstoffen und Partikeln begünstigen. Gleichzeitig steigt auch die PAK-Konzentration an. Niedrige Ansauglufttemperaturen und kalte Zylinderwände können z. B. beim Kaltstart dazu führen, dass ein Kraftstoff mit niedriger Cetanzahl erst in der Expansionsphase zündet. Dies wirkt sich dann besonders ungünstig auf die Rauch- und Partikel-Emissionen aus [50].

Im Gegensatz dazu kann es bei direkteinspritzenden Dieselmotoren im Teillastbereich auch bei zunehmender Cetanzahl zu einer Erhöhung der Partikel-Emissionen kommen. Ursache dafür ist eine durch den kürzeren Zündverzug bedingte schlechtere Kraftstoffausbreitung, was in der Folge zu einer vermehrt unvollständigen Verbrennung und Erhöhung der unlöslichen Partikelanteile führt. Bei indirekt einspritzenden Motoren erhöht sich mit zunehmender Cetanzahl die Verbrennungsgeschwindigkeit in der Nebenkammer. Dadurch kommt es zum verstärkten Ausströmen und zur besseren Durchmischung mit

der Verbrennungsluft im Hauptbrennraum, was zu einer verbesserten Rußoxidation und damit zur Partikelminderung führt [101]. Bei modernen Motoren ist der Einfluss einer höheren Cetanzahl auf die Partikel-Emission geringer bzw. nicht nachweisbar [24].

Durch Anpassungen des Brennraums sowie der Einspritzparameter, insbesondere Einspritzzeitpunkt und -druck können nachteilige Effekte hinsichtlich der Partikel-Emissionen bei der Verbrennung von Kraftstoffen mit niedriger Cetanzahl, wie z. B. Rapsölkraftstoff, gemindert oder ausgeglichen werden. Daneben wirkt sich auch der in Pflanzenölen enthaltene Sauerstoff günstig auf die Rußoxidation aus. Untersuchungen zur Einspritzstrahlausbreitung beim Einsatz von Rapsölkraftstoff wurden von HOPP (2005) [48] durchgeführt. Weitere Forschungsarbeiten hierzu finden derzeit am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe statt.

Der Einfluss des Motoröls auf die Partikel-Emission lässt sich anhand der bisherigen Untersuchungen zwar nachweisen, allgemeingültige Zusammenhänge können daraus jedoch kaum abgeleitet werden. Der Anteil der Rußpartikel, der von der Verbrennung von Motoröl herrührt, wird mit bis zu 20 bis 30 % angegeben [3]. Hierbei spielt jedoch der Betriebspunkt des Motors eine erhebliche Rolle. Besonders im niedrigen und hohen Lastbereich steigt der Anteil der Partikel, welcher auf das Motorenöl zurückzuführen ist [49]. Andererseits kann sich auch durch metallhaltige Schmierstoff- und Kraftstoffadditive der Partikelaustritt verringern, was auf einen verbesserten Rußabbrand durch die katalytische Wirkung der Additive zurückzuführen ist [3].

Wie bei allen Emissionen ist bei Partikeln die örtliche Konzentration, im Speziellen aber auch die Größenverteilung, von besonderer Bedeutung [81]. Inhalierbare Feinstäube weisen einen aerodynamischen Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  auf. Insbesondere aber die lungengängigen Feinstäube  $< 2,5 \mu\text{m}$  sowie die sogenannten ultrafeinen Partikel  $< 0,1 \mu\text{m}$  können bis in die Bronchiolen und Alveolen der Lunge vordringen, wo sie über Monate und Jahre verweilen. Von dort gelangen die Partikel in das Gefäßsystem des Organismus. Epidemiologische Studien weisen auf ein herzscheidendes und kanzerogenes Potenzial der Partikel aus Verbrennungsmotoren hin. Dieselfußpartikel werden deshalb in Deutschland in die MAK Klasse III A2 eingestuft und unterliegen dem Minimierungsgebot [3] [81] [111] [44].

Untersuchungen zur Mutagenität von Emissionen aus Dieselmotoren lassen schließen, dass die Mutagenität

- mit zunehmender Motorlast abnimmt,
- durch die örtlichen Bedingungen im Brennraum maßgeblich beeinflusst wird,
- zum Großteil auf die Kohlenwasserstoff-Komponenten Nitro- und Dinitropyren beruht,
- stark vom Aromatengehalt im Kraftstoff (v. a. Ringaromaten) abhängt und
- bei Motoren mit niedrigeren  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Abgas geringer ist [107].

Zukünftigen Motorenkonzepten wird ein erhebliches Potenzial zur Minderung des mutagenen Potenzials von Dieselabgasen attestiert. Dieses gilt es in Hinblick auf die potenzielle Gesundheitsgefährdung sowie die höhere Akzeptanz des Dieselmotors auszuschöpfen, wenngleich die gesundheitliche Bedrohung durch Dieselabgas gegenüber Zigarettenrauch als untergeordnet anzusehen ist. Die fortschreitende Minderung von Stickstoffoxid-Emissionen und der Einsatz von Partikelfiltersystemen werden dabei hilfreich sein [107]. Auch partikelförmige Emissionen, die bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff entstehen, werden derzeit verstärkt hinsichtlich ihrer Wirkung auf den menschlichen Organismus (z. B. mutagenes Potenzial) untersucht [63].

#### **2.4.7 Innermotorische Optimierung zur Minderung von Abgasemissionen**

In Abhängigkeit von den Bedingungen bei der Verbrennung im Motor erfolgt eine starke Aufgliederung der Gesamtemissionen in einzelne Komponenten. Die jeweiligen Konzentrationen der Schadstoffe sind entscheidend vom Verbrennungsprinzip des Motors, dem Ablauf der Verbrennung und von den Kraftstoffmerkmalen abhängig.

Bei MOLLENHAUER, 2002 [81] werden verschiedene innermotorische Maßnahmen zur Reduzierung der Abgasemissionen aufgezeigt und bewertet:

Zur Reduktion des Rußanteils im Abgas sind Brennverfahren mit sehr hohen Einspritzdrücken zusammen mit kleinen Einspritzdüsenlöchern erforderlich, die auf geringe luftseitige Gemischbildungsunterstützung angewiesen und somit drehzahlunempfindlicher als mit hohem Drall arbeitende Direkteinspritzverfahren sind.

Eine Vor- und oder Nacheinspritzung kann zur Verbesserung der im Zielkonflikt stehenden Partikel- und Stickstoffoxid-Emissionen beitragen, wenn die Einspritzigenschaften last- und drehzahlabhängig an den jeweiligen Betriebszustand, z. B. durch eine elektronische Einspritzregelung angepasst werden.

Für die Minimierung von Stickstoffoxid-Emissionen sollten möglichst homogene Brennraumtemperaturen ohne örtliche, die  $\text{NO}_x$ -Bildung fördernde Temperaturspitzen herrschen. Voraussetzung dafür ist eine gleichmäßige Gemischverteilung im Brennraum.

HC-Emissionen lassen sich neben hohen Brennraumtemperaturen vor allem durch die Verwendung von Einspritzdüsen mit geringen Sackloch- und Spritzlochvolumina mindern.

Die Abgasrückführung (AGR) stellt die wirkungsvollste innermotorische Maßnahme zur  $\text{NO}_x$ -Senkung dar [81]. Dabei wird dem Abgas des Motors ein definierter Teilstrom entnommen und der Ansaugluft beigemischt. Die dadurch bedingte Verminderung des Sauerstoffgehalts im Brennraum führt zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Vor allem die thermische NO-Bildungsrate wird aus den folgenden zwei Gründen gesenkt [89]:

- Der geringere Sauerstoffgehalt im Zylinder bewirkt, dass zur Deckung des Sauerstoffbedarfs eine größere Gasmenge durch die Flammenfront transportiert werden muss als ohne Abgasrückführung. Der höhere Massendurchsatz führt bei gleicher Wärmezufuhr (annähernd gleicher Brennverlauf) zu niedrigeren Temperaturen.
- Die spezifische Wärmekapazität des rückgeführten Abgases ist größer als die von Luft. Dies führt zu einer geringeren Temperatursteigerung bei gleicher freigesetzter Wärmemenge bei der Verbrennung.

NO<sub>x</sub>-Emissionen können durch eine Wasserzugabe zum Dieselkraftstoff und Einspritzung in den Brennraum in Form einer Diesel/Wasser-Emulsion oder durch Zugabe unmittelbar vor der Einspritzung reduziert werden. Die Wirkung ergibt sich aus einer Absenkung der örtlichen Temperaturen im Brenngas. Nachteilig wirkt sich dieses Verfahren jedoch auf einen Anstieg der HC-Emissionen insbesondere im Teillastbetrieb aus. Durch kennfeldabhängig zudosierte Wassermengen kann eine Optimierung des Systems erfolgen [7].

Neben dem Emissionsverhalten bei betriebswarmem Motor ist auch der Schadstoffausstoß in der Kaltstart- und Warmlaufphase zu berücksichtigen. Elektrische Glüheinrichtungen können nicht nur als Starthilfe sondern auch zur Unterstützung des Warmlaufbetriebs dienen. Bei modernen mit elektronischem Management ausgestatteten direkteinspritzenden Motoren kann der Einspritzverlauf (v. a. der Einspritzbeginn) hinsichtlich der Bedingungen bei niedrigen Brennraumtemperaturen optimiert werden und zur Verringerung von CO-, HC- und Partikel-Emissionen beitragen.

Zukünftige neuartige Brennverfahren, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden, wie die homogene Verbrennung im Dieselmotor, bergen ein großes Potenzial zur gleichzeitigen Absenkung der Partikel- und NO<sub>x</sub>-Emissionen. Bei der homogenen Verbrennung, dem sogenannten HCCI-Verfahren (Homogenous Charge Compression Ignition) erfolgt eine weitgehende Gemischhomogenisierung vor der Verbrennung, wobei die Verbrennungsspitzentemperaturen gesenkt und Zonen fetten Gemisches vermieden werden.

Zusätzlich zur innermotorischen Optimierung kann auch durch die Verbesserung konventioneller Dieselkraftstoffe eine deutliche Verminderung von Abgasemissionen erreicht werden [68]. Beispielsweise können synthetische Kraftstoffkomponenten, die heute aus Erdgas und mittelfristig auch aus Biomasse hergestellt werden können - bislang jedoch aufgrund des hohen Kostenniveaus nur begrenzt verfügbar sind - zur Minderung des Schadstoffausstoßes von Dieselmotoren beitragen. Allerdings sind diese Maßnahmen meist weniger wirkungsvoll als Fortschritte in der Motoren- und Abgasnachbehandlungstechnologie [24] [6].

Da rein innermotorische Maßnahmen heute in der Regel nicht mehr ausreichen, die schärfer werdenden Anforderungen der Abgasgesetzgebung für Fahrzeug-Dieselmotoren zu erfüllen, sind Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung erforderlich [81].

## 2.5 Abgasnachbehandlung

Zur Abgasnachbehandlung können verschiedene Techniken oder Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählen Oxidationskatalysatoren, Entstickungskatalysatoren und Abgaspartikelfiltersysteme. Durch den sehr niedrigen Schwefelgehalt ( $< 10$  ppm) von Rapsöl ist der Einsatz von Abgaskatalysatoren bei Rapsölmotoren besonders geeignet. Nachteilig wirkt sich der Gehalt an Phosphor, Calcium und Magnesium im Rapsölkraftstoff aus.

### 2.5.1 Oxidationskatalysator

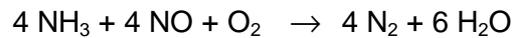
Oxidationskatalysatoren setzen die Energieschwelle für die Einleitung von chemischen Reaktionen (Oxidation und Reduktion) herab und erhöhen gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit. Dem Beginn solcher Reaktionen geht die Anlagerung der oxidierbaren Stoffe (CO, HC) und des Sauerstoffs an der katalytisch aktiven Schicht voraus, an der die Molekülbindungen gelockert werden. Dadurch wird die Aktivierungsenergie der chemischen Reaktion vermindert. Im Anschluss an die katalytische Umsetzung verlassen die Endprodukte wieder den Katalysator, der selbst dabei nicht verändert wird. Der optimale Arbeitsbereich für die bis zu mehr als 90 %-ige Umsetzung der CO- und HC-Emissionen liegt bei ca. 250 bis 350 °C [81]. Eine Rußreduktion ist nur in sehr geringem Umfang mit Oxidationskatalysatoren möglich. Allerdings können die am Ruß angelagerten und häufig geruchsintensiven gasförmigen Kohlenwasserstoffe deutlich reduziert werden [81].

Oxidationskatalysatoren sind aus einem Trägermaterial, einer Zwischenschicht („Washcoat“) und einer katalytisch aktiven Beschichtung aufgebaut. Das Trägermaterial besteht meist aus einem keramischen oder metallischen Wabenkörper mit regelmäßigen in Durchströmungsrichtung angeordneten Kanälen mit quadratischem, rechteckigem oder dreieckigem Querschnitt (Zellenkatalysator). Der Washcoat besteht aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), weist eine hohe spezifische Oberfläche auf (10 bis 25  $\text{g}/\text{m}^2$ ) und enthält sogenannte Promotoren, die die Sauerstoffspeicherfähigkeit verbessern. Die katalytisch aktive Schicht besteht aus Platin und Palladium, die die Aufspaltung des Sauerstoffs fördern und die Oxidation der Schadstoffe einleiten [81].

### 2.5.2 Entstickungskatalysator

Der Entstickungskatalysator, auch Denox-Katalysator genannt, stellt ein wirkungsvolles Verfahren zur Reduzierung von Stickstoffoxiden im Abgas dar [81]. Als Katalysatoren kommen überwiegend Titandioxidträger mit Vanadat/Wolframat-Kontakte zum Einsatz. Dabei wird vor dem Katalysator ein Reduktionsmittel (z. B. Ammoniak, Harnstoff, Kohlenwasserstoffe) in flüssigem oder gasförmigem Zustand dem Rauchgasstrom über ein Düsensystem zugeführt. Die Einspritzmenge richtet sich beim SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction) nach der aktuellen  $\text{NO}_x$ -Rate im Abgas, der Temperatur und dem

Aufbau des Katalysators. Beim Verfahren mit Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oxidiert der im Ammoniak gebundene Wasserstoff mit dem freien und im  $\text{NO}_x$  gebundenen Sauerstoff zu  $\text{H}_2\text{O}$ , so dass Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) übrig bleibt.



Die optimale Arbeitstemperatur dieser Katalysatoren liegt zwischen 250 und 450 °C [80]. Dabei werden Umsetzraten von 80 bis über 90 % erreicht. Durch die katalytische  $\text{NO}_x$ -Reduktion ist es möglich, verbrauchsärmere Motoren mit höheren Betriebstemperaturen einzusetzen, ohne dabei eine thermisch bedingte  $\text{NO}_x$ -Erhöhung in Kauf nehmen zu müssen. Unerwünschte Begleitreaktionen bei Entstickungskatalysatoren sind die partielle Reduktion von  $\text{NO}$  zu  $\text{N}_2\text{O}$  (Lachgas) sowie die Oxidation von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  vor allem bei tieftemperaturaktiven Katalysatoren auf Basis von Platinmetall-Katalysatoren oder die partielle Oxidation von  $\text{HC}$  zu  $\text{CO}$  bei hochtemperaturaktiven Katalysatoren [108].

### 2.5.3 Partikelfiltersysteme

Partikelfiltersysteme bestehen aus dem Filtermedium, der Regenerationseinrichtung sowie einer Steuerungs- und Kontrolleinheit zur Funktionsüberwachung [3]. Grundlagen der Partikelfiltertechnik für Dieselmotoren, insbesondere beim Einsatz in Bussen und Lastwagen, werden ausführlich in einem Bericht, der vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Schweiz herausgegeben wurde, beschrieben [14]. In Deutschland wird vor allem durch den Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V. die Forschung und Öffentlichkeitsarbeit auf dem Gebiet der Partikelfiltersysteme für Dieselmotoren gefördert. Nachfolgend wird eine Übersicht zum Aufbau und Einsatz von Partikelfiltersystemen gegeben [14] [75] [3] [23] [76] [120].

#### Filtermedien

Bei Dieselmotoren haben sich bisher weder elektrostatische oder strömungsdynamische Verfahren noch Abgaswäscher gegenüber einer Abscheidung an oberflächenreichen Strukturen (Filter) durchsetzen können. Als Filtermedien eignen sich temperaturbeständige Materialien, wie keramische Substrate, Metalle oder Faserstrukturen.

#### Keramisch-monolithischer Zellenfilter

- Wabenkörper mit regelmäßigen in Durchströmungsrichtung angeordneten Kanälen, die wechselweise verschlossen sind mit großen Oberflächen (1 bis 3  $\text{m}^2/\text{l}$ )
- hohe Abscheiderate, geringer Gegendruck, niedrige Gasgeschwindigkeiten
- meist aus Cordierit oder Siliciumcarbid
- bei hohem Ascheanfall erfolgt eine schnelle Überladung des Filters
- umfangreiche Erfahrungen seit Jahrzehnten

### Metall-Sinterfilter

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

### Faser-Wickelfilter

- Garne aus Hochtemperaturfasern, gewickelt auf perforiertem Trägerrohr
- spezielle Wickeltechnik hat zu zuverlässigem Filterelement geführt
- durch elastische Aufhängung keine Gefahr von Spannungsrissen
- bei hohem Ascheanfall, wie beim keramisch-monolithischen Zellenfilter, Gefahr der Überladung, jedoch langsamer

### Faser-Strickfilter

- Rundgestricke aus keramischen Garnen
- Faseroberfläche ca. 200 m<sup>2</sup>/l
- hohes Ascheaufnahmevermögen

### Faser-Flechtfilter

- Geflechte aus Hochtemperaturfasern
- metallische Trägerstrukturen

### Filterpapier, Filterfilz, Filtervlies

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

## **Regenerationsverfahren**

Partikelfilter werden höchstens solange mit Ruß beladen, bis ein maximal zulässiger Abgasgegendruck erreicht wird. Dann müssen sie regeneriert werden. Für die Regeneration sind Abgastemperaturen von mehr als 600 °C am Filtereintritt erforderlich [118]. 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 passiver und aktiver 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. Verschiedene Regenerationsmethoden können auch in unterschiedlicher Weise miteinander kombiniert werden.

### Passive Regeneration

Durch den **Einsatz von Additiven**, wie z. B. Eisen, Cer oder Platin, die üblicherweise dem Kraftstoff zudosiert werden, bzw. deren Oxiden im Abgas lässt sich eine Reduzierung der Ruß-Zündtemperatur von ca. 600 °C auf 350 bis 450 °C erreichen. Bei Motoren mit niedrigeren Abgastemperaturen ist eine rein additivunterstützte Regeneration nur durch einen zusätzlichen Eingriff in das Motormanagement möglich. Nachteile der additivunterstützten Regeneration sind die Notwendigkeit eines Zusatztanks mit Dosiereinrichtung sowie der zusätzliche Ascheeintrag durch das Additiv, der zu einem häufigeren manuellen Reinigen des Filters führt. Voraussetzung für die additivunterstützte Regeneration sind Filtersysteme, die auch für die dabei entstehenden kleinen Oxidpartikel (ca. 20 nm) ausreichende Abscheideraten aufweisen. Schädliche Sekundäremissionen müssen generell ausgeschlossen werden.

Das **CRT<sup>TM</sup>-Prinzip (Continuous Regenerating Trap)** beruht darauf, dass in einem vorgeschalteten edelmetallbeschichteten Oxidationskatalysator vermehrt NO<sub>2</sub> aus dem im Abgas enthaltenen NO gebildet wird. Im Rußfilter erfolgt dann die umgekehrte Reaktion, wobei mit Hilfe des freiwerdenden Sauerstoffs der Kohlenstoff im Abgas bereits bei Abgastemperaturen von ca. 280 °C kontinuierlich konvertiert wird. Damit können CO-, HC- und Partikel-Emissionen zu etwa 90 % vermindert werden [51]. Bei diesem passiven System ist ein Kraftstoff mit geringem Schwefelgehalt notwendig. Andernfalls besteht die Gefahr von Katalysatorschäden und hohen Sulfat-Emissionen. Ist die NO<sub>2</sub>-Konzentration oder die Abgastemperatur zu niedrig, kann der Filter verstopfen, wohingegen bei zu hohen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen die Gefahr erhöhter NO<sub>2</sub>-Emissionen gegeben ist [14].

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. Die Regeneration an einer katalytisch beschichteten Wand erfolgt üblicherweise langsam, dafür jedoch weitgehend vollständig. Um eine Beschädigung der katalytisch aktiven Oberfläche zu vermeiden, darf eine maximal auftretende Temperatur von ca. 800 °C nicht überschritten werden (Einhaltung einer maximal zulässigen Filterbeladung).

### Aktive Regeneration

Die Auslösung der **brennerunterstützten Regeneration** ist unabhängig von der Abgastemperatur. Durch Kontrollieren von Betriebsparametern, wie Abgastemperatur, Abgasgegendruck, Motordrehzahl und Last, wird entschieden, wann eine Regeneration gestartet wird. Dazu wird gasförmiger oder flüssiger Kraftstoff in einer kleinen Verbrennungskammer verbrannt und die Abgastemperatur auf die erforderlichen ca. 650 °C erhöht. Beim BHKW-Betrieb erfolgt die Zuschaltung des Brenners meist beim Erreichen eines bestimmten Abgasdrucks.

Bei der **katalytischen Verbrennung** setzt ein Oxidationskatalysator Kraftstoff, der vor dem Rußfilter eingespritzt wird, flammenlos um und hebt so die Abgastemperatur auf die erforderliche Regenerationstemperatur an.

Durch eine **elektrische Beheizung** wird 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 der Energieaufwand gemindert werden.

Bei der **Gegenstrom-Abreinigung** wird durch einen periodischen Druckstoß entgegen der Abgasstromrichtung die Filterbeladung gelöst und über eine Schleuse ausgetragen. Dieses System wird vor allem im Anlagenbau eingesetzt.

Durch **motorische Maßnahmen**, wie die Veränderung des Einspritzverlaufs bei modernen Einspritzsystemen, gegebenenfalls in Verbindung mit einer Drosselung des Gasstroms auf der Ansaug- oder Abgasseite, ist eine Anhebung der Abgastemperatur um bis zu 200 K möglich. Auf diese Weise kann eine Regeneration aktiv eingeleitet werden.

#### 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 notwendig, den Filter von Zeit zu Zeit meist manuell von diesen Rückständen zu reinigen. Dabei muss sichergestellt werden, dass die im Filter angesammelten Partikel, die toxisch sein können, nicht in die Umgebungsluft oder in das Grundwasser gelangen. Manche Hersteller empfehlen ein Rückblasen mit Luft und bringen bereits entsprechende Anschlüsse für die Reinigung an. Andere Hersteller bevorzugen das Reinigen mit Wasser oder Dampf. Die Betriebsdauer zwischen zwei manuellen Filterreinigungen ist abhängig von der Kraftstoff- und Motorölqualität, vom Betriebsprofil des Motors, der Filtereigenschaften und Filterauslegung. Der Wartungsumfang kann so je nach Filtersystem und Randbedingungen sehr unterschiedlich sein.

#### Anforderungen an Partikelfiltersysteme

Von Seiten der Luftreinhaltung, der Motorenhersteller und der Anwender werden bestimmte Anforderungen an Partikelfiltersysteme gestellt. Durch den Einsatz von Filtersystemen sollen neben der Partikelmasse insbesondere auch die Partikelanzahl reduziert werden. Keinesfalls darf der Einsatz eines Abgaspartikelfiltersystems die Emission zusätzlicher, sekundärer schädlicher Abgase bewirken. Beispielsweise könnten durch Kupferadditive (zur Einleitung der Regeneration) Dioxin- und Furan-Emissionen deutlich erhöht werden. Ebenso ist von Partikelfiltersystemen zu fordern, dass sich auch während der Regeneration keine Emissionsspitzen aufgrund unvollständiger Verbrennung oder Filterdurchbrüchen ergeben. Beim Einsatz von Abgaspartikelfiltersystemen sind möglichst niedrige Abgasgedrücke zu gewährleisten, da sonst ein Kraftstoffmehrverbrauch, ein

erhöhter Schadstoffausstoß oder eine Verkürzung der Motorlebensdauer die Folge ist. Niedrige Abgasdrücke werden vor allem durch große Filteroberflächen und eine hohe Porosität des Filtermediums erreicht.

Darüber hinaus sind eine Reihe weiterer wichtiger Aspekte, wie Baugröße, Gewicht und Schalldämmung, zu beachten. Auch sind eine hohe thermische Stabilität und gute Alterungsbeständigkeit gefordert. Die Filtersysteme sollten automatisiert arbeiten und überwacht werden sowie einfach und umweltgerecht gereinigt bzw. ausgetauscht werden können. Für eine additivabhängige Regenerierung ist eine bedarfsgerechte automatische Dosierung der Additive aus einem Vorratstank mit Füllmengenkontrolle zu fordern.

Im Rahmen des sogenannten VERT<sup>4</sup>-Projekts wurde ein Pflichtenheft erarbeitet, das als einheitliche Grundlage für die Bewertung von Dieselpartikelfiltern anerkannt ist. Hierin sind die wesentlichen technischen Anforderungen an Partikelfiltersysteme festgelegt [75]. Die wichtigsten Anforderungen neben weiteren sind:

- Abscheidegrad (Anzahlkonzentration) > 97 % für Partikel von 20 bis 300 nm,
- Abscheidegrad (Massenkonzentration nach VDI 2465) > 93 %,
- keine relevante Erhöhung von Sekundäremissionen (insbesondere NO<sub>2</sub>, Dioxine und Furane, PAK und Nitro-PAK, Schwefelsäure-Aerosole und Partikel),
- Druckverlust bei Motornennleistung < 50 hPa (unbeladener Filter) und < 150 hPa (Grenzbelastung bis Regeneration), im Betrieb max. 200 hPa,
- Additivdosierung automatisch mit Abschaltung bei Filterbruch,
- Funktionsüberwachung durch elektronische Überwachung der Filterfunktion,
- Lebensdauer: > 5000 Betriebsstunden,
- Gebrauchsdauer bis zur mechanischen Reinigung des Filtermaterials von nichtbrennbaren Rückständen: > 2000 Betriebsstunden,
- Wartungsintervall: > 500 Betriebsstunden.

Die Ergebnisse des VERT-Projektes machen deutlich, dass Partikelfilter derzeit als die einzige effiziente Lösung zur nachhaltigen Minderung der Dieselpartikel-Emissionen 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 [76]. 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.

---

<sup>4</sup> VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau: Ein Projekt zur Untersuchung technischer Möglichkeiten zur Minimierung der Diesel-Partikel-Emissionen bei bestehenden Motoren (1994-1999) - Gemeinschaftsprojekt der Schweiz. Unfallversicherungsanstalt (Suva), Österr. Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Deutschen Tiefbauberufsgenossenschaft (TBG), Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Deutschen Umweltbundesamtes (UBA) sowie einer Begleitgruppe der Industrie

Von entscheidender Bedeutung für eine hohe Effektivität des Partikelfilters und zur Gewährleistung eines sicheren Motorbetriebs ist die sorgsame Abstimmung des Partikelfiltersystems auf den Motor und die richtige Wartung. Probleme können sein:

- Verblockung des Filters mit Ruß aufgrund mangelnder Regenerationsbedingungen (zu geringe Abgastemperatur, ungünstiges  $\text{NO}_x$ /Ruß-Verhältnis bei CRT-Systemen, mangelhafte Additivdosierung oder inaktive katalytische Beschichtung),
- Verblockung des Filters mit Aschen von Regenerationsadditiven, Kraftstoff- und Motorölbestandteilen,
- Überbeanspruchung der Filter durch Thermoschock bzw. Überschreiten der Schmelztemperatur mit mechanischen Schäden, wie Risse, Kanalwandverschmelzungen, Maschenaufweitungen, Faserbrüche, Strangverletzungen, Auflösungserscheinungen,
- Unkontrollierte Regenerationsabläufe aufgrund mangelnder Überwachung von Filterbeladung, Abgastemperatur sowie Motordrehzahl und Last,
- Ablagerungsbildung an Einspritzdüsen (z. B. durch Regenerationsadditive).

Infolge dieser Probleme kommt es zu einer erhöhten Bauteilbelastung sowie zu einer schlechteren Verbrennung im Motor, was sich wiederum negativ auf den Kraftstoff- und Motorölverbrauch, die Rußemissionen und die Motorleistung sowie Einspritzdüsen- und Auslassventil-Verschleiß auswirkt [13].

Die meisten bisherigen Untersuchungen beziehen sich auf Partikelfilter für Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen, teilweise auch für Stationärmotoren, die vorwiegend mit Dieselmotorkraftstoff und in geringerem Umfang auch mit Biodiesel betrieben wurden, wie z. B. Arbeiten von BRAUNGARTEN und TSCHÖKE (2003) [11] oder MAURER (1998) [71]. Untersuchungen zur Verwendung von Partikelfiltern bei Pflanzenölkraftstoffen fanden bislang nur in Ausnahmefällen, z. B. von CLAUßEN (1997) statt [22]. Einhergehend mit der Praxiseinführung der Partikelfiltertechnologie bei diversen motorischen Anwendungen werden derzeit auch zunehmend mehr Untersuchungen zu Partikelfiltern beim Einsatz von Rapsölkraftstoff durchgeführt (HOFMANN et al., 2006 [47], KLAISSLE, 2006 [59]).

## **2.6 Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke**

### **2.6.1 Einsatz und Betrieb**

Rapsölbetriebene BHKW zeichnen sich durch eine Reihe von Umweltvorteilen aus. Zusätzlich zur effizienten Energieumwandlung durch Kraft-Wärme-Kopplung wirkt sich die Verwendung von Rapsölkraftstoff positiv auf die Schonung von Ressourcen und den Schutz des Klimas aus. Darüber hinaus kann Rapsöl durch dessen schnelle biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität einen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz

leisten. Deshalb eignet sich der Einsatz von Rapsöl-BHKW vor allem in umweltsensiblen Gebieten, wie etwa dem Alpenraum oder in hochwassergefährdeten Gebieten, wo beim Austritt von Heizöl oder Dieselkraftstoff beträchtliche Schäden entstehen können. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von Rapsöl-BHKW sind ländliche Gebiete, wo bei regionaler Produktion und Nutzung des Rapsöls sowie des Presskuchens durch den niedrigen Transportaufwand eine hohe Energieeffizienz erzielt wird und positive Impulse auf die regionale Strukturentwicklung ausgehen. Durch die Förderung der Stromspeicherung im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes – EEG [34], des Heizölpreisanstieges sowie des gestärkten Umweltbewusstseins werden rapsöлтаugliche BHKW insbesondere im Leistungsbereich bis 500 kW elektrischer Leistung zunehmend nachgefragt.

Trotz günstiger Rahmenbedingungen bestehen aber noch Unsicherheiten bei der Anwendung hinsichtlich der Betriebssicherheit, des Emissionsverhaltens und der Wirtschaftlichkeit der angebotenen Aggregate. Grund dafür sind die oft sehr gegensätzlichen Erfahrungen bezüglich Reparaturanfälligkeit und Laufleistung in der Praxis, aber auch die Zurückhaltung der konventionellen Motorenindustrie, pflanzenöлтаugliche Aggregate zu entwickeln und anzubieten. Neben verunreinigten Pflanzenölkraftstoffen zählen Schmierölverdickung und Motorüberhitzung zu den wichtigsten Ursachen für Schäden an Pflanzenölmotoren. Die Wahl des geeigneten Kraftstoffs (Rapsölkraftstoff gemäß Vornorm DIN V 51605) und die Verwendung eines dauerlaufbeständigen Motors haben deshalb eine hohe Bedeutung. Schäden durch Überhitzung werden durch eine ausreichende Wärmeabfuhr (leistungsfähige Belüftung des Motors, saubere Wärmetauscherflächen) vermieden. Unbedingt einzuhalten sind die vom Hersteller vorgegebenen Wartungsintervalle insbesondere die Motorenölwechsel, da das Motoröl z. B. infolge häufiger Kaltstarts, bei schlechter Abdichtung zwischen Kolben und Zylinderwand oder bei fehlerhaften bzw. verkockten Einspritzdüsen stark mit Rapsölkraftstoff angereichert wird. Rapsöl beschleunigt die Alterung des Motoröls und kann zu Verdickungen des Motoröls und zur Beeinträchtigung der Motorschmierung mit schweren Motorschäden führen [99] [100].

Häufig werden deshalb die Ölwechselintervalle gegenüber dem Betrieb mit Heizöl verkürzt oder die Schmierölmenge beispielsweise durch den Einbau größerer Ölwanne erhöht. Daneben kann der Einbau einer kontinuierlichen Motorölauffrischung (z. B. Plantotronic®) den Wartungsaufwand vermindern. Beim System Plantotronic® wird aus der Ölwanne kontinuierlich ein definierter Teilstrom Gebrauchtöl (ca. 2 % des Kraftstoffverbrauchs) entnommen und dem Kraftstoff zugemischt. Das entnommene Gebrauchtöl wird durch eine Mischung aus Rapsöl aus dem Kraftstofftank und Additiven ersetzt (Abbildung 6). Sowohl die ständige Auffrischung mit Funktionsadditiven, aber auch die beim Plantotronic®-System eingesetzte Niveauüberwachung des Motorölstands verringern effektiv das Risiko eines Motorschadens. Das Plantotronic®-System bewies sowohl in Fahrzeugen als auch in Stationärmotoren Praxistauglichkeit, wenngleich es bislang nicht als Serienprodukt angeboten wird [70] [114].

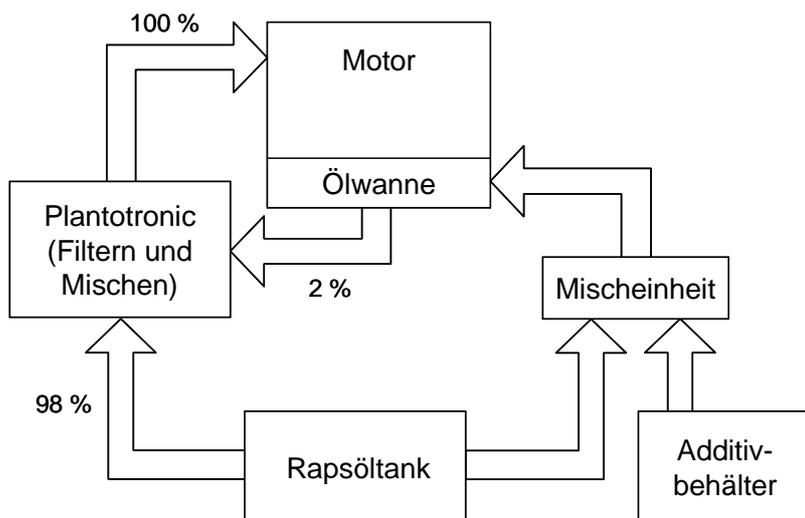


Abbildung 6: Funktionsschema Plantotronic®-System (nach WIDMANN et al., 2001 [114])

In Deutschland gibt es derzeit etwa 40 Hersteller von pflanzenötauglichen BHKW, insgesamt sind mehr als 1800 mit Pflanzenöl betriebene BHKW im Einsatz [97] [52]. Abbildung 7 zeigt, dass etwa 27,3 % dieser Anlagen eine elektrische Leistung bis 10 kW, 37,5 % größer 10 bis 100 kW, 38,0 % größer 100 bis 1000 kW und 1,2 % größer als 1000 kW besitzen. Die gesamte installierte elektrische Leistung beträgt ca. 237 MW, etwa 27,4 % davon entfallen auf Anlagen größer 1000 kW<sub>el</sub>, 55,8 % auf Anlagen größer 100 bis 1000 kW<sub>el</sub>, 15,3 % auf Anlagen größer 10 bis 100 kW<sub>el</sub> und 1,5 % auf Anlagen bis 10 kW<sub>el</sub> [52]. Pflanzenöl-BHKW mit geringer Leistung werden meist mit Rapsölkraftstoff betrieben, bei leistungsstärkeren BHKW kommen seit dem Jahre 2005 vermehrt auch Soja- oder Palmöl zum Einsatz.

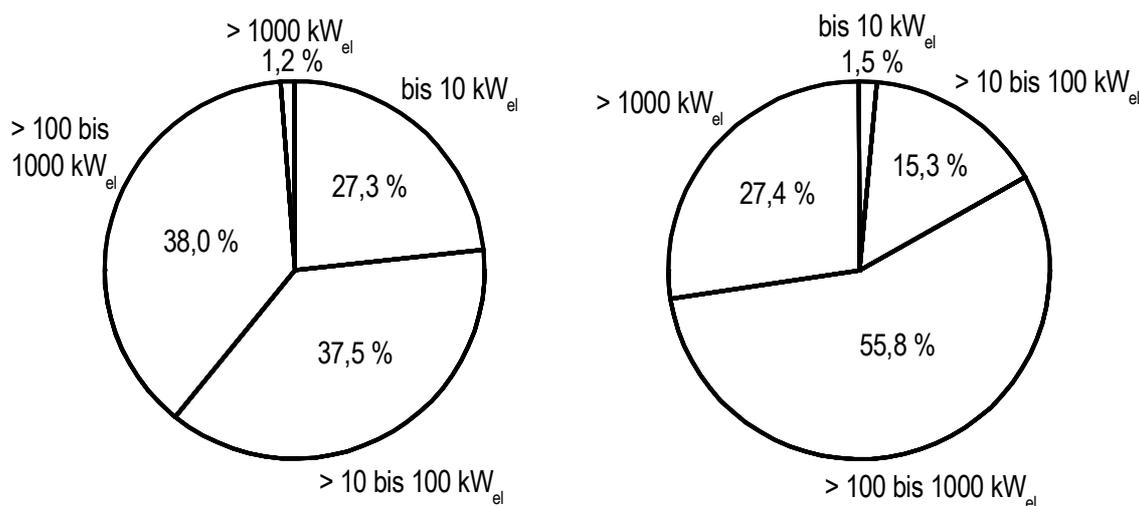


Abbildung 7: Strukturelle Verteilung von Pflanzenöl-BHKW in Deutschland – Bild links: BHKW-Anzahl je Leistungsklasse bez. auf die Gesamtzahl von n = 1801; Bild rechts: Installierte elektrische Leistung je Leistungsklasse bezogen auf die installierte Gesamtleistung von P<sub>el</sub> = 237 MW (nach IE, 2006 [52])

## 2.6.2 Vorschriften zum Immissionsschutz

Die beim Betrieb eines Verbrennungsmotors entstehenden Emissionen können die menschliche Gesundheit, die Umwelt oder andere Schutzgüter (z. B. Materialien) schädigen. Zum Schutze werden deshalb umweltbelastende Abgase, wie Stickstoffoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Partikel, gesetzlich begrenzt. Zur Vereinheitlichung der Beurteilungsmaßstäbe auf europäischer Ebene wurden EG-Luftqualitätsrichtlinien erarbeitet. In der sogenannten Luftqualitäts-Rahmenrichtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 wird der Rahmen für die Rechtsentwicklung im Bereich der Luftqualität in der EU geschaffen. Auf nationaler Ebene werden auf Basis des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [20] Grenzwerte für schädliche Abgasemissionen in der 22. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (22. BImSchV) allgemein und in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [35] anlagenbezogen festgelegt.

### TA Luft

Die Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002 soll dem Schutz der Allgemeinheit vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen dienen, um so ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen [35]. Die Vorschriften der TA Luft sind unter anderem bei der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb einer neuen Anlage (§ 6 Abs. 1 BImSchG) sowie zur Änderung einer bestehenden Anlage (§ 16 Abs. 1, auch in Verbindung mit Abs. 4 BImSchG) zu beachten [35].

Für die Errichtung und den Betrieb von stationären Verbrennungsmotoranlagen für den Einsatz von flüssigen Brennstoffen, wie z. B. pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken, ist eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Verbindung mit Nr.1.4 Spalte 2 des Anhangs zur 4. BImSchV [106] erforderlich, sofern die Feuerungswärmeleistung (FWL) 1 MW oder mehr beträgt (entspricht einem Brennstoffeinsatz von ca. 100 l/h Heizöl extra leicht oder Rapsölkraftstoff [5]). In Tabelle 2 sind die Emissionsbegrenzungen gemäß der TA Luft vom 24. Juli 2002 (TA Luft 2002) für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige BHKW zusammengefasst. Die Angabe der Emissionswerte erfolgt als Masse des emittierten Stoffes je Volumen des Abgases im Normzustand (273,15 K; 101,3 kPa) nach Abzug des Feuchtegehalts an Wasserdampf bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%.

Tabelle 2: Emissionsbegrenzungen nach TA Luft 2002 für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige BHKW (d. h.  $FWL^{1)} \geq 1 \text{ MW}$ ) [35] [119]

Schadstoff	FWL <sup>1)</sup>	Anforderung <sup>2)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	$\geq 1 \text{ MW}$	$\leq 0,30 \text{ g/m}^3$
Gesamtstaub	$\geq 1 \text{ MW}$	$\leq 20 \text{ mg/m}^3$
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	$\geq 1 \text{ MW}$	$\leq 1,0 \text{ g/m}^3$
Organische Stoffe Formaldehyd	$\geq 1 \text{ MW}$	$\leq 60 \text{ mg/m}^3$ (die Möglichkeiten, Emissionen an organischen Stoffen zu vermindern, sind entsprechend dem Stand der Technik auszuschöpfen)

<sup>1)</sup> FWL = Feuerungswärmeleistung

<sup>2)</sup> Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei 5 Vol.-% Sauerstoffgehalt

Für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungspflichtige Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 MW wurden bislang keine allgemeingültigen Vorschriften zur Emissionsbegrenzung festgelegt. Generell gelten aber auch bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen die Minimierungsgrundsätze des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (§ 22 BImSchG). Demnach müssen

- schädliche Umwelteinwirkungen, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, verhindert werden,
- nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden und
- die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden.

Sofern aber immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 und 2 des BImSchG zu beurteilen sind, ob schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen vorliegen, werden die Grundsätze der TA Luft zur Ermittlung und Beurteilung von schädlichen Umwelteinwirkungen und ggf. Anforderungen an die Vorsorge herangezogen [35]. Zur Beurteilung und zur Reduzierung der Umweltauswirkungen von immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen ( $< 1 \text{ MW}_{FWL}$ ) wurden deshalb sogenannte Orientierungs- und Zielwerte für die Abgasemissionen festgelegt. Orientierungs- und Zielwerte sind Werte, die mit dem Ziel festgelegt werden, diese in einem bestimmten Zeitraum zu erreichen, um schädliche Auswirkungen langfristig zu vermeiden. In Tabelle 3 sind die Orientierungs- und Zielwerte für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen aufgeführt.

Tabelle 3: Orientierungs- und Zielwerte für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (d. h. FWL<sup>1)</sup> < 1 MW) [5] [119]

Schadstoff	FWL <sup>1)</sup>	Anforderung <sup>2)</sup>
Kohlenmonoxid (CO)	< 1 MW	≤ 0,30 g/m <sup>3</sup>
Gesamtstaub	< 1 MW	Zielwert: 20 mg/m <sup>3</sup> durch Einsatz von Rußfiltern unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ), angegeben als NO <sub>2</sub>	≥ 500 kW < 1 MW	≤ 2,5 g/m <sup>3</sup> (durch motorische Maßnahmen)
	< 500 kW	≤ 3,0 g/m <sup>3</sup> (Zielwert 2,5 g/m <sup>3</sup> , durch motorische Maßnahmen)
Gerüche/HC	< 1 MW	Einsatz von Oxidationskatalysatoren

<sup>1)</sup> FWL = Feuerungswärmeleistung

<sup>2)</sup> Emissionswerte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand bei 5 Vol.-% Sauerstoffgehalt

## 2.7 Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Pflanzenöl-Motoren

Die Abgasemissionen eines Motors werden im Wesentlichen vom Kraftstoff und Motorsystem bestimmt. Somit ist bei der Verbrennung von Pflanzenölkraftstoff in einem pflanzenöлтаuglichen Motor mit einer von Dieselkraftstoff im Dieselmotor abweichenden Zusammensetzung und Konzentration von Abgaskomponenten zu rechnen. Hinsichtlich des Ausstoßes luftverunreinigender Schadstoffe sollten einheitliche Maßstäbe für Motoren mit Dieselkraftstoff- und Pflanzenölbetrieb angelegt werden. Die im Rahmen von Typprüfungsverfahren geforderten Abgaszertifizierungen neuer Motoren sind jedoch ausschließlich mit Dieselkraftstoff am Serien-Dieselmotor durchzuführen. Um deshalb das Abgasemissionsverhalten von mit Pflanzenölkraftstoff betriebenen Motoren beurteilen zu können, sind entsprechende Messungen notwendig, die üblicherweise im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten stattfinden. In der Literatur sind mittlerweile eine Vielzahl von Untersuchungen beschrieben, in denen die absoluten und die relativen Emissionen im Vergleich zu Dieselkraftstoffbetrieb oder emissionsrelevante Einflüsse bestimmt werden [33] [42] [72] [77] [104] [62] [46] [110] [56] [12] [43]. Die Einsatzgebiete der Motoren sind gerade in neueren Untersuchungen überwiegend landwirtschaftliche Maschinen.

### 2.7.1 Vergleich Pflanzenöl- und Dieselkraftstoffbetrieb

Ein Vergleich der Emissionen zwischen Diesel- und Rapsölkraftstoffbetrieb gestaltet sich schwierig, da die Motoren meist nur für eine Kraftstoffart optimiert sind.

Eine Recherche von Tschöke (1997) [102] fasst Untersuchungen aus den Jahren 1985 bis 1996 zu Abgasemissionen von Pflanzenölmotoren zusammen. Dabei wurden 39 Literaturstellen zu Rapsöl und RME ausgewertet. Die Daten werden unterschieden nach dem Testverfahren, dem Arbeitsverfahren der Motoren (indirekt und direkt einspritzend) und der Motorenanpassung. So werden die Abgasemissionen bei Rapsölkraftstoffbetrieb sowohl von Serien-Dieselmotoren als auch von pflanzenöлтаuglichen Motoren mit den Abgasemissionen bei Dieselkraftstoffbetrieb verglichen. In einem Fall werden auch die Abgasemissionen mit Rapsölkraftstoff im pflanzenöлтаuglichen Motor den Emissionen mit Dieselkraftstoff im originalen Dieselmotor gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die Kohlenmonoxid-Emissionen (CO) liegen bei Rapsölbetrieb in einem Bereich von ca. 70 bis 300 % bezogen auf Dieselkraftstoffbetrieb. Werden jedoch die speziell für den Pflanzenöleinsatz ausgerüsteten Motoren gesondert betrachtet, so können zwischen den Kraftstoffen keine wesentlichen Unterschiede bei den CO-Abgaskonzentrationen festgestellt werden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Kohlenmonoxid-Ausstoß beim Einsatz von Rapsölkraftstoff in etwa dem von Dieselkraftstoff entspricht, sofern die Motoren auf den Pflanzenölkraftstoff abgestimmt sind.

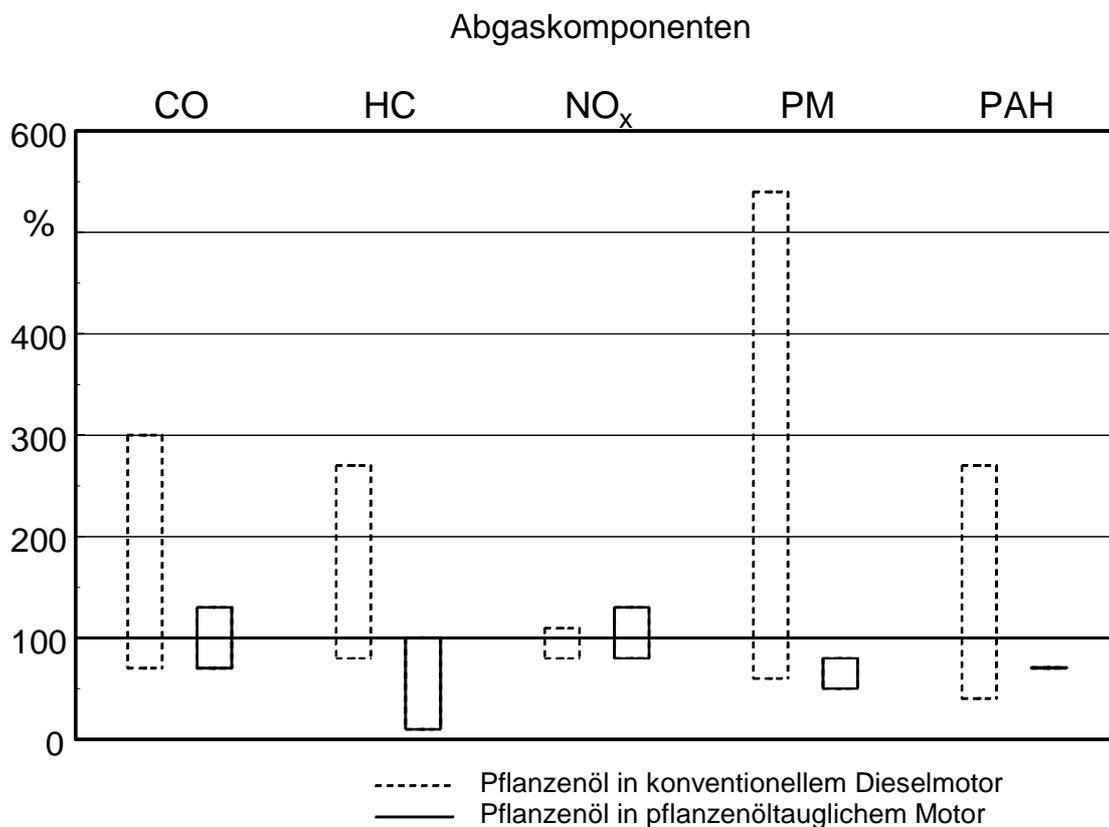


Abbildung 8: Abgasemissionen pflanzenölbetriebener Dieselmotoren im Vergleich zu Dieselkraftstoff (DK = 100 %) (nach Tschöke, 1997 [102])

Die Kohlenwasserstoff-Emissionen (HC) der rapsölbetriebenen Dieselmotoren betragen zwischen ca. 10 und 270 % (Dieselkraftstoff = 100 %). Auffällig ist auch hier, dass die erhöhten Werte den nicht angepassten konventionellen Motoren zuzuschreiben sind. Die auf Pflanzenölbetrieb ausgelegten Motoren weisen mit Rapsölkraftstoff HC-Emissionen auf, die gleich oder deutlich niedriger als die von Dieselkraftstoff sind (Abbildung 8).

Die Stickstoffoxid-Emissionen ( $\text{NO}_x$ ) der rapsölbetriebenen Motoren weisen insgesamt nur eine geringe Abweichung vom Betrieb mit Dieselkraftstoff auf (80 bis 130 %).

Die Partikelmasse-Emissionen (PM) der rapsölbetriebenen Motoren weichen z. T. drastisch gegenüber dem Betrieb mit Dieselkraftstoff ab (Abbildung 8). Die höchsten Werte liegen bei 540 %, die niedrigsten bei 50 %. Hier wirkt sich im Gegensatz zu den anderen Emissionskomponenten auch das Testverfahren stark aus. Die Emissionen bei instationären Tests liegen deutlich über denen stationärer Testverfahren. Die pflanzenöлтаuglichen Motoren emittieren beim Betrieb mit Rapsöl im Durchschnitt etwa 1/3 weniger Partikelmasse als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff.

Bei den Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK oder PAH) sind mit Rapsölkraftstoff auf Diesel bezogene Werte zwischen 10 und 270 % feststellbar. Zwar ist die Datenbasis vergleichsweise gering, aber auch hier zeichnet sich ab, dass die PAH-Emissionen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff in Pflanzenölmotoren tendenziell niedriger liegen als beim Einsatz von Dieselkraftstoff (allerdings in den für Rapsölkraftstoff optimierten Motoren). Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich die Emissionswerte aus Summen verschiedener PAH-Komponenten mit unterschiedlicher gesundheitlicher Relevanz zusammensetzen.

Diese Ergebnisse der Untersuchung von TSCHÖKE (1997) [102] zeigen gute Übereinstimmung mit einer Studie des Umweltbundesamtes [37] sowie weiteren Untersuchungen zum Vergleich der Abgasemissionen beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff.

KERN und WIDMANN (1997) [58] beschreiben die Unterschiede zwischen Emissionen mit Pflanzenöl- und Dieselkraftstoff ebenfalls anhand einer Literaturstudie. Dabei zeigt sich, dass pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren das gleiche oder ein niedrigeres Emissionsniveau aufweisen können als konventionelle Dieselmotoren. Der Einsatz von Rapsöl in nicht pflanzenöлтаuglichen Motoren kann jedoch zu einer starken Erhöhung der Emissionskomponenten HC, CO und Partikel führen. Erhöhte Aldehyd-Emissionen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff können auf den im Molekül enthaltenen Sauerstoff zurückgeführt werden. Die große Spannweite der Ergebnisse weist auf ein großes Optimierungspotenzial hin, wenn das Motorsystem und der Rapsölkraftstoff aufeinander abgestimmt werden.

WIDMANN et al. (1992) [116] beschreibt das Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen direkt einspritzenden Pkw sowie eines direkt und eines indirekt einspritzenden pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff. Beim Pkw sind nahezu keine Veränderungen bei den HC-, CO- und Aldehyd-Emissionen zwischen Diesel- und

Rapsölkraftstoffbetrieb erkennbar. Die  $\text{NO}_x$ - und PAK-Emissionen liegen mit Rapsölkraftstoff über, die Partikel-Emissionen unter dem Niveau von Diesellokraftstoff. Bei den Traktoren bestätigen sich die Ergebnisse mit dem Pkw weitgehend hinsichtlich HC, CO und  $\text{NO}_x$ , alle weiteren Komponenten verhalten sich jedoch bei den beiden Traktoren uneinheitlich. Beispielsweise sind die gesondert ausgewerteten als kanzerogen eingestuft oder verdächtigten PAK-Komponenten bei einem pflanzenötauglichen Motor mit Rapsölkraftstoff nicht nachweisbar, wohingegen sie mit Referenz-Diesellokraftstoff sowohl im gleichen Motor als auch bei den mit Diesellokraftstoff betriebenen Diesellomotoren deutlich höher liegen. Bei einem anderen pflanzenötauglichen Motor zeigen sich jedoch höhere Werte bei Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Diesellokraftstoff im selben Motor, allerdings auf einem insgesamt sehr niedrigen Konzentrationsniveau.

### 2.7.2 Einflüsse auf die Emission bei Pflanzenölkraftstoffbetrieb

KAMPMANN (1994) [57] vergleicht die Stickstoffoxid-Emissionen eines Diesellomotors (4D13.5AL) mit einem Pflanzenölmotor (4P13.5AL) bei unterschiedlichen Drehzahl/Lastverhältnissen. Die Untersuchung zeigt, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Pflanzenölmotors im niedrigen Lastbereich und bei mittlerer Drehzahl geringer, unter Vollast dagegen höher sind als beim Diesellomotor. Für CO und HC verhält es sich umgekehrt.

SYASSEN (1992) [96] beschreibt den möglichen Einfluss der Pflanzenöart (evtl. Fettsäuremuster) auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Grund der Annahme sind höhere  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen, die z. B. bei Rapsölmethylester höher als bei Palmölmethylester liegen. Auch Untersuchungen von DOBIASCH (2000) [30] lassen einen Einfluss der Fettsäurezusammensetzung auf die Stickstoffoxid-Emissionen vermuten. Bei BOUCHE et al. (1997) [9] werden diese Erkenntnisse durch Motorenversuche mit verschiedenen Kraftstoffen bestätigt. Danach nehmen die Stickstoffoxid-Emissionen tendenziell in der Reihenfolge Raps-, Palm- und Kokosöl ab.

Untersuchungen von MAY (1994) [74] ergeben einen deutlichen Vorteil von Rapsöl hinsichtlich der Partikel-Emissionen. SYASSEN (1992) [96] geht von einem rußmindernden Effekt von dem im Pflanzenölmolekül enthaltenen Sauerstoff aus.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen in den sauerstoffarmen Bereichen einer Flamme bei hohen Temperaturen und in kurzer Reaktionszeit. Die Bildung verstärkt sich, wenn im Brennstoff bereits entsprechende aromatische Verbindungen enthalten sind. Da in Pflanzenölen von Natur aus keine Aromaten enthalten sind, könnte aus diesem Grund mit niedrigeren PAK-Emissionen als beim Einsatz von Diesellokraftstoff gerechnet werden. An anderen Stellen wird jedoch davon ausgegangen, dass der Aromatengehalt im Kraftstoff keinen oder nur wenig Einfluss auf die komplexen Bildungsmechanismen von PAK hat [58].

Ein Rückgang von PAK-Emissionen bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff bestätigt sich auch in den Untersuchungen von MAY (1994) [74]. Danach ist die Menge der emittierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe bei einem aufgeladenen Motor und einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  im Rapsölbetrieb nur etwa ein Drittel so hoch wie im Dieselmotorbetrieb. Werden nur die als kanzerogen eingestuft bzw. verdächtigten Komponenten betrachtet, ist der Vorteil von Rapsöl noch wesentlich deutlicher.

Von ähnlich hohen Minderungsraten beim Einsatz von Rapsöl berichten KRAHL et al. (1993) [64]. Allerdings variieren die absoluten PAK-Konzentrationen beim Pflanzenölbetrieb von verschiedenen Fahrzeugen mitunter beträchtlich.

Bei PRESCHER (1997) [84] wurden Untersuchungen zu den Aldehyd-Emissionen beim Einsatz von Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff in einem schwerötauglichen 1-Zylinder 4-Takt Motor 1VDS 18/15 mit einer Maximalleistung von 80 kW und einer Nenndrehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Die Emissionswerte wurden mit Hilfe eines nach FTIR-Methode (Fourier Transformierte Infrarot Spektroskopie) arbeitenden Abgasanalysators (SESAM 2) erfasst. Dabei zeigt sich, dass die Aldehydkonzentrationen im Abgas bei beiden verwendeten Kraftstoffen in besonderem Maße lastabhängig sind. Im unteren Lastbereich werden infolge niedriger Verbrennungs- und Abgastemperaturen bei beiden Kraftstoffen stark erhöhte Aldehyd-Emissionen verzeichnet. Bei der Verwendung von Rapsöl liegen die Aldehyd-Emissionen (als Summe der Komponenten Formaldehyd, Acetaldehyd und Acrolein) im Leerlauf und unter Vollast um 50 % bzw. 100 % höher als bei Dieselmotorkraftstoff. Im mittleren Lastbereich werden dagegen niedrigere oder gleich hohe Aldehydkonzentrationen im Rapsölbetrieb festgestellt.

Diese Untersuchungen stimmen mit den Erkenntnissen von SCHULZ et al. (1997) [93] überein, wonach Aldehyd-Emissionen durch eine sogenannte milde Oxidation, d. h. bei relativ niedriger Verbrennungstemperatur und langer Reaktionszeit gebildet werden. Diese Bedingungen herrschen bei kaltem Motor oder beim Motorbetrieb im unteren Lastbereich, wo die Aldehyd-Emissionen ein Maximum aufweisen. SCHULZ et al. (1997) [93] führen erhöhte Aldehyd-Emissionen im Falle von RME direkt auf den höheren Sauerstoffanteil im Kraftstoff zurück, weil bei der Bildung von Aldehyden aus den Kohlenwasserstoffen keine Zwischenprodukte nachgewiesen werden können.

Weitere Untersuchungen zu Aldehyd-Emissionen von drei unterschiedlichen Motorvarianten (Saugmotor, aufgeladener Motor, aufgeladener Motor mit Oxikat) wurden auch von MAY 1994 [74] durchgeführt. Als Ursache für das erhöhte Bildungspotenzial für Aldehyde wird ebenfalls der im Molekül eingebundene Sauerstoff verantwortlich gemacht. Durch die Verwendung von aufgeladenen Motoren und beim Einsatz von Oxidationskatalysatoren können die Aldehyd-Emissionen jedoch deutlich reduziert werden.

KLAISSLE (2002) [60] untersuchte Möglichkeiten mittels der Parameter: Förderbeginn der Einspritzpumpe, Öffnungsdruck der Einspritzdüsen und Kraftstofftemperatur das Abgas-

und Betriebsverhalten eines direkt einspritzenden Turbodieselmotors (Hersteller: Iveco, Typ 8140.47, 2,5 l Hubraum, 78 kW bei 3800 min<sup>-1</sup>) beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff sowie mit Mischungen davon auf dem Prüfstand zu beeinflussen. Die Einspritzanlage verfügt über eine Verteiler-Einspritzpumpe der Firma Bosch des Typs 0460. Dabei zeigt sich, dass die CO-Emissionen im Leerlauf und bei Teillast mit Rapsölkraftstoff höher als mit Dieselmotorkraftstoff, bei hoher Last gleich hoch oder niedriger sind. Die HC-Konzentrationen bewegen sich insgesamt auf sehr niedrigem Niveau. Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen ist ein geringfügiger Anstieg mit Rapsölkraftstoff gegenüber Dieselmotorkraftstoff zu verzeichnen. Die Untersuchungsergebnisse machen auch deutlich, dass für eine Optimierung von Dieselmotoren auf Rapsölkraftstoff Maßnahmen ergriffen werden müssen, die über eine bloße Kraftstoffvorwärmung hinausgehen und dass eine Optimierung über den ganzen Betriebsbereich durch den Einsatz einer elektronischen Motorsteuerung erfolgen sollte.

DORN (2005) [31] untersuchte die Einflüsse verschiedener Kraftstoffe auf die Partikel-Emissionen eines älteren direkt einspritzenden 2-Zylinder-Dieselmotors (Nennleistung 15,5 kW, Hubraum 1,7 l) mit Generator bei unterschiedlichen Lastzuständen. Der Motor ist mit einem einfachen Zweitank-System ausgerüstet, bei dem die verwendeten Pflanzenölkraftstoffe Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl lediglich vorgewärmt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Einsatz der Pflanzenölkraftstoffe höhere Volumenkonzentrationen bei den Partikel-Emissionen und größere Partikeldurchmesser auftreten als beim Einsatz von Biodiesel oder Dieselmotorkraftstoff. Die Volumenkonzentrationen der emittierten Partikel nehmen kraftstoffunabhängig mit steigender Last linear zu. Die Partikelgrößen bleiben bei Biodiesel und Dieselmotorkraftstoff in unterschiedlichen Lastzuständen gleich, bei den Pflanzenölen ist ein Anstieg der Partikeldurchmesser um ein Vielfaches mit sinkender Last zu verzeichnen. Es wird erwartet, dass sich neuere Motoren mit Hochdruckeinspritzsystemen besser an den jeweiligen Kraftstoff anpassen lassen.

### 2.7.3 Emissionsverhalten von pflanzenölbetriebenen BHKW

Das Emissionsverhalten eines pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerks wurde von MEYER-PITTRUF et al. (2002) [79], DOBIASCH (2000) [29] und LACHENMEIER (1998) [67] untersucht. Dabei wurden die Einflüsse von 38 verschiedenen Pflanzenöl-, Fettsäuremethylester-, Diesel- und synthetischen Kraftstoffen sowie verschiedener Kraftstoffeigenschaften auf die Abgasemissionen eines pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerks des Typs Panda 10 am Prüfstand ermittelt. Das BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 10 kW (Dauerleistung max. 6 kW) verfügt über einen 3-Zylinder-Wirbelkammermotor der Firma Kubota. Ein Oxidationskatalysator ist nicht vorhanden. Im Vergleich zu Diesel führt der Einsatz der regenerativen Kraftstoffe zu einer Minderung von CO, Gesamt-C, Partikeln und PAK, einem geringfügigen Anstieg von NO<sub>x</sub> und einer deutlichen Zunahme von Aceton und Acrolein im Abgas. Bei Pflanzenölen mit vermehrt kurzkettigen Fettsäuren kommt es zu einer Minderung von NO<sub>x</sub>, CO- und Gesamt-C. Je höher der Gehalt an

ungesättigten Fettsäuren im Kraftstoff, desto höher sind die  $\text{NO}_x$ -  $\text{CO}$ - und Gesamt-C-Emissionen bei der Verbrennung im Prüfmotor. Für die bei den Versuchen verwendeten zwei Rapsöle, die sehr hohe Koksrückstände von 0,7 (Rapsöl 2) und 1,0 Masse-% (Rapsöl 1) sowie im Fall von Rapsöl 2 eine sehr hohe Gesamtverschmutzung von 110 mg/kg aufwiesen, wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Emissionswerte ermittelt.

Tabelle 4: Abgasemissionskonzentrationen bei der Verwendung von zwei verschiedenen Rapsölkraftstoffen unterschiedlicher Qualität in einem BHKW des Typs Panda 10 (Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 Vol.-%  $\text{O}_2$ -Gehalt, nach DOBIASCH, 2000 [29])

Emissionskomponente	Rapsöl 1	Rapsöl 2	Einheit
Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ )	276	279	$\text{mg}/\text{m}^3$
Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ )	1597	1573	$\text{mg}/\text{m}^3$
Gesamtstaub	40,1	41,4	$\text{mg}/\text{m}^3$
Gesamt-C	38,1	39,5	$\text{mg}/\text{m}^3$
Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ )	< 1	< 1	$\text{mg}/\text{m}^3$
Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )	n.n. <sup>1)</sup>	n.n.	$\text{mg}/\text{m}^3$
Aceton	5,02	4,65	$\text{mg}/\text{m}^3$
Butyraldehyd	1,73	1,55	$\text{mg}/\text{m}^3$
Acrolein	1,94	1,98	$\text{mg}/\text{m}^3$
$\Sigma^2)$ PAK gesamt	ca. 0,2	ca. 0,4	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\Sigma$ PAK kanzerogen	ca. 0,1	ca. 0,2	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Pyren	ca. 0,08	ca. 0,17	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Benz(a)anthracen	ca. 0,005	n.e. <sup>3)</sup>	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Crysen	ca. 0,006	ca. 0,01	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

<sup>1)</sup> n.n. = nicht nachweisbar

<sup>2)</sup>  $\Sigma$  = Summenwert

<sup>3)</sup> n.e. = nicht ermittelt

Umfangreiche Emissionsmessungen wurden an einem mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW des Typs HP T 60 T-ASY, Baujahr 1997 vom TÜV Ecoplan Umwelt GmbH im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (ehemals: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz) im Jahre 1997 durchgeführt [95]. Das BHKW verfügt über eine elektrische Leistung von 60 kW und ist mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet. Der turboaufgeladene direkteinspritzende Pflanzenölmotor 4 P 13,5 A der Firma TMW wird bei den Emissionsmessungen mit Nennlast und Teillast (66 %) betrieben. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Für einen baugleichen Motor, jedoch mit zusätzlicher Ladeluftkühlung (P13,5 AL) gibt KAMPMANN (1994) [56] Emissionswerte von  $460 \text{ mg}/\text{m}^3$  für  $\text{CO}$ ,  $2710 \text{ mg}/\text{m}^3$  für  $\text{NO}_x$  und  $62 \text{ mg}/\text{m}^3$  für Staub an, bezogen auf Abgas im Normzustand und 5 Vol.-%  $\text{O}_2$ -Gehalt. Ein mit einem Katalysator ausgestatteter Motor des gleichen Typs weist  $\text{CO}$ -Emissionen von  $260 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $1400 \text{ mg}/\text{m}^3$  und Staub-Emissionen von  $54 \text{ mg}/\text{m}^3$  auf.

