



**Forschungsvorhaben EULV32
Emissionsverhalten
thermischer Anlagen bei
instationären Betriebszuständen
(EU Ziel-2 Programm Bayern)**





**Forschungsvorhaben EULV32
Emissionsverhalten
thermischer Anlagen bei
instationären Betriebszuständen
(EU Ziel-2 Programm Bayern)**

Impressum

Titel der Druckschrift:

Forschungsvorhaben EULV32: Emissionsverhalten thermischer Anlagen bei instationären Betriebszuständen (EU Ziel-2 Programm Bayern), Abschlussbericht zum 30.09.2008

Herausgeber:

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

Bearbeitung/Text/Konzept:

Ref. 33, Clemens Marb, Heinz-Uwe Riedel

Redaktion:

Ref. 33, Clemens Marb, Heinz-Uwe Riedel

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Druck:

Eigendruck Bayer. Landesamt für Umwelt

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

September 2008



Dieses Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Untersuchungsumfang, Probenahmestellen	7
3	Ergebnisse und Bewertung	9
3.1	Deponiegasverstromungsanlagen	9
3.1.1	Regelbetrieb	10
3.1.2	Anfahrvorgang	12
3.1.2.1	Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	13
3.1.2.2	Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	14
3.2	Palmöl-Blockheizkraftwerk	17
3.2.1	Regelbetrieb	18
3.2.2	Anfahrbetrieb	19
3.2.2.1	Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	20
3.2.2.2	Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	21
3.3	Einäscherungsanlagen	23
3.3.1	Regelbetrieb	24
3.3.2	Anfahrvorgang	25
3.3.2.1	Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	26
3.3.2.2	Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	28
3.4	Perlit-Blähanlage	29
3.4.1	Regelbetrieb	30
3.4.2	Anfahrbetrieb	31
3.4.2.1	Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	31
3.4.2.2	Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb	33
4	Zusammenfassung	35
5	Danksagung	39
6	Literatur	41

1 Einleitung

Die Europäische Union unterstützt in den Mitgliedsstaaten die Angleichung des Entwicklungsstandes und des Lebensstandards über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). U. a. werden Projekte in sog. Ziel-2-Gebieten gefördert. In Bayern erstreckt sich das Ziel-2-Gebiet [1] entlang der tschechischen Grenze, auf die Nürnberger Südstadt, die Innenstadt von Fürth sowie die Stadt Schweinfurt.

Das EFRE-Projekt „Emissionsverhalten thermischer Anlagen bei instationären Betriebszuständen (EU Ziel-2 Programm Bayern)“ hatte zum Ziel, die Emissionen an beispielhaft ausgewählten Anlagen in Ziel-2-Gebieten zu erfassen und mit dem Regel- bzw. Normalbetrieb zu vergleichen.

Instationäre Betriebszustände, wie sie bei jeder Anlage während des Anfahrens auftreten, können in Abhängigkeit von den eingesetzten Brenn- und Betriebsstoffen gegenüber dem (quasi-)stationären Regelbetrieb durch erhöhte Emissionskonzentrationen und -frachten gekennzeichnet sein. Aus den Ergebnissen der Emissionsmessungen lassen sich ggf. anlagenspezifische Handlungsempfehlungen zur Schadstoffreduktion gewinnen.

Der Messumfang richtete sich generell nach dem jeweiligen Genehmigungsbescheid bzw. nach den in der TA Luft [2] genannten Anforderungen; dabei stellte die in der 17. BImSchV [3] genannte Parameterliste den Mindestuntersuchungsumfang dar. Damit ist eine umfassende Information über das System- und Schadstoffverhalten gewährleistet.

Innerhalb der operativen Projektphase wurden (i) zwei Deponiegasverstromungsanlagen, (ii) ein mit Palmöl betriebenes Blockheizkraftwerk, (iii) zwei Einäscherungsanlagen zur Feuerbestattung und (iv) eine Perlit-Blähanlage untersucht. Die jeweiligen Ergebnisse wurden bzw. werden jeweils mit den Betreibern diskutiert und in einem Bericht nach den Empfehlungen des Ausschusses Luftqualität / Wirkungsfragen / Verkehr (LWV) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) [4] dargestellt. Sie wurden bzw. werden den Anlagenbetreibern, den zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz vorgelegt.

Die vier Anlagentypen weisen ein breites verfahrenstechnisches Spektrum auf: (i) motorische Verbrennung von Deponiegas zur Deponiegasmineralisierung und Stromerzeugung, (ii) motorische Verbrennung von Palmöl zur Gewinnung von Wärme und Strom (Kraft-Wärme-Kopplung), (iii) Verbrennung und Mineralisierung der sterblichen Überreste eines Menschen inkl. Sarg und Sargausstattung in einem Etagenofen sowie (iv) Trocknen und Blähen von Perlit zu einem porösen Granulat (Sekundärrohstoff) für die Baustoffindustrie. Zur Schadstoffrückhaltung kommen bei einer Deponiegasverstromungsanlage ein Oxidationskatalysator, bei den Einäscherungsanlagen ein Zyklon und ein Gewebefilter (Flugstromadsorber) und bei der Perlit-Blähanlage ein Gewebefilter zum Einsatz.

Als Beweggrund für die Teilnahme der Anlagenbetreiber an dem Untersuchungsprogramm war meist die Anerkennung der Messungen im Regelbetrieb als wiederkehrende Messung nach § 26 BImSchG [5] durch die zuständige Kreisverwaltungsbehörde ausschlaggebend.

2 Untersuchungsumfang, Probenahmestellen

An allen Anlagen beinhalteten die Messkampagnen die zeit- und wertekontinuierliche Erfassung von Abgastemperatur, -geschwindigkeit, -feuchte, Sauerstoff, Kohlenstoffdi-/monoxid, Schwefeldioxid bzw. Schwefeloxiden, Stickstoffoxiden und organischem Gesamtkohlenstoff sowie die zeitkontinuierliche Erfassung und wertediskontinuierliche Ermittlung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen {Indikator-PCB und coplanare (dioxinähnliche) PCB nach WHO [6]} und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen (PCDD/F). Je nach Anlagentyp und gültigem Genehmigungsbescheid oder aus fachlichem Interesse kamen weitere Abgaskomponenten oder die Untersuchung von Feststoffproben hinzu.

In den folgenden Kapiteln werden – wenn nicht anders angegeben – die direkt gemessenen, normierten¹ Daten herangezogen, um die instationären Prozesse möglichst detailliert darzustellen.

Probenahmestellen. Die an den Anlagen eingerichteten Mess-/Probenahmestellen entsprechen oft nicht der Norm [7, 8] (ungenügende Ein- und/oder Auslaufstrecke). Dies liegt v. a. an zu knapp bemessenen Abgasleitungslängen zwischen Umlenkungen, Krümmern oder Querschnittsänderungen. Bei sämtlichen Anlagen war eine Nachrüstung von Rohgasmessstellen unmöglich, so dass ausschließlich Reingasprobenahmen (vor oder am Kamin) durchgeführt werden konnten.

Die Untersuchungsumfänge stellten sich bei den vier Anlagentypen wie folgt dar:

Deponiegasverstromungsanlagen. Die Abgasmessungen und -probenahmen an den zwei Deponiegasverstromungsanlagen fanden während eines Anfahrvorgangs und im Regelbetrieb nach Gasmotor und Abgasreinigung am Kamin statt. Neben den o. g. Messgrößen wurden die Konzentrationen an Chlor-/Fluorwasserstoff, Gesamtstaub und Benzol bestimmt.

Mit Palmöl betriebenes Blockheizkraftwerk. Nach einem 2½-monatigen Betriebsstillstand wurde der Anfahrvorgang des Selbstzündungsmotors und der sich daran anschließende Regelbetrieb untersucht. Als zusätzliche Komponenten wurden im Regelbetrieb die Konzentrationen an Chlor-/Fluorwasserstoff, Gesamtstaub, Benzol, 1,3-Butadien, Phenolen und Formaldehyd ermittelt.

Einäscherungsanlagen. An den beiden Etagenöfen mit den Abgasreinigungsanlagen wurde reingasseitig (vor dem Saugzug und Kamin) jeweils einmal das Anfahren nach dem Stillstand über das Wochenende sowie an drei Tagen der Regelbetrieb untersucht. Aufgrund des diskontinuierlichen Anlagenbetriebs ist der Regelbetrieb von instationären Prozessen gekennzeichnet. Neben den o. g. Messgrößen erfolgte vorwiegend im Regelbetrieb die Bestimmung der Abgasgehalte an Gesamtstaub, Quecksilber sowie die Untersuchung des Gewebefilterstaubs auf Quecksilber und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane.

Perlit-Blähanlage. Die Anfahr- und Regelbetriebsuntersuchungen wurden im Abgas eines Blähofens für Perlite nach Gewebefilter und Saugzug am Kamin durchgeführt.

¹ normiert auf 273,15 K, 1.013 hPa, 0 % r. H.

3 Ergebnisse und Bewertung

In den folgenden Abschnitten werden die Messergebnisse an den zwei Deponiegasverstromungsanlagen, dem mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerk, den zwei Einäscherungsanlagen und der Perlit-Blähanlage vorgestellt und bewertet. Da sich die Messergebnisse an den zwei Deponiegasverstromungs- und an den zwei Einäscherungsanlagen untereinander gleichen, werden die Ergebnisse beispielhaft beschrieben. Ausgangspunkt ist das Anlagenschema. Anhand dessen werden der Regel- und Anfahrbetrieb samt Messergebnissen dargestellt und vergleichend erläutert.

3.1 Deponiegasverstromungsanlagen

Seit dem 1. Juni 2005 ist in Deutschland die Deponierung unbehandelter Abfälle untersagt [9]. Nicht nur während der Ablagerung, sondern auch nach Beendigung der Deponierung von (organischen) Abfällen treten über viele Jahre hinweg methanhaltige Deponiegase diffus aus, solange die Deponie nicht abgedeckt, das Gas nicht gefasst und einer Verwertung zugeführt wird. Zur Vermeidung des unkontrollierten Entweichens der Klima schädigenden Deponiegase setzt man verstärkt auf die motorische Verbrennung der Deponiegase zur Gewinnung von elektrischer Energie.

Bei den Deponiegasverstromungsanlagen A und B – vgl. Abbildung 1 – handelt es sich um Anlagen, die an den in Betrieb befindlichen Deponien A und B eingerichtet worden sind.

Deponie A: eine seit 1978 in fünf Bauabschnitten betriebene Deponie für Siedlungsabfälle (Haus- und Gewerbeabfälle), auf der seit 1999 ausschließlich inerte, reaktionsarme Abfälle wie Asbestabfälle, Gießereialsande, Schlacken, Strahlsande etc. abgelagert werden. Genehmigtes Deponievolumen 1,5 Mio. Kubikmeter, verfüllt rd. 1,1 Mio. Kubikmeter. Über 51 Gasbrunnen, -sammelleitungen und -stationen wird das Deponiegas (38 Vol.-% Methan, 22 Vol.-% Kohlenstoffdioxid, < 1 Vol.-% Sauerstoff) gefasst.

Deponie B: eine seit 1981 in zwei Bauabschnitten betriebene Deponie für Siedlungsabfälle (Haus- und Gewerbeabfälle), auf der seit 1997 ausschließlich inerte, reaktionsarme Abfälle wie Asbestabfälle, Gießereialsande, Schlacken, Strahlsande etc. abgelagert werden. Genehmigtes Deponievolumen 3,0 Mio. Kubikmeter, verfüllt rd. 2,3 Mio. Kubikmeter. Über 26 Gasdome, -sammelleitungen und -stationen wird das Deponiegas (48 Vol.-% Methan, 12 Vol.-% Kohlenstoffdioxid, 2 Vol.-% Sauerstoff) gefasst.

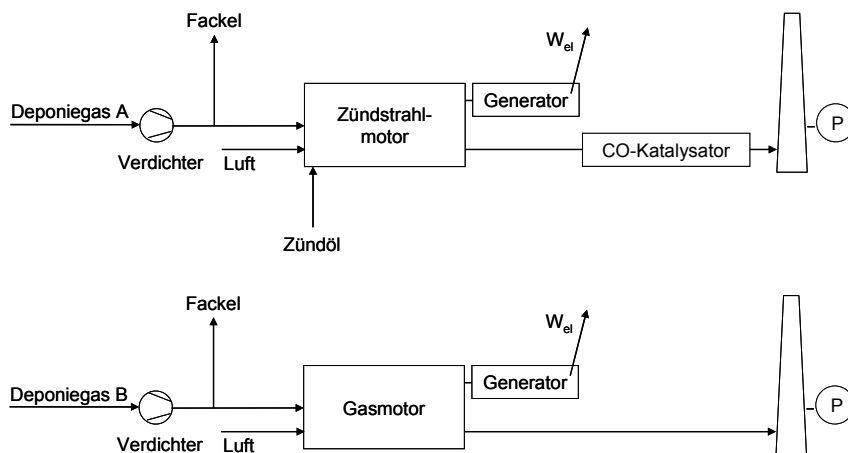


Abb. 1: Verfahrensfliessbild der an den Deponien A (Bild oben) und B (unten) installierten Deponiegasverstromungsanlagen mit Probenahmestellen P.

Die sich innerhalb des Deponiekörpers infolge anaerober biologischer Abbauvorgänge bildenden Deponiegase werden über aufwändige Gassammelsysteme gefasst. Bevor das Deponiegas in den Verdichter gelangt, werden Schwebstoffe abgeschieden und das Gas entfeuchtet. Der Verdichter saugt das Gas aus dem Deponiekörper an und verdichtet es gegenüber der Umgebung auf einen Überdruck von ca. 60 hPa bis 70 hPa. Wie oben erwähnt, bildet das energiereiche Methan (Heizwert ca. 50 MJ/kg) den Hauptbestandteil des Deponiegases. Als Nebenbestandteile sind v. a. Stickstoff, Chlorkohlenwasserstoffe (CKW), Toluol, Benzol, Xylole und Schwefelwasserstoff enthalten.

Auf der Deponie A ist ein Zündstrahlmotor zum Antrieb des elektrischen Generators installiert; dieser Dieselmotor benötigt aufgrund der schwankenden Deponiegaszusammensetzung und des Heizwerts stets Zündöl (Heizöl EL) als Treibstoff. Der Anteil des Zündöls am Heizwert des Brennstoffgemisches bzw. an der Feuerungswärmeleistung liegt unter 10 %. Bei der Anlage B (zwei Motor / Generator-Sätze) handelt es sich um einen Gasmotor mit Fremdzündung, vgl. Angaben in Tabelle 1.

Der Deponiegasmotor A ist mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet, um das im Abgas enthaltene Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid zu konvertieren. Die im Deponiegas enthaltenen Katalysatorgifte begrenzen die Standzeit des Katalysators. Um diese zu verlängern, ist ein hoher Wartungsaufwand (z. B. Waschen der katalytisch wirkenden Oberfläche) und / oder ein regelmäßiger Austausch des Katalysators notwendig.

Bei plötzlichem Motorstillstand und gleichzeitigem Weiterbetrieb der Verdichterstation wird das Deponiegas in einer Fackel verbrannt.

Tab. 1: Wesentliche Kenndaten (Motor / Generator) der Deponiegasverstromungsanlagen.

Auslegungsdaten Motor / Generator	Deponie A	Deponie B
Motortyp	Zündstrahlmotor (Diesel-Prinzip): R6-Zylinder 4-Takt, 6 l Hubraum	Gasmotor (Otto-Prinzip): V8-Zylinder 4-Takt, 17,5 l Hubraum, mit äußerer Gemischbildung und -aufladung
Baujahr	2005	1998
Betriebsstunden	ca. 18.260	ca. 43.990
Gasverbrauch	45 m ³ /h (50 Vol.-% CH ₄)	200 m ³ /h (CH ₄ -Gehalt unbekannt)
Feuerungswärmeleistung	250 kW	847 kW
Leistungseinstellung	100 kW _{el} , 1.500 min ⁻¹ , 50 Hz	300 kW _{el} , 1.500 min ⁻¹ , 50 Hz
Mittlerer Durchsatz – Gas	68 m ³ /h (40 Vol.-% CH ₄)	130 m ³ /h (48 Vol.-% CH ₄)
– Zündöl	2,5 l/h (Heizöl EL)	–
Elektrische Leistung	85 kW _{el}	225 kW _{el}
Letzte Wartung	unmittelbar vor der Untersuchung	kurz vor der Untersuchung

3.1.1 Regelbetrieb

Solange der Deponiekörper ausreichend brennbares Deponiegas für den Verbrennungsmotor liefert, an den ein elektrischer Generator gekoppelt ist, kann Tag und Nacht Strom erzeugt werden. Da an den Deponien A und B zum Zeitpunkt der Messung seit acht bzw. zehn Jahren keine reaktionsfähigen Abfälle mehr abgelagert wurden, ist an beiden Deponien die Gasbildung stark rückläufig. Dies kann dazu führen, dass die Stromerzeugung unterbrochen werden muss, bis sich im Deponiekörper wieder ausreichend Deponiegas gebildet hat. An der Deponie B wurde aus diesem Grund der zweite Deponiegasmotor stillgelegt. Beim Absaugen des Deponiekörpers über die Verdichterstation ist darauf zu

achten, dass man die Deponie nicht übersaugt, d. h., dass man eine höhere Gasmenge absaugt als gebildet wird. In diesem Fall würde über die Deponieoberfläche aktiv Umgebungsluft in den Deponiekörper eindringen.

