



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Abgasemissionen umweltrelevanter Anlagen

Schlussbericht zum 30.11.2014



luft



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Abgasemissionen umweltrelevanter Anlagen

Schlussbericht zum 30.11.2014

Impressum

Abgasemissionen umweltrelevanter Anlagen – Schlussbericht zum 30.11.2014

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
Fax: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat Emissionsmessung und Qualitätssicherung

Redaktion:

LfU, Referat Emissionsmessung und Qualitätssicherung, Thomas Bogner, Clemens Marb

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Stand:

Januar 2015

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Anlagen und Untersuchungsumfang	6
3	Ergebnisse und Bewertung	28
3.1	Biomasseheiz(kraft)werke	28
3.2	Bioabfallvergärung	38
3.3	Holzvergasung	42
3.4	Klärschlammverbrennungen	46
3.5	Blähglasherstellung	54
3.6	Schuhproduktion	60
3.7	Elektrodenherstellung	65
3.8	Zementwerk	70
3.9	Eisengießerei	76
3.10	Kaffeerösterei	80
3.11	Räucherei	86
3.12	Quarzsandwerke	91
3.13	Kieswerk	99
3.14	Granitwerk	103
4	Zusammenfassung	107
	Anhang	117
	Literatur	125

1 Einleitung

Das Projekt „Abgasemissionen umweltrelevanter Anlagen“ dient dem Ziel, die Emissionen an beispielhaft ausgewählten Anlagen und Verfahren im Anfahr-, Regel- oder Versuchsbetrieb zu erfassen, zu bewerten und zu verbessern. Es wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) gefördert.

Instationäre Betriebszustände – wie Anfahrvorgänge – oder technische Störungen können in Abhängigkeit von den eingesetzten Brenn- und Betriebsstoffen gegenüber dem (quasi-)stationären, ordnungsgemäßen Regelbetrieb durch erhöhte Emissionskonzentrationen und -frachten gekennzeichnet sein. Das Gleiche trifft auf für Versuchszwecke veränderte Betriebsparameter und Anlagenkonfigurationen zu. Aus den Ergebnissen der Emissionsmessungen lassen sich anlagenspezifische Handlungsempfehlungen zur Schadstoffreduktion und Betriebsoptimierung (Energie, Betriebsstoffeinsatz, Anlagensicherheit etc.) ableiten.

Im Projekt wurden aus den Wirtschaftsabschnitten [1] *Abfallentsorgung und Energieversorgung* drei Biomasseheiz(kraft)werke, eine Bioabfallvergärungsanlage, ein Holzvergaser, zwei Klärschlammbehandlungen, aus dem Wirtschaftsabschnitt *Verarbeitendes Gewerbe (Zweige: Glaswaren, Schuhe, elektrische Ausrüstungen, Zement, Metallerzeugung, Kaffee, Fleischverarbeitung)* eine Glasschäumanlage, ein Zementwerk, zwei Schuhproduktionen, eine Elektrodenherstellung, eine Gießerei, eine Kaffeerösterei und eine Räucheranlage sowie dem Wirtschaftsabschnitt *Bergbau und Gewinnung von Steinen/Erden* zwei Quarzsandwerke, ein Kieswerk und ein Granitwerk untersucht. Als Anreiz zur freiwilligen Teilnahme an dem Programm stellten die zuständigen Aufsichts- und Genehmigungsbehörden den Betreibern die Anerkennung der Messungen im Regelbetrieb als wiederkehrende Messung nach § 28 BImSchG [2] in Aussicht.

Die Ergebnisse wurden in ausführlichen Berichten dargestellt, bewertet und mit den Betreibern diskutiert. Als Anlage enthielten die Berichte eine Ergebniszusammenstellung nach den Empfehlungen des Ausschusses Luftqualität / Wirkungsfragen / Verkehr (LWV) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) [3]. Die Berichte wurden dem StMUV, den Anlagenbetreibern sowie den zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden (Bezirksregierungen, Landratsämter, Städte) vorgelegt.

Im Abschlussbericht werden die Ergebnisse aller Messkampagnen zusammengefasst und – soweit möglich – vergleichend dargestellt.

2 Anlagen und Untersuchungsumfang

Im Berichtszeitraum von Januar 2009 bis Februar 2014 wurden drei Biomasseheiz(kraft)werke (A, B, C: Feststoffverbrennungen), eine Bioabfallvergärung (D: Gasverbrennungsmotor), eine Holzvergasung (E: Gasverbrennungsmotor), zwei Klärschlammbehandlungen (F, G: Schlammverbrennungen), eine Glasschäumenanlage (H: Glasbruchrockner; I, J: zwei Glasschäumrohre), zwei Schuhproduktionen (K, L: Lösemittelabscheidung/-oxidation), eine Elektrodenherstellung (M: Ringofen), ein Zementwerk (N: Reststoffmitverbrennung), eine Eisengießerei (O: Kupolöfen), eine Kaffeerösterei (P: Rösttrommel), eine Räucheranlage (Q: Räucherammern), zwei Quarzsandwerke (R, S: zwei Sandrockner; T: eine Farbsandanlage; U: eine Sandklassier-/sichteranlage), ein Kies- und Granitwerk (V, W: Klassier- und Brechanlagen) untersucht. Die Anlagen decken ein breites verfahrenstechnisches Spektrum ab. Alle untersuchten Verfahren beinhalten – abgesehen von den Klassier-/Brech-/Sichteranlagen – thermische Prozesse als mögliche Quelle von Emissionen organischer und anorganischer Schadstoffe (z. B. PCDD/F, Hg), von denen Umweltbeeinträchtigungen über den Gaspfad ausgehen können.

Thermische und katalytische Behandlungsprozesse (Verbrennung/Oxidation/Verschmelzung):

- Altholz/Holz hackschnitzel zur Abfallbehandlung/Energieerzeugung (Anlagen A, B, C)
- Biogas zur Elektrizitätserzeugung (D)
- Holzgas zur Elektrizitätserzeugung (E)
- Klärschlamm zur Abfallbehandlung/Energieerzeugung (F, G)
- Erdgas zur Trocknung von Altglas bzw. zum Blähen von Glasgranulat (H, I, J)
- Propan-/Butangas bzw. Katalysator zur Oxidation von Lösemitteln (K, L),
- Heizöl EL zum Brennen von Graphitelektroden (M)
- Abfälle, Sekundärbrennstoffe und Kohle zur Zementklinkerproduktion (N)
- Koks zum Schmelzen von Eisen und Stahlschrott (O)
- Erdgas zur Röstung von Kaffee (P)
- Holz zur Raucherzeugung für die Konservierung von Wurstwaren (Q)
- Erdgas zum Trocknen bzw. zur Behandlung von Quarzsand (R, S, T)

Mechanische Behandlungsprozesse (Zerkleinerung/Trennung):

- Quarzsand, Kies bzw. Granit für Mineralstoffprodukte (U, V, W)

Zur Minderung von Abgasemissionen kommen an den Anlagen die in Tab. 1 aufgeführten Technologien zum Einsatz.

Tab. 1: Übersicht über die an den Anlagen A bis W installierten Abgasreinigungssysteme.

Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Elektrofilter		x					x					
Gewebefilter	x		x			x	x	x	x	x	x	x
Katalysator					x							x
Massenkraftabscheider	x	x				x						
RNV, RTO, TNV				x							x	
SNCR			x			x	x					
Sorptionsstufe	x		x			x	x				x	x
Wäscher						x	x					

Tab. 1 (Forts.): Übersicht über die an den Anlagen A bis W installierten Abgasreinigungssysteme.

Anlage	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Elektrofilter	x				x						
Gewebefilter		x	x			x	x	x	x	x	x
Katalysator				x							
Massenkraftabscheider			x	x							
RNV, RTO, TNV	x			x							
SNCR		x									
Sorptionsstufe					x						
Wäscher					x						

Die Untersuchungen erfolgten im Regel-, Anfahr- und/oder Versuchsbetrieb (RB, AB, VB). Die Messumfänge für die Abgasemissionen – vgl. Tab. 2 bis Tab. 21 – orientierten sich generell an den Bescheiden bzw. Anordnungen der Genehmigungsbehörden oder konkreten fachlichen Fragestellungen zum Zeitpunkt der jeweiligen Untersuchungen. Darüber hinaus wurden weitere Stoffe und Parameter – die zum tieferen Prozessverständnis beitragen (z. B. Roh-, Zwischengas, Einsatz- und Reststoffe) – in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, um umfassende Informationen über das System- und Schadstoffverhalten zu erhalten.

Die Tabellen A-1 bis A-6 im Anhang geben einen Überblick über die im Bereich der Umweltkompartimente Abfall- und Reststoffe bei den Biomasseheiz(kraft)werken, Klärschlammbehandlungsanlagen sowie dem Zementwerk durchgeführten Feststoff- und Eluatuntersuchungen. Diese wurden in die Messprogramme integriert, um die Eignung der Einsatz- und Reststoffe für die bestehenden Verwendungen bzw. Verwertungen/Entsorgungen zu prüfen.

Tab. 2: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter am Biomasseheizkraftwerk A (siehe Abschnitt 3.1). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])					A				
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizkraftwerk, Nr. 8.2, Spalte 2, Anhang 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.2.2, Spalte c V, Anhang 2, 4. BImSchV (2013) [5]									
Behandlungsprozess: Holz-/Altholzverbrennung (Rostfeuerung)									
Betriebsweise	AB		RB		Betriebsweise	AB		RB	
Monat/Jahr	März 2010		April 2010		Monat/Jahr	März 2010		April 2010	
Parameter	RO	RE	RO	RE	Parameter	RO	RE	RO	RE
Temperatur (T)	x	x	x	x	PAK	x	x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)		x		x	B(a)P	x	x	x	x
H ₂ O	x	x	x	x	Ind.-PCB	x	x	x	x
O ₂	x	x	x	x	dl-PCB	x	x	x	x
CO ₂	x	x	x	x	PCDD/F	x	x	x	x
CO	x	x	x	x	Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO	x	x	x	x	Crotonaldehyd				
NO ₂	x	x	x	x	Aceton				
N ₂ O		x		x	2-Butanon				
SO ₂					Ameisensäure				
C _{ges}		x		x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH₄}					Toluol				
HCl	x	x	x	x	Phenol				
HF	x	x	x	x	Σ Kresole				
NH ₃			x	x	Σ Xylenole				
SO _x			x	x	Σ Xylole				
As					α-Pinen				
Cd					β-Pinen				
Co					3-Caren				
Cr					Camphen				
Cu					Ethylbenzol				
Hg	x	x	x	x	Limonen				
Mn					Naphthalin				
Ni					Methylnaphthalin				
Pb					1,3-Butadien				
Sb					Pyridin				
Se					Tetrachlorethen				
Sn					2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V									
Zn									
Gesamtstaub		x		x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 3: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter am Biomasseheizwerk B (siehe Abschnitt 3.1). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Wärme- und Kälteversorgung (D35.11.3 [1])					B				
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizwerk, Nr. 1.2, Spalte 2 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr.1.2.1, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]									
Behandlungsprozess: Holzverbrennung (Rostfeuerung)									
Betriebsweise	AB		RB		Betriebsweise	AB		RB	
Monat/Jahr	April 2011		April 2011		Monat/Jahr	April 2011		April 2011	
Parameter \ Gasart	RO	RE	RO	RE	Parameter \ Gasart	RO	RE	RO	RE
Temperatur (T)	x	x	x	x	PAK	x	x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)		x		x	B(a)P	x	x	x	x
H ₂ O	x	x	x	x	Ind.-PCB	x	x	x	x
O ₂	x	x	x	x	di-PCB	x	x	x	x
CO ₂	x	x	x	x	PCDD/F	x	x	x	x
CO					Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO	x	x	x	x	Crotonaldehyd				
NO ₂	x	x	x	x	Aceton				
N ₂ O		x		x	2-Butanon				
SO ₂	x	x	x	x	Ameisensäure				
C _{ges}		x		x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH₄}					Toluol				
HCl	x	x	x	x	Phenol				
HF	x	x	x	x	Σ Kresole				
NH ₃					Σ Xylenole				
SO _x					Σ Xylole				
As					α-Pinen				
Cd					β-Pinen				
Co					3-Caren				
Cr					Camphen				
Cu					Ethylbenzol				
Hg	x	x	x	x	Limonen				
Mn					Naphthalin				
Ni					Methylnaphthalin				
Pb					1,3-Butadien				
Sb					Pyridin				
Se					Tetrachlorethen				
Sn					2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V									
Zn									
Gesamtstaub		x		x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 4: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter am Biomasseheizkraftwerk C (siehe Abschnitt 3.1). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung und -beseitigung, gefährliche Abfälle (E38.22.0 [1])										
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizkraftwerk, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.1, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]										
Behandlungsprozess: Holz-/Altholzverbrennung (Rostfeuerung)										
Betriebsweise	AB		RB		Betriebsweise	AB		RB		
Monat/Jahr	Juli 2010		August 2010		Monat/Jahr	Juli 2010		August 2010		
Parameter	Gasart	RO	RE	RO	RE	Gasart	RO	RE	RO	RE
Temperatur (T)		x	x	x	x		x	x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)			x		x					x
H ₂ O		x	x	x	x		x	x	x	x
O ₂		x	x	x	x		x	x	x	x
CO ₂		x	x	x	x		x	x	x	x
CO		x	x	x	x		x	x	x	x
CH ₄										
H ₂										
NO		x	x	x	x					
NO ₂		x	x	x	x					
N ₂ O			x		x					
SO ₂										
C _{ges}			x		x					
C _{ges} (Kieselgel)										
C _{CH₄}										
HCl		x	x	x	x					
HF		x	x	x	x					
NH ₃										
SO _x		x	x	x	x					
As			x		x					
Cd			x		x					
Co			x		x					
Cr			x		x					
Cu			x		x					
Hg		x	x	x	x					
Mn			x		x					
Ni			x		x					
Pb			x		x					
Se										
Sb			x		x					
Sn			x		x					
Te										
Tl			x		x					
V			x		x					
Zn										
Gesamtstaub			x		x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀										
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀										
Quarzfeinstaub PM ₄										
PAK		x	x	x	x		x	x	x	x
B(a)P		x	x	x	x		x	x	x	x
Ind.-PCB		x	x	x	x		x	x	x	x
dl-PCB		x	x	x	x		x	x	x	x
PCDD/F		x	x	x	x		x	x	x	x
Benzol										
Formaldehyd										
Acetaldehyd										
Crotonaldehyd										
Aceton										
2-Butanon										
Ameisensäure										
Essigsäure										
Ethylacetat										
Toluol										
Phenol										
Σ Kresole										
Σ Xylenole										
Σ Xylole										
α-Pinen										
β-Pinen										
3-Caren										
Camphen										
Ethylbenzol										
Limonen										
Naphthalin										
Methylnaphthalin										
1,3-Butadien										
Pyridin										
Tetrachlorethen										
2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon										
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]										
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]										

Tab. 5: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter am Bioabfallvergärung D (siehe Abschnitt 3.2). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])				D			
Anlagentyp, -genehmigung: Bioabfallvergärung, Nr. 1.4, Spalte 2 b) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr.1.4.1.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]							
Behandlungsprozess: Biogasverbrennung (Motor)							
Betriebsweise	VB			Betriebsweise	VB		
Monat/Jahr	Juni 2009			Monat/Jahr	Juni 2009		
Parameter \ Gasart	RO	RE1	RE2	Parameter \ Gasart	RO	RE1	RE2
Temperatur (T)	x	x	x	PAK			
Volumenstrom (dV/dt)			x	B(a)P			
H ₂ O	x	x	x	Ind.-PCB			
O ₂	x	x	x	dl-PCB			
CO ₂	x	x	x	PCDD/F			
CO	x	x	x	Benzol			
CH ₄				Formaldehyd	x	x	x
H ₂				Acetaldehyd			
NO	x	x	x	Crotonaldehyd			
NO ₂	x	x	x	Aceton			
N ₂ O				2-Butanon			
SO ₂				Ameisensäure			
C _{ges}	x	x	x	Essigsäure			
C _{ges} (Kieselgel)				Ethylacetat			
C _{CH₄}	x	x	x	Toluol			
HCl				Phenol			
HF				Σ Kresole			
NH ₃				Σ Xylenole			
SO _x	x	x	x	Σ Xylole			
As				α-Pinen			
Cd				β-Pinen			
Co				3-Caren			
Cr				Camphen			
Cu				Ethylbenzol			
Hg				Limonen			
Mn				Naphthalin			
Ni				Methylnaphthalin			
Pb				1,3-Butadien			
Sb				Pyridin			
Se				Tetrachlorethen			
Sn				2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon			
Te				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]			
TI				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]			
V							
Zn							
Gesamtstaub							
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀							
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀							
Quarzfeinstaub PM ₄							

Tab. 6: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Holzvergasung E (siehe Abschnitt 3.3). HO: Holz-, RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Elektrizitätsversorgung (D35.11.3 [1])						E									
Anlagentyp, -genehmigung: Holzvergasung, immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig															
Behandlungsprozess: Holzgasverbrennung (Motor)															
Betriebsweise	RB		RB			Betriebsweise	RB		RB						
Monat/Jahr	Juni 2010		Nov. 2010			Monat/Jahr	Juni 2010		Nov. 2010						
Parameter	Gasart		RO	RE	HO	RO	RE	Parameter	Gasart		RO	RE	HO	RO	RE
Temperatur (T)			x			x	x	PAK							
Volumenstrom (dV/dt)			x				x	B(a)P							
H ₂ O			x			x	x	Ind.-PCB							
O ₂			x		x	x	x	dl-PCB							
CO ₂			x		x	x	x	PCDD/F							
CO			x		x	x	x	Benzol		x	x		x	x	
CH ₄					x			Formaldehyd			x			x	
H ₂					x			Acetaldehyd							
NO			x			x	x	Crotonaldehyd							
NO ₂			x			x	x	Aceton							
N ₂ O								2-Butanon							
SO ₂								Ameisensäure							
C _{ges}				x			x	Essigsäure							
C _{ges} (Kieselgel)								Ethylacetat							
C _{CH4}				x			x	Toluol		x	x		x	x	
HCl				x				Phenol		x	x				
HF				x				Σ Kresole		x	x				
NH ₃								Σ Xylenole		x	x				
SO _x				x				Σ Xylole					x	x	
As								α-Pinen		x	x				
Cd								β-Pinen		x	x				
Co								3-Caren		x	x				
Cr								Camphen		x	x				
Cu								Ethylbenzol					x	x	
Hg								Limonen		x	x				
Mn								Naphthalin		x	x		x	x	
Ni								Methylnaphthalin		x	x				
Pb								1,3-Butadien		x	x				
Se								Pyridin		x	x				
Sb								Tetrachlorethen							
Sn								2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon		x	x				
Te								Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]							
Tl								Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]							
V															
Zn															
Gesamtstaub				x											
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀															
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀															
Quarzfeinstaub PM ₄															

Tab. 7: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Klärschlammverbrennung F (siehe Abschnitt 3.4). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])							F							
Anlagentyp, -genehmigung: Klärschlammverbrennung, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.3, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]														
Behandlungsprozess: Klärschlammverbrennung (Wirbelschichtofen)														
Betriebsweise	AB		AB		RB		Betriebsweise	AB		AB		RB		
Monat/Jahr	Dez. 2010		März 2011				Monat/Jahr	Dez. 2010		März 2011				
Parameter	Gasart		RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE
Temperatur (T)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)		x		x		x								
H ₂ O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
O ₂	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CO ₂	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CH ₄														
H ₂														
NO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NO ₂	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
N ₂ O		x		x		x		x		x		x		x
SO ₂	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
C _{ges}		x		x		x		x		x		x		x
C _{ges} (Kieselgel)														
C _{CH₄}														
HCl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
HF	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NH ₃				x		x		x		x		x		x
SO _x														
As				x		x		x		x		x		x
Cd				x		x		x		x		x		x
Co				x		x		x		x		x		x
Cr				x		x		x		x		x		x
Cu				x		x		x		x		x		x
Hg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn				x		x		x		x		x		x
Ni				x		x		x		x		x		x
Pb				x		x		x		x		x		x
Sb				x		x		x		x		x		x
Se														
Sn				x		x		x		x		x		x
Te														
Tl				x		x		x		x		x		x
V				x		x		x		x		x		x
Zn														
Gesamtstaub		x		x		x		x		x		x		x
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀														
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀														
Quarzfeinstaub PM ₄														
PAK	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
B(a)P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dl-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PCDD/F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Benzol														
Formaldehyd														
Acetaldehyd														
Crotonaldehyd														
Aceton														
2-Butanon														
Ameisensäure														
Essigsäure														
Ethylacetat														
Toluol														
Phenol														
Σ Kresole														
Σ Xylenole														
Σ Xylole														
α-Pinen														
β-Pinen														
3-Caren														
Camphen														
Ethylbenzol														
Limonen														
Naphthalin														
Methylnaphthalin														
1,3-Butadien														
Pyridin														
Tetrachlorethen														
2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon														
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]														
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]														