Tabelle 5: Emissionskonzentrationen eines mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW mit 465 Betriebsstunden (Werte bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>, nach STREIT, 1998 [95])

Emissionskomponente	Nennlast vor O.kat. <sup>1)</sup>	Nennlast vor O.kat. <sup>1)</sup>	Nennlast nach O.kat. <sup>1)</sup>	Nennlast nach O.kat. <sup>1)</sup>	Teillast vor O.kat. <sup>1)</sup>	Teillast nach O.kat. <sup>1)</sup>	Einheit	Messwert-erfassung
Kohlenmonoxid (CO)	557	617	7	7	786	22	mg/m <sup>3</sup>	kontinuierlich
Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> )	n.e. <sup>2)</sup>	n.e.	3551	3107	n.e.	2845	mg/m <sup>3</sup>	kontinuierlich
Gesamtstaub	77	32	68	55	41	32	mg/m <sup>3</sup>	3 x 0,5 h
Gesamt-C	45	56	4	6	148	12	mg/m <sup>3</sup>	kontinuierlich
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> )	n.e.	n.e.	57	73	n.e.	51	mg/m <sup>3</sup>	kontinuierlich
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	13	12	< 1	< 1	13	< 2	mg/m <sup>3</sup>	kontinuierlich
Σ <sup>3)</sup> BTEX	1,5	1,6	0,04	0,03	3,5	0,13	mg/m <sup>3</sup>	3 x 0,5 h
Σ Aldehyde	21,9	19,5	0,75	2,8	66,9	8,9	mg/m <sup>3</sup>	3 x 0,5 h
Σ PAK kanzerogen	2,0	2,2	0,0	0,0	7,0	0,0	µg/m <sup>3</sup>	1 x 3 h
Σ PAK nicht kanzerogen	143,1	142,9	14,0	13,5	279,0	25,2	µg/m <sup>3</sup>	1 x 3 h
Chlorbenzole	n.e.	n.e.	5	n.e.	n.e.	n.e.	ng/m <sup>3</sup>	1 x 3 h
Chlorphenole	n.e.	n.e.	60	n.e.	n.e.	n.e.	ng/m <sup>3</sup>	1 x 3 h
PCB	n.e.	n.e.	60	n.e.	n.e.	n.e.	ng/m <sup>3</sup>	1 x 3 h
PCDD/F	n.e.	n.e.	0,005	n.e.	n.e.	n.e.	ng/m <sup>3</sup>	1 x 3 h

<sup>1)</sup> O.kat. = Oxidationskatalysator

<sup>2)</sup> n.e. = nicht ermittelt

<sup>3)</sup> Σ = Summenwert

PRANKL et al. (2005) [83] untersuchten den technischen und wirtschaftlichen Stand von fünf pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken mit Vor- und Wirbelkammermotoren. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse von Emissionsmessungen an fünf verschiedenen Blockheizkraftwerken (nach PRANKL et al., 2005 [83])

BHKW-Nennleistung	4,3 kW <sub>el</sub>	6,0 kW <sub>el</sub>	5,8 kW <sub>el</sub>	6,0 kW <sub>el</sub>			19,6 kW <sub>el</sub> mit Oxikat		Einheit <sup>1)</sup>
	Betriebszeit	n.e. <sup>2)</sup>	n.e.	n.e.	200 h	1660 h	3000 h	0 h	
Kohlenmonoxid	605	241	462	298	236	208	32	61	mg/m <sup>3</sup>
Stickstoffoxide	644	1575	2027	1395	1235	1329	2000	1953	mg/m <sup>3</sup>
Gesamt-C	25	9	n.e.	14	27	23	n.e.	n.e.	mg/m <sup>3</sup>
Rauchwert (Bosch)	2,7	0,8	n.e.	2,0	1,2	0,8	1,4	n.e.	--

<sup>1)</sup> Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt

<sup>2)</sup> n.e. = nicht ermittelt

GLAß et al. (1991) [40] führten Dauerlaufversuche und Emissionsmessungen an einem direkt einspritzenden Rapsöl-Motor des Typs DMS-MF-4RTA bei einer Drehzahl von 1500 min<sup>-1</sup> und einer Leistung von 106 kW durch. Dabei wurden CO-Emissionen von 528 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub>-Emissionen von 3170 mg/m<sup>3</sup> und Gesamt-C-Emissionen von 19 mg/m<sup>3</sup> jeweils bezogen auf Abgas unter Normbedingungen und 5-Vol.-% O<sub>2</sub>-Gehalt ermittelt.

#### 2.7.4 Einsatz von Partikelfiltersystemen bei Rapsölkraftstoffbetrieb

CLAUSEN (1997) [22] untersuchte katalytische Rußfilter für Dieselaggregate und Rapsölmotoren. Die durchgeführten Emissionsmessungen an einem 3-Zylinder-Reihenmotor der Firma Elsbett-Konstruktion GmbH, Hilpoltstein, durch den ein Generator mit einer maximalen elektrischen Leistung von 24 kW angetrieben wird, lassen den Schluss zu, dass Rapsölrußpartikel gegenüber Dieselrußpartikel 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 zeigt sich, dass Rußfiltermaterial und Abscheideverhalten das Abbrandverhalten des Rußes stärker beeinflussen als dies zusätzliche katalytische Beschichtungen der Filteroberfläche vermögen. Das effektivste getestete Rußfiltermaterial verringert die Aktivierungsenergie der Oxidation sowohl von Diesel- als auch von Rapsölruß auf etwa die Hälfte und erhöht die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante um etwa den Faktor 16.

Untersuchungen von HOFMANN et al. (2006) [47] zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsölmethylester (RME) und Rapsölkraftstoff ergaben etwa 22 % geringere Partikelmasse-Emissionen mit Rapsölmethylester und Rapsöl als mit Dieselmethylester und Dieselmethylester. Hinsichtlich der Zusammensetzung weisen Abgaspartikel bei Dieselbetrieb etwa das doppelte an unlöslichen organischen Bestandteilen auf als bei RME- und Rapsölbetrieb. Letztere besitzen dafür einen höheren Anteil an löslicher organischer Fraktion. Die Partikelanzahl ist mit Rapsölkraftstoff im Durchmesserbereich von 15-70 nm deutlich höher als mit RME und Dieselmethylester. Über den gesamten erfassten Durchmesserbereich von 15 bis 660 nm weist Rapsöl mit ca. 58 000 000 Partikeln pro Kubikzentimeter die etwa 6-fache Anzahl im Vergleich zu den beiden anderen Kraftstoffen auf. Der Druckverlust am Partikelfilter ist bei Dieselmethylesterbetrieb mit einer Rate von 0,37 hPa/min am größten. Die Druckverlustrate beim Einsatz von RME beträgt 0,20 hPa/min, beim Einsatz von Rapsölkraftstoff nur 0,17 hPa/min. Der Abscheidegrad des Partikelfilters bezüglich Kohlenstoff, ermittelt durch die Bestimmung der Schwärzungszahl vor und nach dem Filter, war bei allen drei Kraftstoffen sehr hoch.

### 3 Zielsetzung

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass sich das Abgasemissionsverhalten von mit Rapsölkraftstoff betriebenen Motoren zum Teil erheblich von mit Dieselmotoren betriebenen Motoren unterscheidet. Neben Art und Eigenschaften des Kraftstoffs, wirken sich das gesamte Motor- und Abgasnachbehandlungssystem sowie die Betriebsweise des Motors in vielfältiger Weise auf die Abgaszusammensetzung aus. Der derzeitige Kenntnisstand zum Emissionsverhalten pflanzenöлтаuglicher Motoren bezieht sich vorwiegend auf mobile Anwendungen, Stationärmotoren für BHKW hingegen wurden bislang noch wenig betrachtet. Auch sind die Spannweiten der Abgaskonzentrationen während des Praxisbetriebs und in Abhängigkeit praxisrelevanter Einflüsse meist nicht Gegenstand von Untersuchungen. Von verschiedenen Möglichkeiten zur Reduzierung der Abgasemissionen, wie der Optimierung von Kraftstoff und Motor oder der Anwendung von Abgasnachbehandlungssystemen, wird insbesondere den Abgaspartikelfiltersystemen zur Minderung gesundheitsschädlicher Staub-Emissionen eine hohe Bedeutung zugesprochen. Erfahrungen zum Einsatz in rapsölbetriebenen BHKW fehlen jedoch weitgehend. Eine ausreichende Beurteilung des Emissionsverhaltens von rapsölkraftstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken ist daher ebenso wenig möglich wie Aussagen zur Effektivität und Tauglichkeit von Partikelfiltersystemen beim Einsatz von Rapsölkraftstoff.

Zum Schließen dieser Kenntnislücken sind vorab die Eingangs-, Einfluss- und Zielgrößen des Prozesses der Verbrennung von Rapsölkraftstoff in einem rapsölkraftstofftauglichen Blockheizkraftwerk zu bestimmen. Diese sind in Abbildung 9 modellhaft dargestellt.

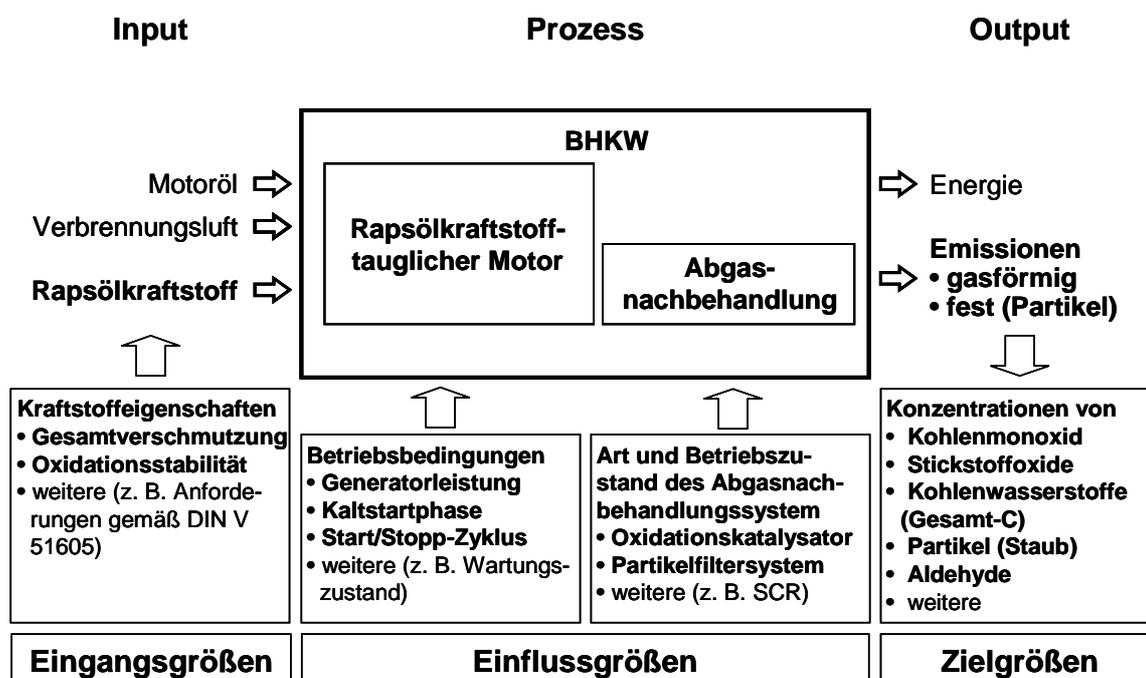


Abbildung 9: Modell der Rapsölkraftstoffverbrennung in pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerken mit Eingangs-, Einfluss- und Zielgrößen

Als Eingangsgrößen von Bedeutung sind verbrennungsrelevante Eigenschaften von Rapsölkraftstoff, wie Gesamtverschmutzung und Oxidationsstabilität, die in der Praxis oft größeren Schwankungen unterworfen sind und nicht immer die Mindestanforderungen nach DIN V 51605 erfüllen. Das Motor- und Abgasnachbehandlungssystem haben einen wesentlichen Einfluss auf den Prozess der motorischen Verbrennung. Wird dabei die technische Ausführung eines Blockheizkraftwerks als konstante Einheit angesehen, sind im Wesentlichen die Betriebsbedingungen Generatorleistung, Kaltstartphasen und Start-Stopp-Zyklen sowie die Art und der Zustand von Abgasnachbehandlungssystemen (z. B., Oxidationskatalysator, Partikelfilter) als Einflussgrößen von Interesse. Zielgrößen dieser Arbeit sind die Emissionen gasförmiger und fester Abgasbestandteile, die hinsichtlich der Luftreinhaltung eine große Bedeutung haben und deshalb bei größeren Anlagen (ab  $1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$ ) gesetzlich limitiert werden. Dazu zählen die Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden, Kohlenwasserstoffen, Partikelmasse und Aldehyden.

Erstes Teilziel dieser Arbeit ist es, die Emissionen an Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden, Kohlenwasserstoffen (Gesamt-C) und Partikelmasse (Staub) im Praxisbetrieb bei verschiedenen rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken zu erfassen. Auch sollen beispielhaft an einem BHKW die Aldehydkonzentrationen im Abgas bestimmt werden. Um die Konzentrationen der tatsächlich mit dem Abgas ausgestoßenen Schadstoffe zu ermitteln, sollen die Untersuchungen an Praxis-BHKW bei den jeweils vorherrschenden Betriebsbedingungen erfolgen, ohne vorher spezielle Prüfbedingungen einzustellen. Des Weiteren sollen die Schwankungsbreiten der Abgasemissionen bestimmt und emissionsrelevante Einflussgrößen untersucht werden. Dies sind insbesondere:

- Generatorlast,
- Kaltstartphasen,
- Start/Stopp-Zyklen,
- Kraftstoffeigenschaften (Gesamtverschmutzung, Oxidationsstabilität),
- Art der Abgasnachbehandlung (Oxidationskatalysator, Abgaspartikelfilter).

Als zweites Teilziel soll das Staub-Minderungspotenzial verschiedener Typen von Abgaspartikelfiltersystemen an einem ausgewählten Rapsöl-BHKW ermittelt werden.

Die Ergebnisse sollen anhand der Emissionsbegrenzungen nach TA Luft 2002, gültig für BHKW ab  $1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$ , eingeordnet werden, um gegebenenfalls die Notwendigkeit von Emissionsminderungsmaßnahmen ableiten zu können.

Mit Hilfe dieser Untersuchung sollen Aussagen über das Emissionsverhalten rapsölbetriebener BHKW und Minderungsmöglichkeiten von Partikel-Emissionen durch Partikelfiltersysteme getroffen werden können. Dies soll dazu beitragen, eine schadstoffarme Betriebsweise sicherzustellen und eine Hilfestellung für die emissionsschutzfachliche Beurteilung sowie für die weitere technische Fortentwicklung von Kraftstoff und Pflanzenöl-BHKW hinsichtlich eines verbesserten Abgasemissionsverhaltens geben zu können.

## 4 Material und Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden an drei für den aktuellen Stand der Technik repräsentativen mit Rapsölkraftstoff betriebenen Blockheizkraftwerken wiederkehrende Emissionsmessungen über einen Zeitraum von 70 Wochen durchgeführt. In ausgewählten Fällen, die sich nach einer belastbaren Datenbasis ohne Störung des Betriebsablaufes richteten, wurden dabei Einflussfaktoren auf die Abgasemissionen näher untersucht. Des Weiteren fanden an einem Blockheizkraftwerk spezielle Emissionsmessungen mit verschiedenen Abgaspartikelfiltersystemen statt. Nachfolgend erfolgt die Beschreibung der untersuchten Varianten sowie der Durchführung der Emissionsmessungen.

### 4.1 Untersuchungsvarianten

Für die Ermittlung des Emissionsverhaltens von rapsölkraftstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken wurden im ersten Teil der Arbeit an drei Praxisanlagen die Einflüsse verschiedener Betriebsweisen, unterschiedlicher Rapsölkraftstoffqualitäten und der Art der Abgasnachbehandlung in insgesamt 18 verschiedenen Kombinationen untersucht (Abbildung 10). Hauptaugenmerk lag dabei auf den für das jeweilige BHKW typischen Betriebsbedingungen, nämlich die für den Dauerbetrieb angelegte Generatorlast („Dauerlast“), den im Praxisbetrieb verwendeten Kraftstoffqualitäten und den an den drei Anlagen installierten Vorrichtungen zur Abgasreinigung.

Die drei für die Untersuchung ausgewählten Blockheizkraftwerke werden im Folgenden BHKW A<sup>5</sup>, BHKW B<sup>6</sup> und BHKW C<sup>7</sup> genannt, wobei BHKW C aus zwei gleichen Modulen aufgebaut ist, die als C1 und C2 bezeichnet werden. Eine genaue Beschreibung dieser Blockheizkraftwerke erfolgt in Kapitel 4.1.1.

Neben den Emissionsmessungen bei Dauerlast, wurden bei BHKW A und BHKW B, bei denen die Generatorlast in einem bestimmten Bereich variiert werden konnte, auch Messungen bei Teillast durchgeführt. Darüber hinaus wurden bei diesen beiden BHKW auch das Emissionsverhalten während eines Lastwechsels, in der Kaltstartphase und während mehrmaligem Startens und Abstellens des Motors („Start/Stop-Zyklus“) bestimmt. Bei BHKW C, bei dem die Generatorlast nicht manuell regelbar war, wurden neben dem Emissionsverhalten bei Dauerlast nur der Einfluss der Kaltstartphasen untersucht. Eine genauere Beschreibung der betrachteten unterschiedlichen BHKW-Betriebsweisen erfolgt in Kapitel 4.1.2.

---

<sup>5</sup> BHKW A: Standort Weihenstephan bei Freising

<sup>6</sup> BHKW B: Standort Greußenheim

<sup>7</sup> BHKW C: Standort Weißenburg

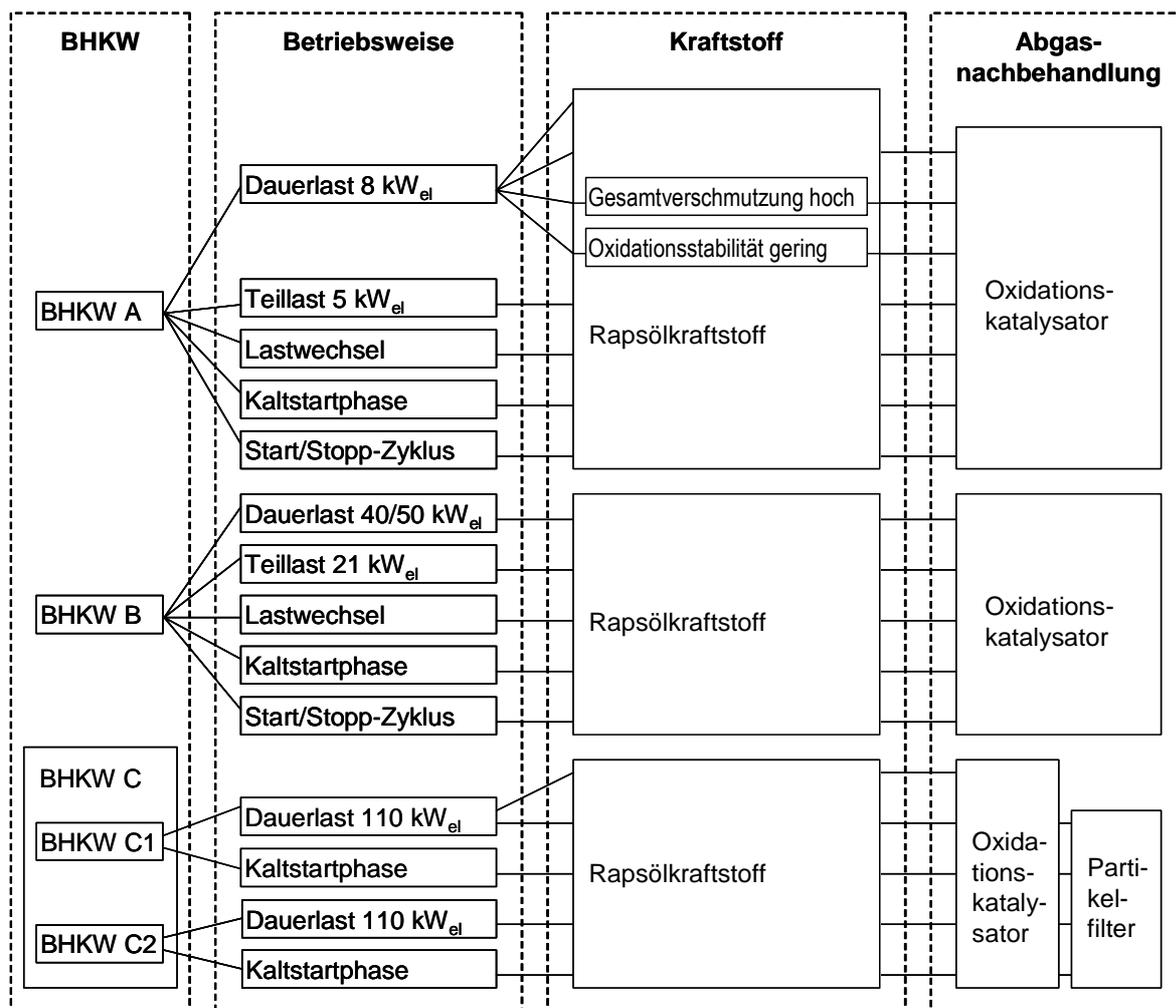


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen an BHKW A, B und C mit der jeweiligen Kombination der Einflussgrößen Betriebsweise, Kraftstoff und Abgasnachbehandlung

Als Kraftstoff wurde der bei dem jeweiligen BHKW am Messtag im Vorratstank befindliche Rapsölkraftstoff verwendet, mit der die Anlage auch sonst betrieben wurde. Die Qualität des Kraftstoffs unterschied sich damit sowohl zwischen den einzelnen BHKW als auch an einem BHKW an den unterschiedlichen Messtagen mehr oder weniger stark voneinander. Bei BHKW A wurden in einem ausgewählten Fall zwei Sonderkraftstoffe geringer Qualität („Gesamtverschmutzung hoch“, „Oxidationsstabilität gering“) eingesetzt, die zu diesem Zweck hergestellt worden waren. Die Eigenschaften der bei den Emissionsmessungen verwendeten Kraftstoffe sind in Kapitel 4.1.3 dokumentiert.

Alle BHKW verfügen über Oxidationskatalysatoren, die bei den vorliegenden Untersuchungen zum Einsatz kamen. Um den Einfluss eines Oxidationskatalysators auf die Emissionen zu ermitteln erfolgte die Abgasprobennahme bei BHKW A in ausgewählten Fällen auch vor und nach dem Oxidationskatalysator. Bei dem modular aufgebauten BHKW C, das an beiden Modulen über je einen Abgaspartikelfilter verfügt, fand eine

Vergleichsmessung zwischen den beiden baugleichen Modulen BHKW C1 und C2 statt. Zusätzlich wurden am BHKW C1 bei einer Variante auch Emissionsmessungen ohne Partikelfilter durchgeführt, um den Einfluss des Abgaspartikelfilters auf die Emissionen zu bestimmen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden verschiedene Partikelfiltersysteme, die für Dieselkraftstoff entwickelt worden waren, hinsichtlich ihrer Effektivität und ihrer Einsatztauglichkeit an BHKW A bei Dauerlast untersucht. Die Partikelfiltersysteme werden mit Buchstaben-codes von „a“ bis „e“ bezeichnet und sind in Kapitel 4.1.4 genauer beschrieben. Neben den Emissionsmessungen mit eingebautem Partikelfiltersystem fanden zeitnah auch vergleichende Messungen an BHKW A ohne Partikelfiltersystem statt. Der Oxidationskatalysator des BHKW A wurde für diese Untersuchungen, mit Ausnahme einer Messreihe mit System „e“ ausgebaut, da die Partikelfiltersysteme entweder selbst durch eine katalytische Beschichtung als Oxidationskatalysator fungierten oder einen speziellen Oxidationskatalysator für die kontinuierliche Regeneration mittels  $\text{NO}_2$  benötigten. Die Versuchsvarianten sind in Abbildung 11 dargestellt.

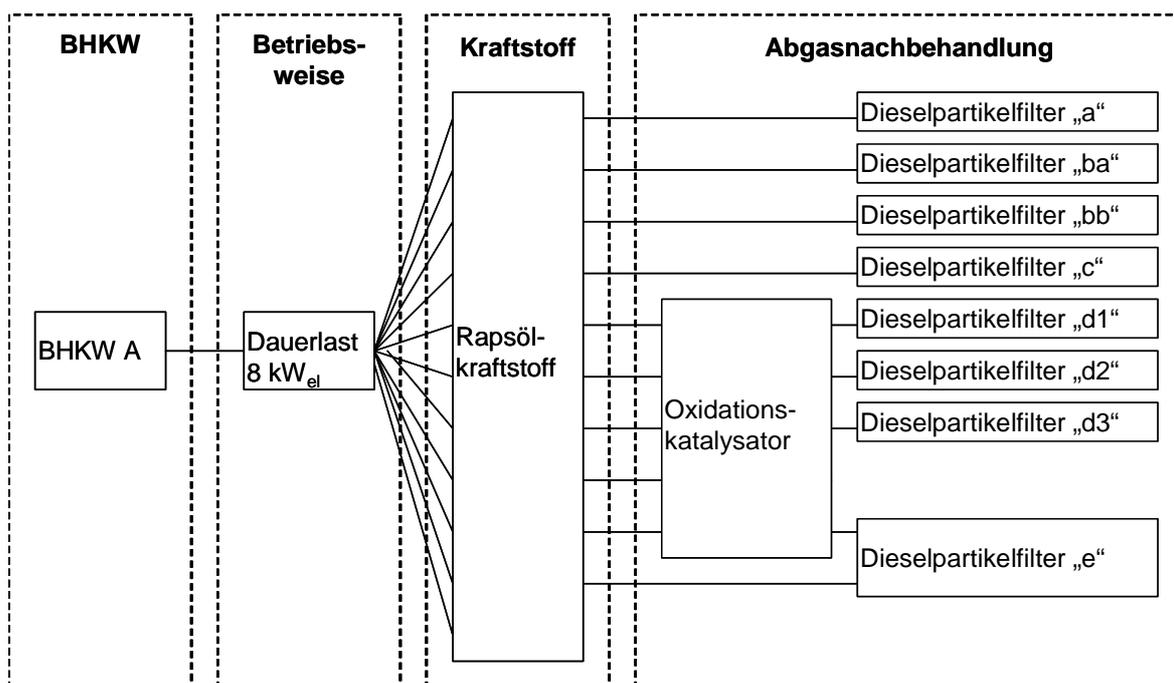


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten für die Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystemen verschiedener Bauarten an BHKW A

Bei allen Messungen zu den in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellten Varianten erfolgte - sofern möglich - eine Fünffachbestimmung der Zielgrößen  $\text{CO}$ -,  $\text{NO}_x$ -, Gesamt-C- und Staub-Konzentration im Abgas durch mindestens je fünf aufeinanderfolgende Einzelmessungen (Halbstundenmittelwerte). Sofern aus betriebstechnischen Gründen nicht fünf Halbstundenmittelwerte bei einer Messung ermittelt werden konnten, wurden in

diesen Fällen auch weniger Wiederholungen durchgeführt. Bei einzelnen Versuchsvarianten, wie z. B. bei Kaltstarts (Startphase), war eine Mehrfachbestimmung nicht möglich, weshalb teilweise auch nur Einfachbestimmungen erfolgten. Aldehyd-Emissionen wurden nur in vier ausgewählten Fällen bestimmt. In Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die Anzahl der Einzelmessungen (Halbstundenmittelwerte) aller ermittelten Emissionskomponenten für die betrachteten Versuchsvarianten zusammengefasst. Die einzelnen Messungen werden fortlaufend nummeriert, um jeder Messung die dabei herrschenden spezifischen Bedingungen einfacher zuordnen zu können. Eine detaillierte Beschreibung der BHKW, der untersuchten BHKW-Betriebsweisen, der Kraftstoffqualitäten und der Abgasnachbehandlungssysteme erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Tabelle 7: Messprogramm zur Ermittlung des Emissionsverhaltens der rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A, B und C bei Dauerlast

Versuchsvarianten					Anzahl <sup>8</sup> Halbstundenmittelwerte für				Messung Nr.
BHKW	BHKW-Betriebsweise <sup>9</sup>	Rapsölkraftstoff	Abgasnachbehandlung		CO	NO <sub>x</sub>	Gesamt-C	Staub	
			Oxidationskatalysator	Partikelfilter					
A	Dauerlast 8 kW <sub>el</sub>	RK1	ja	nein	4	4	4	3	1
		RK2			4	4	4	4	2
		RK3			5	5	5	5	3
		RK5			5	5	5	5	4
		RK5			4	3	4	4	5
		RK6			3	3	3	3	6
B	Dauerlast 40 kW <sub>el</sub>	RK8	ja	nein	4	4	4	4	7
		RK9			5	5	1	5	8
		RK10			5	3	5	5	9
		RK11			5	5	5	5	10
C1	Dauerlast 110 kW <sub>el</sub>	RK12	ja	ja	5	4	5	5	11
		RK13			3	3	3	3	12
C2	Dauerlast 110 kW <sub>el</sub>	RK13	ja	ja	3	2	3	2	13
		RK14			3	3	3	3	14

<sup>8</sup> aus betriebstechnischen Gründen wurden teilweise weniger als 5 Halbstundenmittelwerte ermittelt

<sup>9</sup> eine Erklärung der BHKW-Betriebsweisen erfolgt in Kapitel 4.1.2

Tabelle 8: Messprogramm zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Emissionsverhalten der rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A, B und C

Versuchsvarianten					Anzahl Halbstundenmittelwerte für					Messung Nr.
BHKW	BHKW-Betriebsweise <sup>10</sup>	Rapsölkraftstoff	Abgasnachbehandlung		CO	NO <sub>x</sub>	Gesamt-C	Staub	Aldehyde	
			Oxidationskatalysator	Partikelfilter						
A	Teillast 5 kW <sub>el</sub>	RK1	ja	nein	3	3	3	2	n.e.	15
		RK2			3	3	3	3	n.e.	16
B	Teillast 21 kW <sub>el</sub> Teillast 40 kW <sub>el</sub>	RK8	ja	nein	3	3	3	3	n.e.	17
		RK11			2	2	2	2	n.e.	18
A	Startphase 8 kW <sub>el</sub>	RK1	ja	nein	1	1	1	1	n.e.	19
		RK2			1	1	1	1	n.e.	20
		RK5			1	1	1	1	n.e.	21
B	Startphase 40 kW <sub>el</sub>	RK8	ja	nein	1	1	1	1	n.e.	22
		RK10			1	1	1	1	n.e.	23
C1	Startphase 110 kW <sub>el</sub>	RK12	ja	ja	1	1	1	1	n.e.	24
		RK13			1	1	1	1	n.e.	25
A	3x Start/Stopp 8 kW <sub>el</sub>	RK1	ja	nein	1	1	1	1	n.e.	26
		RK2			1	1	1	1	n.e.	27
B	3x Start/Stopp 40 kW <sub>el</sub>	RK9	ja	nein	1	1	n.e.	1	n.e.	28
A	Dauerlast 8 kW <sub>el</sub>	RK4 h.G. <sup>1)</sup>	ja	nein	2	2	2	2	n.e.	29
		RK7 g.O. <sup>2)</sup>			3	3	3	3	n.e.	30
A	Dauerlast 8 kW <sub>el</sub>	RK5	vor nach vor nach	nein	1	1	1	n.e.	n.e.	31
					1	1	1	n.e.	n.e.	32
					2	1	2	n.e.	n.e.	33
					2	1	2	n.e.	n.e.	34
A	Lastwechsel 2-8 kW <sub>el</sub>	RK2	ja	nein	2	1	2	n.e.	n.e.	35
B	Lastwechsel 20-45 kW <sub>el</sub> Lastwechsel 20-60 kW <sub>el</sub>	RK8	ja	nein	1	1	1	1	n.e.	36
		RK9			1	1	1	n.e.	n.e.	37
C1	Dauerlast 110 kW <sub>el</sub>	RK14	ja	nein	4	4	4	4	n.e.	38
A	Dauerlast 8 kW <sub>el</sub>	RK6	vor nach vor nach	nein	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	3	39
					n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	3	40
					n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	3	41
					n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	3	42

n.e. = nicht ermittelt

<sup>1)</sup>h.G. = Sonderkraftstoff mit hoher Gesamtverschmutzung<sup>2)</sup>g.O. = Sonderkraftstoff mit geringer Oxidationsstabilität<sup>10</sup> eine Erklärung der BHKW-Betriebsweisen erfolgt in Kapitel 4.1.2

Tabelle 9: Messprogramm zur Ermittlung des Emissionsverhaltens des rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Partikelfiltersystemen

Versuchsvarianten					Anzahl Halbstundenmittelwerte für				Messung Nr.
BHKW	BHKW-Betriebsweise <sup>11</sup>	Rapsölkraftstoff	Oxidationskatalysator	Partikelfilter und Filter-Betriebsstunden	CO	NO <sub>x</sub>	Gesamt-C	Staub	
A	Dauerlast 8 kW <sub>el</sub>	RK15	nein	"a" < 5 Bh	4	4	4	4	p1
				nein	4	4	4	4	p2
		RK16	nein	"ba" < 5 Bh	5	4	5	4	p3
				nein	2	1	2	1	p4
		RK17	nein	"ba" = 127 Bh	4	4	4	4	p5
				nein	4	4	4	4	p6
		RK18	nein	"bb" < 5 Bh	3	3	n.e.	3	p7
				nein	3	3	n.e.	3	p8
				"bb" = 210 Bh	4	4	n.e.	4	p9
				nein	2	2	n.e.	2	p10
		RK17	nein	"c" 17 Bh	4	4	n.e.	4	p11
				nein	2	2	n.e.	2	p12
		RK18	ja	"d1" < 5 Bh	4	3	4	3	p13
				nein	3	2	3	3	p14
		RK19	nein	"d2" 94 Bh	3	3	3	2	p15
				nein	3	3	3	3	p16
				"d3" < 5 Bh	4	3	4	3	p17
				nein	3	3	n.e.	2	p18
		RK20	nein	"e" < 5 Bh	2	2	n.e.	2	p19
				"e" = 420 Bh	5	4	5	5	p20
				nein	5	4	5	5	p21
				"e" = 422 Bh	3	3	3	3	p22
				"e" = 441 Bh	3	3	3	3	p23

n.e. = nicht ermittelt

<sup>11</sup> eine Erklärung der BHKW-Betriebsweisen erfolgt in Kapitel 4.1.2

#### 4.1.1 Ausgewählte Blockheizkraftwerke

Die Auswahl der drei pflanzenöлтаuglichen Blockheizkraftwerke für die Untersuchung des Emissionsverhaltens mit Rapsölkraftstoff erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Praxisrelevanz der Anlagenkonzepte und BHKW-Typen,
- Abdeckung des praxisüblichen unteren Leistungsbereichs von Pflanzenöl-BHKW,
- Unterschiedlichkeit der Motorenkonzepte und Abgasreinigungstechnologien.

Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Einsatz und technische Daten der rapsölbetriebenen BHKW A, B und C

	BHKW A	BHKW B	BHKW C
Standort	Weihenstephan	Greußenheim	Weißenburg
Anzahl der Aggregate	1	1	2 (C1 und C2)
elektr. Leistung in kW	8	60	2 x 110
therm. Leistung in kW	15	90	2 x 110
Betriebsbeginn	März 1999	Juni 1997	Mai 1996
Betriebsweise	wärmegeführt	wärmegeführt	stromgeführt
Motortyp	Kubota D1703 BG (Umrüster Fa. VWP/ KW-Energietechnik)	TMW 4 P 13,5 A	DMS MF 6 RTA - LLK 85
Verbrennungsverfahren	Wirbelkammer	Direkteinspritzung	Direkteinspritzung
Kühlung	wassergekühlt	wassergekühlt	ölgkühlt
Hubraum	1,7 l	5,9 l	11,8 l
Zylinder	3	4	6
Wellenleistung	12,8 kW	63,8 kW	120 kW
eingestellte Nenndrehzahl	1500 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>
Einspritzpumpe	Mini-Pumpe (PFR 3M), Fa. Bosch	Reiheneinspritzpumpe, Fa. L'Orange	Reiheneinspritzpumpe, Fa. L'Orange
Einspritzdüsen	Flachsitz- Drosselzapfendüse	Einloch- Zapfendüse	Einloch- Zapfendüse
Generator	Asynchron	Asynchron	Synchron
Hersteller	Emod	Emod	Stamford
Kühlung	wassergekühlt	wassergekühlt	luftgekühlt
Nennleistung	8 kW	60 kW	110 kW
Oxidationskatalysator	ja	ja	ja
Rußfilter	nein	nein	ja
Rußfilterregeneration	--	--	Gasbrenner

#### BHKW A mit 8 kW<sub>el</sub> Nennleistung

Das pflanzenöлтаugliche BHKW A hat eine elektrische Leistung von 8 kW, eine thermische Leistung von 15 kW und wurde von der Firma KW-Energietechnik (ehemals: Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie) auf Basis eines Kubota-Wirbelkammermotors gebaut. Die Wärme dient zur Raumbeheizung, der Strom wird in

das Stromnetz eingespeist. Da das BHKW in der eigenen Versuchseinrichtung betrieben wird, konnten ähnlich wie bei einem Prüfstand, die Untersuchungen auch weitgehend unabhängig vom Betriebsablauf erfolgen. Das BHKW A diente sowohl für die Untersuchungen des praxisüblichen Emissionsverhaltens als auch für die Überprüfung des Einsatzes von Dieselpartikelfiltersystemen (Kapitel 4.1.4). Während der Emissionsmessungen 4 und 5 wurde das BHKW A mit dem Motorschmiersystem Plantotronic® betrieben (Kapitel 2.6.1). Dabei wird Motorenöl in einer Menge, die etwa 2 % des Kraftstoffverbrauchs entspricht, kontinuierlich aus dem Schmierölkreislauf entnommen, gefiltert und dem Kraftstoffvorlauf beigemischt. Die entnommene Schmierölmenge wird durch frisches Schmieröl ständig ersetzt.

### **BHKW B mit 60 kW<sub>el</sub> Nennleistung**

Das Blockheizkraftwerk B dient zur Wärmeversorgung eines Wohngebiets. Der Strom wird vollständig in das Netz eingespeist. Das BHKW, das mit einem Motor der Thüringer Motorenwerke (TMW) ausgestattet ist, weist eine elektrische Nennleistung von 60 kW und eine thermische Leistung von 90 kW auf und wurde von der Fa. Höcker und Partner Energieanlagenbau GmbH, Westenfeld realisiert (Tabelle 10). Das BHKW B wurde zu Beginn der Untersuchungen mit lediglich 40 kW<sub>el</sub> betrieben, da der Wärmebedarf der Verbraucher noch gering war. Wenige Betriebsstunden vor der letzten Emissionsmessung an BHKW B (Messung 10) wurde die Generatorlast auf 50 kW<sub>el</sub> erhöht. Zur Überprüfung der Abgasemissionen im Teillastbetrieb kann die elektrische Leistung des Generators bis auf 20 kW<sub>el</sub> herabgeregelt werden. Das BHKW verfügt über einen Oxidationskatalysator. Zwischen der Messung 7 und 8 ereignete sich bei ca. 5000 Bh ein Motorschaden infolge von Überhitzung, was zum Austausch des Motors führte.

### **BHKW C mit 2 x 110 kW<sub>el</sub> Nennleistung**

Das von der Firma KKW Färber GmbH ausgeführte BHKW C besteht aus zwei baugleichen Modulen BHKW C1 und C2 mit einer elektrischen und thermischen Leistung von jeweils 110 kW der Firma Dieselmotoren- und Gerätebau GmbH Schönebeck (DMS). Das BHKW dient vorrangig zur Spitzenstromabdeckung eines kommunalen Schwimmbades. Bei Bedarf wird die anfallende Wärme für eine Schwimmbeckenheizung genutzt. Beide Module verfügen über je einen Oxidationskatalysator und ein Partikelfiltersystem.

#### **4.1.2 BHKW-Betriebsweisen**

In dieser Arbeit soll das Emissionsverhalten von Blockheizkraftwerken im typischen Praxisbetrieb untersucht werden. Im Folgenden wird die voreingestellte Generatorlast, bei der die BHKW vorwiegend im Dauerbetrieb laufen, als **Dauerlast** bezeichnet. Bei BHKW A und BHKW C stimmt die Dauerlast mit der vom Hersteller angegebenen Nenn-

last von  $8 \text{ kW}_{\text{el}}$  bzw.  $2 \times 110 \text{ kW}_{\text{el}}$  überein. BHKW B hingegen wurde, wie oben erwähnt, anstatt mit der angegebenen elektrischen Nennleistung von  $60 \text{ kW}$  anfangs nur mit  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben. Dies begründet sich dadurch, dass der Wärmebedarf der Verbraucher zu Beginn der Untersuchungen noch sehr gering war. Ein Betrieb bei Nennlast ( $60 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) war nur wenige Minuten beizubehalten, weil dann das Aggregat wegen Überschreiten der maximalen Abgastemperatur auf Störbetrieb schaltete. Gegen Ende des Untersuchungszeitraums wurde die Generatorlast von BHKW B durch den Hersteller aufgrund gestiegener Wärmeabnahme auf  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  erhöht und die kritischen Betriebszustände, (z. B. maximale Abgastemperatur) die einen Störbetrieb auslösen, entsprechend neu definiert.

In der Praxis werden manche BHKW kurz- oder auch langfristig bei Teillast betrieben. Um den Einfluss des **Teillastbetriebs** auf die Abgasemissionen beurteilen zu können, wurden bei BHKW A und B, bei denen eine Leistungsregelung manuell möglich ist, die Abgasemissionen mehrmals auch im Teillastbetrieb erfasst. Die Ermittlung der Abgasemissionen bei Teillast erfolgte in ausgewählten Fällen bei betriebswarmem Motor. Bei BHKW A wurde für den Teillastbetrieb eine Leistung von  $5 \text{ kW}_{\text{el}}$  eingestellt. Dies entspricht  $62,5 \%$  der Nennleistung. Bei BHKW B, das, wie oben beschrieben, anfänglich mit  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben wurde, was in etwa  $66,7 \%$  der Nennleistung entspricht, erfolgten die Teillastversuche mit  $21 \text{ kW}_{\text{el}}$  oder entsprechend  $52,5 \%$  der Dauerlast bzw.  $35 \%$  der Nennlast. Die vierte Emissionsmessung an BHKW B fand nach Anhebung der Generatorleistung auf  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  bzw. bei  $83,3 \%$  der Nennleistung statt. Dabei wurde zum Vergleich mit den ersten drei Emissionsmessungen auch ein Teillastbetrieb bei  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  durchgeführt.

Bei BHKW A und B wurden darüber hinaus die gasförmigen Emissionskomponenten auch bei **Lastwechselzyklen** ermittelt (Kapitel 5.1.3). Bei den Lastwechselzyklen wurde die Generatorlast von BHKW A beginnend bei  $8 \text{ kW}_{\text{el}}$  stufenweise auf  $6, 5, 4$  und  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  abgesenkt. Bei BHKW B wurden zwei unterschiedliche Lastwechselzyklen bestimmt. Hierbei erfolgte einmal die stufenweise Absenkung der Generatorlast von  $45 \text{ kW}_{\text{el}}$  über  $40, 35, 30$  und  $25$  auf  $20 \text{ kW}_{\text{el}}$  und einmal beginnend bei  $60 \text{ kW}_{\text{el}}$  über  $41, 38, 29, 25$  auf  $21 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Die Verweilzeit je Lastpunkt betrug bei beiden BHKW jeweils  $2 \text{ min}$ , die Auswertung erfolgte lastpunktspezifisch unter Angabe der Zweiminutenmittelwerte.

Neben Dauerlast-, Teillast- und Lastwechselversuchen, wurden auch Emissionsmessungen während der ersten halben Stunde beim und nach dem Startvorgang bei kaltem Motor (**Kaltstartphase**) sowie bei dreimaligem An- und Abstellen des Motors innerhalb von  $30 \text{ Minuten}$  bei betriebswarmem Motor (**Start/Stopp-Zyklus**) durchgeführt. Diese Untersuchungen sollen Hinweise geben, inwieweit sich das Emissionsverhalten bei kürzeren Betriebsintervallen gegenüber einem durchgehenden BHKW-Betrieb unterscheidet. Bei diesen Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass bei jedem Einschaltvorgang die BHKW automatisch zuerst im Leerlauf und anschließend mit reduzierter Generatorlast ca.  $3 \text{ Minuten}$  „warmgefahren“ werden, bevor sie auf Dauerlast „hochgefahren“ werden. Beim Ausschalten erfolgt in umgekehrter Reihenfolge die motorschonende stufenweise Absenkung der Generatorlast.

### 4.1.3 Verwendete Rapsölkraftstoffe

#### **Rapsölkraftstoffe für die Untersuchungen zum Emissionsverhalten von drei Rapsöl-BHKW**

Die drei Blockheizkraftwerke werden mit Rapsölkraftstoff, hergestellt durch Kaltpressung, von verschiedenen dezentralen Ölmühlen betrieben. Die Kraftstoffproben wurden am Tag der Emissionsmessung nach dem Kraftstofffilter entnommen und in einem für Pflanzenölkraftstoffe akkreditierten Analyselabor hinsichtlich der wichtigsten Kenngrößen untersucht. Beurteilt wurde die Qualität des Rapsölkraftstoffs durch den Vergleich mit den Anforderungen gemäß dem (zur Zeit der Untersuchungen gültigen) Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff 05/2000 - RK-Qualitätsstandard (Kapitel 2.1) sowie der aktuellen Vornorm DIN V 51605 für Rapsölkraftstoff.

Die Ergebnisse der Kraftstoffanalysen sind in Tabelle 11 für die wiederkehrenden Emissionsmessungen zusammengefasst. Die Kraftstoffproben wurden mit „RK“ für Rapsölkraftstoff bezeichnet und fortlaufend nummeriert („RK1“, „RK2“, „RK3“ und so weiter). Da die Untersuchungen an Praxisanlagen stattfanden und praxisübliche Bedingungen herrschen sollten, wurden keine einheitlichen Versuchskraftstoffe eingesetzt. Die Eigenschaften der Kraftstoffe unterschieden sich daher mehr oder weniger stark zwischen den einzelnen Messungen.

Für die Ermittlung des Einflusses bestimmter Kraftstoffeigenschaften auf die Abgasemissionen wurden speziell dafür hergestellte Sonderkraftstoffe bei BHKW A verwendet. In einem Fall war dies Rapsölkraftstoff mit einer hohen Gesamtverschmutzung, der mit Partikeln, die während der Ölreinigung entfernt worden waren, nachträglich wieder angereichert wurde („RK4“). In einem weiteren Fall wurde ein bei 40 °C über 7 Tage vorgealterter Rapsölkraftstoff mit einer niedrigen Oxidationsstabilität eingesetzt („RK7“).

Die untersuchten Kraftstoffproben erfüllen überwiegend die im „RK-Qualitätsstandard 05/2000“ geforderten Grenzwerte der für Rapsöl charakteristischen Eigenschaften, wie Dichte, Flammpunkt, Heizwert, kinematische Viskosität, Koksrückstand, Iodzahl und Schwefelgehalt. Dichte und kinematische Viskosität weisen von allen Kenngrößen die geringsten Schwankungen auf. Bei der Kenngröße Flammpunkt halten zwei Proben von BHKW B („RK9“ und „RK10“) mit Flammpunkten von 187 und 216 °C den geforderten Grenzwert von mindestens 220 °C nicht ein. Recherchen ergaben, dass bei diesem BHKW zu einem früheren Zeitpunkt eine geringe Menge an Heizöl nachgetankt wurde, als kein Rapsölkraftstoff vorrätig war. Es ist bekannt, dass eine Beimischung von nur ca. 0,5 % Dieselkraftstoff (bzw. Heizöl) zu Rapsöl bereits zu einer Reduzierung des Flammpunkts auf deutlich unter 200 °C führt [88].

Tabelle 11: Kraftstoffkennwerte bei den Emissionsmessungen an BHKW A, BHKW B und BHKW C (Werte, die die Grenzwerte nach RK-Qualitätsstandard 05/2000 nicht einhalten, sind fett gedruckt)

Proben-code	Kraftstoffkenngrößen und Prüfverfahren													Anmerkung	Verwendet bei Messung Nr.:
	Dichte (15 °C) in kg/m <sup>3</sup> DIN EN ISO 3675	Flammpunkt in °C DIN EN ISO 2719	Heizwert in kJ/g DIN 51900-3	Kin. Viskosität (40 °C) in mm <sup>2</sup> /s DIN EN ISO 3104	Koksrückstand in Masse-% DIN EN ISO 10370	Iodzahl in g/100 g DIN EN 14111	Schwefelgehalt in mg/kg DIN EN ISO 20884	Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662	Säurezahl in mg KOH/g DIN EN 14104	Oxidationsstabilität (110 °C) in h DIN EN 14112	Phosphorgehalt in mg/kg DIN EN 14107	Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245	Wassergehalt in Masse-% DIN EN ISO 12937		
RK-Qualität 05/2000	900-930	min. 220	min. 36	max. 36	max. 0,40	100-125	max. 20	max. 24	max. 2,0	min. 5,0	max. 15	max. 0,01	max. 0,075	--	--
DIN V 51605	900-930	min. 220	min. 36	max. 36	max. 0,40	95-125	max. 10	max. 24	max. 2,0	min. 6,0	max. 12	max. 0,01	max. 0,075	--	--
<b>BHKW A</b>															
RK1	920	226	38,1	35	0,27	114	4	<b>45</b>	0,7	6,9	2	0,004	0,059	--	1, 15, 19, 26
RK2	920	245	39,7	34	0,22	110	2	<b>36</b>	0,7	8,2	13	0,001	0,047	--	2, 16, 20, 27, 35
RK3	920	225	37,3	35	0,23	n.e.	7	<b>52</b>	0,6	8,6	2	0,003	0,058	--	3
RK4	920	231	37,6	34	<b>0,44</b>	106	6	<b>827</b>	0,9	5,7	1	<b>0,021</b>	0,067	h. G. <sup>1)</sup>	29
RK5	920	225	37,1	35	0,36	110	<b>60</b>	<b>84</b>	1,1	5,9	<b>27</b>	0,009	0,067	Plant. <sup>2)</sup>	4, 5, 21, 31-34
RK6	n.e.	n.e.	37,3	n.e.	0,30	106	8	<b>29</b>	1,2	7,0	<b>42</b>	0,009	0,049	--	6, 39-42
RK7	n.e.	n.e.	37,1	n.e.	0,33	110	3	<b>36</b>	1,2	<b>3,4</b>	10	0,002	0,055	g. O. <sup>3)</sup>	30
<b>BHKW B</b>															
RK8	920	228	38,2	35	0,29	114	3	<b>40</b>	<b>2,2</b>	<b>0,6</b>	2	0,003	0,064	--	7, 17, 22, 36
RK9	n.e.	<b>187</b>	n.e.	n.e.	n.e.	109	5	23	<b>3,0</b>	<b>0,5</b>	<b>30</b>	n.e.	n.e.	Höb. <sup>4)</sup>	8, 28, 37
RK10	919	<b>216</b>	37,4	36	0,32	107	6	1	<b>3,1</b>	<b>0,6</b>	1	0,008	0,069	--	9, 23
RK11	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,29	112	4	4	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	10	0,006	0,051	--	10, 18
<b>BHKW C</b>															
RK12	920	224	39,0	34	0,40	111	54	88	1,2	5,5	24	0,007	0,051	Plant. <sup>2)</sup>	11, 24
RK13	920	220	39,4	35	0,31	118	4	61	0,9	5,5	< 1	0,017	0,049	--	12, 13, 25
RK14	920	223	39,4	35	0,32	114	3	22	1,0	6,2	< 1	0,021	0,059	--	14, 38

n.e. = nicht ermittelt

<sup>1)</sup> h. G. = Sonderkraftstoff mit einer hohen Gesamtverschmutzung

<sup>2)</sup> Plant. = Rapsöl beinhaltet 2 % gebrauchtes Motorenöl, System Plantotronic® (Kapitel 2.6.1)

<sup>3)</sup> g. O. = Sonderkraftstoff mit einer geringen Oxidationsstabilität

<sup>4)</sup> Höb. = Heizölbeimischung zum Rapsölkraftstoff aufgrund von Mangel an Rapsölkraftstoff

Der Koksrückstand entspricht bei nahezu allen untersuchten Kraftstoffproben den Anforderungen des RK-Qualitätsstandards. Lediglich der Rapsölkraftstoff mit der Bezeichnung „RK4“, der für spezielle Emissionsmessungen gezielt mit Partikeln angereichert wurde (hohe Gesamtverschmutzung) überschreitet den Grenzwert von 0,4 Masse-%. Der Schwefelgehalt liegt bei den Proben von unvermischem Rapsöl mit 2 bis 8 mg/kg erwartungsgemäß unter dem geforderten maximalen Grenzwert von 20 mg/kg. Lediglich die Kraftstoffproben „RK5“ und „RK12“, denen etwa 2 % gebrauchtes Motorenöl durch die kontinuierliche Ölauffrischung mit dem Plantotronic<sup>®</sup>-Schmiersystem zudosiert wurde, weisen Schwefelgehalte von 54 und 60 mg/kg auf. Dies ist auf schwefelhaltige Additivkomponenten des Motoröls zurückzuführen.

Unter allen Kenngrößen weicht der Gehalt an Feststoffen im Öl am häufigsten und am stärksten von dem geforderten Maximalwert gemäß RK-Qualitätsstandard ab. Der obere Grenzwert von 24 mg/kg Gesamtverschmutzung wird nur von wenigen Rapsölproben („RK9“, „RK10“, „RK11“ und „RK14“) eingehalten.

Der im RK-Qualitätsstandard für die Neutralisationszahl (Säurezahl) festgeschriebene Grenzwert von maximal 2,0 mg KOH/g liegt deutlich über den Werten der Kraftstoffproben von BHKW A und C. Dagegen überschreiten die Kraftstoffproben von BHKW B („RK8“ bis „RK11“) mit Neutralisationszahlen von bis zu 3,1 mg KOH/g den geforderten Grenzwert deutlich. Dies ist auf die mit 30 bis 35 °C sehr hohe thermische Belastung des Rapsöls im beheizten Tagestank des BHKW zurückzuführen, die eine Abspaltung freier Festtsäuren begünstigt. Darüber hinaus besteht das Kraftstoffsystem von BHKW B zum Großteil aus Kupferleitungen, welche, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ebenfalls entscheidend zum Anstieg der Säurezahl beitragen können [100].

Für einen sicheren motorischen Betrieb wird gemäß RK-Qualitätsstandard 05/2000 ein Kraftstoff mit einer Oxidationsstabilität von mindestens 5,0 h gefordert. Frisches Rapsöl verfügt über eine Oxidationsstabilität von meist mehr als 8,0 h. Allerdings beeinträchtigen Lagerungsdauer und Lagerungsbedingungen die Oxidationsstabilität mitunter erheblich. Deutlich wird dies bei den Kraftstoffproben von BHKW B („RK8“ bis „RK11“), weil hier der Kraftstoff, wie oben beschrieben, in einem Vorratstank auf Temperaturen von ca. 30 bis 35 °C aufgeheizt wird. Diese Rapsölproben sind durch eine äußerst niedrige Oxidationsstabilität von weniger als einer Stunde gekennzeichnet.

Beim Phosphorgehalt sind vier Grenzwertüberschreitungen gemäß RK-Qualitätsstandard zu beobachten. Darunter sind auch die beiden Kraftstoffproben, in denen ein Anteil von 2 % Motorenöl enthalten ist (Plantotronic<sup>®</sup>-Schmiersystem), was auf die Motorenöladitivierung zurückgeführt werden kann.

Der maximal zulässige Aschegehalt im Öl von 0,01 Masse-% wird von insgesamt drei Proben („RK4“, „RK13“ und „RK14“) überschritten. Ein hoher Aschegehalt im Pflanzenöl deutet in erster Linie auf mineralische Verunreinigungen hin, die bei Transport oder

Lagerung eingetragen werden können. Aber auch der Sonderkraftstoff mit sehr hoher Gesamtverschmutzung überschreitet den geforderten Grenzwert („RK4“).

Der Wassergehalt schwankt bei den vorliegenden Rapsölkraftstoffproben zwischen 0,047 und 0,069 Masse-%. Alle Proben erfüllen somit den Grenzwert nach RK-Qualitätsstandard von maximal 0,075 Masse-%.

### Rapsölkraftstoffe für die Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Rapsöl-BHKW A mit verschiedenen Partikelfiltersystemen

Bei den Emissionsmessungen mit den Partikelfiltersystemen an BHKW A wurde ebenfalls Rapsölkraftstoff aus sogenannter Kaltpressung eingesetzt. In Tabelle 12 sind die analysierten Proben der verschiedenen Rapsölchargen zusammengefasst. Die verwendeten Rapsölkraftstoffe erfüllen weitgehend die Anforderungen des RK-Qualitätsstandards 05/2000. Allerdings liegt bei zwei von 6 Proben („RK15“ und „RK16“) der Kennwert Gesamtverschmutzung über dem geforderten Maximalwert von 24 mg/kg. Die Grenzwerte für die Neutralisationszahl und für die Oxidationsstabilität werden in je zwei Fällen („RK15“ und „RK18“ bzw. „RK16“ und „RK18“) nicht eingehalten.

Tabelle 12: Kraftstoffkennwerte bei den Emissionsmessungen mit verschiedenen Partikelfiltersystemen von BHKW A (Werte, die die Grenzwerte nach RK-Qualitätsstandard 05/2000 nicht einhalten, sind fett gedruckt)

Proben-code	Schwefelgehalt in mg/kg DIN EN ISO 20884	Gesamtverschmutzung in mg/kg DIN EN 12662	Neutralisationszahl in mg KOH/g DIN EN 14104	Oxidationsstabilität (110 °C) in h DIN EN 14112	Phosphorgehalt in mg/kg DIN EN 14107	Aschegehalt in Masse-% DIN EN ISO 6245	Wassergehalt in Masse-% DIN EN ISO 12937	Calciumgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Magnesiumgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Siliciumgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Zinkgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Kaliumgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Natriumgehalt in mg/kg ICP analog DIN EN 14538	Verwendet bei Messung Nr.:
RK-Qualität 05/2000	max. 20	max. 24	max. 2,0	min. 5,0	max. 15	max. 0,01	max. 0,075	--	--	--	--	--	--	
DIN V 51605	max. 12	max. 24	max. 2,0	min. 6,0	max. 12	max. 0,01	max. 0,075	Σ max. 20	--	--	--	--	--	
RK15	1	<b>35</b>	<b>3,83</b>	5,6	8	0,002	0,041	14	1	1	< 1	< 1	1	p1, p2
RK16	4	<b>39</b>	1,33	<b>3,2</b>	5	0,004	0,053	9	1	1	< 1	< 1	< 1	p3, p4
RK17	6	21	0,81	7,9	5	0,005	0,068	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	p5-p8
RK18	4	15	<b>2,62</b>	<b>3,0</b>	7	0,009	0,057	13	1	< 1	< 1	1	< 1	p9-10, p13-14
RK19	< 0,5	13	1,25	6,0	4	0,008	0,041	9	0,5	< 1	< 1	1,4	< 1	p15-p19
RK20	3	16	1,03	8,2	5	0,005	0,062	12	1,2	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	p20-p23

n.e. = nicht ermittelt

Die für die Aschebildung und somit für das Betriebsverhalten von Partikelfiltern relevanten Kennwerte Aschegehalt, Phosphorgehalt, Calciumgehalt und Schwefelgehalt sind hingegen nicht zu beanstanden. So liegt bei allen Proben der Aschegehalt zwischen 0,002 und 0,009 Masse-%, der Phosphorgehalt zwischen 4 und 8 mg/kg, der Calciumgehalt zwischen 5 und 14 mg/kg und der Schwefelgehalt bei maximal 6 mg/kg. Auch die Gehalte an Magnesium, Silicium, Zink, Kalium und Natrium liegen meist unterhalb der Nachweisgrenze des Prüfverfahrens in Höhe von < 1 mg/kg.

#### **4.1.4 Ausgewählte Dieselpartikelfiltersysteme**

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden unterschiedliche Partikelfiltersysteme von fünf verschiedenen Herstellern beim praxisrelevanten Einsatz in rapsölkraftstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken hinsichtlich ihres Abscheideverhaltens überprüft. Die Partikelfiltersysteme wurden primär für den Einsatz von Dieseldieselkraftstoff konzipiert. Eine Anpassung speziell für den Einsatz von Rapsölkraftstoff erfolgte nicht, weil hierzu keine Erfahrungen hinsichtlich der notwendigen Anforderungen vorlagen. Bei der Auswahl der Partikelfiltersysteme wurden jedoch im Vorfeld die speziellen Einsatzbedingungen bei BHKW A, wie Abgastemperatur, Abgasvolumenstrom, Staub-Emissionen sowie die typischen Kraftstoffkennwerte von Rapsöl, berücksichtigt.

Die ausgewählten Dieselpartikelfiltersysteme wurden mit Buchstabencodes in alphabetischer Reihenfolge von „a“ bis „e“ bezeichnet. Von Filter „b“ wurden zwei unterschiedliche Bauweisen („ba“ und „bb“) untersucht, bei Filter „d“ standen drei identische Exemplare zur Verfügung, die entsprechend mit „d1“, „d2“ und „d3“ bezeichnet wurden. Alle Partikelfiltersysteme unterscheiden sich zum Teil grundlegend in der Art des partikelabscheidenden Filters sowie der Zusatzeinrichtungen für die Regeneration.

##### **4.1.4.1 Partikelfilter „a“ – Keramik-Monolith beschichtet**

Das Katalysator-Partikelfiltersystem „a“ besteht aus einem keramischen Monolith, der mit einer Kombination aus hochaktivem „Washcoat“ und einer speziellen Edelmetall-Formulierung versehen ist. Der keramische Filterblock ist in einem Edelstahl-Gehäuse (150 mm Durchmesser, 220 mm Länge) in einer elastischen Lagerung fixiert (Abbildung 12). Das Abgasreinigungssystem vermindert laut Herstellerangaben sowohl gasförmige Schadstoffe, wie Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) als auch Partikel. Die Partikel werden dabei zunächst gefiltert und zusammen mit den gasförmigen Stoffen in oxidierender Atmosphäre zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) katalytisch umgewandelt. Die Filtration erfolgt durch die erzwungene Durchströmung der porösen Kanalwände („Wall Flow“) des monolithischen Blocks, da die quadratischen Kanäle wechselseitig verschlossen sind (Abbildung 12). Durch die feine Kanalstruktur und die dünnen Zwischenwände (0,4 mm) ergibt sich eine große Filteroberfläche und damit eine

hohe Speicherkapazität für Rußpartikel. Das Katalysator-Partikelfiltersystem „a“ ist speziell für den Einsatz bei Abgastemperaturen unterhalb von 300 °C entwickelt worden. Gemäß Herstellerangaben entfaltet der Katalysator-Rußfilter die optimale Wirkung beim Motorbetrieb mit schwefelarmem Kraftstoff (Schwefel-Gehalt max. 50 mg/kg). Er ist aber auch bei der Verwendung von Kraftstoff mit höherem Schwefelgehalt bis 350 mg/kg einsetzbar. Aufgrund der hohen Aktivität ist jedoch bei Temperaturen oberhalb von 350 °C in Verbindung mit hohen Schwefelanteilen mit Bildung von Sulfaten im Abgas zu rechnen. Die katalytische Beschichtung des Filters soll die Zündtemperatur des Dieselrußes deutlich reduzieren, dadurch eine kontinuierliche passive Regeneration des Filters gewährleisten und Temperaturspitzen vermeiden. Der Katalysator-Rußfilter „a“ muss gemäß Herstellerangaben jährlich bzw. alle 1000 Betriebsstunden (Kriterium, welches zuerst eintritt) gereinigt werden. Dazu wird der ausgebaute Filter 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. Der Druckstrahl darf höchstens bis zu einem Abstand von 100 mm an die Filteroberfläche herangeführt werden.

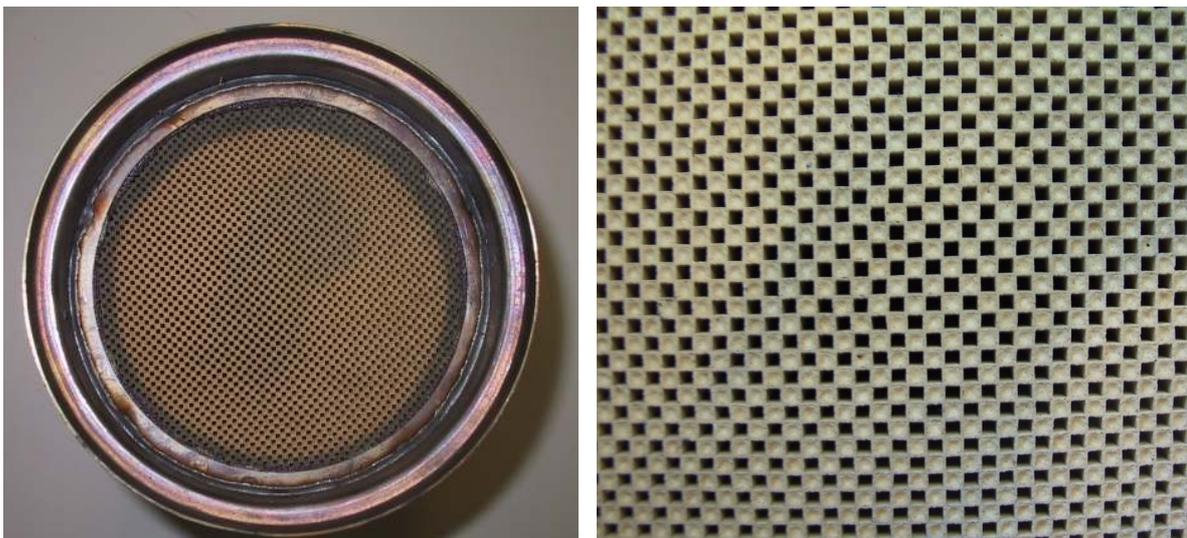


Abbildung 12: Bild links: Draufsicht auf Katalysator-Partikelfilter-System „a“ - keramischer Filterblock mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 220 mm Länge); Bild rechts: Detailaufnahme der wechselseitig verschlossenen Kanäle

#### 4.1.4.2 Partikelfilter „b“ – Draht-/Keramikfilamentgestrick beschichtet

Das Partikelfiltersystem „b“ ist ein kombiniertes Rußfilterelement aus Draht- und Keramikfilamentgestrickbahnen, die in Sandwichbauweise gewickelt werden. 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 laut Herstellerangabe eine Regeneration ab etwa 430 °C. Die Regeneration erfolgt je nach Abgastemperatur 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 Abscheidegraden, die vom Hersteller mit über 90 % angegeben werden. Nanopartikel < 30 nm sollen um bis zu 99 % abgeschieden werden. Die Reinigung von Inertstoffen erfolgt beim Hersteller 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 Partikelfilter (150 mm Durchmesser, 200 mm Länge) „ba“ und „bb“ mit unterschiedlichen Wicklungen. Partikelfilter „bb“ ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Bild links: Filtersystem „bb“ - gewickeltes Draht-/Keramikfilamentgestrick in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 200 mm Länge); Bild rechts: Draufsicht auf Filtersystem „bb“

#### 4.1.4.3 Partikelfilter „c“ – Keramik-Monolith unbeschichtet

Das Partikelfiltersystem „c“ besteht aus einem keramischen Monolithen ohne katalytische Beschichtung. Eine Regeneration erfolgt deshalb erst bei Temperaturen oberhalb der Ruß-Selbstzündungstemperatur von ca. 600 °C. Der Monolith wurde in ein extra angefertigtes Gehäuse mit einem Durchmesser von 142 mm und einer Länge von 200 mm integriert, welches für den motornahen Einbau an einem bestimmten BHKW-Typ entwickelt wurde (Abbildung 14). Das Abgas gelangt zentral in das Partikelfiltergehäuse, wird dann nach Außen geleitet und in einem Spalt zwischen Keramikkörper und Gehäusewand an das untere, nach Außen hin verschlossene Ende geführt. Dort wird der Abgasstrom in die entgegengesetzte Richtung gelenkt, gelangt in die wechselseitig verschlossenen Kanäle, wo die Filtration des Abgases beim Durchströmen der Kanalwände erfolgt. Das gereinigte Abgas tritt am oberen Ende an vier Öffnungen, die kreisförmig um die Eintrittsöffnung angeordnet sind, aus dem Rußfiltergehäuse aus und gelangt in den Abgasstrang. Die manuelle Reinigung sollte alle ca. 1000 bis 2000 Bh stattfinden und erfolgt bei einer Spezialfirma ohne nähere Angaben zum Reinigungsverfahren.