Bei den in Tabelle 2 genannten Mittelwerten sind alle Schadstoffkonzentrationen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-% bezogen. Bei beiden Deponien lagen im Abgas die Sauerstoffkonzentrationen über 5 Vol.-%, so dass sich die bezogenen gegenüber den gemessenen Werten erhöhten.

Tab. 2: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den beiden Deponiegasverstromungsanlagen im Vergleich zu den einzuhaltenden Emissionsbegrenzungen.

Abgasrandparameter / -konzentrationen	Deponie A		Deponie B	
	Mittelwert	Emissions- begrenzung ¹⁾	Mittelwert	Emissions- begrenzung ¹⁾
Volumenstrom [m ³ /h]	226 ²⁾	–	788 ²⁾	–
Temperatur [°C]	372	–	375	–
Sauerstoff [Vol.-%]	5,6 ²⁾	–	7,1 ²⁾	–
Kohlenstoffdioxid [Vol.-%]	11,5 ²⁾	–	10,7 ²⁾	–
Kohlenstoffmonoxid [g/m ³]	0,399 ³⁾	0,65	0,618 ³⁾	0,65
Schwefeldioxid [g/m ³]	0,046 ³⁾	–	0,073 ³⁾	–
Schwefeloxide, angegeben als Schwefeldioxid [g/m ³]	0,042 ³⁾	0,35	0,047 ³⁾	0,50
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid [g/m ³]	0,450 ³⁾	0,50	0,371 ³⁾	0,50
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff [g/m ³]	–	–	0,731 ³⁾	–
Methan [mg/m ³]	1.320 ³⁾	–	1.160 ³⁾	–
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff [mg/m ³]	0,78 ³⁾	30	3,0 ³⁾	30
Fluor und seine gasförmigen Verbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff [mg/m ³]	0,34 ³⁾	3	1,5 ³⁾	5
Schwefelwasserstoff [mg/m ³]	< 0,5 ³⁾	3	< 0,5 ³⁾	5
Formaldehyd [mg/m ³]	77 ³⁾	60	81 ³⁾	–
Σ Formaldehyd, Phenol [mg/m ³]	< 77,01 ³⁾	–	< 81,01 ³⁾	20
Benzol [mg/m ³]	0,36 ³⁾	–	0,10 ³⁾	5 / 1 [2]
Σ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [µg/m ³]	165 ³⁾	–	7,9 ³⁾	–
Σ Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) [ng/m ³]	0,37 ³⁾	–	0,44 ³⁾	–
Σ Coplanare polychlorierte Biphenyle [pg WHO-TEQ/m ³]	0,010 ³⁾	–	0,007 ³⁾	–
Σ Polychlorierte Dibenzo-p- dioxine/-furane [ng I-TEQ/m ³]	2,1×10 ^{-6 3)}	0,1	0,32×10 ^{-3 3)}	0,1

¹⁾ lt. Genehmigungsbescheide für die Deponie A bzw. B

²⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Betriebssauerstoffgehalt

³⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Bezugssauerstoffgehalt (5 Vol.-%)

An der Deponie B ist für den Parameter „organischer Gesamtkohlenstoff ohne Methan“ eine Emissionsbegrenzung von $0,15 \text{ g/m}^3$ einzuhalten. Da bei den Messungen der organische Gesamtkohlenstoff und Methan nicht simultan bestimmt werden konnten, ist die Berechnung des limitierten Parameters organischer Gesamtkohlenstoff ohne Methan nicht korrekt. D. h., die beiden Messwerte können nicht für einen quantitativen Vergleich mit der Emissionsbegrenzung herangezogen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen verfüllten Deponievolumina und des Deponiealters (Quellstärke) ist der Durchsatz (Förderleistung) der Motoren dieser Situation angepasst. Der gemessene Abgasvolumenstrom an der Deponiegasverstromungsanlage A macht rd. ein Drittel der Deponie B aus. Durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators erreicht an der Deponie A die mittlere Kohlenstoffmonoxidkonzentration einen Wert von knapp $0,4 \text{ g/m}^3$, während an der Deponie B dieser Wert bei über $0,6 \text{ g/m}^3$ liegt und damit die Emissionsbegrenzung von $0,65 \text{ g/m}^3$ zu 95 % ausschöpft. Allerdings deuten die für einen Oxidationskatalysator vergleichsweise hohen Kohlenstoffmonoxidwerte auf einen nicht mehr voll funktionstüchtigen Katalysator hin (Katalysator bereits über zwei Jahre in Betrieb; evtl. Katalysatorvergiftung, Desaktivierung durch Siloxane). Die Methankonzentration im Abgas liegt bei beiden Motoren über 1 g/m^3 , was im Wesentlichen aus dem Ladungswechsel (Methanschluß) herührt. Auffällig sind vor allem die hohen Formaldehydkonzentrationen. Die an der Deponie A einzuhaltende Emissionsbegrenzung wurde bei allen vier Probenahmen im Mittel um fast 30 % überschritten. Der an der Deponie A installierte Zündstrahlmotor, der nach dem Dieselverfahren arbeitet, emittiert verfahrensbedingt unverbrannten Kohlenstoff (Rußpartikel). An diesen Rußpartikeln adsorbieren bevorzugt polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, die im Abgas eine durchschnittliche Konzentration von 165 µg/m^3 (bezogen auf 5 Vol.-% Sauerstoff) erreichen. Bei dem Gas-Otto-Motor an der Deponie B liegen die PAK-Emissionen aufgrund der Verbrennungsbedingungen (homogenes Gasgemisch ohne zusätzlichen Zündöleinsatz) um zwei Größenordnungen niedriger. Die Emissionen an polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB, coplanare PCB) sind bei beiden Motoren ebenso wie die an polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und -furanen äußerst gering. Letztere lagen mindestens drei Größenordnungen unterhalb der Emissionsbegrenzung.

3.1.2 Anfahrvorgang

Der Anfahrvorgang einer Deponiegasverstromungsanlage ist von relativ kurzer Dauer (< 8 min).

Aufgrund der höheren Gasproduktion (geringerer Methangehalt) an der Deponie A läuft der Zündstrahlmotor rd. 7.100 h pro Jahr und der Gasmotor an der Deponie B (tagsüber) rd. 2.800 h pro Jahr. Während der Zündstrahlmotor bis auf regelmäßige Wartungsintervalle dauernd betrieben wird, wird der Gasmotor täglich an- und abgestellt.

Kurz nach Betätigung des Anlassers laufen die Motoren und erreichen nach kurzer Zeit die für den Generatorbetrieb erforderliche Solldrehzahl von 1.500 min^{-1} . Sobald die Synchronisation des Generators abgeschlossen ist, wird dieser zugeschaltet. Mit dem Erreichen der Leistungseinstellung von $85 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Deponie A) und $225 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Deponie B) ist der Anfahrvorgang abgeschlossen. Der zeitliche Ablauf des Anfahrens ist in Abbildung 2 zu sehen.

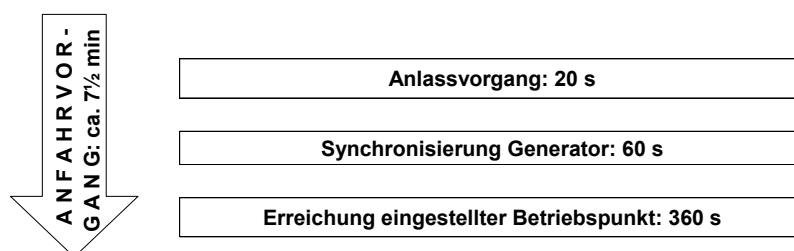


Abb. 2: Zeitlicher Ablauf des Anfahrvorgangs von Deponiegasverstromungsanlagen.

3.1.2.1 Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Da sich die Messkurven (Volumenstrom, Temperatur, Emissionen) der beiden Deponiegasmotoren in vielerlei Hinsicht gleichen, wird im Folgenden beispielhaft anhand des Otto-Motors das instationäre Verhalten ab Motorstart über vier Stunden bildlich dargestellt und erläutert, vgl. Abbildung 3.

Mit Betätigung des Anlassers, der die zum Selbstlauf des Motors nötige Drehzahl (Dieselmotor: 80 bis 200 Umdrehungen pro Minute; Otto-Motor: 60 bis 100 Umdrehungen pro Minute) liefert, wird der Motor gestartet. Dadurch wird beim Dieselmotor – dieser besitzt gegenüber dem Otto-Motor ein deutlich höheres Verdichtungsverhältnis – die Selbstzündungstemperatur (ca. 250 °C) erreicht und beim Otto-Motor das notwendige Luft/Brennstoff-Gemisch erzeugt. Bereits nach wenigen Zündungen bzw. Kurbelwellenumdrehungen laufen die Motoren selbstständig. Dies wird in dem Verlauf des Volumenstroms deutlich. Fast schlagartig erhöhten sich mit dem Motorstart die Drehzahl und damit der geförderte Volumenstrom. Nach kurzer Zeit haben die Motoren die Solldrehzahl von 1.500 Umdrehungen pro Minute erreicht und der Volumenstrom bewegt sich auf einem quasistationären Niveau von knapp 800 m³/h. Die ständigen Druckänderungen in den Gas führenden Leitungen, hervorgerufen durch den

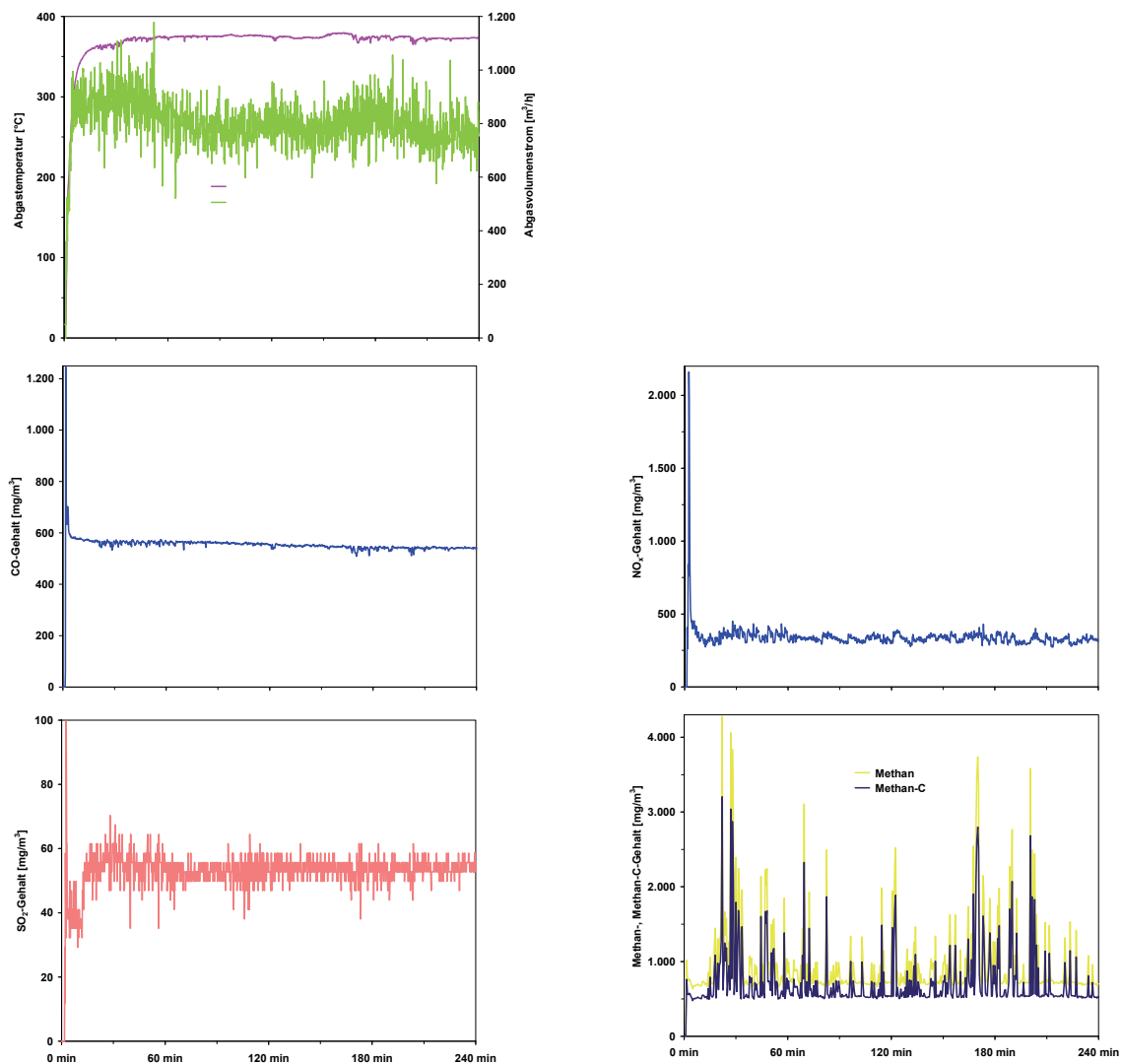


Abb. 3: Verlauf von Abgastemperatur, Volumenstrom, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden, Methan-Kohlenstoffgehalt und Methan im Abgas eines mit Deponiegas betriebenen Gasmotors (Otto-Motor).

Ladungswechsel sowie durch Schwingungen im Leitungssystem, sind für das Rauschen im Signalverlauf des Volumenstroms verantwortlich. Nadelförmige Kohlenstoffmonoxidspitzen im Abgas markieren die plötzlich in Gang gesetzten motorischen Verbrennungsprozesse infolge Selbstzündung (Dieselmotor) bzw. durch den Zündfunken (Otto-Motor). Der Startvorgang wird durch die impulsartig einsetzende Verbrennung gekennzeichnet, so dass im ersten Moment keine hinreichend vollständige Verbrennung erzielt werden kann. Dafür sind in erster Linie der noch relativ kalte Brennraum, die kalten Zylinderwände etc. verantwortlich.

Auffallend ist die kurze Einschwingphase sowohl der Kohlenstoffmonoxid- als auch der Stickstoffoxid-Konzentrationen, die beide nach wenigen Minuten auf einem quasistationären Niveau (Kohlenstoffmonoxid: 567 mg/m^3 , Stickstoffoxide: 350 mg/m^3) verharren. Bei dem Schwefeldioxid-Verlauf dauert der Einschwingvorgang bis zu dem Zeitpunkt, bis die Abgastemperatur 95 % ihres Endwerts erreicht hat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei dem eingesetzten Messverfahren (elektrochemische Messzelle) eine gewisse Querempfindlichkeit zu Kohlenstoffmonoxid und vor allem zu Stickstoffoxiden besteht (beide Parameter liegen unmittelbar nach Start des Motors bei über 1.000 mg/m^3).

Bei Methan ist ausgehend von einer Basislinie von 700 mg/m^3 der Verlauf durch eine Vielzahl in unregelmäßigen Zeitabständen auftretender Peaks (bis über 4.000 mg/m^3) gekennzeichnet. Die Führungsgröße für die Leistungsregelung des Gasmotors ist die gemessene Brennraumtemperatur. In Abhängigkeit der zulässigen Brennraumtemperatur wird der Zündzeitpunkt stets zylinderselektiv eingestellt, was sich auf den Ausbrand des Gasgemisches in den einzelnen Zylindern auswirkt. Dem daraus herrührenden Emissionsverhalten aufgrund der Motorsteuerung ist der infolge des Ladungswechsels auftretende Methanschupf überlagert.

Zusammenfassung. Nach Inbetriebnahme der beiden untersuchten Deponiegasmotoren (Zündstrahl-, Gasmotor) erreichten die Messgrößen innerhalb kurzer Zeit (quasi)stationäre Werte. Kohlenstoffmonoxid hielt auch bei dem Gasmotor, der über keinen Oxidationskatalysator verfügt, die Emissionsbegrenzung ein (Abstand zur Emissionsbegrenzung 5 %). Die Stickstoffoxidemissionen schöpften zu maximal 90 % die Emissionsbegrenzung aus. Die kontinuierlich gemessenen Schwefeldioxidgehalte sind aufgrund der Querempfindlichkeit des eingesetzten Messverfahrens gegenüber den Stickstoffoxiden nicht belastbar; dies belegen die diskontinuierlichen Schwefeloxidbestimmungen. Der Methan gehalt bewegt sich bei beiden Deponiegasmotoren auf einem relativ hohen Niveau um 1 g/m^3 , was einen Rückgang der Methankonzentration gegenüber dem Deponierohgas um 99,5 % bedeutet.

3.1.2.2 Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Das Messprogramm in Bezug auf die persistenten organischen Verbindungen im Abgas der Deponiegasverstromungsanlagen umfasste zwei Probenahmeabschnitte: Anfahren {bis 1 h (Deponie B) bzw. $1\frac{1}{2}$ h (Deponie A) ab Motorstart} sowie der sich daran anschließende Regelbetrieb (3 h). Bedingt durch die niedrigen Schadstoffkonzentrationen war der Probenahmeabschnitt Anfahren damit erheblich länger als der tatsächliche Anfahrvorgang der Deponiegasverstromungsanlagen (unter acht Minuten). In Abbildung 4 sind die Ergebnisse für den Gasmotor an der Deponie B dargestellt.