Tab. 8: Untersuchte Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Klärschlammverbrennung G (siehe Abschnitt 3.4). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])									
Anlagentyp, -genehmigung: Klärschlammverbrennung, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.3, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]									
Behandlungsprozess: Klärschlammverbrennung (Rostofen)									
Betriebsweise	RB		AB		Betriebsweise	RB		AB	
Monat/Jahr	Sept. 2011		Okt. 2011		Monat/Jahr	Sept. 2011		Okt. 2011	
Parameter	Gasart		Gasart		Parameter	Gasart		Gasart	
	RO	RE	RO	RE		RO	RE	RO	RE
Temperatur (T)	x	x	x	x	PAK	x	x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)		x		x	B(a)P	x	x	x	x
H ₂ O	x	x	x	x	Ind.-PCB	x	x	x	x
O ₂	x	x	x	x	dl-PCB	x	x	x	x
CO ₂	x	x	x	x	PCDD/F	x	x	x	x
CO	x	x	x	x	Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO	x	x	x	x	Crotonaldehyd				
NO ₂	x	x	x	x	Aceton				
N ₂ O		x		x	2-Butanon				
SO ₂	x	x	x	x	Ameisensäure				
C _{ges}		x		x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH₄}					Toluol				
HCl	x	x	x	x	Phenol				
HF	x	x	x	x	Σ Kresole				
NH ₃	x	x			Σ Xylenole				
SO _x	x	x			Σ Xylole				
As	x	x			α-Pinen				
Cd	x	x			β-Pinen				
Co	x	x			3-Caren				
Cr	x	x			Camphen				
Cu	x	x			Ethylbenzol				
Hg	x	x	x	x	Limonen				
Mn	x	x			Naphthalin				
Ni	x	x			Methylnaphthalin				
Pb	x	x			1,3-Butadien				
Sb	x	x			Pyridin				
Se					Tetrachlorethen				
Sn	x	x			2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl	x	x			Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V	x	x							
Zn									
Gesamtstaub		x		x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 9: Untersuchte Betriebsweisen (RB: Regel-, VB: Versuchsbetrieb) und Anlagen (H: Glasbruchrockner T, Glasschäumrohr O-II, J: Glasschäumrohr O-IV) und Parameter an der Blähglasherstellung (siehe Abschnitt 3.5). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Herstellung sonstiger Glaswaren (C23.19.0 [1])					H, I, J				
Anlagentyp, -genehmigung: Blähglasherstellung, immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig									
Behandlungsprozess: Altglastrocknung (H: Trockner) / Altglasgranulatblähung (I, J: Ofen II, IV)									
Betriebsweise	RB H (T)	RB I (O-II)	RB J (O-IV)	VB J (O-IV)	Betriebsweise	RB H (T)	RB I (O-II)	RB J (O-IV)	VB J (O-IV)
Monat/Jahr	Juli 2013				Monat/Jahr	Juli 2013			
Parameter \ Gasart	RE	RE	RE	RE	Parameter \ Gasart	RE	RE	RE	RE
Temperatur (T)	x	x	x	x	PAK	x	x	x	
Volumenstrom (dV/dt)	x	x	x	x	B(a)P	x	x	x	
H ₂ O	x	x	x	x	Ind.-PCB	x	x	x	
O ₂	x	x	x	x	dl-PCB	x	x	x	
CO ₂	x	x	x	x	PCDD/F	x	x	x	
CO	x	x	x	x	Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO	x	x	x	x	Crotonaldehyd				
NO ₂	x	x	x	x	Aceton				
N ₂ O	x	x	x	x	2-Butanon				
SO ₂	x	x	x	x	Ameisensäure				
C _{ges}	x	x	x	x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH₄}					Toluol				
HCl					Phenol				
HF					Σ Kresole				
NH ₃	x	x	x	x	Σ Xylenole				
SO _x					Σ Xylole				
As	x	x	x		α-Pinen				
Cd	x	x	x		β-Pinen				
Co	x	x	x		3-Caren				
Cr	x	x	x		Camphen				
Cu	x	x	x		Ethylbenzol				
Hg	x	x	x		Limonen				
Mn	x	x	x		Naphthalin				
Ni	x	x	x		Methylnaphthalin				
Pb	x	x	x		1,3-Butadien				
Sb	x	x	x		Pyridin				
Se	x	x	x		Tetrachlorethen				
Sn	x	x	x		2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te	x	x	x		Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl	x	x	x		Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V	x	x	x						
Zn									
Gesamtstaub	x	x	x						
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 10: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Schuhproduktion K (siehe Abschnitt 3.6). M: Misch-, RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Herstellung von Leder, Lederwaren, Schuhen (C15.20.0 [1])				K					
Anlagentyp, -genehmigung: Schuhproduktion, Nr. 5.1, Spalte 2 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 5.1.1.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5], Nr. 15 31. BImSchV [8]									
Behandlungsprozess: Lösemittelabscheidung / regenerative thermische Oxidation									
Betriebsweise		RB			Betriebsweise		RB		
Monat/Jahr		Sept. 2013			Monat/Jahr		Sept. 2013		
Gasart		RE1	M	RE2	Gasart		RE1	M	RE2
Parameter					Parameter				
Temperatur (T)		x	x		PAK				
Volumenstrom (dV/dt)		x	x		B(a)P				
H ₂ O		x	x		Ind.-PCB				
O ₂		x	x		di-PCB				
CO ₂		x	x		PCDD/F				
CO		x	x		Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO		x	x		Crotonaldehyd				
NO ₂		x	x		Aceton		x	x	
N ₂ O		x	x		2-Butanon		x	x	
SO ₂		x	x		Ameisensäure				
C _{ges}		x	x	x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat		x	x	
C _{CH₄}					Toluol				
HCl					Phenol				
HF					Σ Kresole				
NH ₃					Σ Xylenole				
SO _x					Σ Xylole				
As					α-Pinen				
Cd					β-Pinen				
Co					3-Caren				
Cr					Camphen				
Cu					Ethylbenzol				
Hg					Limonen				
Mn					Naphthalin				
Ni					Methylnaphthalin				
Pb					1,3-Butadien				
Sb					Pyridin				
Se					Tetrachlorethen		x	x	
Sn					2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V									
Zn									
Gesamtstaub									
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 11: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Schuhproduktion L (siehe Abschnitt 3.6). DG: Desorptions-, RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Herstellung von Leder, Lederwaren, Schuhen (C15.20.0 [1])							
Anlagentyp, -genehmigung: Schuhproduktion, Nr. 5.1, Spalte 2 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 5.1.1.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5], Nr. 15 31. BImSchV [8]							
Behandlungsprozess: Lösemittelabscheidung / katalytische Oxidation							
Betriebsweise	RB			Betriebsweise	RB		
Monat/Jahr	Feb. 2014			Monat/Jahr	Feb. 2014		
Gasart				Gasart			
Parameter	RO	DG	RE	Parameter	RO	DG	RE
Temperatur (T)	x	x	x	PAK			
Volumenstrom (dV/dt)	x		x	B(a)P			
H ₂ O	x		x	Ind.-PCB			
O ₂			x	di-PCB			
CO ₂			x	PCDD/F			
CO			x	Benzol			
CH ₄				Formaldehyd			
H ₂				Acetaldehyd			
NO			x	Crotonaldehyd			
NO ₂			x	Aceton	x	x	x
N ₂ O			x	2-Butanon	x	x	x
SO ₂			x	Ameisensäure			
C _{ges}	x	x	x	Essigsäure			
C _{ges} (Kieselgel)				Ethylacetat	x	x	x
C _{CH₄}				Toluol			
HCl				Phenol			
HF				Σ Kresole			
NH ₃				Σ Xylenole			
SO _x				Σ Xylole			
As				α-Pinen			
Cd				β-Pinen			
Co				3-Caren			
Cr				Camphen			
Cu				Ethylbenzol			
Hg				Limonen			
Mn				Naphthalin			
Ni				Methylnaphthalin			
Pb				1,3-Butadien			
Sb				Pyridin			
Se				Tetrachlorethen	x	x	x
Sn				2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon			
Te				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]			
Tl				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]			
V							
Zn							
Gesamtstaub							
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀							
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀							
Quarzfeinstaub PM ₄							

Tab. 12: Untersuchte Betriebsweisen (RB: Regel-, RB (BO): Regel-/Burn-Out-, VB: Versuchsbetrieb) und Parameter an der Elektrodenherstellung M (siehe Abschnitt 3.7). RE: Rein-, RO: Roh-, Z: Zwischengas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Herstellung elektrischer Ausrüstungen (C27.90.0 [1])											M												
Anlagentyp, -genehmigung: Elektrodenherstellung, Nr. 4.7, Spalte 1 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 4.7, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5]																							
Behandlungsprozess: Brand, Abscheidung/Oxidation organischer Stoffe																							
Betriebsweise	VB				RB			RB (BO)				Betriebsweise	VB				RB			RB (BO)			
Monat/Jahr	März 2009				August 2011							Monat/Jahr	März 2010				August 2011						
Parameter	Gasart	RO	Z1	Z2	RE	RO	Z1	RE	Z1	RE	Parameter	Gasart	RO	Z1	Z2	RE	RO	Z1	RE	Z1	RE		
Temperatur (T)			x	x	x	x	x	x	x		PAK		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Volumenstrom (dV/dt)			x	x				x			B(a)P		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
H ₂ O			x	x				x			Ind.-PCB												
O ₂			x	x				x		x	dl-PCB												
CO ₂			x	x				x		x	PCDD/F												
CO			x	x		x	x	x	x		Benzol								x				
CH ₄											Formaldehyd												
H ₂											Acetaldehyd												
NO			x	x				x		x	Crotonaldehyd												
NO ₂			x	x				x		x	Aceton												
N ₂ O											2-Butanon												
SO ₂			x	x							Ameisensäure												
C _{ges}			x	x				x		x	Essigsäure												
C _{ges} (Kieselgel)											Ethylacetat												
C _{CH4}											Toluol												
HCl											Phenol												
HF											Σ Kresole												
NH ₃											Σ Xylenole												
SO _x								x			Σ Xylole												
As											α-Pinen												
Cd											β-Pinen												
Co											3-Caren												
Cr											Camphen												
Cu											Ethylbenzol												
Hg											Limonen												
Mn											Naphthalin												
Ni											Methylnaphthalin												
Pb											1,3-Butadien												
Se											Pyridin												
Sb											Tetrachlorethen												
Sn											2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon												
Te											Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]												
Tl											Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]												
V																							
Zn																							
Gesamtstaub			x	x				x															
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀																							
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀																							
Quarzfeinstaub PM ₄																							

Tab. 13: Untersuchte Betriebsweisen (RB: Regel-, VB: Versuchsbetrieb) und Parameter am Zementwerk N (siehe Abschnitt 3.8). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Zementherstellung (C23.51.0 [1])				N					
Anlagentyp, -genehmigung: Zementwerk, Nr. 2.3, Spalte 1 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.3.1, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]									
Behandlungsprozess: Abfallmitverbrennung (Drehrohren)									
Betriebsweise	VB	RB1	RB2	Betriebsweise	VB	RB1	RB2		
Monat/Jahr	August 2009			Monat/Jahr	August 2009				
Parameter	Gasart	RE	RE	RE	Parameter	Gasart	RE	RE	RE
Temperatur (T)		x	x	x	PAK		x	x	x
Volumenstrom (dV/dt)		x	x	x	B(a)P		x	x	x
H ₂ O		x	x	x	Ind.-PCB		x	x	x
O ₂		x	x	x	dl-PCB		x	x	x
CO ₂		x	x	x	PCDD/F		x	x	x
CO		x	x	x	Benzol		x	x	x
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO		x	x	x	Crotonaldehyd				
NO ₂		x	x	x	Aceton				
N ₂ O					2-Butanon				
SO ₂					Ameisensäure				
C _{ges}		x	x	x	Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH4}					Toluol				
HCl		x	x	x	Phenol				
HF		x	x	x	Σ Kresole				
NH ₃		x	x	x	Σ Xylenole				
SO _x		x	x	x	Σ Xylole				
As		x	x	x	α-Pinen				
Cd		x	x	x	β-Pinen				
Co		x	x	x	3-Caren				
Cr		x	x	x	Camphen				
Cu		x	x	x	Ethylbenzol				
Hg		x	x	x	Limonen				
Mn		x	x	x	Naphthalin				
Ni		x	x	x	Methylnaphthalin				
Pb		x	x	x	1,3-Butadien				
Se					Pyridin				
Sb		x	x	x	Tetrachlorethen				
Sn		x	x	x	2,5-Diphenyl- 1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl		x	x	x	Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V		x	x	x					
Zn		x	x	x					
Gesamtstaub		x	x	x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀									
Quarzfeinstaub PM ₄									

Tab. 14: Untersuchte Betriebsweisen (RB: Regel-, VB: Versuchsbetrieb) und Anlagen (O-I: Kupolofen 1, O-II: Kupolofen 2) und Parameter an der Eisengießerei (siehe Abschnitt 3.9). RE: Rein-, RO: Rohgas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Metallerzeugung und -bearbeitung (C24.51.0 [1])													
Anlagentyp, -genehmigung: Eisengießerei, Nr. 3.7, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 3.7.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]													
Behandlungsprozess: Feststoffverbrennung, Schmelzen													
Betriebsweise	RB (O-I)		RB(O-II)		VB(O-I)		Betriebsweise	RB (O-I)		RB(O-II)		VB(O-I)	
Monat/Jahr	Februar 2009						Monat/Jahr	Februar 2009					
Parameter	Gasart						Parameter	Gasart					
	RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE	RO	RE	
Temperatur (T)	x	x	x	x	x	x							
Volumenstrom (dV/dt)		x		x		x							
H ₂ O	x	x	x	x	x	x							
O ₂	x	x	x	x	x	x							
CO ₂	x	x	x	x	x	x							
CO	x	x	x	x	x	x							
CH ₄													
H ₂													
NO	x	x	x	x	x	x							
NO ₂	x	x	x	x	x	x							
N ₂ O													
SO ₂	x	x	x	x	x	x							
C _{ges}		x		x		x							
C _{ges} (Kieselgel)													
C _{CH4}													
HCl													
HF													
NH ₃													
SO _x													
As													
Cd													
Co													
Cr													
Cu													
Hg													
Mn													
Ni													
Pb													
Se													
Sb													
Sn													
Te													
Tl													
V													
Zn													
Gesamtstaub		x		x		x							
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀													
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀													
Quarzfeinstaub PM ₄													
PAK													
B(a)P													
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x							
dl-PCB	x	x	x	x	x	x							
PCDD/F	x	x	x	x	x	x							
Benzol													
Formaldehyd													
Acetaldehyd													
Crotonaldehyd													
Aceton													
2-Butanon													
Ameisensäure													
Essigsäure													
Ethylacetat													
Toluol													
Phenol													
Σ Kresole													
Σ Xylenole													
Σ Xylole													
α-Pinen													
β-Pinen													
3-Caren													
Camphen													
Ethylbenzol													
Limonen													
Naphthalin													
Methylnaphthalin													
1,3-Butadien													
Pyridin													
Tetrachlorethen													
2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon													
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]													
Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]													

Tab. 15: Untersuchte Betriebsweisen (RB: Regel-, VB: Versuchsbetrieb) und Parameter an der Kaffeerösterei P (siehe Abschnitt 3.10). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Verarbeitung von Kaffee und Tee (C10.83.0 [1])				P			
Anlagentyp, -genehmigung: Kaffeerösterei, Nr. 7.29, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 7.29.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]							
Behandlungsprozess: Rösten, katalytische Oxidation organischer Stoffe							
Betriebsweise	RB1/VB		RB2	Betriebsweise	RB1/VB		RB2
Monat/Jahr	Mai 2010		2011	Monat/Jahr	Mai 2010		2011
Parameter	Gasart	RE1	RE2	Parameter	Gasart	RE1	RE2
Temperatur (T)		x	x	PAK			
Volumenstrom (dV/dt)		x	x	B(a)P			
H ₂ O		x	x	Ind.-PCB			
O ₂		x	x	dl-PCB			
CO ₂		x	x	PCDD/F			
CO		x	x	Benzol			
CH ₄			x	Formaldehyd		x	x
H ₂				Acetaldehyd			
NO		x		Crotonaldehyd			
NO ₂		x		Aceton			
N ₂ O				2-Butanon			
SO ₂				Ameisensäure		x	
C _{ges}		x	x	Essigsäure		x	
C _{ges} (Kieselgel)				Ethylacetat			
C _{CH4}		x		Toluol			
HCl		x		Phenol			
HF		x		Σ Kresole			
NH ₃				Σ Xylenole			
SO _x				Σ Xylole			
As				α-Pinen			
Cd				β-Pinen			
Co				3-Caren			
Cr				Camphen			
Cu				Ethylbenzol			
Hg				Limonen			
Mn				Naphthalin			
Ni				Methylnaphthalin			
Pb				1,3-Butadien			
Se				Pyridin			
Sb				Tetrachlorethen			
Sn				2,5-Diphenyl- 1,4-Benzochinon			
Te				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]			
Tl				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]			
V							
Zn							
Gesamtstaub			x				
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀							
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀							
Quarzfeinstaub PM ₄							

Tab. 16: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Räucherei Q (siehe Abschnitt 3.11). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Fleischverarbeitung (C10.13.0 [1])							
Anlagentyp, -genehmigung: Räucherei, Nr. 7.5, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 7.5.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]							
Behandlungsprozess: Raucherzeugung, Abscheidung organischer Stoffe							
Betriebsweise	RB1	RB2		Betriebsweise	RB1	RB2	
Monat/Jahr	Oktober 2010			Monat/Jahr	Oktober 2010		
Parameter	Gasart	RE	RE	Parameter	Gasart	RE	RE
Temperatur (T)		x	x	PAK			x
Volumenstrom (dV/dt)		x	x	B(a)P			x
H ₂ O		x	x	Ind.-PCB			
O ₂		x	x	dl-PCB			
CO ₂		x	x	PCDD/F			
CO		x	x	Benzol			x
CH ₄				Formaldehyd			x
H ₂				Acetaldehyd			x
NO		x	x	Crotonaldehyd			x
NO ₂		x	x	Aceton			
N ₂ O				2-Butanon			
SO ₂				Ameisensäure			
C _{ges}		x	x	Essigsäure			
C _{ges} (Kieselgel)		x	x	Ethylacetat			
C _{CH₄}				Toluol			
HCl				Phenol			x
HF				Σ Kresole			
NH ₃				Σ Xylenole			
SO _x				Σ Xylole			
As				α-Pinen			
Cd				β-Pinen			
Co				3-Caren			
Cr				Camphen			
Cu				Ethylbenzol			
Hg				Limonen			
Mn				Naphthalin			
Ni				Methylnaphthalin			
Pb				1,3-Butadien			
Se				Pyridin			
Sb				Tetrachlorethen			
Sn				2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon			
Te				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]			
Tl				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]			
V							
Zn							
Gesamtstaub			x				
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀			x				
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀							
Quarzfeinstaub PM ₄							

Tab. 17: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an den Sandtrocknern der Quarzsandwerke R und S (siehe Abschnitt 3.12). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Gewinnung von Kies, Sand, Ton und Kaolin (B08.12.0 [1])					R, S				
Anlagentyp Quarzsandwerk Sandtrockner nach Immissionsschutz Nr. 2.2, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5], bergrechtlich genehmigt durch Hauptbetriebspläne									
Behandlungsprozess: Quarzsand Trocknung									
Betriebsweise	RB R		RB S		Betriebsweise	RB R		RB S	
Monat/Jahr	Okt. 2012	März 2013	Dez. 2012	Apr. 2013	Monat/Jahr	Okt. 2012	März 2013	Dez. 2012	Apr. 2013
Parameter	RE		RE		Parameter	RE		RE	
Temperatur (T)		x		x	PAK				
Volumenstrom (dV/dt)		x		x	B(a)P				
H ₂ O		x		x	Ind.-PCB				
O ₂		x		x	dl-PCB				
CO ₂		x		x	PCDD/F				
CO		x		x	Benzol				
CH ₄					Formaldehyd				
H ₂					Acetaldehyd				
NO		x		x	Crotonaldehyd				
NO ₂		x		x	Aceton				
N ₂ O					2-Butanon				
SO ₂		x		x	Ameisensäure				
C _{ges}					Essigsäure				
C _{ges} (Kieselgel)					Ethylacetat				
C _{CH₄}					Toluol				
HCl					Phenol				
HF					Σ Kresole				
NH ₃					Σ Xylenole				
SO _x					Σ Xylole				
As					α-Pinen				
Cd					β-Pinen				
Co					3-Caren				
Cr					Camphen				
Cu					Ethylbenzol				
Hg					Limonen				
Mn					Naphthalin				
Ni					Methylnaphthalin				
Pb					1,3-Butadien				
Se					Pyridin				
Sb					Tetrachlorethen				
Sn					2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon				
Te					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]				
Tl					Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]				
V									
Zn									
Gesamtstaub		x		x					
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀									
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀		x		x					
Quarzfeinstaub PM ₄		x		x					