Abbildung 14: Draufsicht (links) und Schnittzeichnung (rechts) von Partikelfiltersystem „c“ - keramischer Monolith in speziellem Gehäuse (142 mm Durchmesser, 200 mm Länge)

#### 4.1.4.4 Partikelfilter „d“ – Faserverbundfilter mit NO<sub>2</sub>-Regeneration

Das Partikelfiltersystem „d“ basiert auf einem keramischen Faserverbundwerkstoff und arbeitet nach dem System der Tiefenfiltration. Die Vorteile liegen gemäß Herstellerangaben in der großen offenen Porosität des Faserwerkstoffs, die eine hohe Aufnahmekapazität bei niedrigen Druckdifferenzen gewährleisten soll, in der niedrigen Dichte des Werkstoffs und der hohen Effektivität auch bei der Abscheidung von Kleinstpartikeln. Durch die Art der Filterherstellung können wesentliche Eigenschaften des Filters, wie Druckverlust, Abscheideleistung und Aufnahmekapazität, 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 wird spiralförmig aufgerollt und auf der gegenüberliegenden Seite mit dem aufgerollten Teil dicht verbunden. Der fertig gerollte zylindrische Filterkörper besitzt wie der keramische Monolith des Filtersystems „a“ wechselseitig verschlossenen Kanäle (Abbildung 15). Das Abgas strömt dabei auf einer Seite in die Kanäle ein, gelangt durch die Kanalwände in die benachbarten Kanäle und von dort auf der gegenüberliegenden Seite wieder aus dem Filter. Für die Regeneration ist sowohl eine katalytische Beschichtung des Filters als auch die Integration von Heizelementen in den Filterkörper bei der Wicklung möglich. Darüber hinaus eignet sich auch eine kontinuierliche Regeneration durch NO<sub>2</sub>, welches in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator gebildet wird. Die manuelle Entfernung unverbrannter Rückstände erfolgt durch den Hersteller. Für die Untersuchungen dienten drei baugleiche Filterkörper mit einem Durchmesser von ca. 150 mm und einer Länge von ca. 200 mm, die als „d1“, „d2“ und „d3“ bezeichnet werden. Auf Grundlage einer Analyse der NO und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas des BHKW A wurde sich für das System der kontinuierlichen Regeneration mittels NO<sub>2</sub> entschieden.

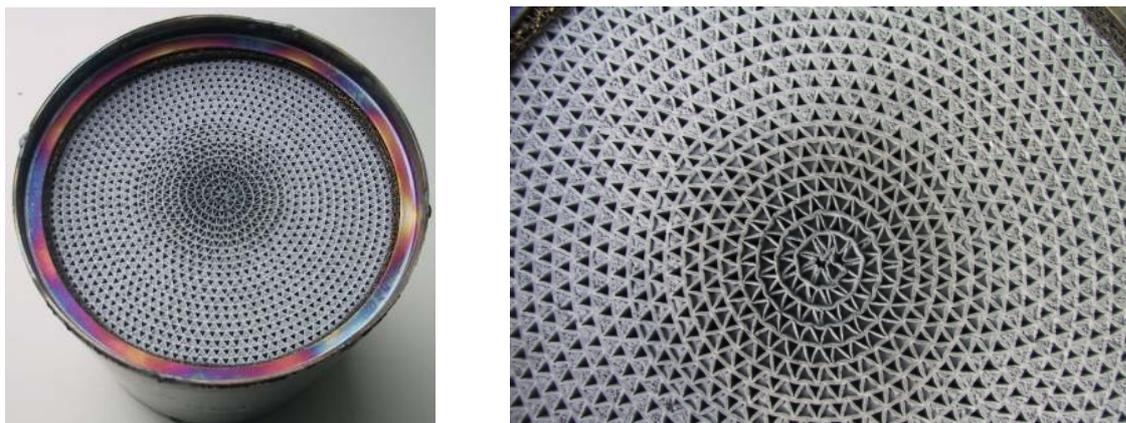


Abbildung 15: Bild links: Draufsicht auf Dieselpartikelfiltersystem „d“ - gewickelte Keramikfaserverbundbahn mit wechselseitig verschlossenen Kanälen in Edelstahlgehäuse (150 mm Durchmesser, 200 mm Länge), Bild rechts: Detailaufnahme der wechselseitig verschlossenen Kanäle

#### 4.1.4.5 Partikelfilter „e“ – Faserflechtfilter beschichtet

Das Dieselpartikelfiltersystem „e“ (Abbildung 16) ist ein hochtemperaturbeständiger 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. Unbrennbare Partikelbestandteile lagern sich im Gewebe ab, teilweise gelangen diese aber 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“ verfügt in der hier verwendeten Ausführung über sechs kreisförmig angeordnete Filterkerzen mit einem Durchmesser von je ca. 45 mm und einer Länge von ca. 660 mm. Die Reinigung der Filterkerzen von unverbrennbaren Rückständen erfolgt bei ausgebautem Filter durch Absaugen, Druckluft oder durch Waschen. Das Dieselpartikelfiltersystem „e“ wurde bei den Untersuchungen sowohl mit als auch ohne vorgeschaltetem Oxidationskatalysator eingesetzt.



Abbildung 16: Abgaspartikelfiltersystem „e“ mit katalytisch beschichteten Glasfasergeflechtfilterkerzen Bild links: Filterkerzen, teilweise im Gehäuse; Bild rechts: Filterkerzen ohne umgebendes Gehäuse

#### 4.1.4.6 Einbau der Dieselpartikelfiltersysteme in das BHKW A

Einbau, Betrieb und Wartung der Partikelfiltersysteme erfolgten in Abstimmung mit dem jeweiligen Hersteller. Da die Filtersysteme unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Regenerationstemperatur aber auch der Baugröße (Partikelfiltersystem „e“) aufweisen, war ein mehrmaliger Umbau des BHKW A notwendig. Der Einbau der zylinderförmigen Partikelfilter mit den Kurzbezeichnungen „a“, „ba“, „bb“, „c“, „d1“, „d2“ und „d3“ erfolgte unmittelbar vor dem Abgaswärmetauscher. Dazu wurde das senkrecht stehende zylindrische Gehäuse gegen ein Gehäuse mit größerem Querschnitt ausgetauscht. Der Abgaswärmetauscher konnte dadurch verkürzt werden, so dass auch die Partikelfilter Platz darin fanden. Die Filterkörper wurden zur Gehäusewand hin mit einer hochtemperaturbeständigen Dichtschnur schwingungs isoliert abgedichtet und in Längsrichtung fixiert.

Für die Partikelfilter „d2“ und „d3“ wurde eine elektrische Heizeinrichtung zur Anhebung der für die Regeneration notwendigen Abgastemperatur konstruiert und vor dem Filter eingebaut (Abbildung 17). Dies war ausschließlich für die Durchführung der Untersuchungen vorgesehen, für einen Dauereinsatz scheiden Abgasheizungen bei diesem BHKW unter den gegebenen Bedingungen aufgrund des hohen Strombedarfs aus.

Zur kontinuierlichen Regeneration der Filter „d1“, „d2“ und „d3“ mittels  $\text{NO}_2$  wurde ein spezieller Oxidationskatalysator in das BHKW nach dem Abgaskrümmen eingebaut. Darüber hinaus wurden weitere konstruktive Umgestaltungen an der Abgasstrecke vorgenommen sowie ein zusätzlicher Wärmeabnehmer integriert. Vor dem Einsatz des Partikelfiltersystems „e“ erfolgte aufgrund dessen Baugröße ein weiterer Umbau der Abgasstrecke (Abbildung 18) sowie die Anbringung einer leistungsfähigeren Abgasheizung. Die Daten der verwendeten Abgasheizungen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Alle diese Maßnahmen wirkten sich in unterschiedlichem Maße auf das Abgasemissionsverhalten des BHKW aus, was bei der Betrachtung der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. Sofern möglich erfolgten die Untersuchungen mit den Partikelfiltern bei kontinuierlichem BHKW-Betrieb. Zeitweise musste jedoch auch das BHKW abgeschaltet werden, wenn z. B. aufgrund eines schnell ansteigenden Abgasgedrucks die Betriebssicherheit des BHKW gefährdet war. Die verschiedenen Betriebsprofile bei den Testläufen beeinflussten zusätzlich die Ergebnisse. Zur Bestimmung des Emissionsverhaltens wurden die Abgasemissionen des mit Rapsöl betriebenen BHKW einmal mit eingebautem Partikelfilter und als Referenz auch ohne Partikelfilter bestimmt. Die beiden korrespondierenden Messungen fanden in der Regel an einem Tag, in Ausnahmefällen auch an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt. Eine gleichzeitige Messung der Emissionen vor und nach dem Partikelfilter zur Beurteilung der Filterabscheideleistung wurde nicht durchgeführt. Diese Vorgehensweise hätte nur bedingt Aussagen über die Veränderung des Emissionsverhaltens durch den Einsatz von Abgaspartikelfiltern (entsprechend der Zielstellung) ermöglicht, denn durch das Vorhandensein eines Partikelfiltersystems im Abgassystem werden die Abgasemissionen aufgrund des Strömungswiderstandes mitunter stark beeinflusst.



Abbildung 17: Abgasheizung für die Untersuchung mit Dieselpartikelfilter „d2“ und „d3“



Abbildung 18: Veränderte Abgasführung für Partikelfiltersystem „e“

Tabelle 13: Technische Daten der verwendeten Abgasheizungen

<b>Abgasheizung 1</b>	Einsatz bei den Partikelfiltern „d2“ und „d3“
Hersteller	Eigenbau mit Heizelementen der Firma Horst GmbH
Aufbau	Kaskadenförmig, mit vom Abgas angeströmten beheizten Stahlplatten mit 2 Stahlhülsen, in denen die Heizelemente sitzen
Abmessungen	Durchmesser = 200 mm, Höhe = 150 mm
Heizelemente	2 Elektroheizpatronen mit je 12,5 x 130 mm und je 1000 Watt
Nenntemperatur	750 °C
<b>Abgasheizung 2</b>	Einsatz bei Partikelfilter „e“
Hersteller	Firma Siekerkotte
Aufbau	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

## 4.2 Durchführung der Emissionsmessungen

### 4.2.1 Messaufbau

#### 4.2.1.1 Erfassung der Randbedingungen

Zur Erfassung der Randbedingungen bei den Emissionsmessungen wurden wichtige Betriebszustände kontinuierlich aufgezeichnet. Dazu wurden die drei untersuchten BHKW mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Die erfassten Messgrößen sind zusammen mit den Messstellen und den eingesetzten Temperaturfühler, Drucksensoren und Volumenstrommessgeräten in Tabelle 14 dargestellt. Die Messdaten wurden mit einem Datalogger des Typs Hydra 2625 A der Firma FLUKE erfasst, an einen PC weitergegeben und ausgewertet. Das Programm zur Aufzeichnung der Messgrößen wurde speziell für das Untersuchungsvorhaben auf Basis von QuickBASIC programmiert. Das Zeitintervall für die Mittelwertbildung wurde im laufenden Betrieb auf 60 s eingestellt. Neben den kontinuierlich erfassten Größen wurden auch alle Wartungs- bzw. Reparaturarbeiten, Störungen und sonstige Vorkommnisse in einem Maschinen-Logbuch dokumentiert. Die ermittelten Randbedingungen beschreiben die Einsatzbedingungen der BHKW und werden bei der Interpretation der Ergebnisse der Emissionsmessungen berücksichtigt.

Tabelle 14: Messgrößen und Messstellen zur Erfassung der Betriebsdaten

Messgrößen	Messstelle	BHKW			Messgrößen-Aufnehmer
		A	B	C1	
Temperatur					
Kraftstoff	nach Tank	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	am Kraftstoff-Filter	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Motoröl	in Ölwanne	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Ansaugluft	vor Luftfilter	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Abgas	nach Zylinder	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	nach Wärmetauscher	x	x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Heizwasser-system	Rücklauf	x			PT100/2
			x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
	Vorlauf	x			PT100/2
			x	x	Mantel-Thermoelement Typ K
Druck					
Abgas	vor Wärmetauscher und ggf. vor Partikelfilter	x	x	x	Druckaufnehmer 0-200 mbar
Volumenstrom					
Kraftstoff	Zuleitung nach Tank, vor Rücklaufzuführung	x			Epi-Flowmeter 3-007 (560 Imp./l)
			x	x	Brooks LS 4550 (200 Imp./l)

#### 4.2.1.2 Erfassung des Emissionsverhaltens

Die Messungen wurden mit einer mobilen Emissionsmessausrüstung durchgeführt. Der Geräteaufbau ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt. Die Bestimmung der Abgaszusammensetzung erfolgte durch die Entnahme repräsentativer Teilgasströme aus dem Hauptgasvolumenstrom im Abgasrohr (Teilstrommethode). Um Kondensationseffekte zu vermeiden, wurde die Abgasprobenahme mit einer beheizten Probenahmesonde mit integriertem Partikelfilter und einer beheizten Probenahmeleitung (Beheizung auf ca. 180 °C) durchgeführt. Die Abgasbestandteile CO, NO<sub>x</sub> bzw. NO, Gesamt-C und CO<sub>2</sub>, wurden während der Messung kontinuierlich im Teilgasvolumenstrom analysiert (extraktive Probenahme). Da den Messgeräten für die CO-, NO<sub>x</sub>- bzw. NO- und CO<sub>2</sub>-Analyse trockenes und partikelfreies Abgas zugeführt werden muss, wurde das Messgas in einem vorgeschalteten Kühler auf ca. 5 °C abgekühlt und in einem weiteren Partikelfilter nochmals gereinigt. Die Erfassung von Gesamt-C erfolgte im heißen und feuchten Abgas.

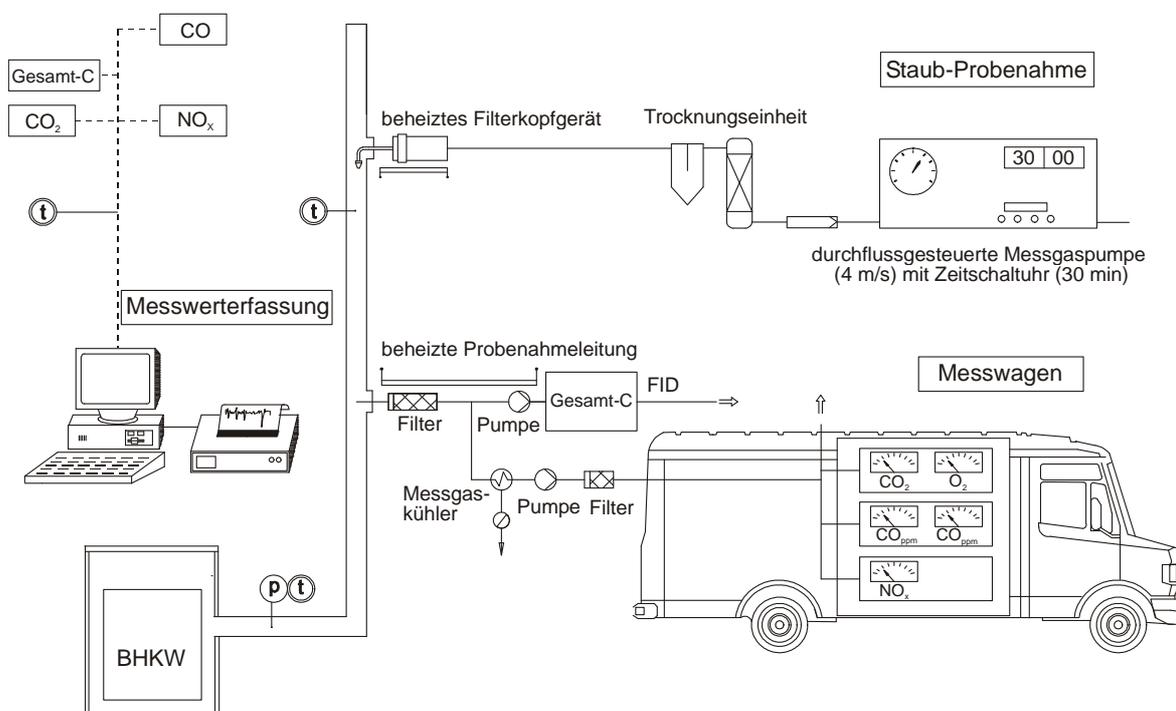


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Geräteaufbaus für die wiederkehrenden Emissionsmessungen an den BHKW A, B und C

Im Gegensatz zu den gasförmigen Emissionskomponenten wurde der Staubanteil diskontinuierlich mittels anreichernder Abgasprobenahme und späterer Analyse im Labor ermittelt. Die hierfür eingesetzte Messstrecke sowie die eingesetzten Messverfahren entsprechen den Anforderungen gemäß der Richtlinie VDI 2066 Blatt 1.

Die Messstutzen für die Emissionsmessungen wurden für BHKW B und BHKW C an einem speziell angefertigten Kaminaufsatz angebracht (Abbildung 20). Dieser wurde für

die Dauer der Messungen am Kaminende des BHKW passgenau aufgesetzt. Ein Teil des Kaminaufsatzes ragte dabei soweit in den Kamin hinein, dass sich eine Gasberuhigungsstrecke von mindestens 1,2 m ergab. Bei BHKW A wurden aufgrund des kleineren Abgasrohrdurchmessers die Messstutzen fest in das Abgassystem eingebaut.



Abbildung 20: Kaminmessaufsatz für die wiederkehrenden Emissionsmessungen an BHKW B und C

#### 4.2.2 Messverfahren

Die zur Bestimmung der gasförmigen Abgasbestandteile CO, NO<sub>x</sub>, Gesamt-C und CO<sub>2</sub>, verwendeten Messgeräte sowie deren Messprinzipien und die bei den Messungen aktiven Messbereiche sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Ebenso werden darin auch die zur Kalibrierung der Messgeräte eingesetzten Prüfgaskonzentrationen angegeben. Die Höhe der Prüfgaskonzentration richtet sich nach den zu erwartenden Konzentrationen im Abgas und dem entsprechenden Messbereichsendwert der Messgeräte. Die relative Genauigkeit der Prüfgaskonzentration entspricht  $\pm 2\%$ . Die maximalen Messfehler der Messgeräte betragen laut Herstellerangaben für das Binos 1 und das Binos 100 des Herstellers Fisher-Rosemount GmbH & Co. max.  $\pm 2\%$ , für das FID-Messgerät des Herstellers J.U.M. Engineering GmbH max.  $\pm 1\%$  und für das NO<sub>x</sub>-Messgerät (Hersteller: Beckmann Industrial) max.  $\pm 1,5\%$  vom Messbereichsendwert.

Tabelle 15: Verwendete Messgeräte, Messbereiche und Prüfgaskonzentrationen für die Erfassung gasförmiger Abgasbestandteile

Messgröße	Messgerät/ Hersteller	Messprinzip	Messbereich(e)	Prüfgaskonzentration <sup>1)</sup>	Messfehler d. Messgeräts <sup>2)</sup>	Nachweisgrenze
CO <sub>2</sub>	BINOS 1/ Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-20 Vol.-%	17,0 Vol.-% in N <sub>2</sub>	max. ± 2 %	1 % <sup>3)</sup>
CO	BINOS 100/ Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-500 ppm	450 ppm in N <sub>2</sub>	max. ± 2 %	1 % <sup>3)</sup>
	BINOS 1/ Fisher-Rosemount	Infrarotabsorption	0-2,5 Vol.-%	2,28 Vol.-% in N <sub>2</sub>	max. ± 2 %	1 % <sup>3)</sup>
Gesamt-C <sup>4)</sup>	FID 3-100/ J.U.M.	Flammenionisation	0-10 ppm <sup>5)</sup> 0-100 0-1000	90 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> in N <sub>2</sub>	max. ± 1 %	1 ppm
NO <sub>x</sub> /NO	Modell 951 A/ Beckmann Industrial	Chemolumineszenz	0-10 ppm <sup>5)</sup> 0-25 0-100 0-250 0-1000 0-2500	990 ppm NO in N <sub>2</sub> und 2010 ppm NO in N <sub>2</sub>	max. ± 1,5 %	0,1 ppm

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

<sup>2)</sup> max. Messfehler des Messgerätes in Prozent vom Messbereichsendwert (lt. Herstellerangabe)

<sup>3)</sup> Nachweisgrenze in Prozent vom Messbereichsendwert (lt. Herstellerangabe)

<sup>4)</sup> Summe flüchtiger organ. Verbindungen; Messung im feuchten Abgas gemäß VDI 3481 Blatt 1

<sup>5)</sup> manuelle Messbereichsumschaltung

Die kontinuierlich erfassten Messgrößen der mobilen Messausrüstung wurden 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 wurde das an der ehemaligen Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik in Weihenstephan (jetzt: Technologie- und Förderzentrum in Straubing) entwickelte Programm PSM 8.0 auf Basis von QuickBASIC verwendet. Die Abtastdauer für 19 Kanäle des Dataloggers betrug während der Messungen ca. 9 Sekunden. Als Zeitintervall zur Mittelwertbildung wurde 60 Sekunden gewählt.

Die Bestimmung der Partikelmasse-Emissionen (Staub-Emissionen) erfolgt diskontinuierlich mit einem Filterkopfgerät gemäß VDI-Richtlinien 2066 Blatt 1 und Blatt 3. Hierbei wird aus dem Abgasstrom ein Teilgasstrom isokinetisch abgesaugt und die darin mitgeführten Partikel in einer außerhalb der Abgasmessstrecke befindlichen Abscheidevorrichtung gesammelt. Zur Abscheidung dient eine mit Quarzwolle (mittlerer Faserdurchmesser 4 bis 12 µm) gestopfte Edelstahl-Filterhülse. Der Durchlassgrad wird selbst bei extrem feinen Stäuben mit weniger als 1 % angegeben [65]. Bei den Emissionsmessungen zur Bestimmung des Abscheideverhaltens von Partikelfiltersystemen wurde nach der Filterhülse zusätzlich ein Quarzfaserplanfilter (mittlere Porengröße 0,3 µm) angebracht, um den Durchlassgrad weiter zu verringern und die Messsicherheit zu erhöhen. Diese Kombination ist insbesondere bei Staubkonzentrationen < 20 mg/m<sup>3</sup>, wie sie beim Einsatz von

Partikelfiltersystemen zu erwarten sind, in Erwägung zu ziehen [41]. Um eine ungewollte Kondensation des Abgases zu verhindern, wird das Absaugrohr und die Staubabscheidevorrichtung beheizt. Im Anschluss an die Abscheidevorrichtung befindet sich die Absaugapparatur mit einem Trockenturm zur Gastrocknung, einem Durchflussmesser zur Bestimmung des Abgasvolumenstroms, Vorrichtungen zur Messung von Gastemperatur und -druck, einer Gasuhr und einer Saugpumpe (Abbildung 19).

Die Dauer der Probenahme betrug 30 Minuten, sofern während dieses Zeitraums der Sättigungsgrad der Filterhülse nicht überschritten wurde. Bei Unterschreiten eines Unterdrucks von ca. 0,3 bar wurde die Probenahme bereits vorzeitig beendet, da ansonsten Lufteintrag in das System oder ein Durchbrechen des Filters nicht mehr ausgeschlossen werden konnte. Die in der Abscheideeinrichtung zurückgehaltene Staubmasse wurde gravimetrisch durch Einwiegen des unbeladenen und Rückwiegen des beladenen Filters gemäß VDI 2066 Teil 1 bestimmt. Dazu diente eine elektronische Präzisionswaage der Firma Mettler mit einer Auflösung von 0,1 mg.

Die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Staub-Emissionen beträgt verfahrensbedingt etwa  $\pm 5$  bis 10 % bei einem Messwert von etwa  $10 \text{ mg/m}^3$  und bei Doppelbestimmung. Die Nachweisgrenze liegt etwa bei 1 bis  $2 \text{ mg/m}^3$  bei einer Einsatzzeit (Absaugung) von 0,5 h und  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  Absauggeschwindigkeit [41].

Die Messung der Aldehyd-Emissionen wurde vom TÜV-Süd Deutschland Bau und Betrieb durchgeführt. Ermittelt wurden die C1- bis C4-Aldehyde Formaldehyd, Acetaldehyd, Propionaldehyd, Acrolein und Butyraldehyd sowohl vor als auch nach dem Oxidationskatalysator. Die Probenahme erfolgte mittels Teilgasentnahmesonden aus Edelstahl nach dem Auslasskrümmer des Motors gleichzeitig vor und nach dem Oxidationskatalysator. Aufgrund der konstruktiven Ausführung des BHKW waren die Ein- und Auslaufstrecken vor bzw. nach den Messstellen kürzer als in der Richtlinie VDI 2066 Blatt 1 gefordert. Dies wurde bei der Angabe der Messunsicherheiten berücksichtigt. Als Messverfahren wurde das DNPH-Verfahren (Gasflaschenmethode) nach der Richtlinie VDI 3862 Blatt 2 angewandt (Tabelle 16). Hierbei werden die Proben mit 2,4-Dinitrophenylhydrazin umgesetzt und als Einzelkomponenten quantifiziert [41].

Tabelle 16: Mess- und Analyseverfahren zur Bestimmung der Aldehyd-Emissionen an BHKW A [103]

Messverfahren	DNPH-Verfahren – Gaswaschflaschenmethode gemäß VDI 3862 Blatt 2
Probenahme	
Entnahmesonde	Edelstahl, Länge ca. 1 m, über Abgas beheizt (> 200 °C)
Partikelfilter	Quarzwolle in der Sonde
Absorptionssystem	2 Frittenwaschflaschen (gekühlt) in Serie mit Absorptionsmittel, eine nachgeschaltete Frittenwaschflasche mit Wasser (wird verworfen)
Absorptionsmittel	DNPH-Lösung: 65 mg 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) in 100 ml Acetonitril. Zugabe von 4 Tropfen 1 molarer Perchlorsäure vor der Probenahme.
Probenehmer	Membranpumpe mit nachgeschalteter Gasuhr
Dauer der Probenahme	3 x 0,5 h je Messstelle und Kraftstoff
Probentransfer	in Glasfläschchen
Analyse	
Gerät	HPLC, Hersteller: Merck-Hitachi
Säule	Reversed-Phase-Säule RP 18, 5 µm, 250 x 4,6 mm
Nachweisgrenze <sup>1)</sup>	0,05 mg/m <sup>3</sup> (für das Gesamtverfahren bei 25 ml Absorptionslösung und 30 l Probenahmenvolumen)
Messunsicherheit <sup>1)</sup>	0,5 mg/m <sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Messwerte bezogen auf Abgas im Normzustand (1013 hPa, 0 °C, trocken) und 5 Vol.-% O<sub>2</sub>

#### 4.2.3 Ablauf der Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen an den drei Praxisanlagen erfolgten innerhalb eines Zeitraums von 18 Monaten. Dabei galt es, die Messungen während des laufenden Betriebs durchzuführen, ohne diesen zu beeinträchtigen. Insgesamt wurden bei BHKW A sechs, bei BHKW B vier und bei BHKW C1 und C2 je zwei wiederkehrende Messungen der Abgas-komponenten Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide, Gesamt-Kohlenstoff, Staub und Kohlen-dioxid durchgeführt. Die unterschiedliche Anzahl von Messungen begründet sich in den geringeren Laufzeiten und der schlechteren Zugänglichkeit der Blockheizkraftwerke B und C. Darüber hinaus konnten die wiederkehrenden Emissionsmessungen nicht in exakt regelmäßigen Abständen realisiert werden.

Die Emissionsmessungen bei Dauerlast fanden jeweils über einen Zeitraum von mindestens zwei bis drei Stunden statt. Dabei wurden die gasförmigen Abgaskomponenten kontinuierlich erfasst und drei bis vier Staubprobenahmen mit einer Absaugdauer von je 30 Minuten durchgeführt. Bei den kontinuierlich erfassten Abgaskomponenten wurden genau diejenigen Zeitintervalle zur Berechnung der Halbstundenmittelwerte herangezogen, in denen eine Staubprobenahme erfolgt war. Somit beziehen sich Konzentrationsangaben aller Emissionskomponenten einer bestimmten Messung auf denselben Zeitraum.

Um vergleichbare Betriebsverhältnisse an der Anlage zu gewährleisten, wurde mit den Emissionsmessungen, mit Ausnahme der Messungen während des Startvorgangs, erst nach einer Warmlaufphase von mindestens zwei Stunden begonnen. Während dieser Zeit erreichte der Motor die im Dauerbetrieb übliche Betriebstemperatur. Die Anzeigen der Motoröl-, Motorkühlwasser- und Abgastemperaturüberwachung der BHKW dienten zur Kontrolle, wann die stationären Betriebsbedingungen erreicht waren.

Bei BHKW C wurde während der Emissionsmessungen die Regeneration der beiden Partikelfiltersysteme außer Kraft gesetzt, weil der ansonsten bei der Regeneration stattfindende Gaseintrag ins Abgassystem sowie der Rußabbrand einen Vergleich mehrerer Halbstundenmittelwerte miteinander nicht zugelassen hätte.

Bei den Versuchen mit den Partikelfiltersystemen an BHKW A wurden korrespondierende Messungen mit und ohne dem jeweiligen Partikelfiltersystem durchgeführt. Die Messungen erfolgten in der Regel im Neuzustand der Filter sowie je nach dem Verhalten während des Betriebs nach einer gewissen Einsatzstundenzeit.

#### 4.2.4 Auswertung

Die Auswertung der Emissionsmessungen erfolgte mithilfe des an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik entwickelten Makropakets FMDA 3.0 sowie der Software Microsoft Excel. Nachfolgend werden die wichtigsten Auswerteschritte erläutert [69].

Zunächst wurden die als Minutenmittelwerte vorliegenden und im feuchten Abgas bestimmten Gesamt-C-Gehalte auf Gehalte im trockenen Abgas umgerechnet. Dazu wurden die gemessenen Gesamt-C-Minutenmittelwerte mit den Wassergehalts-Minutenmittelwerten ( $f$ ) und der Normdichte von Wasserdampf  $\rho_{H_2O} = 0,804 \text{ kg/m}^3$  nach Formel (1) verrechnet:

$$\text{Gesamt} - C_{\text{trocken}} = \text{Gesamt} - C_{\text{feucht}} * \left( 1 + \frac{f}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (1)$$

Aus den kontinuierlich erfassten Minutenmittelwerten der Abgaskomponenten CO, NO<sub>x</sub>, Gesamt-C und CO<sub>2</sub> wurden anschließend Halbstundenmittelwerte über den Zeitraum der Staub-Probenahme gebildet. Die als Volumenkonzentrationen erfassten Messwerte wurden durch Multiplikation mit der in Tabelle 17 aufgeführten Gasdichten auf Massenkonzentrationen umgerechnet.

Tabelle 17: Gasdichten der kontinuierlich erfassten Emissionsgrößen

Parameter	Dichte $\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
CO	1,251
NO <sub>x</sub>	2,053 (Gasdichte von NO <sub>2</sub> )
Gesamt-C	1,607

Bei der Auswertung der diskontinuierlichen Staubmessung wurde zunächst das während der Probenahme abgesaugte Gasvolumen mittels der gemessenen Abgastemperatur- und Abgasdruckdaten auf das Normvolumen umgerechnet und anschließend die im Labor bestimmte Staubmasse darauf bezogen.

Die berechneten mittleren Massenkonzentrationen ( $E_{(Messwert)}$ ) aller Emissionskomponenten wurden daraufhin auf einen einheitlichen Sauerstoff-Gehalt von 5 Vol.-% (gemäß TA Luft für Verbrennungsmotoranlagen) mit Formel (2) bezogen:

$$E_{5\text{Vol.}\%O_2} = E_{(Messwert)} * \frac{21\text{Vol.}\% - 5\text{Vol.}\%}{21\text{Vol.}\% - O_{2(Messwert)}} \quad (2)$$

Die Angabe der Emissionswerte erfolgte schließlich als Halbstundenmittelwerte in Milligramm pro Kubikmeter (mg/m<sup>3</sup>) trockenes Abgas unter Normbedingungen bei 1013 hPa und 273,15 K, bezogen auf einen einheitlichen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%.

Bei der Ermittlung von mehreren aufeinanderfolgenden Halbstundenmittelwerten im Rahmen einer Messreihe (Messung), werden die Ergebnisse als arithmetische Mittelwerte aus der Summe der Halbstundenmittelwerte, dividiert durch die Anzahl der Halbstundenmittelwerte (Einzelmessungen) angegeben. Des Weiteren werden die Spannweite zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Halbstundenmittelwert sowie die Standardabweichung und der Variationskoeffizient einer Messung unter der Annahme normalverteilter Messwerte bestimmt. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der einzelnen Messwerte um den Mittelwert. Der Variationskoeffizient ist definiert als die relative Standardabweichung, d. h. die Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert der Einzelmessungen und wird in Prozent angegeben.

Zur Einordnung des durchschnittlichen Emissionsniveaus eines BHKW über den gesamten Beobachtungszeitraum wurde ein ungewichteter Mittelwert aus den Mittelwerten der wiederkehrenden Messungen gebildet. Daneben wäre auch eine gewichtete Mittelwertbildung unter Berücksichtigung der Anzahl der Halbstundenmittelwerte einer Messung möglich. Diese Vorgehensweise wurde jedoch nicht gewählt, da jeder Messreihe unabhängig von der Anzahl der Einzelmessungen aufgrund der geringen Schwankungsbreite der Einzelmessungen und der signifikanten Unterschiede bei unterschiedlichen Messungen die gleiche Bedeutung beigemessen wurde.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Emissionsverhalten von drei Rapsöl-BHKW

Nachfolgend werden zuerst wichtige, insbesondere emissionsrelevante Ereignisse während des Untersuchungszeitraums sowie die Randbedingungen bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen aufgezeigt. Anschließend wird das Abgasemissionsverhalten der drei untersuchten mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW in den für den Dauerbetrieb typischen Lastzuständen (Dauerlast) dargestellt. Nach den Ergebnissen bei Dauerlast wird der Einfluss verschiedener BHKW-Betriebsweisen (Teillast, Kaltstartphasen, Start/Stop-Zyklen), ausgewählter Kraftstoffeigenschaften sowie eines Oxidationskatalysators und eines Abgaspartikelfilters auf die Emissionskomponenten aufgezeigt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt meist in Säulendiagrammen. Die Höhe jeder Säule gibt den bei einer Emissionsmessung ermittelten arithmetischen Mittelwert von n aufeinanderfolgenden Halbstundenmittelwerten an. Die Spannweite der Halbstundenmittelwerte wird durch einen Balken angezeigt, der den Bereich zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Wert umspannt. Alle Einzelergebnisse finden sich in Anhang 1 bis Anhang 6.

#### 5.1.1 Randbedingungen

Während des Untersuchungszeitraums gab es bei den drei BHKW eine Reihe von Ereignissen, die sich auf das Emissionsverhalten auswirken können, wie z. B. Wartungsarbeiten oder der Einbau eines Systems zur kontinuierlichen Motorölauffrischung Plantotronic® (Kapitel 2.6.1). In Abbildung 21 bis Abbildung 23 sind die wichtigsten Ereignisse sowie die Zeitpunkte der Emissionsmessungen an den drei BHKW während des jeweils untersuchten Betriebsstundenzeitraums dargestellt.

Bei BHKW A wurden sechs Emissionsmessungen bei Betriebsstundenzählerständen von ca. 300 bis 5000 Bh durchgeführt. Wenige Betriebsstunden nach der dritten Emissionsmessung erfolgte der Einbau des Plantotronic®-Schmiersystems, mit dem das Aggregat bis unmittelbar vor der sechsten Messung betrieben wurde. Bei der sechsten Emissionsmessung an BHKW A wurden die Aldehyde im Abgas bestimmt. Dazu musste die Wärmeisolation des BHKW abgebaut werden. Darüber hinaus erfolgten turnusgemäß Wartungsarbeiten entsprechend der Herstellerangaben, wie z. B. Motoröl- und Motorölfilterwechsel sowie Kraftstoff- und Luftfilterwechsel.

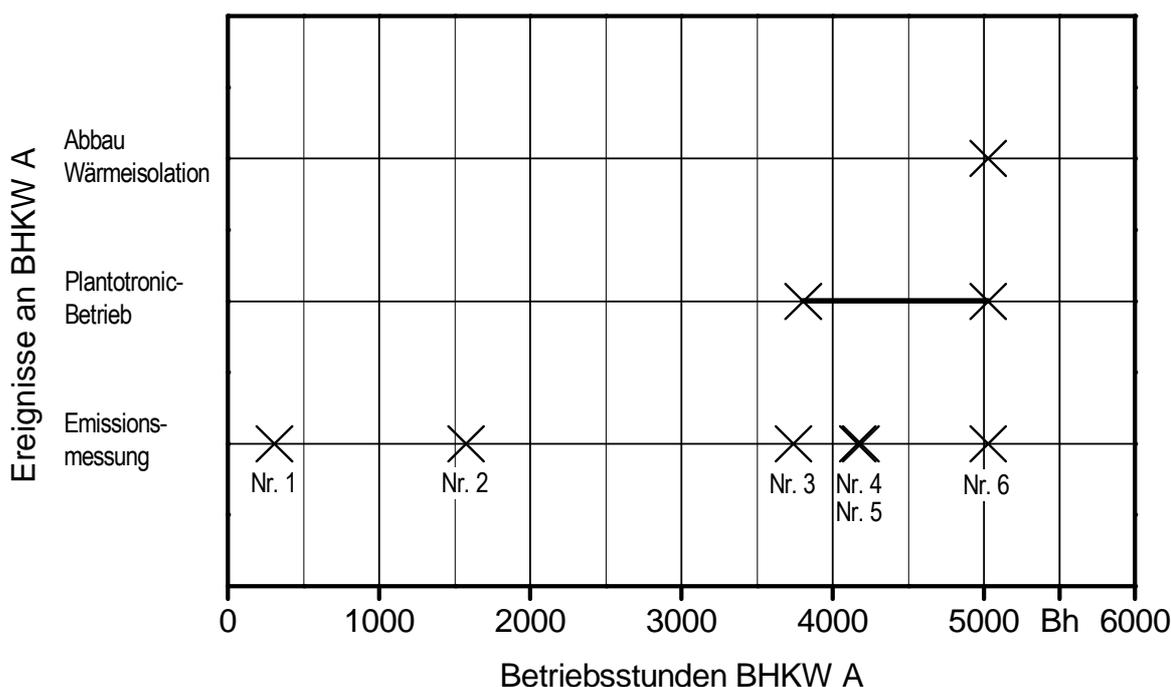


Abbildung 21: Ereignisse an BHKW A während des Untersuchungszeitraums

Die Untersuchungen an BHKW B begannen nach etwa 4500 Betriebsstunden und endeten nach weiteren ca. 4500 Betriebsstunden. In diesem Zeitraum erfolgten vier wiederkehrende Emissionsmessungen. Bei BHKW B wurden neben den üblichen Wartungsarbeiten auch dreimal die Einspritzdüsen gewechselt und fünfmal die Ventile eingestellt. Nach der ersten Emissionsmessung ereignete sich bei etwa 5000 Betriebsstunden ein Motorschaden (Kolbenfresser), der einen Motortausch zur Folge hatte. Dabei wurde ein generalüberholter gebrauchter Motor eingebaut. Aufgrund von Kraftstoffmangel musste der Betreiber bei etwa 5400 Betriebsstunden kurzfristig Heizöl nachtanken. Etwa 300 Betriebsstunden vor der letzten Emissionsmessung wurde für den Dauerbetrieb die Leistung des BHKW B, dessen elektrische Nennleistung vom Hersteller mit 60 kW angegeben wird, von anfänglich 40 auf 50 kW<sub>el</sub> angehoben, da sich der Wärmebedarf der Abnehmer erhöht hatte.

Das BHKW C1 wird hauptsächlich zur Spitzenstromabdeckung genutzt, weshalb sich der Untersuchungszeitraum lediglich auf etwas mehr als 600 Betriebsstunden erstreckte. In diesem Zeitraum wurden die ersten zwei Emissionsmessungen mit Partikelfilter und eine weitere Messung ohne Partikelfilter durchgeführt. Etwa 500 Betriebsstunden lang wurde das Aggregat mit dem Plantotronic<sup>®</sup>-Schmiersystem betrieben. Die Einspritzpumpe wurde insgesamt dreimal neu eingestellt. Am baugleichen Modul BHKW C2 wurden zum Vergleich die Emissionen an den Tagen bestimmt, an denen bei BHKW C1 die Messungen 9 und 10 stattfanden.

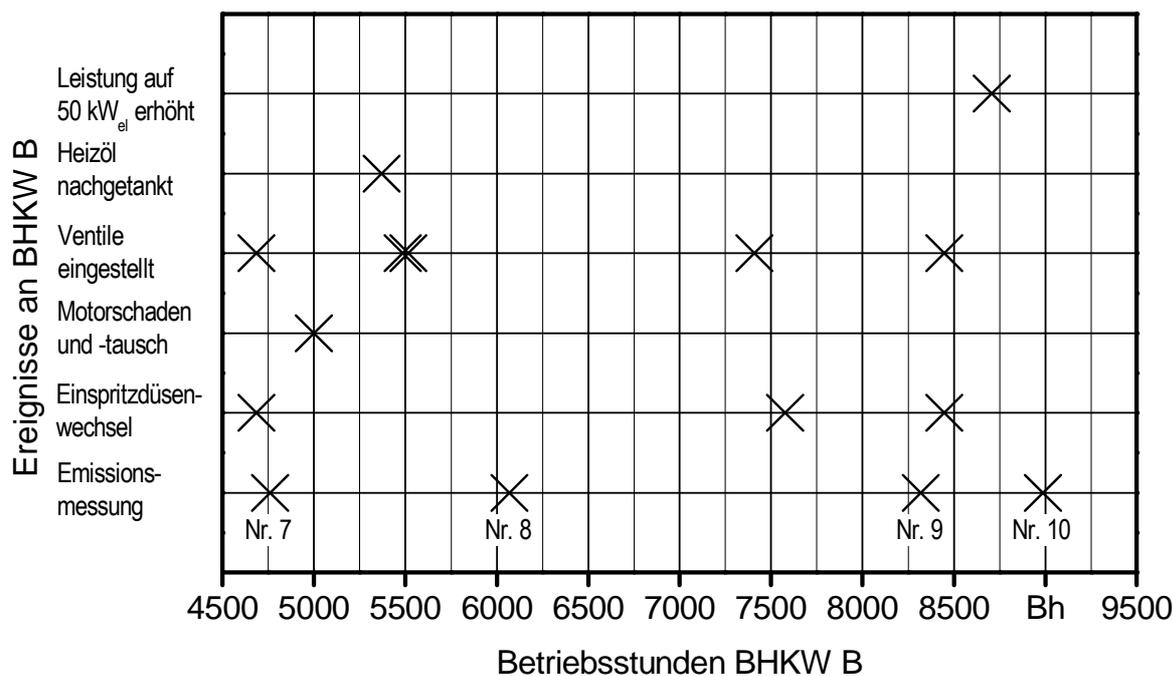


Abbildung 22: Ereignisse an BHKW B während des Untersuchungszeitraums

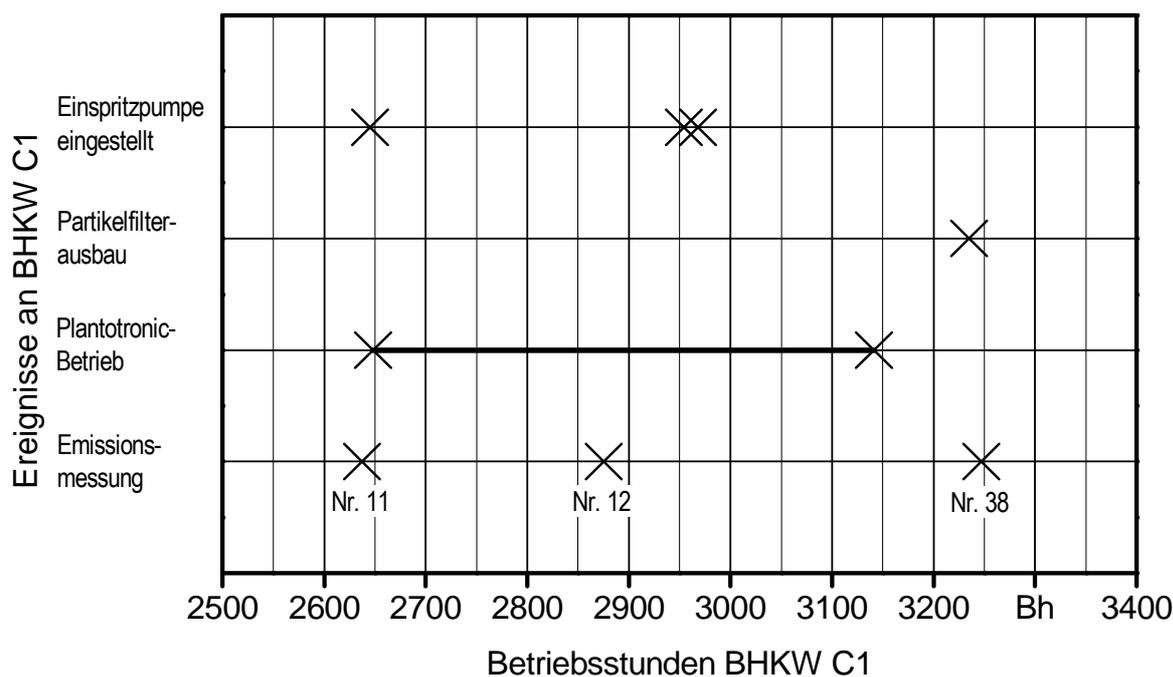


Abbildung 23: Ereignisse an BHKW C1 während des Untersuchungszeitraums

Neben den durchgeführten Veränderungen an den drei BHKW, die vorwiegend aus den Praxisgegebenheiten resultierten, wurden auch wichtige Randbedingungen des BHKW-Betriebs, wie z. B. Kraftstoff- und Abgastemperaturen, die während der Emissionsmessungen herrschten, erfasst. Diese sind in Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20 gemittelt über den Zeitraum des Dauerlastbetriebs der einzelnen Messungen zusammengefasst.

Die Aufzeichnung der Messdaten von BHKW A, B und C1 begann jeweils nach der ersten Emissionsmessung, das BHKW C2 diente zu Vergleichsmessungen für BHKW C1, die Randbedingungen wurden nicht erfasst.

Tabelle 18: Betriebsdaten von BHKW A während der Messungen bei Dauerlast

Parameter	Einheit	Mes- sung 2	Mes- sung 3	Mes- sung 4	Mes- sung 5	Mes- sung 6
Kraftstofftemperatur nach Tank	°C	12	17	19	20	8
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	32	31	32	32	18
Motoröltemperatur in Ölwanne	°C	88	92	92	93	89
Ansauglufttemperatur vor Luftfilter	°C	36	44	46	46	21
Abgastemperatur nach Zylinder	°C	316	344	371	365	345
Abgastemperatur nach AWT	°C	125	131	136	136	128
Heizwassertemperatur im Rücklauf	°C	47	61	61	61	62
Heizwassertemperatur im Vorlauf	°C	77	79	80	81	79
Abgasdruck vor Wärmetauscher	hPa	44	47	52	53	n.e. <sup>1)</sup>
Kraftstoffverbrauch	l/h	3,1	3,0	2,9	3,1	n.e. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> n.e. = nicht ermittelt

Tabelle 19: Betriebsdaten von BHKW B während der Messungen bei Dauerlast

Parameter	Einheit	Messung 8	Messung 9	Messung 10
Kraftstofftemperatur nach Tank	°C	35	31	34
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	43	56	50
Motoröltemperatur in Ölwanne	°C	104	109	104
Ansauglufttemperatur vor Luftfilter	°C	22	35	12
Abgastemperatur nach Zylinder	°C	372	399	410
Abgastemperatur nach AWT	°C	232	234	256
Heizwassertemperatur im Rücklauf	°C	69	70	68
Heizwassertemperatur im Vorlauf	°C	78	79	78
Abgasdruck vor Wärmetauscher	hPa	249	n.e. <sup>1)</sup>	256
Kraftstoffverbrauch	l/h	13,0	13,0	16,1

<sup>1)</sup> n.e. = nicht ermittelt

Tabelle 20: Betriebsdaten von BHKW C1 während der Messungen bei Dauerlast

Parameter	Einheit	Messung 12	Messung 34
Kraftstofftemperatur nach Tank	°C	27	21
Kraftstofftemperatur am Filter	°C	48	45
Motoröltemperatur in Ölwanne	°C	95	93
Ansauglufttemperatur vor Luftfilter	°C	33	28
Abgastemperatur nach Zylinder	°C	478	447
Abgastemperatur nach AWT	°C	169	166
Heizwassertemperatur im Rücklauf	°C	30	25
Heizwassertemperatur im Vorlauf	°C	55	50
Abgasdruck vor Wärmetauscher	hPa	53	19
Kraftstoffverbrauch	l/h	30,9	29,0

## 5.1.2 Dauerlast

### 5.1.2.1 Kohlenmonoxid

In Abbildung 24 sind die Kohlenmonoxid-Emissionen (CO-Emissionen) unter den für jedes der drei BHKW typischen Bedingungen des Dauerbetriebs (Dauerlast) bei wiederkehrenden Messungen dargestellt.

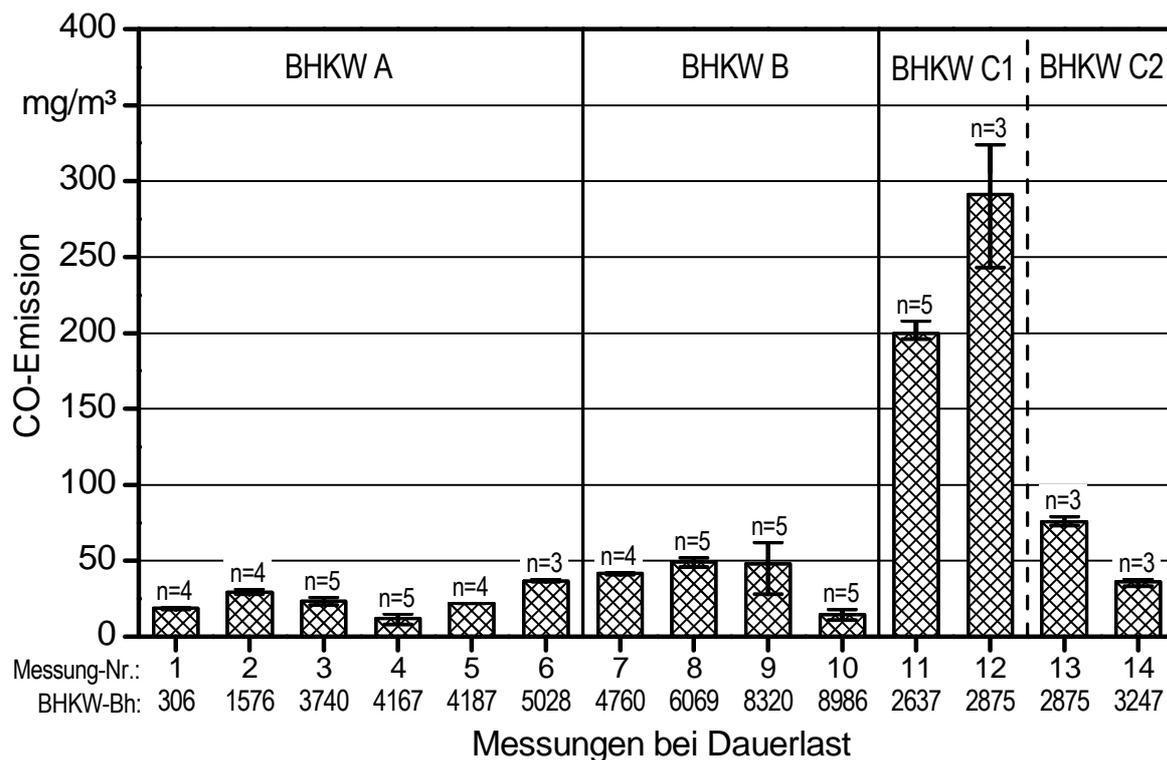


Abbildung 24: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Demnach weist das **BHKW A** mittlere CO-Konzentrationen von 12 bis 37 Milligramm pro Kubikmeter (mg/m<sup>3</sup>) Abgas im Normzustand auf. Der Mittelwert über alle sechs Messungen beträgt 24 mg/m<sup>3</sup> bei einer Standardabweichung von 9 mg/m<sup>3</sup> und einem Variationskoeffizienten von 36 %. Die Spannweiten aller n Halbstundenmittelwerte jeder einzelnen Messung betragen zwischen 0 mg/m<sup>3</sup> bei Messung 5 (vier gleiche Messwerte) bis hin zu 7 mg/m<sup>3</sup> bei Messung 4. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte einer Messung betragen entsprechend zwischen 0 und 3 mg/m<sup>3</sup> (Mittelwert 1,3 mg/m<sup>3</sup>), die Variationskoeffizienten zwischen 0 und 24 % (Mittelwert 7 %).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Spannweite der Werte von aufeinanderfolgenden Halbstundenmittelwerten einer Messung geringer sind, als die Spannweite der Mittelwerte zwischen den sechs wiederkehrenden Messungen. So ist beispielsweise die CO-

Konzentration im Abgas bei Messung 5 fast doppelt so hoch wie bei Messung 4, welche am Vortag stattfand, obwohl die gleiche Kraftstoffcharge verwendet wurde und sich die äußeren Bedingungen sowie die ermittelten Betriebskenngrößen zwischen den beiden Messungen nicht wesentlich voneinander unterscheiden (Tabelle 18).

Die geringen Streubreiten der Halbstundenmittelwerte einer Messung weisen auf eine sehr gute Wiederholbarkeit der durchgeführten Messungen hin. Die Streuungen der CO-Konzentrationen innerhalb der sechs Messungen bei BHKW A sind, sofern sie nicht auf Messunsicherheiten beruhen, nicht auf eine Änderung der erfassten Randbedingungen zurückzuführen. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass das Zusammenwirken verschiedener verbrennungswirksamer Faktoren, wie z. B. Ablagerungen an Einspritzdüsen oder an Ein- und Auslassventilen, die sich in unregelmäßigen Abständen bilden und auch wieder lösen können, ausschlaggebend sind. Neben innermotorischen Ablagerungen können auch Ablagerungen von Verbrennungsrückständen im Abgassystem, z. B. an der katalytisch wirksamen Beschichtung des Oxidationskatalysators für die unterschiedlichen CO-Konzentrationen im Abgas bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen verantwortlich sein. Derartige Einflüsse, die vom Zustand des Motorsystems ausgehen, sind jedoch keine Zielgrößen dieser Untersuchung und werden daher nicht näher betrachtet.

Innerhalb des Untersuchungszeitraums von insgesamt 4722 Betriebsstunden an BHKW A kann bei den sechs wiederkehrenden Messungen kein Trend hin zu einer Zu- oder Abnahme der CO-Emissionen beobachtet werden. Auch kann kein signifikanter Einfluss der erfassten Betriebskenngrößen festgestellt werden (Tabelle 18). Es ist lediglich eine geringfügige Erhöhung des Abgasgedrucks von 44 auf 53 hPa zu vermerken, was sich tendenziell in einer schlechteren Verbrennungsgüte und damit in einer Zunahme der CO-Emission bei Messung 6 auswirken konnte. Die ebenfalls bei Messung 6 deutlich niedrigere Ansaugluft- und Kraftstofftemperatur am Filter ergaben sich aufgrund des notwendigen Abbaus der Schallschutzdämmung für die Aldehyd-Probenahme (Kapitel 5.1.1). Die fehlende Isolierung führte zu einem weniger starken Aufheizen von Ansaugluft und Kraftstoff durch die Wärmeabstrahlung des Aggregats. Dadurch konnte es auch zu einer vermehrt unvollständigen Verbrennung und somit zum Anstieg der CO-Konzentration im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen gekommen sein.

Das bei den Messungen 4 und 5 eingesetzte Schmiersystem Plantotronic<sup>®</sup>, bei dem ein Anteil von 2 % Motorenöl aus der Ölwanne kontinuierlich entnommen und dem Kraftstoff zugemischt wird (Kapitel 2.6.1), zeigt keine negativen Auswirkungen auf die CO-Emissionen. Die CO-Emissionen liegen hierbei im unteren Bereich der Schwankungsbreite aller Messungen an BHKW A. Bei diesen Messungen sind um etwa 20 K höhere Abgastemperaturen zu verzeichnen (Tabelle 18). Diese können ein Indiz für veränderte Verbrennungseigenschaften des mit dem Spezial-Motoröl angereicherten Rapsölkraftstoffs (z. B. aufgrund von mitverbrannten Motoröladditiven) sein. So könnten verstärkte Oxidationsreaktionen von Verbrennungsprodukten im Brennraum zu den beobachteten geringeren CO-Emissionen geführt haben (Kapitel 2.4.6).

Allerdings sind die CO-Emissionen bei BHKW A generell sehr gering und nur wenig oberhalb der Nachweisgrenze des Messverfahrens von ca.  $10 \text{ mg/m}^3$ . Die Standardabweichungen mehrerer Halbstundenmittelwerte einer Messung sind ebenso wie die Standardabweichung zwischen den einzelnen CO-Messungen bei BHKW A niedriger als die vom Hersteller angegebene Genauigkeit des Messgeräts von ca.  $18 \text{ mg/m}^3$ , so dass den beobachteten Unterschieden bei den Messungen keine allzu große Bedeutung beigemessen werden kann. Allerdings weisen die geringen Streuungen der Einzelmessserien darauf hin, dass sich die Mittelwerte der wiederkehrenden Messungen signifikant voneinander unterscheiden. Die Ursachen dafür können jedoch nicht immer eindeutig ermittelt werden.

Bei **BHKW B** wurden bei den insgesamt vier wiederkehrenden Messungen mittlere CO-Emissionen zwischen  $15$  und  $49 \text{ mg/m}^3$  ermittelt (Abbildung 24). Die durchschnittliche CO-Konzentration über alle vier Messungen beträgt  $39 \text{ mg/m}^3$ , bei einer Standardabweichung von  $16 \text{ mg/m}^3$  und einem Variationskoeffizienten von  $42 \%$ . Die Standardabweichungen der einzelnen Messungen betragen zwischen  $1$  und  $17 \text{ mg/m}^3$  (Mittelwert  $6 \text{ mg/m}^3$ ), die Variationskoeffizienten zwischen  $1$  und  $35 \%$  (Mittelwert  $15 \%$ ). Auch hier bestätigt sich wie bei BHKW A, dass die Abweichungen zwischen den Messungen größer sind als bei den Halbstundenwerten einer Messung.

Bei Messung 9 wird im Vergleich zu den anderen Messungen an BHKW B (Messungen 7, 8, 10) mit  $34 \text{ mg/m}^3$  die größte Schwankungsbreite der einzelnen Halbstundenmittelwerte festgestellt. Bei dieser Messung sind auch gegenüber Messung 8 deutlich höhere Temperaturen von Ansaugluft, Kraftstoff am Kraftstofffilter, Abgas und Motoröl zu beobachten (Tabelle 19). Nur wenige Betriebsstunden nach Messung 9 mussten die Einspritzdüsen erneuert werden, da diese starke Verkokungen aufwiesen. Es ist deshalb anzunehmen, dass sich die Einspritzdüsen zum Zeitpunkt der Emissionsmessung 9 nicht in einwandfreiem Zustand befanden. Darüber hinaus lag der Abgasgegendruck bei Messung 9 sehr hoch, so dass der Messbereich des eingebauten Drucksensors überschritten wurde und in Folge dessen keine Auswertung der aufgezeichneten Daten stattfinden konnte. Es ist bekannt, dass ein hoher Abgasgegendruck (z. B. durch einen mit Ruß beladenen Abgaswärmetauscher) zu einer stärkeren Belastung des Motors führt. Dies, gegebenenfalls in Verbindung mit den stark verkokten Einspritzdüsen, kann die Ursache für einen unregelmäßigen Motorbetrieb mit größeren Schwankungen bei den CO-Emissionen als bei den anderen Messungen sein.

Die mit Abstand niedrigsten CO-Emissionen bei BHKW B sind bei Messung 10 zu verzeichnen, bei der die mittlere CO-Konzentration von  $15 \text{ mg/m}^3$  etwa nur bei einem Drittel der Werte von den Messungen 7, 8 und 9 liegt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Aggregat bei Messung 10 mit  $50 \text{ kW}$  elektrischer Leistung anstatt der bis dahin üblichen  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben wurde (Kapitel 4.1.1). Bedingt durch die höheren Drücke und Temperaturen im Brennraum sowie durch die veränderten Strömungsverhältnisse kann es zu einer besseren Aufbereitung des Kraftstoff-/Luft-Gemisches, einem Abbau von

Ablagerungen im Zylinder, an Einspritzdüsen und Ventilen sowie im Abgassystem und in der Folge zu einer verbesserten Verbrennung gekommen sein. Daneben wirkt sich auch eine höhere Verbrennungstemperatur im Allgemeinen günstig auf die Oxidation von Kohlenmonoxid aus und trägt so zur Reduzierung dieses Schadstoffs im Abgas bei.

Der wegen eines Motorschadens durchgeführte Motortausch zwischen den Messungen 7 und 8 lässt keine wesentliche Änderung bei den CO-Emissionen erkennen. Auch zeichnet sich anhand der ermittelten Ergebnisse kein Einfluss der Kraftstoffqualität auf die CO-Emissionen ab, obgleich sich die bei den vier Messungen eingesetzten Rapsölkraftstoffe insbesondere hinsichtlich der Höhe der Gesamtverschmutzung und des Phosphorgehalts deutlich unterscheiden (Tabelle 11).

Die Module C1 und C2 von **BHKW C** verfügen über je ein Partikelfiltersystem. Bei Dauerlast von Aggregat C1 sind bei den Messungen 11 und 12 vergleichsweise hohe CO-Emissionen von 200 und 291 mg/m<sup>3</sup> zu verzeichnen. Die Standardabweichungen dieser beiden Messungen betragen 5 und 43 mg/m<sup>3</sup>, die Variationskoeffizienten 2 und 15 %. Die Kohlenmonoxid-Emissionen von Aggregat C2 betragen dagegen bei den Messungen 13 und 14 mit 76 bzw. 36 mg/m<sup>3</sup> deutlich weniger als die CO-Emissionswerte von Aggregat C1 (Messung 12). Die Standardabweichungen bei den Messungen von Aggregat C2 betragen je 3 mg/m<sup>3</sup>, die Variationskoeffizienten 4 bzw. 7 %.

Die hohen CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW C1 bei den Messungen 11 und 12 können auf einen Schaden des Rußpartikelfilters zurückgeführt werden. Wegen lokalen Überhitzungen kam es bei dem metallischen Partikelfilterkörper zu Verschmelzungen von Strömungskanalwänden, wodurch die Kanäle verengt bzw. ganz verschlossen wurden. Der so erhöhte Strömungswiderstand im Abgassystem führte zu einer stärkeren Belastung des Motors und zu einer unvollständigeren Verbrennung. Auch die vergleichsweise großen Schwankungen der Halbstundenmittelwerte von CO bei Messung 12 können so wie bei Messung 9 mit BHKW B in den ungünstigen Betriebsbedingungen des Motors durch den hohen Abgasgedruck begründet liegen.

Zwischen den Messungen 13 und 14 an Aggregat C2 kam es zu einem Rückgang der CO-Emissionen von 76 mg/m<sup>3</sup> auf 36 mg/m<sup>3</sup>, dessen Ursache jedoch nicht ermittelt werden konnte. Die Standardabweichungen bei diesen Messungen liegen mit je 3 mg/m<sup>3</sup>, wie bei fast allen anderen Messungen auf sehr niedrigem Niveau und deuten auf eine gute Wiederholbarkeit hin.

Bei einem Vergleich der CO-Emissionen aller drei BHKW untereinander schneidet das BHKW A tendenziell günstiger ab. Die Ursache dafür kann zum einen im geringeren Alter von Aggregat A begründet liegen, zum anderen können Nebenkammer-Brennverfahren generell Vorteile hinsichtlich der CO-Emissionen aufgrund der starken Verwirbelung des Brennstoff-/Luftgemisches aufweisen (Kapitel 2.4.2).

Werden die CO-Konzentrationen der durchgeführten Untersuchungen mit den Ergebnissen von PRANKL et al. (2005) [83], DOBIASCH (2000) [29], STREIT und FRIEB (1998) [95], KAMPMANN (1994) [56] sowie GLAß et al. (1991) [40] verglichen, so bestätigen sich im Wesentlichen die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen an den verschiedenen Aggregaten.

Bei den bei PRANKL et al. (2005) [83] durchgeführten wiederkehrenden Emissionsmessungen zeigen sich deutlich voneinander abweichende CO-Konzentrationen im Abgas beim selben BHKW (Tabelle 6). Bei dem mit einem Oxidationskatalysator ausgestatteten BHKW mit 20 kW<sub>el</sub>, welches vom gleichen Hersteller, wie das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte BHKW A stammt, betragen die CO-Emissionen im Neuzustand 32 und nach 3600 h 61 mg/m<sup>3</sup> und liegen damit im oberen Wertebereich von BHKW A.

Die Messungen von STREIT und FRIEB (1998) [95] ergaben bei zwei Wiederholungsmessungen an einem BHKW mit Oxidationskatalysator des gleichen Typs wie BHKW B CO-Emissionen von jeweils 7 mg/m<sup>3</sup>. Diese Ergebnisse liegen damit sogar noch unterhalb der niedrigsten CO-Emissionen aller Messungen, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführt wurden.

Für einen baugleichen, jedoch mit zusätzlicher Ladeluftkühlung versehenen, Motor ermittelte KAMPMANN (1994) [56] deutlich höhere CO-Emissionswerte von 260 mg/m<sup>3</sup>. Ein Vergleich der Messwerte von CO und NO<sub>x</sub> zwischen den Messungen mit und ohne Katalysator macht jedoch deutlich, dass die relativ hohen CO-Emissionen wahrscheinlich aus einer hinsichtlich NO<sub>x</sub> erfolgten Optimierung des Aggregats resultierten. Auch kann keine Aussage über die Effektivität des Katalysators gemacht werden.

### 5.1.2.2 Stickstoffoxide

Die an den drei BHKW ermittelten Stickstoffoxid-Emissionen sind in Abbildung 25 in dem jeweils typischen Dauerbetriebszustand (Dauerlast) bei wiederkehrenden Messungen dargestellt.

Die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen betragen für das **BHKW A** über den gesamten Untersuchungszeitraum bei Nennlastbetrieb im Mittel 2026 mg/m<sup>3</sup>, bei einer Standardabweichung von 145 mg/m<sup>3</sup> und einem Variationskoeffizienten von 7 %. Die durchschnittlichen Halbstundenmittelwerte der sechs Messungen schwanken zwischen 1901 und 2295 mg/m<sup>3</sup>. Die höchsten Emissionswerte wurden bei Messung 2 ermittelt. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte der einzelnen Messungen reichen von 6 bis 101 mg/m<sup>3</sup> und liegen im Mittel bei 40 mg/m<sup>3</sup> und damit noch im Rahmen der Ungenauigkeit des Messverfahrens. Der Variationskoeffizient beträgt im Durchschnitt 2 %. Ebenso wie bei den CO-Emissionen, ist auch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen von BHKW A anhand der wiederkehrenden Emissionsmessungen über den gesamten Beobachtungszeitraum von 4722 Betriebsstunden keine Veränderung zu verzeichnen.