Die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffemissionen (PAK) werden sowohl im Anfahr- als auch im Regelbetrieb fast ausschließlich von den Komponenten Naphthalin und Fluoren (Verhältnis rd. 9 : 1) gebildet. Insgesamt sind die Konzentrationen auf sehr niedrigem Niveau (einstelliger $\mu\text{g/m}^3$ -Bereich), wobei im Anfahrbetrieb etwas höhere Gehalte zu verzeichnen sind.

Sowohl die polychlorierten Biphenyle (Indikator-PCB) als auch die coplanaren polychlorierten Biphenyle (WHO-PCB) bewegen sich auf sehr niedrigem Niveau. Gegenüber dem Anfahrbetrieb sind sie im Regelbetrieb um eine (Indikator-PCB) bzw. zwei Größenordnungen (WHO-PCB) niedriger. Während bei den Indikator-PCB alle sechs Kongenere bestimmt werden konnten, macht bei den WHO-PCB beim Anfahren das Kongener 126 über 90 % der gewichteten Summenkonzentration aus.

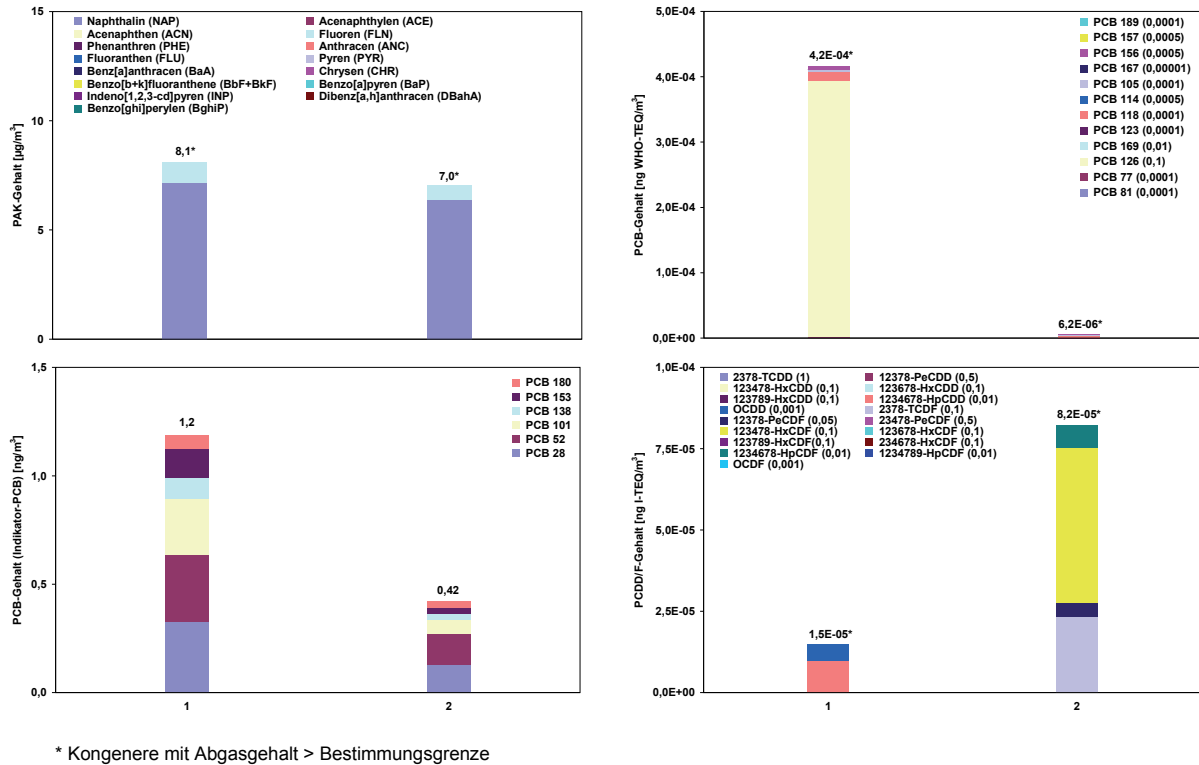


Abb. 4: **Gasmotor: Gegenüberstellung Anfahr- / Regelbetrieb** der Abgasgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB), coplanaren polychlorierten Biphenylen (WHO-PCB) und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen (PCDD/F) während des Anfahrens der Deponiegasverstromungsanlage; Probenahmephase 1 (ab Motorstart: 1 h), Probenahmephase 2 (im Anschluss daran: 3 h).

Die ebenfalls sehr geringen polychlorierten Dibenzo-p-dioxin- und -furangehalte (PCDD/F) sind während des Anfahrens um den Faktor 5 niedriger als im Regelbetrieb. Auffallend ist das unterschiedliche Kongenerenmuster: die Kongenere während des Anfahrens (zwei Dioxin-Kongenere) traten im Regelbetrieb (vier Furan-Kongenere) nicht auf. Dies deutet darauf hin, dass sich mit dem Regelbetrieb die Bildungsbedingungen für die PCDD/F ändern.

Das Abgas des Zündstrahlmotors der Deponiegasverstromungsanlage A weist gegenüber dem des Gas-Otto-Motors sowohl im Regel- (siehe Tabelle 2) als auch im Anfahrbetrieb (vgl. Abbildung 4 und 5) um zwei Größenordnungen höhere Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen auf. Während des Anfahrens (inkl. Einstellarbeiten des Servicetechnikers am Motor) liegt die Konzentration auf einen mehr als doppelt so hohem Niveau im Vergleich zum anschließenden Regelbetrieb.

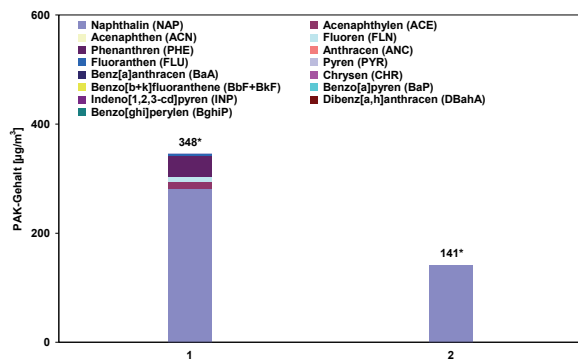


Abb. 5: **Zündstrahlmotor: Gegenüberstellung Anfahr- / Regelbetrieb** der Abgasgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) während des Anfahrens der Deponiegasverstromungsanlage; Probenahmephase 1 (ab Motorstart: 1½ h), Probenahmephase 2 (im Anschluss daran: 3 h).

Bei beiden Motorabgasen ist Naphthalin die dominierende Komponente (Anteil am PAK-

Gesamtgehalt: > 80 %); beim Regelbetrieb nach Start des Zündstrahlmotors ist es der einzig bestimmbare polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoff.

Die anderen im Abgas untersuchten persistenten organischen Schadstoffe sind beim Anfahren und anschließenden Regelbetrieb des Zündstrahlmotors auf ähnlichem (Indikator-PCB, coplanare PCB) bzw. deutlich niedrigerem (PCDD/F) Konzentrationsniveau wie beim Gas-Otto-Motor und zeigen auch ein vergleichbares Verhältnis. Daher wurde auf eine grafische Darstellung verzichtet.

Zusammenfassung. Im Abgas der zwei Deponiegasverstromungsanlagen sind die Konzentrationen an persistenten organischen Schadstoffen generell sehr gering (Ausnahme: PAK beim Zündstrahlmotor) und nehmen im anschließenden Regelbetrieb weiter ab (Ausnahme: PCDD/F beim Gas-Otto-Motor). Das Anfahren der Motoren stellt demnach hinsichtlich der organischen Schadstoffe gegenüber dem Regelbetrieb keinen emissionsrelevanten Betriebszustand dar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass während des Anfahrens hohe Schadstoffkonzentrationen kurzzeitig durchaus auftreten können, die sich aber nicht unbedingt in den Messwerten (Mittelwerte über die jeweilige Probenahmedauer; Probenahmedauer wesentlich größer als tatsächlicher Anfahrvorgang) widerspiegeln brauchen.

3.2 Palmöl-Blockheizkraftwerk

Der Einsatz fossiler Brennstoffe geht mit der Bildung von Kohlenstoffdioxid als nicht klimaneutralem Verbrennungsprodukt einher. Aus diesem Grund werden verstärkt Anstrengungen unternommen, andere kohlenstoffhaltige Rohstoffe (z. B. nachwachsende Rohstoffe wie Pflanzenöle) mit einer besseren Klimabilanz einzusetzen. Inwieweit diese Rohstoffe, die oftmals Grundstoffe für die Nahrungsmittelproduktion sind, nachhaltig produziert werden und deren Einsatz als Brennstoff ökologisch vorteilhaft ist, ist vielfach umstritten.

Bei dem Blockheizkraftwerk (BHKW) wird Palmöl als Brennstoff in einem an diesen Brennstoff angepassten Industriemotor (Dieselprinzip) zur Energieerzeugung (Strom, Wärme; Kraft-Wärme-Kopplung) verwendet. Das Palmöl stammt aus Malaysia und wird auf dem See- und Landweg nach Europa an die Anlage geliefert. Um Palmöl als Flüssigkeit (Schmelzpunkt: 35 °C – 39 °C) zu transportieren, sind beheizte Schiffs- und Fahrzeugtanks erforderlich.

Das untersuchte Blockheizkraftwerk ist immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig. Die Feuerungswärmeleistung des Verbrennungsmotors von ca. 350 kW liegt unter den in der 4. BImSchV (Anhang Nr. 1.2 c und Nr. 1.4 b, bb) [12] angeführten Leistungsgrenzen von 20 MW bzw. 1 MW. Die Abbildung 6 gibt als Blockschaltbild den Anlagenaufbau wieder.

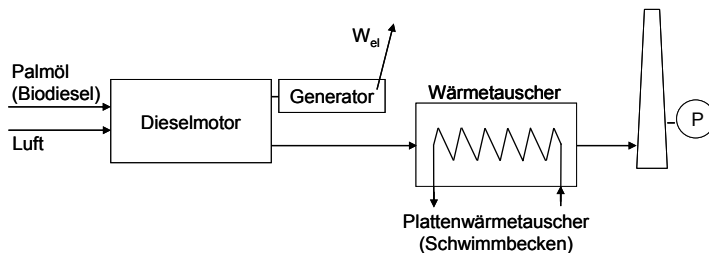


Abb. 6: Schematische Darstellung des mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks (BHKW) mit Probenahmestelle P.

Das BHKW befindet sich auf dem Gelände eines kommunalen Hallen- und Freibads. Während der Badesaison ist das BHKW rund um die Uhr in Betrieb. Wesentliche Anlagenkomponenten sind das Brennstofflager {zwei Biodiesel- (à 2.000 l), ein Palmöltank (37.700 l)}, der 6-Zylinder-Viertakt-Reihenmotor mit Direkteinspritzung, Abgasturbolader und Ladeluftkühlung, der Rohrbündel-Abgaswärmetauscher für die Wärmeauskopplung, der Generator für die Stromerzeugung sowie diverse Nebeneinrichtungen (z. B. Wärmetauscher für die Tank- und Brennstoffvorwärmung). Das vorgewärmte Palmöl wird in einem Ölfiler von Schwebstoffen, Verunreinigungen etc. für eine saubere motorische Verbrennung befreit. Der Motor ist mechanisch an den Synchrongenerator gekoppelt. Die erzeugte elektrische Energie wird in das öffentliche Stromversorgungsnetz eingespeist.

Mit der Enthalpie der heißen Verbrennungsabgase wird zunächst der Abgasturbolader angetrieben; danach geht im Abgaswärmetauscher die Wärme an den Wasserkreislauf für die Beheizung der Schwimmbecken über, der Rest wird über den Kamin an die Umgebung abgeführt. Der auf Palmöl umgerüstete Diesel-Motor (Baujahr 2007) verfügt weder über einen Katalysator noch über einen Partikelfilter. Zur Verbesserung des Foulingverhaltens des Abgaswärmetauschers (kohlenstoffhaltige Beläge) werden alle 25 min die Rohrbündel abgasseitig durch Eindüsung von Wasser abgereinigt.

3.2.1 Regelbetrieb

In Tabelle 3 sind wichtige Daten der Verbrennungseinheit des Blockheizkraftwerks dargestellt. Die Nutzleistung der Anlage beträgt bei Volllast elektrisch 150 kW_{el} und thermisch 140 kW_{th}. Damit ergibt sich ein energetischer Bruttowirkungsgrad von 80 %.

Tab. 3: Wesentliche Kenndaten (Motor / Generator) des mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks.

Auslegungsdaten Motor / Generator	Blockheizkraftwerk
Motortyp	Dieselmotor: R6-Zylinder 4-Takt, 12 l Hubraum, Abgasturbolader, Ladeluftkühlung
Baujahr	2007
Betriebsstunden	ca. 4.530
Feuerungswärmeleistung	ca. 350 kW
Leistungseinstellung – thermisch	130 kW _{th}
– elektrisch	150 kW _{el} , 1.500 min ⁻¹ , 50 Hz
Brennstoffe	Palmöl, Biodiesel
Mittlerer Brennstoffdurchsatz	ca. 40 l/h
Letzte Wartung	3 Betriebswochen vor der Untersuchung

Tab. 4: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchung des mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks.

Abgasrandparameter / -konzentrationen	Blockheizkraftwerk	
Volumenstrom [m ³ /h]	514 ¹⁾	–
Temperatur [°C]	213	–
Sauerstoff [Vol.-%]	10,7 ¹⁾	–
Kohlenstoffdioxid [Vol.-%]	7,8 ¹⁾	–
Kohlenstoffmonoxid [mg/m ³]	301 ¹⁾	470 ²⁾
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid [mg/m ³]	1.687 ¹⁾	2.631 ²⁾
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff [mg/m ³]	20,9 ¹⁾	33,4 ²⁾
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff [mg/m ³]	< 0,33 ¹⁾	< 0,51 ²⁾
Fluor und seine gasförmigen Verbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff [mg/m ³]	< 0,17 ¹⁾	< 0,26 ²⁾
Schwefeloxide, angegeben als Schwefeldioxid [mg/m ³]	0,4 ¹⁾	0,6 ²⁾
Gesamtstaub [mg/m ³]	46,0 ¹⁾	70,8 ²⁾
Formaldehyd [mg/m ³]	3,1 ¹⁾	4,8 ²⁾
Benzol [mg/m ³]	0,29 ¹⁾	0,45 ²⁾
Phenol [mg/m ³]	< 0,002 ¹⁾	< 0,003 ²⁾
1,3-Butadien [mg/m ³]	< 0,0002 ¹⁾	< 0,0003 ²⁾
Σ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [µg/m ³]	19,5 ¹⁾	30,3 ²⁾
Σ Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) [ng/m ³]	0,313 ¹⁾	0,488 ²⁾
Σ Coplanare polychlorierte Biphenyle [pg WHO-TEQ/m ³]	0,23 ¹⁾	0,37 ²⁾
Σ Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane [ng I-TEQ/m ³]	2,7×10 ^{-3 1)}	4,3×10 ^{-3 2)}

¹⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Betriebssauerstoffgehalt

²⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Bezugssauerstoffgehalt (5 Vol.-%)

Nach dem Anfahrvorgang und am darauffolgenden Tag wurde der Regelbetrieb insgesamt neun Stunden untersucht. In Tabelle 4 sind die erzielten Messwerte (Mittelwerte) aufgelistet. Da es sich um keine immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtige Anlage handelt, entfällt der Vergleich mit Emissionsbegrenzungen.

Trotz des relativ geringen Abgasvolumenstroms an die Umgebung fallen die erhöhten Konzentrationswerte und relativ hohen Massenströme insbesondere für Stickstoffoxide und Gesamtstaub bei einer motorischen Verbrennung von Pflanzenöl nach dem Dieselprinzip auf. Die Emissionen an Stickstoffoxiden könnten durch den Einsatz von SCR-Katalysatoren, staubförmige Emissionen durch den Einsatz von Partikelfiltern (Sekundärmaßnahme) bzw. ggf. durch Primärmaßnahmen (neue / bessere Einspritzdüsen) gemindert werden. Die Belastung des Abgases mit organischen Schadstoffen (insbesondere geruchsintensive und kanzerogene Stoffe) kann durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren deutlich gemindert werden.

3.2.2 Anfahrbetrieb

Alle 250 Betriebsstunden sind Wartungsarbeiten am Motor erforderlich (Motorenöl- und Ölfilterwechsel). Umfassendere Wartungsarbeiten (z. B. Einspritzdüsenwechsel) schreibt der Anlagenhersteller alle 1.000 Betriebsstunden vor. Für diese Servicearbeiten wird das Blockheizkraftwerk abgeschaltet.

Der Betrieb des Motors mit Palmöl wird vor dem Abfahren auf Biodiesel umgestellt, ebenso wird der Motor mit Biodiesel angefahren. Damit ist sichergestellt, dass das vorgewärmte Palmöl stets in einen vorgewärmten Motorblock eintritt und an keiner Stelle in der Leitung bis hin zur Pumpe und Einspritzdüse ausflocken bzw. erstarren kann. Das Gleiche gilt für den Abfahrvorgang.