Tab. 18: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter am Farbsandofen des Quarzsandwerks T (siehe Abschnitt 3.12). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Herstellung von sonst. Erzeugnissen aus nichtmetallischen Mineralien (C23.99.0 [1])			T	
Anlagentyp, -genehmigung: Quarzsandwerk Farbsandanlage, Nr. 2.4, Spalte 2 b) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.4.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]				
Behandlungsprozess: Quarzsandbeschichtung (Drehrohrofen)				
Betriebsweise	RB		Betriebsweise	RB
Monat/Jahr	Okt. 2012		Monat/Jahr	Okt. 2012
Gasart			Gasart	
Parameter	RE		Parameter	RE
Temperatur (T)	x		PAK	
Volumenstrom (dV/dt)	x		B(a)P	
H ₂ O	x		Ind.-PCB	
O ₂	x		dl-PCB	
CO ₂	x		PCDD/F	
CO	x		Benzol	
CH ₄			Formaldehyd	
H ₂			Acetaldehyd	
NO	x		Crotonaldehyd	
NO ₂	x		Aceton	
N ₂ O			2-Butanon	
SO ₂	x		Ameisensäure	
C _{ges}			Essigsäure	
C _{ges} (Kieselgel)			Ethylacetat	
C _{CH₄}			Toluol	
HCl			Phenol	
HF			Σ Kresole	
NH ₃			Σ Xylenole	
SO _x			Σ Xylole	
As			α-Pinen	
Cd			β-Pinen	
Co			3-Caren	
Cr			Camphen	
Cu			Ethylbenzol	
Hg			Limonen	
Mn			Naphthalin	
Ni			Methylnaphthalin	
Pb			1,3-Butadien	
Se			Pyridin	
Sb			Tetrachlorethen	
Sn			2,5-Diphenyl- 1,4-Benzochinon	
Te			Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]	
Tl			Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]	
V				
Zn				
Gesamtstaub	x			
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀				
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀	x			
Quarzfeinstaub PM ₄	x			

Tab. 19: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Sandklassier-/sichteranlage des Quarzsandwerks U (siehe Abschnitt 3.12). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Gewinnung von Kies, Sand, Ton und Kaolin (B08.12.0 [1])			
Anlagentyp, -genehmigung: Quarzsandwerk Sandklassier-/sichteranlage, Nr. 2.2, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]			
Behandlungsprozess: Quarzsand Trennung/Reinigung			
Betriebsweise	RB	Betriebsweise	RB
Monat/Jahr	Dezember 2012	Monat/Jahr	Dezember 2012
Gasart	RE	Gasart	RE
Parameter		Parameter	
Temperatur (T)	x	PAK	
Volumenstrom (dV/dt)	x	B(a)P	
H ₂ O	x	Ind.-PCB	
O ₂		dl-PCB	
CO ₂		PCDD/F	
CO		Benzol	
CH ₄		Formaldehyd	
H ₂		Acetaldehyd	
NO		Crotonaldehyd	
NO ₂		Aceton	
N ₂ O		2-Butanon	
SO ₂		Ameisensäure	
C _{ges}		Essigsäure	
C _{ges} (Kieselgel)		Ethylacetat	
C _{CH₄}		Toluol	
HCl		Phenol	
HF		Σ Kresole	
NH ₃		Σ Xylenole	
SO _x		Σ Xylole	
As		α-Pinen	
Cd		β-Pinen	
Co		3-Caren	
Cr		Camphen	
Cu		Ethylbenzol	
Hg		Limonen	
Mn		Naphthalin	
Ni		Methylnaphthalin	
Pb		1,3-Butadien	
Se		Pyridin	
Sb		Tetrachlorethen	
Sn		2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon	
Te		Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]	
Tl		Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]	
V			
Zn			
Gesamtstaub	x		
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀			
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀	x		
Quarzfeinstaub PM ₄	x		

Tab. 20: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Kiesklassier-/brechanlage des Kieswerks V (siehe Abschnitt 3.13). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbe-
scheids.

Wirtschaftszweig: Gewinnung von Kies, Sand, Ton und Kaolin (B08.12.0 [1])					
Anlagentyp, -genehmigung: Kieswerk Kiesklassier-/brechanlage, Nr. 2.2, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] ent- sprechend Nr. 2.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]					
Behandlungsprozess: Kies Trennung/Zerkleinerung					
Betriebsweise	RB		Betriebsweise	RB	
Monat/Jahr	Mai 2012	Sept. 2012	Monat/Jahr	Mai 2012	Sept. 2012
Gasart	RE		Gasart	RE	
Parameter	RE		Parameter	RE	
Temperatur (T)	x		PAK		
Volumenstrom (dV/dt)	x		B(a)P		
H ₂ O	x		Ind.-PCB		
O ₂			dl-PCB		
CO ₂			PCDD/F		
CO			Benzol		
CH ₄			Formaldehyd		
H ₂			Acetaldehyd		
NO			Crotonaldehyd		
NO ₂			Aceton		
N ₂ O			2-Butanon		
SO ₂			Ameisensäure		
C _{ges}			Essigsäure		
C _{ges} (Kieselgel)			Ethylacetat		
C _{CH₄}			Toluol		
HCl			Phenol		
HF			Σ Kresole		
NH ₃			Σ Xylenole		
SO _x			Σ Xylole		
As			α-Pinen		
Cd			β-Pinen		
Co			3-Caren		
Cr			Camphen		
Cu			Ethylbenzol		
Hg			Limonen		
Mn			Naphthalin		
Ni			Methylnaphthalin		
Pb			1,3-Butadien		
Se			Pyridin		
Sb			Tetrachlorethen		
Sn			2,5-Diphenyl- 1,4-Benzochinon		
Te			Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]		
Tl			Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]		
V					
Zn					
Gesamtstaub	x				
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀					
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀	x				
Quarzfeinstaub PM ₄	x				

Tab. 21: Untersuchte Betriebsweise (RB: Regelbetrieb) und Parameter an der Granitklassier-/brechanlage des Granitwerks W (siehe Abschnitt 3.14). RE: Reingas; gelb hinterlegt: Parameter des Genehmigungsbescheids.

Wirtschaftszweig: Be- und Verarbeitung von Naturwerkstoffen und Natursteinen (B08.11.0 [1])							
Anlagentyp, -genehmigung: Granitwerk Granitklassier-/brechanlage, Nr. 2.2, Spalte 2 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.2, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]							
Behandlungsprozess: Granit Trennung/Zerkleinerung							
Betriebsweise	RB			Betriebsweise	RB		
Monat/Jahr	Okt. 2012	Nov. 2012	Mai 2013	Monat/Jahr	Okt. 2012	Nov. 2012	Mai 2013
Gasart				Gasart			
Parameter	RE			Parameter	RE		
Temperatur (T)	x			PAK			
Volumenstrom (dV/dt)	x			B(a)P			
H ₂ O	x			Ind.-PCB			
O ₂				dl-PCB			
CO ₂				PCDD/F			
CO				Benzol			
CH ₄				Formaldehyd			
H ₂				Acetaldehyd			
NO				Crotonaldehyd			
NO ₂				Aceton			
N ₂ O				2-Butanon			
SO ₂				Ameisensäure			
C _{ges}				Essigsäure			
C _{ges} (Kieselgel)				Ethylacetat			
C _{CH₄}				Toluol			
HCl				Phenol			
HF				Σ Kresole			
NH ₃				Σ Xylenole			
SO _x				Σ Xylole			
As				α-Pinen			
Cd				β-Pinen			
Co				3-Caren			
Cr				Camphen			
Cu				Ethylbenzol			
Hg				Limonen			
Mn				Naphthalin			
Ni				Methylnaphthalin			
Pb				1,3-Butadien			
Se				Pyridin			
Sb				Tetrachlorethen			
Sn				2,5-Diphenyl-1,4-Benzochinon			
Te				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. I TA Luft [6]			
Tl				Krebserz. Stoffe Nr. 5.2.7.1.1 Kl. III TA Luft [6]			
V							
Zn							
Gesamtstaub	x						
Feinstaub PM _{2,5} /PM ₁₀							
Feinstaub PM ₄ /PM ₁₀	x						
Quarzfeinstaub PM ₄	x						

3 Ergebnisse und Bewertung

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Anlagen mit ihren Verfahren und Betriebsweisen kurz vorgestellt und die Ergebnisse der Emissionsmessungen beschrieben und erläutert. Gleichartige Anlagentypen werden abschnittsweise zusammengefasst, um direkte Vergleiche zu ermöglichen. Detaillierte Beschreibungen der Anlagentechnik sowie Darstellungen und Diskussionen der Ergebnisse enthalten die ausführlichen Untersuchungsberichte. Sie wurden den zuständigen Stellen (StMUV, Anlagenbetreiber, Genehmigungs-/Aufsichtsbehörden) zur Verfügung gestellt. Da sie firmeninterne Daten enthalten, die der Geheimhaltung unterliegen, und eine Zustimmung der Betreiber zur Weitergabe nicht vorliegt, sind die ausführlichen Untersuchungsberichte öffentlich nicht zugänglich.

Die Emissionen werden als spezifische Größen (pro Volumen oder Zeit) angegeben:

- Massenkonzentration: Masse der emittierten Stoffe oder Stoffgruppen pro Volumen, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa).
- Massenstrom: Masse der emittierten Stoffe oder Stoffgruppen pro Zeit.

Für den Anfahrbetrieb der Anlagen sind – soweit der Genehmigungsbescheid hierzu explizit keine Emissionsbegrenzungen vorgibt – die für den Regelbetrieb festgelegten Emissionsbegrenzungen nicht bindend. Entsprechend der allgemeinen Vorgaben der TA Luft Nr. 5.1.2 [6] sollten die Emissionen im Anfahrbetrieb das Zweifache der für den Regelbetrieb festgelegten Begrenzungen nicht überschreiten.

Für den Regelbetrieb der Anlagen gelten die Emissionsbegrenzungen als sicher eingehalten, wenn alle Einzelmessungen (y) zuzüglich der erweiterten Messunsicherheit (U_p) nach Rundung des Summenwerts ($y + U_p$) gemäß DIN 1333 [9] und anschließender Wertangabe mit der gleichen Einheit und Stellenzahl wie die Emissionsbegrenzung im Genehmigungsbescheid die im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

Für die genehmigten, zeitlich befristeten Versuchsbetriebe der Anlagen gelten individuelle Sonderregelungen hinsichtlich der erlaubten Höhe der Emissionen. Diese gestatten im Ausnahmefall eine Überschreitung der für den Regelbetrieb festgelegten Emissionsbegrenzungen. Dem Aspekt des Schutzes der im BImSchG [2] genannten Schutzgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen wird Rechnung getragen.

3.1 Biomasseheiz(kraft)werke

In den Biomasseheiz(kraft)werken wird durch Verbrennung von Biomasse in Öfen mit Rostfeuerung thermische Energie erzeugt, die zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt wird. Nach dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) [10] waren Ende 2011 bayernweit 62 Biomasseheiz(kraft)werke mit einer elektrischen Leistung von 196 MW in Betrieb. Aufgrund der nachhaltigen und klimaschonenden Energieerzeugung nehmen Anzahl und spezifische Leistung der Anlagen bayern- und bundesweit zu.

Die Abb. 1 zeigt Grundfließbilder der drei untersuchten Biomasseheiz(kraft)werke und Tab. 22 eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

In der Anlage A kommen vorwiegend naturbelassene Hölzer (Holzhackschnitzel), in der Anlage B ausschließlich naturbelassene Hölzer (Holzhackschnitzel) und in der Anlage C vorwiegend Althölzer der Kategorien AI bis AIV (gemäß AltholzV [11]) zum Einsatz. Die Brennstoffe werden in Bunkern vorgehalten und mit Förderaggregaten den Öfen mit Rostfeuerung zugeführt. Aus der Enthalpie der Abgase wird in den Abhitzeesseln Dampf für einen rechtsläufigen Kreisprozess (Dampfturbine mit

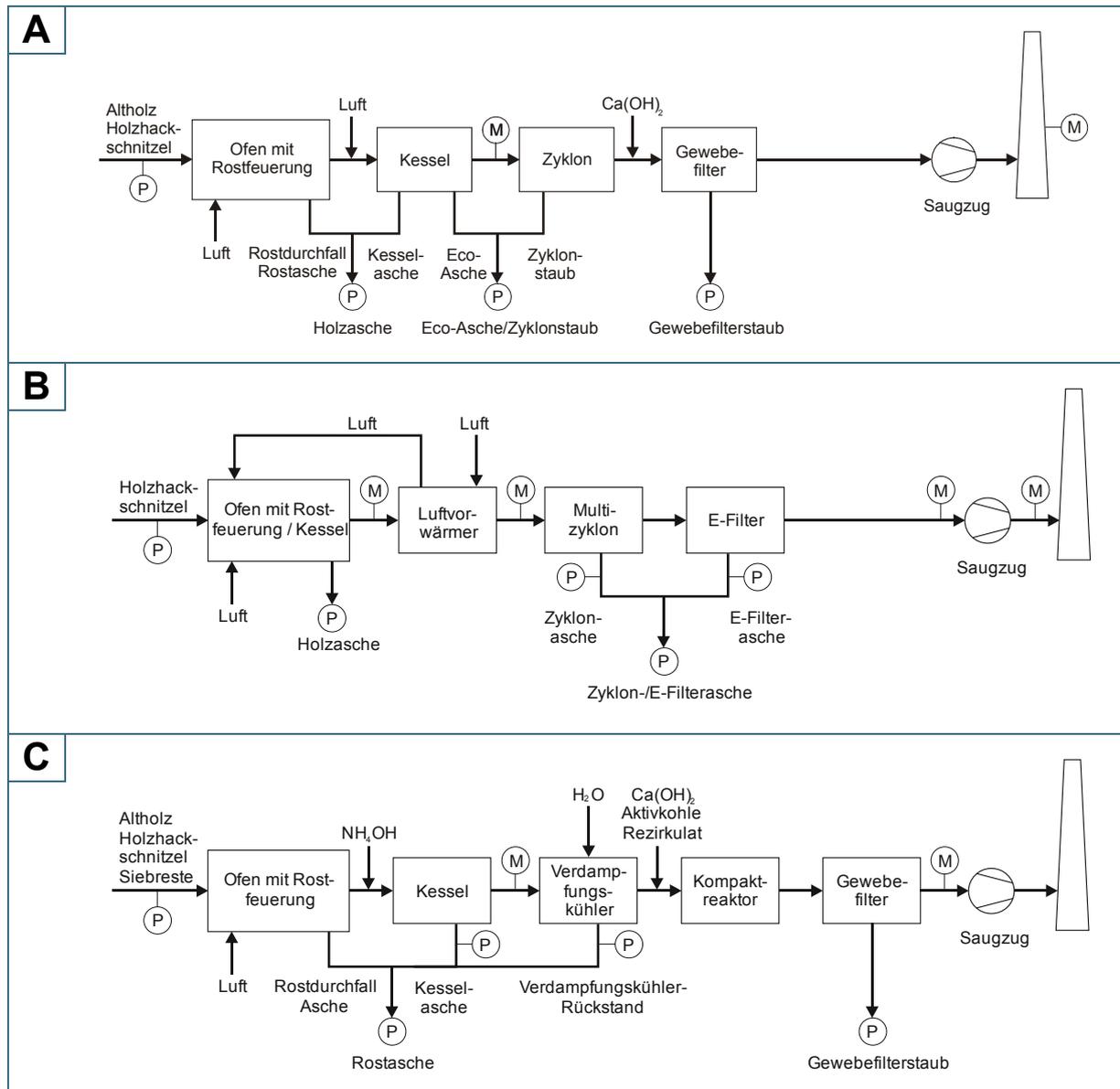


Abb. 1: Grundfließbilder der drei Biomasseheiz(kraft)werke A, B und C mit Abgasmessstellen M und Feststoffprobenahmestellen P.

Generator) und/oder Heiz-/Kühlzwecke (Adsorptionskältemaschine) erzeugt. In Abhängigkeit von Anlagengröße und Schadstoffbelastung der Brennstoffe sind zur Minderung der Emissionen unterschiedlich konzipierte Abgasreinigungsanlagen (siehe S. 6f., Tab. 1) installiert. Bei dem Verbrennungsprozess fallen als feste Rückstände Aschen, Stäube und Abgasreinigungsprodukte an.

Untersuchungsschwerpunkte waren die Abgasemissionen an gasförmigen und staubgebundenen anorganischen Schadstoffen, Gesamtstaub sowie (hoch-)toxischen organischen Schadstoffen.

Regelbetrieb

An den Biomasseheiz(kraft)werken fanden jeweils ein bis zwei Wochen nach dem Anfahren Abgasuntersuchungen im regulären Anlagenbetrieb statt. In Tab. 23, S. 30, sind die in den Genehmigungsbescheiden festgelegten Emissionsbegrenzungen den ermittelten Emissionswerten (Mittel- und Maximalwerte) im Abgas gegenübergestellt. Die Emissionsbegrenzungen in den Genehmigungsbescheiden orientieren sich bei den Anlagen A und B an der TA Luft [6] und bei der Anlage C an der 17. BImSchV (2003) [7].

Bezüglich der Ausschöpfung der gültigen Emissionsbegrenzungen ergibt sich unter Berücksichtigung der Messunsicherheit folgende Reihenfolge: Stickstoffmon-/dioxid maximal zu 70 %, Gesamtstaub zu

Tab. 22: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Biomasseheiz(kraft)werke A, B und C.

Auslegungsdaten	Anlage A	Anlage B	Anlage C
Feuerungs-/Kesselanlage	Rostofen (wassergekühlter Vorschub-Rost) Naturumlauf-Wasserrohrkessel	Rostofen (wassergekühlter Vorschub-Rost) Zwangsumlauf-Flammrohr-Rauchrohrkessel	Rostofen (wassergekühlter Vorschub-Rost) Naturumlauf-Zweiweg-Eckrohrkessel
Feuerungswärmeleistung	32 MW	3 MW	21,4 MW
Genehmigte Brennstoffe	Naturbelassenes Holz und Rinde aus Forstwirtschaft und Landschaftspflege, Altholz Kategorie AI und AII [11]	Naturbelassenes Holz (Holzhackschnitzel)	Naturbelassenes Holz einschließlich anhaftender Rinde sowie Reisig und Zapfen, gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz, Sperrholz, Span-, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz ¹⁾ , gemischte Siedlungsabfälle ²⁾
Eingesetzte Brennstoffe	Waldhackschnitzel (20 Mass.-%), Grünschnitt (80 Mass.-%)	Naturbelassenes Holz (100 Mass.-% Holzhackschnitzel, Qualität G 100/W 30 [12])	Altholz Kategorien [11]: AI bis AIII (58 Mass.-%), A IV (15 Mass.-%), Waldholz (15 Mass.-%), Siebreste (12 Mass.-%)
Brennstoffdurchsatz	12,5 Mg/h	0,74 Mg/h	7,0 Mg/h
Dampfleistung max.	41,0 Mg/h (Nennlast: 35,0 Mg/h)	–	24 Mg/h (Auslegung)
Abgasreinigungsanlage	Multizyklon, Gewebefilter (Flugstromverfahren)	Multizyklon, Elektrofilter	SNCR, Zyklon, Gewebefilter (Flugstromverfahren)
Rückstände	Rostasche, Rostdurchfall, Kesselasche, Eco-Asche, Zyklonstaub, Gewebefilterstaub	Rostasche, Rostdurchfall, Kesselasche, Zyklonstaub, Elektrofilterstaub	Rostasche, Rostdurchfall, Kesselasche, VDK-Rückstand, Gewebefilterstaub
Untersuchte Feststoffe	Holz, Holzasche (Gemisch Rostasche, Rostdurchfall, Kesselasche, Eco-Asche, Zyklonstaub), Gemisch Zyklonstaub/Eco-Asche, Gewebefilterstaub	Holz, Holzasche (Gemisch Rostasche, Rostdurchfall, Kesselasche), Gemisch Zyklonstaub/Elektrofilterstaub, Zyklonstaub, Elektrofilterstaub	Holzmisch, Holzasche (Gemisch Holzasche, Rostdurchfall, Kesselasche, VDK-Rückstand), Kesselasche, VDK-Rückstand, Gewebefilterstaub

¹⁾ mit Ausnahme von Holzabfällen, die halogenorganische Verbindungen oder Schwermetalle infolge der Behandlung mit Holzschutzmitteln oder infolge einer Beschichtung enthalten können und zu denen insbesondere Holzabfälle aus Bau- und Abbrucharbeiten gehören. Altholz der Kategorien AI bis AIV [11]

²⁾ Anlage für den wechselnden Betrieb mit Müll (nur Haus-, Sperrmüll) ausgestattet und genehmigungsrechtlich zugelassen

42 %, gasförmige anorganische Chlorverbindungen zu 22 %, Quecksilber zu 14 %, Schwefeldi-/trioxid zu 6 %, gasförmige anorganische Fluorverbindungen zu weniger als 3 %, polychlorierte Dibenzop-dioxinen/-furane zu weniger als 2 % sowie Summe Cadmium, Thallium bzw. Summe Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Cobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn und Benzo(a)pyren zu weniger als

1 %. Kohlenstoffmonoxid erreicht an der Anlage A maximal 80 % des Grenzwerts, organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff) an der Anlage B maximal 3 %. Bei Anlage C kam es bei Kohlenstoffmonoxid sechsmal und bei Gesamtkohlenstoff einmal zu(r) Grenzwertüberschreitung(en). Als Ursache wurde eine Störung im Bereich der Dampfmengenmessung ermittelt. Nach dem Tausch bzw. der Reparatur der defekten Komponenten wurden auch an Anlage C die Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenstoff eingehalten.