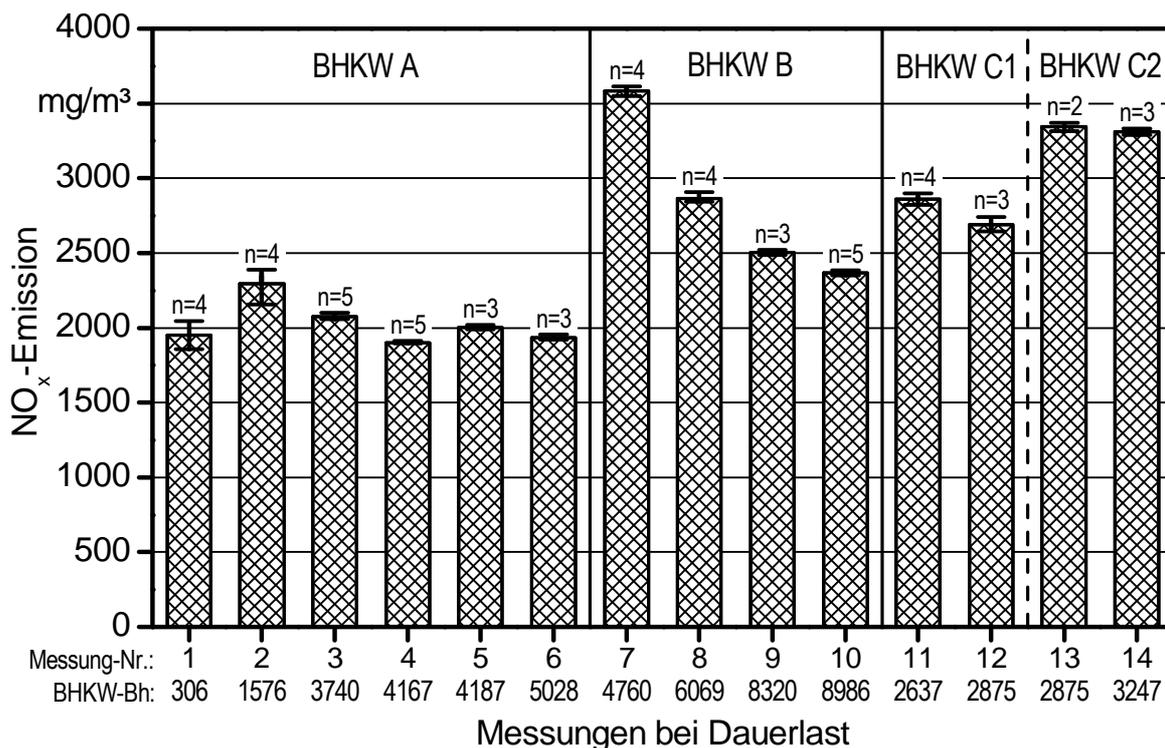


Abbildung 25: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; angegeben als NO<sub>2</sub>, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Im Gegensatz zu BHKW A ist bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen von **BHKW B** ein Rückgang über die vier Messtage von 3580 über 2870 und 2500 auf 2370 mg/m<sup>3</sup> zu beobachten. Der Untersuchungszeitraum von der ersten bis zur vierten wiederkehrenden Messung (Messungen 7, 8, 9 und 10) umfasst 4226 Betriebsstunden. Der Mittelwert aller vier Messungen beträgt 2830 mg/m<sup>3</sup>, bei einer Standardabweichung von 544 mg/m<sup>3</sup> und einem Variationskoeffizienten von 19 %. Deutlich niedriger liegen wiederum die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte der einzelnen Messungen. Sie betragen zwischen 14 und 30 mg/m<sup>3</sup>, die Variationskoeffizienten etwa 1 %.

Zwischen den Messungen 7 und 8 ist ein Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionen um ca. 20 % zu beobachten. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der BHKW-Motor, wie bereits erwähnt, aufgrund eines Schadens ausgetauscht werden musste. Da bei Messung 7 noch keine Messdatenerfassung von Betriebskenngrößen installiert war, kann der Grund für den beobachteten Rückgang der NO<sub>x</sub>-Emissionen nicht näher eingegrenzt werden.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen betragen für das Aggregat C1 von **BHKW C** bei Nennlast 2862 und 2691 mg/m<sup>3</sup> bei einem Mittelwert von 2777 mg/m<sup>3</sup>. Dagegen weist das Aggregat C2 mit 3345 und 3313 mg/m<sup>3</sup> durchschnittlich etwa 20 % höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen auf. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte an beiden Modulen von BHKW C variieren noch innerhalb der Messunsicherheit des Messverfahrens zwischen 23 und 48 mg/m<sup>3</sup>, die Variationskoeffizienten zwischen 1 und 2 %. Die deutlich geringeren NO<sub>x</sub>-

Emissionen von Aggregat C1 sind eine Folge des hohen Abgasgegendrucks aufgrund des defekten Rußfilters, welcher zu einem Rückstau von Verbrennungsabgas und damit zu einem unvollständigeren Ladungswechsel führte, was wie eine Abgasrückführung wirkt (Kapitel 2.4.3).

BHKW A, B und C unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der Stickstoffoxid-Emissionen. Diese betragen bei BHKW A im Mittel  $2026 \text{ mg/m}^3$ , bei BHKW B  $2830 \text{ mg/m}^3$ , bei Aggregat C1  $2777 \text{ mg/m}^3$  und bei Aggregat C2  $3329 \text{ mg/m}^3$ . Ausschlaggebend dafür sind primär das Verbrennungsverfahren und die Verbrennungstemperatur. Niedrigere Verbrennungstemperaturen, wie sie z. B. bei Vor- und Wirbelkammermotoren (BHKW A) vorkommen, führen im Vergleich zu direkt einspritzenden Motoren (BHKW B, C1 und C2) zu geringeren  $\text{NO}_x$ -Emissionen aufgrund der kleineren thermischen  $\text{NO}_x$ -Bildungsrate (Kapitel 2.2).

Die Stickstoffoxid-Emissionen der von PRANKL et al. (2005) [83] untersuchten BHKW variieren stark untereinander. Selbst bei den drei BHKW eines Herstellers mit gleichem Motorenfabrikat schwanken die mittleren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen zwischen  $1575$ ,  $1320$  und  $1977 \text{ mg/m}^3$ . Die beiden leistungsschwächeren BHKW weisen ein weitaus geringeres, das leistungsstärkere BHKW dagegen ein gleich hohes Emissionsniveau wie das vom gleichen Hersteller stammende BHKW A auf. Gründe hierfür werden nicht genannt.

Bei den Untersuchungen von DOBIASCH (2000) [29] wurden bei einem, im Vergleich zu BHKW A leistungsschwächeren BHKW, ebenfalls geringere  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $1597$  und  $1573 \text{ mg/m}^3$  ermittelt.

Im Gegensatz zu den Wirbelkammermotoren bei den Untersuchungen von PRANKL et al. (2005) [83] und DOBIASCH (2000) [29] waren bei den Messungen von STREIT und FRIEß (1998) [95] an einem direkt einspritzenden Motor mit  $3107$  bis  $3551 \text{ mg/Nm}^3$  deutlich höhere  $\text{NO}_x$ -Emissionen festzustellen, die über dem Niveau des baugleichen BHKW B liegen. Dies ist mitunter auf den Betrieb bei unterschiedlicher Generatorleistung zurückzuführen.

KAMPMANN (1994) [56] gibt für den gleichen Motor, allerdings mit Ladeluftkühlung,  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $2710 \text{ mg/m}^3$  ohne Katalysator und  $1400 \text{ mg/m}^3$  mit Katalysator, bei einer anzunehmenden voneinander abweichenden Motoreinstellung, an.

Die Untersuchungen von GLAß et al. (1991) [40], wo  $\text{NO}_x$ -Emissionen von  $3170 \text{ mg/m}^3$  ermittelt wurden, stimmen mit den eigenen Ergebnissen am baugleichen BHKW C sehr gut überein.

### 5.1.2.3 Gesamt-C

Die Gesamt-C-Emissionen sind in Abbildung 26 in dem für jedes der drei BHKW typischen Dauerbetriebszustand (Dauerlast) bei wiederkehrenden Emissionsmessungen dargestellt.

Auf insgesamt sehr niedrigem Niveau befinden sich die Gesamt-C-Emissionen von **BHKW A**. Sie betragen im Mittel  $4 \text{ mg/m}^3$  bei einer Standardabweichung von  $2 \text{ mg/m}^3$ . Mit zunehmenden Betriebsstunden steigt die Gesamt-C-Konzentration tendenziell von anfangs  $2 \text{ mg/m}^3$  bei Messung 1 bis auf  $6 \text{ mg/m}^3$  bei Messung 6 geringfügig an. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte der einzelnen Messungen liegen zwischen 0 und  $1 \text{ mg/m}^3$ . Der tendenzielle Anstieg der Gesamt-C-Emissionen kann bei den Messungen 4 und 5 durch mitverbranntes Motorenöl beim Plantotronic<sup>®</sup>-Schmiersystem begründet sein. Bei der Messung 6 können auch die niedrigeren Kraftstofftemperaturen infolge der verminderten Wärmeisolation (Ausbau der Schallschutzdämmung für die Aldehyd-Probenahme), ähnlich wie bei Kohlenmonoxid, zu einer Erhöhung der Gesamt-C-Emissionen beigetragen haben. Die Unterschiede der nahe der Nachweisgrenze des Messverfahrens von ca.  $2 \text{ mg/m}^3$  liegenden Ergebnisse von BHKW A sind aber dennoch wenig signifikant, da sie überwiegend noch im Bereich der Messgenauigkeit des Messverfahrens liegen.

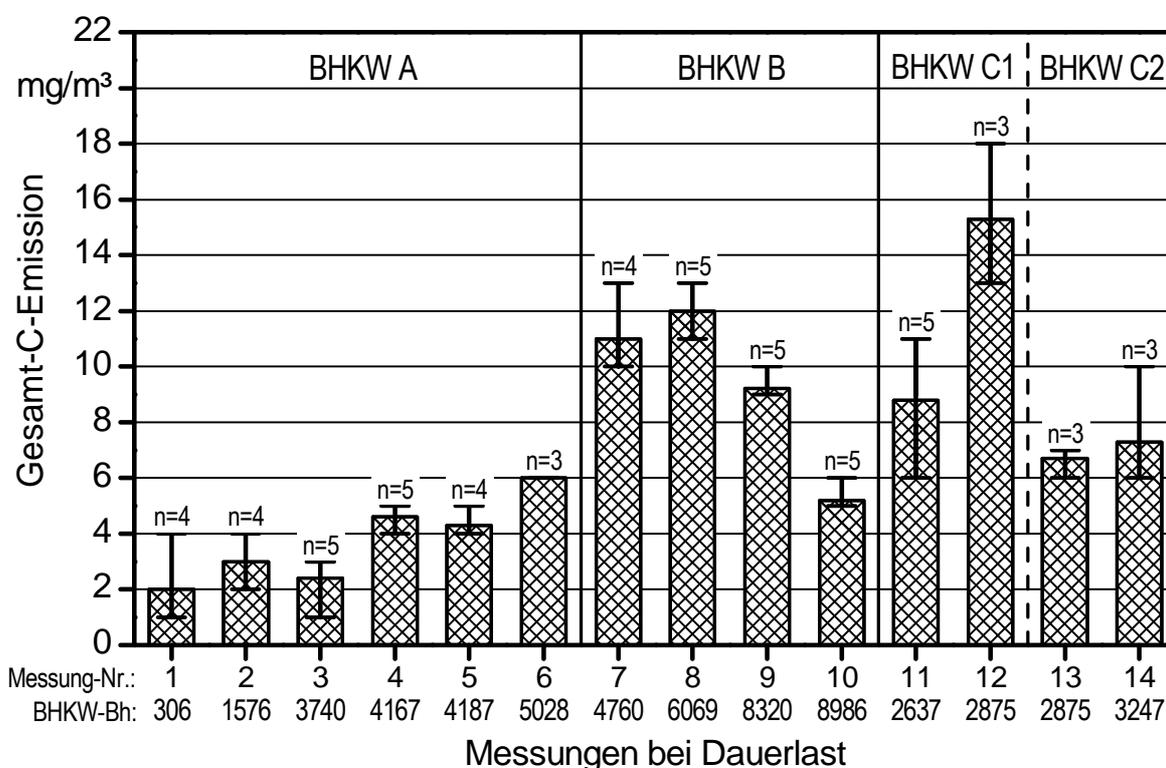


Abbildung 26: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Bei **BHKW B** ist ein Rückgang der Gesamt-C-Emissionen bei der dritten und vierten wiederkehrenden Messung zu beobachten. Die mittleren Gesamt-C-Emissionen von BHKW B betragen ca.  $9 \text{ mg/m}^3$  bei einer Spannweite von 5 bis  $12 \text{ mg/m}^3$ . Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte je Messung liegen unter  $1,5 \text{ mg/m}^3$ . Bei Messung 10, bei der das Aggregat nach zwischenzeitlicher Umstellung mit  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  anstatt der bis dahin üblichen  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben wurde, sind die geringsten Gesamt-C-Emissionen von BHKW B zu beobachten, was wie bei den  $\text{CO}$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionswerten, auf eine insgesamt verbesserte Verbrennungsgüte bei nennlastnaher Generatorleistung ( $60 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) hindeutet.

Die Gesamt-C-Emissionen von **BHKW C** betragen bei Aggregat C1 im Mittel  $12 \text{ mg/m}^3$  und bei Aggregat C2  $7 \text{ mg/m}^3$ . Wie bei den  $\text{CO}$ -Emissionen wird der höchste Wert ( $15 \text{ mg/m}^3$ ) bei BHKW C1 (Messung 12) ermittelt, was wiederum auf den defekten Partikelfilter zurückzuführen ist. Die Standardabweichungen betragen für beide Aggregate gleichermaßen etwa  $1 \text{ mg/m}^3$ .

BHKW A weist gegenüber den anderen beiden BHKW die geringsten Gesamt-C-Emissionen auf. Dies ist insbesondere auf die gute Gemischaufbreitung beim Wirbelkammer-Brennverfahren zurückzuführen. Die Unterschiede liegen aber ebenso wie die absoluten Werte auf sehr geringem Niveau, wenn bei BHKW B die nennlastnahe Betriebsweise und bei BHKW C das Aggregat C2 mit funktionstüchtigem Partikelfilter zum Vergleich herangezogen werden.

Die Ergebnisse von PRANKL et al. (2005) liegen mit 9 bis  $25 \text{ mg/m}^3$  aufgrund des fehlenden Oxidationskatalysators höher als beim vergleichbaren BHKW A der vorliegenden Untersuchung. Die Messungen von DOBIASCH (2000) [29], ebenfalls ohne Oxidationskatalysator, ergaben deutlich höhere Werte von 38,1 bzw.  $39,5 \text{ mg/m}^3$ .

Bei den Untersuchungen von STREIT und FRIEß (1998) [95] an einem BHKW mit Oxidationskatalysator waren, ähnlich wie bei den eigenen Messungen an BHKW B, sehr niedrige Gesamt-C-Emissionen von 4 und  $6 \text{ mg/m}^3$  zu verzeichnen.

An einem Aggregat des gleichen Typs wie BHKW C, jedoch ohne Oxidationskatalysator wurden bei GLAß et al. (1991) [40] Gesamt-C-Emissionen von  $19 \text{ mg/m}^3$  ermittelt, die über den Konzentrationen im Abgas von BHKW C liegen.

#### 5.1.2.4 Staub

Die Staub-Emissionen der drei BHKW sind in Abbildung 27 in dem jeweils typischen Dauerbetriebszustand (Dauerlast) bei wiederkehrenden Emissionsmessungen dargestellt.

Die Staub-Konzentrationen im Abgas von **BHKW A** betragen zwischen 60 und  $136 \text{ mg/m}^3$ , bei einem Mittelwert von  $80 \text{ mg/m}^3$ . Der höchste Wert wurde bei Messung 6

ermittelt und ist etwa doppelt so hoch wie der Mittelwert aus den vorangegangenen fünf Messungen. Bei Messung 6 wurden auch die höchsten CO- und Gesamt-C-Emissionswerte von BHKW A ermittelt. Dies kann einerseits an den kühleren Kraftstoff- und Ansauglufttemperaturen wegen des BHKW-Umbaus für die Aldehyd-Probenahme liegen, andererseits ist auch davon auszugehen, dass sich mit zunehmender Betriebsdauer eine schlechtere Gemischaufbereitung z. B. durch Ablagerungen an Einspritzdüsen abzeichnet. Hierzu kann auch der erhöhte Phosphorgehalt von 42 mg/kg im Kraftstoff („RK6“) sowie die ebenfalls erhöhten Phosphorgehalte bei den vorangegangenen Messungen beigetragen haben. Es wird vermutet, dass die Ablagerungsbildung mit steigendem Phosphorgehalt im Kraftstoff zunimmt [59].

Die Ergebnisse zeigen, dass die Halbstundenmittelwerte der Staub-Emissionen während einer Messung meist höhere Abweichungen voneinander aufweisen, als die gasförmigen Emissionskomponenten. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte einer Messung liegen zwischen 6 und 20 mg/m<sup>3</sup>, die Standardabweichung der sechs Messungen untereinander bei 29 mg/m<sup>3</sup>. Die Variationskoeffizienten betragen entsprechend bei den einzelnen Messungen durchschnittlich etwa 14 % und über alle sechs Messungen von BHKW A hinweg 37 %.

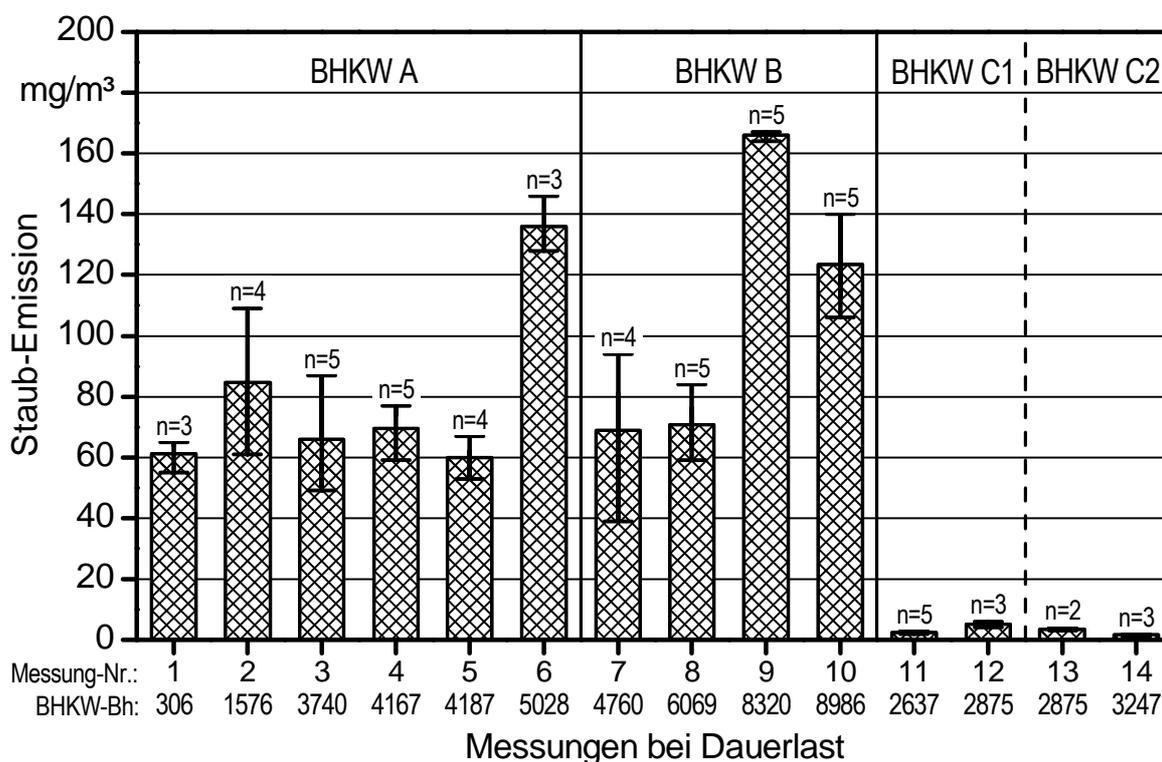


Abbildung 27: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Bei den ersten beiden Messungen bei **BHKW B** wurden durchschnittliche Staubkonzentrationen im Abgas von  $70 \text{ mg/m}^3$  ermittelt, wohingegen bei den darauffolgenden Messungen mit  $166 \text{ mg/m}^3$  und  $123 \text{ mg/m}^3$  die etwa 2,4- bzw. 1,8-fachen Staubkonzentrationen festgestellt wurden. Die Standardabweichungen bei den Messungen von BHKW B liegen zwischen 1 und  $24 \text{ mg/m}^3$  (Mittelwert  $13 \text{ mg/m}^3$ ), die Variationskoeffizienten zwischen 1 und 35 % (Mittelwert 16 %).

Die vergleichsweise hohen Staubkonzentrationen bei BHKW B bei den Messungen 9 und 10 sind im Falle der Messung 9 auf die insgesamt höhere thermische Belastung des Aggregats, den hohen Abgasgegendruck und die verkokten Einspritzdüsen (Kapitel 2.4.6 und Tabelle 19) und im Falle von Messung 10 auf die höhere Generatorleistung zurückzuführen.

Bedingt durch das Vorhandensein eines Partikelfilters liegen die Staub-Emissionen von **BHKW C1** und **C2** bei lediglich 2 bis  $5 \text{ mg/m}^3$  (knapp über der Nachweisgrenze) und damit deutlich niedriger als bei den anderen beiden BHKW. Die Standardabweichungen der Halbstundenmittelwerte bei den einzelnen Messungen betragen ca.  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Die breiteren Streuungen der Halbstundenmittelwerte einer Messung sind zum einen auf größere verfahrensbedingte Ungenauigkeiten bei der Staubprobenahme und bei der gravimetrischen Bestimmung der Partikelmasse zurückzuführen. Die Messungenauigkeit wird mit bis zu 10 % angegeben (Kapitel 4.2.2). Zum anderen kann die Staubkonzentration im Abgas, trotz stationärer Betriebsbedingungen des Aggregats, aufgrund der komplexen Bildungsmechanismen in Abhängigkeit von den Parametern der Gemischbildung und Verbrennung kurzfristig auch stärkeren Schwankungen unterworfen sein.

DOBIASCH (2000) [29] ermittelte Staub-Emissionen von ca.  $40 \text{ mg/m}^3$  und damit niedrigere Werte als bei den eigenen Emissionsmessungen an BHKW A.

Auch die Ergebnisse von STREIT und FRIEß (1998) [95] liegen mit 32 und  $55 \text{ mg/m}^3$  darunter. Ursachen dafür können der leistungsschwächere Motor bei den Untersuchungen von DOBIASCH (2000) [29] und der vergleichsweise neue Motor bei den Messungen von STREIT und FRIEß (1998) [95] sein. Letzterer ist durch ein insgesamt sehr niedriges Emissionsniveau auch weiterer Verbrennungsprodukte aus unvollständiger Verbrennung, wie CO und Gesamt-C, gekennzeichnet.

KAMPMANN (1994) [56] stellte ebenfalls geringfügig niedrigere Staub-Emissionen ( $62 \text{ mg/m}^3$  bzw.  $54 \text{ mg/m}^3$ ) fest, als die eigenen Ergebnisse beim vergleichbaren BHKW B zeigen. Die Abweichungen liegen jedoch innerhalb der Spannweiten der Halbstundenmittelwerte bei den Messungen 7 und 8.

### 5.1.2.5 Aldehyde

Neben den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten und den Gesamt-C-Emissionen wurden am **BHKW A** bei zwei Prüfläufen auch die Aldehydkonzentrationen im Abgas bestimmt. Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse der Messungen, die vom TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb GmbH durchgeführt wurden [103]. Die Schadstoffkonzentrationen im Abgas betragen in etwa für Formaldehyd 1,1 mg/m<sup>3</sup>, für Acrolein 0,8 mg/m<sup>3</sup>, für Acetaldehyd 0,5 mg/m<sup>3</sup> und für Propionaldehyd 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Bei Propionaldehyd ist zu berücksichtigen, dass bei drei der sechs Messungen die Nachweisgrenze von 0,05 mg/m<sup>3</sup> unterschritten wird. Die Konzentration von Butyraldehyd liegt bei allen Messungen unterhalb dieser Nachweisgrenze.

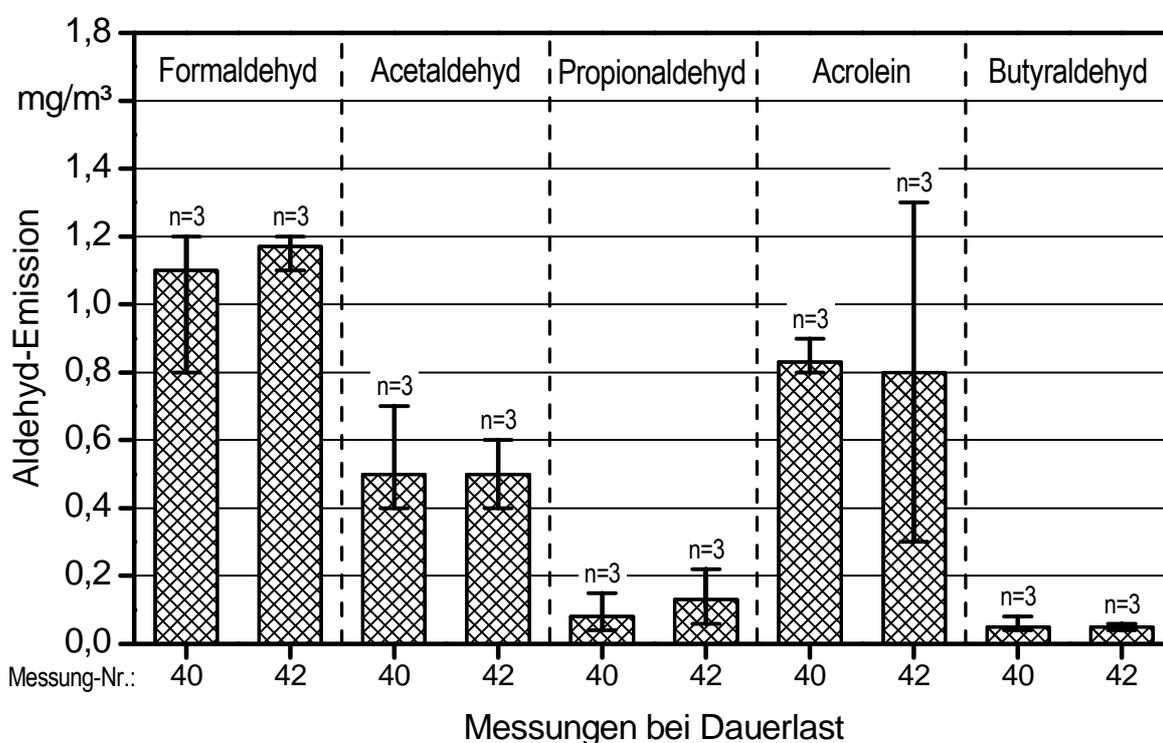


Abbildung 28: Aldehyd-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei Dauerlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die mittleren Konzentrationen aller gemessenen Aldehydkomponenten betragen in der Summe 2,6 mg/m<sup>3</sup> bei einer Standardabweichung von 0,4 mg/m<sup>3</sup> und einem Variationskoeffizienten von 17 %. Die Aldehydkonzentration im Abgas entspricht damit etwa 43 % der am selben Messtag ermittelten Gesamt-C-Emissionen von BHKW A. Verfahrensbedingt sind die Messwerte allerdings mit einer großen Messunsicherheit von etwa 0,5 mg/m<sup>3</sup> behaftet (Tabelle 16).

### 5.1.3 Einfluss von Teillastbetrieb

Abbildung 29 zeigt die CO-Emission von BHKW A bei einem Teillastbetrieb von 5 kW<sub>el</sub> (entspricht 62,5 % der Nennlast) im Vergleich zu den korrespondierenden Emissionswerten bei Dauerlastbetrieb von 8 kW<sub>el</sub> und von BHKW B einmal bei Teillastbetrieb von 21 kW<sub>el</sub> (entspricht 35 % der Nennlast) im Vergleich zur eingestellten Dauerlast von 40 kW<sub>el</sub> (Messung 7) und ein andermal bei Teillastbetrieb von 40 kW<sub>el</sub> (entspricht 66,7 % der Nennlast) im Vergleich zu dem bei dieser Messung korrespondierenden Dauerlastbetrieb bei 50 kW<sub>el</sub> (entspricht 83,3 % der Nennlast).

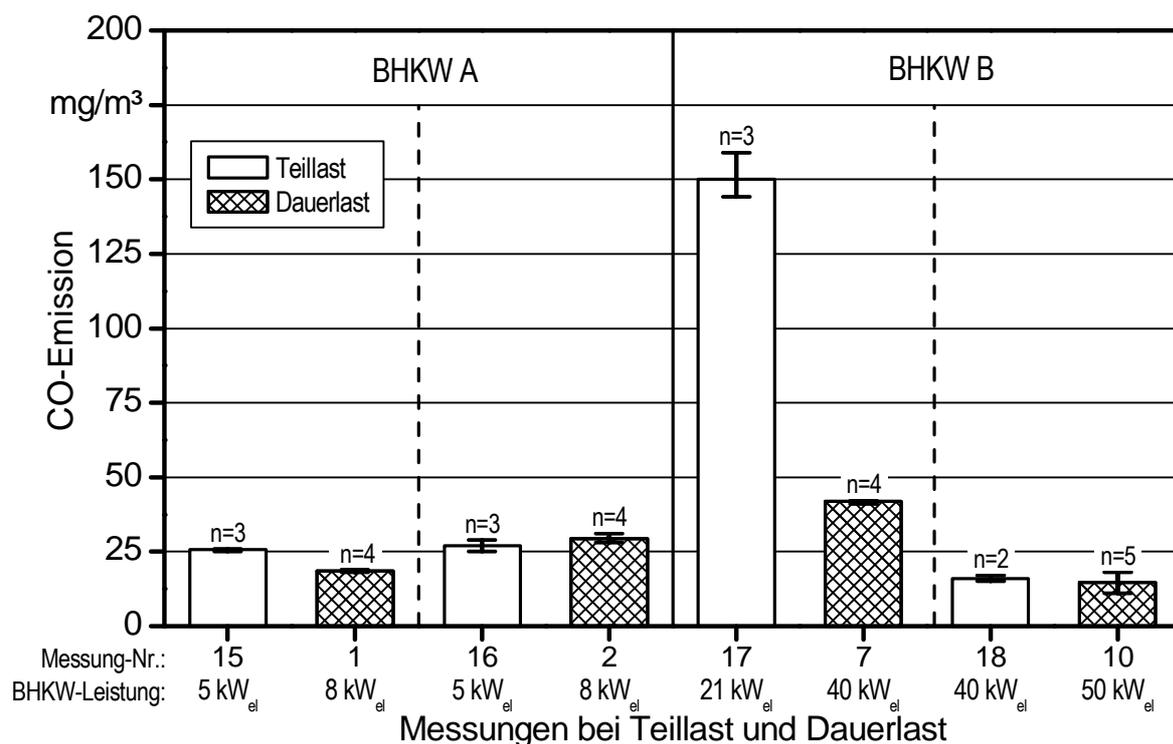


Abbildung 29: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Ein Teillastbetrieb von 5 kW<sub>el</sub> führt bei BHKW A in einem Fall (Messung 15) zu geringfügig höheren Kohlenmonoxid-Emissionen (26 mg/m<sup>3</sup>) gegenüber Dauerlast (19 mg/m<sup>3</sup>), wohingegen im anderen Fall (Messung 16 gegenüber Messung 2) keine Veränderung zu beobachten ist. Die Unterschiede liegen zwar innerhalb der Ungenauigkeit des Messverfahrens, aufgrund der engen Streubreite der Einzelmessungen zeichnet sich dennoch ein Einfluss der Last auf die CO-Emissionen ab.

In Abbildung 30 sind die CO-Emissionen von BHKW A bei zwei Lastwechselzyklen zwischen 2 und 8 kW<sub>el</sub> dargestellt. Zur übersichtlicheren Darstellung sind die einzelnen Messergebnisse je Lastpunkt miteinander verbunden, obgleich über den genauen Verlauf

der Kurve zwischen den Messpunkten keine Aussage getroffen werden kann. Dabei wird deutlich, dass die CO-Emissionen zwischen 8 kW<sub>el</sub> (Nennlast) und 4 kW<sub>el</sub> langsam aber kontinuierlich von ca. 52 auf 84 mg/m<sup>3</sup> ansteigen. Unterhalb von 4 kW<sub>el</sub> (50 % Teillast) kommt es zu einem starken Anstieg auf eine CO-Konzentration, die um das 5- bis 6-fache über der Konzentration bei Nennlast liegt. Dies ist auf eine zunehmend unvollständigere Verbrennung bei abnehmender Last und Brennraumtemperatur zurückzuführen. Gleichzeitig nimmt im Schwachlastbetrieb die Aktivität des Oxidationskatalysators aufgrund zu geringer Abgastemperaturen schlagartig ab.

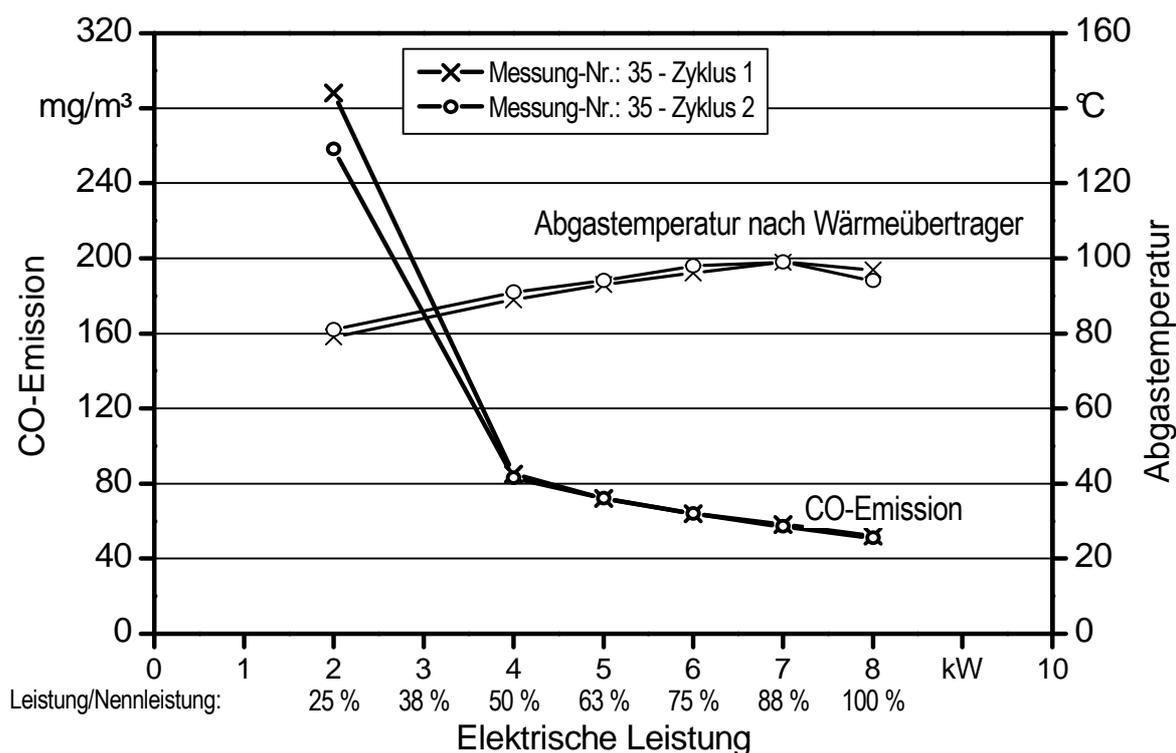


Abbildung 30: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Bei BHKW B ist gegenüber BHKW A im Teillastbetrieb mit 150 mg/m<sup>3</sup> eine drei- bis vierfach höhere CO-Konzentration im Abgas als beim Dauerlastbetrieb von 40 kW<sub>el</sub> zu beobachten (Abbildung 29). Als Nennlast wird vom Hersteller eine elektrische Leistung von 60 kW angegeben. Somit entspricht der Teillastbetrieb mit 21 kW<sub>el</sub> nur etwa 35 % der angegebenen Nennlast. Wird BHKW B anstatt der ursprünglich eingestellten 40 kW<sub>el</sub> mit 50 kW<sub>el</sub> Dauerlast betrieben, wirkt sich eine Lastabsenkung auf 40 kW<sub>el</sub> dagegen nicht auf die Höhe der CO-Emissionen aus (Messungen 18 und 10). Hieraus kann gefolgert werden, dass ein Teillastbetrieb im nennlastnahen Bereich, wie schon bei BHKW A, keinen oder nur einen geringfügigen Anstieg des CO-Gehalts im Abgas zur Folge hat, wohingegen es bei Schwachlastbetrieb zu einer deutlichen Zunahme kommt. Die trotz gleich hoher Generatorlast niedrigeren CO-Emissionen bei Messung 18 gegenüber

Messung 7 könnten darin begründet liegen, dass sich bei der dazwischen erfolgten Umstellung der Dauerlast von 40 auf 50 kW<sub>el</sub> eine nachhaltige Verbesserung der motorischen Verbrennung verbunden mit einem Rückgang von Ablagerungen ergeben hat.

In Abbildung 31 sind die CO-Emissionen des BHKW B bei einem Lastwechsel zwischen 20 und 45 kW<sub>el</sub> und bei einem weiteren Lastwechsel zwischen 20 und 60 kW<sub>el</sub> dargestellt. Wie bei Abbildung 30 sind die einzelnen Messpunkte der besseren Übersicht wegen miteinander verbunden.

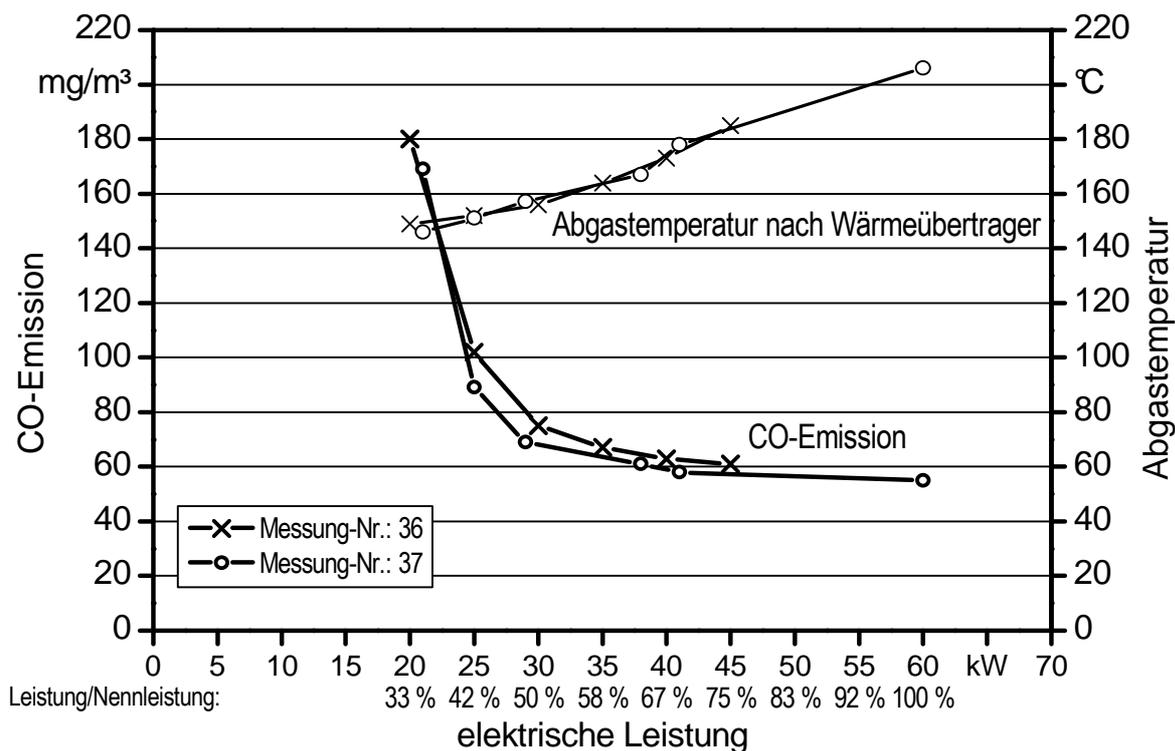


Abbildung 31: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Entsprechend den Ergebnissen bei BHKW A ist auch bei BHKW B ein mäßiger Anstieg der CO-Emissionen mit abnehmender Generatorleistung bis zu einer Leistung von ca. 50 % der Nennleistung und darunter ein deutlicher Anstieg auf das ca. 3-fache des Nennlastniveaus zu beobachten.

Bei STREIT und FRIEB (1998) [95] wurden bei Teillastbetrieb von 66 % der Nennlast nach dem Oxidationskatalysator mit 22 mg/m<sup>3</sup> auch etwa die dreifachen CO-Emissionen im Vergleich zu Nennlast ermittelt, was die eigenen Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt, wenn auch auf einem anderen absoluten Konzentrationsniveau und bei einem steileren Kurvenverlauf.

Wie Abbildung 32 zeigt, ergibt ein Teillastbetrieb mit  $5 \text{ kW}_{\text{el}}$  gegenüber dem Betrieb mit  $8 \text{ kW}_{\text{el}}$  bei BHKW A einmal um 28 % höhere **Stickstoffoxid-Emissionen** ( $2492 \text{ mg/m}^3$ ) als bei der korrespondierenden Nennlast-Messung 1 ( $1953 \text{ mg/m}^3$ ) und einmal um 43 % höhere  $\text{NO}_x$ -Werte ( $3278 \text{ mg/m}^3$ ) als bei der Nennlast-Messung 2 ( $2295 \text{ mg/m}^3$ ). In Abbildung 33 sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen von BHKW A bei einem Lastwechselzyklus dargestellt. Demnach bestätigt sich der Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit abnehmender Generatorlast.

Im Gegensatz zu BHKW A zeigen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen von BHKW B ein anderes Verhalten. Bei Teillast liegen die  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Abgas um 9 % (Messung 17) bzw. 6 % (Messung 18) unter dem Dauerlastniveau (Abbildung 32). Grund dafür ist die bei dem direkt einspritzenden BHKW B bei niedrigerer Last und Brennraumtemperatur kleinere thermische  $\text{NO}_x$ -Bildungsrate (Kapitel 2.4.3). Gleiches bestätigt sich auch im Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei zwei Lastwechselzyklen in Abbildung 34.

Die Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungen von STREIT und FRIEB (1998) [95] überein, wonach der Teillastbetrieb mit 66 % eines BHKW mit direkt einspritzendem Motor zu einem Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen um mehr als 400 bzw. 700  $\text{mg/m}^3$  gegenüber der Konzentration von  $3551 \text{ mg/m}^3$  bei Nennlast führt.

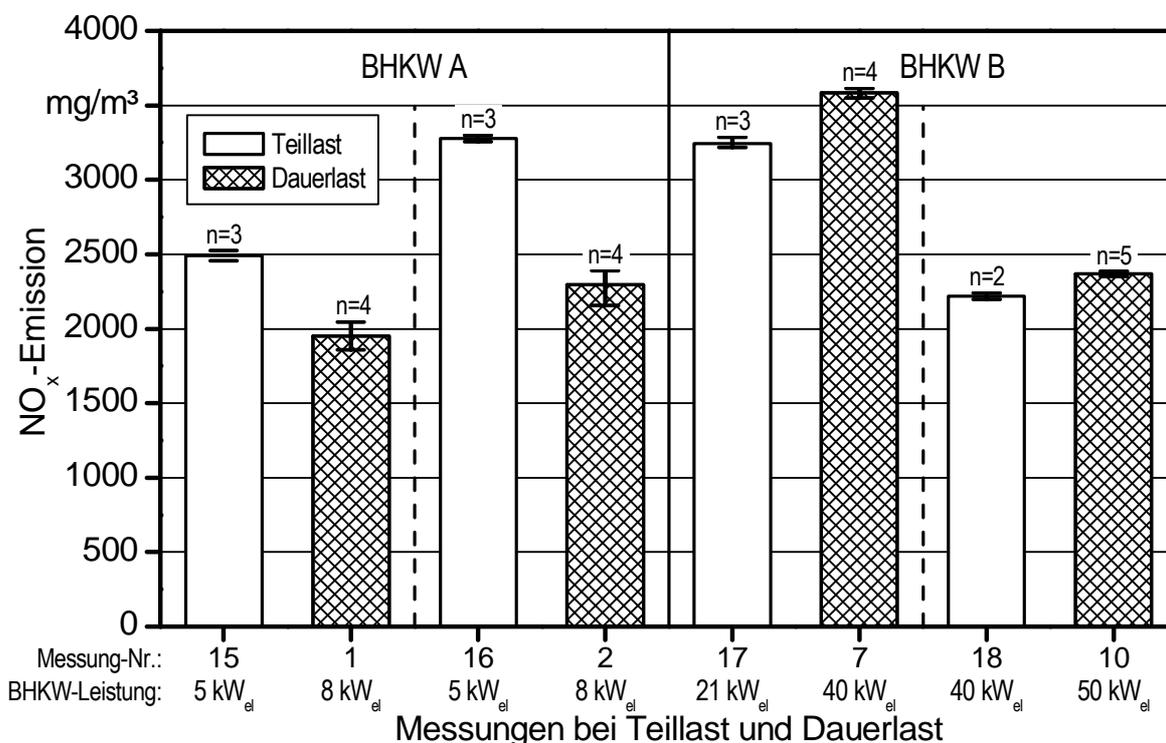


Abbildung 32:  $\text{NO}_x$ -Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 %  $\text{O}_2$ )

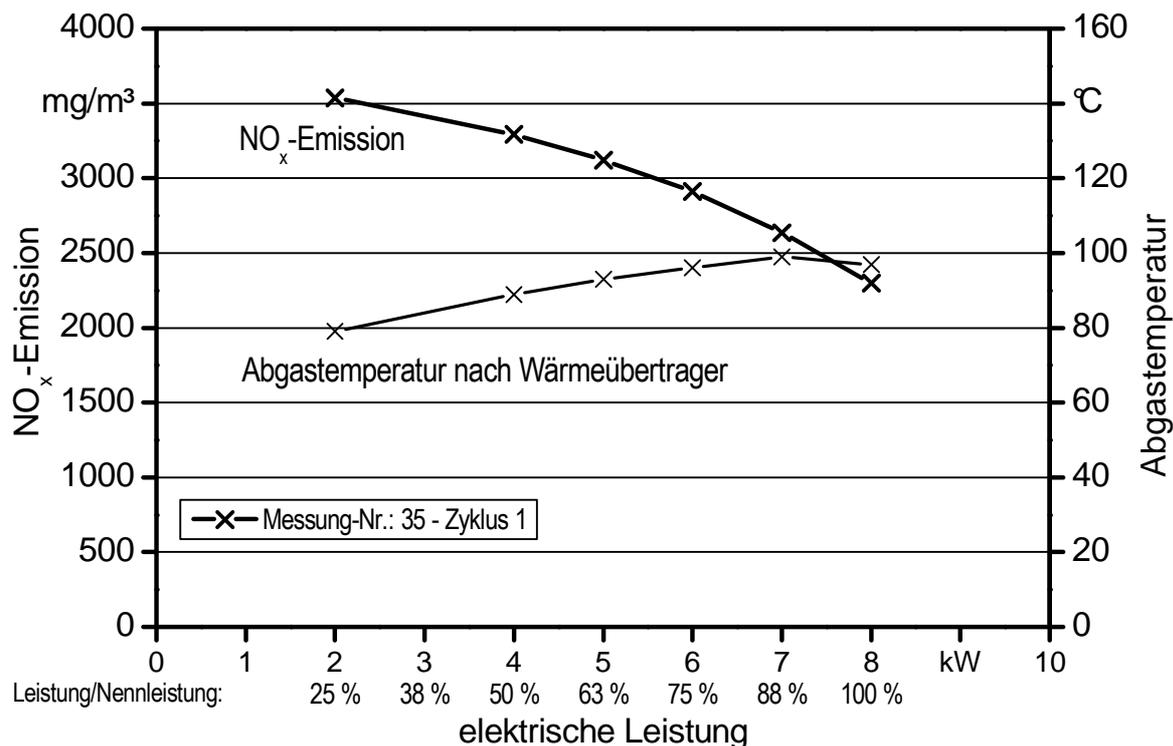


Abbildung 33: NO<sub>x</sub>-Emission von Pflanzenöl-BHKW A bei einem Lastwechselzyklus (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

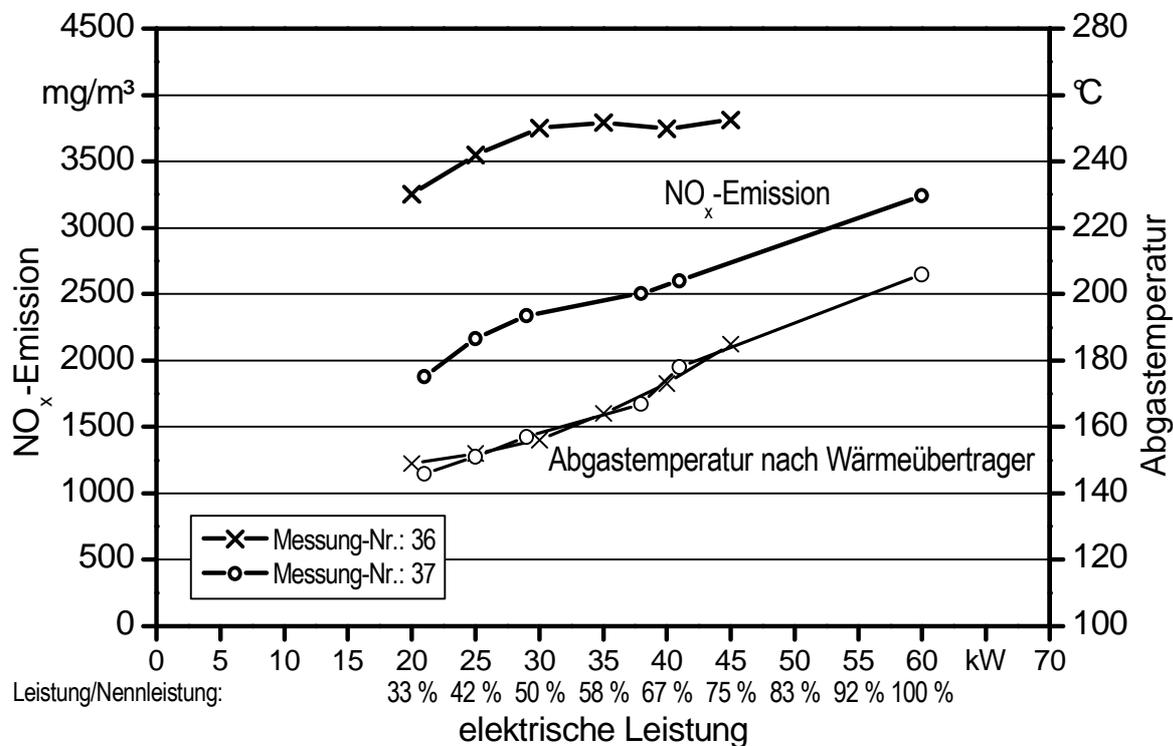


Abbildung 34: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die **Gesamt-C-Emissionen** zeigen im Teillastbetrieb ein ähnliches Verhalten wie die CO-Emissionen. Bei BHKW A sind beim Teillastbetrieb nur geringfügig höhere Gesamt-C-Emissionen als bei Nennlast zu verzeichnen. Diese liegen innerhalb der Messunsicherheit. Dagegen zeigt BHKW B einen deutlichen Anstieg beim Teillastbetrieb von 21 kW<sub>el</sub> (Teillast von 35 % bezogen auf Nennlast) im Vergleich zur Dauerlast bei 40 kW<sub>el</sub> (Teillast von 67 % bezogen auf Nennlast) auf mehr als das 10-fache (Abbildung 35). In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind die Gesamt-C-Konzentrationen im Abgas von BHKW A und BHKW B bei je zwei Lastwechselzyklen dargestellt. Wie bei den CO-Emissionen ist auch hier kein oder nur ein geringfügiger Anstieg zwischen dem Betrieb bei Nennleistung und 50 %-iger Teillast erkennbar. Bei weiter abnehmender Generatorlast kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Gesamt-C-Emissionen auf das drei- bis sechsfache gegenüber Nennleistung. Hauptgrund dafür ist, wie bei den CO-Emissionen, die abnehmende Aktivität des Oxidationskatalysators bei sinkenden Abgastemperaturen. Daneben kommt es vermehrt zur Anreicherung von Kohlenwasserstoffverbindungen im Abgas, die aus teil- und unverbrannten Kraftstoffanteilen herrühren (Kapitel 2.4.4).

Bei dem von STREIT und FRIEB (1998) [95] untersuchten BHKW kommt es ebenso wie bei BHKW A und B bei Teillast zu höheren Gesamt-C-Emissionen als bei Nennlast. Es ist ein Anstieg von 5 auf 12 mg/m<sup>3</sup> nach dem Oxidationskatalysator und von ca. 50 auf 148 mg/m<sup>3</sup> vor dem Oxidationskatalysator zu verzeichnen.

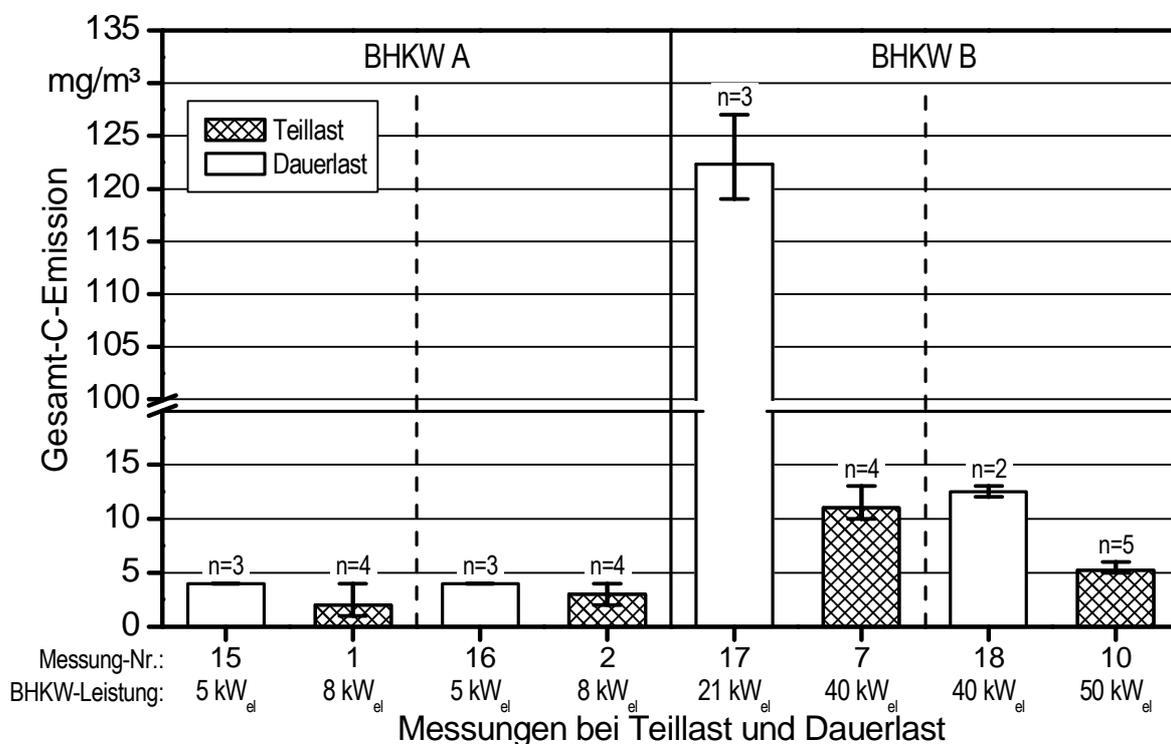


Abbildung 35: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

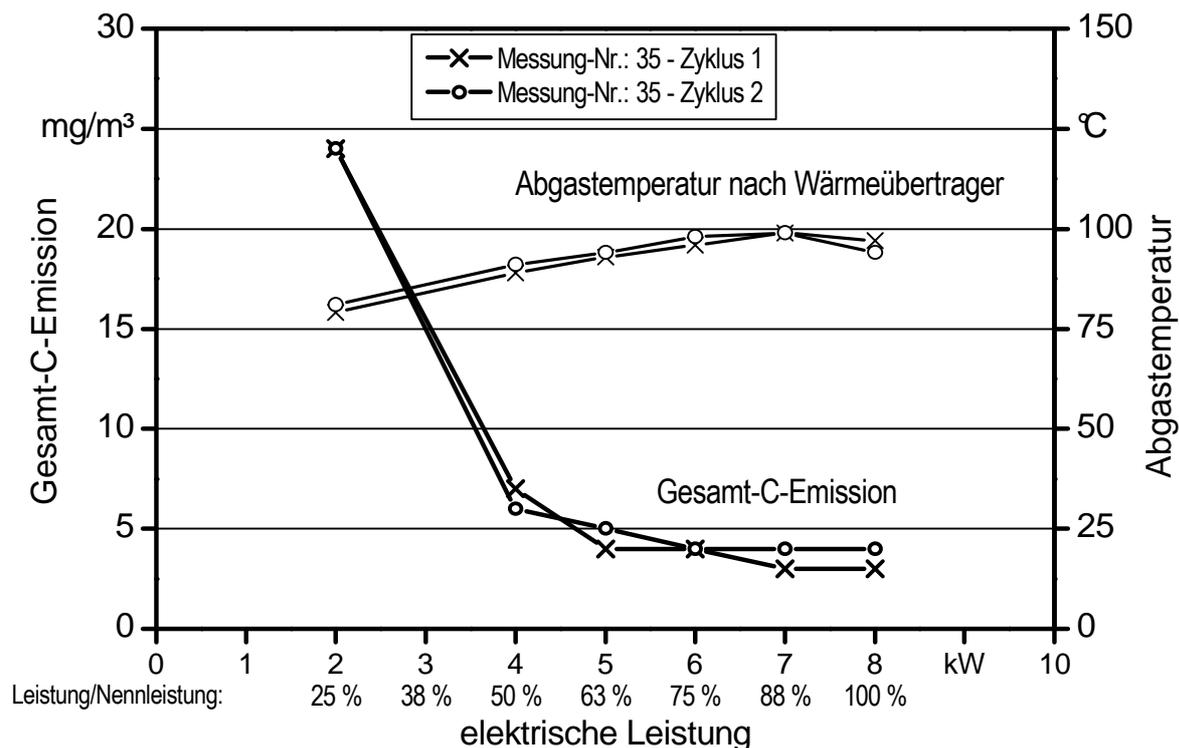


Abbildung 36: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

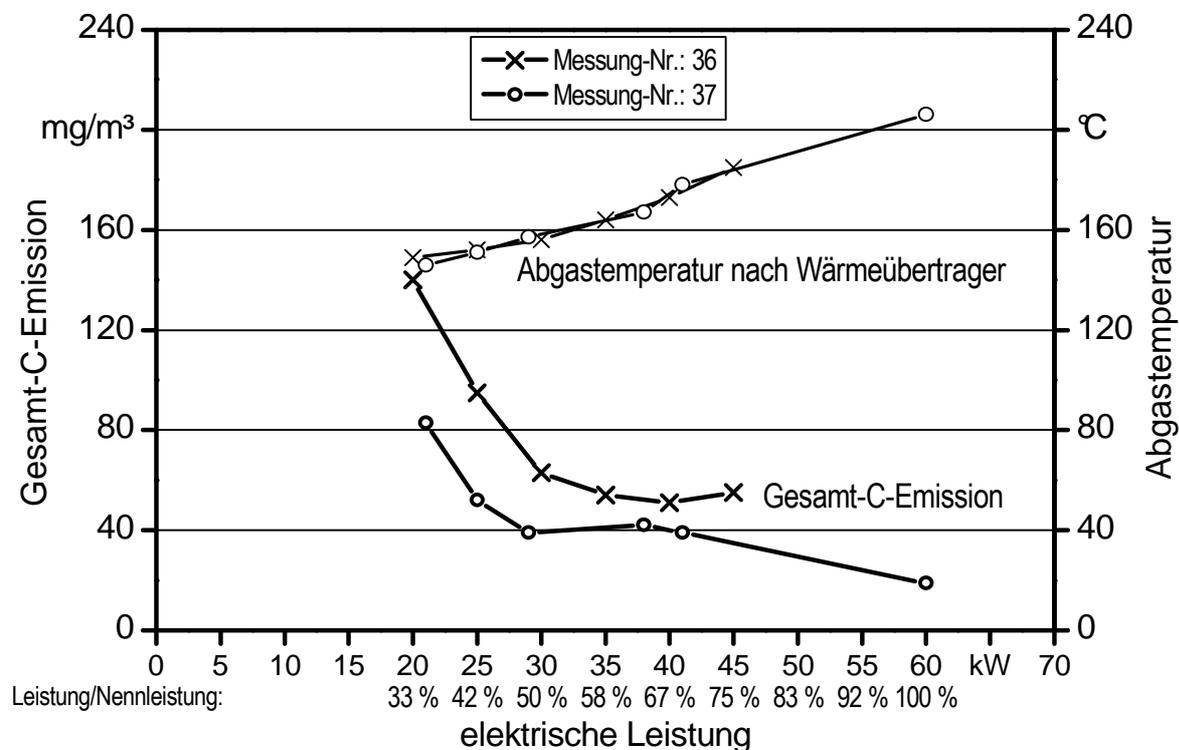


Abbildung 37: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW B bei zwei Lastwechselzyklen (2-Minuten-Mittelwerte, bezogen auf trockenes Abgas unter Normbedingungen und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Im Gegensatz zu den gasförmigen Emissionskomponenten ist bei den **Staub-Emissionen** im Teillastbetrieb von BHKW A ( $5 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) ein deutlicher Rückgang auf eine Konzentration von ca. 12 bis  $15 \text{ mg/m}^3$  festzustellen (Abbildung 42). Dies entspricht ca. 17 % der bei Nennlast ( $8 \text{ kW}_{\text{el}}$ ) emittierten Staubmenge. Die geringeren Staub-Emissionen des Wirbelkammermotors bei Teillast sind unter anderem auf eine verbesserte Rußoxidation aufgrund des höheren Sauerstoffgehalts in der Verbrennungsluft zurückzuführen.

Bei BHKW B kommt es beim Betrieb mit  $21 \text{ kW}_{\text{el}}$  zu etwa 50 % höheren Staub-Emissionen als bei Dauerlast mit  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  (Messungen 17 und 7). Wird jedoch der Teillastbetrieb bei  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  mit dem Dauerlastbetrieb bei  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  verglichen so sind die Staub-Emissionen um 22 % geringer als beim Betrieb mit  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ . (Messungen 18 und 10). Dies deutet darauf hin, dass es bei nennlastnahem Teillastbetrieb erst zu einem Rückgang der Staub-Emissionen aufgrund vermehrter Rußoxidation durch den höheren Sauerstoffgehalt und der längeren Verweilzeit des Brenngases im Brennraum kommt, bevor mit weiter sinkender Last ein Anstieg der Staub-Emissionen aufgrund abnehmender Verbrennungstemperaturen und verstärkter Auftretens von Zonen „fetten“ Gemisches durch schlechtere Kraftstoffaufbereitung und -verteilung zu verzeichnen ist (Kapitel 2.4.6). Die Abweichungen der Staub-Emissionen zwischen den beiden Messungen bei  $40 \text{ kW}_{\text{el}}$  liegen innerhalb der ermittelten Spannweite der Halbstundenmittelwerte.

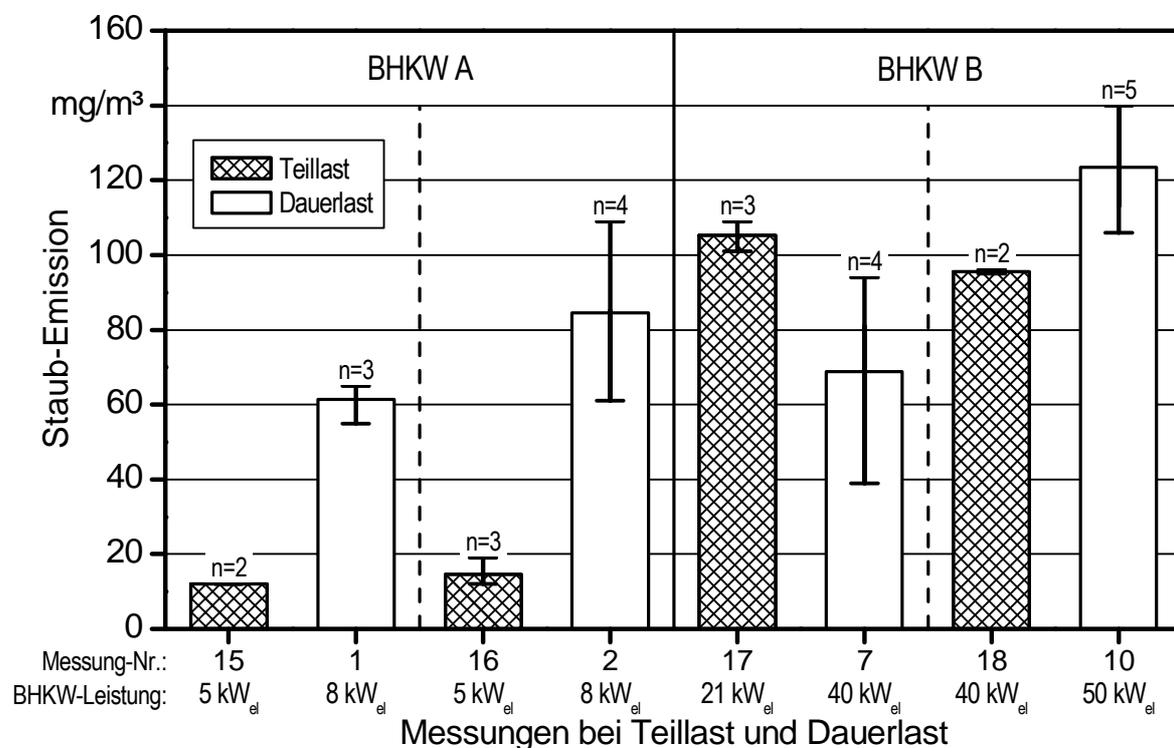


Abbildung 38: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A und B bei Teillast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 %  $\text{O}_2$ -Gehalt)

STREIT und FRIEB (1998) [95] stellen eine Zunahme der Staub-Emissionen von 32 auf 62 mg/m<sup>3</sup> beim Betrieb mit Teillast (66 % im Vergleich zu Nennlast) fest. Dies weicht von den eigenen Ergebnissen insofern ab, dass bei BHKW C1 ein Anstieg der Staub-Emissionen erst in einem niedrigeren Teillastbereich zu beobachten ist. Werden die Staub-Emissionen vor dem Oxidationskatalysator betrachtet, so ist bei den Untersuchungen von STREIT und FRIEB (1998) [95] kein signifikanter Einfluss erkennbar, da die beiden Messwerte bei Nennlast einmal über und einmal unter dem Wert bei Teillast liegen. Möglicherweise ist dies auch auf die sehr kurzen Abgasberuhigungsstrecken vor der Staub-Probennahme zurückzuführen, die infolge der baulichen Ausführung des Abgas-systems in Kauf genommen werden mussten.

#### 5.1.4 Einfluss der Kaltstartphase

Zur Bestimmung des Emissionsverhaltens in der Kaltstartphase wurden die Messungen während der ersten 30 Minuten BHKW-Betrieb, beginnend mit dem Anlassen des kalten Motors, durchgeführt. In Abbildung 39 sind die **CO-Emissionen** während der Kaltstartphase von BHKW A, B und C1 dargestellt. Sie liegen bei allen Messungen erwartungsgemäß höher als bei Nennlastbetrieb.