Der Start beginnt mit der Erhöhung der Brennraumtemperaturen durch die Glühkerzen. Nach wenigen Sekunden ist die erforderliche Temperatur erreicht. Mit Betätigung des Anlassers zündet das Brennstoff / Luft-Gemisch von selbst und der Dieselmotor läuft von seiner Leerlaufdrehzahl in den Lastpunkt mit einer Drehzahl von 1.500 min^{-1} . Sobald die Synchronisation des Generators mit dem externen Stromversorgungsnetz erfolgt ist, wird dieser zur Stromerzeugung zugeschaltet. Die Generatorleistung wird in drei Stufen ($20 \text{ kW}_{\text{el}}$, $50 \text{ kW}_{\text{el}}$, $100 \text{ kW}_{\text{el}}$) auf die Sollleistung von $150 \text{ kW}_{\text{el}}$ erhöht.

Die manuelle Umstellung vom Brennstoff Biodiesel auf Palmöl erfolgt nach Erreichen der Sollleistung. Im Palmölbetrieb wird ab einer Abgastemperatur von $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (nach dem Abgasturbolader) der Abgaswärmetauscher zugeschaltet. Das Anfahrschema ist in Abbildung 7 dargestellt.

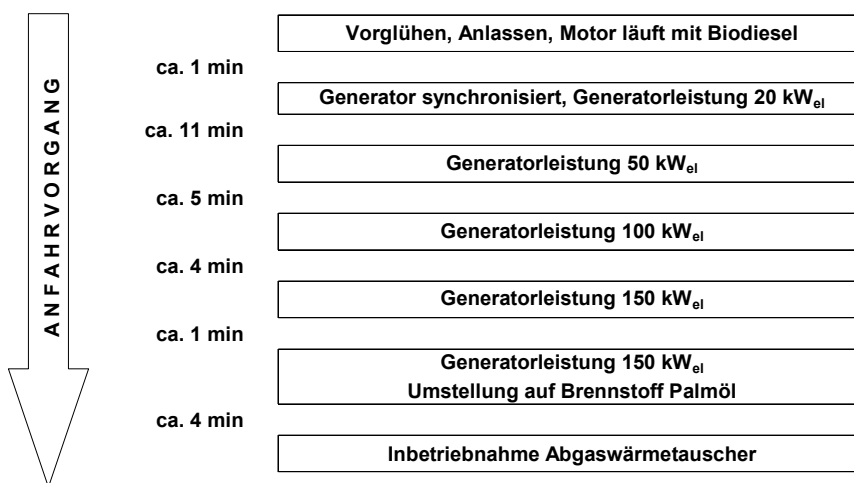


Abb. 7: Zeitlicher Ablauf des Anfahrvorgangs des mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks.

3.2.2.1 Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Nach einem 2½-monatigen Anlagenstillstand während der Winterpause begann die Wiederinbetriebnahme des Hallen- und Freibads mit dem Anfahren des Blockheizkraftwerks.

Aufgrund einer losen Kraftstoffleitung mit Austritt von Biodiesel wurde der Startvorgang abgebrochen. Unmittelbar nach deren Reparatur konnte der Motor erfolgreich gestartet werden. Danach lief der Motor rd. 18 Minuten mit Biodiesel im Generatorbetrieb. Wegen eines Kühlwassermangels ging der Motor bei einer Leistungseinstellung von 100 kW_{el} aus. Nach Entlüftung und Befüllung des Kühlwassersystems wurde der Motor zum dritten Mal gestartet. Im Weiteren folgte die Leistungssteigerung auf den Sollwert von 150 kW_{el}, die Umstellung auf Palmölbetrieb und die Zuschaltung des Abgaswärmetauschers. Die Zeitpunkte des Motorstarts und -stopps sind in Abbildung 8 in allen Messwertverläufen ersichtlich.

Bei jedem Motorstart erhöht sich durch die Drehung der Kurbelwelle durch den Anlasser schlagartig der Abgasvolumenstrom. Im Leerlauf beträgt der Volumenstrom 300 m³/h bis 350 m³/h. Mit der Erhöhung der Generator- und damit der Motorleistung von 20 kW_{el} auf 150 kW_{el} nimmt der Abgasvolumenstrom – ungeachtet der zwei Motorstopps – sukzessive auf einen Wert von durchschnittlich 550 m³/h zu.

Der Verlauf der Abgastemperatur am Kamin spiegelt die mehrmaligen Startversuche wider. Nach dem dritten Motorstart geht der Kurvenverlauf in einen durch die periodische Abreinigung des Rohrbündelwärmetauschers hervorgerufenen sägezahnartigen Grenzyklus mit einer Maximaltemperatur von 189 °C über. Die Wassereindüsung in den Abgaswärmetauscher führt jeweils zu Temperaturrückgängen um 27 °C.

Die drei Motorstarts sind durch sprunghafte Anstiege der Kohlenstoffmonoxid-Konzentration gekenn-

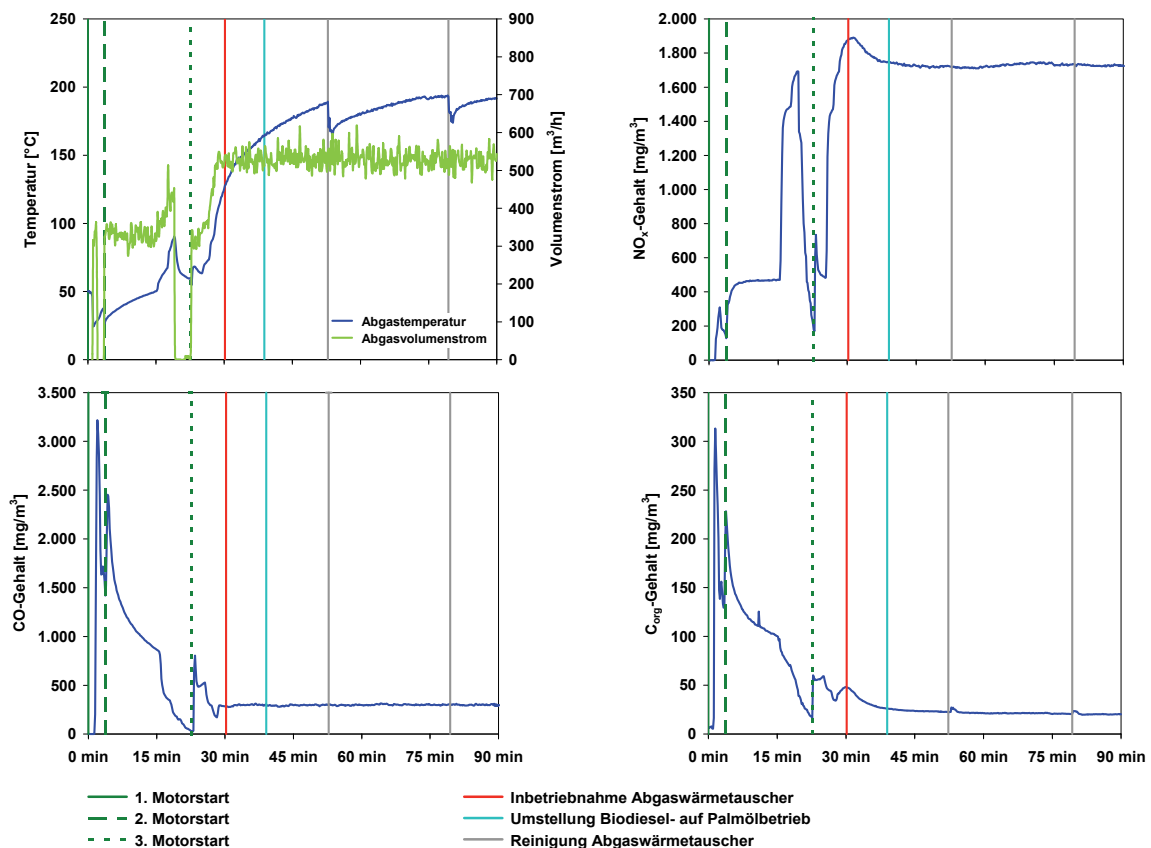


Abb. 8: Verlauf von Abgastemperatur, Volumenstrom, Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxiden und organischem Gesamtkohlenstoff im Abgas eines mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks.

zeichnet (1. Motorstart: 3.220 mg/m³, 2. Motorstart: 2.450 mg/m³, 3. Motorstart: 805 mg/m³). Je höher die Motortemperatur ist, desto geringere Maxima werden bei den Startvorgängen erzielt, ein Indiz für die unvollständige Oxidation des Brennstoffs im kalten Zylinder (Bildung von Kohlenstoffmonoxid infolge unzureichender, „kalter“ Verbrennung). Im (quasi)stationären Betrieb zeigt das Kohlenstoffmonoxid einen konstanten Verlauf mit einem Gehalt von 300 mg/m³.

Da Biodiesel und Palmöl nur in Spuren (< 0,01 %) Schwefel enthalten, entsteht bei der Verbrennung dieser Brennstoffe kaum Schwefeldioxid (vgl. Tabelle 4).

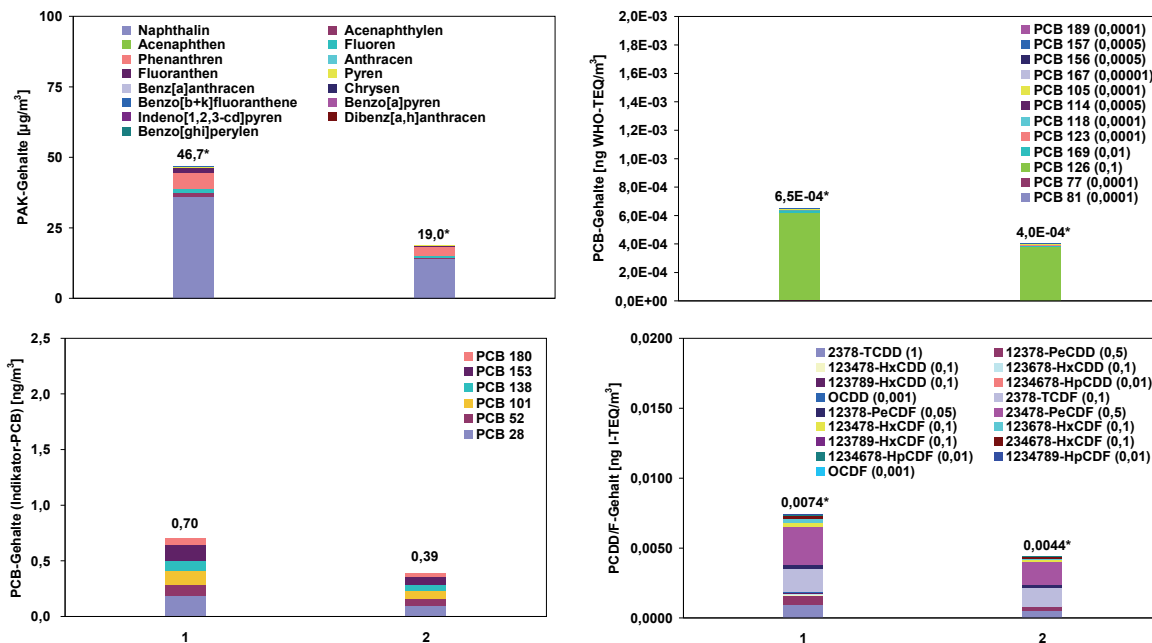
Die mehrmaligen Motorstarts führen unmittelbar zu einem raschen Anstieg der Stickstoffoxid-Konzentrationen. Tendenziell fällt der Konzentrationssprung nach dem Motorstart umso höher aus, je höher der Motor beim Startvorgang vorgewärmt und damit die Brennraumtemperatur ist. Zwischen dem zweiten Motorstart bis zum (automatischen) Motorstopp infolge Kühlwassermangels bewegen sich die Stickstoffoxide auf einem stabilen Niveau von etwa 470 mg/m³. Durch die Generator- und damit Motorlaststeigerung von 20 kW_{el} auf 50 kW_{el} erhöhen sie sich bis auf einen Wert von 1.690 mg/m³. Nach dem dritten Motorstart und der Umstellung von Biodiesel- auf Palmölbetrieb sowie der Inbetriebnahme des Abgaswärmetauschers erreicht das Stickstoffoxid-Konzentrationsniveau einen auch im weiteren Verlauf konstanten Wert von 1.730 mg/m³ (bzw. 2.720 mg/m³ bezogen auf 5 Vol.-% Sauerstoffgehalt).

Die Konzentration an organischem Gesamtkohlenstoff korreliert in etwa mit den Kohlenstoffmonoxid-Gehalten. Ausgehend von einem sehr niedrigen Niveau erreichen die Kohlenstoffemissionen beim ersten Motorstart durch die in den einzelnen Zylindern plötzlich einsetzenden Verbrennungsvorgänge einen Maximalwert von 313 mg/m³; dieser Wert kennzeichnet den Beginn der Oxidation des Brennstoffs. Durch die schnelle Ausbreitung der Flammenfront in den Zylindern fällt die Konzentration sofort wieder ab. Ein weiterer Rückgang wird durch den zweiten Startvorgang, der einen Konzentrationspeak von 228 mg/m³ hervorruft, unterbrochen. Bis zum Motorstopp infolge Kühlwassermangels reduziert sich im Teillastbetrieb der Gehalt an organischem Gesamtkohlenstoff bis auf 20 mg/m³. Erst nach dem dritten Motorstart, der Umstellung auf Palmölbetrieb und der Inbetriebnahme des Abgaswärmetauschers erreicht der organische Gesamtkohlenstoff ein stabiles Niveau von etwa 20 mg/m³.

Zusammenfassung. Nach der Inbetriebnahme des Dieselmotors erreichen die Messgrößen – unterbrochen von zwei Betriebsstörungen wegen einer Leckage in der Treibstoffleitung sowie eines zu geringen Kühlwasserstroms, die jeweils einen Neustart erforderten – innerhalb kurzer Zeit die (quasi)stationären Werte. Den Beginn der Treibstoffverbrennung bei jedem Motorstart kennzeichnen emissionsmäßig nicht relevante Peaks im Verlauf der Kohlenstoffmonoxid- als auch der organischen Gesamtkohlenstoff-Konzentration; diese gehen innerhalb kürzester Zeit zurück. Demgegenüber verhalten sich die Stickstoffoxide gegenläufig. Je höher die Temperatur in den Brennräumen der Zylinder ist, desto mehr Stickstoffoxide bilden sich aus dem mit der Verbrennungsluft zugeführten Stickstoff. Im (quasi)stationären Zustand wird ein Konzentrationsniveau von über 1.700 mg/m³ (bei Betriebs-sauerstoffgehalt) erreicht. Bezüglich Stickstoffoxiden scheinen die möglichen Primärmaßnahmen (z. B. Änderungen des Luft/Brennstoff-Verhältnisses) für einen wirkungsgrad-optimierten Betrieb weitgehend ausgeschöpft. Weitergehende NO_x-Minderungen wären nur durch Sekundärmaßnahmen (z. B. selektive katalytische Stickstoffreduktion) zu erzielen.

3.2.2.2 Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Das Untersuchungsprogramm beinhaltete die Probenahme im Abgas auf persistente organische Spurenstoffe {polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (Indikator- und WHO-PCB) und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane (PCDD/F)} während des Anfahrvorgangs. Bedingt durch die niedrigen Schadstoffkonzentrationen erstreckte sich die Probenahme des Anfahrvorgangs über 1½ Stunden, beginnend mit dem ersten Motorstart, und umfasste das Erreichen einer (quasi)konstanten Abgastemperatur am Kamin sowie zwei Abreinigungsphasen des Abgaswärmetauschers. Damit bilden sich in dieser über die Anfahrdauer „integrierenden“ Gasprobe sämtliche



* Kongenere, Verbindungen mit Abgasgehalt > Bestimmungsgrenze

Abb. 9: Gegenüberstellung Anfahr- / Regelbetrieb der Abgasgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB), coplanaren polychlorierten Biphenylen (WHO-PCB) und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen (PCDD/F) während des Anfahrens des mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerks; Probenahmephase 1 (ab Motorstart: 1½ h), Probenahmephase 2 (im Anschluss daran: 3 h).

Motorstarts, die Inbetriebnahme des Abgaswärmetauschers, die Umstellung von Biodiesel- auf Palmölbetrieb sowie die ersten beiden Reinigungsphasen des Abgaswärmetauschers ab. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der beiden Probenahmeabschnitte Anfahrbetrieb und Regelbetrieb nach dem Anfahrvorgang dargestellt.

Bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen sind sowohl im Anfahr- als auch im Regelbetrieb die gleichen Verteilungsmuster festzustellen. Mit einem Anteil von ca. 75 % bildet Naphthalin die Hauptkomponente. Höher siedende Komponenten ab Benzo[a]pyren treten nicht auf. Die insgesamt niedrigen Konzentrationen liegen im zweistelligen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich und sind im Anfahrbetrieb um das Doppelte höher als im Regelbetrieb.

Die Abgasgehalte an polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB) im dreistelligen pg/m^3 -Bereich sind äußerst gering. Im Regelbetrieb sind sie fast um die Hälfte niedriger als im Anfahrbetrieb. Analoge Aussagen gelten für die coplanaren polychlorierten Biphenyle (WHO-PCB), deren Konzentration sich im dreistelligen fg/m^3 -Bereich bewegt. Den Hauptbeitrag mit jeweils über 93 % liefert das Kongener PCB 126.