Die Emissionen kanzerogener bzw. schwer abbaubarer, hochtoxischer Stoffe (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle sowie polychlorierte Dibenzop-dioxine/-furane) sind im Regelbetrieb an allen Biomasseheiz(kraft)werken sehr gering.

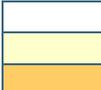
Tab. 23: Mittel- und Maximalwerte sowie Maximalwerte inkl. Messunsicherheit der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den Biomasseheiz(kraft)werken A, B und C (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
Volumenstrom $\times 10^{-3}$	m ³ /h	59,3	67,0	70,4	–
		7,02	8,09	8,49	–
		36,8	46,2	48,5	–
Temperatur	°C	145	154	157	–
		160	165	168	–
		153	154	157	–
O ₂	Vol.-%	7,9	9,1	9,6	–
		7,7	8,8	9,2	–
		8,0	10,1	10,6	–
CO ₂	Vol.-%	12,6 ¹⁾	14,5 ¹⁾	15,9 ¹⁾	–
		12,7 ¹⁾	13,5 ¹⁾	14,2 ¹⁾	–
		12,8 ¹⁾	14,5 ¹⁾	15,2 ¹⁾	–
CO	g/m ³	0,110	0,219	0,241	0,30 ¹⁾
		0,030	0,040	0,042	0,30 ^{1,2)}
	mg/m ³	38,3	285 ^{***)}	299 ^{***)}	100 ¹⁾
SO ₂	mg/m ³	–	–	–	–
		25,5 ¹⁾	35,8 ¹⁾	37,6 ¹⁾	–
		–	–	–	–
Σ SO ₂ , SO ₃	g/m ³	0,008	0,014	0,015	0,70 ¹⁾
		–	–	–	–
Σ NO, NO ₂	g/m ³	9,6	11,0	12,1	200 ^{1,7)}
		0,267	0,335	0,352	0,50 ¹⁾
	mg/m ³	0,310	0,334	0,351	0,50 ^{1,2)}
N ₂ O	mg/m ³	288	356	374	500 ^{1,7)}
		9,7 ¹⁾	15,8 ¹⁾	16,6 ¹⁾	–
		4,6 ¹⁾	6,0 ¹⁾	6,3 ¹⁾	–
C _{ges}	mg/m ³	2,1 ¹⁾	20,3 ¹⁾	21,3 ¹⁾	–
		0,1	0,3	0,3	20 ¹⁾
		0,1	0,5	0,5	20 ^{1,2)}
NH ₃	mg/m ³	1,9	28,4 ^{****)}	29,8 ^{****)}	20 ^{1,7)}
		10,3 ¹⁾	10,9 ¹⁾	12,0 ¹⁾	–
		–	–	–	–
					60 ^{1,7)}

Anlage A

Anlage B

Anlage C



Tab. 23 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte sowie Maximalwerte inkl. Messunsicherheit der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den Biomasseheiz(kraft)-werken A, B und C.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
HCl	mg/m ³	3,6	5,9	6,5	30 ¹⁾
		2,4 ^{*)}	2,7 ^{*)}	3,0 ^{*)}	–
		3,2	4,7	5,2	60 ^{1), 7)}
HF	mg/m ³	< 0,1 ^{*)}	< 0,2 ^{*)}	< 0,2 ^{*)}	–
		< 0,1 ^{*)}	< 0,1 ^{*)}	< 0,1 ^{*)}	–
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	4 ^{1), 7)}
Hg	mg/m ³	0,002 ^{*)}	0,002 ^{*)}	0,003 ^{*)}	–
		0,002 ^{*)}	0,003 ^{*)}	0,003 ^{*)}	–
		0,003	0,006	0,007	0,05 ¹⁾
Σ Cd, Tl ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	< 0,001	< 0,001	0,05 ³⁾
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	0,0040	0,0048	0,5 ³⁾
Σ B(a)P, As, Cd, Co, Cr ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	< 0,001	< 0,001	0,05 ³⁾
B(a)P	mg/m ³	–	< 0,001	< 0,001	0,01 ⁴⁾
		–	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	–
		–	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	–
PAK ^{**)}	µg/m ³	–	0,87 ^{*)}	1,13 ^{*)}	–
		–	0,94 ^{*)}	1,22 ^{*)}	–
		–	0,59 ^{*)}	0,77 ^{*)}	–
Ind.-PCB ^{**)}	ng/m ³	–	0,13 ^{*)}	0,17 ^{*)}	–
		–	0,25 ^{*)}	0,33 ^{*)}	–
		–	0,09 ^{*)}	0,12 ^{*)}	–
dl-PCB ^{**)}	ng WHO-TEQ/m ³	–	< 0,01 ^{*)}	< 0,01 ^{*)}	–
		–	< 0,01 ^{*)}	< 0,01 ^{*)}	–
		–	< 0,01 ^{*)}	< 0,01 ^{*)}	–
PCDD/F ^{**)}	ng I-TEQ/m ³	–	< 0,001	0,001	0,1 ⁵⁾
		–	0,001 ^{*)}	0,001 ^{*)}	–
		–	0,001	0,002	0,1 ⁶⁾
Gesamtstaub	mg/m ³	0,2	0,7	0,8	40 ^{1), 7)}
		16,7	19,5	22,4	100 ^{1), 2)}
		0,2	0,2	0,23	30 ¹⁾

Anlage A	
Anlage B	
Anlage C	

^{*)} Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%
^{**)} Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt
^{***)} Erhöhter Wert als Folge einer Betriebsstörung (Ausfall Dampfmenagemessung), Grenzwert wurde nach Reparatur eingehalten
¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%
²⁾ Laut Nr. 2.7 Abs. 2 Buchstabe a TA Luft [6] ist der Halbstundenmittelwert auf das Zweifache der im Genehmigungsbescheid festgelegten Konzentration zu begrenzen.
³⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (> 0,5 h, < 2 h)
⁴⁾ Mittelwert über Probenahmedauer, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%
⁵⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (> 6 h), bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%
⁶⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (> 6 h)
⁷⁾ Umrechnung der Emissionswerte auf den Bezugssauerstoffgehalt nur für Zeiten, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt

Anfahrbetrieb

Die Biomasseheiz(kraft)werke werden mindestens einmal pro Jahr zu Revisionszwecken abgeschaltet und nach zwei bis vier Wochen Stillstand aus dem Kaltzustand wieder angefahren. Bei der Inbetriebnahme sind die Anlagen unter Berücksichtigung werkstofflicher Gegebenheiten (z. B. Trocknen erneuerter Feuerfestzustellung, Wärmeausdehnung Kessel etc.) wieder in den stationären Betriebszustand Regelbetrieb (Gaszusammensetzung, Temperatur, Strömung etc.) zu bringen.

Als Beginn der Anfahrvorgänge wurden bei den Untersuchungen i. d. R. die Entzündung des Brennstoffs zum Aufheizen der Anlage und als Ende (quasi-)stationäre Verbrennungsbedingungen definiert (vgl. Tab. 24). An der Anlage A begann und endete die Anfahruntersuchung jeweils früher (Beginn der Vorbelüftung bzw. nach dem Abfahren der Anlage am Ende des Anfahrvorgangs wegen Materialstaus im Ascheabwurfschacht). Die Dauer der Anfahrvorgänge richtete sich nach der Art und dem Umfang der Revisionsarbeiten (z. B. Erneuerungsmaßnahmen an der Feuerfestzustellung etc.) und den Vorgaben der Anlagen- und Kesselbauer (Aufheiz- bzw. Trockenheizprogramm für Feuerraum mit vorgegebenen Gradienten- und Haltephasen). Die Anfahrvorgänge dauerten 24 bis 32 ½ Stunden.

Tab. 24: Revisionsumfang sowie betriebstechnische Ereignisse, die Beginn, Ende und Dauer der Anfahruntersuchungen an den Biomasseheiz(kraft)werken A, B und C definieren.

	Anlage A	Anlage B	Anlage C
Revisionsumfang	Reinigung/Kontrolle Feuerungs-, Kesselsystem.		
	Erneuerung Schadstellen der Feuerfestzustellung (Schamotte).		Erneuerung Schadstellen der Feuerfestzustellung (Platten, Cladding Decke 1. Zug), Reinigung/Kontrolle Abgasreinigungssystem. Erneuerung Abgasverteiler vor Gewebefilter, Gewebefilterschläuche (teilweise), Turbinenrevision
Untersuchungsbeginn	Start Vorbelüftung	Entzünden des Brennstoffs (Scheitholz) auf dem Rost	Start Anfahrbrenner
Untersuchungsende	Betriebsstörung Materialstau im Ascheabwurfschacht, Abfahren Anlage	2 h nach Erreichen des stationären Betriebszustandes bei Vollast	6 h nach Holzaufgabe
Untersuchungsdauer	24,0 h	32,5 h	24,5 h

Die Abgasuntersuchungen erfolgten gemäß einer Strategie, die Informationen über den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen liefert, möglichen Überfrachtungen von Probenahmeab-/adsorbentien Rechnung trägt und auf die o. g. Biomasseheiz(kraft)werke anwendbar ist. In Abhängigkeit von der unkorrigierten Feuerraumtemperatur bzw. der Rohgastemperatur (Alternativkriterium) wurden die Anfahrvorgänge in bis zu vier Probenahmephasen (0: Vorbelüftung; I bis III: Aufheizen) unterteilt. In Tab. 25, S. 35, sind die während der Anfahrvorgänge erfassten Parameter als Mittelwerte für diese Phasen dargestellt.

Bei den Anlagen A und B ist der Abgasvolumenstrom, abgesehen von der Vorbelüftung (Anlage A, Phase 0), stets geringer als im Regelbetrieb. Die Abgastemperaturen steigen von der Phase I bis III auf die Regelbetriebswerte an. Abweichend davon sind an der Anlage C der Abgasvolumenstrom und die Abgastemperatur während des direkten Aufheizens mit Brennstoff aufgrund der Vorheizung des Kessels mit Speisewasser und angewärmter Primärluft (über HD-Luftvorwärmer; Energieauskopplung von weiterer Verbrennungslinie) in etwa so hoch wie im Regelbetrieb.

Für Kohlenstoffmonoxid zeigen sich in einzelnen bzw. allen Phasen des Aufheizbetriebs (Anlage B, C bzw. Anlage A) bis zu achtfach höhere Emissionen als im Regelbetrieb. Dies ist auf nicht vermeidbare, unvollständige Verbrennungszustände der Brennstoff/Luft-Gemische in den Feuerräumen bzw. die Bildung von „kaltem“ Kohlenstoffmonoxid zurückzuführen. An den Anlagen A und B gehen die Koh-

lenstoffmonoxidemissionen erst nach Überschreiten eines Temperaturfensters (Feuerraum: 600 bis 700 °C) zurück. Bei Anlage C treten ab Holzaufgabe aufgrund mehrfachen Luft- und damit Sauerstoffmangels im Feuerraum stark schwankende Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen mit Spitzen bis zu 3.500 mg/m³ auf.

Schwefeldioxid bzw. die Summe aus Schwefeldi- und -trioxid wurden ausschließlich an den Anlagen B und C bestimmt. Bis zum Erreichen der Werte im Regelbetrieb (Anlage B: 25 °mg/m³; Anlage C: 9,6 mg/m³) zeigen die Konzentrationsverläufe folgendes Bild: In Phase III treten an Anlage B unmittelbar vor Erreichen des Vollastbetriebs Konzentrationsschwankungen und -spitzen auf (evtl. Mobilisierung schwefelhaltiger Aerosole), während bei Anlage C sich die Schwefeldi-/trioxid-Gehalte erst signifikant mit der Holzaufgabe auf den Verbrennungsrost erhöhen.

Die Emissionen an Stickstoffmon-/dioxid ergeben an allen Anlagen ein stimmiges Bild. Beim Aufheizen nehmen die Werte von der Phase I zu Phase III stets zu; in Phase III liegen die Emissionen auf Regelbetriebsniveau. Verantwortlich hierfür sind jeweils die thermisch und die durch den Brennstoff bedingten Stickoxidbildungen.

Distickstoffmonoxid tritt im Abgas gewöhnlich erst ab dem Holzverbrennungsbetrieb (Anlage A und B ab Phase I und Anlage C ab Phase III) auf. Die Konzentrationen sind im Vergleich zum Regelbetrieb an den Anlagen A und C (Phase III) ähnlich und an der Anlage B geringer.

Die Emissionen an organischen Stoffen (angegeben als C_{ges}) korrelieren mit Kohlenstoffmonoxid. In allen bzw. einzelnen Phasen des Aufheizbetriebs (Anlage A bzw. B, C) zeigen sich um bis zu vier Größenordnungen höhere Emissionen als im Regelbetrieb. Die höheren Werte sind auf unvollständige Verbrennung (unzureichender Ausbrand der Brennstoffe) zurückzuführen. An Anlage C treten bereits in Phase I erhöhte Emissionen auf, die wahrscheinlich auf mit organischen Stoffen belastete Primärluft aus dem Müllbunker zurückzuführen sind.

Bei den gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen (angegeben als HCl) ergibt sich an allen Anlagen ein gleiches Verhalten. Beim Aufheizen nehmen die Werte von Phase I zu Phase III stets zu; die Emissionen bleiben beim Anfahren unter dem Regelbetriebsniveau. Die brennstoffbedingte Bildung bzw. Freisetzung von anorganischen Chlorverbindungen bzw. Chlorwasserstoff aus Wandablagerungen/Staubresten ist somit gering.

Bezüglich der Emissionen an anorganischen Fluorverbindungen (angegeben als HF) lassen sich keine Aussagen treffen, da sich die Konzentrationen an allen Anlagen stets unterhalb der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens befinden.

Auffallend bei den Anfahrvorgängen sind teilweise erhöhte Emissionen an Gesamtstaub. Sie wirken sich ggf. negativ auf die Höhe der Emissionen von Schadstoffen aus, die teilweise an Staub gebunden sind (z. B. Metalle, PAK, PCB, PCDD/F).

Die Quecksilberemissionen zeigen an allen Anlagen – betrachtet über die einzelnen Phasen – ein gleichbleibendes und niedriges Niveau. Im Vergleich zum regulären Anlagenbetrieb sind die Emissionen an der Anlage A höher, an der Anlage B niedriger und an der Anlage C etwa gleich hoch.

Die Abgaskonzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen sind bei den Anlagen A und B in allen Phasen und bei Anlage C in Phase I teilweise deutlich höher. Insbesondere in der ersten Phase des Anfahrvorgangs liegen an allen Anlagen höhere PAK- und Gesamtstaubgehalte vor, was auf an Staub gebundene PAK hindeutet. Hinsichtlich Benzo(a)pyren, das häufig als Leitsubstanz für die Stoffgruppe der 16 PAK nach EPA [13] herangezogen wird, sind nur an der Anlage A in den Phasen I und II leicht erhöhte Emissionen erkennbar.

Tab. 25: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Anfahrbetriebsuntersuchungen an den Biomasseheiz(kraft)werken A, B und C (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert \bar{y}			
		0	I	II	III
Dauer	hh:mm	00:47	06:06	04:39	12:03
		–	06:20	17:10	07:20
		–	08:02	09:45	06:07
Volumenstrom $\times 10^{-3}$	m ³ /h	72,2	25,6	25,6	31,4
		–	3,17	3,64	5,95
		–	36,8	35,4	34,0
Temperatur	°C	61	53	114	144
		–	89	118	145
		–	150	161	157
O ₂	Vol.-%	21,0	19,3	18,3	12,6
		–	14,4	13,3	10,7
		–	19,1	15,6	7,8
CO ₂	Vol.-%	< 0,1 ⁾	1,6 ⁾	2,6 ⁾	7,9 ⁾
		–	6,3 ⁾	7,5 ⁾	9,9 ⁾
		–	1,5 ⁾	3,9 ⁾	11,7 ⁾
CO	g/m ³	0,005 ⁾	0,792 ⁾	0,826 ⁾	0,401 ⁾
		–	0,246 ⁾	0,037 ⁾	0,035 ⁾
	mg/m ³	–	17,0 ⁾	20,9 ⁾	156 ⁾
SO ₂	mg/m ³	–	–	–	–
		–	5,5 ⁾	14,5 ⁾	19,7 ⁾
		–	–	–	–
Σ SO ₂ , SO ₃	g/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,002 ⁾	0,048 ⁾	0,092 ⁾	0,221 ⁾
		–	0,165 ⁾	0,226 ⁾	0,316 ⁾
	mg/m ³	–	22,7 ⁾	94,9 ⁾	309 ⁾
N ₂ O	mg/m ³	< 0,1 ⁾	7,1 ⁾	6,7 ⁾	11,2 ⁾
		–	2,1 ⁾	< 0,1 ⁾	0,6 ⁾
		–	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾	7,6 ⁾
C _{ges}	mg/m ³	1,6 ⁾	117 ⁾	111 ⁾	33,4 ⁾
		–	15,6 ⁾	0,5 ⁾	0,5 ⁾
		–	19,2 ⁾	2,8 ⁾	3,9 ⁾

Anlage A	
Anlage B	
Anlage C	

Bei den Indikator-PCB, dl-PCB und PCDD/F zeigt Anlage A in allen Aufheizphasen um den Faktor 10 bis über 1.000 höhere Emissionswerte als im Regelbetrieb. An der Anlage B ist dieser Effekt in wesentlich geringerem Maße bzw. überhaupt nicht gegeben. Die geringsten Emissionen weist Anlage C auf, an der in Phase I die Indikator-PCB maximal um das Vierfache erhöht vorliegen.

Bewertung und Konsequenzen

Im (quasi-)stationären Regelbetrieb der Biomasseheiz(kraft)werke zeigen sich geringe Schadstoffemissionen, die Emissionsgrenzwerte werden eingehalten. Demgegenüber liegen im Anfahrbetrieb – für den die Grenzwerte der Genehmigungsbescheide nicht gelten – insbesondere bei Kohlenstoffmonoxid, Gesamtstaub und organischen Stoffen (C_{ges} , PAK, PCB, PCDD/F) teilweise höhere Emissionswerte vor.

Zur Minderung der Schadstoffemissionen bei Anfahrvorgängen – um den Vorgaben der TA Luft Nr. 5.1.2 [6] gerecht zu werden – wurden bzw. werden an den Anlagen folgende Maßnahmen umgesetzt:

Tab. 25 (Forts.): Mittelwerte der Abgaskonzentrationen während der Anfahrbetriebsuntersuchungen an den Biomasseheiz(kraft)werken A, B und C.