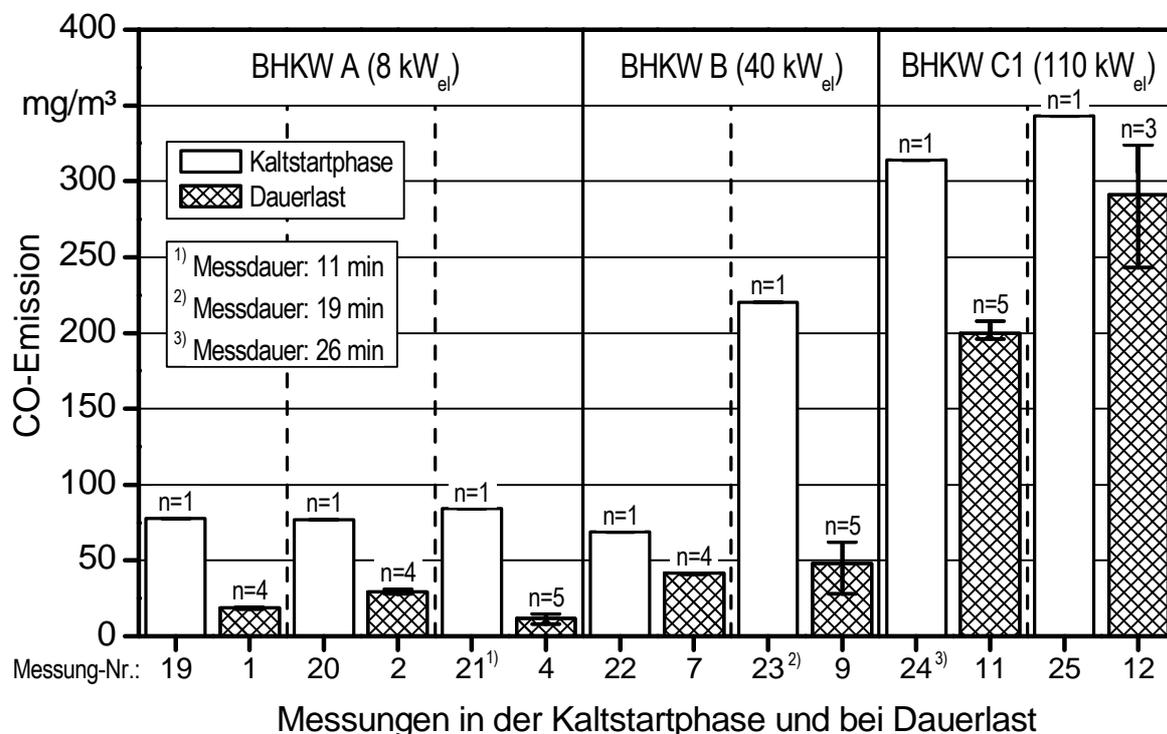


Abbildung 39: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B und C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Bei BHKW A wurden während der Kaltstartphase ca. 3- bis 7-mal höhere Kohlenmonoxid-Emissionen ermittelt als bei Nennlastbetrieb. Der größte Unterschied ist zwischen den Messungen 21 und 4 zu verzeichnen. Dies liegt zum Teil auch daran, dass die Emissionsmessung bei Messung 21 nicht 30 Minuten sondern lediglich 11 Minuten erfolgte und somit die frühe Kaltstartphase eine stärkere Gewichtung erhält. Das vorzeitige Beenden der Emissionsmessungen ist dadurch begründet, dass bei der Staubprobennahme ein starker Druckanstieg am Filter zu verzeichnen war, was eine halbstündige Absaugung nicht zuließ. Die Gründe für die höheren CO-Emissionen während der Startphase liegen an den kalten Brennraumwänden, der niedrigeren Verbrennungstemperatur sowie an der anfänglich noch nicht erreichten Betriebstemperatur und damit geringen Umsetzungsrate des Oxidationskatalysators.

Bei BHKW B sind die CO-Emissionen während des Kaltstarts im Vergleich zum Dauerlastbetrieb um das 1,6-fache (Messung 22) bzw. das 4,6-fache (Messung 23) höher. Auch bei Messung 23 wurde wegen des starken Druckanstiegs am Filter bei der Staubprobennahme der Mittelwert lediglich aus den ersten 19 Minuten gebildet, so dass hierbei auch die frühe Kaltstartphase eine höhere Gewichtung erhält.

Bei BHKW C1 ist der Unterschied zwischen der Startphase und dem Dauerlastbetrieb mit den 1,4- bzw. 1,2-fachen Kohlenmonoxid-Konzentrationen im Abgas im Vergleich zu BHKW A und BHKW B geringer, allerdings bei deutlich höheren absoluten Emissionen.

Die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** von BHKW A sind, wie aus Abbildung 40 hervorgeht, in der Kaltstartphase des Motors bei Messung 19 unverändert und bei den Messungen 20 und 21 etwa 10 bis 16 % geringer als beim jeweils korrespondierenden Nennlastbetrieb. Bei BHKW B sind ebenfalls geringfügig niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen zu beobachten. Gleiches zeigt sich auch bei BHKW C1, bei dem die NO<sub>x</sub>-Werte in der Anfahrtsphase 3 bis 4 % unterhalb des Dauerlastniveaus liegen. Für die während der Kaltstartphase geringfügig niedrigeren NO<sub>x</sub>-Emissionen sind die tendenziell tieferen Verbrennungstemperaturen ausschlaggebend.

Die **Gesamt-C-Emissionen** sind in Abbildung 41 dargestellt. Sie verhalten sich bei allen drei BHKW weitgehend analog zu den CO-Emissionen. Während der Kaltstartphase kommt es fast durchweg zu 2- bis 5-fach höheren Gesamt-C-Emissionen als bei Nennlastbetrieb. Einzige Ausnahme bildet bei BHKW C1 die Messung 25, bei der die Gesamt-C-Emissionen in der Kaltstartphase nur 40 % der Konzentrationen bei Nennlast (Messung 12) betragen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass sich bei Messung 12 ein Schaden am Partikelfilter abzeichnete, was in der Folge zu einem höheren Abgasgegendruck führte. Der geringere Abgasvolumenstrom bei langsamer Leistungserhöhung in der Kaltstartphase könnte sich günstig hinsichtlich eines niedrigeren Abgasgegendrucks und verminderter Gesamt-C-Emissionen ausgewirkt haben. Daneben ist jedoch auch die geringere Belastbarkeit der Messergebnisse zu beachten, da Wiederholungsmessungen zum Emissionsverhalten in der Kaltstartphase nicht möglich waren.

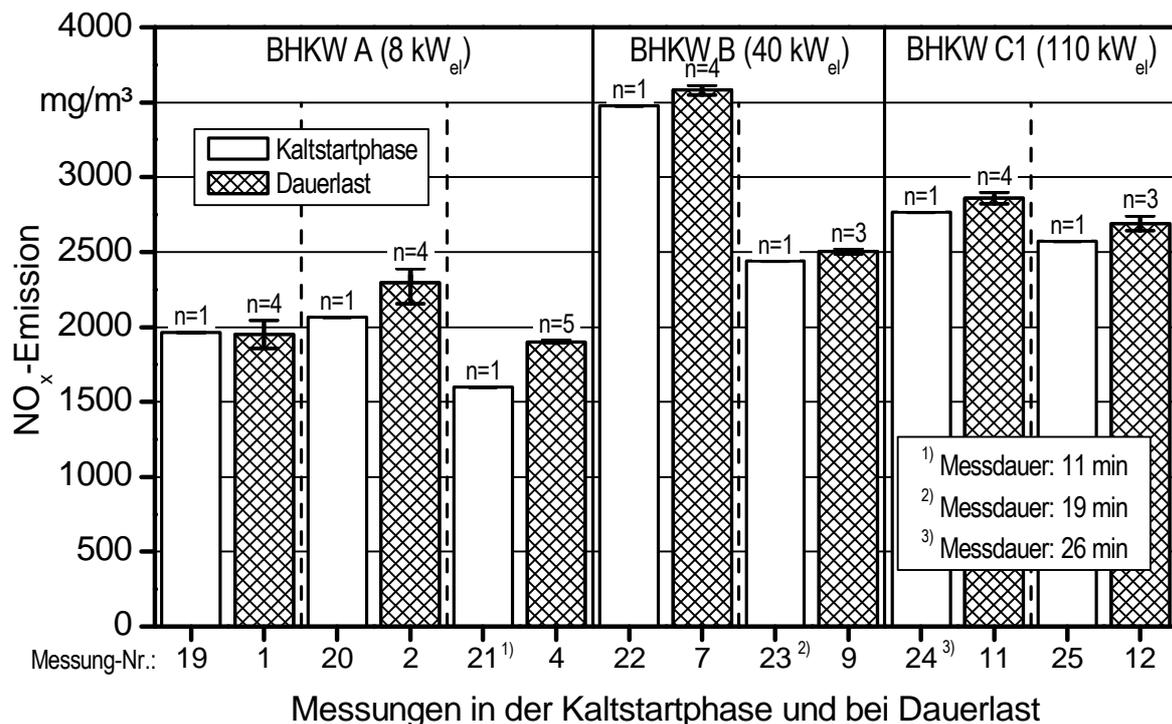


Abbildung 40: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B, C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>)

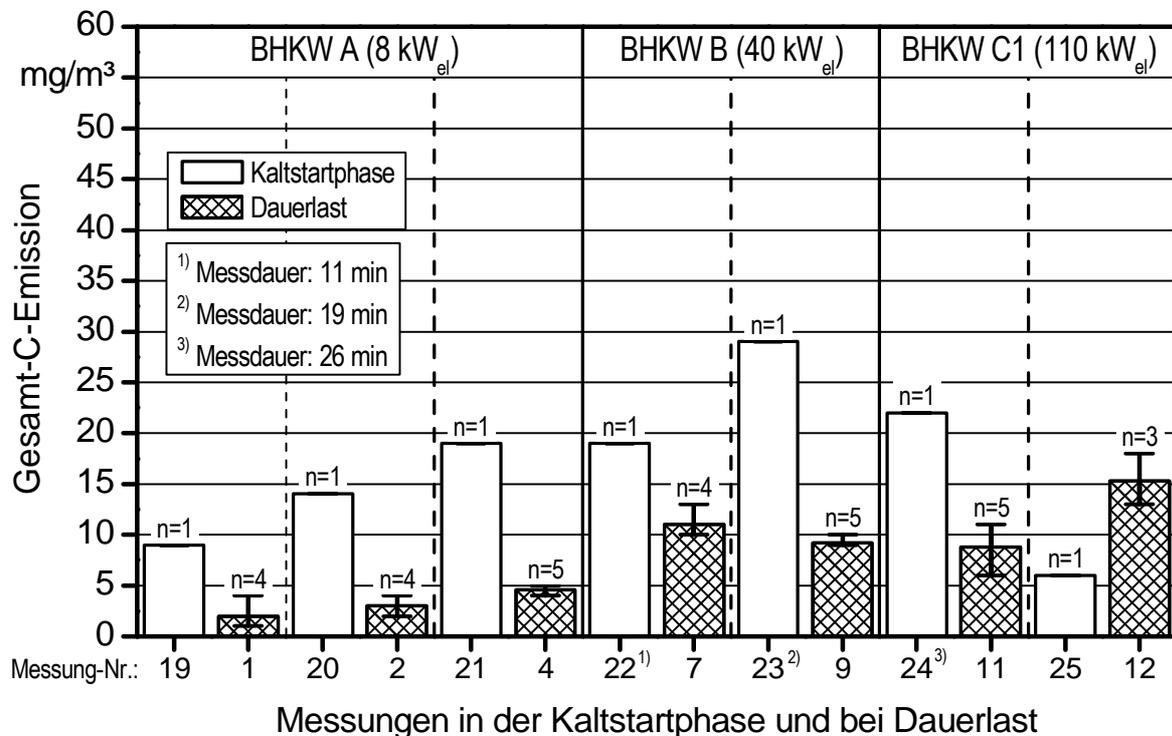


Abbildung 41: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B, C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>)

Wie Abbildung 42 zeigt, sind in der Startphase des Motors analog zu den CO- und Gesamt-C-Emissionen in den meisten Fällen auch höhere **Staub-Emissionen** zu verzeichnen als bei Dauerlastbetrieb. Lediglich bei Messung 19 von BHKW A ergibt sich keine Veränderung. Bei allen anderen Messungen liegen die Staub-Emissionen während der ersten 30 Minuten eines Kaltstarts etwa 1,3- bis 3,7-mal so hoch wie bei Nennlastbetrieb. Gründe für den erhöhten Partikelaustritt sind neben der unvollständigen Verbrennung und ungünstigen Bedingungen für die Rußoxidation auch die in der Kaltstartphase vermehrt auftretende Emission teil- und unverbrannter Kohlenwasserstoffe, die sich an den Partikeln anlagern können und so als Staub-Emission erfasst werden.

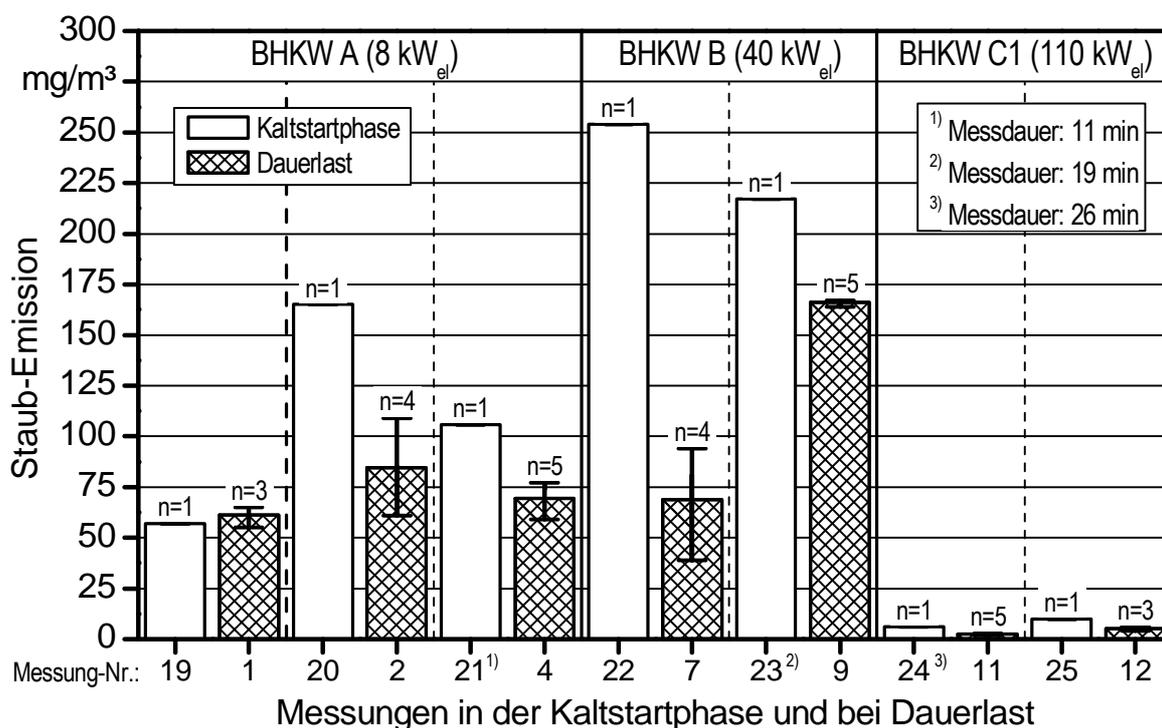


Abbildung 42: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A, B und C1 in der Kaltstartphase im Vergleich zu Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

### 5.1.5 Einfluss von Start/Stopp-Zyklen

Ein ähnlicher Einfluss auf das Emissionsverhalten wie in der Kaltstartphase zeigt sich, wenn innerhalb von 30 Minuten das Aggregat bei Betriebstemperatur dreimal gestartet und wieder abgestellt wird. Bei den **CO-Emissionen** kommt es, wie aus Abbildung 43 hervorgeht, zu einem Anstieg auf das 1,7- bis 2,5-fache bei BHKW A und auf das 3,1-fache bei BHKW B im Vergleich zum Betrieb bei Dauerlast. Die höheren Emissionen bei den Start/Stopp-Zyklen sind auf die vermehrt unvollständige Verbrennung in Phasen mit niedrigeren Betriebstemperaturen und bei geringerer Last zurückzuführen. Bei jedem Einschaltvorgang des BHKW wird nämlich der Motor automatisch zuerst im Leerlauf und anschließend mit reduzierter Generatorlast betrieben, bevor er auf Dauerlast „hochgefahren“ wird. Beim Ausschalten erfolgt in umgekehrter Reihenfolge eine stufenweise Absenkung der Generatorlast.

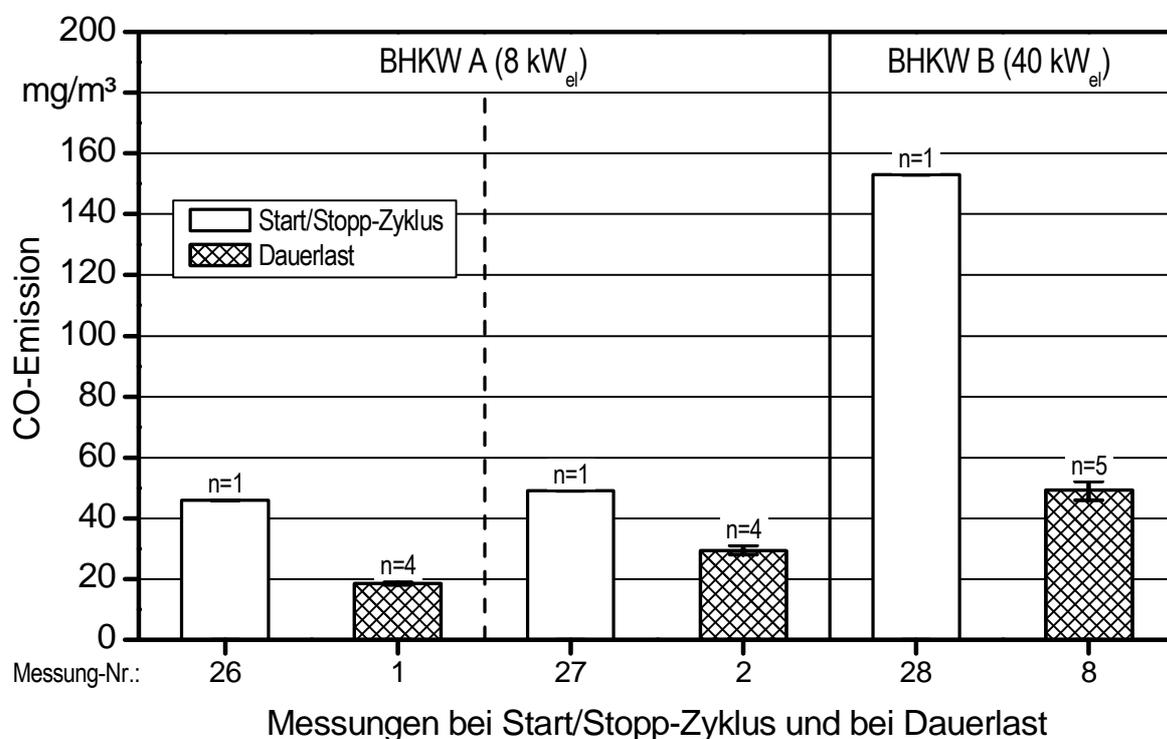


Abbildung 43: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Erwartungsgemäß sind bei den **NO<sub>x</sub>-Emissionen** im Wesentlichen nur geringfügige Unterschiede zwischen den Start-/Stopp-Zyklen und dem Betrieb bei Dauerlast zu erkennen. So sind die in Abbildung 45 dargestellten NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Messung 26 von BHKW A und Messung 28 von BHKW B bei dreimaligem Ein- und Ausschalten des Motors binnen 30 Minuten etwa 10 % niedriger als bei Nennlastbetrieb, wohingegen sie bei Messung 27 an BHKW A mit 6 % geringfügig höher liegen.

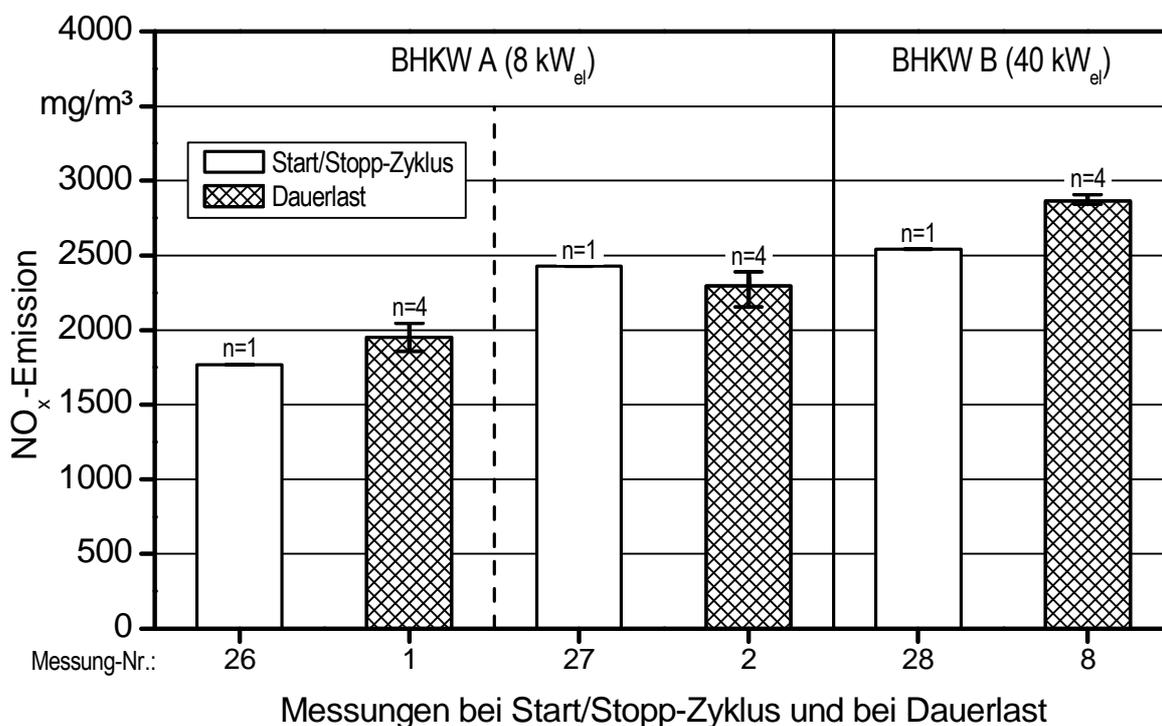


Abbildung 44: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stop-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die **Gesamt-C-Emissionen** sind in Abbildung 45 dargestellt. Der Start/Stop-Zyklus führt bei BHKW A zu 2,0- bis 3,5-fach höheren Gesamt-C-Emissionen (allerdings auf einem sehr niedrigen Konzentrationsniveau) und bei BHKW B zu 4,3-fach höheren Gesamt-C-Emissionen als bei Dauerlastbetrieb. Damit verhalten sich die Gesamt-C-Emissionen bei dreimaligem Ein- und Ausschalten innerhalb einer halben Stunde ähnlich wie die CO-Emissionen. Wie bei den CO-Emissionen ist beim BHKW B mit direkter Einspritzung erwartungsgemäß ein größerer Anstieg als bei BHKW A mit indirekter Einspritzung zu verzeichnen. Dies zeigt, dass sich beim Wirbelkammermotor Betriebsphasen, in denen verstärkt teil- oder unverbrannter Kraftstoff in das Abgas gelangt, weniger stark auf eine Verschlechterung des Emissionsbildes auswirken.

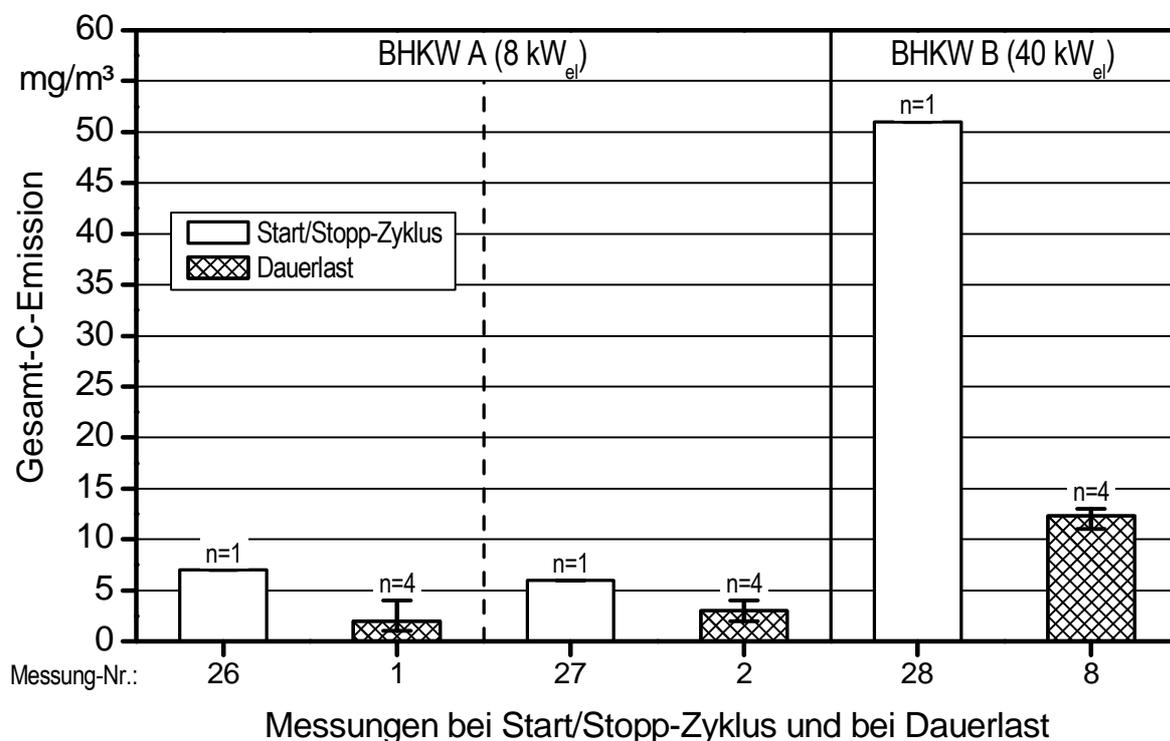


Abbildung 45: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stop-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Abbildung 46 zeigt die **Staub-Emissionen** bei den Start/Stopp-Zyklen. Diese sind bei BHKW A um das 1,3- bis 1,8-fache und bei BHKW B um das 1,5-fache höher als bei Dauerlast. Ursachen dafür können einerseits die niedrigen Brennraumtemperaturen und die verstärkt auftretenden Zonen mit Kraftstoffüberschuss sein, die die Partikelbildung fördern und die Rußoxidation hemmen. Andererseits können auch durch Druckstöße des Abgases beim Ein- und Ausschalten sowie durch Vibrationen des Aggregats, insbesondere beim Abstellen des Motors, im Abgassystem abgelagerte Partikel mit dem Abgasstrom ausgetragen werden.

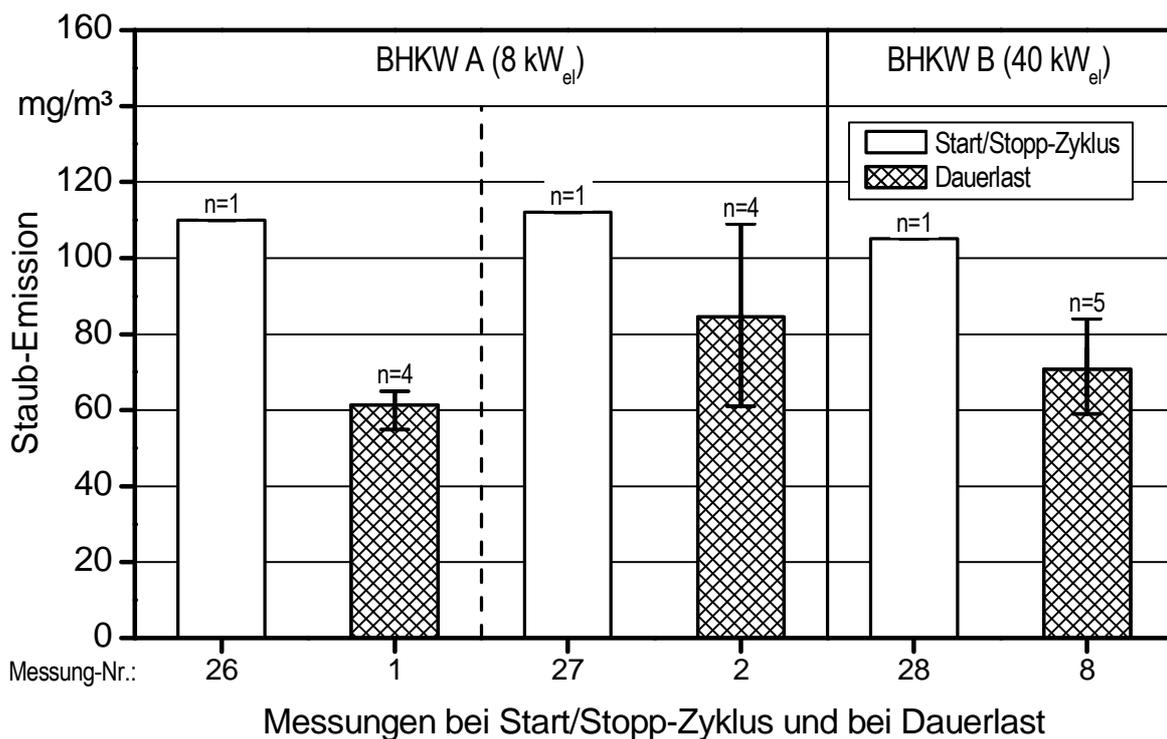


Abbildung 46: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW bei dreimaligem Ein- und Ausschalten (Start/Stopp-Zyklus) im Vergleich zum Dauerlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

### 5.1.6 Einfluss ausgewählter Rapsölkraftstoffeigenschaften

In Abbildung 47 sind die bei Nennlast ermittelten **Kohlenmonoxid-Emissionen** von BHKW A bei der Verwendung unterschiedlicher, speziell hergestellter Kraftstoffqualitäten (Sonderkraftstoffe) dargestellt. Als Sonderkraftstoffe werden eingesetzt zum einen Rapsölkraftstoff mit einer sehr hohen Gesamtverschmutzung von 827 mg/kg (entspricht etwa dem 30-fachen Grenzwert gemäß RK-Qualitätsstandard 05/2000 bzw. DIN V 51605) mit der Bezeichnung „RK4“ und zum anderen Rapsölkraftstoff mit einer geringen Oxidationsstabilität von 3,4 h (Grenzwert: 5,0 h gemäß RK-Qualitätsstandard 05/2000, bzw. 6,0 h gemäß DIN V 51605) mit der Bezeichnung „RK7“. Kraftstoffe mit derart hohen Gesamtverschmutzungen treten in der Praxis allerdings selten und nur bei stärkeren Verschmutzungen des Kraftstofftanks und Fehlfunktion des Kraftstofffilters auf. Rapsölkraftstoff mit einer zu geringen Oxidationsstabilität in dieser Größenordnung kommen dagegen häufiger vor, wenn z. B. Rapsölkraftstoff zu lange bzw. bei zu hohen Temperaturen gelagert worden ist. Die korrespondierenden Vergleichsmessungen bei Dauerlast fanden jeweils am gleichen Messtag statt.

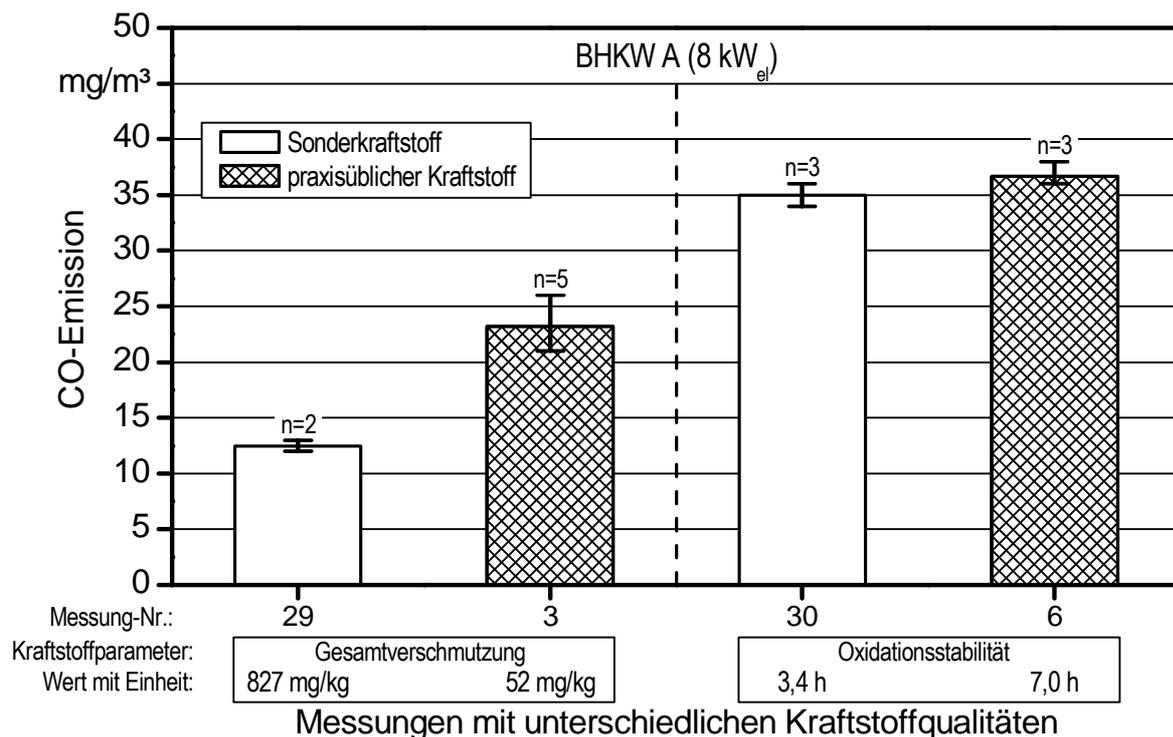


Abbildung 47: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Beim Rapsölkraftstoff „RK4“ (hohe Gesamtverschmutzung) ist ein Einfluss auf die CO-Emissionen festzustellen. Die CO-Konzentration im Abgas beträgt mit  $12,5 \text{ mg/m}^3$  bei der Verwendung von „RK4“ mit hoher Gesamtverschmutzung etwa nur die Hälfte im Vergleich zum praxisüblichen Rapsölkraftstoff „RK3“. Da die Untersuchungen mit dem Sonderkraftstoff unmittelbar nach den Referenzmessungen stattfanden, herrschten bei beiden Messungen annähernd die gleichen Randbedingungen. Demnach können im Rapsölkraftstoff enthaltene Partikel, die als Bestandteile der Rapssaat bei der Ölgewinnung in das Rapsöl gelangen und bei der Reinigung nicht abgetrennt werden, den Verbrennungsprozess im Wirbelkammermotor positiv hinsichtlich der CO-Emissionen beeinflussen. Die Oxidationsstabilität des eingesetzten Rapsölkraftstoffs hingegen lässt in der hier betrachteten Bandbreite keinen Einfluss auf die CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A erkennen.

Abbildung 48 zeigt, dass der Einfluss einer hohen Gesamtverschmutzung im Kraftstoff auf die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** gering ist. Es ergeben sich lediglich um etwa 10 % niedrigere Emissionswerte ( $1868 \text{ mg/m}^3$ ) als bei der Verwendung des praxisüblichen Kraftstoffs ( $2073 \text{ mg/m}^3$ ). Beim Einsatz eines Rapsölkraftstoffs mit einer geringen Oxidationsstabilität ist keine Veränderung bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen zu beobachten.

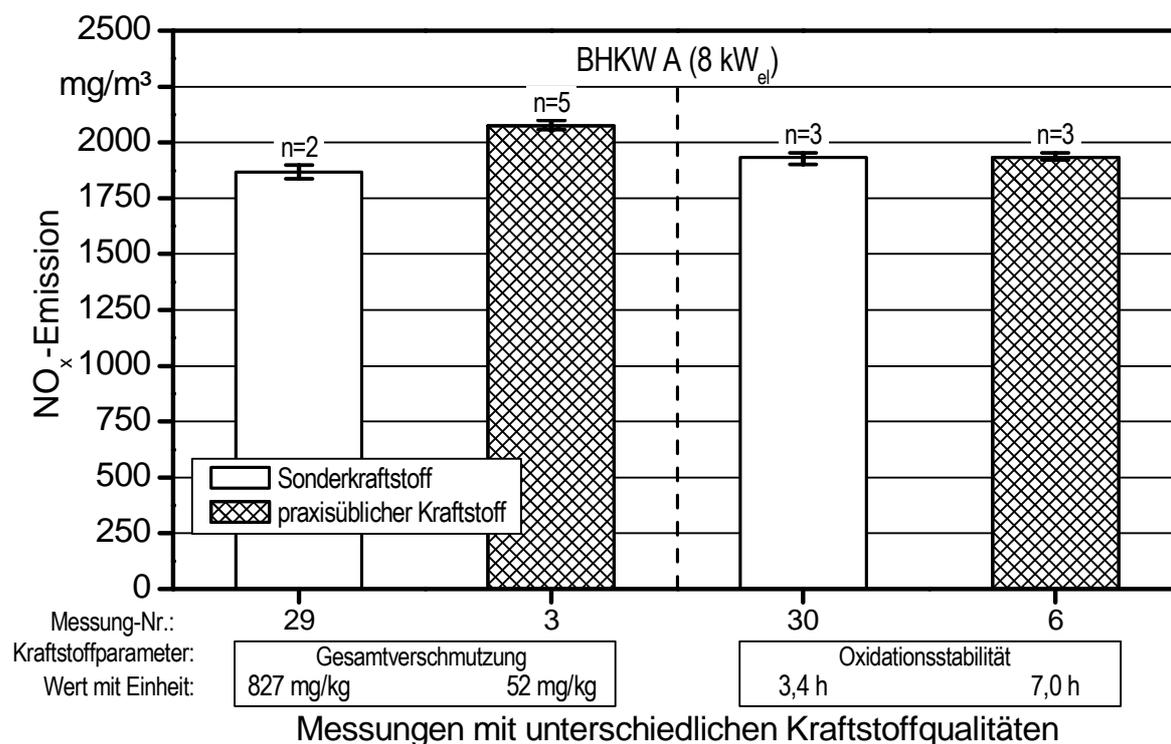


Abbildung 48: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die **Gesamt-C-Emissionen** sind in Abbildung 49 dargestellt. Sie liegen bei der Verwendung des stark partikelbeladenen Rapsölkraftstoffs „RK4“ innerhalb der Spannweite aufeinanderfolgender Halbstundenmittelwerte der Referenzmessung mit dem praxisüblichen Rapsölkraftstoff „RK3“. Auch die Ergebnisse bei der Verwendung von Rapsölkraftstoffen, die sich hinsichtlich der Oxidationsstabilität unterscheiden befinden sich auf annähernd gleichem Niveau.

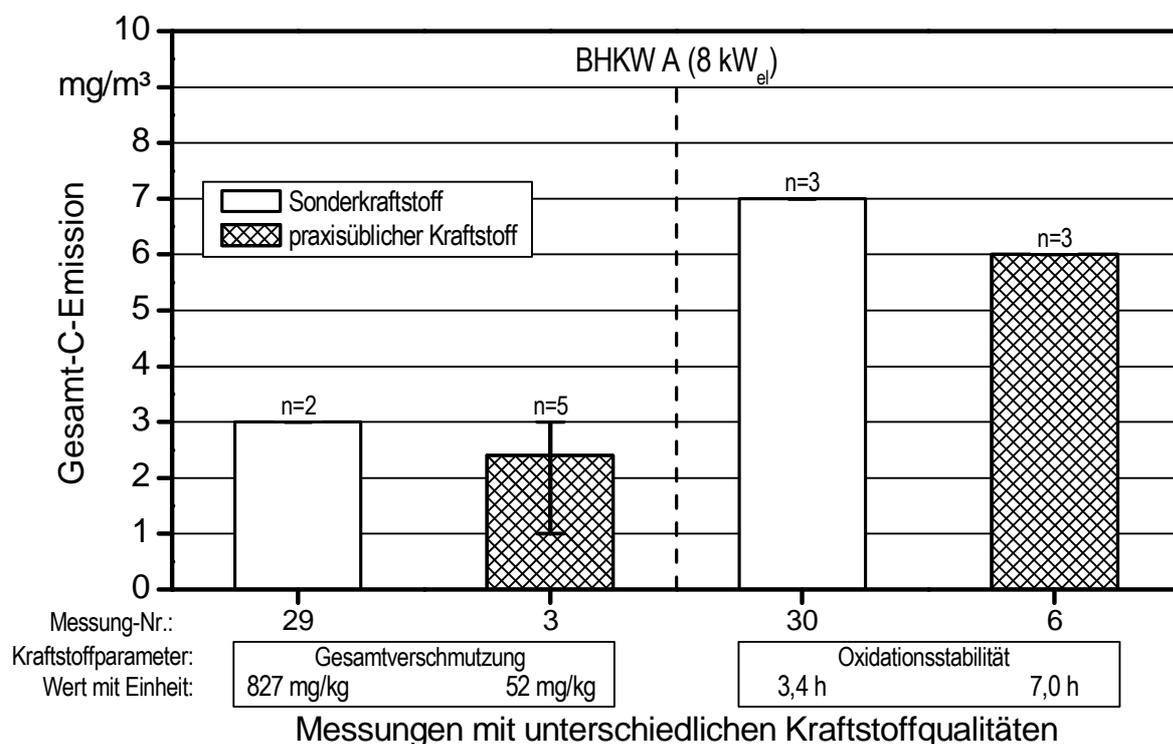


Abbildung 49: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Im Gegensatz zu den CO-Emissionen ist bei den **Staub-Emissionen**, wie in Abbildung 50 dargestellt ist, bei der Verwendung des Kraftstoffs „RK4“ mit hoher Gesamtverschmutzung ein 1,8-fach höherer Emissionswert (117 mg/m<sup>3</sup>) als bei der Referenzmessung (66 mg/m<sup>3</sup>) zu verzeichnen. Gründe hierfür können sein, dass die im Kraftstoff enthaltenen Partikel im Motor nicht vollständig verbrennen und teilverbrannt in den Abgasstrom gelangen, dass sich vermehrt aschehaltige Verbrennungsprodukte bilden und dass sich an die größere Partikelfracht im Brenngas verstärkt unverbrannte Kohlenwasserstoffe anlagern, die zur Erhöhung der Staub-Emission beitragen. Mit dem Kraftstoff „RK7“ mit einer geringen Oxidationsstabilität ergeben sich ebenfalls höhere Staub-Emissionen von etwa 169 mg/m<sup>3</sup> im Vergleich zum üblicherweise eingesetzten Rapsölkraftstoff „RK6“, bei dem Staub-Emissionen von 136 mg/m<sup>3</sup> ermittelt wurden. Eine Erklärung hierfür kann nicht gegeben werden.

Generell ist davon auszugehen, dass Veränderungen im Emissionsbild, die durch ungenügende Kraftstoffqualität hervorgerufen werden, je nach Art und Größe der Abweichung, Motortyp, Sauberkeit von Einspritzdüsen und Brennraum sowie je nach Betriebsweise sehr unterschiedlich ausfallen können. Von Bedeutung kann in diesem Zusammenhang auch die längerfristige indirekte Verschlechterung des Emissionsverhaltens durch die Bildung von Ablagerungen oder durch erhöhten Motorverschleiß sein.

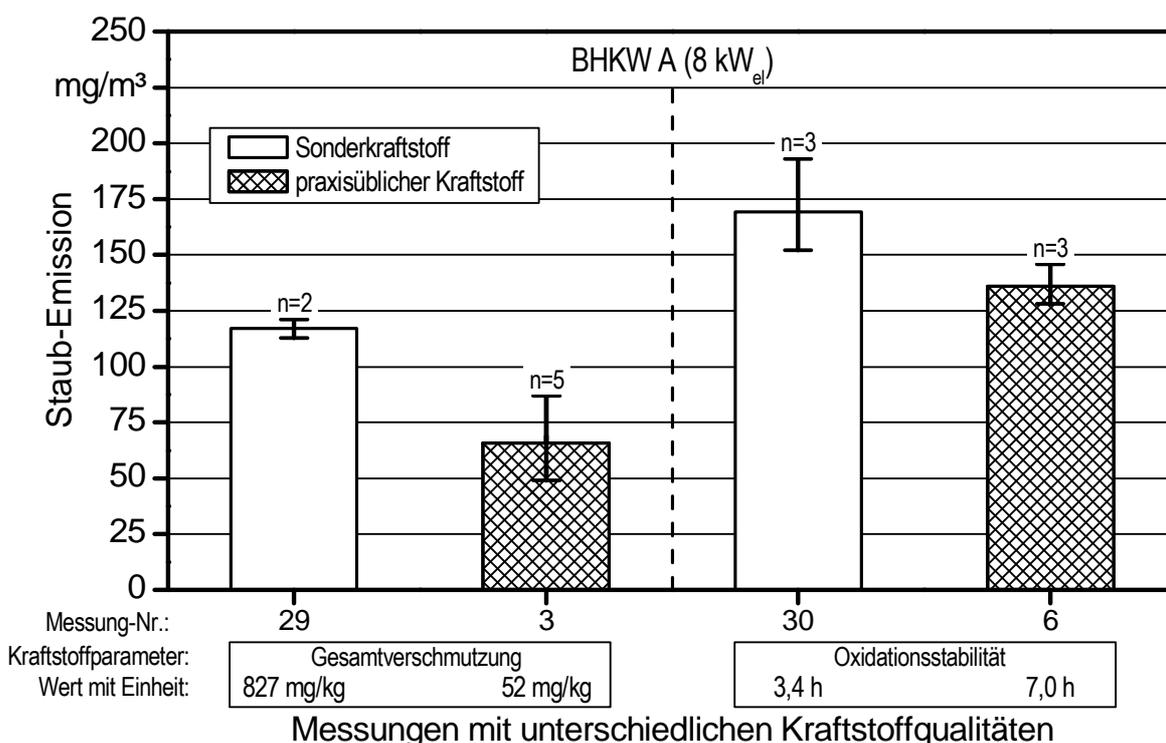


Abbildung 50: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A beim Einsatz verschiedener Rapsölkraftstoffqualitäten bei Nennlastbetrieb (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

### 5.1.7 Einfluss eines Oxidationskatalysators

In Abbildung 51 bis Abbildung 54 sind die CO-, NO<sub>x</sub>- Gesamt-C- und Aldehyd-Emissionen des BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast dargestellt.

Danach ist eine Abnahme der CO-Emissionen von 181 auf 19 mg/m<sup>3</sup> und von 221 auf 24 mg/m<sup>3</sup> durch den Oxidationskatalysator zu verzeichnen. Dies entspricht einer Umsetzungsrate von ca. 90 %, die auf der vermehrten Oxidation von CO zu CO<sub>2</sub> an der katalytisch aktiven Schicht beruht. CO-Minderungsraten in gleicher Größenordnung werden üblicherweise auch bei Diesekraftstoff erreicht (Kapitel 2.5.1). Die CO-Emissionen nach dem Oxidationskatalysator entsprechen den CO-Konzentrationen, die bei den wiederkehrenden Emissionsmessungen bei Dauerbetrieb gemessen wurden (Abbildung 24).

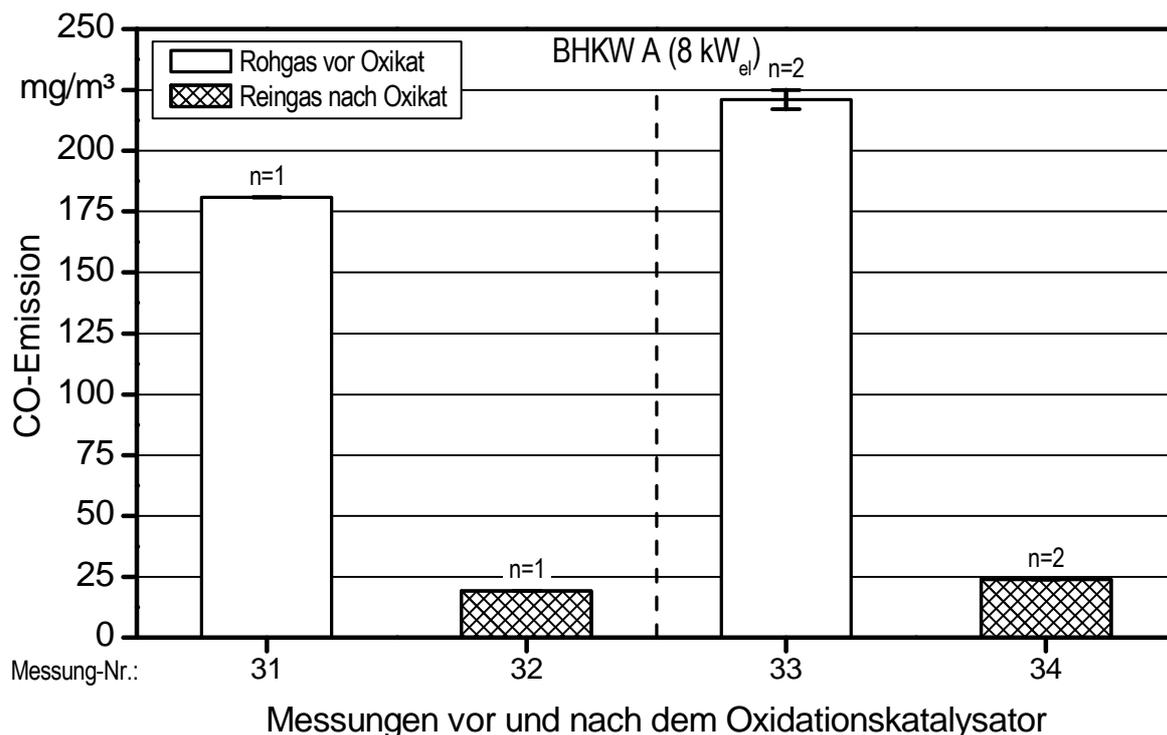


Abbildung 51: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

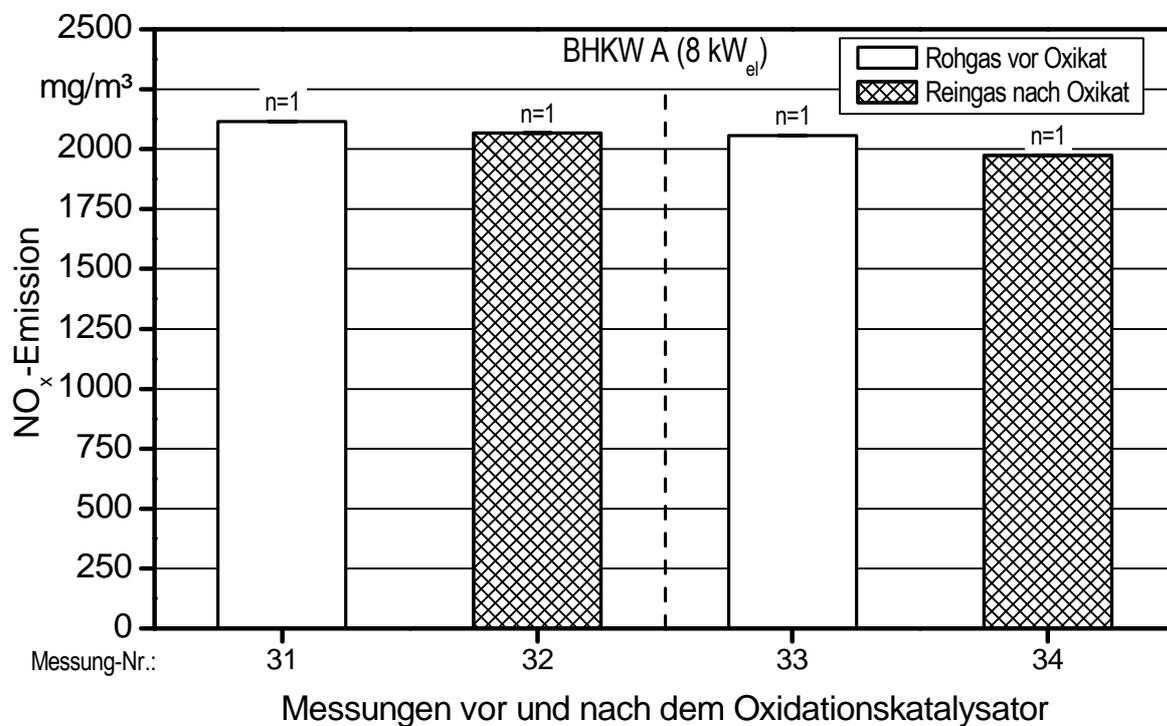


Abbildung 52: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die Konzentration von Stickstoffoxiden im Abgas wird erwartungsgemäß kaum durch den Oxidationskatalysator beeinflusst. Es ist lediglich von einer vermehrten Oxidation des Stickstoffmonoxids (NO) zu Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) auszugehen.

Durch den Oxidationskatalysator werden neben den CO- auch die Gesamt-C-Emissionen von 12 auf 3 mg/m<sup>3</sup> bzw. von 23 auf ca. 6,5 mg/m<sup>3</sup> deutlich reduziert. Die Umsetzungsraten betragen entsprechend zwischen 67 und 72 %. Auch diese Wirkung des Oxidationskatalysators (Minderung der Gesamt-C-Emissionen) durch Oxidation teilverbrannter Kohlenwasserstoffe entspricht in etwa der bei der Verwendung von Dieselkraftstoff, wenngleich auch noch höhere Umsetzungsraten von über 90 % in der Literatur genannt werden (Kapitel 2.5.1).

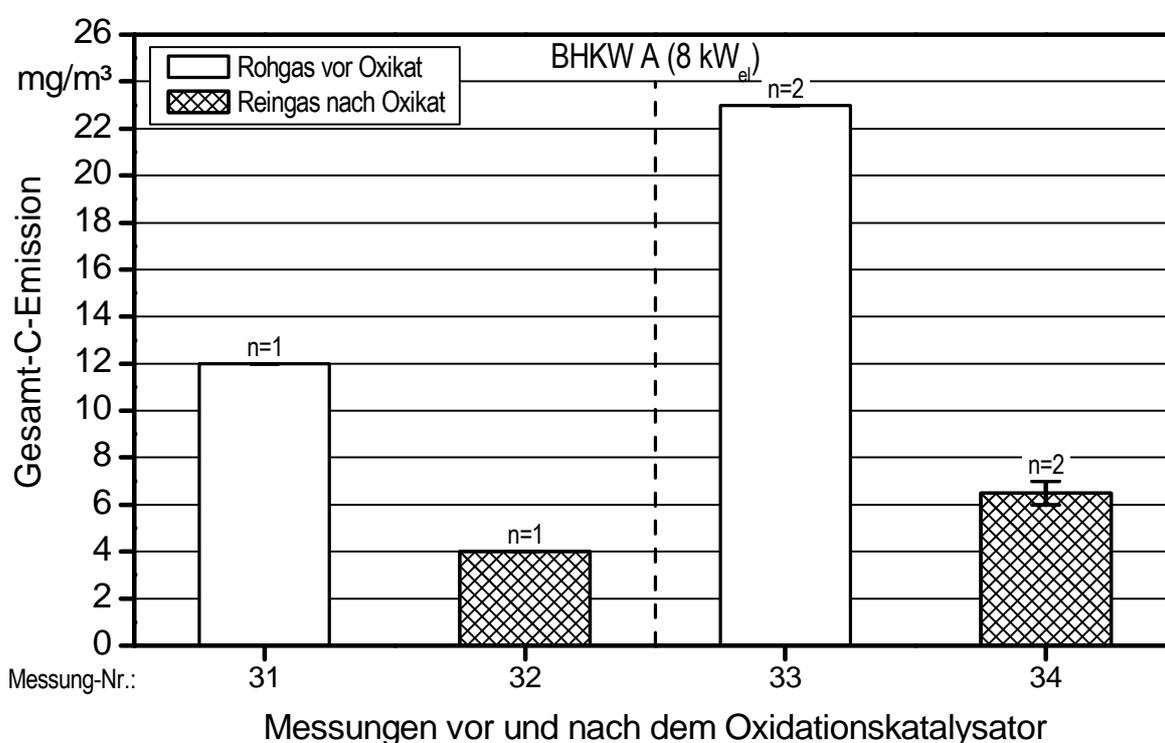


Abbildung 53: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Insbesondere werden die bei der Bestimmung der Gesamt-C-Emissionen miterfassten Aldehyd-Emissionen, zu denen Verbindungen gehören, die stark gesundheitsgefährdend sind und für den typischen Abgasgeruch von Rapsölkraftstoff verantwortlich sind, durch den Oxidationskatalysator deutlich reduziert (Abbildung 54). Die Minderungsrate liegt für die Summe aller gemessenen Aldehyde sowie für jede einzelne Aldehydkomponente bei etwa 80 %, wobei Formaldehyd mit ca. 85 % am effektivsten umgesetzt wird. Aber auch die Aldehydkomponenten Acetaldehyd, Propionaldehyd und Acrolein werden um ca. 75

bis 80 % reduziert. Bei der Ergebnisbetrachtung muss allerdings berücksichtigt werden, dass die in Abbildung 54 angegebenen absoluten Konzentrationen mit einer vefahrensbedingten Messungengenauigkeit von etwa  $0,5 \text{ mg/m}^3$  behaftet sind und dass die Werte von Propionaldehyd nach dem Oxidationskatalysator sowie alle Werte für Butyraldehyd unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Untersuchungen zu Aldehyd-Emissionen von MAY (1994) [74] bestätigen, dass durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren die Aldehyd-Emissionen deutlich reduziert werden können.

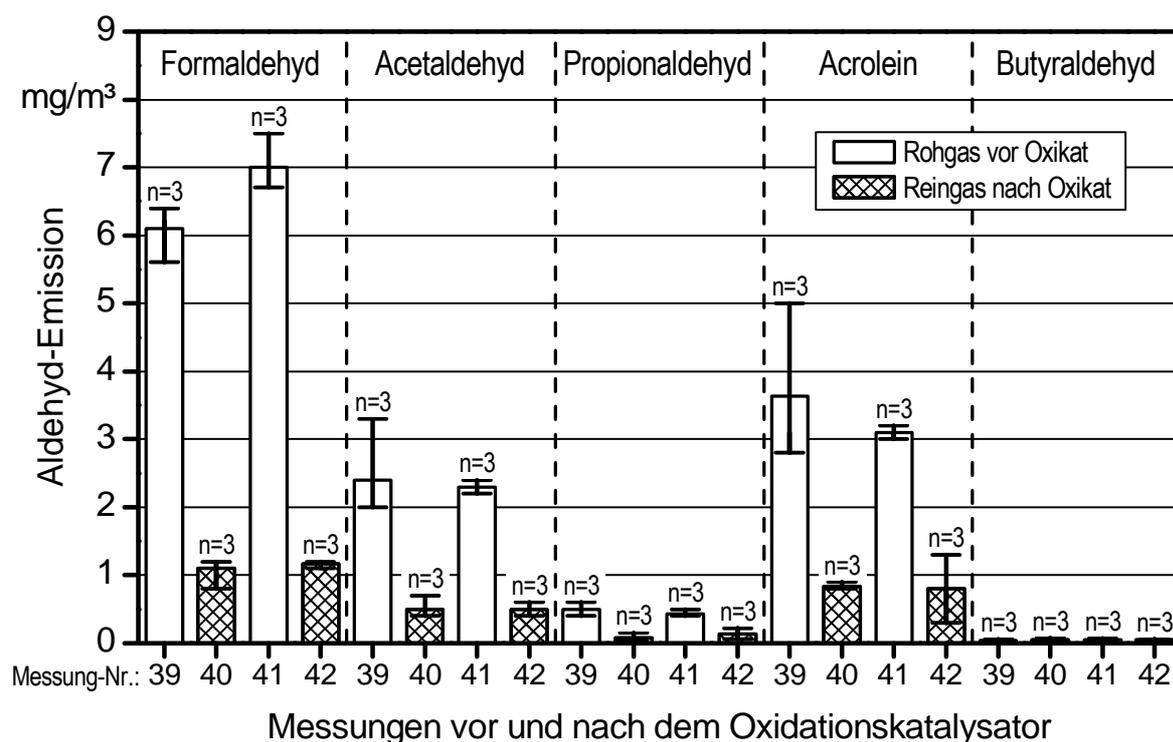


Abbildung 54: Aldehyd-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW A vor und nach dem Oxidationskatalysator bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 %  $\text{O}_2$ -Gehalt)

Bei PRANKL et al. (2005) [83] wurden die  $\text{CO}$ -Emissionen bei 4 verschiedenen BHKW Typen ohne Oxidationskatalysator ermittelt. Diese betragen zwischen  $208$  und  $605 \text{ mg/m}^3$ . Zwei BHKW, die vom gleichen Hersteller stammen, wie das bei den eigenen Untersuchungen verwendete BHKW A, weisen Werte zwischen ca.  $200$  und  $300 \text{ mg/m}^3$  auf und stimmen mit den eigenen Ergebnissen (Messungen vor dem Oxidationskatalysator) im Wesentlichen überein. Die von PRANKL et al. (2005) [83] bestimmten Gesamt- $\text{C}$ -Emissionen (ohne Oxidationskatalysator) liegen ebenfalls in der gleichen Größenordnung wie bei BHKW A vor dem Oxidationskatalysator.

Etwa zwei- bis dreifach so hohe Gesamt-C-Emissionen wurden dagegen von DOBIASCH (2000) [29] ermittelt. Auch die CO-Emissionen sind um etwa 40 % höher als bei den eigenen Untersuchungen. Hinsichtlich der Aldehydkomponente Acrolein schneidet das BHKW bei DOBIASCH (2000) [29] im Vergleich zu den Messungen an BHKW A vor dem Oxidationskatalysator günstiger, hinsichtlich Butyraldehyd ungünstiger ab. Nach dem Oxidationskatalysator liegen jedoch bei BHKW A auch die Acrolein-Emissionen deutlich unterhalb des Niveaus, welches bei DOBIASCH (2000) [29] angegeben wird.

STREIT und FRIEß (1998) [95] stellten bei einem, mit BHKW B vergleichbaren, direkt einspritzenden BHKW deutlich höhere CO-Emissionen vor dem Oxidationskatalysator von mehr als 617 mg/m<sup>3</sup> fest. Die CO-Reduktion durch den Oxidationskatalysator war mit 99 % sehr hoch. Daneben wurde eine staubmindernde Wirkung von bis zu 58 % ermittelt. Die Gesamt-C-Emissionen konnten ebenfalls effektiv mit einem Oxidationskatalysator um etwa 90 % reduziert werden. Die CO- und Gesamt-C-Umsetzungsraten liegen damit bei STREIT und FRIEß (1998) [95] über denen der eigenen Untersuchungen.

Ähnliches gilt für den baugleichen Motor, jedoch mit Ladeluftkühlung, für den bei KAMPMANN (1994) [56] CO-Emissionen von 460 mg/m<sup>3</sup> angegeben werden.

Auch bei GLAß et al. (1991) [40] wurden im Vergleich zu BHKW A vor dem Oxidationskatalysator höhere CO-Emissionen von 528 mg/m<sup>3</sup> und mit 19 mg/m<sup>3</sup> etwa ebenso hohe Gesamt-C-Emissionen ermittelt.

### 5.1.8 Einfluss eines Abgaspartikelfilters

In Abbildung 67 sind die Staub-Emissionen bei Nennlast von BHKW-Aggregat C1 mit und ohne Partikelfilter exemplarisch dargestellt. Im Vergleich dazu werden auch die Emissionen des baugleichen Aggregats C2 mit Partikelfilter aufgeführt. Der Partikelfilter des Aggregats C1 wies zum Zeitpunkt der Messung 12, wie in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben, innere Schäden auf, die zu einer Verengung des durchströmten Querschnitts und damit zu einem Abgasgegendruckanstieg führten. Diese Fehlfunktion zeichnete sich bereits auch bei der zu einem früheren Zeitpunkt stattfindenden Messung 11 ab. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist ferner zu berücksichtigen, dass die zum Vergleich herangezogenen Referenzmessungen 11 und 12 zeitlich deutlich vor der Messung 38 stattgefunden haben und die Messungen 13 und 14 an einem anderen, wenn auch baugleichen Aggregat, erfolgt sind.

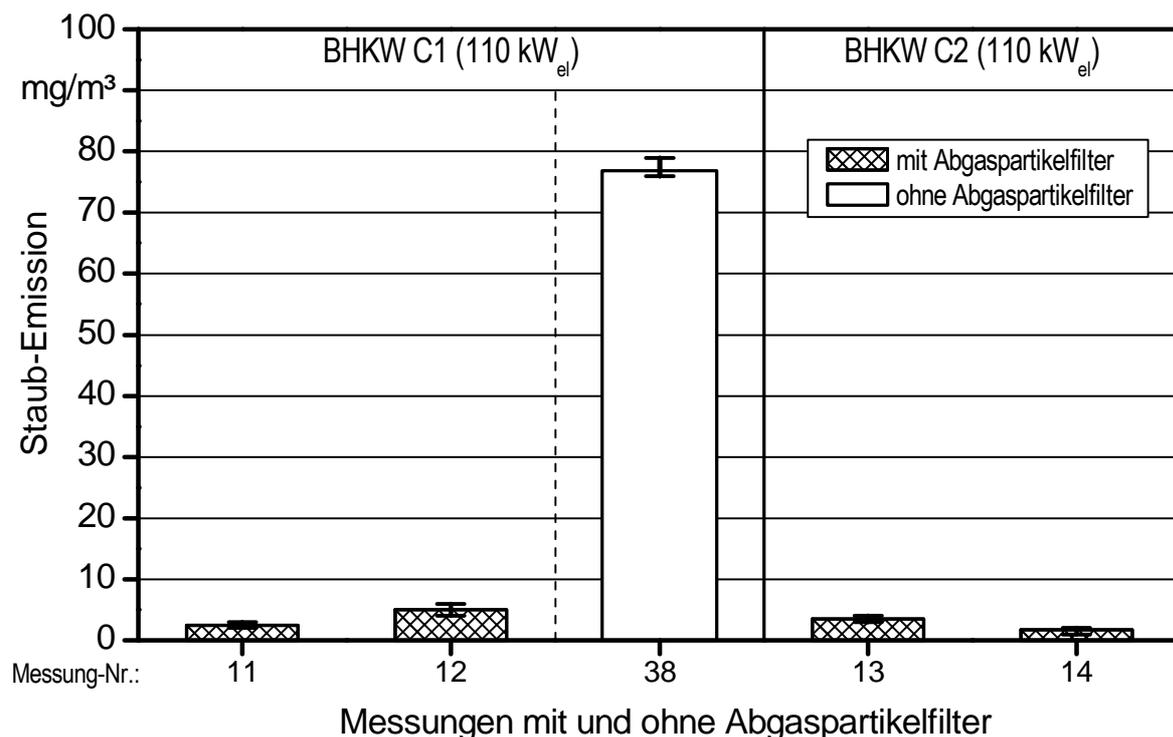


Abbildung 55: Staub-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von  $n$  Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Bei den Staub-Emissionen ist der Unterschied zwischen den Messungen mit Abgaspartikelfilter und der Messung ohne Partikelfilter erwartungsgemäß sehr groß. Mit einer Staubkonzentration von ca. 75 mg/m<sup>3</sup> wird bei Messung 38 (ohne Partikelfilter) der ca. 15-fache Wert der Messungen mit Abgaspartikelfilter (ca. 2 bis 6 mg/m<sup>3</sup>) ermittelt. Die Minderungsrate bei den Staub-Emissionen durch den Partikelfilter beträgt demnach mehr als 90 %.

Die CO-Konzentrationen im Abgas liegen bei Aggregat C1 mit dem defekten Partikelfilter bei ca. 200 und 300 mg/m<sup>3</sup> und damit deutlich über den Werten der Messungen ohne Partikelfilter sowie des baugleichen Aggregats C2 mit intaktem Partikelfilter. Der Anstieg der CO-Emissionen zwischen der Messung 11 und 12 deutet auf die zunehmende Schädigung des Partikelfilters, einhergehend mit einem Abgasgedruckanstieg hin.

Wie aus Abbildung 57 hervorgeht, ist bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen dagegen keine signifikante Veränderung zwischen den Messungen mit und der Messung ohne Partikelfilter zu beobachten. Auch der höhere Abgasgedruck aufgrund des schadhafte Partikelfilters bei den Messungen 11 und 12 zeigt keine Auswirkung auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen.