Auch die Gehalte an polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und -furanen bewegen sich auf einem sehr niedrigen Konzentrationsniveau (einstelliger pg/m^3 -Bereich). Die Kongenerenmuster des Anfahr- und Regelbetriebs ähneln sich, Hauptkongenere sind mit jeweils 20 % bis 40 % Anteil das 2,3,7,8-TCDF und das 2,3,4,7,8-PeCDF. Im Regelbetrieb erreicht die PCDD/F-Konzentration rd. 60 % des Werts des Anfahrbetriebs.

Zusammenfassung. Die Konzentrationen an persistenten organischen Schadstoffen, insbesondere PAK und PCB, im Anfahr- und Regelbetrieb sind äußerst gering und damit als nicht emissionsrelevant zu bewerten. Dies deutet einerseits (PCB, PCDD/F) auf chlorarme Brennstoffe (Biodiesel, Palmöl), andererseits (PAK) auf einen relativ guten Ausbrand hin.

3.3 Einäscherungsanlagen

Bei den untersuchten Anlagen handelt es sich um zwei nahezu baugleiche Einäscherungsanlagen desselben Herstellers. Die Anlagen sind auf eine Kapazität von acht Einäscherungen pro Tag (bei Einschichtbetrieb) ausgelegt und unterliegen der 27. BImSchV [10].

Die Einäscherung erfolgt in einem Etagenofen. Der Ofen besteht aus drei übereinander liegenden Kammern (Haupt-, Mineralisierungsbrennkammer, Aschekühlung) sowie einer Nachbrennkammer für die Abgase aus der Haupt- und Mineralisierungsbrennkammer. Zum Erreichen und Halten der jeweiligen Betriebs- bzw. geforderten Mindesttemperaturen sowie zur Gewährleistung eines guten Ausbrands sind die Haupt-, Mineralisierungs- und Nachbrennkammer mit jeweils einem Erdgasbrenner ausgestattet.

Die Kenndaten der beiden Anlagen – vgl. Tabelle 5 – unterscheiden sich im Wesentlichen in der installierten Brennerleistung. Gegenüber der Anlage A liegen an der Anlage B die Brennerleistung um fast 80 % und der durchschnittliche spezifische Gasverbrauch pro Einäscherung um 35 % höher. Da die Förderleistungen der Saugzugventilatoren um 10 % differieren, bedingen die unterschiedlichen Brennerleistungen zwangsläufig für jede Anlage eine andere Grundeinstellung (Voll-, Teillast) der nichtlinearen Regelung (Zwei-Punkt-Schalter).

Die Abbildung 10 zeigt das Verfahrensfliessbild der Einäscherungsanlagen. Die Einäscherung beginnt mit dem Einfahren des Sargs mit dem menschlichen Leichnam in die Hauptbrennkammer (Mindesttemperatur: 650 °C); durch die in der Muffel des Ofens gespeicherte Energie entzündet er sich von selbst. Damit keine Verbrennungsgase nach außen dringen, wird während des Einfahrens und Schließens der Ofentür das Portal abgesaugt (Hochfahren der Saugzugleistung). Nach etwa 1 – 1½ Stunden ist die Einäscherung der sterblichen Überreste in der Hauptbrennkammer abgeschlossen: Die Verbrennungsrückstände gelangen in die Mineralisierungsbrennkammer und die nächste Einäscherung kann beginnen. Ein zugeschalteter Gasbrenner dient der vollständigen Mineralisierung der Verbrennungsrückstände (ca. 50 Minuten). Anschließend kühlt die Asche in der darunter liegenden Kammer ab und fällt schließlich in den Aschekasten.

Eine Einäscherung dauert insgesamt ca. drei Stunden. In der Regel sind Haupt-, Mineralisierungsbrennkammer und Aschekühlung mit Verbrennungsrückständen belegt, d. h., in dem Etagenofen laufen gleichzeitig drei Einäscherungen zeitversetzt überlappend ab.

Die Verbrennungsabgase aus der Haupt- und Mineralisierungsbrennkammer werden in der Nachbrennkammer (Mindesttemperatur: 850 °C, Verweilzeit: ca. 2 s) vollständig thermisch oxidiert. Danach werden die heißen Abgase in einem zweistufigen Wärmetauscher auf 105 °C bis 150 °C abgekühlt.

Tab. 5: Wesentliche Kenndaten der beiden Einäscherungsanlagen.

Auslegungsdaten	Einäscherungsanlage A	Einäscherungsanlage B
Kapazität	8 Einäscherungen / Tag (Einschichtbetrieb)	8 Einäscherungen / Tag (Einschichtbetrieb)
Brennerleistung		
Hauptbrenner	300 kW	450 kW
Mineralisierungsbrenner	80 kW	320 kW
Nachbrenner	300 kW	450 kW
Brennstoff	Erdgas H	Erdgas H
Durchschnittlicher Gasverbrauch pro Einäscherung	17 m ³	23 m ³
Förderleistung Saugzug	6.000 m ³ /h	5.400 m ³ /h

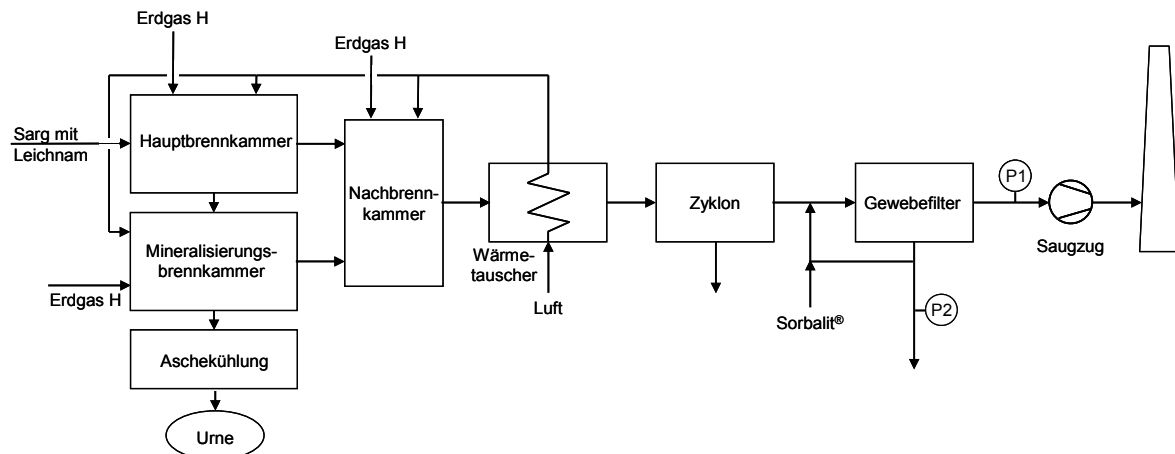


Abb. 10: Verfahrensfliessbild der Einäscherungsanlagen mit Probenahmestelle P1 (vor dem Abgasventilator für die Abgasuntersuchungen) und P2 (ausgetragener Gewebefilterstaub).

Ein Teil der übertragenen Wärmeenergie wird zur Vorwärmung der angesaugten Verbrennungsluft genutzt, der Rest wird an die Umgebung abgeführt. Nach einer mehrstufigen Reinigung (Vorentstaubung mittels Zyklon; Flugstromverfahren: Kugelrotorreaktor mit Gewebefilter) wird das Abgas von einem Abgasventilator über den Kamin in die Umgebung abgeführt.

3.3.1 Regelbetrieb

In Tabelle 6 sind die durchschnittlichen Abgaswerte für den Regelbetrieb der untersuchten Einäscherungsanlagen zusammengestellt. Alle Schadstoffkonzentrationen sind auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-% bezogen. Bei beiden Anlagen lag die Sauerstoffkonzentration im Abgas über 11 Vol.-%, so dass sich die bezogenen gegenüber den gemessenen Werten erhöhten.

Der Etagenofen der Einäscherungsanlage A wird mit deutlich mehr Verbrennungsluft (kleineres Brennstoff/Luft-Verhältnis) betrieben als der der Anlage B, erkennbar an einem größeren Abgasvolumen und insbesondere einem höheren Sauerstoffgehalt (16 Vol.-%) im Abgas. Wegen der durch die Feuerraumabkühlung schlechteren Verbrennungsbedingungen liegen die Abgaswerte der limitierten Parameter Kohlenstoffmonoxid, organischer Gesamtkohlenstoff und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane nach Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% bei der Anlage A über denen der Anlage B. Dies trifft auch für die nicht limitierten Messgrößen (mit Ausnahme der coplanaren polychlorierten Biphenyle) zu, wenn man den Verdünnungseffekt aufgrund des kleineren Brennstoff/Luft-Verhältnisses durch Bezugsrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt berücksichtigt.

Insgesamt liegen bei beiden Anlagen die Schadstoffkonzentrationen auf teilweise sehr niedrigem Niveau. Lediglich der Kohlenstoffmonoxidgehalt im Abgas der Anlage A (durchschnittlich bei knapp 60 % des Grenzwerts [10]) und der Stickstoffoxidgehalt an beiden Anlagen zeigen erhöhte Werte: an den insgesamt sechs Messtagen (drei Messtage an jeder Einäscherungsanlage) wurde der Kohlenstoffmonoxid-Grenzwert von 50 mg/m^3 dreimal (Anlage A: 67 mg/m^3 , 224 mg/m^3 ; Anlage B: 51 mg/m^3) überschritten; zu den Ursachen siehe Ausführungen in Abschnitt 3.2.2.1.

Da an beiden Einäscherungsanlagen eine Untersuchung des Rohgases vor der Abgasreinigung nicht möglich war (keine geeigneten Probenahmemöglichkeiten), wurde die Abscheideleistung anhand der Analysen des beladenen Gewebefilterstaubs und des Sorptionsmittels (Blindprobe) auf Quecksilber und organische Spurenschadstoffe beurteilt. Im Gewebefilterstaub wurden eine deutliche Aufkonzentrierung und vergleichsweise hohe Schadstoffgehalte ermittelt (Quecksilber: zwischen 430 mg/kg und 585 mg/kg ; polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe: zwischen 83 mg/kg und 359 mg/kg ; Indikator-PCB: zwischen $1,96 \text{ µg/kg}$ und $7,05 \text{ µg/kg}$; coplanare polychlorierte Biphenyle: zwischen 13 ng

Tab. 6: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den beiden Einäscherungsanlagen im Vergleich zu den einzuhaltenden Grenzwerten.

Abgasrandparameter / -konzentrationen	Einäscherungs- anlage A	Einäscherungs- anlage B	Grenzwert [10]
Volumenstrom [m ³ /h]	1.328 ¹⁾	986 ¹⁾	–
Temperatur [°C]	106	96	–
Sauerstoff [Vol.-%]	15,9 ¹⁾	12,3 ¹⁾	–
Kohlenstoffdioxid [Vol.-%]	3,9 ¹⁾	6,8 ¹⁾	–
Kohlenstoffmonoxid [mg/m ³]	29,0 ²⁾	8,5 ²⁾	50
Schwefeldioxid [mg/m ³]	24,9 ²⁾	6,7 ²⁾	–
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid [mg/m ³]	278 ²⁾	246 ²⁾	–
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff [mg/m ³]	2,7 ²⁾	1,1 ²⁾	20
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff [mg/m ³]	0,69 ²⁾	0,22 ²⁾	–
Fluor und seine gasförmigen Verbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff [mg/m ³]	0,12 ²⁾	0,08 ²⁾	–
Quecksilber (filtergängig) [µg/m ³]	2,2 ²⁾	0,7 ²⁾	–
Gesamtstaub [mg/m ³]	0,61 ²⁾	0,70 ²⁾	10
Σ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [µg/m ³]	0,37 ²⁾	0,29 ²⁾	–
Σ Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) [ng/m ³]	0,53 ²⁾	0,51 ²⁾	–
Σ Coplanare polychlorierte Biphenyle [pg WHO-TEQ/m ³]	0,014 ²⁾	0,026 ²⁾	–
Σ Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane [ng I-TEQ/m ³]	0,60×10 ^{-3 2)}	0,52×10 ^{-3 2)}	0,1

¹⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Betriebssauerstoffgehalt

²⁾ Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Bezugssauerstoffgehalt (11 Vol.-%)

WHO-TEQ/kg und 381 ng WHO-TEQ/kg; polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane: zwischen 1,6 µg I-TEQ/kg und 28 µg I-TEQ/kg). Mit diesen Werten sind die Gewebefilterstäube um eine bis drei Größenordnungen höher belastet als Gewebefilterstäube aus Müllverbrennungsanlagen [11] {Ausnahmen: Indikator-PCB, PCDD/F (eine Anlage): vergleichbare Gehalte}. Die Gehalte sind zum einen ein Indiz für eine hohe Rohgasbeladung, zum anderen für die effiziente Abgasreinigung, die zu den niedrigen Abgaskonzentrationen führt.

3.3.2 Anfahrvorgang

Der Einschichtbetrieb (5-Tage-Woche) der beiden Einäscherungsanlagen erfordert an jedem Arbeitstag ein Vorheizen des Etagenofens auf Betriebstemperatur, um mit den Einäscherungen beginnen zu können.

Über Nacht bzw. über das Wochenende kühlt sich der Etagenofen aufgrund seines hohen Wärmespeichervermögens auf eine Temperatur von ca. 600 °C bzw. 400 °C ab. Nach dem Vorbelüften (ca. 2 min) wird der Anfahrvorgang durch die Inbetriebnahme der erdgasbetriebenen Haupt-, Mineralisierungs- und Nachbrenner gestartet. Das erforderliche Temperaturniveau zur Durchführung der Einäscherung beträgt in der Hauptbrennkammer 650 °C bzw. in der Nachbrennkammer 850 °C (10-Minuten-Mittelwert). Nach einem Wochenende im Stillstand dauert der Aufheizvorgang zwischen 0,75 h

und 1,5 h, nach einem Stillstand über Nacht rund 0,5 h bis 0,75 h.

Untersucht wurde der Anfahrbetrieb zu Wochenbeginn (längerer Anfahrbetrieb, da Anlage stärker abgekühlt). Der Anfahrvorgang wurde als beendet betrachtet, sobald die Hauptverbrennung (ca. 1,25 h) der ersten Einäscherung abgeschlossen ist.

3.3.2.1 Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

In Abbildung 11 sind die Kurvenverläufe der kontinuierlich erfassten Messgrößen während des Anfahrvorgangs und danach im Regelbetrieb dargestellt.

Der reine Erdgasbrennerbetrieb zum Vorheizen der drei Brennkammern zeigt sich in einem Peak von Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff beim Start der Brenner sowie in einem schnellen Anstieg auf ein relativ konstantes Niveau für die Stickstoffoxidegehalte (und den Volumenstrom).

Mit Beginn des Chargenprozesses ändern sich die Verbrennungsbedingungen und damit die Abgasverhältnisse schlagartig und grundlegend.

Der Chargenprozess mit den Ereignissen Einfahren des Sarges (Falschlufteinbruch durch die geöffnete Ofentür bei erhöhtem Unterdruck im Etagenofen, Portalabsaugung) und Sargaufbruch (plötzliche Verfügbarkeit leicht brennbaren Materials; i. d. R. zwischen 5 und 15 Minuten nach Ofenbeschickung) stellt hohe Anforderungen an die Steuerungs- / Regelungstechnik, vor allem der Verbrennungsluftzuführung; bei Bedarf werden die Zuluftklappen durch das Bedienpersonal auch manuell eingestellt. Die Unterschiede bezüglich der sterblichen Überreste, Totenkleidung, Sargmaterial, -ausstattung und der geringer werdende Sauerstoffbedarf im Verlauf einer Einäscherung (aufgrund abnehmender brennbarer Masse) stellen zusätzliche Einflussgrößen für das Verbrennungssystem dar. Dadurch wird ein gleichförmiger Verbrennungsablauf ohne zufällige Störungen erschwert.

Die erwähnten Ereignisse Ofenbeschickung und Sargaufbruch schlagen sich bei den meisten kontinuierlichen Messgrößen (z. B. Volumenstrom, Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide) in einem unstetigen Kurvenverlauf nieder.

So erhöht sich der Volumenstrom bei jedem Einfahren eines Sarges aufgrund der kurzzeitigen Inbetriebnahme der Portalabsaugung auf über das Doppelte. Im Verlauf einer Einäscherung sinkt er mit abnehmender Verbrennungsintensität bis auf Werte um 1.000 m³/h. Zeitverzögert steigt die Abgastemperatur von der Ofenbeschickung bis zum / kurz nach Sargaufbruch an, um dann bei abnehmender Verbrennungsintensität wieder abzusinken. Die Verläufe der Gehalte an Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff zeigen scharfe Peaks bis in den einstelligen g/m³-Bereich, insbesondere beim Einfahren des Sarges und Sargaufbruch; diese Peaks führten zu den bereits erwähnten Grenzwertüberschreitungen für Kohlenstoffmonoxid. Ansonsten bleiben die Gehalte auf niedrigem Niveau.

Ein unruhiger Konzentrationsverlauf kennzeichnet das Verhalten der Stickstoffoxide während der Einäscherungen. Zu Beginn und am Ende jeder Einäscherung befinden sich die Gehalte auf vergleichsweise niedrigem Niveau, das Maximum fällt oftmals mit dem Sargaufbruch zusammen.