Parameter	Einheit	Messwert \bar{y}			
		0	I	II	III
HCl	mg/m ³	–	0,6 ⁾	1,3 ⁾	3,3 ⁾
		–	0,3 ⁾	0,8 ⁾	1,3 ⁾
		–	< 0,3 ⁾	1,3 ⁾	1,7 ⁾
HF	mg/m ³	–	< 0,2 ⁾	< 0,2 ⁾	< 0,2 ⁾
		–	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾
		–	< 0,2 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾
Hg	mg/m ³	0,006 ⁾	0,006 ⁾	0,006 ⁾	0,007 ⁾
		–	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾	0,001 ⁾
		–	0,004 ⁾	0,004 ⁾	0,005 ⁾
Σ Cd, Tl ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	–	–	< 0,001 ⁾
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	–	–	0,0051 ⁾
Σ B(a)P, As, Cd, Co, Cr ^{**)}	mg/m ³	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	–	–	0,0023 ⁾
B(a)P	mg/m ³	< 0,001 ⁾	0,003 ⁾	0,001 ⁾	< 0,001 ⁾
		–	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾
		–	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾
PAK ^{**)}	μ g/m ³	2,07 ⁾	373 ⁾	378 ⁾	111 ⁾
		–	208 ⁾	6,13 ⁾	16,0 ⁾
		–	2,43 ⁾	0,63 ⁾	0,56 ⁾
Ind.-PCB ^{**)}	ng/m ³	1,6	16,4	40,5	15,1
		–	1,02	0,18	0,18
		–	0,36	0,18	0,26
dl-PCB ^{**)}	ng WHO-TEQ/m ³	< 0,01 ⁾	0,01 ⁾	0,11 ⁾	0,16 ⁾
		–	< 0,01 ⁾	< 0,01 ⁾	< 0,01 ⁾
		–	< 0,01 ⁾	< 0,01 ⁾	< 0,01 ⁾
PCDD/F ^{**)}	ng I-TEQ/m ³	0,046 ⁾	0,062 ⁾	1,59 ⁾	4,54 ⁾
		–	0,055 ⁾	0,022 ⁾	0,016 ⁾
		–	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾	< 0,001 ⁾
Gesamtstaub	mg/m ³	–	51,3 ⁾	0,9 ⁾	41,7 ⁾
		–	46,3 ⁾	8,2 ⁾	17,0 ⁾
		–	79,1 ^{)****)}	2,8 ^{)****)}	93,3 ^{)****)}

Anlage A

Anlage B

Anlage C

⁾ Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

^{**)} Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

^{***)} Große, dunkle Partikel auf Filter (evtl. Zunder, der infolge thermischer Spannungen von der Kanalinnenwandplatzte). Das kontinuierliche Messgerät des Betreibers (Streulichtmessprinzip) detektierte in den selben Zeiträumen keine erhöhten Emissionswerte

- die Verkürzung des Zeitintervalls, in dem instabile Verbrennungsbedingungen vorherrschen,
- das rasche Durchfahren des Temperaturfensters für die De-Novo-Synthese von chlororganischen Schadstoffen,
- die möglichst frühzeitige Inbetriebnahme der Staubabscheider (Gewebe- bzw. Elektrofilter),
- Entfernung von Ablagerungen an gasführenden Anlagenteilen (Abgaskanäle, Gewebefilter etc.),
- der Einsatz von Adsorbentien zur PCDD/F-Abscheidung.

3.2 Bioabfallvergärung

In Vergärungsanlagen wird Biomasse von Mikroorganismen anaerob abgebaut und dabei Biogas erzeugt. Dieses wird als Brennstoff in Verbrennungsmotoren (Gas-Otto- bzw. Zündstrahl-Prinzip) zur Energieerzeugung (Strom, Wärme; Kraft-Wärme-Kopplung) genutzt. Bei der motorischen Verbrennung von Biogas (50–75 Vol.-% CH₄, 25–45 Vol.-% CO₂, 2–7 Vol.-% H₂O [14], S. 14]) treten infolge Brennstoffschlupf (Ventilüberschneidung) und Teiloxidation (Toträume, Ablagerungen etc.) stets Methan- und Formaldehydemissionen auf. Von vielen Anlagen werden die Formaldehyd-Grenzwerte auf Basis primärseitiger Maßnahmen (Motorwartung, optimierte Motoreinstellung wie Zündzeitpunkt, λ-Wert) nicht oder nicht sicher eingehalten, so dass Sekundärmaßnahmen zur Abgasreinigung erforderlich werden. Bayernweit waren am 31.12.2013 insgesamt 2.330 Bioabfallvergärungsanlagen und NawaRo-Anlagen (NawaRo = nachwachsende Rohstoffe) mit einer installierten elektrischen Leistung von 732 MW in Betrieb [15]. Die hohe Zahl existierender und künftig zu erwartenden Vergärungsanlagen mit Verbrennungsmotoren erfordern wirksame Maßnahmen und Technologien zur Minderung gesundheits- und klimaschädlicher Abgasemissionen.

An einer Bioabfallvergärungsanlage, die aufgrund Überschreitung des Formaldehyd-Grenzwerts (60 mg/m³, bezogen auf 5 Vol.-% Sauerstoff) versuchsweise mit einer thermischen regenerativen Nachverbrennungsanlage (RNV) zur Reinigung des Motorabgases ausgestattet war, sollte die Wirksamkeit und Effizienz dieses Abgasreinigungsverfahrens in der Praxis geprüft und bewertet werden. Die Abb. 2 zeigt das Grundfließbild der Anlage und Tab. 26 eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

Als Substrate für die Fermentation kommen an der Anlage organische Abfälle, NawaRo und Schweinegülle zum Einsatz. Das erzeugte Biogas wird in einem Gas-Otto-Motor mit angekoppeltem Stromgenerator verbrannt. Das Motorabgas tritt mit einer Temperatur von etwa 450 °C in die RNV ein. Diese besteht aus einem Gaswege-Umschaltssystem (4-Wege-Klappe), zwei Speicherkammern mit keramischen Schüttkörpern als Wärmespeichermedium und einer Reaktionskammer. Die keramischen Schüttkörper in der ersten Speicherkammer wärmen das Abgas vor. In der nachfolgenden Reaktionskammer reagieren die Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffmonoxid mit dem im Abgas vorhandenen Restsauerstoff exotherm zu Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Die Abgastemperatur liegt – ggf. nach zusätzlicher Erwärmung mittels elektrischer Beheizung bzw. Gasverbrennung (Erd-/Biogaseindüsung) – bei 740 bis 780 °C. Das aus der Reaktionskammer strömende Abgas gibt in der zweiten Speicherkammer einen Teil seiner Enthalpie an die dort enthaltenen keramischen Schüttkörper ab. Die 4-Wege-Klappe kehrt nach etwa 2 bis 3 Minuten die Strömungsrichtung des Abgases durch die Speicherkammern und Reaktionskammer um. Zu diesem Zeitpunkt sind die Schüttkörper der zuerst durchströmten Speicherkammer soweit abgekühlt, dass die Temperaturdifferenz als treibendes Gefälle nicht mehr zur Abgasvorwärmung ausreicht.

Über die gesamte RNV betrachtet, verlässt das Abgas diese mit einer um 40 °C höheren Temperatur als am Eingang (etwa 570 °C). Es wird zur Warmwassererzeugung in einem Wärmetauscher genutzt und über den Kamin in die Umgebung abgegeben.

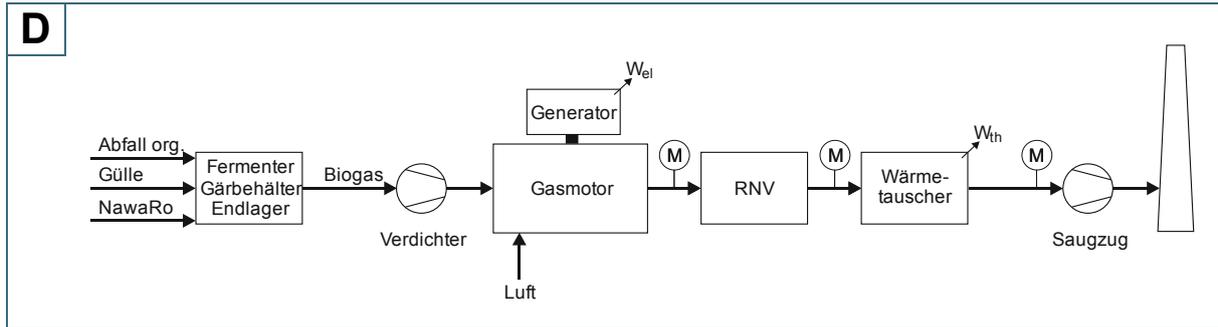


Abb. 2: Grundfließbild der Bioabfallvergärungsanlage D inkl. Verbrennungsmotor mit Abgasmessstellen M.

Tab. 26: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Bioabfallvergärungsanlage D (Versuchsbetrieb).

Auslegungsdaten	Anlage D
Biogasanlage	Kontinuierliche Nassfermentation
Genehmigte Einsatzstoffe	Organische Abfälle, tierische Nebenprodukte und nachwachsende Rohstoffe
Komponenten	Lagerboxen und Sammelbehälter, Hygienisierbehälter, Vorfermenter, 2 Hauptfermenter, Nachgärbehälter, Niederdruckgasspeicher, Endlager mit Restgas erfassung
Verbrennungsmotoren	12-Zylinder-Viertakt-Ottomotor, Abgasturbolader zur Gemischaufladung, Magergemisch-Verbrennungsregelung
Anzahl	2
Feuerungswärmeleistung	1,3 MW
Max. thermische Leistung	544 kW
Max. elektrische Leistung	525 kW
Eingesetzter Brennstoff	Biogas (Methan ca. 58 Vol.-%, Sauerstoff ca. 0,6 Vol.-%, Schwefelwasserstoff ca. 100 ppm, Rest: Kohlenstoffdioxid, Stickstoff)
Brennstoffdurchsatz	280 m ³ /h
Abgasreinigungsanlage	Thermisch regenerativ mit Abgasvorwärmung
Max. Durchsatz (Motorabgas)	2.700 m ³ /h
Temperatur Reaktionskammer	740 bis 780 °C
Externe Energiezufuhr	Nach Bedarf elektrische Stabbeheizung bzw. Biogasstützfeuerung
Elektrische Heizleistung	40 kW

Versuchsbetrieb

Die Tab. 27, S. 40, gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse, die im Versuchsbetrieb der Verbrennungsmotorenanlage mit der RNV bei Vollast ermittelt wurden.

Im Rohgas nach Verbrennungsmotor werden die im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwerte – jeweils bezogen auf 5 Vol.-% Sauerstoff – für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid (angegeben als Stickstoffdioxid) und Schwefeldi-/trioxid (angegeben als Schwefeldioxid) sicher eingehalten. Hingegen liegen alle ebenfalls auf 5 Vol.-% Sauerstoff bezogenen Formaldehyd-Werte um fast das Doppelte über dem Grenzwert von 60 mg/m³. Zugleich ergeben sich mit mehr als 1.600 mg/m³ sehr hohe Werte für organische Stoffe (C_{ges}), die zu etwa 80 % auf unverbranntes Methan zurückzuführen sind. Somit waren an der Verbrennungsmotorenanlage für Biogas Sekundärmaßnahmen zur Reduzierung der Emissionen an Formaldehyd erforderlich bzw. für Methan sehr zu empfehlen.

Das gereinigte Abgas weist nach der RNV (Reingas I) bzw. nach RNV und Abgaswärmetauscher (Reingas II) bei Schwefeldi-/trioxid und Stickstoffmon-/dioxid etwa die gleichen, bei Kohlenstoffmonoxid etwa um den Faktor 10 und bei Gesamt-, Methankohlenstoff, Formaldehyd etwa um den Faktor 100 geringere Emissionswerte auf. Die Verminderung des Methanschlupfes (CO₂-Äquivalent Methan:

25 [16], S. 212) führt zu einer Einsparung von 64,0 kg/h an CO₂-Äquivalenten bei gleichzeitiger Erhöhung der CO₂-Fracht um 25,0 kg/h. Bei 8.000 Jahresbetriebsstunden ergibt sich daraus eine jährliche Einsparung von rund 312 Mg CO₂-Äquivalenten. Für Formaldehyd ist die Einhaltung des Grenzwerts sicher gewährleistet. Ein Anspruch auf eine höhere Strompreisvergütung aufgrund niedriger Formaldehyd-Emissionen (Emissionsminderungsbonus bei Emissionswerten unter 40 mg/m³) besteht nach der aktuellen Gesetzeslage [17] für Neuanlagen nicht mehr.

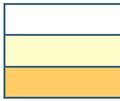
Tab. 27: Mittel- und Maximalwerte sowie Maximalwerte inkl. Messunsicherheit der Abgasrandparameter und -konzentrationen während des Betriebs einer RNV-Pilotanlage nach dem Verbrennungsmotor der Bioabfallvergärungsanlage D.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage D
		\bar{y}	y_{max}	$y_{max} + U_p$	Grenzwert
Volumenstrom × 10 ⁻³	m ³ /h	–	–	–	–
		–	–	–	–
		–	1,8	1,9	–
Temperatur	°C	455	459	468	–
		493	512	522	–
		219	224	228	–
O ₂	Vol.-%	8,1	8,4	8,8	–
		8,0	8,1	8,5	–
		8,1	8,2	8,6	–
CO ₂	Vol.-%	9,9 ⁾	10,1 ⁾	10,6 ⁾	–
		11,4 ⁾	11,7 ⁾	12,3 ⁾	–
		10,6 ⁾	11,0 ⁾	11,5 ⁾	–
CO	g/m ³	0,77	0,81	0,85	–
		0,06	0,06	0,07	1,0 ¹⁾
		0,07	0,07	0,08	1,0 ¹⁾
Σ SO ₂ , SO ₃	g/m ³	0,006	0,007	0,008	–
		0,007	0,007	0,008	0,31 ¹⁾
		0,007	0,007	0,009	0,31 ¹⁾
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,349	0,394	0,414	–
		0,324	0,326	0,342	0,50 ¹⁾
		0,374	0,393	0,413	0,50 ¹⁾
C _{ges}	mg/m ³	1644	1667	1750	–
		13,5	13,6	14,3	–
		14,0	14,5	15,2	–
C _{CH₄}	mg/m ³	1319	1325	1391	–
		11,5	11,7	12,3	–
		10,7	10,8	11,3	–
HCHO	mg/m ³	116	117	140	–
		1,9	1,9	2,3	60 ¹⁾
		1,9	2,0	2,4	60 ¹⁾

Rohgas

Reingas I

Reingas II



⁾ Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

Bewertung und Konsequenzen

Der Versuchsbetrieb einer RNV an der Verbrennungsmotorenanlage für Biogas belegt, dass die

- oxidative, thermische Abgasnachbehandlung in einer RNV zu einer signifikanten Reduzierung der Emissionen organischer Stoffe beiträgt und damit der Grenzwert für Formaldehyd deutlich unterschritten wird (– 96 %),
- Freisetzungen von krebserregendem Formaldehyd und klimaschädlichem Methan auf ein Minimum reduziert werden,
- anderen im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwerte nicht überschritten werden und sich die dort genannten Parameter nicht verschlechtern.

Somit stellen für den Betrieb an Biogasverbrennungsmotoren ausgelegte RNV-Anlagen eine geeignete Technologie zur nachhaltigen Minderung der Formaldehyd- und Methanemissionen dar.

3.3 Holzvergasung

In Holzvergasungsanlagen wird aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz in einem Reaktor ein brennbares Synthesegas (Hauptbestandteile: Stickstoff, Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Methan) erzeugt. Dieser Brennstoff wird in Verbrennungsmotoren nach dem Otto- oder Diesel-Prinzip (Zündstrahlmotor) zur Energieerzeugung (Strom, Wärme; Kraft-Wärme-Kopplung) genutzt. Verfahrensbedingt enthält das Abgas nach der motorischen Verbrennung aufgrund Schlupf (v. a. Ventilüberschneidung beim Gaswechsel) noch Bestandteile des Synthesegases (z. B. Kohlenstoffmonoxid, Methan, Benzol etc.) bzw. daraus gebildete Reaktionsprodukte (z. B. Formaldehyd). Deutschlandweit waren im Jahr 2011 über 160 Holzvergasungsanlagen mit einer elektrischen Leistung von ca. 23 MW in Betrieb [18]. Die steigende Anzahl an Holzvergasungsanlagen mit Verbrennungsmotor erfordert in Anbetracht des Potenzials organischer Schadstoffe (kanzerogene Nebenbestandteile, z. B. Teer, Benzol etc.) wirksame Maßnahmen und Technologien zur Vermeidung gesundheitsschädlicher Abgasemissionen.

An einer Anlage sollte die Einhaltung des Kohlenstoffmonoxid-Grenzwerts ($0,30 \text{ g/m}^3$) geprüft und zusätzliche Informationen über die Höhe der Emissionen anderer Schadstoffe (z. B. Benzol) gewonnen werden. Die Abb. 3 zeigt das Grundfließbild der Anlage und Tab. 28, S. 41, eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

Das zu Hackschnitzeln verarbeitete Holz wird nach dem Vortrocknen dem Holzvergaser zugeführt (Gleichstromprinzip von oben nach unten; senkrecht stehender Rohrreaktor mit (quasi-)kontinuierlichem Wanderbett und radialer Zuführung des Vergasungsmittels Luft). Im Reaktor entweicht aus dem Holz durch die von unten aufsteigende Wärme zunächst die Restfeuchte. Im Temperaturfenster von 200 bis $700 \text{ }^\circ\text{C}$ laufen überwiegend pyrolytische Prozesse ab, die zur Bildung von Kohlenwasserstoffen und elementarem Kohlenstoff führen. In der stromabwärts liegenden Oxidationszone ($T > 1.000 \text{ }^\circ\text{C}$) werden im Reaktor langkettige Kohlenwasserstoffe gecrackt und Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf gebildet. Die dabei frei werdende Energie wird in der nachfolgenden Reduktionszone für endotherme Reaktionen benötigt, um ein brennbares Synthesegas (Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff, Methan) zu erzeugen. Das Synthesegas wird in mehreren Stufen (Heißgasfilter, Zyklon, Kühler, Holzwollefilter) für den Einsatz in einem Gas-Otto-Motor (12-Zylinder-Viertakt, mit angekoppeltem Generator) aufbereitet. Das Motorabgas wird über den Oxidations-Katalysator zur Minderung der Kohlenstoffmonoxidemissionen einem Wärmetauscher zur Wärmenutzung (Abwärme wird zur Vortrocknung der Hackschnitzel genutzt) zugeführt. Danach gelangt es über den Kamin in die Umgebung.

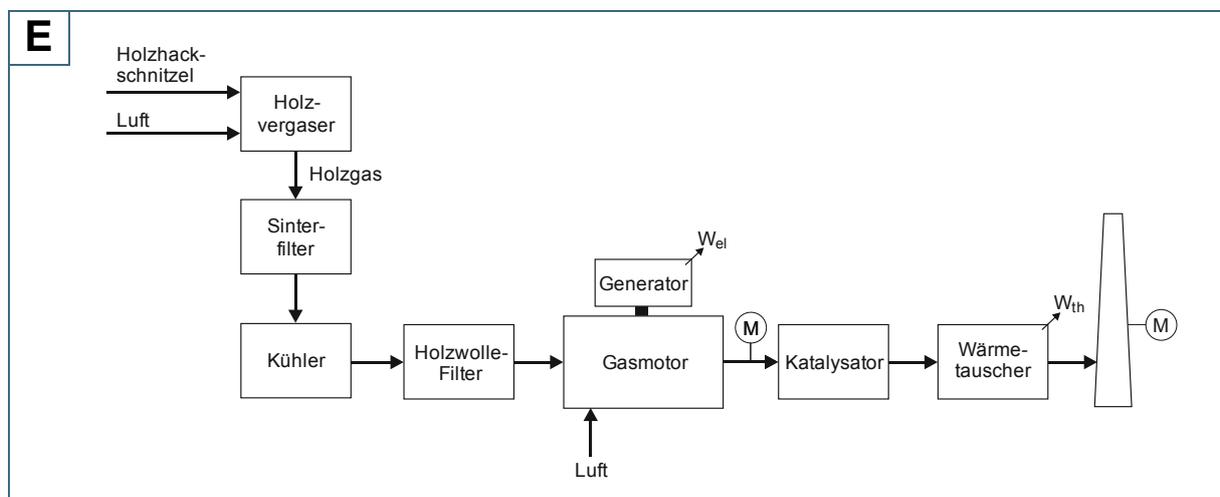


Abb. 3: Grundfließbild der mit Holzgas betriebenen Verbrennungsmotorenanlage (Holzvergasungsanlage) E mit Abgasmessstellen M.

Tab. 28: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Holzvergasungsanlage E.