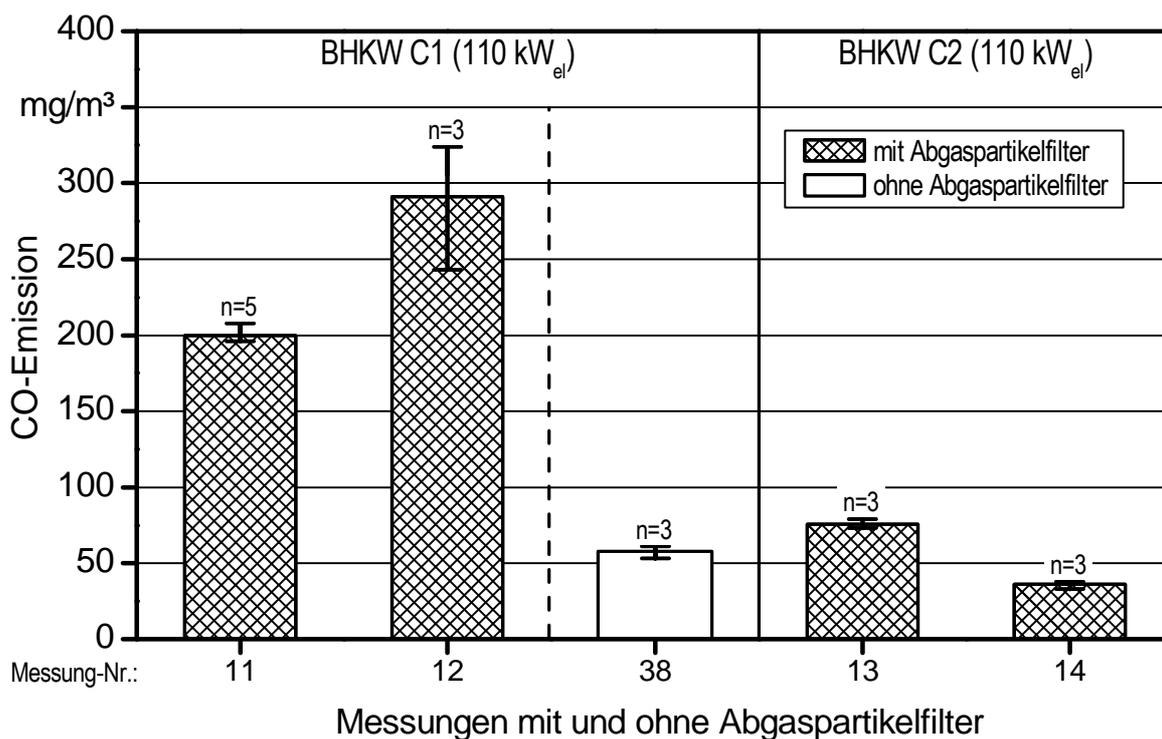


Abbildung 56: CO-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C mit und ohne Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bez. auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

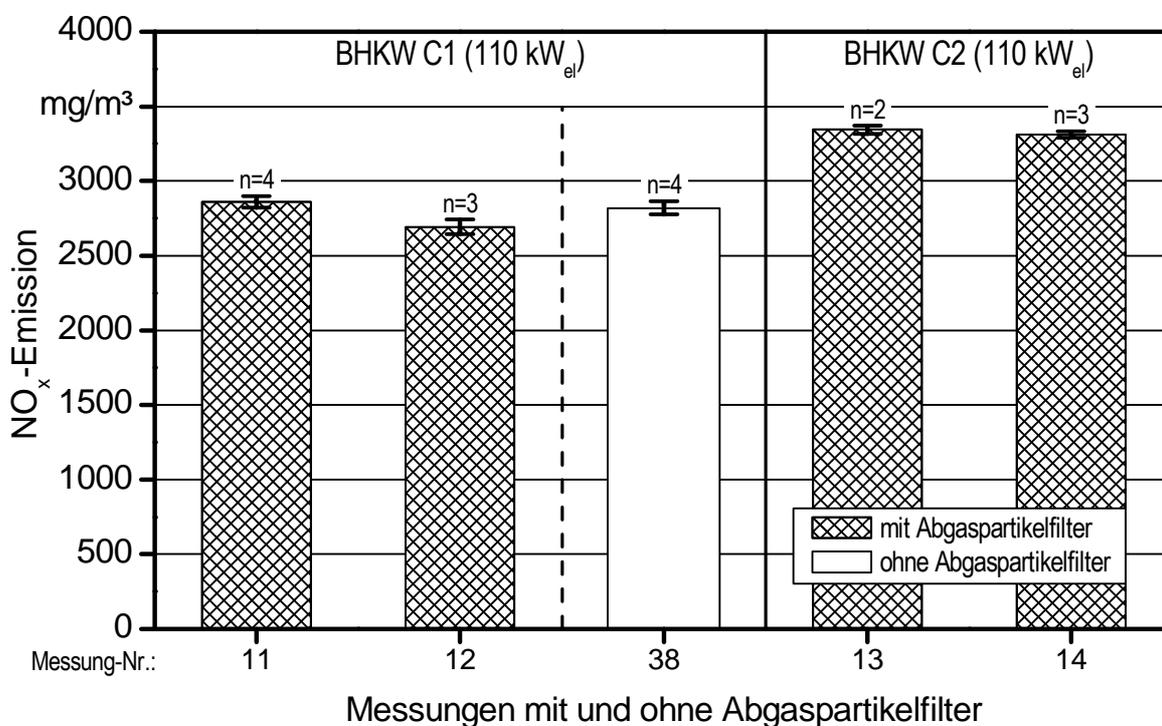


Abbildung 57: NO<sub>x</sub>-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die Gesamt-C-Emissionen hingegen verhalten sich analog zu den CO-Emissionen, wenn auch mit weniger ausgeprägten Unterschieden zwischen den Messungen mit und ohne Partikelfilter. Wie Abbildung 58 zeigt, betragen die Gesamt-C-Emissionen von Aggregat C1 mit Partikelfilter 9 bzw. 15 mg/m<sup>3</sup> gegenüber 6,5 mg/m<sup>3</sup> ohne Partikelfilter. In etwa gleicher Größenordnung bewegen sich die Gesamt-C-Konzentrationen von Aggregat C2 mit intaktem Partikelfilter. Die bei den Messungen 11 und 12 deutlich höheren Gesamt-C-Konzentrationen können, wie oben erwähnt, auf eine stärkere Belastung des Aggregats durch den defekten Partikelfilter zurückgeführt werden.

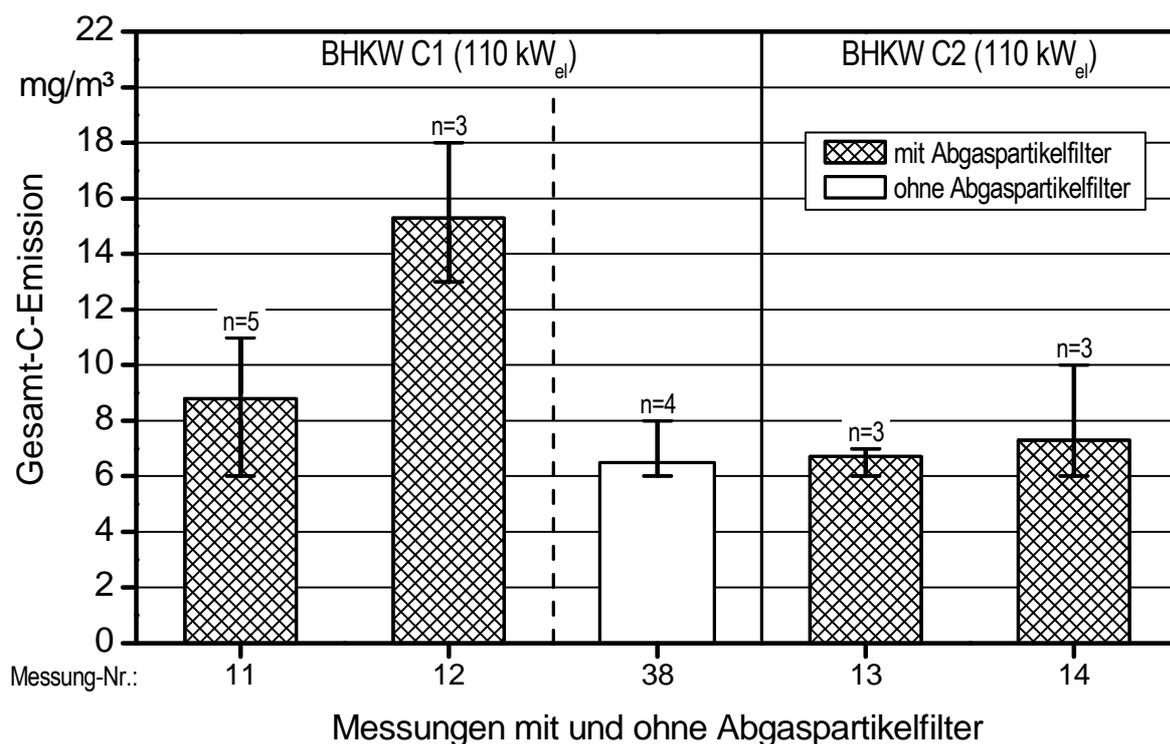


Abbildung 58: Gesamt-C-Emissionen von Pflanzenöl-BHKW C1 mit und ohne sowie von BHKW C2 mit Abgaspartikelfilter bei Nennlast (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

### 5.1.9 Fazit

Die drei ausgewählten BHKW weisen untereinander aber auch bei den wiederkehrenden Messungen zum Teil große Unterschiede in der Höhe der emittierten Schadstoffkonzentrationen CO, NO<sub>x</sub>, Gesamt-C und Staub auf. Die Gründe hierfür sind sowohl im anlagen-spezifischen Emissionsverhalten, aber auch in den vielseitigen Einflussgrößen beim Praxisbetrieb zu sehen. Ereignisse, wie Motortausch, Schäden am Partikelfilter, Wartungsarbeiten, bauliche Maßnahmen (z. B. Einbau des Schmiersystems Plantotronic®) aber auch unterschiedliche, z. T. nicht normkonforme Kraftstoffqualitäten bei den wiederkehrenden Messungen, führen dazu, dass eine Beurteilung des Emissionsverhaltens nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten möglich ist. Bei der Untersuchung bestimmter Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten wurden deshalb zeitnahe korrespondierende Referenzmessungen bei Dauerlast zum Vergleich herangezogen. In vielen Fällen konnten die bei den Messungen beobachteten Unterschiede im Emissionsverhalten anhand der ermittelten Randbedingungen erklärt und mithilfe des Kenntnisstands aus bisherigen Untersuchungen verifiziert werden.

Dennoch sind die genauen Ursachen für das voneinander abweichende Emissionsniveau bei unterschiedlichen Messungen nicht immer eindeutig von bestimmten Randbedingungen abzuleiten. Es ist davon auszugehen, dass wechselnde innermotorische Zustände, hervorgerufen insbesondere durch Ablagerungen an Einspritzdüsen, Ventilen, Kolben und Zylinder, die sich während des Betriebs in unregelmäßigen Abständen bilden und auch wieder ablösen, die Ergebnisse mitunter stark beeinflussten. Prüfstandsversuche, bei denen die Umgebungsbedingungen konstant gehalten werden und die eine intensivere Überwachung des Motorbetriebs ermöglichen, könnten weiteren Aufschluss geben. Ziel dieser Arbeit war es jedoch das typische Emissionsverhalten von Praxisanlagen einschließlich der darauf einwirkenden Einflussgrößen zu erfassen sowie gezielt praxistypische Bedingungen zu variieren, um die Auswirkungen auf die Emissionen zu ermitteln.

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Emissionsverhalten von rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW sowie die darauf wirkenden Einflüsse zeigen gute Übereinstimmung mit grundlegenden Zusammenhängen bei der dieselmotorischen Verbrennung sowie den bisherigen Untersuchungen. Die ermittelten Konzentrationen limitierter Abgaskomponenten bewegen sich meist in der gleichen Größenordnung wie auch die Messungen bei den Untersuchungen von PRANKL et al. (2005) [83], DOBIASCH (2002) [29], STREIT und FRIEß (1998) [95], KAMPMANN (1994) [56] und GLAß et al. (1991) [40] und zwar insbesondere dann, wenn ähnliche Anlagentypen des gleichen Herstellers miteinander verglichen werden. Andere Einflussgrößen, wie Qualitätsmerkmale des Rapsölkraftstoffs, sind bislang weniger untersucht worden. Weitere Untersuchungen hierzu wären wünschenswert, um vorliegenden Ergebnisse abzusichern. Einen größeren Einfluss als die Kraftstoffqualität haben gemäß den vorliegenden Untersuchungen Abgasnachbehandlungssysteme, wie Oxidationskatalysatoren und Partikelfiltersysteme. Somit bestätigt sich dieser aus der Literatur für Dieselmotorkraftstoff bekannte Zusammenhang auch für Rapsölkraftstoff.

## 5.2 Emissionsverhalten eines Rapsöl-BHKW mit verschiedenen Partikelfiltersystemen

Zunächst werden das Betriebsverhalten der Partikelfiltersysteme sowie die Randbedingungen während des Untersuchungszeitraums dargestellt. Danach wird das Emissionsverhalten von BHKW A beim Einsatz der verschiedenen Partikelfiltersysteme aufgezeigt.

### 5.2.1 Betriebsverhalten und Randbedingungen

#### 5.2.1.1 Partikelfilter „a“ – Keramik-Monolith beschichtet

Das Partikelfiltersystem „a“ war insgesamt 182 Betriebsstunden (Bh) im Einsatz. Die während dieses Zeitraums vor dem Filterkörper erfassten Parameter Abgastemperatur und Abgasgegendruck sind zusammen mit den Zeitpunkten der manuellen Filterreinigungen und der Emissionsmessung in Abbildung 59 dargestellt. Die Emissionsmessung fand im Neuzustand nach einer Einlaufzeit von weniger als 5 Bh statt. Insgesamt wurde der Partikelfilter vier mal ausgebaut und manuell mit Druckluft gereinigt. Bei jedem Wiedereinbau wurde gemäß den Vorgaben des Filterherstellers der Filterkörper gedreht, so dass sich die Durchströmungsrichtung änderte. Die beiden ersten, ohne eine manuelle Reinigung unterbrochenen, Betriebsintervalle (je ein Intervall in jede Durchströmungsrichtung des Filters) waren mit 85 bzw. 70 Bh deutlich länger als die darauffolgenden.

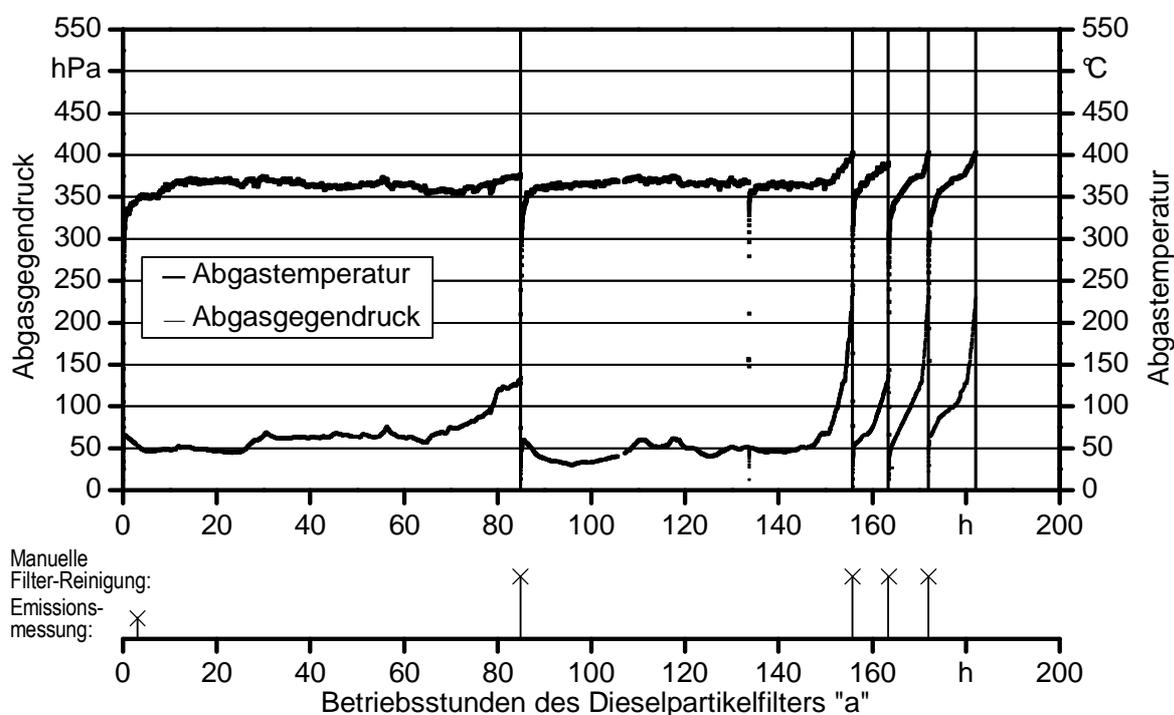


Abbildung 59: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „a“

Dabei stieg der Abgasgegendruck von ca. 50 hPa auf 140 hPa im ersten bzw. auf über 200 hPa im zweiten Intervall an. Dies weist darauf hin, dass bei diesen beiden Intervallen die Regeneration des Partikelfilters gut funktionierte, was auch anhand des Rückgangs des Abgasgegendrucks bei steigender Abgastemperatur unmittelbar nach Einbau des Filters zu sehen ist. Bei ca. 134 Bh musste das BHKW kurzzeitig betriebsbedingt abgestellt werden. Dadurch erklärt sich der Abfall von Abgastemperatur und Abgasdruck in Abbildung 59. In den darauffolgenden drei Betriebsintervallen stieg der Abgasgegendruck bereits innerhalb von maximal 10 Bh auf Werte größer 200 hPa an. Daraus lässt sich schließen, dass durch die manuelle Reinigung mit Druckluft die Rückstände im Filter nicht vollständig entfernt werden konnten, was in der Folge zu einer verminderten katalytischen Wirkung und zu dem beobachteten schnellen Druckanstieg durch die zunehmende Filterbelastung führte. Bei der Überprüfung des Filterkörpers durch den Hersteller am Ende der Untersuchung wurde eine hohe Beladung von ca. 40 g Ruß und etwa 0,2 g unverbrennbaren Aschebestandteilen festgestellt. Im Inneren des Filters waren Strömungskanäle durch eine lokale Überhitzung zerstört. Die Untersuchungen mit dem Filtersystem „a“ wurden aufgrund der häufig erforderlichen manuellen Filterreinigungen und der möglicherweise mangelhaften Hitzebeständigkeit des Filtermaterials eingestellt.

### 5.2.1.2 Partikelfilter „b“ – Draht-/Keramikfilamentgestrick beschichtet

Das Partikelfiltersystem „ba“ war insgesamt 134 Stunden im Einsatz (Abbildung 60).

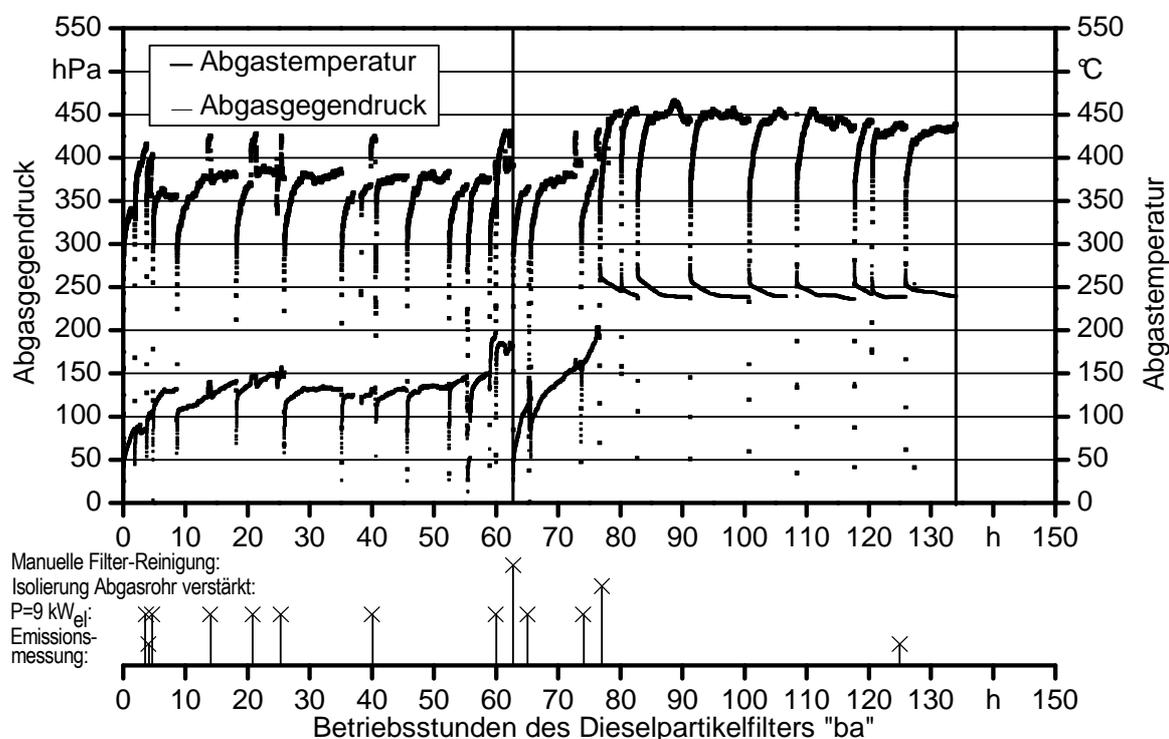


Abbildung 60: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „ba“

Der Betrieb erfolgte aus Gründe der besseren Anlagenüberwachung nur tagsüber. Nach 63 Betriebsstunden war eine manuelle Reinigung des Filters durch Erhitzen auf ca. 700 °C im Muffelofen notwendig, da der Abgasgegendruck auf bis zu 200 hPa angestiegen war. Trotz mehrmaliger Abgastemperaturerhöhung auf die angegebene Rußabbrandtemperatur von ca. 430 °C durch eine zeitweise Anhebung der Generatorleistung von 8 auf 9 kW<sub>el</sub> war keine Abgasgegendruckminderung, die auf eine Regenerierung hingedeutet hätte, zu beobachten. Nach erfolgter Filterreinigung lag der Abgasgegendruck ähnlich wie im Neuzustand bei etwa 60 hPa, stieg aber bereits innerhalb nur weniger Betriebsstunden wieder auf über 200 hPa an. Dies deutet darauf hin, dass auch die Filterreinigung keinen positiven Effekt auf die Filterregenerierung hatte und die kurzzeitige Anhebung der Abgastemperatur auf die angegebenen ca. 430 °C unter den vorliegenden Bedingungen nicht zur Regeneration bzw. zur längerfristigen Minderung des Abgasgegendrucks ausreichte. Durch die Verbesserung der Isolierung am Abgassystem des BHKW nach 77 Bh konnte eine deutliche Temperaturerhöhung auf ca. 450 °C erreicht werden. Ein Rückgang des Abgasgegendrucks war aber auch damit nicht zu verzeichnen. Die Emissionsmessungen wurden zu Beginn des Filtereinsatzes nach ca. 4 Bh sowie am Ende der Untersuchung nach ca. 125 Bh durchgeführt.

Der vom Hersteller überarbeitete **Partikelfilter „bb“** verursachte von Beginn an einen sehr hohen Abgasgegendruck von mehr als 250 hPa (Abbildung 61).

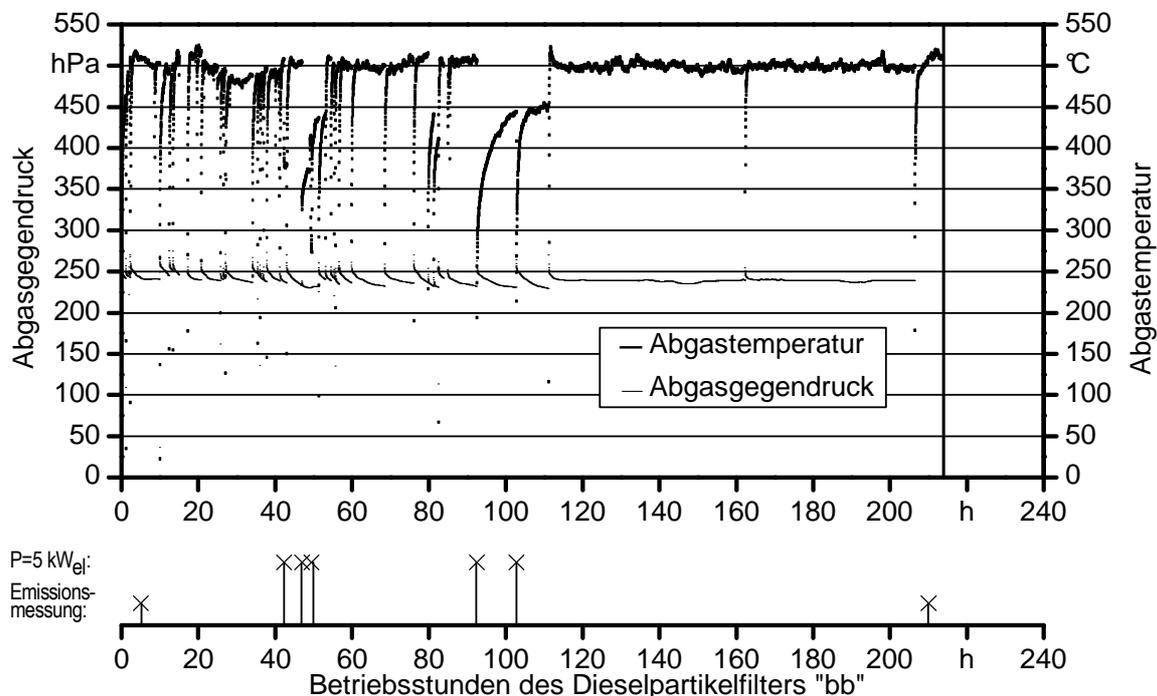


Abbildung 61: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „bb“

Demnach brachte die neue Wicklung des Filters keine Verbesserung hinsichtlich des Druckverlusts. Trotzdem wurde das Aggregat mit dem Partikelfiltersystem „bb“ 214 Stunden betrieben. Dabei musste immer wieder die Generatorleistung des BHKW von 8 auf 5 kW<sub>el</sub> vermindert werden, wenn das BHKW aufgrund zu hoher Abgas- oder Motortemperatur auf Störbetrieb schaltete. Emissionsmessungen mit Partikelfilter „bb“ fanden nach ca. 5 und nach ca. 210 Betriebsstunden statt.

### 5.2.1.3 Partikelfilter „c“ – Keramik-Monolith unbeschichtet

Beim Einsatz des Partikelfiltersystems „c“, welches nicht über eine katalytische Beschichtung verfügt, lagen die Abgastemperaturen maximal bei etwa 520 °C und somit unterhalb der für den Rußabbrand notwendigen Abgastemperatur von ca. 600 °C. Eine Regenerierung konnte deshalb nicht stattfinden. Der Rußfilter war daher nur 23 Betriebsstunden im Einsatz, weil der Abgasgegendruck entsprechend schnell mit zunehmender Beladung bereits während der ersten zwei Betriebsstunden von ca. 50 auf 250 hPa anstieg (Abbildung 62). Die Emissionsmessungen fanden nach ca. 17 Betriebsstunden statt. Da Partikelfiltersystem „c“ nicht ohne umfangreichere Maßnahme zur Absenkung der Rußabbrandtemperatur eingesetzt werden kann, wurden die Untersuchungen mit Partikelfilter „c“ eingestellt.

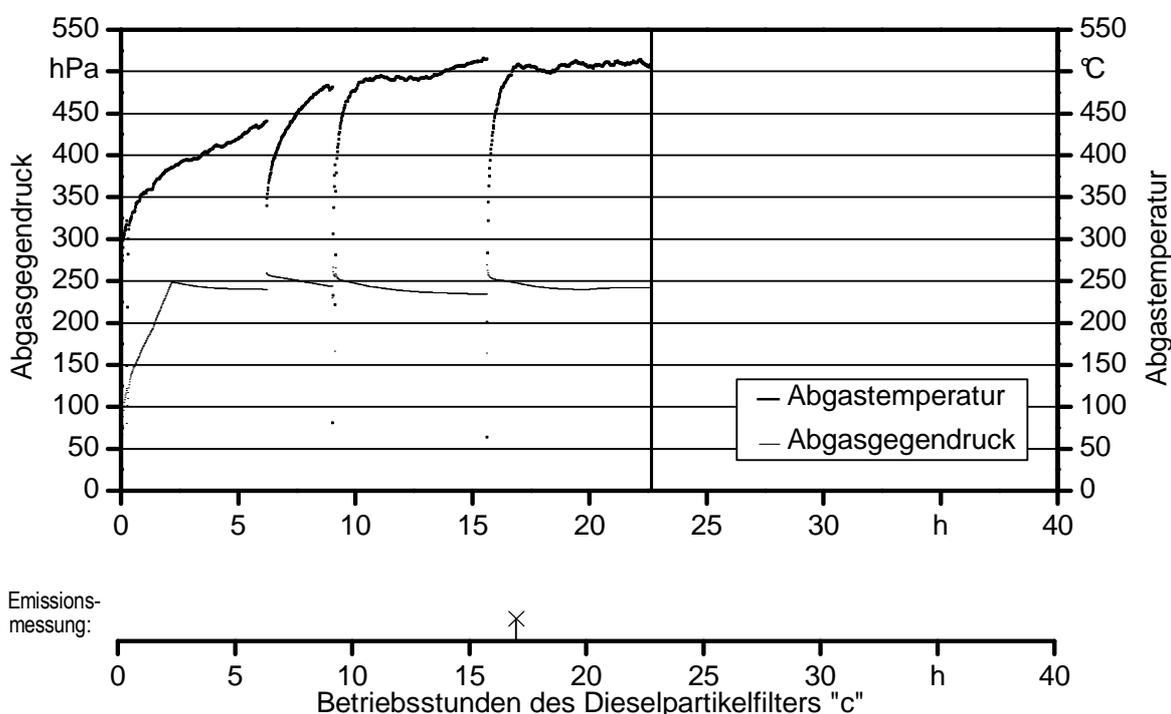


Abbildung 62: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „c“

#### 5.2.1.4 Partikelfilter „d“ – Faserverbundfilter mit NO<sub>2</sub>-Regeneration

Die Partikelfiltersysteme „d1“ „d2“ und „d3“ sind baugleiche zylinderförmige Verbundfaserfilterkörper, deren Regeneration mittels NO<sub>2</sub>, das in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator gebildet wird, erfolgt. Nach Einbau des Oxidationskatalysators wurde anfangs der Filter „d1“ im Dauerbetrieb getestet. Die Emissionsmessung erfolgte nach ca. 4 Betriebsstunden. Während der gesamten 58 Betriebsstunden stieg der Abgasgegendruck zunächst langsam und ab ca. 35 Einsatzstunden deutlich schneller von ursprünglich 40 auf über 200 hPa an, was auf eine zumindest anfänglich gut funktionierende Regeneration hinweist (Abbildung 63). Da der Abgasgegendruck ab der etwa 50. Betriebsstunde bei einer (bedingt durch den Abgasgegendruck angestiegenen) Abgastemperatur von ca. 340 °C nicht weiter zunahm, wurde angenommen, dass der Rußabbrand bei diesen bzw. höheren Temperaturen am effektivsten sei und eine elektrische Abgastemperaturanhebung (Abgasheizung) unmittelbar vor dem Rußfilter in das Abgassystem des BHKW eingebaut. Diese sollte im laufenden Betrieb, vor allem aber auch bereits in der Anfangsphase der Filterbeladung eine möglichst hohe Regenerierungsrate durch optimale Abgastemperaturen gewährleisten. Beim Ausbau des Filters „d1“ wurde bemerkt, dass sich auf der Einströmseite zwischen den Strömungskanälen eine mehrere Millimeter dicke Rußschicht gebildet hatte, die teilweise auch die Öffnungen der Strömungskanäle dazwischen verschloss. Daraufhin wurden die Untersuchungen mit dem Filter „d2“ fortgesetzt.

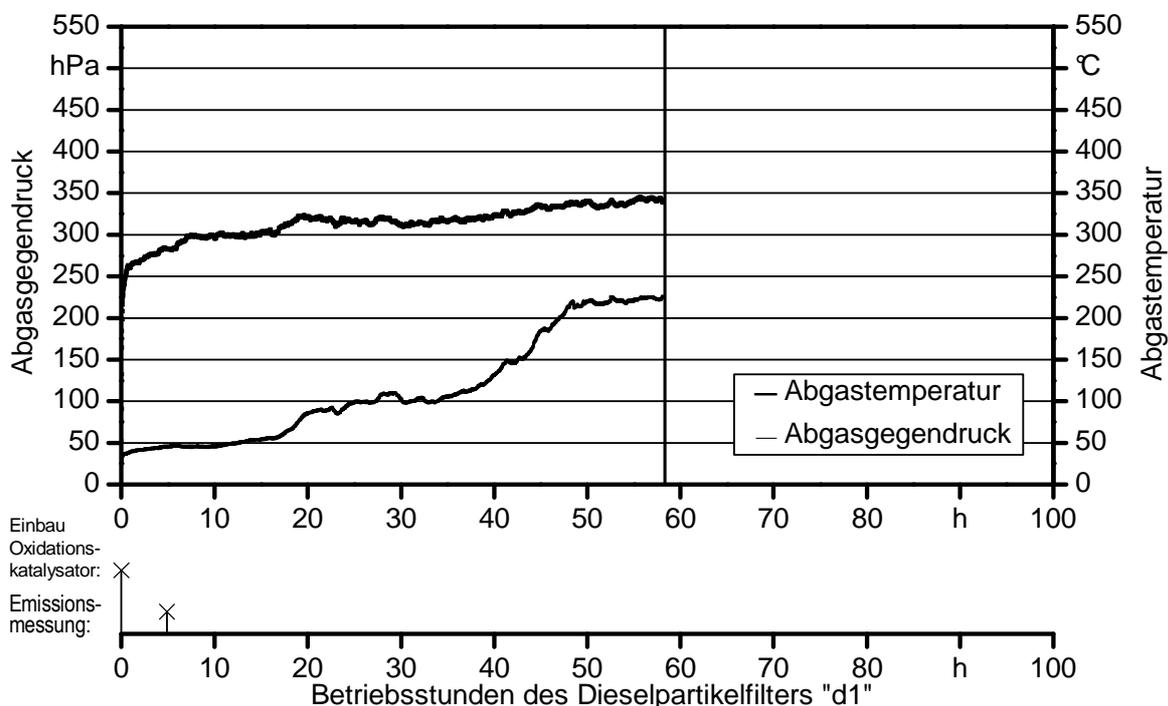


Abbildung 63: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d1“

Der Filter „d2“ wurde bei Abgastemperaturen zwischen 350 und 380 °C betrieben. Binnen 98 Stunden stieg der Abgasgegendruck von ca. 50 auf 150 hPa an, was darauf hindeutete, dass durch die Abgastemperaturerhöhung mittels elektrischer Heizelemente gegenüber Filter „d1“ ein etwas längeres wartungsfreies Betriebsintervall möglich war (Abbildung 64). Allerdings wurden bei den Emissionsmessungen nach etwa 94 Stunden mehrere kleine Beschädigungen des Filterkörpers auf der Abgaseintrittsseite beobachtet, so dass auch ein darüber hinausgehender Schaden im Innern des Filterkörpers nicht ausgeschlossen werden konnte und die weiteren Untersuchungen mit dem baugleichen dritten Filter „d3“ erfolgten.

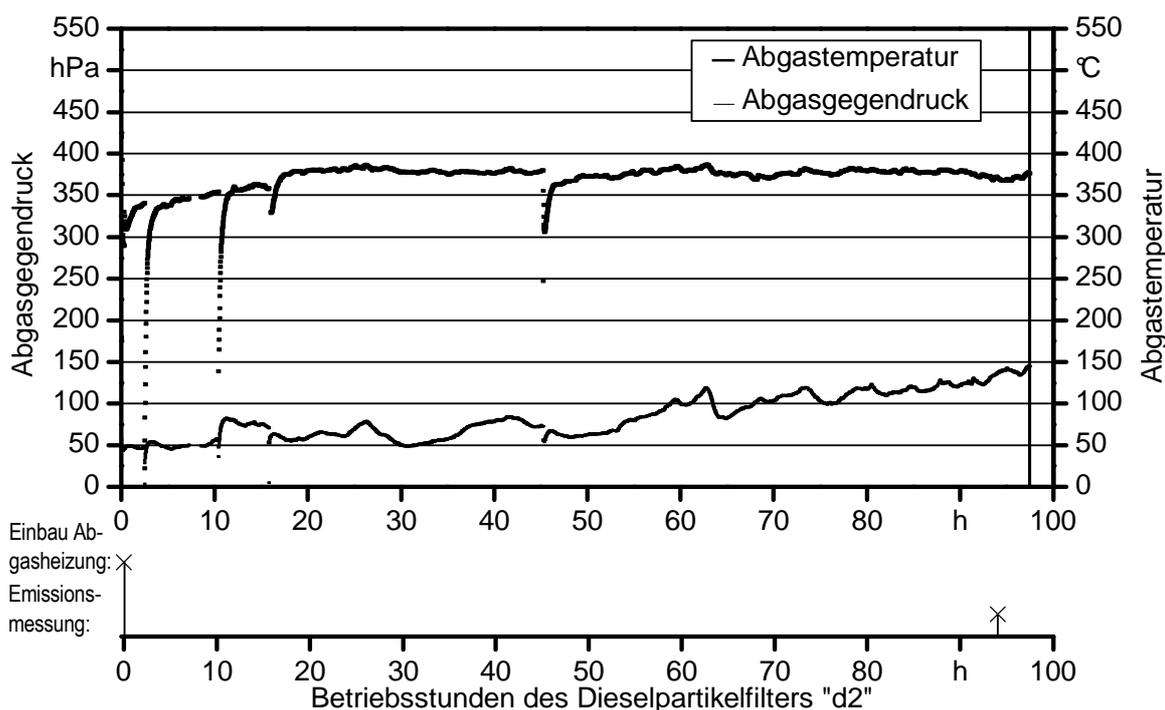


Abbildung 64: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d2“

Der Partikelfilter „d3“ führte bereits nach 26 Bh zu einem Anstieg des Abgasgegendrucks von ca. 25 auf 250 hPa (Abbildung 65). Auch eine zweimalige manuelle Reinigung mit Druckluft führte zu keiner längeren Filterstandzeit, worauf die Untersuchungen mit Partikelfiltersystem „d“ eingestellt wurden. Die Emissionsmessungen mit Filter „d3“ fanden im Neuzustand nach etwa 4 Betriebsstunden statt.

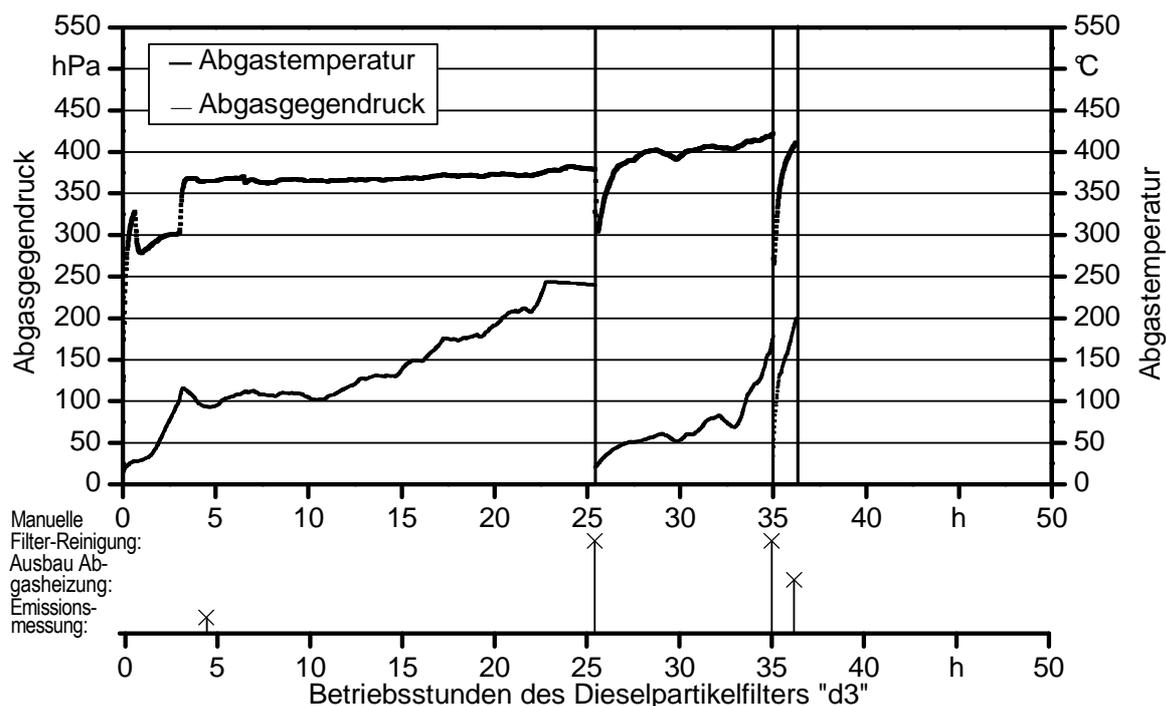


Abbildung 65: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „d3“

#### 5.2.1.5 Partikelfilter „e“ – Faserflechtfilter beschichtet

Das Dieselpartikelfiltersystem „e“ war bis zum Abschluss der Untersuchungen ca. 620 Betriebsstunden im Einsatz. Während dieser Zeit wurde der Filter fünfmal ausgebaut und gereinigt (Abbildung 66). Die Intervalle zwischen zwei Filterreinigungen betrugen normalerweise ca. 100 bis 200 Betriebsstunden. Lediglich nach der ersten Reinigung musste der Filter bereits nach weiteren 34 Stunden ausgebaut und gereinigt werden, weil der im Abgassystem vorgeschaltete Oxidationskatalysator Schaden genommen hatte und Trägermaterial im Abgasstrom bis zum Partikelfilter mitgeführt wurde, wo es sich ablagerte. Der Schaden des Oxidationskatalysators war vermutlich aufgrund von Schwingungen des Gehäuses hervorgerufen worden. Ein direkter Zusammenhang mit dem Betrieb des Partikelfiltersystems bestand nicht. Der weitere Betrieb erfolgte ohne Oxidationskatalysator. Um die Abgastemperatur auf das für die Regeneration notwendige Niveau von ca. 450 °C zu heben, wurde zu Beginn der Untersuchungen mit dem Filter „e“ eine elektrische Abgasheizung integriert. Nach etwa 122 Betriebsstunden erfolgte darüber hinaus noch eine Verstärkung der Wärmeisolierung des Abgassystems. Die Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „e“ wurden im Neuzustand nach einer kurzen Einlaufzeit, bei insgesamt 420 Betriebsstunden, bei insgesamt 422 Betriebsstunden unmittelbar nach einer manuellen Filterreinigung und nach insgesamt 441 Betriebsstunden durchgeführt.

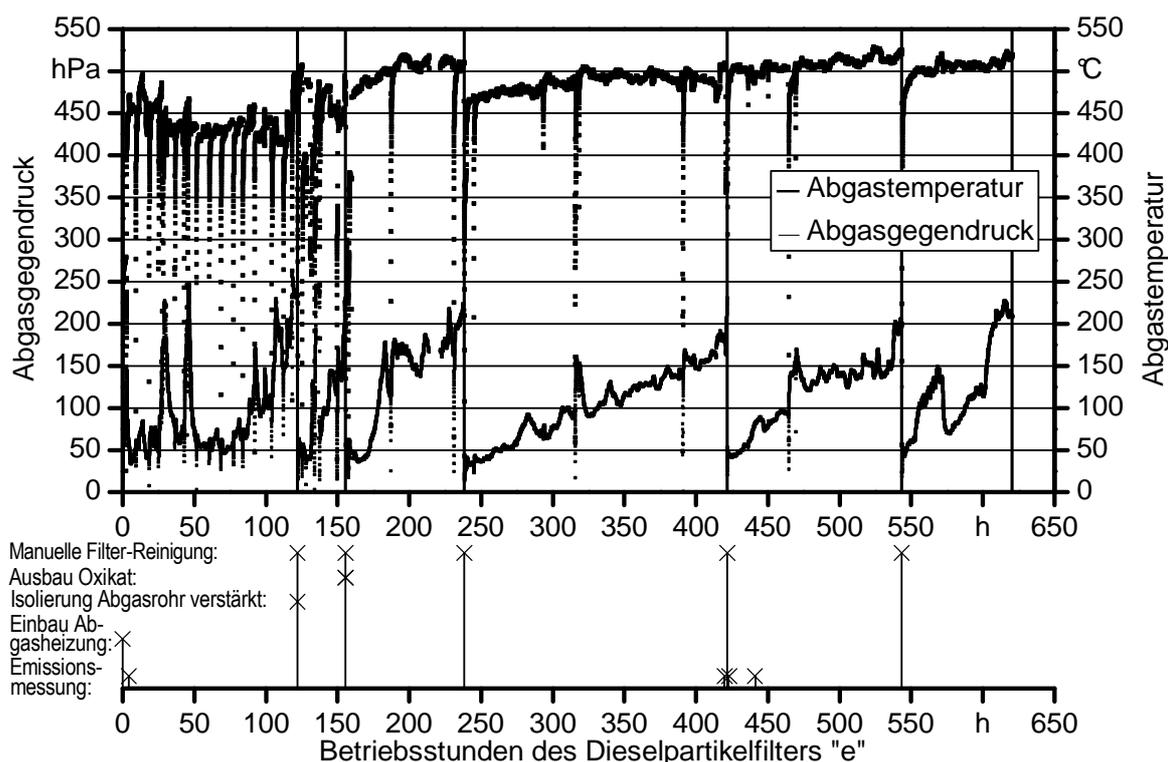


Abbildung 66: Abgasgegendruck und Abgastemperatur sowie Ereignisse beim Einsatz von Partikelfiltersystem „e“

## 5.2.2 Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Partikelfiltern

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen mit den verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen werden in den nachfolgenden Kapiteln gezeigt. Neben der Konzentration von Staub im Abgas werden auch die Konzentrationen der Emissionskomponenten Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Gesamt-C dargestellt, da diese durch katalytische Partikelfilterbeschichtungen und veränderte Strömungsverhältnisse im Abgasstrom (Abgasgegendruck) beeinflusst werden können. Die Höhe jeder Säule der nachfolgenden Abbildungen stellt den arithmetischen Mittelwert von  $n$  aufeinanderfolgenden Halbstundenmittelwerten der Schadstoffkonzentrationen im Abgas dar. Die Fehlerbalken geben die Spannweiten der Halbstundenmittelwerte an. Eine Beschreibung der mit den Buchstabencodes von „a“ bis „e“ versehenen Partikelfiltersysteme erfolgt in Kapitel 4.1.4. Der Staubminderungsgrad wird durch korrespondierende Messungen mit und ohne dem jeweiligen Partikelfiltersystem bestimmt.

### 5.2.2.1 Staub

Wie in Abbildung 67 zu sehen ist, können die Staub-Emissionen von mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW mit den getesteten Dieselpartikelfiltersystemen zum Teil deutlich reduziert werden.

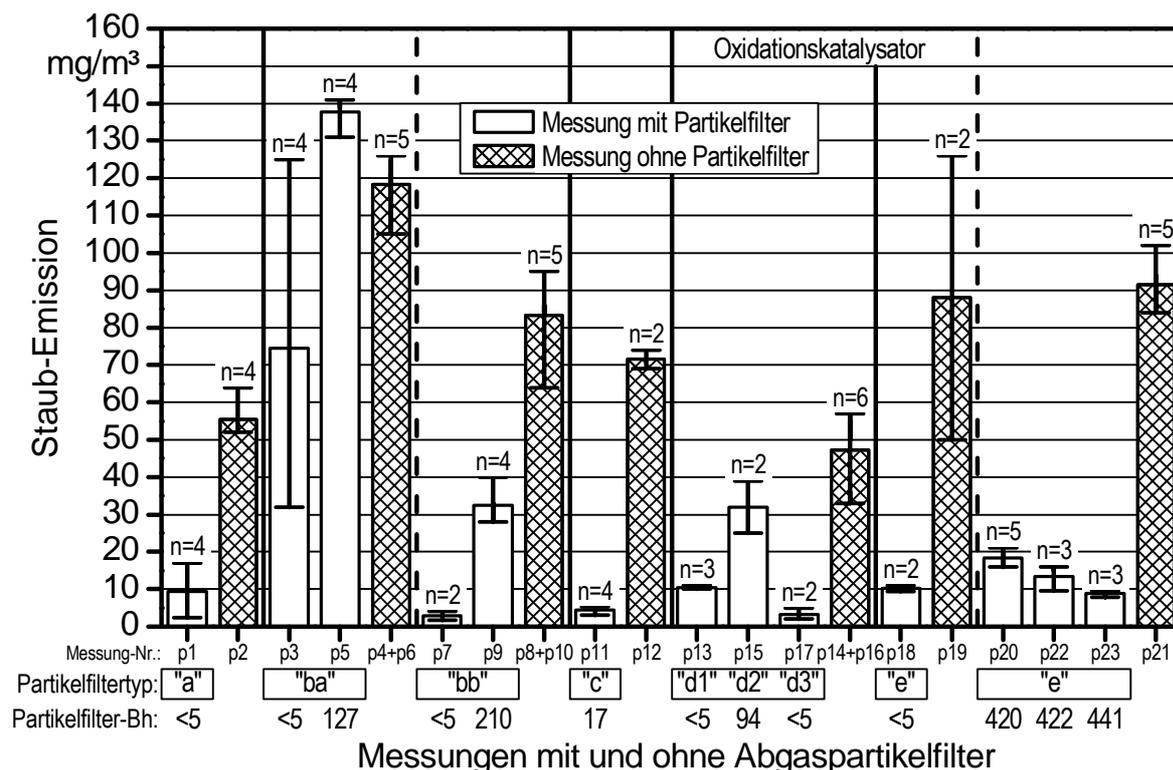


Abbildung 67: Staub-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Die mittleren Staub-Emissionen mit den Filtersystemen „a“ und „c“ nach einer nur kurzen Einlaufphase (Messungen p1 und p11) liegen bei 9 bzw. 4 mg/m<sup>3</sup>. Im Vergleich dazu sind die Staub-Emissionen ohne Filter mit 56 und 72 mg/m<sup>3</sup> (Messungen p2 und p12) erwartungsgemäß deutlich höher. Emissionsmessungen nach mehreren Filtereinsatzstunden wurden bei diesen beiden Systemen nicht durchgeführt, da Filter „a“ während des Einsatzes eine erhebliche innere Beschädigung erfahren hatte und Partikelfiltersystem „c“ ohne Maßnahmen zur Unterstützung der Regeneration unter den gegebenen Bedingungen für einen Langzeiteinsatz nicht geeignet war (Kapitel 5.2.1).

Mit dem Partikelfilter „ba“ wurde im Neuzustand nur eine geringfügige Staub-Minderung von 37 % erzielt (Messung p3). Dies kann auf eine falsche Dimensionierung bzw. Fehlfunktion des Filterkörpers zurückgeführt werden, worauf auch die große Spannweite der einzelnen Halbstundenmittelwerte hindeutet. Nach insgesamt 127 Bh (Messung p5) wurden mit 138 mg/m<sup>3</sup> sogar höhere Staub-Emissionen als ohne Partikelfilter (118 mg/m<sup>3</sup>) ermittelt. Ursache dafür ist eine Überladung des Partikelfilters, die einen hohen Abgasgegendruck mit starker Motorbelastung nach sich zog. Das für die Regeneration erforderliche Temperaturniveau wurde nicht dauerhaft erreicht. Eine kurzzeitige Anhebung der Abgastemperatur auf die erforderlichen 430 °C reichte nicht aus, um eine Regeneration einzuleiten.

Die größte Effektivität aller Filter weist Partikelfilter „bb“ im neuen Zustand auf, durch den die Staub-Emissionen ausgehend von  $83 \text{ mg/m}^3$  bei der Referenzmessung auf  $3 \text{ mg/m}^3$  (Messung p7) gesenkt wurden. Allerdings herrschte hierbei ein sehr hoher Abgasgegendruck. Nach ca. 210 Betriebsstunden (Messung p9) nahm die Staubminderung durch Filter „bb“ von 97 % im Neuzustand auf 61 % ab. Ursache dafür war ein Filterschaden, der wahrscheinlich auf Grund von zu hohem Abgasgegendruck aufgetreten war.

Mit den beiden baugleichen Partikelfiltern „d1“ und „d3“ wurden im Neuzustand Staub-Minderungsraten von 78 und 93 % erzielt (Messungen p13 und p17). Mit dem ebenfalls baugleichen Filter „d2“ lagen nach 94 Filtereinsatzstunden die Staub-Emissionen mit  $32 \text{ mg/m}^3$  (Messung p15) 3- bis 11-mal so hoch wie bei den anderen Filtern im Neuzustand. Ursache dafür kann neben einer generell geringen Abscheideleistung auch eine mechanische Beschädigung des Filters „d2“ sein, die sich im eingebauten Zustand während des Betriebs ereignet hatte.

Bei allen vier Messungen mit Partikelfiltersystem „e“ liegen die Staub-Emissionen zwischen  $9$  und  $18 \text{ mg/m}^3$  und damit deutlich unter den Staub-Emissionen ohne Partikelfilter von  $88$  bzw.  $91 \text{ mg/m}^3$  (Messungen p19 und p21). Die niedrigste Partikelabscheidung von Filter „e“ im Vergleich zur Referenzmessung ohne Partikelfilter wurde mit 80 % bei Messung p20 unmittelbar vor der vierten manuellen Filterreinigung ermittelt. Dies ist möglicherweise auf den höheren Abgasgegendruck bei starker Filterbeladung und der dadurch erhöhten Staub-Emissionen im Rohgas (vor dem Partikelfilter) zurückzuführen. Zudem gelangen mit steigendem Druckgefälle am Filter zunehmend mehr Partikel mit dem Abgasstrom durch das Filtermedium hindurch, die emittiert und als Staub-Emission erfasst werden. Eine Abnahme der Staub-Minderung des Filters kann innerhalb des Beobachtungszeitraums nicht festgestellt werden. Bei Messung p23, nach insgesamt etwa 441 Filtereinsatzstunden wurde sogar die bei Partikelfiltersystem „e“ niedrigste Staubkonzentration im Abgas ermittelt.

### 5.2.2.2 Kohlenmonoxid

Die bei den 23 Emissionsmessungen ermittelten CO-Emissionen sind in Abbildung 68 dargestellt. Auffällig sind dabei die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Messungen. Bei den Messungen p13 bis p19 sind die CO-Konzentrationen im Abgas deutlich niedriger als bei den anderen Messungen (mit Ausnahme von Messung p1), unabhängig davon, ob ein Partikelfilter eingebaut war oder nicht. Dies liegt daran, dass bei den Partikelfiltersystemen „d1“, „d2“ und „d3“ ein Oxidationskatalysator vorgeschaltet war, um mithilfe des darin vermehrt gebildeten  $\text{NO}_2$  einen kontinuierlichen Rußabbrand im Filter zu erreichen (Kapitel 2.5.3).

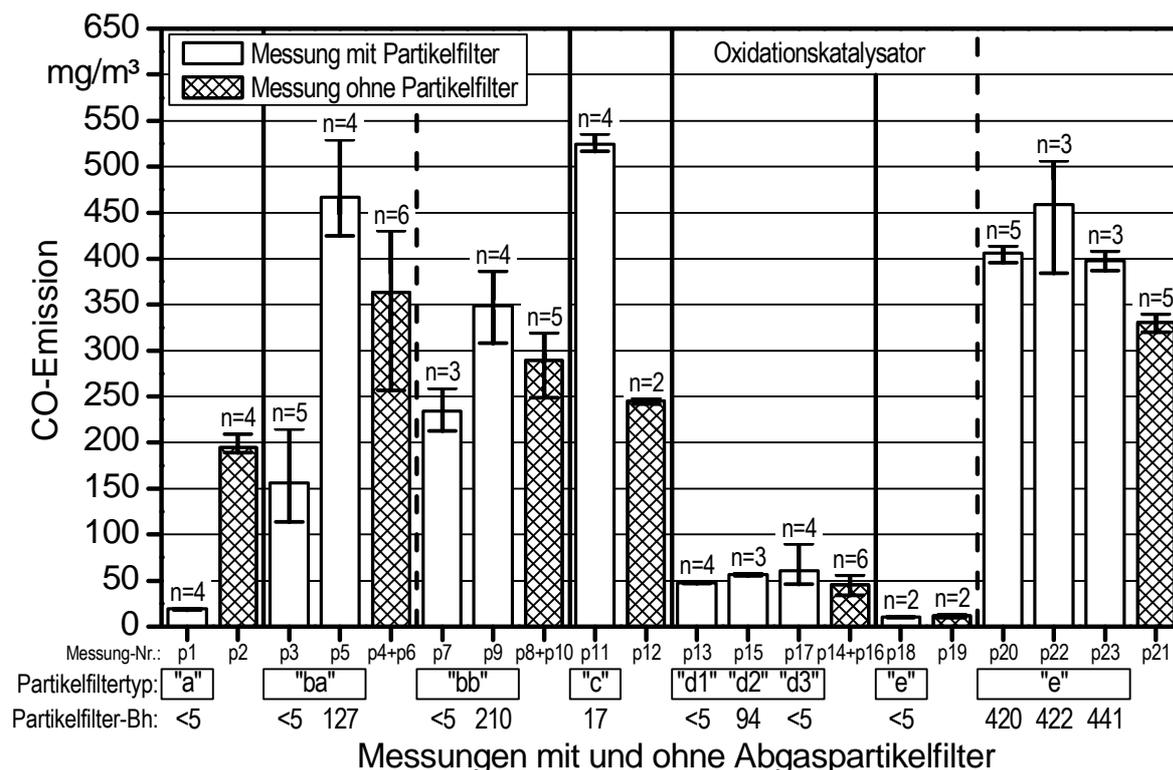


Abbildung 68: CO-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Auch bei der ersten Messung zur Bestimmung der Staub-Minderung durch Partikelfiltersystem „e“ war dieser Oxidationskatalysator eingebaut, wodurch sich die niedrigen CO-Konzentrationen von maximal 21 mg/m<sup>3</sup> im Vergleich zu den darauffolgenden Messungen erklären lassen. Auf etwa gleichem Niveau liegen die CO-Emissionen mit dem Partikelfilter „a“ (Messung „p1“), der mit einer hochaktiven katalytischen Beschichtung zur Reduzierung der Regenerationstemperatur versehen ist. Die CO-Emissionen verringern sich mit Partikelfilter „a“ um 90 % gegenüber dem Wert ohne Filter.

Auch die Filter „ba“, „bb“ und „e“ verfügen über eine katalytische Beschichtung zur Senkung der Rußabbrandtemperatur, die aber nur im Falle des Filters „ba“ und „bb“ im jeweils neuen Zustand (Messungen p3 und p7) zu einer Minderung der CO-Emissionen von 57 bzw. 19 % führt. Bereits nach wenigen Einsatzstunden ist bei diesen beiden Filtern ebenso wie beim Filtersystem „e“ eine Erhöhung der CO-Emissionen zwischen ca. 20 und 39 % im Vergleich zum BHKW-Betrieb ohne Partikelfiltersystem zu verzeichnen.

Die katalytischen Beschichtungen der untersuchten Filter können also mit Ausnahme des Partikelfilters „a“ zu keiner wesentlichen Verbesserung der CO-Emissionen, verglichen mit dem Betrieb ohne Filter, beitragen. Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass durch die Ablagerung von Partikeln auf der katalytisch aktiven Beschichtung während des Betriebs

die ohnehin geringe Effektivität noch weiter abnimmt und durch den steigenden Abgasgedruck gleichzeitig der Ausstoß von CO zunimmt. Der höchste Anstieg der CO-Emission ist mit Partikelfiltersystem „c“ zu beobachten, welches ohne katalytische Beschichtung zu mehr als einer Verdopplung der CO-Emissionen im Abgas im Vergleich zum BHKW-Betrieb ohne Filter führt.

Bei den Messungen ohne Oxidationskatalysator und ohne Abgaspartikelfilter wurden CO-Konzentrationen von 195 bis 331 mg/m<sup>3</sup> gemessen. Diese entsprechen weitgehend den Emissionskonzentrationen der in Kapitel 5.1.7 beschriebenen Untersuchungsergebnisse im Abgas vor dem Oxidationskatalysator. Auch die CO-Konzentrationen bei den Messungen mit Partikelfiltersystem und Oxidationskatalysator sowie bei den Messungen des Partikelfilters „a“ mit katalytischer Beschichtung liegen in gleicher Größenordnung wie die Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Oxidationskatalysator (Kapitel 5.1).

### 5.2.2.3 Stickstoffoxide

Die bei den Messungen mit und ohne Dieselpartikelfilter ermittelten Stickstoffoxid-Emissionen sind in Abbildung 69 dargestellt. Die Konzentrationen schwanken zwischen 1511 und 2161 mg/m<sup>3</sup>.

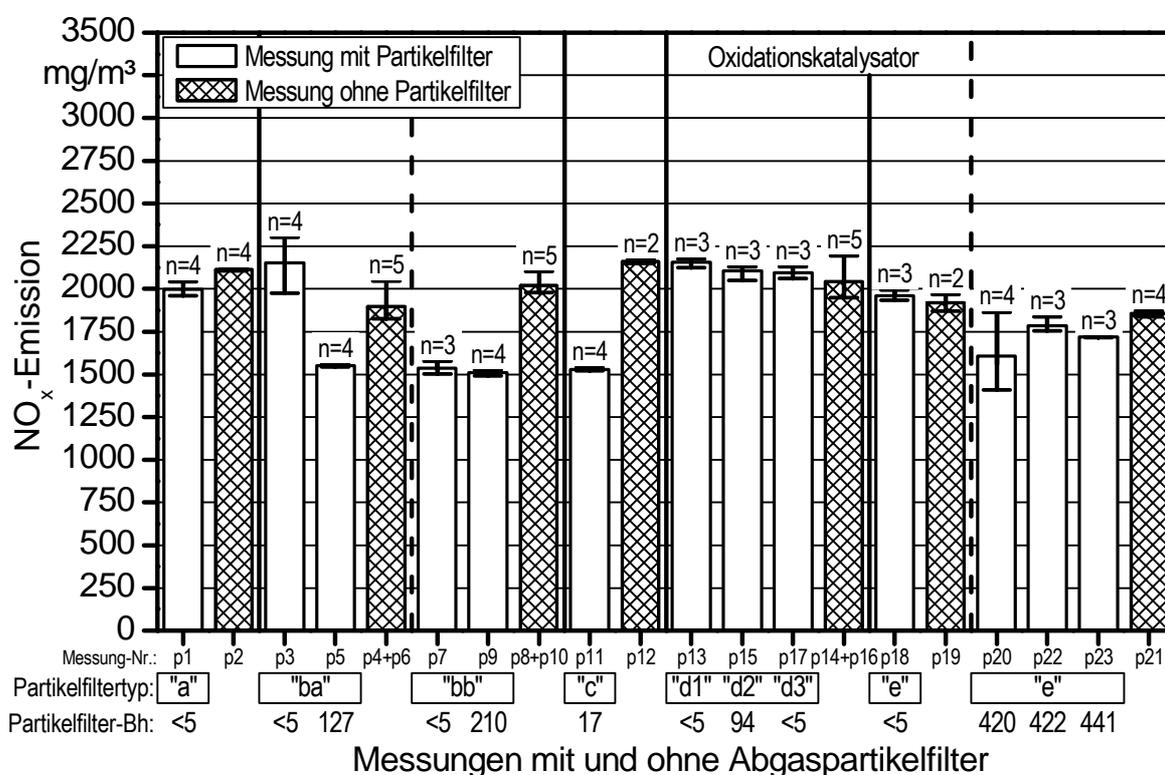


Abbildung 69: NO<sub>x</sub>-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 % O<sub>2</sub>-Gehalt)

Eine Beeinflussung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch die Partikelfiltersysteme ist nur bei hohen Abgasgedrücken über ca. 200 hPa feststellbar. So wurden bei den Messungen p5, p7, p9, p11 und p20 mit ca. 1511 bis 1606  $\text{mg}/\text{m}^3$  die niedrigsten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ermittelt. Diese liegen zwischen 14 und 29 % unterhalb des Wertes ohne Partikelfilter. In den anderen Fällen kommt es lediglich zu geringfügigen Unterschieden zwischen den Messungen mit und ohne Partikelfilter. Eine Abnahme von  $\text{NO}_x$  mit steigendem Abgasgedruck erklärt sich dadurch, dass, bedingt durch den Rückstau im Krümmer, ein Teil der Abgase im Bereich der Ventilüberschneidungen in den Zylinder zurückströmt, was einer Art internen Abgasrückführung gleicht [3].

#### 5.2.2.4 Gesamt-C

Die Gesamt-C-Emissionen sind in Abbildung 70 dargestellt. Sie betragen im Mittel zwischen ca. 3 und 18  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Der Einfluss der Partikelfiltersysteme auf die Gesamt-C-Emission liegt meist innerhalb der Schwankungsbreite der Halbstundenmittelwerte einer Messung. Im Gegensatz dazu kommt es beim Filter „a“, der mit einer hochaktiven katalytischen Beschichtung versehen ist, zu einem deutlichen Rückgang der Gesamt-C-Konzentration im Abgas auf etwa ein Fünftel des Wertes ohne Filter. Bei den Messungen p7 bis p12 sowie p18 und p19 wurden keine Gesamt-C-Emissionen bestimmt.

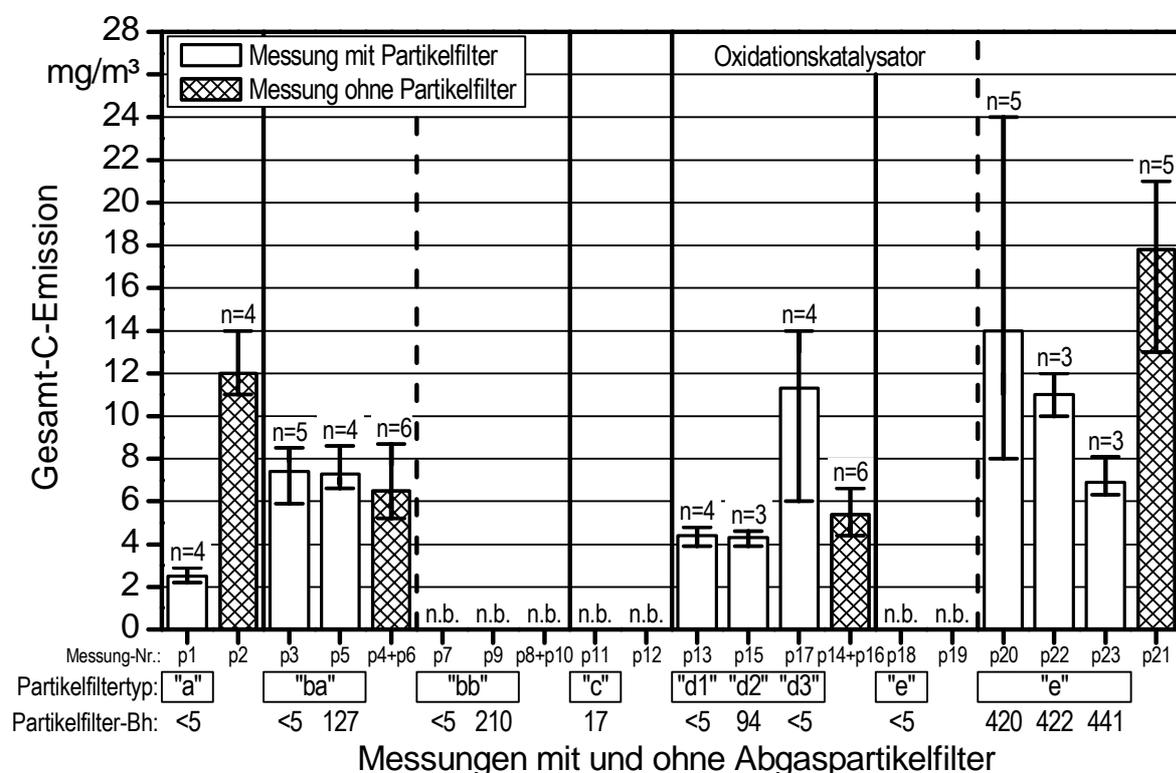


Abbildung 70: Gesamt-C-Emission des rapsölbetriebenen BHKW A mit verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter (Mittelwert und Spannweite von n Halbstundenmittelwerten; bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand und 5 %  $\text{O}_2$ -Gehalt)

### 5.2.2.5 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass die ausgewählten für Dieselkraftstoff entwickelten Partikelfiltersysteme zwar grundsätzlich zur Minderung von Staub-Emissionen rapsölkraftstoffbetriebener BHKW geeignet sind, aber einen hohen Wartungsaufwand erfordern. Dies ist mitunter zum Teil auch auf die Versuchsanstellung zurückzuführen. Als problematisch stellte sich der nachträgliche Einbau der Filter aufgrund des nur begrenzt verfügbaren Bauraums heraus. Aufgrund der geringen Abgastemperaturen mussten zusätzliche Komponenten, wie z. B. Abgasheizungen, in das Abgassystem integriert werden. Diese Umbaumaßnahmen am Abgassystem des Aggregats können sich ungünstig auf das Emissionsverhalten auswirken, wenn auch ein Vergleich der Referenzmessungen mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.1 auf keine wesentlichen Unterschiede hinweist. Aufgrund des begrenzten Bauraums am BHKW war es weiterhin nicht möglich, die Filter so im Abgasstrom zu positionieren, dass eine ungleichmäßige über den Filterquerschnitt verteilte Beladung ausgeschlossen werden konnte. Dies könnte zu unkontrollierten Regenerationen und Materialschäden geführt haben. Undichtigkeiten und mechanische Beschädigungen des Filters während des Betriebs sind weitere Faktoren, die Einfluss auf das Betriebs- und Emissionsverhalten nahmen. Darüber hinaus wirkten sich die bei den Untersuchungen voneinander abweichenden Betriebsprofile des BHKW A beim Einsatz der verschiedenen Partikelfiltersysteme und die in Kapitel 5.1.2 ermittelten Schwankungen im Emissionsverhalten auf die Ergebnisse aus. Neben den versuchsbedingten Einflüssen, kann aber auch angenommen werden, dass die unterschiedlichen Abgaspartikeleigenschaften zwischen Rapsöl- und Dieselbetrieb Ursache für die beobachteten kurzen Standzeiten der Partikelfilter waren. Hinweise dazu ergeben sich aus den Untersuchungen von HOFMANN et al. (2006) [47] zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsölmethylester (RME) und Rapsölkraftstoff. Danach unterscheiden sich die Partikel-Emissionen der Kraftstoffe Rapsmethylester, Rapsöl und Dieselkraftstoff hinsichtlich der Masse, Anzahl, Größenverteilung und Zusammensetzung signifikant. Weitere Untersuchungen bestätigen die kraftstoffspezifischen Abgaspartikeleigenschaften [78] [25]. Schließlich ist auch zu berücksichtigen, dass bei einem Teil der ausgewählten Diesel-Partikelfiltersysteme der technische Stand zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht voll ausgereift war.