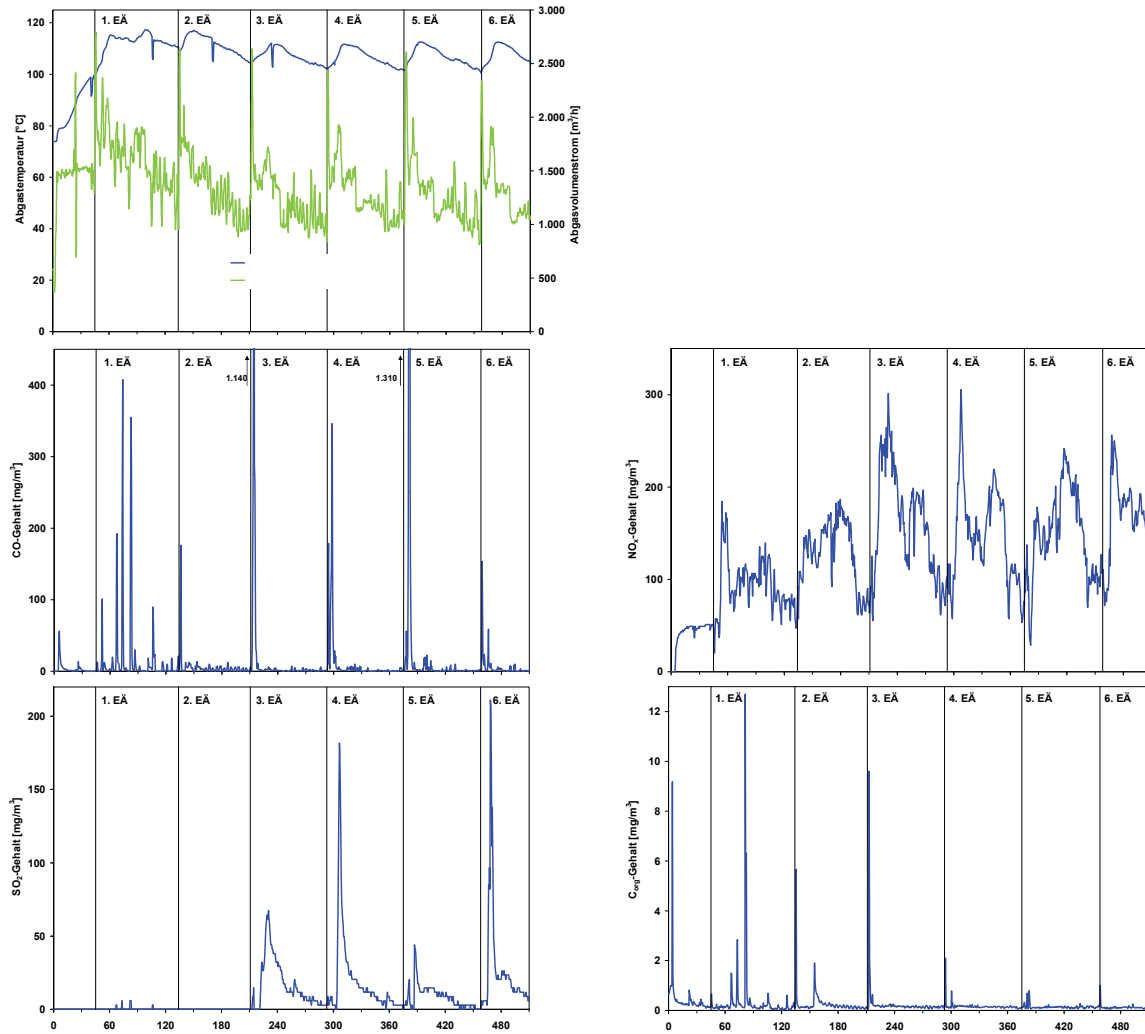


Abb. 11: Verlauf von Abgastemperatur, Volumenstrom, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffoxiden und organischem Gesamtkohlenstoff im Abgas einer Einäscherungsanlage (EÄ: Einäscherung).

Zusammenfassung. Generell zeigen die einzelnen Einäscherungen ein mehr oder minder ähnliches Verhalten in den Messgrößen. Die Ereignisse Einfahren des Sarges und Sargaufbruch sind bei den meisten kontinuierlich erfassten Parametern mit Konzentrationspeaks / -maxima verbunden, die bei Kohlenstoffmonoxid zu unzulässigen Grenzwertüberschreitungen führen können. Ansonsten liegen die Gehalte i. d. R. auf niedrigem Niveau.

Vor dem Hintergrund der Kohlenstoffmonoxid-Grenzwertüberschreitungen beim Betrieb von Einäscherungsanlagen führt das *Forschungs- und Entwicklungszentrum für Sondertechnologien (FES)*, Rednitzhembach, derzeit das Forschungsprojekt „Bewertung und Optimierung des Verbrennungsprozesses in bayerischen Krematorien“ durch, um die Ursachen der Grenzwertüberschreitungen zu ermitteln und Empfehlungen für einen optimierten Betrieb der Anlagen auszuarbeiten. Als Sekundärmaßnahme käme die Nachrüstung mit einem Oxidationskatalysator in Betracht.

3.3.2.2 Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Die diskontinuierlich gemessenen Schadstoffe polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (Indikator und WHO-PCB) sowie die polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und -furane sind in Abbildung 12 für den Anfahr- und für den Regelbetrieb dargestellt.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe konnten während des Vorheizens des Etagenofens im Abgas nicht bestimmt werden (Bestimmungsgrenze: $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$); im daran anschließenden Regelbetrieb wurde als einzige Komponente Naphthalin gefunden.

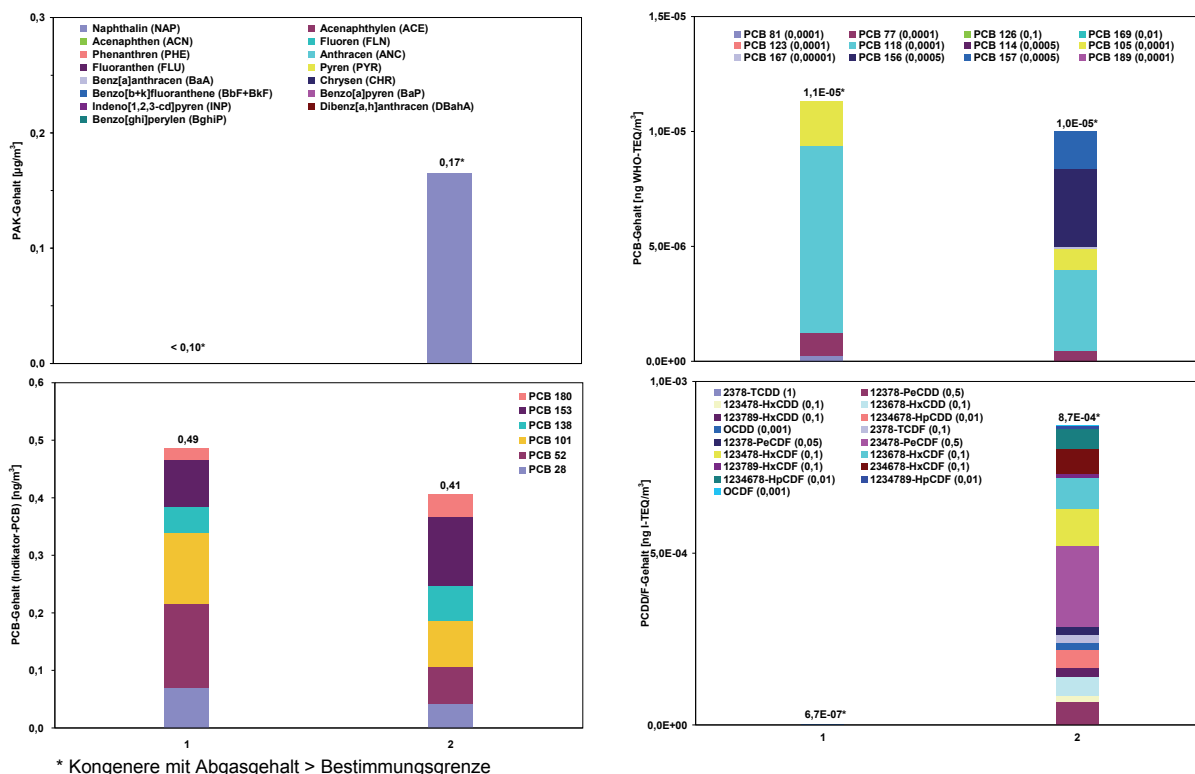


Abb. 12: Gegenüberstellung Anfahr- / Regelbetrieb der Abgasgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB), coplanaren polychlorierten Biphenylen (WHO-PCB) und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen (PCDD/F) während des Anfahrens der Einäscherungsanlage; Probenahmephase 1 (Aufheizen und erste Einäscherung: 2 h), Probenahmephase 2 (im Anschluss daran: $6\frac{1}{2}$ h).

An polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB und coplanare PCB) wurden im Abgas beim Anfahren ähnlich niedrige Gehalte ermittelt wie im Regelbetrieb. Bei den coplanaren PCB sind leichte Verschiebungen in der Kongenerenverteilung zu beobachten.

Deutliche Unterschiede in der Abgasbelastung beim Vorheizen gegenüber dem Regelbetrieb weisen die polychlorierten Dibenzo-p-dioxine/-furane auf: der schon sehr geringe Gehalt im Regelbetrieb wird beim Anfahren des Etagenofens um weitere drei Größenordnungen unterschritten, von den 17 Kongenere konnte nur das oktachlorierte Dibenzo-p-dioxin bestimmt werden.

Zusammenfassung. Die Konzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, Indikator-PCB und coplanaren polychlorierten Biphenylen im Abgas bewegen sich während des Vorheizens des Etagenofens auf ähnlich niedrigem Niveau wie im (daran anschließenden) Regelbetrieb; die Gehalte an polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen liegen drei Größenordnungen niedriger. Damit ist das tägliche Anfahren von Einäscherungsanlagen nicht emissionsrelevant.

3.4 Perlit-Blähanlage

Aus dem natürlichen Rohstoff Perlit (vulkanisches Gestein aus Aluminiumsilikat) wird durch einen thermischen Blähprozess ein hochwertiger, vielseitig einsetzbarer Bau- und Dämmstoff (Blähgranulat) hergestellt.

Die untersuchte Perlit-Blähanlage ist immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig, da Anlagen zum Blähen von Perlit, Schiefer oder Ton in der 4. BImSchV, Anhang Nr. 2.7, Spalte 2 [12], genannt sind. Die Abbildung 13 zeigt den verfahrenstechnischen Prozess als vereinfachtes Blockschaltbild.

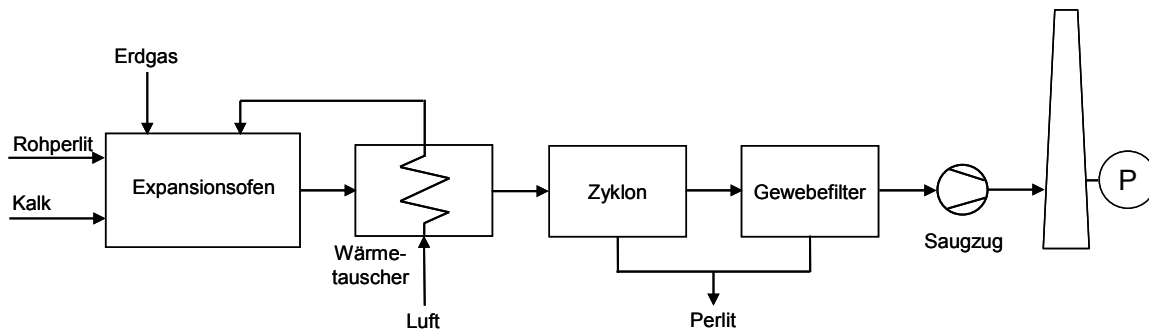


Abb. 13: Schematische Darstellung der Perlit-Blähanlage mit Probenahmestelle (P).

Der aufbereitete Rohperlit (gemahlen, klassiert, vorgetrocknet und homogenisiert) weist einen Kristallwassergehalt von 2 Mass.-% bis 5 Mass.-% auf. In einem direkt mit Erdgas befeuerten, vertikalen Blähofen (Expansionsofen) wird der Rohperlit zusammen mit Kalkmehl (0,5 Mass.-%; zur Einbindung von gasförmigen Fluorverbindungen) im Abgasstrom der Gasflamme auf etwa 1.000 °C erhitzt. Dabei expandiert das Rohperlitmehl auf das 10- bis 20-Fache seines ursprünglichen Volumens infolge der bei dieser Prozesstemperatur schlagartigen Verdampfung des Kristallwasseranteils. Während des Abkühlprozesses bildet sich ein Blähgranulat, das aufgrund seiner geringen Dichte mit dem Abgasstrom ausgetragen wird. Über einen Gas/Gas-Wärmetauscher tritt der Blähperlit- / Abgasstrom in einen Zyklon; mit der ausgekoppelten Wärmemenge wird die für den Blähprozess notwendige Verbrennungsluft vorgewärmt. Im Zyklon wird ein Teil des Blähperlits per Fliehkraft abgeschieden (Temperatur rd. 500 °C). Dem mit Blähperlitstaub beladenen Abgasstrom aus dem Zyklon wird über eine Luftklappe zum Schutz des Gewebefilters vor Übertemperatur Raumluft zugeführt. Der sich an den Gewebefilterschläuchen aufbauende Blähperlitstaub-Filterkuchen wird pneumatisch abgereinigt und mit dem Blähperlit aus dem Zyklon zum Fertigperlit vereint. Das am Gewebefilter gereinigte Abgas tritt über das Saugzuggebläse und den Kamin in die Umgebung aus.

Die Messungen im Anfahr- und Regelbetrieb erfolgten im Abgas am Kamin der Perlit-Blähanlage nach dem Gewebefilter und Saugzug.

3.4.1 Regelbetrieb

Wichtige Kenndaten des Blähofens sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Leistungsdaten zeigen, dass es sich um einen energieintensiven Prozess handelt, um aus dem Mineralgestein das Kristallwasser zu entfernen.

Tab. 7: Übersicht über wesentliche Kenndaten des Blähofens der Perlit-Blähanlage.

Auslegungsdaten	
Max. Durchsatz	ca. 5,5 Mg/h (Rohstoff)
Einsatzstoffe	Perlit (Aluminiumsilikat), Kalk
Brenner	Brennstoff
	Erdgas H
	Brennerleistung
	4,8 MW
	Max. Brennstoffdurchsatz
	ca. 480 m ³ /h

Die Tabelle 8 gibt die über die Regelbetriebsuntersuchung gemittelten Ergebnisse der gemessenen Abgasrandparameter und -konzentrationen wieder. Beim Betrachten der Messwerte fällt der hohe Sauerstoffgehalt von über 18 Vol.-% auf, der von der Luftbeimischung zur Kühlung des Abgases herührt. Der durch die Luftzufuhr hervorgerufene Verdünnungseffekt ist bei allen Schadstoffkonzentrationen durch den Sauerstoffbezug auf 14 Vol.-% berücksichtigt.

Tab. 8: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchung der Perlit-Blähanlage.

Abgasrandparameter / -konzentration	Perlit-Blähanlage	Emissionsbegrenzung ¹⁾
Volumenstrom [m ³ /h]	20.900 ²⁾	–
Temperatur [°C]	168	–
Sauerstoff [Vol.-%]	18,6 ²⁾	–
Kohlenstoffdioxid [Vol.-%]	1,6 ²⁾	–
Kohlenstoffmonoxid [mg/m ³]	< 14 ³⁾	–
Schwefeldioxid [mg/m ³]	< 14 ³⁾	–
Schwefeloxide, angegeben als Schwefeldioxid [mg/m ³]	7,0 ³⁾	–
Stickstoffoxide, angegeben als Stickstoffdioxid [mg/m ³]	78 ³⁾	90
Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff [mg/m ³]	5,7 ³⁾	50
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff [mg/m ³]	97 ³⁾	–
Fluor und seine gasförmigen Verbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff [mg/m ³]	1,2 ³⁾	2,7
Ammoniak [mg/m ³]	< 0,3 ³⁾	–
Gesamtstaub [mg/m ³]	64 ³⁾	20
Σ Form-, Acetaldehyd [mg/m ³]	< 0,1 ³⁾	20
Σ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [µg/m ³]	0,73 ³⁾	–
Σ Polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) [ng/m ³]	0,84 ³⁾	–
Σ Coplanare polychlorierte Biphenyle [pg WHO-TEQ/m ³]	0,19 ³⁾	–
Σ Polychlorierte Dibenz-p-dioxine/-furane [ng I-TEQ/m ³]	2,4×10 ^{-3 3)}	–

1) lt. Genehmigungsbescheid

2) Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Betriebssauerstoffgehalt

3) Mittelwerte für trockenes Abgas im Normzustand bei Bezugssauerstoffgehalt (14 Vol.-%)

Bis auf Gesamtstaub – hervorgerufen durch Undichtigkeiten am Gewebefilter (Löcher in zwei Gewebefilterschläuchen) – werden die Emissionsbegrenzungen unterschritten. Relativ hohe Konzentrationen liegen bei den gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen vor; deren Emissionen könnten sich gegebenenfalls durch eine optimierte Kalkzugabe weiter reduzieren lassen.