Auslegungsdaten	Anlage E
Holzvergasung	Gleichstromvergaser. Senkrecht stehender Rohrreaktor mit Wanderschüttung und radialer Zuführung des Vergasungsmittels (Luft)
Einsatzstoffe	Holz hackschnitzel
Komponenten	Schubbodentrockner, Vergasungsreaktor, Hochtemperatur-Feinfilter, Zyklon, Holzgaskühler, Holzwolffilter
Verbrennungsmotor	12-Zylinder-Viertakt-Ottomotor, Abgasturbolader zur Gemischaufladung
Feuerungswärmeleistung	0,38 MW
Max. thermische Leistung	230 kW
Max. elektrische Leistung	150 kW
Eingesetzter Brennstoff	Synthesegas (Kohlenstoffmonoxid 10 bis 17,5 Vol.-%, Wasserstoff 6,3 bis 13 Vol.-%, Methan 1,0 bis 4,5 Vol.-%, Sauerstoff 1,5 bis 6,4 Vol.-%, Kohlenstoffdioxid 8,0 bis 13,2 Vol.-%, Rest Stickstoff)
Brennstoffdurchsatz	Ca. 220 m ³ /h
Abgasreinigungsanlage	Oxidationskatalysator

Regelbetrieb Juni 2010

Laut Betreiberangabe befanden sich der Holzvergaser und der Gasmotor vor Beginn der Untersuchungen in ordnungsgemäßen Betrieb und Zustand. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen der ersten Stunde zeigen ein anderes Bild (vgl. Tab. 29). Die Sauerstoffgehalte sind mit über 7 Vol.-% und die auf 5 Vol.-% Sauerstoff bezogenen Kohlenstoffmonoxidgehalte mit mehr als 12 g/m³ zu hoch. Zudem schwanken die Kohlenstoffmonoxidgehalte stark und zeigen Peaks bis zu 50 g/m³. Offensichtlich arbeitete die λ -Regelung des Gasmotors nicht oder nicht korrekt. Unter diesen Gegebenheiten war für Kohlenstoffmonoxid die Einhaltung der Emissionsbeschränkungen nicht gegeben, deshalb wurden die weiteren Parameter laut Messplan nicht bestimmt.

Um dennoch Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlage unter annähernd „regulären“ Betriebsbedingungen zu gewinnen, setzte der Betreiber behelfsmäßig die λ -Regelung (Schrittmotor am Gasmischer) außer Betrieb und fixierte die Brennluftzufuhr am Gasmischer manuell auf einen festen Wert. Ohne automatische λ -Regelung ergeben sich im Schnitt wesentlich bessere Werte für Sauerstoff von 3,1 Vol.-% Sauerstoff und Kohlenstoffmonoxid von 0,83 g/m³.

Trotz dieser Maßnahmen überschreiten die Kohlenstoffmonoxid-Halbstundenmittelwerte den Grenzwert von 0,30 g/m³ um mehr als das Dreifache.

Die Emissionen an Schwefeldi- und -trioxid und gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen sind aufgrund der bei Holzvergasungsanlagen benötigten guten Holzqualität (niedrige Schwefel-, Chlor- und Fluorgehalte) stets auf geringem und unbedenklichem Niveau.

Ebenso zeigen sich für Gesamtstaub mit maximal 3,8 mg/m³ geringe Gehalte unter dem Grenzwert des Genehmigungsbescheids. Sie belegen eine gut funktionierende Partikelabscheidung (Asche, Ruß) bei der Synthesegasaufbereitung (Heißgasfilter, Zyklon, Kühler, Holzwolffilter).

Für Stickstoffmon-/dioxid konnte ohne λ -Regelung der Grenzwert von 0,50 g/m³ größtenteils nicht eingehalten werden. Die maximal erfasste Emission überschreitet den Grenzwert um fast das Doppelte. Die Halbstundenmittelwerte an organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) liegen mit durchschnittlich 94 mg/m³ auf erhöhtem Niveau. Daran hat Methan-Kohlenstoff mit durchschnittlich 32 mg/m³ generell einen Anteil von mehr als 30 %.

Tab. 29: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas nach Katalysator (Halbstundenmittelwerte bzw. Mittelwerte über die Probenahmezeit) im Regelbetrieb (Motor ohne λ -Regelung) der Holzvergasungsanlage E im Vergleich zu den Grenz- und Emissionswerten [6].

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert Anlage E / Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
Volumenstrom	m ³ /h	438	449	471	- / -
		599	746	783	
Temperatur	°C	163	182	186	- / -
		168	187	191	
O ₂	Vol.-%	3,1	4,4	4,6	- / -
		3,9	7,9	8,3	
CO ₂	Vol.-%	17,6 ¹⁾	18,8 ¹⁾	19,7 ¹⁾	- / -
		16,4 ¹⁾	18,2 ¹⁾	19,3 ¹⁾	
CO	g/m ³	0,83 ¹⁾	1,04 ¹⁾	1,09 ¹⁾	0,30 ¹⁾ / 0,30 ²⁾
		1,70 ¹⁾	6,56 ¹⁾	6,89 ¹⁾	
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,70 ¹⁾	0,86 ¹⁾	0,90 ¹⁾	0,50 ¹⁾ / 0,50 ¹⁾
		0,65 ¹⁾	0,75 ¹⁾	0,79 ¹⁾	
Σ SO ₂ , SO ₃	g/m ³	0,0013	0,0018	0,0020	- / 0,35 ¹⁾
		-	-	-	
HCl	mg/m ³	0,14	0,20	0,22	- / -
		-	-	-	
HF	mg/m ³	< 0,1	< 0,1	< 0,11	- / -
		-	-	-	
Gesamtstaub	mg/m ³	3,0 ¹⁾	3,3 ¹⁾	3,8 ¹⁾	- / 20 ¹⁾
		-	-	-	
C _{ges}	mg/m ³	94 ¹⁾	140 ¹⁾	147 ¹⁾	- / -
		696 ¹⁾	3.141 ¹⁾	3.298 ¹⁾	
C _{CH₄}	mg/m ³	32 ¹⁾	44 ¹⁾	48 ¹⁾	- / -
		398 ¹⁾	1.692 ¹⁾	1.861 ¹⁾	
HCHO	mg/m ³	7,4 ¹⁾	7,5 ¹⁾	9,0 ¹⁾	60 ¹⁾ / 60 ¹⁾
		11,4 ¹⁾	13,9 ¹⁾	16,7 ¹⁾	
Benzol	mg/m ³	29 ¹⁾	34 ¹⁾	41 ¹⁾	- / 1 ¹⁾
		51 ¹⁾	194 ¹⁾	233 ¹⁾	
Toluol	mg/m ³	17 ¹⁾	27 ¹⁾	32 ¹⁾	- / -
		5 ¹⁾	18 ¹⁾	22 ¹⁾	

06/2010

11/2010

¹⁾ Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol.-%. Die Umrechnung der Messwerte für Kohlenstoffmonoxid und Formaldehyd darf nur für Zeiten erfolgen, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt.

²⁾ Falls das Synthesegas nicht als Bio-, Klär- oder Grubengas einzustufen ist

Mit einem maximalen Messwert von 9,0 mg/m³ wurde der Formaldehyd-Grenzwert von 60 mg/m³ zuverlässig eingehalten. Für Benzol und Toluol zeigen sich höhere Gehalte (durchschnittlich 29 mg/m³ bzw. 17 mg/m³). So überschreitet Benzol den in der TA Luft für krebserzeugende Stoffe der Klasse III genannten Wert von 1 mg/m³ [6] deutlich.

Regelbetrieb November 2010

Anhand der im Juni 2010 gewonnenen Erkenntnisse und offenen Fragen hinsichtlich der Katalysatorwirkung wurde der Untersuchungsumfang erweitert. Die Zusammensetzung des Verbrennungsabgases wurde vor und nach Katalysator simultan erfasst. Um mit den Ergebnissen der Juni-Untersuchung vergleichen zu können, wurden die gleichen Motoreinstellungen vorgenommen (λ -Regelung außer Betrieb, Brennluftzufuhr auf Maximum).

Bei der Untersuchung im November 2010 lagen die auf 5 Vol.-% bezogenen Halbstundenmittelwerte von Kohlenstoffmonoxid auf einem etwa doppelt so hohen Niveau wie zuvor. Die in Tab. 29 nicht dargestellten Rohgaskonzentrationen zeigen einen sehr schlechten Katalysatorwirkungsgrad bezüglich Kohlenstoffmonoxid von durchschnittlich 27 %.

Sämtliche Messwerte für Stickstoffmon-/dioxid überschreiten den Grenzwert von 0,50 g/m³; ein Indiz dafür, dass für die untersuchte Anlage ein funktionierender Drei-Wege-Katalysator samt Regelung erforderlich ist.

Trotz vergleichbarer Betriebsbedingungen an den beiden Messterminen sind die Halbstundenmittelwerte an organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) weitaus höher und schwanken im Tagesverlauf stark (Maximum 3.141 mg/m³). Der Anteil an unverbranntem Methan(-Kohlenstoff) beträgt mindestens 40 %.

Die Formaldehydwerte sind mit durchschnittlich 11,4 mg/m³ im Vergleich zu früher (7,4 mg/m³) etwas höher, halten den Grenzwert von 60 mg/m³ dennoch sicher ein. Mit Benzol-Gehalten zwischen 8,6 und 170 mg/m³ bestätigen sich die hohen Emissionen, die diesmal zusätzlich starken Schwankungen unterworfen sind. Der in der TA Luft für krebserzeugende Stoffe der Klasse III angegebene Wert von 1 mg/m³ [6] wird weit überschritten.

Bewertung und Konsequenzen

Die Regelbetriebsuntersuchungen des Holzvergasers mit Verbrennungsmotor ergeben, dass die

- Anlage hinsichtlich Vergasungs-, Motor-, Sicherheits- und Abgasreinigungstechnik nicht dem emissionsseitig geforderten Stand der Technik entspricht,
- Emissionen an
 - Schwefeldi-/trioxid, gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen und Gesamtstaub generell niedrig sind,
 - Kohlenstoffmonoxid sowie Stickstoffmon-/dioxid die im Genehmigungsbescheid genannten Grenzwerte nicht erfüllen,
 - Benzol den in der TA Luft [6] vorgegebenen Emissionswert weit (bis um den Faktor 233) überschreitet.

Vom Betrieb der Anlage unter den bei den Untersuchungen vorgefundenen Zuständen gehen umwelt- und gesundheitsrelevante Emissionen und Gefahren aus, die einen Weiterbetrieb der Anlage nicht rechtfertigen. Die Anlage wurde außer Betrieb genommen und abgebaut.

3.4 Klärschlammverbrennungen

In Klärschlammverbrennungsanlagen werden Schlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen in Öfen mit Wirbelschicht- oder Rostfeuerung verbrannt. Aus der frei werdenden Energie wird in Kesselanlagen Wärme gewonnen, die zur Schlamm-trocknung, zur Beheizung und/oder Stromerzeugung (Dampfprozess) genutzt wird. Die Abb. 4 zeigt die Grundfließbilder der beiden untersuchten Klärschlammverbrennungsanlagen und Tab. 30, S. 45, eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

In beiden Anlagen kommen ausschließlich kommunale und industrielle Klärschlämme (bestimmte Industriebereiche wie Lebensmittelindustrie) zum Einsatz. Die Brennstoffe werden in Bunkern bzw. Behältern vorgehalten und zunächst Zentrifugen bzw. Trocknern zugeführt, in denen sie mechanisch entwässert bzw. thermisch getrocknet werden, bevor sie in die Verbrennungsöfen gelangen. Die Enthalpie der Abgase dient in den Abhitzekesteln zur Erzeugung von Dampf (Anlage F) oder heißem Thermoöl (Anlage G). Der Dampf bzw. das Thermoöl wird als Heiz- bzw. Betriebsmittel (Beheizung von Nebeneinrichtungen wie Trockner, Behälter etc. bzw. Gebäude), der Dampf zusätzlich zur Stromproduktion (Dampfturbine mit Generator) genutzt. Zur Minderung der Schadstoffemissionen sind Abgasreinigungsanlagen in unterschiedlicher Ausführung installiert. Die Abgase gelangen schließlich über Kamine in die Umgebung. An festen Prozessrückständen fallen Aschen, Stäube und Abgasreinigungsprodukte an.

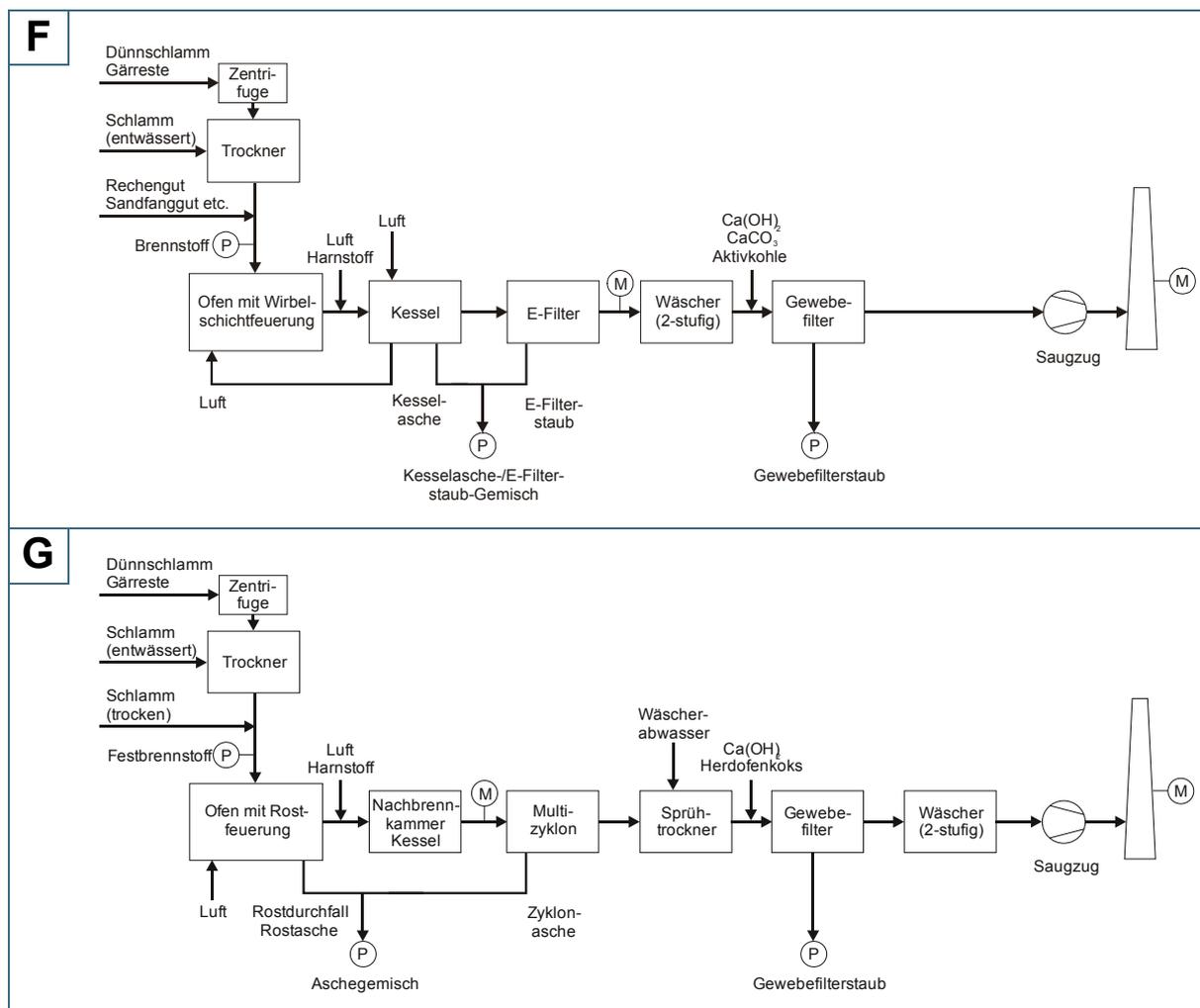


Abb. 4: Grundfließbilder der Klärschlammverbrennungsanlagen F und G mit den Abgasmessstellen M und Feststoffprobenahmestellen P.

Tab. 30: Übersicht über wesentliche Kenndaten der untersuchten Klärschlammverbrennungsanlagen F und G.

Auslegungsdaten	Anlage F	Anlage G
Feuerungs-/ Kesselanlage	Wirbelschichtofen Naturumlauf-Wasserrohrkessel	Rostofen (wassergekühlter Vorschub-Rost) Zwangsumlauf Thermoöl-Tandemkessel
Anzahl Öfen	2	2
Feuerungswärmeleistung	10 MW (je Ofen)	6,0 MW (je Ofen)
Genehmigte Brennstoffe	Schlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen mit bestimmten Abfallschlüsselnummern gemäß AVV [19]	
Eingesetzte Brennstoffe	Klärschlamm maschinell entwässert und getrocknet	
Brennstoffdurchsatz	2,5 Mg _{TS} /h (je Ofen)	3,5 Mg _{TS} /h (je Ofen)
Dampfleistung max.	9,0 Mg/h (4,0 MPa, 400 °C)	–
Thermische Leistung	–	4,0 MW (1,3 MPa, 300 °C)
Anzahl Abgasreinigungslinien	2 (separat für beide Öfen)	1 (gemeinsam für beide Öfen)
Abgasreinigungsanlage	SNCR, Elektrofilter, Abgaswäscher (2-stufig), Gewebefilter (Flugstromverfahren)	SNCR, Multizyklon, Verdampfungskühler, Gewebefilter (Flugstromverfahren), Abgaswäscher (2-stufig)
Rückstände	Kesselasche, Elektrofilterstaub, Gewebefilterstaub	Rostasche, Rostdurchfall, Zyklonasche, Sprühtrocknerprodukt, Gewebefilterstaub
Untersuchte Feststoffe	Klärschlamm, Gemisch Kesselasche/Elektrofilterstaub, Gewebefilterstaub	Klärschlamm, Gemisch Rostasche/Rostdurchfall/Zyklonasche

Ziel der Untersuchungen war es, Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlagen im Anfahr- und Regelbetrieb sowie die Zusammensetzung und das Auslaugverhalten der Einsatz- und Reststoffe zu erhalten. An Anlage F wurde neben dem Anfahrvorgang aus dem kalten Zustand (Kaltstart) zusätzlich der Anfahrvorgang aus dem betriebswarmen Zustand (Warmstart) untersucht.

Der Regelbetrieb beider Anlagen war auf die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte zu prüfen.

Regelbetrieb

Die Abgasuntersuchungen fanden an der Anlage F fünf Tage nach und an der Anlage G 18 Tage vor der Revision statt. In Tab. 32, S. 47, sind die in den Genehmigungsbescheiden festgelegten Emissionsbeschränkungen den ermittelten Messwerten (Mittel- und Maximalwerte) gegenübergestellt. Die Grenzwerte in den Bescheiden orientieren sich an der 17. BImSchV (2003) [7]. Bei Anlage G bestehen bezüglich der Emissionen an Nickel, Vanadium, Benzo(a)pyren zusätzliche sowie für Ammoniak, Summe „Cadmium, Thallium“ und polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen höhere Anforderungen.

Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit werden die Grenzwerte hinsichtlich der einzelnen Parameter wie folgt ausgeschöpft: Stickstoffmon-/-dioxid maximal zu 54 %, organische Stoffe (als C_{ges}) zu 38 %, Ammoniak zu 30 %, Gesamtstaub zu 24 %, Summe „Benzo(a)pyren, Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom“ zu 10 %, Schwefeldi-/-trioxid zu 5 %, gasförmige anorganische Chlorverbindungen und Quecksilber zu 4 %, gasförmige anorganische Fluorverbindungen, Nickel, Vanadium, Summe „Cadmium, Thallium“, Summe „Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Cobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn“, Benzo(a)pyren und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane zu weniger als 3 %. Beide Anlagen halten die Emissionsbeschränkungen mit hoher Sicherheit ein.

Für die kanzerogenen und/oder schwer abbaubaren, hochtoxischen Stoffe (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle sowie polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane) liegen sehr geringe Reingasgehalte vor.

In Bezug auf klimarelevante Abgaskomponenten fällt Distickstoffmonoxid (CO₂-Äquivalent: 310 [16], S. 212) mit Emissionswerten – jeweils mehr als 400 mg/m³ – auf. Diese Emissionen sind durch keine Grenzwerte beschränkt; im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid führen sie fast zu einer Verdoppelung der CO₂-äquivalenten Fracht.

Anfahrbetrieb

Die Anlage F wurde zur Untersuchung des Warmstartverhaltens ohne besonderen betrieblichen Anlass (z. B. kurzzeitige Wartungsarbeiten etc.) für etwa 2,5 Stunden außer Betrieb gesetzt. Nach Abkühlung auf eine Wirbelschichttemperatur von 440 °C begann das Hochfahren der Anlage aus dem vom vorausgehenden Betrieb noch warmen Zustand.