## 6 Einordnung der Ergebnisse

### 6.1 Emissionsverhalten rapsölkraftstoffbetriebener Praxis-BHKW

Für die vorliegenden Untersuchungen zum Emissionsverhalten von rapsölkraftstoffbetriebener BHKW wurden drei repräsentative Anlagen ausgewählt. Allerdings hat die gerade in jüngster Zeit verstärkte Nachfrage nach pflanzenölbetriebenen BHKW zu einer enormen Verbreiterung des Angebots, basierend auf einer Vielzahl unterschiedlicher Motoren und Umrüsttechniken geführt. Die vorliegende Arbeit zeigt anhand der durchgeführten Messungen aber auch unter Einbeziehung von Literaturangaben, dass das Emissionsverhalten zwischen verschiedenen BHKW stark voneinander abweichen kann. Somit beziehen sich die gewonnenen Ergebnisse nur auf die hier ausgewählten BHKW und können nicht allgemeingültig auf andere, insbesondere neuere Anlagen übertragen werden. Dennoch geben die ermittelten Spannweiten der Schadstoffkonzentrationen im Abgas Anhaltspunkte zur Charakterisierung des Emissionsverhaltens von PflanzenölbHKW, zumal sie sich gut in den Stand des Wissens einfügen. Darüber hinaus liefern die Ergebnisse Hinweise zur Optimierung hinsichtlich eines emissionsarmen Betriebs. Denn Maßnahmen zur Minderung des Emissionsverhaltens sind um so dringlicher, je stärker die Bedeutung pflanzenöltauglicher BHKW zunimmt. Für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungspflichtige Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) von weniger als 1 MW wurden bislang keine Vorschriften zur Emissionsbegrenzung festgelegt. Sofern aber kleinere BHKW zu beurteilen sind, ob schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen vorliegen, werden häufig auch die Grundsätze der TA Luft herangezogen [35].

Werden die mittleren **Kohlenmonoxid-Emissionen (CO)** aller drei BHKW mit der für Anlagen größer 1 MW<sub>FWL</sub> gültigen Emissionsbegrenzung nach TA Luft 2002 von 0,30 g/m<sup>3</sup> verglichen, so wird deutlich, dass bei jeder Messung dieser Wert deutlich unterschritten wird (Abbildung 71 bis Abbildung 74). Voraussetzung dafür ist, dass die BHKW über Oxidationskatalysatoren verfügen und dass sie nahe der vom Hersteller angegebenen Nennleistung betrieben werden. Darüber hinaus ist es von Bedeutung, dass sich alle Komponenten in einwandfreiem Zustand befinden. Wird all dies erfüllt, sind CO-Konzentrationen im Abgas zwischen ca. 0,02 und 0,05 g/m<sup>3</sup> zu erwarten, was etwa 10 % der für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub> gültigen Emissionsbegrenzung gemäß TA Luft 2002 entspricht. Im Schwachlastbetrieb oder ohne Oxidationskatalysator ist allerdings mit bis zu 10-fach höheren CO-Konzentrationen zu rechnen (Kapitel 5.1.3), wodurch die Emissionsbegrenzung gemäß TA Luft 2002 für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub> oft nicht erreicht wird. Des Weiteren wirken sich auch hohe Abgasgedrücke, z. B. durch partikelbeladene Komponenten des Abgassystems oder defekte Abgaspartikelfilter erheblich auf einen Anstieg der CO-Emissionen auf das 5-fache des Normalbetriebs aus (Abbildung 56).

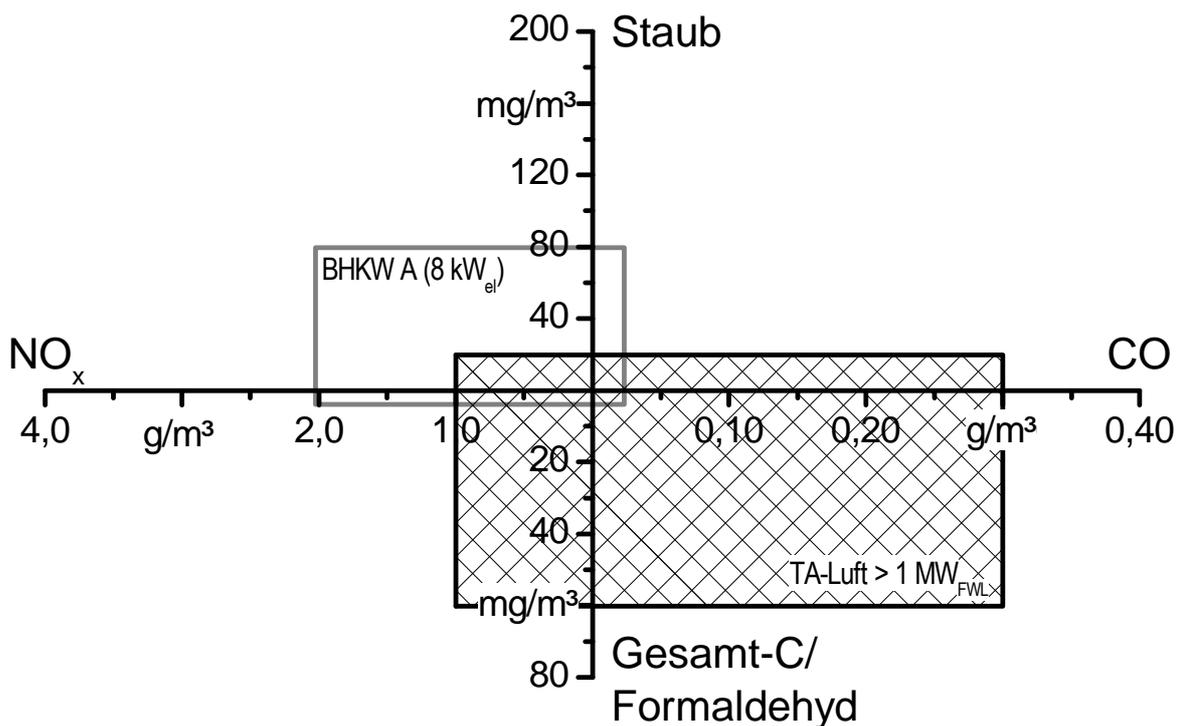


Abbildung 71: Mittelwerte von CO, NO<sub>x</sub>, Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW A im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub>

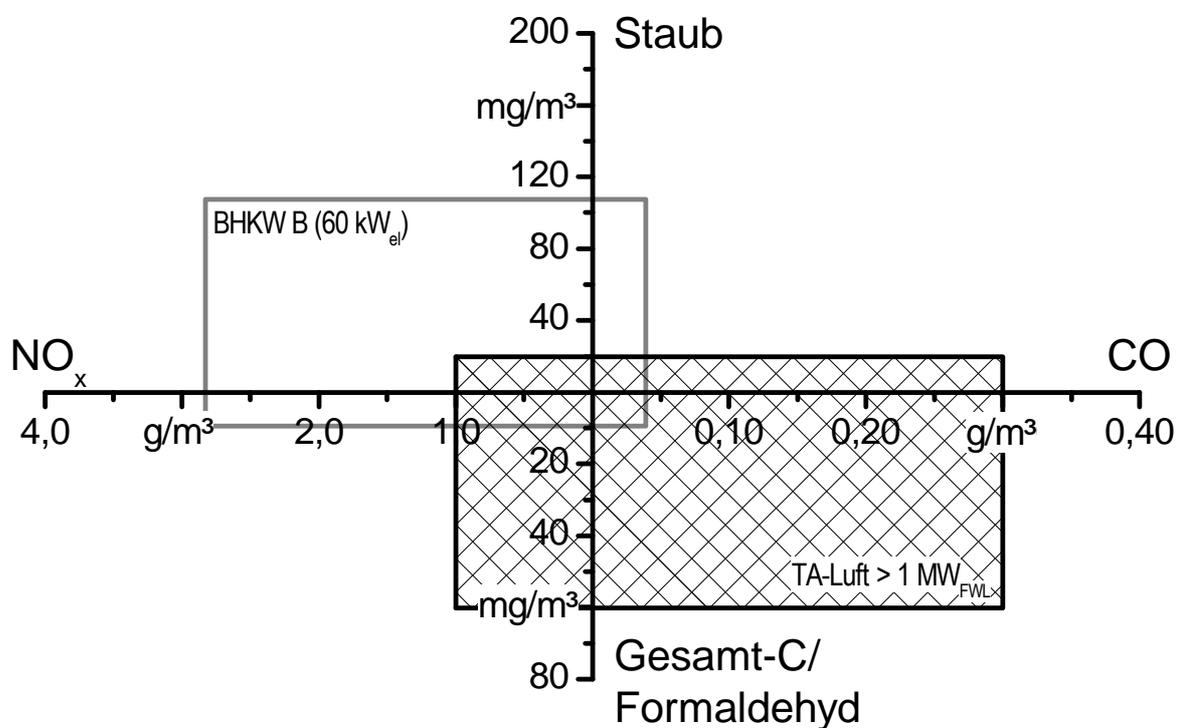


Abbildung 72: Mittelwerte von CO, NO<sub>x</sub>, Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW B im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub>

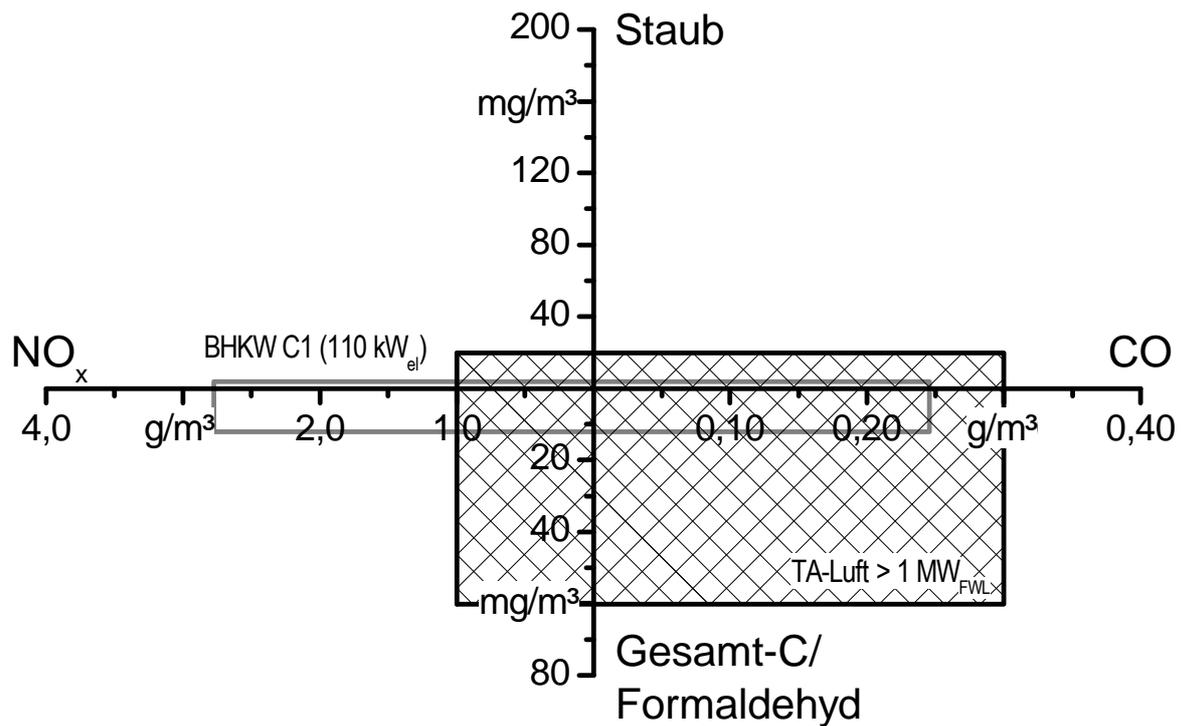


Abbildung 73: Mittelwerte von CO, NO<sub>x</sub>, Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW C1 im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub>

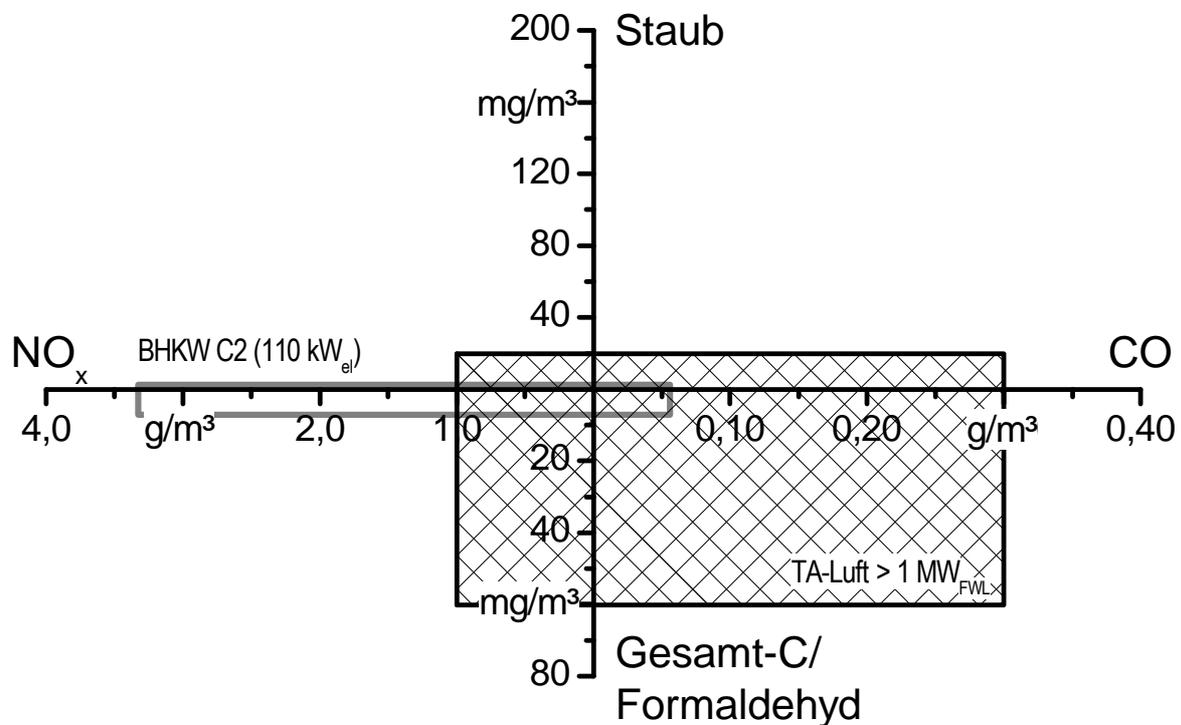


Abbildung 74: Mittelwerte von CO, NO<sub>x</sub>, Staub und Gesamt-C bzw. Formaldehyd bei BHKW C2 im Vergleich zu den Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub>

Die **Stickstoffoxid-Emissionen (NO<sub>x</sub>)** von allen drei Aggregaten liegen zwischen ca. 2,0 und 3,3 g/m<sup>3</sup> und übersteigen damit die Emissionsbegrenzung von 1,0 g/m<sup>3</sup> nach TA Luft 2002 (für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub>) um das 2- bis 3,3-fache (Abbildung 71 bis Abbildung 74). Zur Einordnung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungspflichtigen BHKW wurde ein Orientierungswert eingeführt, der für die hier untersuchten BHKW < 500 kW<sub>FWL</sub> 3,0 g/m<sup>3</sup> beträgt (Tabelle 3). Wird dieser zum Vergleich herangezogen, so ist festzustellen, dass nur das mit einem Wirbelkammer-Motor ausgestattete BHKW A bei allen Messungen darunter liegt. Bei den BHKW mit Direkteinspritzung kommt es erwartungsgemäß zu deutlich höheren Stickstoffoxidkonzentrationen im Abgas, wenn auch BHKW B und BHKW C1 im Mittel aller Messungen den Orientierungswert noch knapp einhalten. Lediglich BHKW C2 liegt bei beiden Messungen über dem Orientierungswert von 3,0 g/m<sup>3</sup>.

Den NO<sub>x</sub>-Emissionen wird von Seiten der Luftreinhaltung eine hohe Bedeutung beigegeben. Wirkungsvolle Entstickungsmaßnahmen, wie z. B. SCR-Katalysatoren, werden bei kleineren BHKW, für die keine immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen erforderlich sind, aufgrund des vergleichsweise hohen technischen Aufwands und hoher Investitionskosten in der Regel nicht getroffen. Aufgrund des deutlichen Überschreitens des Werts der NO<sub>x</sub>-Emissionsbegrenzung von 1,0 g/m<sup>3</sup> (gültig für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub>) sind für dessen Einhaltung eine nachmotorische Entstickung, wie z. B. der Einsatz von SCR-Katalysatoren, anzustreben. Eine innermotorische Optimierung hinsichtlich der NO<sub>x</sub>-Emissionen (z. B. durch Anpassung des Einspritzzeitpunkts) ist nur in begrenztem Umfang möglich und geht im Allgemeinen mit einem Anstieg der CO-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs einher, so dass diese Maßnahme aufgrund wirtschaftlicher Einbußen und höherem CO<sub>2</sub>-Ausstoß nur in Einzelfällen und nur für geringfügige NO<sub>x</sub>-Minderungsraten sinnvoll erscheint.

Die **Gesamt-C-Emissionen** der hier untersuchten BHKW betragen im Mittel zwischen 2 und 15 mg/m<sup>3</sup> (Abbildung 26). Emissionsbegrenzungen für Gesamt-C-Emissionen sind bei Verbrennungsmotoranlagen in der TA Luft 2002 nicht aufgeführt. Allerdings wurde eine Emissionsbegrenzung für Formaldehyd im Abgas mit einer Massenkonzentration von höchstens 60 mg/m<sup>3</sup> ab einer Anlagengröße von 1 MW<sub>FWL</sub> festgelegt. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die Möglichkeiten, Emissionen an organischen Stoffen zu vermindern, entsprechend dem Stand der Technik auszuschöpfen sind. Da die Begrenzung für Formaldehyd-Emissionen deutlich über den ermittelten Gesamt-C-Emissionen der untersuchten pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerke liegt, ist die Erfüllung dieser Anforderung für Anlagen mit Oxidationskatalysator problemlos möglich (Abbildung 71 bis Abbildung 74). Die Aldehyde machen als Bestandteile der erfassten Gesamt-C-Emissionen bei dem BHKW mit Wirbelkammermotor etwas weniger als die Hälfte der Gesamt-C-Emissionen aus. Da Aldehyde wie auch eine Reihe anderer Kohlenwasserstoffverbindungen eine hohe gesundheitliche Relevanz aufweisen und störende Gerüche verursachen, ist auf deren Minderung ein besonderes Augenmerk zu legen.

Für eine Minimierung der Gesamt-C-Emissionen sind daher Oxidationskatalysatoren unbedingte Voraussetzung. Diese erreichen Umsetzungsraten bei den Gesamt-C-Emissionen von 70 % und bei den darin enthaltenen Aldehyden um 80 % (Kapitel 5.1.7). Außerdem sind auch die Einflüsse verschiedener Betriebsweisen zu berücksichtigen, da es insbesondere in der Kaltstartphase und bei Schwachlastbetrieb aufgrund der eingeschränkten Funktionsweise des Oxidationskatalysators auch zu einer Vervielfachung der Schadstoffkonzentration im Abgas kommen kann.

Bei den hier untersuchten BHKW wurden **Staub-Emissionen** von 2 bis 166 mg/m<sup>3</sup> ermittelt (Abbildung 27). Die Staubkonzentrationen variieren aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren im Vergleich zu den gasförmigen Emissionen meist stärker sowohl zwischen den einzelnen Messungen eines BHKW als auch zwischen den BHKW. Die mit Abgaspartikelfiltersystemen ausgestatteten Aggregate C1 und C2 des BHKW C halten die Emissionsbegrenzung gemäß TA Luft für Staub von 20 mg/m<sup>3</sup> für Anlagen größer 1 MW<sub>FWL</sub> ein (Abbildung 71 bis Abbildung 74). Dieser Wert entspricht auch dem Zielwert für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen kleiner 1 MW<sub>FWL</sub> (Tabelle 3). BHKW A und B weisen ohne Partikelfilter Staubkonzentrationen im Abgas von mindestens dem Dreifachen des Zielwerts auf. Es erscheint problematisch, dass der Zielwert für Staub-Emissionen von 20 mg/m<sup>3</sup> allein durch motorische Maßnahmen (z. B. durch optimierte Einspritzdüsen und -systeme) erreicht werden kann. Der Einsatz von Partikelfiltersystemen ist daher anzustreben. Zwar wurde bei Aggregat C1 von BHKW C, das mit einem Rußfilter ausgestattet ist, der Zielwert von 20 mg/m<sup>3</sup> durchwegs unterschritten, aber bei diesem Aggregat traten häufig Störungen am Partikelfilter auf, woraus eine inakzeptable Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen von CO und Gesamt-C resultierte.

Partikelfilter sind effektiv aber bislang noch mit vielen Problemen behaftet, insbesondere wenn sie für eine aggregatsunabhängige Nachrüstung dienen sollen. Erst wenn bestehende Kenntnislücken ausgeräumt und weitere Entwicklungen unternommen worden sind, kann deren Praxis-Einsatz erfolgen. Systematische Arbeiten zum Einsatz von Partikelfiltersystemen bei mit Rapsölkraftstoff betriebenen Blockheizkraftwerken werden in jüngster Zeit vermehrt durchgeführt (HOFMANN et al., 2006 [47], KLAISSE, 2006 [59]).

Untersuchungen an BHKW A zeigten, dass ungenügende Kraftstoffqualität, wie beispielsweise eine hohe Gesamtverschmutzung, zu einem deutlichen Anstieg der Staub-Emissionen beitragen können. Vom Regelkraftstoff abweichende Rapsölkraftstoffeigenschaften können aber auch indirekt und vor allem längerfristig durch eine verstärkte Bildung von Ablagerungen zu einer deutlichen Verschlechterung des Emissionsverhaltens von Blockheizkraftwerken führen. Der beobachtete Vorteil hinsichtlich der CO-Emissionen beim Kraftstoff mit hoher Gesamtverschmutzung dürfte daher nur von kurzfristiger Bedeutung sein, was auch anhand des erhöhten Werts für den Koksrückstand deutlich wird (Tabelle 11). Durch die Einführung qualitätssichernder Maßnahmen bei der Erzeugung von Rapsölkraftstoff ist ein großes Optimierungspotenzial gegeben.

Ungünstige Betriebsbedingungen, wie Kaltstartphasen, Start/Stop-Zyklen oder Lastwechsel, sind vor allem bei direkt einspritzenden Motoren mit einer Erhöhung bestimmter Emissionskomponenten, wie z. B. CO, Gesamt-C oder Staub, verbunden und sollten deshalb weitgehend vermieden werden. Allerdings sind meist erst bei deutlichen Abweichungen vom Regelbetrieb unmittelbare signifikante Auswirkungen auf die Emissionen erkennbar.

Ein Vergleich der Emissionen mit heizölbetriebenen BHKW konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Allerdings zeichnen sich anhand bisheriger Untersuchungen beim Vergleich von Diesel- und Rapsölkraftstoff weder für den einen noch für den anderen Kraftstoff wesentliche Vorteile ab (Kapitel 2.7.1). Die verfügbare Datenbasis weist auf Vorteile von Rapsölkraftstoff hinsichtlich der CO-, Gesamt-C- und Staub-Emissionen hin, sofern eine hochwertige technische Anpassung des Motors an den Betrieb mit Rapsölkraftstoff vorgenommen wurde. Nachteile bestehen für Rapsölkraftstoff jedoch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen.

## 6.2 Abgaspartikelfiltersysteme bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einsatz von verschiedenen Dieselpartikelfiltersystemen bei einem mit Rapsölkraftstoff betriebenen BHKW zeigen, dass die Staub-Emissionen durch den Einsatz von Partikelfiltersystemen stark gemindert werden können. Die einzige Ausnahme bildete Partikelfiltersystem „ba“, bei dem nach einer Einsatzdauer von 127 Betriebsstunden aufgrund unzureichender Funktionsfähigkeit und starker Filterbeladung höhere Staub-Emissionen als bei der Referenzmessung ohne Filter zu verzeichnen waren. Die in Kapitel 5.2.2.1 ermittelten Staub-Minderungsraten sowie die absoluten Emissionskonzentrationen bei der Verwendung der untersuchten Partikelfiltersysteme sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Die absoluten Staub-Emissionen erfüllen bei 9 von 13 Messungen mit Partikelfiltersystemen die Emissionsbegrenzung von maximal 20 mg/m<sup>3</sup> gemäß TA Luft 2002 für BHKW ab 1 MW<sub>FWL</sub> (entspricht dem Zielwert bei Anlagen < 1 MW<sub>FWL</sub>). Dies deutet darauf hin, dass die im Sinne der Luftreinhaltung angestrebte Begrenzung des Staub-Austoßes bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW mit Dieselpartikelfiltersystemen grundsätzlich möglich ist.

Tabelle 21: Staub-Minderungsraten und absolute Staub-Emissionen beim Einsatz von Partikelfiltersystemen

Filterbezeichnung (Kapitel 4.1.4)	Filter-Betriebsstunden bei Messung in h	Staub-Minderungsrate	Absolute Staub- Emissionen in mg/m <sup>3</sup>
„a“	< 5	83 %	9,4
„ba“	< 5	37 %	74,5
	127	-16 %	137,8
„bb“	< 5	97 %	2,9
	210	61 %	32,5
„c“	17	94 %	4,4
„d1“	< 5	78 %	10,3
„d2“	94	32 %	32,0
„d3“	< 5	93 %	3,3
„e“	< 5	88 %	10,2
	420	80 %	18,4
	422	85 %	13,5
	441	90 %	8,9

Wird allerdings die ermittelte Staub-Minderungsrate mit dem im VERT-Pflichtenheft [75] für Dieselpartikelfiltersysteme geforderten Abscheidegrad von mehr als 93 % (Kapitel 2.5.3) verglichen, so wird deutlich, dass lediglich das Partikelfiltersystem „bb“ im Neuzustand und Partikelfilter „c“ diese Anforderung erfüllt. Bei zwei weiteren Partikelfiltersystemen werden Staub-Minderungsraten von 90 bis 93 % erzielt. Die geforderte Abscheideleistung nach dem VERT-Pflichtenheft wird damit knapp verfehlt. Bei mehr als der Hälfte aller Messungen sind Staub-Minderungsraten von weniger als 90 % zu verzeichnen. Daher ist eine Verbesserung der Abscheideleistung der meisten im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Dieselpartikelfiltersysteme notwendig. Allerdings sollte hierbei auch berücksichtigt werden, dass eine günstigere Positionierung der Filter im Abgassystem tendenziell zu besseren Ergebnissen führen könnte. Bei der Konstruktion von BHKW sollten deshalb zukünftig Voraussetzungen geschaffen werden, um Partikelfiltersysteme motornah in die Abgasstrecke auch nachträglich installieren zu können.

Eine weitere Anforderung an Dieselpartikelfiltersysteme gemäß VERT-Pflichtenheft ist, dass keine Erhöhung der Emission von limitierten Abgaskomponenten gegenüber dem Ausgangszustand erfolgen darf. Bei den Stickstoffoxid-Emissionen des rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW A wird durch den Einsatz der verschiedenen Partikelfiltersysteme tendenziell ein geringfügiger Rückgang beobachtet. Dies liegt mitunter im höheren Abgasgegendruck beladener Partikelfilter begründet, der gleichsam einer internen Abgasrückführung zu einer Verringerung der Stickstoffoxid-Emissionen führt [3]. Dieser scheinbare Vorteil geht jedoch meist einher mit negativen Effekten, wie die Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs, Verkürzung der Motorlebensdauer und Anstieg anderer Abgaskomponenten (z. B. Kohlenmonoxid). Bei den meisten hier getesteten Partikelfiltern ist im Neuzustand in der Regel entweder keine Veränderung oder, sofern der Filterkörper über eine katalytische Beschichtung verfügt, eine Reduzierung der CO-Emissionen zu beobachten. Nach bereits kurzer Betriebsdauer von wenigen Stunden hingegen kann es, wie

bei den Filtern „ba“, „bb“ und „e“, zu einem Anstieg der CO-Emissionen kommen. Dies begründet sich dadurch, dass die zunehmende Filterbeladung einerseits zu einem Anstieg des Abgasgedrucks und andererseits zur Abnahme der katalytischen Aktivität des Partikelfilters führt. Bei 11 der 13 Messungen ist ein, wenn auch meist nur geringfügiger, Anstieg der CO-Emissionen beim Einsatz eines Partikelfiltersystems gegenüber dem herkömmlichen BHKW-Betrieb ohne Partikelfiltersystem zu verzeichnen. Somit wird eine wichtige Forderung nach dem VERT-Pflichtenheft, wonach es durch den Einsatz von Dieselpartikelfiltersystemen zu keiner Erhöhung limitierter Emissionskomponenten kommen darf, überwiegend nicht erfüllt. Eine Abgasgedrucküberwachung sollte deshalb bei allen Partikelfiltern vorgesehen werden, um davon Hinweise über die Funktionstüchtigkeit des Filters und das Emissionsverhalten der Anlage zu bekommen.

Die Betriebsintervalle zwischen zwei Filterwartungen sind bei allen getesteten Partikelfiltersystemen deutlich kürzer als die in den Anforderungen gemäß dem VERT-Pflichtenheft vorgegebenen 500 Betriebsstunden (Kapitel 2.5.3). Dies liegt unter anderem daran, dass keine Optimierung der Dieselpartikelfiltersysteme hinsichtlich des Einsatzes bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW stattfand. Zudem waren bei der Nachrüstung des für die Untersuchungen eingesetzten BHKW A, wie oben erwähnt, aufgrund des eingeschränkten Bauraums oft nicht optimale Voraussetzungen gegeben. Trotz schwingungsisoliertem und mit den Herstellern abgestimmtem Einbau der Partikelfilter konnte eine thermische Überlastung oder mechanische Beschädigung der Filter nicht immer ausgeschlossen werden.

Auch lag die Abgastemperatur des BHKW A auf sehr niedrigem Niveau, so dass für die Regeneration entweder hochaktive katalytische Beschichtungen oder eine nachträgliche Anhebung der Abgastemperatur notwendig waren. Bei verbesserter Integration eines Partikelfiltersystems in das Abgassystem, die bereits beim Bau des BHKW zu berücksichtigen ist, ist eine Verlängerung der Filterstandzeit zu erwarten. Da während der Untersuchungen keine grundlegenden Optimierungsmaßnahmen vorgenommen wurden, ist von einem großen Optimierungspotenzial auszugehen.

Nach den derzeit vorliegenden Erkenntnissen ist die Nachrüstung von pflanzenölbetriebenen BHKW mit handelsüblichen Partikelfiltersystemen aus dem Dieselsektor noch nicht empfehlenswert. Weitere Entwicklungen zur Anpassung der Systeme an Kraftstoff und Motor sind erforderlich. Untersuchungen zum Einsatzverhalten von Dieselpartikelfiltersystemen in mit Rapsölkraftstoff betriebenen Blockheizkraftwerken werden inzwischen durchgeführt. Für die Entwicklung von Nachrüstlösungen sind eine große Filteroberfläche, aktive Regenerationsmaßnahmen und hohe Wartungsfreundlichkeit bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff von besonderem Vorteil.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Sinne der Luftreinhaltung erstrebenswerte Minderung von Abgasemissionen aus Verbrennungsmotoren erlangt auch zunehmende Bedeutung bei der Nutzung von Pflanzenölkraftstoff in Blockheizkraftwerken. Die Gesetzgebung gibt den Rahmen durch Festsetzung und Verschärfung von Emissionsbegrenzungen für wichtige Abgaskomponenten vor. Zwar bestehen derzeit keine Emissionsbegrenzungen für BHKW mit Verbrennungsmotoren, die über eine Feuerungswärmeleistung (FWL) von weniger als 1 MW verfügen, aber auch für diese Anlagen werden vermehrt die Anforderungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft (für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub>) als Beurteilungsmaßstab, z. B. zur Erteilung einer baurechtlichen Genehmigung, zu Grunde gelegt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass rapsölkraftstoffbetriebene BHKW bereits einen hohen Stand hinsichtlich eines niedrigen Emissionsverhaltens aufweisen. Die für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub> gültigen Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft für die Abgaskomponenten CO und Formaldehyd werden auch von BHKW niedrigerer Leistungsklassen eingehalten, sofern diese über einen Oxidationskatalysator verfügen. Neben der effektiven Minderung von Kohlenmonoxid-Emissionen um bis zu 90 % reduzieren Oxidationskatalysatoren auch die Gesamt-C-Emissionen deutlich um ca. 50 bis 70 % sowie die in dieser Stoffgruppe enthaltenen Aldehyde um ca. 80 %. Für eine gute Wirksamkeit des Oxidationskatalysators ist es entscheidend, dass Blockheizkraftwerke mit Nennlast oder nennlastnah betrieben werden. Bei Schwachlastbetrieb von weniger als 50 % der Nennlast ist aufgrund des insgesamt höheren CO-Ausstoßes und der niedrigen Abgastemperatur entweder keine oder nur eine ungenügende Minderung erzielbar. Weil Oxidationskatalysatoren als Stand der Technik betrachtet, serienmäßig produziert sowie preiswert angeboten werden können und weil auch bei deren Einsatz in rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW hinreichend Erfahrungen vorliegen, ist deren Anwendung bei allen Rapsöl-BHKW erstrebenswert.

Zur Minimierung der CO- und Gesamt-C-Emissionen ist es darüber hinaus erforderlich, auf Teillastbetrieb von BHKW so weit wie möglich zu verzichten. Lediglich ein Teillastbetrieb nahe der vom Hersteller angegebenen Nennlast erscheint akzeptabel, da hierbei normalerweise keine signifikante Verschlechterung des Emissionsbildes hingenommen werden muss. Des Weiteren sollten häufige Kaltstarts ebenso vermieden werden, wie kurze Betriebsintervalle mit mehrmaligem Starten und Abstellen der Aggregate innerhalb kurzer Zeitabstände, weil dies zu einem Anstieg der CO- und Gesamt-C-Emissionen auf das mehrfache des Nennlastniveaus führt. Für eine emissionsoptimierte und zugleich wirtschaftliche Betriebsweise ist daher eine hohe Maschinenauslastung gefordert, welche durch eine sorgfältige Planung des BHKW mit einer auf die Wärmeabnehmer bedarfsgerecht abgestimmten Auslegung (z. B. durch modularen Aufbau) realisiert werden kann.

Mangelhafte Rapsölkraftstoffqualität, die hinsichtlich der Kenngrößen Gesamtverschmutzung und Oxidationsstabilität stark von den Anforderungen nach der Vornorm

DIN V 51605 abweicht, kann zu einer Erhöhung der CO- und Staub-Emissionen führen. Bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff ist deshalb, anders als bei Dieselkraftstoff oder Heizöl, aufgrund eines noch weitgehend nicht in die Praxis eingeführten Qualitätssicherungssystems auf die Einhaltung der Mindestanforderungen bestehender Kraftstoffnormen besonders zu achten. Zwar zeigen sich bei den Emissionsmessungen mit einem ungenügend gereinigten Rapsöl wider Erwarten auch Verbesserungen bei den CO-Emissionen, aber es ist anzunehmen, dass eine hohe Gesamtverschmutzung im Kraftstoff neben einem größeren Wartungsaufwand für Kraftstofffilterwechsel und Tankreinigungsmaßnahmen längerfristig auch die Bildung von Ablagerungen im Einspritzsystem und Brennraum mit höheren CO-Emissionen nach sich zieht.

Generell sind auch Einflüsse von Randbedingungen, wie der Wartungszustand der BHKW, auf die Abgasemissionen von großer Bedeutung. Insbesondere das Einspritzsystem sowie die Komponenten des Abgasstrangs sind von besonderer Emissionsrelevanz und sollten daher regelmäßig gewartet werden. Dies gilt es bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW besonders zu berücksichtigen, da der Kenntnisstand über das Zusammenwirken der verschiedenen Einflussfaktoren Kraftstoff, Motorsystem und Betriebsprofil noch umfangreiche Lücken aufweist und sich ungünstige Bedingungen in hohem Maße auf den BHKW-Betrieb, z. B. durch Bildung von Ablagerungen auswirken können. Zur frühzeitigen Erkennung von Fehlfunktionen, mit denen oft auch eine Verschlechterung des Emissionsverhaltens verbunden ist, dienen verlässliche Einrichtungen zur BHKW-Betriebsüberwachung, wie z. B. Abgastemperatur- und Abgasgedruckerfassung.

Im Gegensatz zu den Kohlenmonoxid- und Formaldehyd-Emissionen können die Anforderungen gemäß TA Luft hinsichtlich des Ausstoßes an Stickstoffoxiden und Gesamtstaub, die für Anlagen ab  $1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$  Gültigkeit haben, mit Rapsöl-BHKW kleinerer Leistung nicht oder nur in Ausnahmefällen eingehalten werden.

Wirbelkammermotoren zeichnen sich zwar bekanntermaßen durch günstigere Stickstoffoxid-Emissionen gegenüber direkt einspritzenden Motoren aus, was sich in diesen Untersuchungen auch bestätigte, aber der maximal zulässige Wert nach TA Luft von  $1,0 \text{ g/Nm}^3$  (für Anlagen größer  $1 \text{ MW}_{\text{FWL}}$ ) kann für beide Brennverfahren voraussichtlich nur durch neuere Motorengenerationen mit Abgasrückführung oder durch nachträgliche Abgasentstickung mittels selektiver katalytischer Reduktion (SCR-Katalysatoren) erreicht werden. Erfahrungen beim Einsatz von SCR-Katalysatoren an rapsölbetriebenen Motoren werden derzeit vermehrt bei Nutzfahrzeugen gemacht. Diese deuten darauf hin, dass mit Entstickungskatalysatoren auch beim Einsatz von Rapsölkraftstoff hohe  $\text{NO}_x$ -Minderungsraten erzielt werden können. Systematische Untersuchungen dazu fehlen jedoch weitgehend. Für kleinere pflanzenölbetriebene BHKW wurde diese Technik auch beim Betrieb mit Heizöl bzw. Dieselkraftstoff bislang noch nicht ausreichend entwickelt oder eingesetzt. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Effektivität und technische Eignung dieser Systeme bei Rapsölkraftstoffbetrieb sicher nachzuweisen.

Ähnlich wie bei den Stickstoffoxid-Emissionen kann auch der Zielwert für die als besonders gesundheitlich relevant eingestuften Staub-Emissionen entsprechend der vorliegenden Erkenntnisse nur durch eine Abgasnachbehandlung erreicht werden. Dazu zählen insbesondere die Partikelfiltersysteme. Die im Rahmen dieser Arbeit getesteten Dieselpartikelfiltersysteme mindern effektiv die Partikelmasse-Emissionen (Staub) von rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken, so dass der angestrebte Zielwert für Staub-Emissionen von  $20 \text{ mg/m}^3$  in den meisten Fällen unterschritten wird. Jedoch weisen die bei dieser Arbeit untersuchten, für Dieseldieselkraftstoff entwickelten Partikelfiltersysteme eine hohe Störanfälligkeit, einen großen Wartungsaufwand und geringe Standzeiten auf und sind deshalb nicht für eine Nachrüstung bei rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW geeignet. Ursachen dafür sind die auch bei Dieseldieselkraftstoff noch nicht abgeschlossene Entwicklung von Partikelfiltern zur Nachrüstung, die nicht an die speziellen Abgaseigenschaften bei Rapsölkraftstoffbetrieb angepassten Systeme sowie die oft ungünstigen baulichen Voraussetzungen zur nachträglichen Integration der Filter.

Bisherige Untersuchungen beziehen sich meist auf die Unterschiede hinsichtlich der Konzentrationen gasförmiger und partikelförmiger Abgasbestandteile zwischen Dieseldieselkraftstoff- und Rapsölkraftstoffbetrieb. Es zeichnet sich jedoch in neueren Forschungsvorhaben ab, dass die Anwesenheit von aschebildenden Elementen, wie Phosphor, Calcium und Magnesium, im Rapsölkraftstoff wie erwartet zu einem größeren unbrennbaren mineralischen Partikelanteil im Abgas und folglich zu einer schnellen Filterbeladung führt [59]. Daneben gibt es Hinweise, dass unter ungünstigen Bedingungen (z. B. zu geringe Abgastemperatur) die Partikel-Emissionen von rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften die katalytisch wirksamen Beschichtungen des Filterkörpers benetzen und somit inaktivieren können, was eine frühzeitige Verstopfung der Filter verursacht. Gründe hierfür können die im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff abweichende Größenverteilung und Zusammensetzung von Abgaspartikeln aus rapsölkraftstoffbetriebenen Motoren sein [78] [25] [47]. Nach Abschluss weiterer noch durchzuführender Untersuchungen ist es wahrscheinlich, dass sowohl die Filterkörper als auch die Maßnahmen zur Regenerierung an die speziellen Voraussetzungen bei der Verbrennung von Rapsölkraftstoff in Blockheizkraftwerken angepasst werden können. Dabei gilt es insbesondere, ein hohes Partikel aufnehmenvermögen bei gleichzeitig niedrigem Druckabfall und hoher Wartungsfreundlichkeit des Filters zu verwirklichen. Am besten bewährt haben sich bislang Partikelfiltersysteme mit einer großen Anströmoberfläche, wie z. B. Kerzenfilter. Das so aufgebaute Partikelfiltersystem „e“ zeichnete sich durch einen weitgehend störungsfreien Betrieb bei vergleichsweise langsamem Abgasgedruckanstieg aus. Dennoch konnten auch mit diesem Filter nicht die gewünschte Intervalllänge von bis zu ca. 1000 Betriebsstunden oder mehr zwischen zwei Filterreinigungen erreicht werden. Als Regenerationsmaßnahme bietet bei der Nachrüstung von Partikelfiltern möglicherweise eine aktive Regeneration, z. B. durch Vollstrombrenner oder elektrische Beheizung der Filter, Vorteile gegenüber passiven Systemen, die genau definierte Abgasbedingungen erfordern. Des Weiteren ist eine zuverlässige Filterüberwachung vorzusehen, damit im

Fälle einer Fehlfunktion keine Nachteile hinsichtlich des Abgasemissionsverhaltens hingenommen werden müssen. Mittelfristig ist der Einsatz von Partikelfiltersystemen in allen neuen pflanzenölbetriebenen BHKW zur Minderung der Staub-Emissionen anzustreben. Dies würde auch dazu beitragen, die Akzeptanz dieser Anlagen weiter zu vergrößern. Nur bei erfolgtem Nachweis, dass pflanzenölbetriebene BHKW den hohen Anforderungen der Luftreinhaltung genügen, wird deren Betrieb langfristig möglich sein.

### **Ausblick**

Oxidationskatalysatoren sollten heute bereits als Standardausrüstung pflanzenölauglicher Aggregate aller Leistungsklassen betrachtet und eingesetzt werden. Die Entwicklung bzw. Anpassung von Abgaspartikelfiltersystemen ist zu forcieren, die Einsatzzeichnung von Entstickungskatalysatoren bedarf verstärkter Prüfung. Neben dem anzustrebenden vermehrten Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen, die sich als effektive Emissionsminderungsmaßnahmen herausgestellt haben, gilt es auch zukünftig noch stärker auf eine emissionsoptimierte Betriebsweise, eine sorgfältige Anlagenwartung sowie die Einhaltung von Mindestanforderungen an die Kraftstoffqualität zu achten. Dies ist sowohl in Hinblick auf einen schadstoffarmen Betrieb als auch auf einen störungs- und wartungsarmen Betrieb von Motor und Abgasnachbehandlungssystem entscheidend. Eine aufeinander abgestimmte Optimierung von Motorsystem, Partikelfiltersystem und Kraftstoff ist daher unumgänglich.

Zusätzlich zu den Abgasnachbehandlungssystemen sind auch die Pflanzenöl-BHKW-Technik und die Pflanzenölkraftstoffe weiter zu entwickeln und zu optimieren. Dies kann durch die Verwendung moderner Motoren mit elektronisch geregelten Hochdruckeinspritzungen begünstigt werden. Das Einbringen von Know-how der Motorenhersteller wäre dabei ebenso wichtig wie die bislang nicht erfolgte Optimierung von Rapsöl-BHKW hinsichtlich eines emissionsarmen Betriebs. Des Weiteren könnten durch erfolgreiches Qualitätsmanagement bei der Bereitstellung sowie durch die nachträgliche Aufbereitung oder Additivierung des Rapsölkraftstoffs Fortschritte hinsichtlich einer Emissionsminderung erzielt werden.

Darüber hinaus sollten die in jüngster Zeit verstärkt bei BHKW als Kraftstoff eingesetzten Pflanzenöle, wie Palmöl oder Sojaöl, hinsichtlich ihrer technischen Tauglichkeit bezüglich des BHKW-Einsatzes und ihres noch weitgehend unbekanntem Emissionsverhaltens in der Praxis auch unter Berücksichtigung der ökologischen Eignung untersucht werden. Da für diese Pflanzenöle im Gegensatz zu Rapsölkraftstoff bislang keine Anforderungen bei der Verwendung als Kraftstoff definiert sind und sich die verschiedenen Qualitäten auf dem Markt deutlich voneinander unterscheiden, ist zuerst die Erarbeitung von Qualitätsstandards notwendig.

## 8 Zusammenfassung

Blockheizkraftwerke, die mit Rapsölkraftstoff betrieben werden, wirken sich positiv auf die Schonung von Ressourcen sowie den Schutz von Klima, Boden und Gewässern aus. Aufgrund verbesserter Wirtschaftlichkeit gewinnen insbesondere Aggregate im unteren Leistungsbereich zur gleichzeitigen Strom- und Wärmebereitstellung an Bedeutung. Trotz vieler positiver Effekte bei der Verwendung von Rapsölkraftstoff in Blockheizkraftwerken sind jedoch auch gesundheits- und umweltschädliche Abgasemissionen, wie beispielsweise Partikel, von großem Interesse.

Rapsölkraftstoff gemäß der gültigen Vornorm DIN V 51605 unterscheidet sich in Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften grundsätzlich von herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff. Bei der Verbrennung im Motor können deshalb von Dieselmotorkraftstoff abweichende Abgasemissionen entstehen. Daneben beeinflussen die am Motorsystem notwendigen Änderungen zur Umrüstung auf Rapsölkraftstoffbetrieb die Vorgänge bei der Einspritzung und Gemischbildung und damit das Abgasverhalten. Gegenstand bisheriger Untersuchungen waren hauptsächlich Motoren für den mobilen Einsatz. Für eine Beurteilung der absoluten Emissionen von rapsölkraftstoffbetriebenen Praxis-BHKW kleinerer Leistungsklassen im Praxisbetrieb sowie der Auswirkung praxisüblicher Betriebsbedingungen auf das Emissionsverhalten war der aktuelle Kenntnisstand unzureichend. Auch konnten keine Aussagen über die Einsatztauglichkeit und die Effektivität von Partikelfiltersystemen bei RapsölbHKW kleinerer Leistungsklassen gemacht werden.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, das Abgasemissionsverhalten von drei unterschiedlichen rapsölkraftstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken über einen längeren Zeitraum im Praxisbetrieb wiederkehrend zu erfassen und die Ergebnisse hinsichtlich des aktuellen Stands der Emissionsgesetzgebung, welche jedoch erst für größere Anlagen (ab 1 MW Feuerungswärmeleistung) Emissionsbegrenzungen vorsieht, einzuordnen. Darüber hinaus sollten emissionsrelevante Einflüsse, wie Teillastbetrieb, Kaltstartphasen, häufige Start-/Stopp-Vorgänge, Kraftstoffeigenschaften und die Wirkung eines Oxidationskatalysators und eines Partikelfilters, untersucht werden. Schließlich sollten an einem ausgewählten BHKW die Effektivität und die Tauglichkeit verschiedener für die Anwendung mit Dieselmotorkraftstoff entwickelter Partikelfiltersysteme hinsichtlich des Einsatzes bei Rapsölkraftstoff überprüft und beurteilt werden.

Ausgewählt wurden drei BHKW mit elektrischen Leistungen von 8 kW, 60 kW und 110 kW. Bei den Emissionsmessungen wurden die Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden, Gesamt-C und Staub erhoben. Zusätzlich wurden an einem ausgewählten BHKW die gesundheits- und geruchsrelevanten Aldehyde im Abgas bestimmt. Im zweiten Teil der Arbeit wurden fünf verschiedene Partikelfiltersysteme, die für den Einsatz von mit Dieselmotorkraftstoff betriebenen Motoren entwickelt worden waren, zeitlich nacheinander in ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 8 kW eingebaut und die Emissionen sowohl mit als auch ohne Partikelfiltersystem

bestimmt und miteinander verglichen. Daneben wurden relevante Betriebsparameter, wie Abgastemperaturen und Abgasdrücke, kontinuierlich aufgezeichnet und die Wartungsarbeiten am Partikelfilter, wie z. B. manuelle Reinigungsvorgänge, dokumentiert.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass rapsölkraftstoffbetriebene BHKW geringer Leistungsklassen hinsichtlich des Emissionsverhaltens bereits einem hohen Entwicklungsstand entsprechen, zumal im Regelfall diesbezüglich keine Optimierungen vorgenommen werden. Die drei untersuchten BHKW weisen gemittelt über mehrere Halbstundenmittelwerte eines Messtags CO-Emissionen von ca. 24 bis 183 mg/m<sup>3</sup> auf und liegen damit deutlich unter der Emissionsbegrenzung gemäß TA Luft 2002 von 300 mg/m<sup>3</sup> (gültig für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub>). Die vergleichsweise niedrigen CO-Emissionen sind ebenso wie die als niedrig einzustufenden Gesamt-C-Emissionen von 4 bis 11 mg/m<sup>3</sup> in erster Linie auf die Verwendung von Oxidationskatalysatoren zurückzuführen, womit Umsetzungsraten von ca. 70 bis 90 % erzielt wurden. Die Minderung der Aldehyd-Emissionen durch den Oxidationskatalysator betrug ebenfalls etwa 80 %, wodurch sich Konzentrationen von ca. 1,1 mg/m<sup>3</sup> für Formaldehyd, 0,8 mg/m<sup>3</sup> für Acrolein und 0,5 mg/m<sup>3</sup> für Acetaldehyd im Abgas ergaben. Oxidationskatalysatoren werden heute vielfach eingesetzt und haben sich beim Einsatz von Rapsölkraftstoff bewährt. Auf ihren Einsatz sollte deshalb nicht verzichtet werden.

Bei den Stickstoffoxid-Emissionen ist ein durch das Verbrennungsverfahren bedingter Unterschied zwischen dem Aggregat mit Wirbelkammermotor und den BHKW mit Direktein-spritzung erkennbar. So wurden mit dem Wirbelkammermotor 2000 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> im Abgas ermittelt, wohingegen die direkt einspritzenden Motoren etwa 2800 bis 3300 mg/m<sup>3</sup> aufwiesen. Der Vergleichswert nach TA Luft 2002 von 1000 mg/m<sup>3</sup> (gültig für Anlagen ab 1 MW<sub>FWL</sub>) wird demnach von keinem BHKW eingehalten. Dazu sind zukünftig entweder moderne Motorengenerationen mit Abgasrückführung und/oder nachmotorische Maßnahmen, wie die Anwendung von Entstickungskatalysatoren, erforderlich.

Für die Staub-Emissionen beträgt die für größere Anlagen gültige Emissionsbegrenzung nach TA Luft 2002 20 mg/m<sup>3</sup>. Zur Begrenzung von Staub-Emissionen stellen Partikelfilter eine wirkungsvolle Maßnahme dar. Mit durchschnittlich etwa 3 mg/m<sup>3</sup> ist der Partikelmas-seausstoß bei einem BHKW mit Partikelfilter deutlich niedriger als bei den anderen beiden BHKW ohne Filter, für die Staub-Emissionen von etwa 80 bzw. 100 mg/m<sup>3</sup> ermittelt wurden. Allerdings fiel der Partikelfilter im Praxiseinsatz durch eine hohe Störanfälligkeit infolge von hitzebedingten Schäden am Trägermaterial auf, was zu zahlreichen Störungen im Anlagenbetrieb und hohen CO- und HC-Emissionsspitzen führte.

Untersuchungen mit verschiedenen Partikelfiltersystemen an einem rapsölkraftstoffbetriebenen BHKW zeigen ebenfalls, dass die Staub-Emissionen mit Dieselpartikelfiltern zum Teil deutlich reduziert werden können. Der angestrebte Zielwert für Staub-Emissionen von 20 mg/m<sup>3</sup> wurde in 9 von 13 Fällen unterschritten. Sofern dieser Zielwert eingehalten wurde, konnten im Vergleich zum Betrieb ohne Partikelfilter Reduktionsraten

von 74 bis 98 % erreicht werden. Allerdings war auch ein Anstieg des Abgasgegendrucks von etwa 40 auf über 250 hPa bei allen getesteten Dieselpartikelfiltersystemen innerhalb von weniger als 200 Betriebsstunden zu beobachten. Die Rußfilterregeneration (Rußabbrand) war meist nur im Neuzustand der Filter zufriedenstellend. Hohe Abgasgegendrücke führen zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch, zu stärkerer Motorbelastung sowie zum Anstieg der Abgasemissionen. Eine aufwändige manuelle Filterreinigung ist dann unumgänglich.

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. Nach erfolgter Optimierung und gegenseitiger Abstimmung des Gesamtsystems Partikelfiltersystem, Kraftstoff und Motor sollte eine Ausrüstung von rapsölbetriebenen Aggregaten mit Abgaspartikelfiltersystemen angestrebt werden.

Zur Minimierung der CO- und Gesamt-C-Emissionen ist es erforderlich, den Betrieb im unteren Teillastbetrieb zu vermeiden. Auch Kaltstartphasen bewirkten bei den hier untersuchten BHKW in den meisten Fällen einen Anstieg der CO-, HC- und Staub-Emissionen um den Faktor 1,2 bis 7 gegenüber dem Nennlastbetrieb bei betriebswarmem Motor. Auch kurze Betriebsintervalle mit mehrmaligem Starten und Abstellen der Aggregate innerhalb kurzer Zeitabstände führten zu einem Anstieg der CO- und Gesamt-C-Emissionen auf das mehrfache des Nennlastniveaus. Für eine emissionsoptimierte und zugleich wirtschaftliche Betriebsweise ist daher eine sorgfältige Planung des BHKW mit einer auf die Wärmeabnehmer bedarfsgerecht abgestimmten Auslegung (z. B. durch modularen Aufbau) notwendig. Mangelhafte Rapsölkraftstoffqualität, die hinsichtlich der Kenngrößen Gesamtverschmutzung und Oxidationsstabilität stark von den Anforderungen nach der Vornorm DIN V 51605 abweicht, führte überwiegend zu einer Verschlechterung der Staub- und Gesamt-C-Emissionen. Generell sind auch Randbedingungen, wie der Einfluss des Wartungszustands der untersuchten BHKW auf die Abgasemissionen von großer Bedeutung. Insbesondere das Einspritzsystem sowie die Komponenten des Abgasstrangs sind von besonderer Emissionsrelevanz und sollten daher regelmäßig geprüft werden. Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen sind die betrachteten Einflüsse hingegen weniger ausgeprägt.

Aus den bisweilen deutlichen Unterschieden im Emissionsbild bei einem Aggregat an verschiedenen Messtagen als auch zwischen den einzelnen BHKW kann auf ein erhebliches Optimierungspotenzial geschlossen werden. Um dies auszuschöpfen sind weitergehenden Untersuchungen insbesondere zu den spezifischen Eigenschaften von Abgaspartikeln aus rapsölkraftstoffbetriebenen Motoren sowie den Wechselwirkungen von Rapsölkraftstoffeigenschaften, Motor- und Abgasnachbehandlungssystem notwendig.

## 9 Summary

Combined heat and power units (CHP), fuelled with pure rapeseed oil, have major environmental advantages. In addition to efficient energy conversion by co-generation, the use of rapeseed oil fuel has positive impact on the protection of resources and the atmosphere. Furthermore fast biodegradability and low toxicity of pure vegetable oil provides the opportunity to make a decisively contribution to soil conservation and water pollution control. With rising economic efficiency, the demand of small-scale vegetable oil fuelled CHP for combined power and heat supply is increasing. Despite many positive effects, also harmful exhaust gas emissions of rapeseed oil fuelled CHP units, such as particles, need to be considered.

Since rapeseed oil fuel properties according to the demands of pre-standard DIN V 51605 differ from conventional diesel fuel or heating oil, exhaust gas emissions of combustion engines, fuelled with rapeseed oil are likely to vary from diesel fuel operation. Besides that, adaptation measures for rapeseed oil fuel operation have effects on injection and combustion processes and consequently on exhaust gas characteristics. Subject of recent investigations are mainly engines for automotive applications. According to present knowledge, the valuation of emissions of small scale rapeseed oil fuelled CHP units during practice operation and the effects of typical operation conditions on emissions is not possible. Additionally, the suitability and effectivity of diesel particulate filter systems for small scale rapeseed oil fuelled CHP units are not known sufficiently.

Therefore, it was the aim of this work to investigate exhaust gas emission characteristics of three different rapeseed oil fuelled CHP units over a longer period recurrently under practice conditions. The results were assessed in regard of limiting values, that are solely existing for plants with fuel inputs of 1 MW (relates to about 400 kW<sub>el</sub>) or more, since small CHP units are not subject to emission authorization. Furthermore, emission relevant influences, such as partial load operation, cold starts, frequent start/stop sequences, fuel properties and the effect of oxidation catalysts and particulate filters were examined. Finally, various particulate filter systems, developed for diesel operation, were tested for the application in rapeseed oil fuelled CHP units.

Subjects of investigation are three different types of rape seed oil fuelled CHP units with 8 kW, 60 kW and 110 kW electrical power output. Within exhaust gas emission measurement the concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), total organic carbon (TOC) and particulate matter were determined. Additionally, the health relevant group of aldehyde emissions was ascertained. In the second part of the work, five different particulate filter systems, developed for diesel fuel operation, were consecutively tested in a rapeseed oil fuelled CHP unit with an electrical power output of 8 kW. The emissions were measured with and without the filters. Besides that, relevant operation parameters, like exhaust gas temperature and pressure were monitored. Also maintenance works as there are manual filter purification were recorded.

The results reveal, that small scale CHP units for rapeseed oil use already show an high level of development, especially when considering that usually no optimisation of exhaust gas emissions is conducted. The three investigated plants show mean values for carbon monoxide emissions between 24 and 183 mg/m<sup>3</sup> (referred to dry exhaust gas at standard conditions: 1013 hPa, 0 °C and 5 % O<sub>2</sub>). Thus, all investigated CHP units easily fulfill the limiting value of 300 mg/m<sup>3</sup> according to the German TA-Luft 2002 (Technical Instruction on Air Quality), which however is only valid for bigger plants. The throughout very low CO emissions of all three CHP units as well as the low TOC emissions (4 to 11 mg/m<sup>3</sup>) can be attributed to the application of oxidation catalysts, whereby converting rates from 70 to 90 % could be achieved. The reduction of the aldehyd emissions by the oxidation catalyst also averaged 80 %, resulting in absolute values of 1,1 mg/m<sup>3</sup> for formaldehyde, 0,8 mg/m<sup>3</sup> for acrolein and 0,5 mg/m<sup>3</sup> for acetaldehyde. Oxidation catalysts are widely introduced in practice by now and have proved their appropriateness in engines, fuelled with rapeseed oil.

For nitrogene oxides emissions, a difference in combustion type of the engines was obvious. The swirl chamber engine showed NO<sub>x</sub> concentrations of about 2000 mg/m<sup>3</sup>, whereas for the direct injection engines concentrations from 2800 to 3300 mg/m<sup>3</sup> were measured. The limiting value of 1000 mg/m<sup>3</sup> (valid for plants with fuel inputs of 1 MW or more) could not be reached. Thereto new engine developments e. g. with the application of exhaust gas recirculation systems and/or NO<sub>x</sub> reduction catalysts are necessary.

The limiting value for particle mass emission is fixed at 20 mg/m<sup>3</sup> (valid only for bigger CHP units). To obtain particle mass reduction, particle filters are very effective. With a mean value of 3 mg/m<sup>3</sup> the particle mass emissions of a CHP unit with particle filter was significantly lower than for plants without filters. For latter average particle masses between 80 and 100 mg/m<sup>3</sup> were measured. Though the particle filter was noticed to be highly susceptible to malfunction. Melted filter conduits, apparently caused by catalytic effects of accumulated not burnable fuel and motor oil derived ashes, increased exhaust gas pressure and temperature and led to high CO and TOC emission peaks.

Investigations on a rapeseed oil fuelled CHP unit, retrofitted with different particulate filter systems also show that particulate mass emissions could be reduced significantly with these filter systems. The target limiting value of 20 mg/m<sup>3</sup> according to TA-Luft was fulfilled in 9 of 13 measurements. Assumed that the limiting value was met, particle mass reduction rates ranged from 74 to 98 %. However, an increase of exhaust gas counter pressure from about 40 to 250 hPa was recorded for all tested filter systems within less than 200 operation hours. Filter regeneration usually was only satisfying, when filters were new. High exhaust gas counter pressure leads to higher fuel consumption, higher engine wear and to an increase of emissions. In this case a laborious manual filter cleaning is indispensable.

By the use of particulate filters with high ash storage capacities and large surfaces for the exhaust flow, with minimising ash building ingredients in rapeseed oil fuel and the engine oil as well as with easy to maintain filter design the usability of particulate filter systems for rapeseed oil fuelled CHP units can be improved. After optimisation and coordination of the entire system particulate filter, fuel and engine oil, the application of particulate filter systems in rapeseed oil fuelled CHP units should be aspired.

For minimisation of CO and TOC emissions, it is necessary to avoid operation at low load. Also cold starts led in most cases to an increase of CO, TOC and particle emissions by the factor 1,2 to 7, compared to nominal load under hot running conditions. Furthermore short operation intervals with frequent turn-on and –off procedures resulted in an increase of CO- and TOC emissions to a level which was several times higher than during nominal load. For a low emission as well as economic efficient operation, a proper facility planning with a on the heat demand harmonised size is essential. Poor rapeseed oil fuel quality, that differs widely from the demands of pre-standard DIN V 51605, regarding total contamination and oxidation stability, can lead to an increase of particle mass and TOC emissions. In general, also side conditions such as the state of maintenance of the CHP unit is highly emission relevant, too. This applies especially for the injection system as well as the compounds of the exhaust gas system. For NO<sub>x</sub> emissions the investigated influences are less important.

Due to significant differences in emission characteristics for both the same plant at different dates of measurement as well as between the investigated plants, a big optimisation potential can be deduced. Therefore, further investigations are necessary, regarding the specific characteristics of exhaust gas particles from rapeseed oil fuelled engines and the interaction of rapeseed oil fuel properties, engine and exhaust gas aftertreatment system.