3.4.2 Anfahrbetrieb

Die Blähanlage wird jede Woche zur Reinigung, Kontrolle und für Wartungsarbeiten für etwa acht Stunden außer Betrieb genommen. In Abhängigkeit von der Rohstoffversorgungslage und den Möglichkeiten zur Produktweiterverarbeitung (Dämmplatten) können u. U. weitere Stillstände auftreten.

Nach einem 2¼-stündigen Anlagenstillstand wurde der Anfahrvorgang untersucht. Die operationell definierten Zeitpunkte Vorbelüftung des Ofens mit anschließender Zündung des Erdgasbrenners bildeten den Beginn und ein konstantes Abgastemperaturniveau am Kamin unmittelbar nach Produktionsbeginn das Ende des Anfahrvorgangs. Entsprechend dieser Kriterien war der Anfahrvorgang nach 75 min abgeschlossen. Das Anfahrschema ist in Abbildung 14 dargestellt.

Der Anfahrvorgang beginnt aus Sicherheitsgründen (Explosionsschutz) mit der Vorbelüftung der Anlage und der automatisierten Überprüfung der installierten Systeme. Mit einer Zündflamme wird die Gasflamme gezündet. Wenige Minuten danach wird die Brennerleistung auf Zweidrittlast hochgefahren; bei einer Abgastemperatur von knapp 700 °C wird das Rohperlit / Kalkstein-Gemisch in die Brennerflamme bzw. -abgas dispergiert. Das für den Blähprozess notwendige Temperaturniveau wird anhand des zugeführten Massenstroms des Rohperlit / Kalkstein-Gemischs eingestellt.

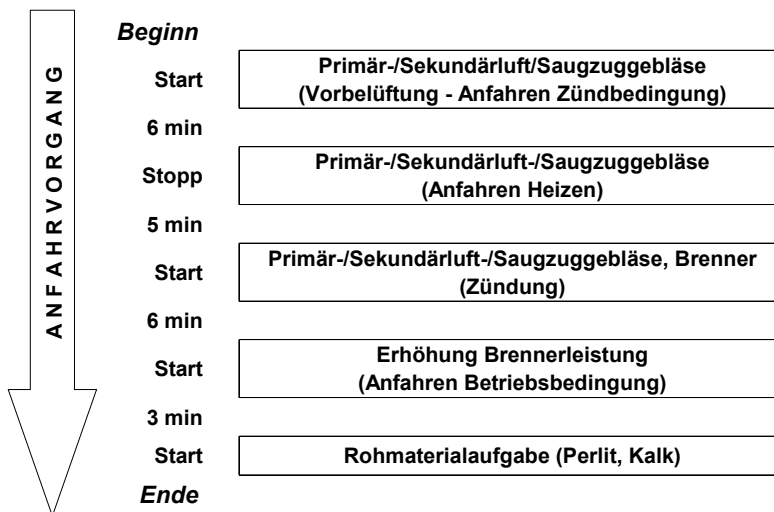


Abb. 14: Ablaufschema des Anfahrvorgangs der Perlit-Blähanlage.

3.4.2.1 Kontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Die während des Anfahrvorgangs kontinuierlich erfassten Abgasrandparameter und -konzentrationen am Kamin werden anhand der in Abbildung 15 dargestellten Kurvenverläufe erläutert. Der Schwefeldioxidgehalt im Abgas lag in allen Betriebszuständen unterhalb der Bestimmungsgrenze (5 mg/m³) und ist deshalb nicht dargestellt.

Während der Vorbelüftungsphase (Primär-, Sekundärluft- und Saugzuggebläse in Betrieb) wird die Anlage kurzzeitig maximal belüftet (Abgasvolumenstrom: ca. 25.000 m³/h), um potenziell zündfähige Gasgemische aus dem Ofen und den Rohrleitungen zu entfernen. Danach wird der Volumenstrom auf

etwa 15.000 m³/h zurückgenommen. Die Fehlerselbstdiagnose der Anlagenkomponenten läuft bei einem weiter verminderten Abgasvolumenstrom von ca. 4.900 m³/h ab. Mit Brennerzündung steigt der Volumenstrom kurzzeitig auf 6.250 m³/h an. Ab Erhöhung der Brennerleistung auf Zweidrittlast wird der Abgasvolumenstrom in einem Zeitraum von knapp einer Stunde auf das Regelbetriebsniveau von etwa 20.000 m³/h erhöht. Dabei erreicht die Abgastemperatur einen stationären Wert von 165 °C.

Bei den im Folgenden diskutierten Schadstoffen ist die Verdünnung des Abgases durch die Falschluff zu berücksichtigen.

Am Kohlenstoffmonoxidverlauf ist – jeweils mit einer gewissen Totzeit von einigen Minuten – sowohl die Brennerzündung als auch die Rohmaterialaufgabe an kleinen Peaks mit einem Maximum von 12 mg/m³ zu erkennen. Insgesamt liegen die Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen auf einem niedrigen Niveau, meist auf Höhe bzw. unter der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens von 5 mg/m³.

Die Stickstoffoxidgehalte im Abgas resultieren vor allem aus der hohen, für den Blähprozess notwendigen Flammentemperatur. Mit Zündung des Brenners steigen die thermisch gebildeten Stickstoffoxide zunächst sprunghaft auf 41 mg/m³; während konstanter Brennerlast nimmt die Stickstoffoxidkonzentration weiter auf 62 mg/m³ zu. Durch die Erhöhung der Brennerlast auf Zweidrittlast wird ein maximaler Konzentrationsanstieg auf 78 mg/m³ erreicht. Mit der Materialaufgabe und Einstellung der Regelbetriebsbedingungen pendeln sich die Stickstoffoxidkonzentrationen auf einem Niveau von 25 mg/m³ ein.

Der organische Gesamtkohlenstoff bewegt sich insgesamt auf einem niedrigen Niveau von ca. 2 mg/m³, den Brennerstart kennzeichnet eine Konzentrationsspitze von 18,8 mg/m³.

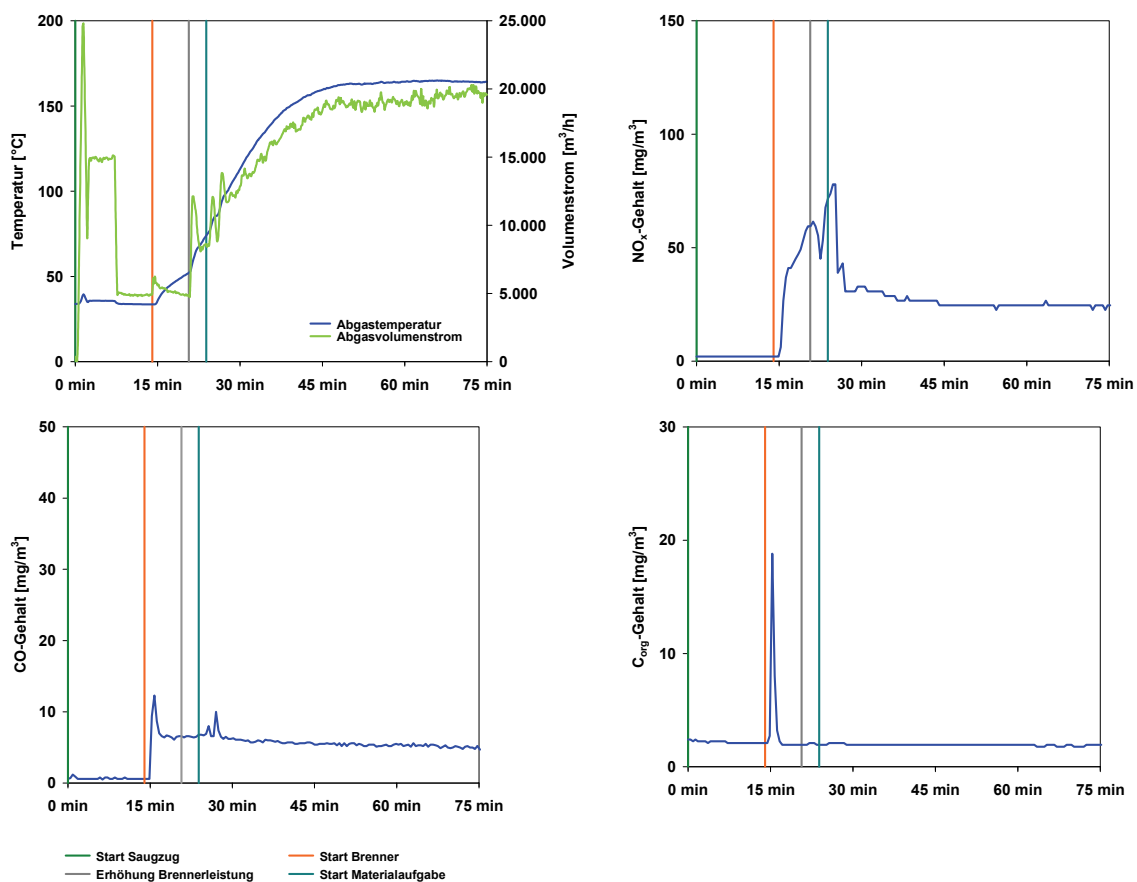


Abb. 15: Verläufe von Abgastemperatur und -volumenstrom sowie der Abgasgehalte an Stickstoffoxiden und organischem Gesamtkohlenstoff im Abgas während des Anfahrens des Blähofens.

Zusammenfassung. Die Ergebnisse belegen, dass die Zündung des Erdgasbrenners mit einer kurzzeitig unvollständigen Brennstoffoxidation einhergeht. Die Abgasgehalte der kontinuierlich ermittelten Messgrößen sind aufgrund der Verdünnung des Abgases (Kühlluft vor Gewebefilter) im Anfahrbetrieb stets auf einem geringen Emissionsniveau.

3.4.2.2 Diskontinuierliche Messgrößen im Anfahrbetrieb

Während des Anfahrens fand eine Probenahme auf persistente organische Schadstoffe statt. Die Probenahmedauer erstreckte sich vom Start der Vorbelüftung über die Zündung des Erdgasbrenners und den Start der Materialaufgabe bis zum Erreichen eines stabilen Abgastemperaturniveaus am Kamin (75 min). In Abbildung 16 sind die Ergebnisse des Anfahrbetriebs vergleichend zum Regelbetrieb dargestellt.

Im Anfahrbetrieb liegt mit $2,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eine sehr geringe Konzentration an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen im Abgas vor. Der stationäre Regelbetrieb senkt demgegenüber das Konzentrationsniveau auf ein Neuntel ab. Als einzige Komponente konnte beide Male das leichtflüchtige Naphthalin bestimmt werden.

Bei den polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB) sind die Abgasgehalte ebenfalls niedrig und um den Faktor 4 gegenüber dem Regelbetrieb erhöht. Bei beiden Proben waren alle sechs Kongenere bestimmbar.

Für die coplanaren PCB liegen die Analysenwerte in einer vernachlässigbaren Größenordnung; sowohl im Anfahr- als auch im Regelbetrieb liefert das PCB-Kongener 126 einen Beitrag von über 75 % zur Summe.

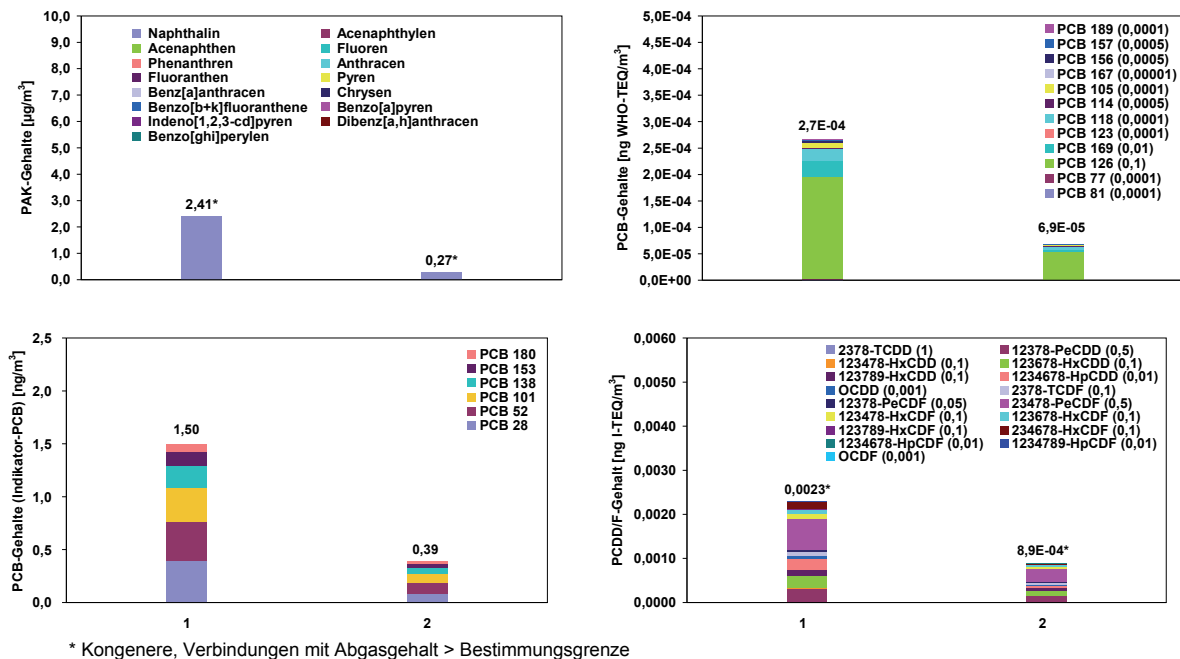


Abb. 16: **Gegenüberstellung Anfahr- / Regelbetrieb** der Abgasgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB), coplanaren polychlorierten Biphenylen (WHO-PCB) und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen (PCDD/F) während des Anfahrens der Perlit-Blähanlage; Probenahmephase 1 (ab Vorbelüftung des Ofens: 1¼ h), Probenahmephase 2 (im Anschluss daran: 3 h).

Ähnliche Kongenerenverteilungen kennzeichnen die PCDD/F-Emission im Anfahr- und Regelbetrieb. Dabei bewegen sich die Emissionen im einstelligen pg/m^3 -Bereich auf sehr niedrigem Niveau. Die Konzentrationen sind während des Anfahrens um den Faktor 2,6 höher als im Regelbetrieb.

Zusammenfassung. Die diskontinuierlich ermittelten Abgasgehalte der persistenten organischen Verbindungen liegen alle auf einem sehr niedrigen Konzentrationsniveau. Gegenüber dem Regelbetrieb sind die Gehalte während des Anfahrens der Anlage um bis zu eine Zehnerpotenz höher. Welchen Anteil an diesem Ergebnis die dem Abgas zugeführte Kühlluft für den sicheren Betrieb des Gewebefilters hat, bleibt offen. Hierzu müsste an der Anlage die Möglichkeit bestehen, den Kühlluftvolumenstrom an einer geeigneten Messstelle zu bestimmen.

4 Zusammenfassung

Das FuE-Vorhaben *Emissionsverhalten thermischer Anlagen bei instationären Betriebszuständen (EU Ziel-2 Programm Bayern)*, Laufzeit: 01.07.2007 – 30.09.2008, hatte zum Ziel, die Emissionen von Anlagen in Ziel-2-Gebieten während instationärer Betriebszustände zu erfassen, mit denen des Regelbetriebs zu vergleichen und aus den Ergebnissen Vorschläge für einen optimierten Anlagenbetrieb zu erarbeiten. Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.

Die Untersuchungen wurden an insgesamt sechs thermischen Anlagen bzw. vier Anlagentypen durchgeführt:

- zwei Deponiegasverstromungsanlagen (jeweils 1 × Anfahr- und 2 Tage Regelbetrieb)
- ein Palmöl-Blockheizkraftwerk (1 × Anfahr- und 2 Tage Regelbetrieb)
- zwei Einäscherungsanlagen (jeweils 1 × Anfahr- und 3 Tage Regelbetrieb)
- eine Perlit-Blähanlage (1 × Anfahr- und 2 Tage Regelbetrieb)

Die Emissionen der genannten Anlagen stammen aus thermischen Spalt- (Perlit-Blähanlage) und Verbrennungs- bzw. Oxidationsprozessen (restliche Anlagen). Dazu werden neben Verbrennungsluft „Materialien“ (Einsatz- und Brennstoffe) unterschiedlicher Aggregatzustände eingesetzt:

- gasförmig {Deponiegasverstromungsanlage (Gasmotor)}
- gasförmig / flüssig {Deponiegasverstromungsanlage (Zündstrahlmotor)}
- gasförmig / fest (Einäscherungsanlagen, Perlit-Blähanlage)
- flüssig (Palmöl-Blockheizkraftwerk)

Die einzelnen thermischen Prozesse finden in Motoren (Deponiegasverstromungsanlagen, Palmöl-Blockheizkraftwerk), Etagenöfen (Einäscherungsanlagen) und „transportline“ Reaktoren (fluidisiertes Wanderbett; Perlit-Blähanlage) statt.

Die Messumfänge orientierten sich an den in den jeweiligen Genehmigungsbescheiden limitierten Abgaskomponenten und beinhalteten zusätzlich die persistenten organischen Schadstoffe polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (Indikator- und coplanare WHO-PCB) und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane (PCDD/F).

An den Anlagen waren normgerechte Abgasmessungen nur vor oder am Kamin möglich; an den beiden Einäscherungsanlagen wurden zusätzlich Gewebefilterstaubproben (Abgasreinigung mittels Flugstromverfahren) analysiert.