Die Untersuchungen des Kaltstartverhaltens erfolgten an den Anlagen F und G jeweils nach dem turnusmäßigen Revisionsstillstand. Die Dauer der Anfahrvorgänge hing von der Art und dem Umfang der Revisionsarbeiten (z. B. Erneuerung der Feuerfestzustellung etc.) ab und erfolgte nach den Vorgaben der Anlagen- und Kesselbauer (Aufheiz- bzw. Trockenheizprogramm für Feuerraum mit vorgegebenen Gradienten- und Haltephasen). Dementsprechend dauerten die Anfahrvorgänge 17 bis 24 Stunden (vgl. Tab. 31).

Als Beginn des Anfahrvorgangs wurde jeweils die Entzündung des Brennstoffs zum Aufheizen der Anlage (Zündung Anfahrbrenner) und als Ende jeweils (quasi-)stationäre Verbrennungsbedingungen zwei Stunden nach Klärschlammaufgabe definiert. Die Abgasuntersuchungen folgten einer Strategie, die Informationen über den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen liefert und möglichen Überfrachtungen von Probenahmeab-/adsorbenzien Rechnung trägt. Weitergehende Übereinstimmungen in der Probenahmestrategie waren aufgrund der jeweiligen Anlagenkonfiguration und der darauf abgestimmten Inbetriebnahmeweisen nicht gegeben.

Der Aufheizbetrieb der Anlage F wurde in Abhängigkeit von der korrigierten Feuerraumtemperatur und dem Betrieb der Brennerlanzen beim Warmstart in zwei (WI und WII) und Kaltstart in drei Probenahmephase (KI bis KIII) unterteilt. An Anlage G untergliederte sich der Anfahrvorgang in Abhängigkeit vom Anfahrbrenner- und Schlammverbrennungsbetrieb in drei Phasen (I bis III mit Unterabschnitten IIa und IIb). In Tab. 33, S. 49, sind die während der Anfahrvorgänge erfassten Parameter als Mittelwerte für die betreffenden Phasen dargestellt.

An der Anlage F ist der Abgasvolumenstrom vergleichbar zum Regelbetrieb, an der Anlage G stets darunter. Die durchschnittlichen Abgastemperaturen nähern sich von Phase zu Phase den Regelbetriebswerten an. Beim Warmstart der Anlage F ist aufgrund des vorausgegangenen Betriebs die durchschnittliche Abgastemperatur in der Phase WI um 25 °C höher als in der Phase KI des Kaltstarts.

Tab. 31: Anfahrart, Revisionsumfang sowie betriebstechnische Ereignisse, die Beginn, Ende und Dauer der Anfahruntersuchungen an den Klärschlammverbrennungsanlagen F und G definieren.

	Anlage F		Anlage G
Anfahrart	Warmstart	Kaltstart	Kaltstart
Revisionsumfang	–	Reinigung/Kontrolle Feuerungs-, Kesselsystem, Ausbesserung Schadstellen der Feuerfestzustellung im Strahlungsteil, Reinigung/Kontrolle Abgasreinigungssystem, Teilerneuerung Gewebefilter (Gehäuse, Filterschläuche), Turbinenrevision	Wartung/Kontrolle Klärschlamm-trockner. Reinigung/Kontrolle Feuerungs-, Förder-, Kesselsystem, Rauchgas-, Rezirkulationsgas-, Brüdenleitung, Abgasreinigungssystem
Untersuchungsbeginn	Zündung Anfahrbrenner		Zündung Anfahrbrenner erster Ofen
Untersuchungsende	2 h nach Klärschlammaufgabe (Ende Stabilisierungszeit)		2 h nach Klärschlammaufgabe zweiter Ofen (Ende Stabilisierungszeit)
Untersuchungsdauer	5,8 h	17,0 h	24,0 h

Tab. 32: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den Klärschlammverbrennungsanlagen F und G (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
Volumenstrom $\times 10^{-3}$	m ³ /h	14,4	15,1	15,8	–
		16,7	18,2	20,0	–
Temperatur	°C	114	115	117	–
		118	119	121	–
O ₂	Vol.-%	9,6	11,3	11,9	–
		9,7	10,8	11,3	–
CO ₂	Vol.-%	9,8 ¹⁾	11,0 ¹⁾	11,6 ¹⁾	–
		9,8 ¹⁾	10,8 ¹⁾	11,3 ¹⁾	–
CO	mg/m ³	7,8	11,8	12,4	100 ¹⁾
		15,0	22,0	23,1	100 ¹⁾
SO ₂	mg/m ³	0,8	1,5	1,6	200 ^{1,2)}
		0,7 ¹⁾	1,3 ¹⁾	1,4 ¹⁾	200 ^{1,2)}
Σ SO ₂ , SO ₃	mg/m ³	–	–	–	200 ^{1,2)}
		7,8	8,2	9,0	200 ^{1,2)}
Σ NO, NO ₂	mg/m ³	40,9	58,1	61,0	400 ^{1,3)}
		163	197	217	400 ^{1,2)}
N ₂ O	mg/m ³	448 ¹⁾	683 ¹⁾	717 ¹⁾	–
		433 ¹⁾	641 ¹⁾	705 ¹⁾	–
C _{ges}	mg/m ³	1,2	7,2	7,6	20 ^{1,2)}
		2,0	5,9	6,2	20 ¹⁾
NH ₃	mg/m ³	2,1	2,5	2,8	60 ^{2,4)}
		7,3	8,2	9,1	30 ^{2,4)}
HCl	mg/m ³	< 0,1	< 0,1	< 0,1	60 ^{2,4)}
		1,9	2,1	2,3	60 ^{2,4)}
HF	mg/m ³	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4 ^{2,4)}
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	4 ^{2,4)}

Anlage F

Anlage G

Für Kohlenstoffmonoxid zeigt sich an der Anlage F in der ersten Phase des Warmstarts ein generell sehr niedriges Niveau. Aufgrund des noch heißen Feuerraums kommt es während des Brennerbetriebs zu keiner Bildung von „kaltem“ Kohlenstoffmonoxid. Mit der Klärschlammaufgabe treten vorübergehend Konzentrationsspitzen auf, die auf einen kurzzeitig unvollständigen Ausbrand des Abgases hindeuten. Beim Anfahren aus dem kalten Zustand sind bis zu einer korrigierten Feuerraumtemperatur von etwa 450 °C (Phase KII) eine stete Zunahme und höhere Kohlenstoffmonoxidgehalte zu verzeichnen. Diese sind auf eine unvollständige Verbrennung des Brennstoff/Luft-Gemisches bzw. auf die Bildung von „kaltem“ Kohlenstoffmonoxid in dem noch kalten Ofen zurückzuführen. Bei der Klärschlammaufgabe treten verstärkt durch regelungstechnische Probleme und damit verbundenem Sauerstoffmangel CO-Spitzen auf.

Die Anlage G zeigt – abgesehen von Spitzen bei Störung des Verbrennungssystems (z. B. Brennerzündung, Schlammaufgabe) – stets niedrige Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen von maximal 25 mg/m³.

Schwefeldioxid liegt bei allen Anfahrvorgängen in der Regel in sehr geringer Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens (5 mg/m³) vor. An der Anlage F ist beim Warmstart zum Zeitpunkt der Klärschlammaufgabe (Phase WII) ein sprunghafter Anstieg auf 90 mg/m³ festzustellen. Innerhalb einer Stunde fallen die Konzentrationen wieder sukzessive unter die Bestimmungsgrenze.

Tab. 32 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Regelbetriebsuntersuchungen an den Klärschlammverbrennungsanlagen F und G.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
Hg	mg/m ³	< 0,001	0,002	0,002	0,05 ^{2, 4)}
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05 ^{2, 4)}
Ni	mg/m ³	< 0,003	< 0,003	< 0,004	–
		0,002	0,003	0,004	0,18 ^{2, 4)}
V	mg/m ³	< 0,001	< 0,001	< 0,001	–
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,18 ^{2, 4)}
Σ Cd, Tl ^{*)}	mg/m ³	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05 ^{2, 4)}
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,04 ^{2, 4)}
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co ₂ , Cu, Mn, Ni, V, Sn ^{**)}	mg/m ³	0,003	0,004	0,005	0,5 ^{2, 4)}
		0,003	0,004	0,004	0,5 ^{2, 4)}
Σ B(a)P, As, Cd, Co, Cr ^{**)}	mg/m ³	0,002	0,002	0,002	0,05 ^{2, 4)}
		0,003	0,004	0,005	0,05 ^{2, 4)}
B(a)P	mg/m ³	–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	–
		–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	0,01 ^{2, 4)}
PAK ^{**)}	μg/m ³	–	0,82 ¹⁾	1,07 ¹⁾	–
		–	1,17 ¹⁾	1,52 ¹⁾	–
Ind.-PCB ^{**)}	ng/m ³	–	0,19 ¹⁾	0,25 ¹⁾	–
		–	0,20 ¹⁾	0,26 ¹⁾	–
dl-PCB ^{**)}	ng WHO-TEQ/m ³	–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	–
		–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	–
PCDD/F ^{**)}	ng I-TEQ/m ³	–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	0,1 ^{2, 5)}
		–	< 0,001 ¹⁾	< 0,001 ¹⁾	0,08 ^{2, 5)}
Gesamtstaub	mg/m ³	0,3	0,3	0,3	30 ^{2, 4)}
		3,2	6,2	7,1	30 ^{2, 4)}

Anlage F	
Anlage G	

¹⁾ Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

^{**)} Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

²⁾ Umrechnung der Emissionswerte auf den Bezugssauerstoffgehalt nur für Zeiten, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt

³⁾ Umrechnung der Emissionswerte auf den Bezugssauerstoffgehalt nur für Zeiten, in denen die SNCR-Anlage in Betrieb und der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt ist

⁴⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (≥ 0,5 h, ≤ 2 h), bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

⁵⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (≥ 6 h), bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

Für Stickstoffmon-/dioxid zeigen sich bei allen Anfahrvorgängen folgende Gemeinsamkeiten: Über den Zeitraum des reinen Anfahrbrennerbetriebs steigen die Emissionen aufgrund der thermisch bedingten Stickoxidbildung kontinuierlich auf 120 bis 145 mg/m³ an. Beim Warmstart befindet sich der Ausgangswert nach der Zündung des Anfahrbrenners – im Unterschied zu den Kaltstarts mit ca. 20 bis 30 mg/m³ – mit 100 mg/m³ bereits auf einem höheren Level. Weiter liegen nach der Klärschlamm-aufgabe, die aufgrund der brennstoffbedingten Stickoxidbildung einen sprunghaften Anstieg der Gehalte im Verbrennungsabgas zur Folge hat, stets hohe Konzentrationen und -schwankungen vor. Diese sind durch das Regelungsverhalten der SNCR-Anlagen (Regelstrecke mit Totzeit) bedingt und gehen nach dem Einschwingvorgang auf das Niveau des (quasi-)stationären Regelbetriebs zurück.

Distickstoffmonoxid tritt in nennenswerten, schwankenden Konzentrationen ab dem Zeitpunkt der Klärschlamm-aufgabe auf (Anlage F: Phase WII und KIII; Anlage G: Phase II).

Tab. 33: Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Anfahrbetriebsuntersuchungen an den Klärschlammverbrennungsanlagen F und G (Forts. S. 50).

Parameter	Einheit	Messwert \bar{y}				
		WI	WII	I	II	III
Dauer	hh:mm	03:29	02:26	06:11	07:43	03:00
		–	–	05:47	11:51	06:00
Volumenstrom $\times 10^{-3}$	m ³ /h	16,0	14,2	19,8	17,3	17,2
		–	–	3,4	7,5	12,3
Temperatur	°C	89	98	64	94	101
		–	–	21	66	110
O ₂	Vol.-%	15,9	11,0	18,6	16,3	12,8
		–	–	18,7	13,5	10,6
CO ₂	Vol.-%	3,7 ⁾	8,2 ⁾	1,7 ⁾	3,4 ⁾	6,5 ⁾
		–	–	1,5 ⁾	4,7 ⁾	7,9 ⁾
CO	mg/m ³	1,4 ⁾	17,4 ⁾	89,5 ⁾	114 ⁾	94,5 ⁾
		–	–	12,8 ⁾	10,8 ⁾	5,6 ⁾
SO ₂	mg/m ³	< 0,1 ⁾	15,4 ⁾	2,7 ⁾	2,4 ⁾	2,7 ⁾
		–	–	0,6 ⁾	0,7 ⁾	0,6 ⁾
Σ NO, NO ₂	mg/m ³	125 ⁾	76,6 ⁾	47,3 ⁾	83,9 ⁾	220 ⁾
		–	–	28,0 ⁾	115 ⁾	161 ⁾
N ₂ O	mg/m ³	< 0,1 ⁾	357 ⁾	0,5 ⁾	2,1 ⁾	88,6 ⁾
		–	–	0,1 ⁾	16,4 ⁾	172 ⁾
C _{ges}	mg/m ³	0,6 ⁾	6,1 ⁾	40 ⁾	3,8 ⁾	31 ⁾
		–	–	11 ⁾	9,0 ⁾	1,3 ⁾
NH ₃	mg/m ³	–	–	0,5 ⁾	0,5 ⁾	7,7 ⁾
		–	–	–	–	–
HCl	mg/m ³	1,1 ⁾	1,7 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾
		–	–	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾
HF	mg/m ³	< 0,1 ⁾	< 0,2 ⁾	< 0,2 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾
		–	–	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾	< 0,1 ⁾

Anlage F	
Anlage G	

Höhere Konzentrationen bzw. Konzentrationsspitzen an organischen Stoffen (C_{ges}) treten an beiden Anlagen und bei allen Anfahrvorgängen jeweils zur Klärschlammaufgabe bzw. bei technischen Problemen mit Sauerstoffmangel (z. B. Brennerstörungen, Überdruck im Feuerraum etc.) auf. Beim Kaltstart der Anlage F fällt auf, dass bereits ab der Vorbelüftung und damit noch vor dem Brennerbetrieb hohe Gesamtkohlenstoffkonzentrationen im Bereich zwischen 200 und 260 mg/m³ vorliegen. Diese gehen nach der Brennerzündung innerhalb von 2,5 Stunden auf unter 20 mg/m³ zurück. Als mögliche Quelle wird eine organische Verunreinigungen der Sandschüttung im Wirbelschichtofen bzw. geruchsintensive Ströme an Abluft oder Brüden vermutet. Abgesehen davon liegen stets niedrige Konzentrationen an organischen Stoffen unter 20 mg/m³ bzw. im Bereich der Bestimmungsgrenze (1 mg/m³) vor.

Die Emissionen an Ammoniak (max. 7,7 mg/m³) sowie gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen (HCl/HF: max. 2,1/< 0,2 mg/m³) sind permanent niedrig.

Hinsichtlich des Gesamtstaubs fallen an beiden Anlagen jeweils bei den Kaltstartvorgängen teilweise höhere Emissionen an, die sich negativ auf die Höhe der Emissionen von staubgebundenen Schadstoffen (z. B. Metalle, PAK, PCB, PCDD/F) auswirken. Als Ursachen wurden bei der Anlage F eine in verkehrter Drehrichtung laufende Austragschnecke am Gewebefilter (bei der Revision elektrisch falsch angeschlossen), Staubdepots sowie Undichtigkeiten von Bypass-Klappen, bei der Anlage G Korrosionsprozesse (von den Wandungen abgeplatzte Rost-Partikel) lokalisiert. Wie sich zeigte, befand sich an Anlage G die Korrosion in einem fortgeschrittenen Stadium, so dass der Kamin aufgrund der Windbelastung bei einem Sturm 15 Monate später umknickte.

Tab. 33 (Forts.): Mittelwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Anfahr-
betriebsuntersuchungen an den Klärschlammverbrennungsanlagen F und G.

Parameter	Einheit	Messwert \bar{y}				
		WI	WII	I	II	III
Hg	mg/m ³	< 0,001 ^{*)}	0,005 ^{*)}	0,007 ^{*)}	0,005 ^{*)}	0,009 ^{*)}
		–	–	0,023 ^{*)}	0,058 ^{*)}	0,007 ^{*)}
Ni	mg/m ³	–	–	0,014 ^{*)}	< 0,004 ^{*)}	< 0,003 ^{*)}
		–	–	–	–	–
V	mg/m ³	–	–	< 0,005 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}
		–	–	–	–	–
Σ Cd, Tl ^{**)}	mg/m ³	–	–	0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}
		–	–	–	–	–
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn ^{**)}	mg/m ³	–	–	0,250 ^{*)}	0,032 ^{*)}	0,009 ^{*)}
		–	–	–	–	–
Σ B(a)P, As, Cd, Co, Cr ^{**)}	mg/m ³	–	–	0,033 ^{*)}	0,005 ^{*)}	0,005 ^{*)}
		–	–	–	–	–
B(a)P	mg/m ³	< 0,001 ^{*)}				
		–	–	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}
PAK ^{**)}	μg/m ³	2,8 ^{*)}	3,2 ^{*)}	37,4 ^{*)}	7,15 ^{*)}	159 ^{*)}
		–	–	0,98 ^{*)}	1,28 ^{*)}	0,62 ^{*)}
Ind.-PCB ^{**)}	ng/m ³	0,20 ^{*)}	0,26 ^{*)}	292 ^{*)}	49,9 ^{*)}	27,4 ^{*)}
		–	–	0,20 ^{*)}	0,40 ^{*)}	0,45 ^{*)}
dl-PCB ^{**)}	ng WHO-TEQ/m ³	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	0,001 ^{*)}	0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}
		–	–	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}
PCDD/F ^{**)}	ng I-TEQ/m ³	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	0,65 ^{*)}	0,050 ^{*)}	0,024 ^{*)}
		–	–	< 0,001 ^{*)}	< 0,001 ^{*)}	0,002 ^{*)}
Gesamtstaub	mg/m ³	1,3 ^{*)}	1,0 ^{*)}	24,9 ^{*)}	35,6 ^{*)}	3,9 ^{*)}
		–	–	0,7 ^{*)}	< 0,3 ^{*)}	< 0,3 ^{*)}

Anlage F

Anlage G

*) Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%

**) Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

Die Quecksilberemissionen sind beim Warm- und Kaltstart der Anlage F im Vergleich zum regulären Anlagenbetrieb nicht bzw. etwas höher. Anders als an Anlage F zeigt sich bei Anlage G trotz geringer Rohgaswerte relativ bald nach der Zündung des Anfahrbrenners ein deutlicher Anstieg der Quecksilberkonzentrationen (Maximum 0,120 mg/m³) bis zum Beginn der Adsorbendosierung am Gewebefilter. Ab diesem Zeitpunkt nehmen die Gehalte kontinuierlich bis zum Ende der zweistündigen Stabilisierungsphase nach Klärschlammaufgabe auf 0,006 mg/m³ ab. Die Messwerte belegen eine Mobilisierung von Quecksilber aus dem stromabwärts zur Rohgasmessstelle gelegenen Abgasreinigungs- und Kanalsystem.

Die Abgaskonzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen sind an der Anlage F in allen Phasen des Warmstarts etwas und des Kaltstarts deutlich erhöht. An der Anlage G bleiben die Emissionen auf Regelbetriebsniveau. Hinsichtlich Benzo(a)pyren, das häufig als Leitsubstanz für die 16 PAK nach EPA [13] herangezogen wird, sind an beiden Anlagen keine erhöhten Emissionen zu erkennen.

Bei den Indikator-PCB, dl-PCB und PCDD/F zeigt der Kaltstart der Anlage F in allen Aufheizphasen hohe Emissionswerte, die bis zu 1.000-fach höher als im Regelbetrieb sind. An der Anlage G ist dieser Effekt nicht bzw. kaum ausgeprägt.

Bewertung und Konsequenzen

Im ungestörten Regelbetrieb der Klärschlammverbrennungsanlagen werden die Grenzwerte der Genehmigungsbescheide sicher eingehalten. Demgegenüber zeigen sich im Anfahrbetrieb – der an beiden Anlagen nicht den Grenzwertbeschränkungen der Genehmigungsbescheide unterliegt – bei Anlage F (Kaltstart) teils höhere Emissionen an Gesamtstaub und PCDD/F sowie bei Anlage G an Quecksilber (Kaltstart), während beim Warmstart die Konzentrationsverläufe dem Regelbetrieb ähneln.