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wasser-gefährdende Stoffe vom 27. Juli 2005 (BAnz. Nr. 142a vom 30. Juli 2005)
- [2] ATTENBERGER, A. und E. REMMELE (2003): Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff. Forschungsbericht, Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 91 S.
- [3] BASSHUYSEN VAN, R. und F. SCHÄFER (Hrsg.) (2004): Lexikon Motorentechnik. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 1078 S.
- [4] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LFU) (2003): Information über Abgase des Kraftfahrzeugverkehrs Stand März 2003. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Augsburg. 20 S. Available at: [www.bayern.de/lfu/luft/index.html](http://www.bayern.de/lfu/luft/index.html). Accessed at 8<sup>th</sup> May 2007
- [5] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LFU) (2001): Mustergutachten zum Immissionsschutz für stationäre Dieselmotore, Augsburg; Stand 2001, 48 S. Available at: [www.bayern.de/lfu/luft/index.html](http://www.bayern.de/lfu/luft/index.html). Accessed at 8<sup>th</sup> May 2007
- [6] BECKER, R. F. (1998): Potential zur Verbesserung des Abgasverhaltens konventioneller Kraftstoffe. In: Kraftstoffe und Ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren, Lehrgang Nr. 23421/64.139, 14. u. 15. Mai 1998, Technische Akademie Esslingen.
- [7] BINDER, K. (1992): Minderung der Stickoxid- und Partikelemission durch Diesel/Wasser-Emulsionen. mineralöl technik, Vol. 37 (1992), Nr. 12, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 1-20
- [8] BIRKNER, M. (1995): Untersuchung der Eignung von Pflanzenölen als Kraftstoff für Dieselmotoren und Vorstellung eines neuen Pflanzenöl-Motor-Konzeptes. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenwesen, Kaiserslautern: Eigenverlag, 148 S.
- [9] BOUCHÉ, T.; M. HINZ; D. HIEBER und H. TSCHÖKE (1997): Einfluß verschiedener Pflanzenöl-Eigenschaften auf Verbrennung und Schadstoffbildung in einem direkt-einspritzenden Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift, Vol. 58, Nr. 3, S. 148-154
- [10] BOCKISCH, M. (1993): Nahrungsfette und -öle. Stuttgart: Eugen Ulmer, 694 S.
- [11] BRAUNGARTEN, G. und H. TSCHÖKE (2003): Das Betriebsverhalten von Partikelfiltern bei Verwendung von Biodiesel im Verbrennungsmotor. In: NAROSSA 2003, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference for Renewable Resources 16<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> June 2003 in Magdeburg, Germany. ÖHMI Consulting GmbH (Hrsg.), ÖHMI Consulting GmbH, Magdeburg, Eigenverlag, 16 S.
- [12] BREUER, C. (1994): Beitrag zur Verbrennung von Rapsöl und Rapsölmethylester in direkt-einspritzenden Dieselmotoren. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Bd. 219. Düsseldorf: VDI Verlag, 134 S.
- [13] BREUER, K.-H. (1999): Abgasnachbehandlungstechniken im Rahmen der Dieselmotor-Entwicklung und Geräte-Nachrüstung. In: Feinpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Veranstaltungsunterlagen der Tagung vom 12.-13. Oktober 1999. Haus der Technik e.V. (Hrsg.), Haus der Technik e.V., Essen, Eigenverlag, 16 S.
- [14] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) Bern (Hrsg.) (2000): Partikelfilter für schwere Nutzfahrzeuge, Umwelt-Materialien NR. 130 – Luft, S. 1-56, Available at: [www.admin.ch/buwal/](http://www.admin.ch/buwal/). Accessed at 5<sup>th</sup> May 2007

- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2007): Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2006 in Deutschland – Stand 21. Februar 2007. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin, Februar 2007, 15 S.
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2006): Entwicklung der erneuerbaren Energien 2005 - Aktueller Sachstand. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin, Mai 2006, 27 S.
- [17] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (2007): Biomasse. Bonn: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat VE 5. Available at: [www.german-renewable-energy.com](http://www.german-renewable-energy.com). Accessed at 30 April 2007
- [18] BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY (2006): BP Statistical Review of World Energy June 2006, London, 45 S.
- [19] BRENDÖRFER, M. und T. GRAF (2005): Anlagentechnik der Ölabpressung. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung, Nr. 427. Münster: Landwirtschaftsverlag, S. 31-36
- [20] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18. Dezember 2006 (BGBl. I S. 3180)
- [21] BURGGRAF, J. und K. ULLRICH (1995): Die neuen ölgekühlten ECO-Pflanzenölmotoren MF-RTA von DMS. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 56, Nr. 2, S. 101-103
- [22] CLAUßEN, M. (1997): Katalytische Rußfilter für Dieselaggregate und Rapsölmotoren, Bd. 29. CUTEC-Schriftenreihe, Papierflieger Verlag, Clausthal-Zellerfeld, 58 S.
- [23] CLEMENS, B. (2004): DPF im Einsatz von stationären Dieselmotoranlagen. In: Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren. Beiträge zur 2. FAD-Konferenz 2004 in Dresden. Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V. (Hrsg.), Dresden: FAD e. V., Eigenverlag, S. 233-240
- [24] CUVELIER, D. H.; R. DE CRAECKER, H. J. GUTTMANN, M. HONKANEN, E. B. M. JANSEN, G. MARTINI, E. G. REYNOLDS, D. J. RICKEARD, G. WOLFF und P. J. ZEMROCH (2002): Evaluation of diesel fuel cetane and aromatics effects on emissions from euro-3 engines. Report No. 4/02, prepared for the CONCAWE Automotive Emissions Management Group by its Special Task Force AE/STF-18. CONCAWE (Hrsg.), Brüssel 52 S.
- [25] CZERWINSKI, J.; Y. ZIMMERLI, T. NEUBERT, M. KASPER und T. MOSIMANN (2006): Analysis of (Nano) Particles with GTL, RME & ROR on a Modern HD-Diesel Engine. Report for Swiss Petrol Union, Zürich, Schweiz. Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Informatik HTI, Abgasprüfstelle, Nidau (Hrsg.), Eigenverlag. 40 S.
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2004): DIN EN 590: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Dieselkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2004): DIN EN 14214: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Fettsäure-Methylester (FAME) für Dieselmotoren - Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2006): DIN V 51605: Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH

- [29] DOBIASCH, A. (2000): Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von regenerativen Kraftstoffen auf das Emissionsverhalten von Verbrennungsmotoren. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Band 428. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 173 S.
- [30] DOBIASCH, A.; R. MEYER-PITTRUFF; A. GIFHORN und H. SCHÖBERL (1997): Emission Situation of Regenerative-Fuel-Powered Diesel Engines, S. 1-7
- [31] DORN, B. (2005): Einflüsse verschiedener Kraftstoffe auf das Abgasverhalten von Dieselmotoren. Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Hochschule Offenburg, 130 S.
- [32] ELSBETT TECHNOLOGIE GMBH (2007): Firmenportrait. Available at: [www.elsbett.com](http://www.elsbett.com). Accessed at 8<sup>th</sup> May 2007
- [33] EMBERGER, P. und K. THUNEKE (2006): Einhaltung aktueller Emissionsgrenzwerte bei zwei rapsölkraftstoffbetriebenen Traktoren – Erste Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen. In: Tagungsband zum 15. Symposium Bioenergie – Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (Hrsg.), OTTI e. V. Regensburg: Eigenverlag, S. 232-237
- [34] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1918), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. November 2006 (BGBl. I S. 2550)
- [35] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBl. 2002, Heft 25-29, S. 511-605)
- [36] FAULSTICH, M. und K. GREIFF (2007): Was kann die Biomasse in Deutschland leisten? In: Biomasse, Biogas, Biotreibstoffe... Fragen und Antworten. Verfahren & Werkstoffe für die Energietechnik, Band 3. FAULSTICH, M. und S. PRECHTL (Hrsg.), Sulzbach-Rosenberg: Förster Druck und Service GmbH & Co. KG, S. 69-91
- [37] FRIEDRICH, A. et al. (1993): Ökologische Bilanz von Rapsöl und Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselmotoren, Mindestanforderungen und Prüfverfahren (Ökobilanz Rapsöl), TEXTE 4/93 Berlin; Umweltbundesamt
- [38] GAILFUß, M. (2006): Pflanzenöl-BHKW – Bestimmungen des novellierten Erneuerbare-Energien Gesetzes (EEG). In Tagungsband „Pflanzenöl-BHKW – Technologien, Entwicklungen, Praxiserfahrungen“ am 27. April 2006 in Nürnberg-Fürth, Vortragsunterlagen, 52 Folien
- [39] GAIRING, M. (1998): Anforderungen von Dieselmotoren an ihre Kraftstoffe. In: Kraftstoffe und Ihre Anwendung in Otto- und Dieselmotoren, Lehrgang Nr. 23421/64.139, 14. u. 15. Mai 1998 Technische Akademie Esslingen.
- [40] GLAß, R.; T. BOUCHE und K. ULLRICH (1995): Engine Test Stand Studies on Performance, Emissions and Durability of a DI Diesel Engine Fuelled with Rapeseed Oil. In: Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Congress on Combustion Engines CIMAC in Interlaken (CH), CIMAC (Hrsg.), CIMAC, Interlaken, Schweiz, Eigenverlag, S. 1-17
- [41] GÖRNER, K. und K. HÜBNER (2002): Gasreinigung und Luftreinhaltung. VDI-Buch. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, S. M1-M44
- [42] HASSEL, E.; K. PRESCHER, S. BERNDT, E. FLÜGGE, J. GOLISCH, W. HARKNER, U. SCHÜMANN, G. SY und V. WICHMANN (2006): Praxiseinsatz von serienmäßigen neuen rapsöлтаuglichen Traktoren. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock, Eigenverlag, 222 S.

- [43] HAVENITH, C. (1991): Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugmotoren bei Verwendung von Pflanzenölen. In: VDI Berichte Nr. 885, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.), VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 129-144
- [44] HEINRICH, R. (1994): Wirkungsforschung bei Dieselmotoremissionen. In: Tagungsband zum Fachgespräch Emissionen von Pflanzenöl-Kraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, CARMEN e.V. (Hrsg.); CARMEN e.V., Rimpf, Eigenverlag, S. 19-29
- [45] HENSCHLER, D. (1994): Bedeutung der Schadstoffemissionen aus Verbrennungsmotoren für den Menschen und die Umwelt. In: Tagungsband zum Fachgespräch Emissionen von Pflanzenöl-Kraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, CARMEN e.V. (Hrsg.); CARMEN e.V., Rimpf, Eigenverlag, S. 14-18
- [46] HERRMANN, S. (1995): Einsatz unveränderter alternativer Treibstoffe und ihrer Mischungen im direkteinspritzenden Dieselmotor. Diplomarbeit. Schweizerische Ingenieurschule für Landwirtschaft Zollikofen (CH), 71 S.
- [47] HOFMANN, U.; P. REINHARDT und M. EVTIMOVA (2006): Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsmethylester und Rapsöl. In: Chemie Ingenieur Technik, 78, No.6, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, S. 709-714.
- [48] HOPP, M. (2005): Untersuchung des Einspritzverhaltens und des thermischen Motorprozesses bei Verwendung von Rapsöl und Rapsmethylester in einem Common-Rail-Dieselmotor. Dissertation an der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, 133 S.
- [49] HOUBEN, M. und G. LEPPERHOFF (1994): Anteil des Schmieröls an der Partikelemission moderner Dieselmotoren und Möglichkeiten zur Vermeidung. mineralöl technik, Vol. 39, Nr. 9, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 15-27
- [50] HOUBEN, M. und G. LEPPERHOFF (1990): Der Kraftstoffeinfluß auf die Partikelemission von Dieselmotoren. mineralöl technik, Vol. 35, Nr. 10, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 1-24
- [51] HÜTHWOHL, G. und B. MAURER (1999): Partikelfiltertechnik heute und morgen. In: Feinpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Veranstaltungsunterlagen der Tagung vom 12.-13. Oktober 1999. Haus der Technik e.V. (Hrsg.), Haus der Technik e.V., Essen, Eigenverlag, 9 S.
- [52] INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GGMBH LEIPZIG (IE) (2007): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse – Endbericht im Auftrag des BMU, Eigenverlag, 150 S.
- [53] JURISCH, C. und R. MEYER-PITTRUFF (1994): Pflanzenölgeeignete Dieselmotoren deutscher Hersteller. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126, S. 89-105
- [54] KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN (2001): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN (Hrsg.) Springer-Verlag, S. 7
- [55] KALTSCHMITT, M. und A. WIESE (1997): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. KALTSCHMITT, M. und A. WIESE (Hrsg.) Springer-Verlag, S. 8-10

- [56] KAMPMANN, J. (1994): Abgaszusammensetzung von Pflanzenölmotoren der Baureihe P 13,5. In: Tagungsband zum Fachgespräch Emissionen von Pflanzenölkraftstoffen und ihre Umweltwirkungen, Würzburg, 11.01.1994, CARMEN e.V. (Hrsg.); CARMEN e.V., Rimpar, Eigenverlag, S. 47-51
- [57] KAMPMANN, J. (1990): Dieselmotor mit Direkteinspritzung für Pflanzenöl. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 54, Nr. 7/8, S. 378-383
- [58] KERN, C. und B.A. WIDMANN (1997): Bewertung der Emissionen von Dieselmotoren beim Betrieb mit Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis und normalem Dieselmotorkraftstoff - Datenauswertung der bisherigen Labor- und Flottenversuche. Abschlußbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen
- [59] KLAISSE, M. (2006): Verifizierung ausgewählter Rapsölkraftstoffkennwerte aus der DIN V 51605 hinsichtlich ihrer motorischen Relevanz. In: Tagungsband zum 15. Symposium Bioenergie – Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (Hrsg.), OTTI e. V. Regensburg: Eigenverlag, S. 218-224
- [60] KLAISSE, M. (2002): Erfassung und Optimierung des Abgas- und Betriebsverhaltens eines pflanzenölbetriebenen Dieselmotors. Master-Thesis an der Fachhochschule Konstanz, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, Fachbereich Maschinenbau, 104 S.
- [61] KLINGENBERG, H. (1996): Automobile Exhaust Emission Testing - Measurement of Regulated and Unregulated Exhaust Gas Components, Exhaust Emission Tests. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 383 S.
- [62] KRAHL, J.; G. VELLGUTH; A. MUNACK; K. STALDER und M. BAHADIR (1996): Schadstoffemissionen und Umweltwirkungen bei Verwendung von Rapsölkraftstoffen in der Landwirtschaft. Motortechnische Zeitschrift, Jg. 57, Nr. 1, S. 24-31
- [63] KRAHL, J.; A. MUNACK und J. BÜNGER (2006): Emissionen von Biodiesel und Pflanzenölen im Vergleich. Folien zum 4. Internationalen Fachkongress des Bundesverband BioEnergie e. V. und der Ufop e. V. vom 27.-28. November 2006 in Berlin, 39 S.
- [64] KRAHL, J. und G. VELLGUTH (1993): Vergleichende Untersuchungen von Leistungen, Verbrauch und Emissionen der verschiedenen Motorkonzepte. Bericht zum erweiterten Versuchsvorhaben mit Rapsölmotoren des Landes Niedersachsen. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Eigenverlag, 147 S.
- [65] KREBS, R. (1978): Staubbeladungsmessung in strömenden Gasen. 2. Auflage, Lurgi Umwelt und Chemotechnik GmbH, Frankfurt am Main, 86 S.
- [66] KRIEGER, K. (1999): Diesel-Einspritztechnik für PKW-Motoren - Überblick über Verfahren und Ergebnisse. Motortechnische Zeitschrift, Jg. 60, Nr. 5, S. 308-313
- [67] LACHENMAIER, J. (1998): Instrumentierung und Inbetriebnahme eines mit regenerativen Kraftstoffen betriebenen BHKW-Versuchsstandes zur Messung von Abgasemissionen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie der Technischen Universität München, 74 S.
- [68] LANGE, W. W.; H. SCHLÖGL, P. GADD; K. RICHTER, A. A. REGLITZKY und J.J. ZÜRNER (1995): Das Potential der Kraftstoffqualität für die Verbesserung von Verbrennung und Emissionsverhalten abgasoptimierter Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Dieselmotorenteknik, Hrsg.: Essers, U.; Prescher K.-H. 5. Symposium am 7. und 8. 12. 1995, Esslingen, S. 3-14

- [69] LAUNHARDT, T. (2002): Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen, Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad. Dissertation an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München – Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Lehrstuhl für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, VDIMEG-Schrift Nr. 397, 193 S.
- [70] LUTHER, R. (2001): Ölwechsel überflüssig! Nachwachsende Rohstoffe, Vol. 1, Nr. 1, S. 39-40
- [71] MAURER, B. (1998): Das CRT-System (Continuously Regenerating Trap) im Biodiesel-Einsatz. In: Fachtagung Biodiesel - Optimierungspotentiale und Umwelteffekte, Informationen, Erfahrungsaustausch, Perspektiven. 12.-13. Juni 1998, Forum der FAL Braunschweig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Fachhochschule Coburg
- [72] MAURER, K. (2000): Untersuchung zur Produktion von standardisiertem Pflanzenöl-Treibstoff und Ermittlung von motor- und verbrennungstechnischen Kenndaten bei auf Pflanzenölbetrieb umgerüsteten Dieselmotoren. Kurzbericht zum Teilprojekt „Naturdiesel“. Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim (Hrsg.), Eigenverlag 102 S.
- [73] MAURER, K. (2000): Verfügbare Technik bei mobilen und stationären Pflanzenölmotoren. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (Hrsg.): Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas. Zweites Anwenderforum. Regensburg: Eigenverlag, S. 103-108
- [74] MAY, H.; W. DIETRICH, U. HATTINGEN und C. BIRKNER (1994): Emissionsverhalten pflanzenölbetriebener Dieselmotoren. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke; VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1126, S. 183-204
- [75] MAYER, A. (2006): Filterliste BAFU/Suva – Geprüfte und erprobte Partikelfilter-Systeme für die Nachrüstung von Dieselmotoren. Stand: Dezember 2006. Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.), Bern. Available at: [www.umwelt-schweiz.ch/](http://www.umwelt-schweiz.ch/). Accessed at 5<sup>th</sup> May 2007
- [76] MAYER A.; J. CZERWINSKI und J.-L. PÉTERMANN (2003): Erfahrungen mit Partikelfilter-Nachrüstungen bei Baumaschinen in der Schweiz. In: Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren. Beiträge zur FAD-Konferenz 2003 in Dresden. Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V. (Hrsg.), Dresden: FAD e. V., Eigenverlag, S. 155-170
- [77] MENRAD, H.; K. WEIDMANN, W. BERNHARDT, G. HEILMANN und U. BEHN (1998): Rapsöl als Motorenkraftstoff? mineralöl technik, Vol. 34, Nr. 5-6, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 1-48
- [78] MEYER, M. (2007): Rapsölkraftstoff in der Schweiz - Statusbericht zur Motorenforschung. In: Tagungsband zum 16. Symposium Bioenergie – Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (Hrsg.), OTTI e. V. Regensburg: Eigenverlag
- [79] MEYER-PITROFF, A. DOBIASCH und J. LACHENMAIER (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke Teil 2. Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern 172. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, 106 S.
- [80] MOLLENHAUER, K. (1997): Handbuch - Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag, 1029 S.

- [81] MOLLENHAUER, K. (2002): Handbuch - Dieselmotoren. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1069 S.
- [82] MUNACK, A., L. HERBST, A. KAUFMANN, Y. RUSCHEL, O. SCHRÖDER, J. KRAHL und J. BÜNGER (2005): Vergleich von Shell Mittel-Destillat, Premium-Dieselmotorenkraftstoff und fossilem Dieselmotorenkraftstoff mit Rapsölmethylester. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Braunschweig, Coburg, Göttingen, 36 S.
- [83] PRANKL, H.; K. KRAMMER, H. JANETSCHKE und T. ROITMEIER (2005): Blockheizkraftwerke auf Pflanzenölbasis. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt BLT 012951, Wieselburg 106 S.
- [84] PRESCHER, K. und A. STANEV (1997): Die Aldehydemission von Dieselmotoren in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität und Maßnahmen zur Verringerung. In: Es-sers, U. (Hrsg.): Dieselmotorentechnik 98. Renningen-Malmsheim; Expert-Verlag, 553, S. 152-173
- [85] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff – Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München – Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Lehrstuhl für Landtechnik, Freising-Weihenstephan, VDIMEG-Schrift Nr. 400, 194 S.
- [86] REMMELE, E. und K. STOTZ (2005): Hinweise zur Erzeugung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Anlagen. Straubing: TFZ, 15 S.
- [87] REMMELE, E. und K. STOTZ (2003): Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich - Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis. Abschlussbericht zum Vorhaben Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. FKZ: 22004900. Schriften aus dem TFZ 1, Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 115 S.
- [88] REMMELE, E.; K. THUNEKE; B. WIDMANN; T. WILHARM und H. SCHÖN (2000): Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenölaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - Endbericht zum Forschungsvorhaben., Bd. "Gelbes Heft" Nr. 69. München: Hrsg. und Druck: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 217 S.
- [89] REMMELS, W. und A. VELJI (1997): Grundsatzstudie: Einfluß der Abgasrückführung auf Emission und Wirkungsgrad. In: Die Stickoxidemission - Die Herausforderung an den Dieselmotor“ 2. Dresdner Motorenkolloquium. 15. und 16. Mai 1997.
- [90] RICHTER, H.; V. KORTE und N. HEMMERLEIN (1991): Experimentelle Untersuchung zur Nutzung von Pflanzenölen in Dieselmotoren. Forschungsbericht: Dr.-Ing.hc. F. Porsche AG, Entwicklungszentrum Weissach, 113 S.
- [91] Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte I (ABl. L 146 vom 30.4.2004, S. 1–112, Berichtigte Fassung im ABl. L 75 vom 15.3.2007)
- [92] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU) (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 124 S.
- [93] SCHULZ, H.; G. BANDEIRA DE MELO und F. OUSMANOV (1997): Volatile Organic Compounds and Particulates as Constitutes of Diesel Engine Exhaust Gas. Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 111-123

- [94] STIESCH, G.; P. GÜNTER und K. GROTH (1998): Anpassung eines Schleppermotors an die Anforderungen des Betriebs mit RME. In: Fachtagung Biodiesel - Optimierungspotentiale und Umwelteffekte, Informationen, Erfahrungsaustausch, Perspektiven. 12.-13. Juni 1998, Forum der FAL Braunschweig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Fachhochschule Coburg
- [95] STREIT, A. und H. FRIEB (1998): Emissionsuntersuchungen an einem stationären Rapsöl-Blockheizkraftwerk - Ergebnisse einer Grundsatzuntersuchung. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Energetische Nutzung von Pflanzenölen., S. 113-133
- [96] SYASSEN, O. (1992): Chancen und Problematik nachwachsender Kraftstoffe. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 53, Nr. 11/12, S. 510-518 und 560-568
- [97] TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM (TFZ) (2007): Herstellerlisten und Bezugsquellen. Available at: [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de). Accessed at 8<sup>th</sup> May 2007
- [98] TER RELE; HOUSER und CROSBY (1994): Der Einfluß von Einlaßventilablagerungen auf Abgasemissionen. mineralöl technik, Vol. 39, Nr. 10, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 1-20
- [99] THUNEKE, K und T. WILHARM (2003): Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 104 S.
- [100] THUNEKE, K.; E. REMMELE und B. WIDMANN (2002): Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke – Leitfaden. Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern 170. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, 66 S.
- [101] TRITTHART, P. (1994): Dieselpartikelemissionen: Analysetechniken - Erfahrungen – Ergebnisse. mineralöl technik, Vol. 39, Nr. 8, Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik (Hrsg.), Hamburg: Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Eigenverlag, S. 1-20
- [102] TSCHÖKE, H. (1997): Rapsöl als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren - Chance oder Irrweg? Fuels, 1st International Colloquium, 16. - 17.01.1997; Ed. Bartz, W.J.; Esslingen, Germany, S. 405-420
- [103] TÜV SÜDDEUTSCHLAND BAU UND BETRIEB (2000): Bericht über die Emissionsmessung am Pflanzenöl-BHKW, unveröffentlichtes Messprotokoll, 13 S.
- [104] VELLGUTH, G. (1997): Emissionen bei Verwendung alternativer Kraftstoffe in Schlepper-Dieselmotoren. Grundlagen der Landtechnik, Vol. 37 (1987), Nr. 6, S. 207-213
- [105] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2004): VDI-Richtlinie 3985: Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen. VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 63 S.
- [106] Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1619)
- [107] WACHTER, W. (2007): Die Umweltrelevanz des Dieselmotors. Dozentenvorlesung im Rahmen der Lehrveranstaltung „Ausgewählte Kapitel der Verbrennungskraftmaschine“ Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 35 S. Available at: <http://fvkma.tu-graz.ac.at/>. Accessed at 7<sup>th</sup> May 2007

- [108] WAHL, T.; E. JACOB und W. WEISWEILER (1987): NO<sub>x</sub>-Verminderung bei Dieselmotoren - Teil 1: Modellgasuntersuchungen mit stickstofffreien Reduktionsmitteln. AAJOURNAL367, Vol. 57, Nr. 9, S. 506-514
- [109] WARNATZ, J.; U. MAAS und R.W. DIBBLE (2001): Verbrennung, Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 326 S.
- [110] WEIDMANN, K. (1994): Einsatz von rapsölstämmigen Kraftstoffen in Dieselmotoren. Schriftenreihe Praxis-Forum, Nr. 14 (1994), S. 151-172
- [111] WICHMANN H.-E. und A. PETERS (1999): Gesundheitsrisiken durch feine und ultrafeine Partikel. In: Feinpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Veranstaltungsunterlagen der Tagung vom 12.-13. Oktober 1999. Haus der Technik e.V. (Hrsg.), Haus der Technik e.V., Essen, Eigenverlag, 5 S.
- [112] WIDMANN, B.A. (1994): Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung des Phosphorgehaltes von Rapsöl bei der Gewinnung in dezentralen Anlagen. Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan. Forschungsbericht Agrartechnik MEG 262. Freising-Weihenstephan, 157 S.
- [113] WIDMANN, B.A. (1994): Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen - Einflußfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozeß. Forschungsbericht. „Gelbes Heft“ Nr. 51. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 310 S.
- [114] WIDMANN, B.; S. GLAMSER; R. LUTHER und C. SEYFERT (2001): Neuartiges Schmier-system auf Rapsölbasis für Motoren durch kontinuierliche Ölauffrischung (System Plantotronic). In: Ratschow, J.-P. und H. Auernhammer (Hrsg.): Agricultural Engineering 2001 - Tagung Landtechnik 2001. Düsseldorf: VDI Verlag, 1, S. 305-311
- [115] WIDMANN, B.; T. STELZER, E. REMMELE und M. KALTSCHMITT (2001): Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: KALTSCHMITT, M. und H. HARTMANN (Hrsg.): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin. Springer-Verlag, S. 537-583
- [116] WIDMANN, B. A., R. APFELBECK, B. H. GESSNER und P. PONTIUS (1992): Verwendung von Rapsöl zu Motorentreibstoff und als Heizölersatz in technischer und umweltbezogener Hinsicht. „Gelbes Heft“ Nr. 40. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. München 1992, 650 S.
- [117] ZELENKA, P. (1995): Abgasnachbehandlungssysteme im Hinblick auf die Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte. Dieselmotorentechnik, Hrsg.: Essers, U.; Pre-scher K.-H. 5. Symposium am 7. und 8. 12. 1995, Esslingen, S. 241-262
- [118] ZELENKA, P. und C. TELFORD (2002): Entwicklung eines Partikelfiltersystems für Nutzfahrzeuge mit brennerunterstützter Regeneration. MTZ 9/2002 63. Jhg., S. 684-690
- [119] ZELL, B. (2000): Bayer. Landesamt für Umweltschutz „Emissionsauflagen und Genehmigungspraxis bei Biogas- und Pflanzenöl-BHKW“, Zweites Anwenderforum Energetische Nutzung von Pflanzenöl und Biogas; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg; 23.11.00 in Staffelstein S. 69-79
- [120] ZIKORIDSE, G.; E. BACH und R. SANDIG (2003): Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren – Konzepte und Strategien. In: Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren. Beiträge zur FAD-Konferenz 2003 in Dresden. Förderkreis Abgas-nachbehandlungstechnologien für Dieselmotoren e. V. (Hrsg.), Dresden: FAD e. V., Eigenverlag, S.86-98

## Anhang

## Anhang 1: Ergebnisse der Emissionsmessungen an BHKW A bei Dauerlast

Va-riante	BHKW	Be-triebs-stunden	Leis-tung	Raps-ölkraft-stoff	Oxikat	Par-tikel-filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge-samt-C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas-temperatur	Mess-dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min				
1	A	306	8	RK1	ja	nein	18	2043	--	4	55	10,5	7,9	116	29
							19	1974	--	2	65	10,4	8,0	119	29
							19	1937	--	1	--	10,3	8,1	119	29
							18	1856	--	1	64	10,3	8,1	119	29
$\bar{x}$						<b>18,5</b>	<b>1952,5</b>	<b>--</b>	<b>2,0</b>	<b>61,3</b>	<b>10,4</b>	<b>8,0</b>	<b>118,3</b>	<b>29,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,6</b>	<b>77,9</b>	<b>--</b>	<b>1,4</b>	<b>5,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>3,1%</b>	<b>4,0%</b>	<b>--</b>	<b>70,7%</b>	<b>9,0%</b>	<b>0,9%</b>	<b>1,2%</b>			
2	A	1576	8	RK2	ja	nein	31	2157	--	4	109	11,2	7,4	103	30
							28	2388	--	3	61	11,1	7,5	116	29
							30	2288	--	3	83	11,0	7,5	118	30
							28	2348	--	2	85	11,1	7,5	118	30
$\bar{x}$						<b>29,3</b>	<b>2295,3</b>	<b>--</b>	<b>3,0</b>	<b>84,5</b>	<b>11,1</b>	<b>7,5</b>	<b>113,8</b>	<b>29,8</b>	
<b>s</b>						<b>1,5</b>	<b>100,9</b>	<b>--</b>	<b>0,8</b>	<b>19,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>5,1%</b>	<b>4,4%</b>	<b>--</b>	<b>27,2%</b>	<b>23,2%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,7%</b>			
3	A	3740	8	RK3	ja	nein	26	2059	--	3	69	10,3	8,0	121	30
							24	2058	--	3	66	10,3	8,0	121	30
							23	2093	--	3	87	10,3	8,1	121	29
							22	2099	--	2	49	10,4	8,0	120	30
							21	2057	--	1	58	10,3	8,1	121	28
$\bar{x}$						<b>23,2</b>	<b>2073,2</b>	<b>--</b>	<b>2,4</b>	<b>65,8</b>	<b>10,3</b>	<b>8,0</b>	<b>120,8</b>	<b>29,4</b>	
<b>s</b>						<b>1,9</b>	<b>20,9</b>	<b>--</b>	<b>0,9</b>	<b>14,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>8,3%</b>	<b>1,0%</b>	<b>--</b>	<b>37,3%</b>	<b>21,5%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,7%</b>			
4	A	4167	8	RK5	ja	nein	15	1897	--	5	74	10,4	8,0	120	30
							14	1911	--	5	75	10,3	8,0	123	30
							13	1896	--	5	77	10,2	8,1	125	30
							10	1898	--	4	62	10,2	8,1	126	30
							8	1901	--	4	59	10,2	8,2	126	30
$\bar{x}$						<b>12,0</b>	<b>1900,6</b>	<b>--</b>	<b>4,6</b>	<b>69,4</b>	<b>10,3</b>	<b>8,1</b>	<b>124,0</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>2,9</b>	<b>6,1</b>	<b>--</b>	<b>0,5</b>	<b>8,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>24,3%</b>	<b>0,3%</b>	<b>--</b>	<b>11,9%</b>	<b>11,9%</b>	<b>0,9%</b>	<b>1,0%</b>			
5	A	4187	8	RK5	ja	nein	22	2018	--	4	67	10,6	7,9	123	30
							22	1991	--	4	58	10,5	7,9	124	30
							22	1997	--	4	53	10,5	7,9	124	29
							22	--	1320	5	62	10,4	8,0	125	30
$\bar{x}$						<b>22,0</b>	<b>2002,0</b>	<b>1320</b>	<b>4,3</b>	<b>60,0</b>	<b>10,5</b>	<b>7,9</b>	<b>124,0</b>	<b>29,8</b>	
<b>s</b>						<b>0,0</b>	<b>14,2</b>	<b>--</b>	<b>0,5</b>	<b>5,9</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>0,0%</b>	<b>0,7%</b>	<b>--</b>	<b>11,8%</b>	<b>9,9%</b>	<b>0,8%</b>	<b>0,6%</b>			
6	A	5028	8	RK6	ja	nein	38	1954	--	6	128	11,1	7,4	116	30
							36	1922	--	6	134	11,0	7,5	117	25
							36	1922	--	6	146	10,9	7,6	117	30
$\bar{x}$						<b>36,7</b>	<b>1932,7</b>	<b>--</b>	<b>6,0</b>	<b>136,0</b>	<b>11,0</b>	<b>7,5</b>	<b>116,7</b>	<b>28,3</b>	
<b>s</b>						<b>1,2</b>	<b>18,5</b>	<b>--</b>	<b>0,0</b>	<b>9,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>3,1%</b>	<b>1,0%</b>	<b>--</b>	<b>0,0%</b>	<b>6,7%</b>	<b>0,9%</b>	<b>1,3%</b>			
<b>1-6</b>															
$\bar{x}$							<b>23,6</b>	<b>2026,0</b>	<b>1320</b>	<b>3,7</b>	<b>79,5</b>	<b>10,6</b>	<b>7,8</b>	<b>119,6</b>	<b>29,4</b>
<b>s</b>							<b>8,6</b>	<b>145,0</b>	<b>--</b>	<b>1,5</b>	<b>29,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>		
<b>v</b>							<b>36,2%</b>	<b>7,2%</b>	<b>--</b>	<b>40,8%</b>	<b>36,5%</b>	<b>3,4%</b>	<b>3,6%</b>		

## Anhang 2: Ergebnisse der Emissionsmessungen an BHKW A bei verschiedenen Einflüssen

Variante	BHKW	Be- triebs- stunden	Leis- tung	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge- sam- t- C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas- tempe- ratur	Mess- dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min
15	A	306	5	RK1	ja	nein	25	2524	--	4	--	13,6	5,6	99	29
							26	2492	--	4	12	13,7	5,5	98	28
							26	2459	--	4	12	13,7	5,5	98	29
$\bar{x}$							<b>25,7</b>	<b>2491,7</b>	--	<b>4,0</b>	<b>12,0</b>	<b>13,7</b>	<b>5,5</b>	<b>98,3</b>	<b>28,7</b>
<b>s</b>							<b>0,6</b>	<b>32,5</b>	--	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>2,2%</b>	<b>1,3%</b>	--	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,4%</b>	<b>1,0%</b>		
16	A	1576	5	RK2	ja	nein	29	3298	--	4	19	13,9	5,3	95	30
							27	3255	--	4	12	13,9	5,3	97	30
							25	3281	--	4	13	14,0	5,3	97	30
$\bar{x}$							<b>27,0</b>	<b>3278,0</b>	--	<b>4,0</b>	<b>14,7</b>	<b>13,9</b>	<b>5,3</b>	<b>96,3</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>2,0</b>	<b>21,7</b>	--	<b>0,0</b>	<b>3,8</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>7,4%</b>	<b>0,7%</b>	--	<b>0,0%</b>	<b>25,8%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,0%</b>		
35	A	1576	8	RK2	ja	nein	52	2298	--	3	--	11,7	7,0	97	2
			7				58	2635	--	3	--	12,8	6,2	99	2
			6				64	2910	--	4	--	13,7	5,5	96	2
			5				72	3121	--	4	--	14,4	5,0	93	2
			4				85	3294	--	7	--	15,2	4,4	89	2
			2				288	3538	--	24	--	16,7	3,2	79	2
35	A	1576	8	RK2			51	--	1580	4	--	11,7	7,0	94	2
			7				57	--	1819	4	--	12,7	6,2	99	2
			6				64	--	2336	4	--	13,7	5,5	98	2
			5				72	--	2758	5	--	14,5	4,9	94	2
			4				83	--	3030	6	--	15,1	4,4	91	2
			2				258	--	3518	24	--	16,8	3,2	81	2
19	A	306	Start	RK1	ja	nein	78	1965	--	9	57	11,0	7,6	90	30
20		1576		RK2			77	2068	--	14	165	11,2	7,4	76	30
21		4167		RK5			84	1599	--	19	106	10,9	7,6	58	11
26	A	306	3 x	RK1	ja	nein	46	1767		7	110	12,6	6,3	98	29
27		1576		RK2			49	2428		6	112	13,6	5,6	101	29
29		3740	8	RK4.	ja	nein	13	1836	--	3	113	10,5	7,9	116	30
							12	1900	--	3	121	10,4	8,0	117	29
$\bar{x}$							<b>12,5</b>	<b>1868,0</b>	--	<b>3,0</b>	<b>117,0</b>	<b>10,5</b>	<b>8,0</b>	<b>116,5</b>	<b>29,5</b>
<b>s</b>							<b>0,7</b>	<b>45,3</b>	--	<b>0,0</b>	<b>5,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>5,7%</b>	<b>2,4%</b>	--	<b>0,0%</b>	<b>4,8%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,9%</b>		
30	A	5028	8	RK7	ja	nein	36	1946	--	7	152	11,0	7,5	118	30
							35	1902	--	7	163	10,9	7,6	120	29
							34	1954	--	7	193	10,9	7,6	120	30
$\bar{x}$							<b>35,0</b>	<b>1934,0</b>	--	<b>7,0</b>	<b>169,3</b>	<b>10,9</b>	<b>7,6</b>	<b>119,3</b>	<b>29,7</b>
<b>s</b>							<b>1,0</b>	<b>28,0</b>	--	<b>0,0</b>	<b>21,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>2,9%</b>	<b>1,4%</b>	--	<b>0,0%</b>	<b>12,5%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,8%</b>		
31	A	4187	8	RK5	vor	nein	217	2056	--	23	--	11,0	7,5	117	30
32					nach		24	1974	--	7	--	10,9	7,6	118	29
33					vor		225	--	1968	23	--	10,9	7,6	121	30
34					nach		24	--	1568	6	--	11,0	7,5	120	30

## Anhang 3: Ergebnisse der Aldehyd-Emissionsmessungen an BHKW A

Va- riante	BHKW	Be- triebs- stunden	Leis- tung	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	Form- aldehyd	Acetal- dehyd	Propio- nalde- hyd	Acrolein	Buty- ralde- hyd	$\Sigma$ Alde- hyde	O <sub>2</sub>	Abg.- temp.	Mess- dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%	°C	min
39	A	5028	8	RK6	nein	nein	6,4	3,3	0,6	5,0	0,06	15,36	11,1	345	30
							5,6	2,0	0,5	2,8	0,03	10,93	11,0	355	30
							6,2	2,0	0,4	3,1	0,03	11,73	11,0	353	30
$\bar{x}$						<b>6,07</b>	<b>2,43</b>	<b>0,50</b>	<b>3,63</b>	<b>0,04</b>	<b>12,67</b>	<b>11,0</b>	<b>351,0</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,42</b>	<b>0,75</b>	<b>0,10</b>	<b>1,19</b>	<b>0,02</b>	<b>2,36</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>6,9%</b>	<b>30,8%</b>	<b>20,0%</b>	<b>32,8%</b>	<b>43,3%</b>	<b>18,6%</b>	<b>0,5%</b>			
40	A	5028	8	RK6	ja	nein	1,2	0,7	0,15	0,8	0,08	2,93	11,1	345	30
							0,8	0,4	0,04	0,8	0,04	2,08	11,0	355	30
							1,2	0,4	0,04	0,9	0,04	2,58	11,0	353	30
$\bar{x}$						<b>1,07</b>	<b>0,50</b>	<b>0,08</b>	<b>0,83</b>	<b>0,05</b>	<b>2,53</b>	<b>11,0</b>	<b>351,0</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,23</b>	<b>0,17</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,02</b>	<b>0,43</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>21,7%</b>	<b>34,6%</b>	<b>82,8%</b>	<b>6,9%</b>	<b>43,3%</b>	<b>16,9%</b>	<b>0,5%</b>			
41	A	5028	8	RK6	nein	nein	6,7	2,2	0,4	3,2	0,04	12,54	11,0	366	30
							6,7	2,3	0,4	3	0,07	12,47	10,9	367	30
							7,5	2,4	0,5	3,1	0,05	13,55	10,9	363	30
$\bar{x}$						<b>6,97</b>	<b>2,30</b>	<b>0,43</b>	<b>3,10</b>	<b>0,05</b>	<b>12,85</b>	<b>10,9</b>	<b>365,3</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,46</b>	<b>0,10</b>	<b>0,06</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>	<b>0,60</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>6,6%</b>	<b>4,3%</b>	<b>13,3%</b>	<b>3,2%</b>	<b>28,6%</b>	<b>4,7%</b>	<b>0,5%</b>			
42	A	5028	8	RK6	ja	nein	1,2	0,4	0,06	1,3	0,06	3,02	11,0	366	30
							1,2	0,4	0,22	0,3	0,04	2,16	10,9	367	30
							1,1	0,6	0,11	0,8	0,06	2,67	10,9	363	30
$\bar{x}$						<b>1,17</b>	<b>0,47</b>	<b>0,13</b>	<b>0,80</b>	<b>0,05</b>	<b>2,62</b>	<b>10,9</b>	<b>365,3</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,06</b>	<b>0,12</b>	<b>0,08</b>	<b>0,50</b>	<b>0,01</b>	<b>0,43</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,9%</b>	<b>24,7%</b>	<b>63,0%</b>	<b>62,5%</b>	<b>21,7%</b>	<b>16,5%</b>	<b>0,5%</b>			

## Anhang 4: Ergebnisse der Emissionsmessungen an BHKW B bei Dauerlast

Va-riante	BHKW	Be-triebs-stunden	Leis-tung	Raps-ölkraft-stoff	Oxikat	Par-tikel-filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge-samt-C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas-temperatur	Mess-dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min				
7	B	4760	40	RK8	ja	nein	42	3582	--	13	94	11,3	7,3	198	30
							42	3612	--	10	39	11,2	7,3	200	29
							42	3548	--	10	61	11,3	7,3	201	30
							41	3587	--	11	81	11,3	7,3	202	30
$\bar{x}$						<b>41,8</b>	<b>3582,3</b>	<b>--</b>	<b>11,0</b>	<b>68,8</b>	<b>11,3</b>	<b>7,3</b>	<b>200,3</b>	<b>29,8</b>	
<b>s</b>						<b>0,5</b>	<b>26,3</b>	<b>--</b>	<b>1,4</b>	<b>24,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>1,2%</b>	<b>0,7%</b>	<b>--</b>	<b>12,9%</b>	<b>35,0%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,0%</b>			
8	B	6069	40	RK9	ja	nein	46	2909	--	13	84	12,3	6,6	206	30
							48	2867	--	13	64	12,2	6,6	208	29
							50	2844	--	12	71	12,2	6,6	208	30
							51	2845	--	11	76	12,3	6,5	207	29
							52	--	2370	11	59	12,4	6,5	206	30
$\bar{x}$						<b>49,4</b>	<b>2866,3</b>	<b>2370</b>	<b>12,0</b>	<b>70,8</b>	<b>12,3</b>	<b>6,6</b>	<b>207,0</b>	<b>29,6</b>	
<b>s</b>						<b>2,4</b>	<b>30,4</b>	<b>--</b>	<b>1,0</b>	<b>9,8</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,9%</b>	<b>1,1%</b>	<b>--</b>	<b>8,3%</b>	<b>13,9%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,8%</b>			
9	B	8320	40	RK10	ja	nein	28	2521	--	10	164	11,7	7,0	204	30
							32	2504	--	9	165	11,7	7,0	206	30
							57	2487	--	9	167	11,7	7,0	207	29
							62	--	--	9	167	11,7	7,0	207	30
							62	--	2052	9	167	11,7	7,0	208	31
$\bar{x}$						<b>48,2</b>	<b>2504,0</b>	<b>2052</b>	<b>9,2</b>	<b>166,0</b>	<b>11,7</b>	<b>7,0</b>	<b>206,4</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>16,8</b>	<b>17,0</b>	<b>--</b>	<b>0,4</b>	<b>1,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>34,9%</b>	<b>0,7%</b>	<b>--</b>	<b>4,9%</b>	<b>0,9%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>			
10	B	8986	50	RK11	ja	nein	18	2375	--	6	106	11,0	7,5	226	30
							12	2354	--	5	120	11,0	7,6	228	25
							11	2363	--	5	138	10,9	7,6	228	25
							17	2385	--	5	140	11,0	7,5	228	21
							15	2351	--	5	113	11,0	7,5	227	29
$\bar{x}$						<b>14,6</b>	<b>2365,6</b>	<b>--</b>	<b>5,2</b>	<b>123,4</b>	<b>11,0</b>	<b>7,5</b>	<b>227,4</b>	<b>26,0</b>	
<b>s</b>						<b>3,0</b>	<b>14,3</b>	<b>--</b>	<b>0,4</b>	<b>15,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>			
<b>V</b>						<b>20,9%</b>	<b>0,6%</b>	<b>--</b>	<b>8,6%</b>	<b>12,2%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,7%</b>			
<b>7-10</b>															
$\bar{x}$							<b>38,5</b>	<b>2829,5</b>	<b>--</b>	<b>9,4</b>	<b>107,2</b>	<b>11,6</b>	<b>7,1</b>	<b>210,3</b>	<b>28,8</b>
<b>s</b>							<b>16,3</b>	<b>544,4</b>	<b>--</b>	<b>3,0</b>	<b>46,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>		
<b>v</b>							<b>42,3%</b>	<b>19,2%</b>	<b>--</b>	<b>32,1%</b>	<b>43,5%</b>	<b>4,9%</b>	<b>5,9%</b>		

## Anhang 5: Ergebnisse der Emissionsmessungen an BHKW B bei verschiedenen Einflüssen

Va-riante	BHKW	Be-triebs-stunden	Leis-tung	Raps-ölkraft-stoff	Oxikat	Par-tikel-filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge-samt-C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas-tempe-ratur	Mess-dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min
17	B	4760	21	RK8	ja	nein	144	3216	--	119	109	14,5	4,9	144	30
							147	3228	--	121	106	14,5	4,9	149	30
							159	3286	--	127	101	14,5	4,9	149	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>150,0</b>	<b>3243,3</b>	<b>--</b>	<b>122,3</b>	<b>105,3</b>	<b>14,5</b>	<b>4,9</b>	<b>147,3</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>7,9</b>	<b>37,4</b>	<b>--</b>	<b>4,2</b>	<b>4,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>5,3%</b>	<b>1,2%</b>	<b>--</b>	<b>3,4%</b>	<b>3,8%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>		
18	B	8986	40	RK11	ja	nein	17	2197	--	13	95	12,4	6,5	197	30
							15	2242	--	12	96	12,5	6,4	202	30
							<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>16,0</b>	<b>2219,5</b>
<b>s</b>							<b>1,4</b>	<b>31,8</b>	<b>--</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>8,8%</b>	<b>1,4%</b>	<b>--</b>	<b>5,7%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,6%</b>	<b>1,1%</b>		
36	B	4760	20	RK8	ja	nein	180	3254	--	140	--	14,6	4,8	149	2
			25				102	3550	--	95	--	13,6	5,5	152	2
			30				75	3749	--	63	--	12,9	6,1	156	2
			35				67	3790	--	54	--	12,0	6,8	164	2
			40				63	3746	--	51	--	11,2	7,4	173	2
			45				61	3813	--	55	--	10,2	8,1	185	2
37	B	6069	21	RK9			169	1881	--	83	--	15,1	4,5	146	2
			25				89	2165	--	52	--	14,2	5,1	151	2
			29				69	2340	--	39	--	13,7	5,5	157	2
			38				61	2504	--	42	--	12,6	6,3	167	2
			41				58	2602	--	39	--	12,1	6,7	178	2
			60				55	3242	--	19	--	9,5	8,6	206	2
22	B	4760	Start	RK8	ja	nein	69	3478	--	19	254	11,2	7,4	164	30
23		8320		RK10			220	2439	--	29	217	12,3	6,5	140	19
28	B	6069	3x	RK9	ja	nein	153	2542	--	51	105	13,9	5,4	170	30

## Anhang 6: Ergebnisse der Emissionsmessungen an BHKW C1 und C2

Va-riante	BHKW	Be-triebs-stunden	Leis-tung	Raps-ölkraft-stoff	Oxikat	Par-tikel-filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge-samt-C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas-tempe-ratur	Mess-dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min				
11	C1	2637	110	RK12	ja	ja	200	2899	--	8	3	10,5	7,9	151	32
							208	2858	--	6	3	10,5	7,9	156	30
							197	2870	--	11	2	10,7	7,8	163	30
							198	2822	--	10	2	10,7	7,7	164	30
							196	--	2682	9	2	10,8	7,7	160	29
$\bar{x}$						<b>199,8</b>	<b>2862,3</b>	<b>2682</b>	<b>8,8</b>	<b>2,4</b>	<b>10,6</b>	<b>7,8</b>	<b>158,8</b>	<b>30,2</b>	
<b>s</b>						<b>4,8</b>	<b>31,9</b>	<b>--</b>	<b>1,9</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>2,4%</b>	<b>1,1%</b>	<b>--</b>	<b>21,9%</b>	<b>22,8%</b>	<b>1,3%</b>	<b>1,3%</b>			
12	C1	2875	110	RK13	ja	ja	306	2688	--	15	4	10,3	8,1	159	30
							324	2644	--	13	5	--	8,1	156	30
							243	2740	--	18	6	10,6	7,8	143	30
$\bar{x}$						<b>291,0</b>	<b>2690,7</b>	<b>--</b>	<b>15,3</b>	<b>5,0</b>	<b>10,5</b>	<b>8,0</b>	<b>152,7</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>42,5</b>	<b>48,1</b>	<b>--</b>	<b>2,5</b>	<b>1,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>			
<b>v</b>						<b>14,6%</b>	<b>1,8%</b>	<b>--</b>	<b>16,4%</b>	<b>20,0%</b>	<b>2,0%</b>	<b>2,2%</b>			
38	C1		110	RK14	ja	nein	61	2830	--	8	76	11,3	7,3	158	30
							53	2867	--	6	76	11,3	7,3	162	25
							59	2775	--	6	79	11,2	7,4	163	30
							65	2804	--	6	76	11,3	7,3	167	31
$\bar{x}$						<b>59,5</b>	<b>2819,0</b>	<b>--</b>	<b>6,5</b>	<b>76,8</b>	<b>11,3</b>	<b>7,3</b>	<b>162,5</b>	<b>29,0</b>	
<b>s</b>						<b>5,0</b>	<b>39,1</b>	<b>--</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>8,4%</b>	<b>1,4%</b>	<b>--</b>	<b>15,4%</b>	<b>2,0%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,7%</b>			
<b>11-12</b>															
$\bar{x}$							<b>183,4</b>	<b>2790,6</b>	<b>--</b>	<b>10,2</b>	<b>28,1</b>	<b>10,8</b>	<b>7,7</b>	<b>158,0</b>	<b>29,7</b>
<b>s</b>							<b>116,6</b>	<b>89,2</b>	<b>--</b>	<b>4,6</b>	<b>42,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>		
<b>v</b>							<b>63,6%</b>	<b>3,2%</b>	<b>--</b>	<b>44,9%</b>	<b>150,4%</b>	<b>4,0%</b>	<b>4,5%</b>		
24	C1		Start	RK12	ja	ja	314	2768	--	22	6	10,6	7,8	106	26
25	C1		Start	RK13	ja	ja	343	2572	--	6	10	10,2	8,1	115	30
13	C2	2875	110	RK13	ja	ja	79	3373	--	7	4	10,6	7,9	142	30
							75	3317	--	7	3	10,6	7,8	142	34
							73	--	3186	6	--	10,7	7,8	142	6
$\bar{x}$						<b>75,7</b>	<b>3345,0</b>	<b>3186</b>	<b>6,7</b>	<b>3,5</b>	<b>10,6</b>	<b>7,8</b>	<b>142,0</b>	<b>23,3</b>	
<b>s</b>						<b>3,1</b>	<b>39,6</b>	<b>--</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,0%</b>	<b>1,2%</b>	<b>--</b>	<b>8,7%</b>	<b>20,2%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,7%</b>			
14	C2	3247	110	RK14	ja	ja	33	3318	--	6	2	10,7	7,8	156	30
							37	3333	--	6	2	10,6	7,8	156	31
							38	3288	--	10	1	10,3	8,0	168	30
$\bar{x}$						<b>36,0</b>	<b>3313,0</b>	<b>--</b>	<b>7,3</b>	<b>1,7</b>	<b>10,5</b>	<b>7,9</b>	<b>160,0</b>	<b>30,3</b>	
<b>s</b>						<b>2,6</b>	<b>22,9</b>	<b>--</b>	<b>2,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>7,3%</b>	<b>0,7%</b>	<b>--</b>	<b>31,5%</b>	<b>34,6%</b>	<b>2,0%</b>	<b>1,5%</b>			
<b>13-14</b>															
$\bar{x}$							<b>55,8</b>	<b>3329,0</b>	<b>3186</b>	<b>7,0</b>	<b>2,6</b>	<b>10,6</b>	<b>7,9</b>	<b>151,0</b>	<b>26,8</b>
<b>s</b>							<b>28,0</b>	<b>22,6</b>	<b>--</b>	<b>0,5</b>	<b>1,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>50,2%</b>	<b>0,7%</b>	<b>--</b>	<b>6,7%</b>	<b>50,2%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,3%</b>		

## Anhang 7: Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „a“

Va- riante	BHKW	Filterbe- triebs- stunden	Leis- tung	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	CO	NO <sub>x</sub>	NO	Ge- samt- C	Staub	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Abgas- tempe- ratur	Mess- dauer
Nr.		h	kW <sub>el</sub>				mg/m <sup>3</sup>	%	%	°C	min				
p1	A	< 5	8	RK15	nein	"a"	18	1961	--	2,9	17	10,2	8,2	118	30
			8				19	1971	--	2,6	12	10,2	8,1	118	29
			8				19	2010	--	2,4	6,3	10,4	8,0	113	30
			8				20	2041	--	2,2	2,4	10,6	7,9	118	31
$\bar{x}$						<b>19,0</b>	<b>1995,8</b>	--	<b>2,5</b>	<b>9,4</b>	<b>10,4</b>	<b>8,1</b>	<b>116,8</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>0,8</b>	<b>36,8</b>	--	<b>0,3</b>	<b>6,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,3%</b>	<b>1,8%</b>	--	<b>11,8%</b>	<b>68,0%</b>	<b>1,9%</b>	<b>1,6%</b>			
p2	A	--	8	RK15	nein	--	189	2106	--	11	64	10,3	8,0	119	30
			8				190	2121	--	11	54	10,3	8,1	120	31
			8				191	2121	--	12	52	10,3	8,1	122	31
			8				209	2109	--	14	52	10,4	8,0	122	31
$\bar{x}$						<b>194,8</b>	<b>2114,3</b>	--	<b>12,0</b>	<b>55,5</b>	<b>10,3</b>	<b>8,1</b>	<b>120,8</b>	<b>30,8</b>	
<b>s</b>						<b>9,5</b>	<b>7,9</b>	--	<b>1,4</b>	<b>5,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,9%</b>	<b>0,4%</b>	--	<b>11,8%</b>	<b>10,4%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,7%</b>			

## Anhang 8: Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „b“

Variante Nr.	Filterbetriebsstunden h	Leistung kW <sub>el</sub>	Rapsölkraftstoff	Oxikat	Partikelfilter	CO mg/m <sup>3</sup>	NOx mg/m <sup>3</sup>	NO mg/m <sup>3</sup>	Gesamt-C mg/m <sup>3</sup>	Staub mg/m <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas-temperatur °C	Messdauer min							
p3	A	< 5	8	RK16	nein	"ba"	215	1975	--	5,9	125	10,8	7,7	123	30						
							214	2109	--	6,7	99	10,9	7,6	127	30						
							120	2228	--	7,9	42	11,1	7,5	127	31						
							119	2302	--	8,5	32	11,2	7,4	127	28						
							114	--	2235	7,9	--	11,4	7,3	128	26						
$\bar{x}$						<b>156,4</b>	<b>2153,5</b>	<b>2235</b>	<b>7,4</b>	<b>74,5</b>	<b>11,1</b>	<b>7,5</b>	<b>126,4</b>	<b>29,0</b>							
<b>s</b>						<b>53,1</b>	<b>143,1</b>	<b>--</b>	<b>1,1</b>	<b>44,8</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>									
<b>v</b>						<b>33,9%</b>	<b>6,6%</b>	<b>--</b>	<b>14,3%</b>	<b>60,1%</b>	<b>2,2%</b>	<b>2,1%</b>									
p4	A	--	8	RK16	nein	--	344	--	1761	8,7	--	10,7	7,7	123	30						
							257	2046	--	7,7	125	10,9	7,7	121	30						
							$\bar{x}$						<b>300,5</b>	<b>2046,0</b>	<b>1761</b>	<b>8,2</b>	<b>125,0</b>	<b>10,8</b>	<b>7,7</b>	<b>122,0</b>	<b>30,0</b>
							<b>s</b>						<b>61,5</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>0,7</b>	<b>--</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>		
							<b>v</b>						<b>20,5%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>8,6%</b>	<b>--</b>	<b>1,3%</b>	<b>0,0%</b>		
p5	A	127	8	RK17	nein	"ba"	529	1554	--	8,6	139	8,5	9,4	231	24						
							448	1559	--	6,8	141	8,6	9,3	232	25						
							466	1546	--	7,1	140	8,6	9,3	232	25						
							425	1542	--	6,6	131	8,7	9,3	234	25						
							$\bar{x}$						<b>467,0</b>	<b>1550,3</b>	<b>--</b>	<b>7,3</b>	<b>137,8</b>	<b>8,6</b>	<b>9,3</b>	<b>232,3</b>	<b>24,8</b>
<b>s</b>						<b>44,6</b>	<b>7,7</b>	<b>--</b>	<b>0,9</b>	<b>4,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>									
<b>v</b>						<b>9,6%</b>	<b>0,5%</b>	<b>--</b>	<b>12,5%</b>	<b>3,3%</b>	<b>0,9%</b>	<b>0,5%</b>									
p6	A	--	8	RK17	nein	--	384	1890	--	6,1	126	10,5	8,0	185	25						
							430	1825	--	5,8	115	10,3	8,1	186	25						
							429	1841	--	5,5	121	10,2	8,2	187	24						
							336	1881	--	5,2	105	10,1	8,2	187	24						
							$\bar{x}$						<b>394,8</b>	<b>1859,3</b>	<b>--</b>	<b>5,7</b>	<b>116,8</b>	<b>10,3</b>	<b>8,1</b>	<b>186,3</b>	<b>24,5</b>
<b>s</b>						<b>44,7</b>	<b>31,2</b>	<b>--</b>	<b>0,4</b>	<b>9,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>									
<b>v</b>						<b>11,3%</b>	<b>1,7%</b>	<b>--</b>	<b>6,9%</b>	<b>7,7%</b>	<b>1,7%</b>	<b>1,2%</b>									
p7	A	< 5	8	RK17	nein	"bb"	259	1502	--	--	1,7	7,2	10,4	207	30						
							230	1578	--	--	4	7,2	10,4	206	30						
							213	1528	--	--	0	7,2	10,5	206	31						
							$\bar{x}$						<b>234,0</b>	<b>1536,0</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>1,9</b>	<b>7,2</b>	<b>10,4</b>	<b>206,3</b>	<b>30,3</b>
<b>s</b>						<b>23,3</b>	<b>38,6</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>2,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>									
<b>v</b>						<b>9,9%</b>	<b>2,5%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>105,7%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,6%</b>									
p8	A	--	8	RK17	nein	--	293	1989	--	--	84	10,0	8,3	153	30						
							291	1978	--	--	88	9,9	8,4	153	30						
							296	2010	--	--	95	9,9	8,4	157	30						
							$\bar{x}$						<b>293,3</b>	<b>1992,3</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>89,0</b>	<b>9,9</b>	<b>8,4</b>	<b>154,3</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>						<b>2,5</b>	<b>16,3</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>5,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>									
<b>v</b>						<b>0,9%</b>	<b>0,8%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>6,3%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,7%</b>									
p9	A	210	8	RK18	nein	"bb"	344	1490	--	--	40	7,0	10,6	182	30						
							308	1523	--	--	28	7,0	10,6	184	30						
							386	1506	--	--	33	6,9	10,6	186	30						
							356	1526	--	--	29	6,9	10,7	189	30						
$\bar{x}$						<b>348,5</b>	<b>1511,3</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>32,5</b>	<b>7,0</b>	<b>10,6</b>	<b>185,3</b>	<b>30,0</b>							
<b>s</b>						<b>32,3</b>	<b>16,7</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>5,4</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>									
<b>v</b>						<b>9,3%</b>	<b>1,1%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>16,8%</b>	<b>0,8%</b>	<b>0,5%</b>									
p10	A	--	8	RK18	nein	--	249	2102	--	--	64	10,0	8,3	117	30						
							319	2019	--	--	86	9,9	8,4	119	30						
							$\bar{x}$						<b>284,0</b>	<b>2060,5</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>75,0</b>	<b>10,0</b>	<b>8,4</b>	<b>118,0</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>						<b>49,5</b>	<b>58,7</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>15,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>									
							<b>17,4%</b>	<b>2,8%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>20,7%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,8%</b>								

## Anhang 9: Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „c“

Va- riante Nr.	Filterbe- triebs- stunden h	Leis- tung kW <sub>el</sub>	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	CO mg/m <sup>3</sup>	NOx mg/m <sup>3</sup>	NO mg/m <sup>3</sup>	Ge- samt- C mg/m <sup>3</sup>	Staub mg/m <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas- tempe- ratur °C	Mess- dauer min	
p11	A	17	8	RK17	nein	"c"	526	1540	--	--	5,3	7,0	10,6	199	29
							535	1523	--	--	5	7,0	10,6	200	29
							518	1526	--	--	4,3	7,0	10,6	200	29
							517	1525	--	--	3	7,0	10,6	200	29
<b><math>\bar{x}</math></b>						<b>524,0</b>	<b>1528,5</b>	--	--	<b>4,4</b>	<b>7,0</b>	<b>10,6</b>	<b>199,8</b>	<b>29,0</b>	
<b>s</b>						<b>8,4</b>	<b>7,8</b>	--	--	<b>1,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>1,6%</b>	<b>0,5%</b>	--	--	<b>23,3%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>			
p12	A	--	8	RK17	nein	--	248	2149	--	--	69	8,1	10,2	142	30
							242	2173	--	--	74	8,1	10,2	143	30
<b><math>\bar{x}</math></b>						<b>245,0</b>	<b>2161,0</b>	--	--	<b>71,5</b>	<b>8,1</b>	<b>10,2</b>	<b>142,5</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>4,2</b>	<b>17,0</b>	--	--	<b>3,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>1,7%</b>	<b>0,8%</b>	--	--	<b>4,9%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>			

## Anhang 10: Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „d“

Va- riante Nr.	Filterbe- triebs- stunden h	Leis- tung kW <sub>el</sub>	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	CO mg/m <sup>3</sup>	NOx mg/m <sup>3</sup>	NO mg/m <sup>3</sup>	Ge- samt-			CO <sub>2</sub> %	Abgas- tempe- ratur °C	Mess- dauer min	
									C mg/m <sup>3</sup>	Staub mg/m <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %				
p13	A	<5	8	RK18	ja	"da"	48	2176	--	4,8	10	11,0	7,6	128	30
							49	2170	--	4,7	10	10,8	7,7	129	30
							47	2124	--	4,2	11	10,7	7,8	130	30
							47	--	1389	3,9	--	10,5	7,9	131	22
$\bar{x}$						<b>47,8</b>	<b>2156,7</b>	<b>1389</b>	<b>4,4</b>	<b>10,3</b>	<b>10,8</b>	<b>7,8</b>	<b>129,5</b>	<b>28,0</b>	
<b>s</b>						<b>1,0</b>	<b>28,4</b>	<b>--</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>2,0%</b>	<b>1,3%</b>	<b>--</b>	<b>9,6%</b>	<b>5,6%</b>	<b>1,9%</b>	<b>1,7%</b>			
p14	A	--	8	RK18	ja	--	34	2194	--	6,6	36	11,0	7,5	137	30
							35	2158	--	6,1	33	11,0	7,5	137	29
							37	--	1391	5,7	57	10,8	7,7	138	30
$\bar{x}$						<b>35,3</b>	<b>2176,0</b>	<b>1391</b>	<b>6,1</b>	<b>42,0</b>	<b>10,9</b>	<b>7,6</b>	<b>137,3</b>	<b>29,7</b>	
<b>s</b>						<b>1,5</b>	<b>25,5</b>	<b>--</b>	<b>0,5</b>	<b>13,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>4,3%</b>	<b>1,2%</b>	<b>--</b>	<b>7,4%</b>	<b>31,1%</b>	<b>1,1%</b>	<b>1,5%</b>			
p15	A	94	8	RK19	ja	"db"	56	2133	--	4,6	--	10,2	8,1	194	30
							55	2133	--	4,3	25	10,2	8,2	194	30
							58	2050	--	3,9	39	10,0	8,3	196	31
$\bar{x}$						<b>56,3</b>	<b>2105,3</b>	<b>--</b>	<b>4,3</b>	<b>32,0</b>	<b>10,1</b>	<b>8,2</b>	<b>194,7</b>	<b>30,3</b>	
<b>s</b>						<b>1,5</b>	<b>47,9</b>	<b>--</b>	<b>0,4</b>	<b>9,9</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>			
<b>v</b>						<b>2,7%</b>	<b>2,3%</b>	<b>--</b>	<b>8,2%</b>	<b>30,9%</b>	<b>1,1%</b>	<b>1,2%</b>			
p16	A	--	8	RK19	ja	--	56	1959	--	4,4	50	10,2	8,2	158	25
							55	1949	--	4,8	55	10,2	8,2	159	29
							55	1952	--	4,9	51	10,2	8,2	159	26
$\bar{x}$						<b>55,3</b>	<b>1953,3</b>	<b>--</b>	<b>4,7</b>	<b>52,0</b>	<b>10,2</b>	<b>8,2</b>	<b>158,7</b>	<b>26,7</b>	
<b>s</b>						<b>0,6</b>	<b>5,1</b>	<b>--</b>	<b>0,3</b>	<b>2,6</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>			
<b>v</b>						<b>1,0%</b>	<b>0,3%</b>	<b>--</b>	<b>5,6%</b>	<b>5,1%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>			
p17	A	<5	8	RK19	ja	"dc"	46	2131	--	13	--	10,5	8,0	131	30
							53	2093	--	14	5	10,2	8,2	134	30
							55	2060	--	12	3	10,0	8,3	136	30
							90	--	1874	6	2	9,7	8,6	153	30
$\bar{x}$						<b>61,0</b>	<b>2094,7</b>	<b>1874</b>	<b>11,3</b>	<b>3,3</b>	<b>10,1</b>	<b>8,3</b>	<b>138,5</b>	<b>30,0</b>	
<b>s</b>						<b>19,7</b>	<b>35,5</b>	<b>--</b>	<b>3,6</b>	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>			
<b>v</b>						<b>32,3%</b>	<b>1,7%</b>	<b>--</b>	<b>31,9%</b>	<b>45,8%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,0%</b>			

## Anhang 11: Ergebnisse der Emissionsmessungen mit Partikelfiltersystem „e“

Va- riante Nr.	BHKW	Filterbe- triebs- stunden h	Leis- tung kW <sub>el</sub>	Raps- ölkraft- stoff	Oxikat	Par- tikel- filter	CO mg/m <sup>3</sup>	NOx mg/m <sup>3</sup>	NO mg/m <sup>3</sup>	Ge- samt- C mg/m <sup>3</sup>	Staub mg/m <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %	Abgas- tempe- ratur °C	Mess- dauer min
p18	A	< 5	8	RK19	ja	"e"	21	1955	--	--	11	10,9	7,6	104	30
			8				20	1995	--	--	9,4	10,8	7,7	113	30
			8				22	1935	--	--	--	10,6	7,8	114	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>21,0</b>	<b>1961,7</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>10,2</b>	<b>10,8</b>	<b>7,7</b>	<b>110,3</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>1,0</b>	<b>30,6</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>1,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>4,8%</b>	<b>1,6%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>11,1%</b>	<b>1,4%</b>	<b>1,3%</b>		
p19	A	--	8	RK19	ja	--	13	1871	--	--	126	10,9	7,6	112	30
			8				10	1967	--	--	50	11,0	7,6	112	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>11,5</b>	<b>1919,0</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>88,0</b>	<b>11,0</b>	<b>7,6</b>	<b>112,0</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>2,1</b>	<b>67,9</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>53,7</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>18,4%</b>	<b>3,5%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>61,1%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,0%</b>		
p20	A	420	8	RK20	nein	"e"	413	1409	--	12	16	9,1	9,0	171	30
			8				414	1862	--	11	20	9,0	9,1	172	31
			8				399	1592	--	15	19	9,0	9,1	172	30
			8				410	1560	--	24	16	9,0	9,1	173	30
			8				396	--	1875	8	21	8,9	9,1	174	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>406,4</b>	<b>1605,8</b>	<b>1875</b>	<b>14,0</b>	<b>18,4</b>	<b>9,0</b>	<b>9,1</b>	<b>172,4</b>	<b>30,2</b>
<b>s</b>							<b>8,3</b>	<b>188,6</b>	<b>--</b>	<b>6,1</b>	<b>2,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>2,0%</b>	<b>11,7%</b>	<b>--</b>	<b>43,7%</b>	<b>12,5%</b>	<b>0,8%</b>	<b>0,5%</b>		
p21	A	--	8	RK20	nein	--	340	1836	--	13	102	9,6	8,6	127	30
			8				320	1871	--	16	87	9,7	8,5	128	30
			8				324	1850	--	18	84	9,7	8,5	129	30
			8				329	1871	--	21	90	9,7	8,5	131	30
			8				340	--	1869	21	94	9,7	8,5	132	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>330,6</b>	<b>1857,0</b>	<b>1869</b>	<b>17,8</b>	<b>91,4</b>	<b>9,7</b>	<b>8,5</b>	<b>129,4</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>9,2</b>	<b>17,1</b>	<b>--</b>	<b>3,4</b>	<b>7,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>2,8%</b>	<b>0,9%</b>	<b>--</b>	<b>19,2%</b>	<b>7,6%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,5%</b>		
p22	A	422	8	RK20	nein	"e"	384	1836	--	12	15	9,6	8,6	152	29
			8				506	1757	--	11	16	9,5	8,7	164	30
			8				486	1764	--	10	10	9,5	8,7	165	30
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>458,7</b>	<b>1785,7</b>	<b>--</b>	<b>11,0</b>	<b>13,7</b>	<b>9,5</b>	<b>8,7</b>	<b>160,3</b>	<b>29,7</b>
<b>s</b>							<b>65,4</b>	<b>43,7</b>	<b>--</b>	<b>1,0</b>	<b>3,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>		
<b>v</b>							<b>14,3%</b>	<b>2,4%</b>	<b>--</b>	<b>9,1%</b>	<b>23,5%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,7%</b>		
p23	A	441	8	RK20	nein	"e"	387	1722	--	6,3	9	9,2	8,9	174	29
			8				398	1714	--	6,3	8	9,2	8,9	175	30
			8				408	1723	--	8,1	10	9,2	8,9	176	31
<b><math>\bar{x}</math></b>							<b>397,7</b>	<b>1719,7</b>	<b>--</b>	<b>6,9</b>	<b>9,0</b>	<b>9,2</b>	<b>8,9</b>	<b>175,0</b>	<b>30,0</b>
<b>s</b>							<b>10,5</b>	<b>4,9</b>	<b>--</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>		
<b>v</b>							<b>2,6%</b>	<b>0,3%</b>	<b>--</b>	<b>15,1%</b>	<b>11,1%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>		