Eine kurze Anfahrtdauer im maximal zweistelligen Minutenbereich bis zum (quasi)stationären Betrieb zeigen die mit Auskoppelung elektrischer Energie verbundenen motorischen Verbrennungsprozesse. Bei den Einäscherungsanlagen dauert der Anfahrvorgang aufgrund des Wärmespeichervermögens des Etagenofens rd. 1 h und an der Perlit-Blähanlage ca. 20 min.

Bedingt durch die niedrigen Schadstoffkonzentrationen waren die Probenahmedauern für die persistenten organischen Spurenschadstoffe (i. d. R. > 1 h) teilweise deutlich länger als die tatsächlichen Anfahrvorgänge; hieraus ergibt sich ein Vermischungseffekt mit den Regelbetriebsemissionen.

Abgesehen von kurzzeitigen Peaks in den kontinuierlichen Messgrößen bei Motor- oder Brennerstart sowie bei plötzlichen Störungen zeigte (z. T. bedingt durch den bereits erwähnten Vermischungseffekt) kein Anfahrvorgang im Vergleich zum Regelbetrieb besondere Auffälligkeiten hinsichtlich des Schadstoffgehalts im Abgas. Insofern sind die Emissionen aus dem Anfahrvorgang der Anlagen auch wegen der vergleichsweise kurzen Dauer des Anfahrbetriebs von untergeordneter Bedeutung.

Im Regelbetrieb der Anlagen mit motorischer Verbrennung als auch bei der Perlit-Blähanlage spiegeln die kontinuierlich gemessenen Parameter einen (quasi)stationären Anlagenbetrieb wider, während instationäre Betriebszustände den Regelbetrieb von Einäscherungsanlagen (diskontinuierlicher Betrieb) kennzeichnen.

Zusammenfassend sind bez. der untersuchten Anlagen folgende Aussagen zu treffen:

Deponiegasverstromungsanlagen. Die Generatoren zur elektrischen Energiegewinnung werden von Motoren nach dem Otto- (Gasmotor) bzw. Diesel-Prinzip (Zündstrahlmotor) angetrieben. Das an beiden Deponien quantitativ und qualitativ rückläufige Deponiegas reicht für eine kontinuierliche Verstromung unter Motorvollast nicht aus. Daher wird der Gasmotor täglich nur stundenweise betrieben; der mit einem Oxidationskatalysator ausgestattete Zündstrahlmotor (mit Zündöl) kann hingegen auch bei schlechterer Gasqualität ständig betrieben werden.

Das Emissionsverhalten während des Anfahrens ist bei beiden Motoren geprägt von einem intensiven, kurzzeitigen Peak von Kohlenstoffmonoxid (max. 7.010 mg/m^3) und Stickstoffoxiden (max. 2.160 mg/m^3) zu Beginn der motorischen Verbrennung. Die Gehalte an persistenten organischen Schadstoffen im Abgas bewegen sich in den ersten 60 bzw. 100 Betriebsminuten auf (sehr) niedrigem Niveau (PAK: max. dreistelliger $\mu\text{g/m}^3$ -Bereich; Indikator-PCB: einstelliger ng/m^3 -Bereich; WHO-PCB: max. dreistelliger fg WHO-TEQ/ m^3 -Bereich; PCDD/F: max. zweistelliger fg I-TEQ/ m^3 -Bereich).

Der Regelbetrieb zeigt im Abgas vergleichsweise hohe Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid (Gasmotor ohne Abgaskatalysator: durchschnittlich $0,62 \text{ g/m}^3$), Stickstoffoxiden (Zündstrahlmotor: $0,45 \text{ g/m}^3$), Methan (max. $1,26 \text{ g/m}^3$) und Formaldehyd (max. 77 mg/m^3). Demgegenüber liegen die organischen Spurenschadstoffe im Bereich der Abgasgehalte während des Anfahrens. Die erhöhten Kohlenstoffmonoxid-Messwerte beim Zündstrahlmotor deuten auf einen nicht mehr voll funktionstüchtigen Oxidationskatalysator hin (Katalysator bereits über zwei Jahre in Betrieb; evtl. Katalysatorvergiftung, Desaktivierung durch Siloxane).

Palmöl-Blockheizkraftwerk. Das immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Blockheizkraftwerk dient der Wärmeerzeugung für ein kommunales Hallen- / Freibad; die erzeugte elektrische Energie wird in das öffentliche Netz eingespeist. Etwa alle zehn Tage wird der an den Palmölbetrieb angepasste Diesel-Motor abgeschaltet, gewartet und neu gestartet. Sekundärmaßnahmen zur Abgasreinigung sind nicht vorhanden.

Das Anfahren erfolgt mit Biodiesel, nach Erreichen der Generatorsollleistung wird auf Palmölbetrieb umgestellt. Der Anfahrvorgang endet mit der Inbetriebnahme des Abgaswärmetauschers zur Wärmeauskopplung knapp 30 Minuten nach Motorstart. Beim dem Anfahrvorgang – nach ca. 2½-monatigem Anlagenstillstand – musste der Motor wegen technischer Probleme dreimal gestartet werden; jeder Motorstart erzeugt hohe Peaks an Kohlenstoffmonoxid (max. 3.220 mg/m^3) und organischem Gesamtkohlenstoff (max. 313 mg/m^3). Diese fallen umso niedriger aus, je wärmer der Motorbrennraum ist. Umgekehrt steigen mit zunehmender Motorlaufzeit die Stickstoffoxid-Konzentrationen (max. 1.890 mg/m^3) im Abgas. In den ersten 90 min seit der Inbetriebnahme (67 min nach dem letzten Motorstart) ist die Belastung des Abgases mit organischen Spurenschadstoffen als relativ gering einzustufen (PAK: zweistelliger $\mu\text{g/m}^3$ -Bereich; Indikator-PCB: dreistelliger pg/m^3 -Bereich; WHO-PCB: dreistelliger fg WHO-TEQ/ m^3 -Bereich; PCDD/F: einstelliger pg I-TEQ/m^3 -Bereich).

Im Regelbetrieb weist das Motorabgas hohe Gehalte insbesondere an Kohlenstoffmonoxid (im Mittel 298 mg/m^3), Stickstoffoxiden (1.655 mg/m^3) und Gesamtstaub (Rußpartikel; 46 mg/m^3) auf. Gegen-

über dem Anfahrbetrieb liegen die Konzentrationen an persistenten organischen Schadstoffen bei ca. der Hälfte.

Einäscherungsanlagen. In den drei Brennkammern der Etagenöfen ist jeweils ein Erdgasbrenner installiert. Die Anlagen werden im Einschichtbetrieb (5-Tage-Woche) betrieben. Die Abgase werden im Flugstromverfahren (Gewebefilter) mit einem Kalk / Aktivkohle-Gemisch gereinigt.

Das Anfahren der Etagenöfen (Vorheizen der Brennkammern auf Mindesttemperaturen von 650 °C bzw. 850 °C) dauert in den nicht auf Umgebungstemperatur abgekühlten Etagenöfen zwischen 0,5 h und 1,5 h. Die Inbetriebnahmen der Erdgasbrenner zeigen in den Abgasen aufgrund der vorgewärmten Brennkammern keine extrem hohen Kohlenstoffmonoxid-Peaks (max. 123 mg/m³). Im Verlauf des Vorheizens erhöhen sich die Stickstoffoxid-Konzentrationen auf max. 109 mg/m³. Die Abgasbelastung mit organischen Spurenschadstoffen während des Anfahrens (Aufheizen und erste Einäscherung) ist sehr gering (PAK: max. dreistelliger ng/m³-Bereich; Indikator-PCB: dreistelliger pg/m³-Bereich; WHO-PCB, PCDD/F: max. dreistelliger fg WHO- bzw. I-TEQ/m³-Bereich).

Das Emissionsverhalten im Regelbetrieb wird qualitativ von den Ereignissen Einfahren des Sarges und Sargaufbruch geprägt; diese führen bei Kohlenstoffmonoxid zu hohen Peaks (max. 9.580 mg/m³) bei ansonsten sehr geringen Gehalten im Bereich der Bestimmungsgrenze. Eine große Schwankungsbreite (um ca. eine Größenordnung) weisen die Stickstoffoxidgehalte auf; die Stickstoffoxidkonzentrationen liegen im Mittel bei 142 mg/m³ bzw. 214 mg/m³. Die Abgaskonzentrationen der persistenten organischen Schadstoffe bewegen sich im Regelbetrieb in ähnlich niedrigen Bereichen wie während des Anfahrens.

Gegenüber den sehr geringen Quecksilber- und organischen Schadstoffgehalten in den Abgasen ist eine starke Aufkonzentrierung dieser Stoffe in den Gewebefilterstäuben festzustellen. Im Vergleich zu Gewebefilterstäuben aus Müllverbrennungsanlagen liegen die jeweiligen Konzentrationen durchwegs um eine bis drei Größenordnungen höher {Ausnahmen: Indikator-PCB, PCDD/F (eine Anlage): vergleichbare Gehalte}.

Perlit-Blähanlage. Kernstück ist ein Expansionsofen (vertikaler Rohrreaktor), in dem das im eingesetzten Rohperlit enthaltene Kristallwasser aus dem Kristallgefüge mittels eines Erdgasbrenners bei Temperaturen um 1.000 °C ausgetrieben wird. Die Anlage wird wöchentlich nach Reinigungs- und Wartungsarbeiten in Betrieb genommen. Als Abgasreinigungsmaßnahme (d. h., zur Produktabscheidung) sind ein Zyklon und ein Gewebefilter installiert, zudem wird Kalk (0,5 Mass.-%) zum Rohperlit zugegeben.

Das Anfahren ist v. a. vom Anstieg des Stickstoffoxidgehalts auf max. 78 mg/m³ und von einem Peak beim Gehalt des organischen Gesamtkohlenstoffs (19 mg/m³) bei Brennerzündung gekennzeichnet. Die organischen Schadstoffkonzentrationen (Probenahme über 75 min) liegen auf ähnlich niedrigen Niveaus wie beim Anfahren der o. g. Anlagen.

Im Regelbetrieb wurden hohe Staubgehalte (durchschnittlich 64 mg/m³) ermittelt, was durch Leckagen am Gewebefilter zu erklären ist, sowie relativ hohe Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen (34 mg/m³). Eigentlich könnten sich Letztere im Abgas gegebenenfalls durch eine optimierte Kalkzugabe weiter reduzieren lassen. Die Gehalte an organischen Spurenschadstoffen liegen im Regelbetrieb um bis zu eine Größenordnung unter den Konzentrationen des Anfahrvorgangs.

Aus den an unterschiedlichen Anlagentypen erzielten Ergebnissen ist für das Anfahren der betrachteten Anlagen bis auf Detailoptimierungen kein unmittelbarer Handlungsbedarf abzuleiten.

Im Unterschied hierzu ist für den Regelbetrieb festzustellen, dass es bei den / dem / der

- Deponiegasverstromungsanlagen
 - bezüglich Formaldehyd und Methan
- mit Palmöl betriebenen Blockheizkraftwerk

- bezüglich organischer Stoffe (geruchsintensive und kanzerogene Stoffe), Kohlenstoffmonoxid und gegebenenfalls Gesamtstaub
- Einäscherungsanlagen
 - bezüglich Kohlenstoffmonoxid
- Perlit-Blähanlage
 - bezüglich gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen

das Optimierungspotenzial – nicht nur bei Überschreitungen der Emissionsbegrenzungen bzw. Grenzwerte – in erster Linie durch Primär- und in zweiter Linie durch Sekundärmaßnahmen auszuschöpfen gilt.

Als technische Maßnahmen kommen in Betracht:

- Deponiegasverstromungsanlagen
 - Optimierung der Motoreinstellungen / -steuersoftware, Verminderung des Methanschlupfs und thermische Nachverbrennung oder gegebenenfalls Einsatz eines Oxidationskatalysators
- mit Palmöl betriebenes Blockheizkraftwerk
 - regelmäßiger Wechsel der Einspritzdüsen, Überprüfung der Motoreinstellung sowie des Wartungszustands durch regelmäßige Abgasmessungen, Einsatz eines geeigneten Oxidationskatalysators und gegebenenfalls Einsatz eines geeigneten Partikelfilters, Sicherstellung geeigneter Brennstoffqualität
- Einäscherungsanlagen
 - Optimierung des Ofenbetriebs (Strömungsverhältnisse) und evtl. Einsatz eines Oxidationskatalysators
- Perlit-Blähanlage
 - Optimierung (quantitativ, qualitativ) der Kalk-Zugabe

Die Realisierung dieser fachlich begründeten Erfordernisse wird mit den Anlagenbetreibern und Überwachungsbehörden diskutiert, damit im gegenseitigen Einvernehmen umsetzbare Lösungsvorschläge erarbeitet werden können.

Bei den Einäscherungsanlagen wird auf das laufende Forschungsprojekt „Bewertung und Optimierung des Verbrennungsprozesses in bayerischen Krematorien“ verwiesen.

5 Danksagung

Der Dank gilt allen an dem Vorhaben Beteiligten, den Kolleginnen und Kollegen

- der Referate *Schwermetallanalytik* und *Organische Analytik* der Abteilung *Zentrale Analytik, Stoffbewertung* für die Aufarbeitung diverser Abgasproben und Ermittlung der Gehalte an Chlor- / Fluorwasserstoff, Metallen, kanzerogenen Stoffen, Indikator-PCB, coplanaren PCB (WHO) und PCDD/F
- des Referates *Luftreinhalte bei Anlagen* der Abteilung *Luft, Lärm, Anlagensicherheit* für die Auswahl der Anlagen, die kritische Durchsicht der Mess- bzw. LAI-Berichte und die eingehende Fachdiskussion der Ergebnisse
- der Landratsämter und Bezirksregierungen, die für die einzelnen Anlagen in den jeweiligen Regierungsbezirken zuständig sind, für die kooperative Zusammenarbeit

und insbesondere den Firmen und Verantwortlichen vor Ort, die offen für unser Anliegen waren, Emissionsmessungen an ihren Anlagen durchzuführen, deren Umfang den Genehmigungsbescheid weit überschritten hat.

Ohne die Mitwirkung und Unterstützung aller wäre das Vorhaben weder realisierbar noch der damit erzielbare Erkenntnisgewinn möglich gewesen.

Vor allem gebührt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, das das Vorhaben positiv beschieden, innerhalb der EU-Strukturförderung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert und begleitet hat, unser besonderer Dank.

6 Literatur

- [1] ANONYM:
Europäischen Fonds für regionale Entwicklung in Bayern. Förderperiode 2000-2006.
http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE_2000-2006/Ziel_2/informationen.html
- [2] ANONYM:
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). Vom 24. Juli 2002.
GMBl. (2002) 25-29, S. 511-605
- [3] ANONYM:
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV). Vom 14.08.2003.
BGBl. I, (2003) 41, S. 1634-1651
- [4] ANONYM:
http://www.lfu.bayern.de/luft/fachinformationen/p26_messtellen/doc/mustermessbericht.doc
- [5] ANONYM:
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. BImSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz. Fassung vom 26. September 2002 (BGBl. I Nr. 71 vom 23.10.2007, S. 2470)
- [6] VAN DEN BERG, M.; BIRNBAUM, L.; BOSVELD, B.T.C.; BRUNSTRÖM, B.; COOK, P.; FEELEY, M.; GIESY, J.P.; HANBERG, A.; HASEGAWA, R.; KENNEDY, S.W.; KUBIAK, T.; LARSEN, J.C.; VAN LEEUWEN, F.X.R.; LIEM, A.K.D.; NOLT, C.; PETERSON, R.E.; POELLINGER, L.; SAFE, S.; SCHRENK, D.; TILLITT, D.; TYSKLIND, M.; YOUNES, M.; WAERN, F.; ZACHAREWSKI, T.:
Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife.
Environmental Health Perspective **106** (1998) 12, S. 775-792
- [7] ANONYM:
VDI 4200 – Durchführung von Emissionsmessungen an geführten Quellen.
Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2000, 68 S.
- [8] ANONYM:
DIN EN 13284-1 – Emissionen aus stationären Quellen. Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen. Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren.
Beuth Verlag, Berlin, April 2002, 44 S.
- [9] ANONYM:
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen – TA Siedlungsabfall). Vom 14. Mai 1993.
BAnz. Nr. 99a (1993), S. 4967
zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 26. Juni 1992 {BGBl. I, (1992) 29, S. 1161}
- [10] ANONYM:
Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung und zur Änderung der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Vom 19. März 1997. Artikel 1: Siebenundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung – 27. BImSchV).
BGBl. I, (1997) 18, S. 545-547, geändert durch Artikel 11 des Zweiten Gesetzes zur Erleichterung der Verwaltungsreform in den Ländern (2. Zuständigkeitslockerungsgesetz). Vom 03. Mai 2000.
BGBl. I, (2000) 20, S. 632-635

-
- [11] KNORR, W.; HENTSCHEL, B.; MARB, C.; SCHÄDEL, S.; SWEREV, M.; VIERLE, O.; LAY, J.:
Rückstände aus der Müllverbrennung. Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken.
Initiativen zum Umweltschutz 13.
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999, 258 S.
- [12] ANONYM:
Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – 4. BImSchV –
Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Vom 20. Juni 2005.
BGBl. I, (2005) 35, S. 1687-1716