Als Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen bei Anfahrvorgängen kommen an beiden Anlagen die

- Erkundung und Entfernung von Ablagerungen in abgasführenden Anlagenteilen (insbesondere Kanäle, Gewebefilter etc.),
- möglichst frühzeitige Inbetriebnahme der PCDD/F- bzw. Quecksilber-Ad-/Absorptionsstufe (Flugstromadsorber mit Gewebefilterabscheider bzw. Fällmitteldosierung am Abgaswäscher)

zum Einsatz. Darüber hinaus wurde an Anlage G zur Minderung der Quecksilberemissionen aus dem Abgaswäscher die stromaufwärts gelegenen Abscheidestufen größer dimensioniert und dadurch deren Abscheideleistung optimiert. Insgesamt stellen die Anfahrvorgänge der Klärschlammverbrennungsanlagen aus dem warmen und kalten Betriebszustand keine Ereignisse dar, von denen umweltrelevante Emissionen ausgehen.

3.5 Blähglasherstellung

In der Glasschäumenanlage wird aus Altglas, das aufbereitet, mit Binde- und Blähmittel versetzt und granuliert wird, in Öfen (sog. Glasschäumrohre) ein rundkörniges, geschlossenporiges Produkt geringerer Dichte (sog. Blähglasgranulat) erzeugt. Dieses findet in der Baustoffindustrie als inertes, isolierendes, schallabsorbierendes und witterungsbeständiges Material vielseitige Verwendung. Die Abb. 5 zeigt die Grundfließbilder und die Tab. 34, S. 53, gibt eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten der an der Glasschäumenanlage untersuchten Teilanlagen Glasbruchtrockner (H), direkt (I) und indirekt beheiztes Glasschäumrohr (J). Andere an der Glasschäumenanlage vorhandene Anlagenteile, wie die beiden Granulattrockner (Drehrohrofen bzw. Sprühtrockner) bzw. mehrere identisch aufgebaute direkt beheizte Glasschäumrohre, wurden wegen der Ähnlichkeiten zu den oben genannten Anlagen nicht separat untersucht.

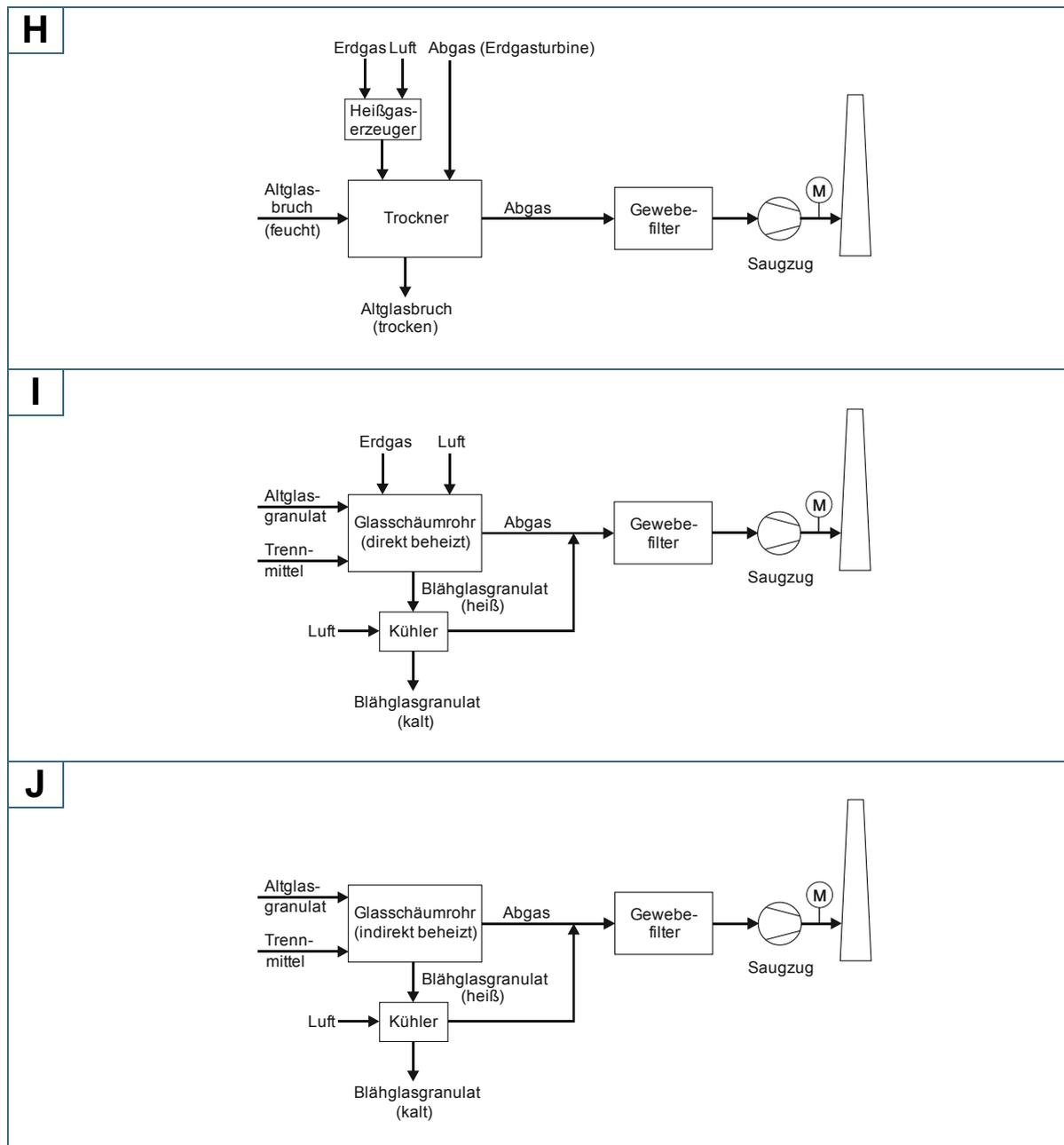


Abb. 5: Grundfließbilder des Glasbruchtrockners (H) sowie der direkt (I) und indirekt beheizten Glasschäumrohre (J) mit Abgasmessstellen M.

Tab. 34: Übersicht über wesentliche Kenndaten des Glasbruchrockners (H), des direkt (I) und indirekt beheizten Glasschäumrohrs (J).

Auslegungsdaten	Anlage H	Anlage I	Anlage J
Bauart	Drehrohr, einzügig	Drehrohr, einzügig	Drehrohr, einzügig
Betriebsweise	Gleichstrom, kontinuierlich	Gegenstrom, kontinuierlich	Gegenstrom, kontinuierlich
Einsatzstoffe	Altglas, gebrochen	Trockengranulat (Glas, Binde-, Bläh-, Trennmittel)	Trockengranulat (Glas, Binde-, Bläh-, Trennmittel)
Durchsatzleistung max.	10 Mg/h	1,8 Mg/h	1,8 Mg/h
Art der Beheizung	Direkt	Direkt	Indirekt
Brennstoffe, Heizgase	Erdgas, Abgas Erdgasturbine	Erdgas	Erdgas
Feuerungswärmeleistung	1,50 MW	1,35 MW	1,60 MW
Abgasvolumenstrom	Ca. 9.000 m ³ /h	Ca. 20.000 m ³ /h (inkl. Kühlerabluft)	Ca. 5.500 m ³ /h (inkl. Kühlerabluft)
Abgasreinigungseinrichtung	Gewebefilter	Gewebefilter	Gewebefilter, SNCR (Versuchsbetrieb)
Abgasreinigungsrückstand	Gewebefilterstaub	Gewebefilterstaub	Gewebefilterstaub

Im Glasbruchrockner (H) werden die mit Etiketten, Kunststoffkappen und Inhaltsresten verunreinigten Glasscherben getrocknet. Dies ist für die nachfolgenden Reinigungs- (Störstoffabscheidung) und Aufarbeitungsschritte (Mahlung, Klassierung) des Materials in Mühlen, Siebmaschinen und Sichern notwendig. Der Glasbruchrockner ist als einzüiges Drehrohr mit direkter Beheizung ausgeführt. Die Trocknung erfolgt im Gleichstrom mit Heißgas aus einem erdgasbetriebenen Heißgaserzeuger (Brenner) sowie Abgas aus einer erdgasbetriebenen Gasturbine. Zur Minderung der Staubemissionen ist dem Trockner abgasseitig ein Gewebefilter nachgeschaltet. Das gereinigte Abgas gelangt über den Kamin in die Umgebung.

In den Glasschäumrohren (I/J, direkt/indirekt mit Erdgas beheizte Drehrohröfen) werden die aus Glasmehl, Binde- und Blähmitteln bestehenden trockenen Granulate nach Zugabe von Trennmittel erhitzt. Bei Temperaturen bis 900 °C bläht sich das Granulat infolge der thermischen Zersetzung des darin enthaltenen Blähmittels auf ein Mehrfaches des Ausgangsvolumens auf. Die Blähprodukte werden anschließend in Kühlern mit Umgebungsluft abgekühlt. Am direkt beheizten Glasschäumrohr wird das Brennerabgas mit dem Reaktionsabgas aus der thermischen Zersetzung des Blähmittels und der Kühlerabluft in einem Gewebefilter entstaubt und über einen Kamin in die Umgebung abgegeben. Beim indirekt beheizten Glasschäumrohr wird das Reaktionsabgas mit der Kühlerabluft getrennt vom Brennerabgas in einem Gewebefilter entstaubt und über einen Kamin abgeleitet.

Untersuchungsziel war, Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der immissionsschutzrechtlich gemäß 4. BImSchV [4], [5] nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen H, I und J im Regelbetrieb (RB) für bestimmte anorganische und organische Schadstoffe, insbesondere Stickstoffoxide, Quecksilber sowie kanzerogene und toxische organische Verbindungen (PAK, PCB und PCDD/F), zu erhalten. Des Weiteren sollte in einem einstündigen Versuchsbetrieb (VB) am indirekt beheizten Glasschäumrohr (Anlage J) die prinzipielle Wirksamkeit der Entstickung nach dem SNCR-Verfahren zur Minderung der Stickstoffoxidemissionen getestet werden.

Glasbruchtrockner

Das gereinigte Abgas des Glasbruchtrockners (Anlage H) weist für Schwefeldioxid, Stickstoffoxide (Stickstoffmon-/dioxid inkl. Distickstoffmonoxid), Gesamtstaub, staubförmige anorganische Stoffe der Klasse I (Quecksilber, Thallium), Klasse II (Blei, Cobalt, Nickel, Selen, Tellur) und Klasse III (Antimon, Chrom, Kupfer, Mangan, Vanadium, Zinn), krebserzeugende Stoffe der Klasse I (Arsen, Benzo(a)pyren, Cadmium, Cobalt, Chrom(VI)), dl-PCB und PCDD/F niedrige Emissionen auf. Für Ammoniak und organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) sind deutlich erkennbare, für die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe etwas höhere sowie für die Indikator-PCB vergleichsweise hohe Emissionswerte festzustellen. Soweit in der TA Luft [6] bei den vorgenannten Stoffe Festlegungen von Emissionswerten bestehen, werden diese für die Massenkonzentration eingehalten.

Direkt beheiztes Glasschäumrohr

Die Abgasgehalte an Schwefeldioxid, Ammoniak, Distickstoffmonoxid, Gesamtstaub, staubförmigen anorganischen Stoffen der Klasse II und III und dl-PCB sind am direkt beheizten Glasschäumrohr (Anlage I) stets niedrig und befinden sich deutlich unter den in der TA Luft [6] angegebenen bzw. z. T. an anderen Anlagentypen festgestellten Emissionswerten. Für Stickstoffmon-/dioxid, staubförmige anorganischen Stoffen der Klasse I (Quecksilber), organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Indikator-PCB zeigen sich höhere sowie für die PCDD/F hohe Emissionswerte. Der PCDD/F-Emissionswert der TA Luft [6] von $0,1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ wurde überschritten. Würde man einen Fremdluftanteil (gemäß Nr. 5.1.2 TA Luft [6]), der aus der Vermischung des Abgases aus dem Schäumrohr mit der geringer belasteten Kühlerabluft aus dem Produktkühler resultiert, aber wegen des fehlenden Messplatzes nicht bestimmt werden konnte, berücksichtigen, könnten sich rechnerisch für die PCDD/F-Massenkonzentration noch höhere Emissionswerte ergeben.

Indirekt beheiztes Glasschäumrohr

Am indirekten beheizten Glasschäumrohr (Anlage J) ergeben sich im Regelbetrieb im Vergleich zum direkt beheizten signifikante Unterschiede bei den Untersuchungsparametern. Der Abgasvolumenstrom – bestehend aus Reaktionsabgas und Kühlerabluft – ist aufgrund der fehlenden Abgasströme der Brenner nur etwa ein Viertel so hoch. Die Abgasgehalte an Ammoniak, staubförmigen anorganischen Stoffen der Klasse II und III, organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff C_{ges} , polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Indikator-PCB, dl-PCB und PCDD/F) sind z. T. – insbesondere hinsichtlich der Gehalte an organischen Stoffen – erheblich niedriger. Höhere Konzentrationswerte zeigen sich für Stickstoffoxide (Stickstoffmon-/dioxid) bzw. staubförmige anorganischen Stoffen der Klasse I (Quecksilber); die entsprechenden Emissionswerte der TA Luft [6] von $0,35 \text{ g/m}^3$ bzw. $0,050 \text{ mg/m}^3$ werden um etwa 20 % überschritten.

In einem einstündigen Versuchsbetrieb wurde am indirekt beheizten Glasschäumrohr (Anlage J) über eine Lanze am Schäumrohrende gasförmiges Ammoniak in das Schäumrohr eingedüst, um die Wirksamkeit des Entstickungsverfahrens nach der SNCR-Technologie prinzipiell zu erproben. Es zeigt sich, dass die Konzentrationen an Stickstoffoxiden (Stickstoffmon-/dioxid) um etwa die Hälfte sowie unter den in der TA Luft [6] angegeben Wert von $0,35 \text{ g/m}^3$ zurückgehen. Gleichzeitig steigen die Ammoniakgehalte (Schlupf) mit bis zu $37,3 \text{ mg/m}^3$ über den dort genannten Emissionswert von 30 mg/m^3 an.

Tab. 35: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Untersuchungen am Glasbruchrockner (H), direkt (I) und indirekt beheizten Glasschäumrohr (J) der Glasschäumenanlage (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage H, I, J
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Emissionswert [6]
Volumenstrom	m ³ /h	8.840	8.884	9.328	–
		19.604	21.055	22.108	–
		5.538	5.538	5.815	–
Temperatur	°C	64,2	64,9	66,2	–
		122	123	126	–
		58,5	61,5	62,7	–
O ₂	Vol.-%	19,3	19,6	20,6	–
		20,5	20,6	21,6	–
		21,1	21,3	22,3	–
		21,3	21,3	22,4	–
CO ₂	Vol.-%	0,9	1,3	1,3	–
		0,6	0,6	0,6	–
		0,2	0,3	0,3	–
		0,2	0,2	0,3	–
CO	g/m ³	0,050	0,061	0,064	–
		0,051	0,078	0,082	–
		0,024	0,039	0,041	–
		0,018	0,020	0,021	–
SO ₂	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,35 ¹⁾²⁾
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,35 ¹⁾²⁾
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,35 ¹⁾²⁾
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,35 ¹⁾²⁾
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,009	0,013	0,014	0,35 ¹⁾³⁾
		0,225	0,256	0,269	0,35 ¹⁾³⁾
		0,349	0,407	0,427	0,35 ¹⁾³⁾
		0,195	0,207	0,217	0,35 ¹⁾³⁾
N ₂ O	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	–
		0,016	0,019	0,020	–
		0,017	0,017	0,018	–
NH ₃	mg/m ³	13,7	17,6	19,4	30 ¹⁾
		1,0	1,2	1,3	30 ¹⁾
		0,2	0,2	0,2	30 ¹⁾
		27,4	33,9	37,3	30 ¹⁾

Anlage H (RB)
 Anlage I (RB)
 Anlage J (RB)
 Anlage J (VB)

Tab. 35 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Untersuchungen am Glasbruchrockner (H), direkt (I) und indirekt beheizten Glasschäumrohr (J) der Glasschäumenanlage.

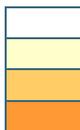
Parameter	Einheit	Messwert			Anlage H, I, J Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{max}	$y_{max} + U_p$	
Gesamtstaub	mg/m ³	1,0	1,6	1,9	20 ¹⁾
		< 0,3	< 0,3	< 0,3	20 ¹⁾
		0,5	0,5	0,6	20 ¹⁾
Σ Hg, Tl ¹⁾	mg/m ³	0,002	0,003	0,004	0,05 ¹⁾⁴⁾
		0,029	0,033	0,040	0,05 ¹⁾⁴⁾
		0,045	0,052	0,062	0,05 ¹⁾⁴⁾
Σ Pb, Co, Ni, Se, Te ¹⁾	mg/m ³	< 0,001	0,001	0,001	0,5 ¹⁾⁵⁾
		< 0,001	0,001	0,001	0,5 ¹⁾⁵⁾
		0,002	0,003	0,004	0,5 ¹⁾⁵⁾
Σ Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn ¹⁾	mg/m ³	< 0,001	< 0,001	< 0,001	1 ¹⁾⁶⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	1 ¹⁾⁶⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	1 ¹⁾⁶⁾
Σ As, B(a)P, Cd, Co, Cr(VI) ¹⁾	mg/m ³	0,001	0,001	0,001	0,05 ¹⁾⁷⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05 ¹⁾⁷⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05 ¹⁾⁷⁾
C _{ges}	mg/m ³	16,5	18,9	19,9	50 ¹⁾⁸⁾
		8,1	10,8	11,4	50 ¹⁾⁸⁾
		6,1	7,2	7,6	50 ¹⁾⁸⁾
		5,3	5,5	5,7	50 ¹⁾⁸⁾
PAK ¹⁾	µg/m ³	32,6	34,3	44,6	–
		26,3	28,7	37,3	–
		11,0	12,4	16,1	–
Ind. –PCB ¹⁾	ng/m ³	1022	1215	1580	–
		206	251	326	–
		0,359	0,378	0,491	–
dl-PCB ¹⁾	ng WHO-TEQ (2005) /m ³	0,007	0,008	0,012	–
		0,008	0,010	0,015	–
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	–
PCDD/F ¹⁾	ng I-TEQ/m ³	< 0,001	< 0,001	0,001	0,1 ⁹⁾¹⁰⁾
		0,161	0,194	0,291	0,1 ⁹⁾¹⁰⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1 ⁹⁾¹⁰⁾
	µg I-TEQ/h	0,007	0,007	0,011	0,25 ¹⁰⁾
		3,39	4,08	6,12	0,25 ¹⁰⁾
		< 0,001	0,001	0,002	0,25 ¹⁰⁾

Anlage H (RB)

Anlage I (RB)

Anlage J (RB)

Anlage J (VB)



¹⁾ Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

²⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Schwefeloxide (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid), angegeben als Schwefeldioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])

³⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])

⁴⁾ Staubförmige anorganische Stoffe der Klasse I, Quecksilber, Thallium und ihre Verbindungen (Nr. 5.2.2 TA Luft [6])

⁵⁾ Staubförmige anorganische Stoffe der Klasse II, Blei, Cobalt, Nickel, Selen, Tellur und ihre Verbindungen (Nr. 5.2.2 TA Luft [6])

⁶⁾ Staubförmige anorganische Stoffe der Klasse III, Antimon, Chrom, Kupfer, Mangan, Vanadium, Zinn und ihre Verbindungen; Cyanide, Fluoride leicht löslich (Nr. 5.2.2 TA Luft [6])

⁷⁾ Krebs erzeugende Stoffe der Klasse I, Arsen, Cadmium und ihre Verbindungen; Benzo(a)pyren; wasserlösliche Cobaltverbindungen, Chrom(VI)verbindungen (außer Barium-/Bleichromat) (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

⁸⁾ Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])

⁹⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (> 6 h)

¹⁰⁾ Schwer abbaubare, leicht anreicherbare und hochtoxische organische Stoffe, Dioxine und Furane (Nr. 5.2.7.2 in Verbindung mit Anhang 5 TA Luft [6])

Bewertung und Konsequenzen

Vom Glasbruchrockner gehen Ammoniakemissionen aus, die durch die stickstoffhaltigen organischen Verunreinigungen im Altglasbruch, die während der mehrmonatigen Lagerung durch mikrobiologische Prozesse zu Ammoniak abgebaut werden, bedingt sind. Des Weiteren sind infolge der Verunreinigungen des Materials mit Organik ebenfalls Emissionen organischer Stoffe vorhanden, die in Abhängigkeit der thermischen Materialbelastung die Ursache für weitere Reaktionsprodukte, z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, sein können. Auffallend sind die hohen Emissionen an Indikator-PCB, deren Ursache vermutlich in Verunreinigungen des Einsatzstoffes begründet ist.

Beim direkt beheizten Glasschäumrohr liegen hohe Emissionen an PCDD/F vor, die es zu mindern gilt. Die PCDD/F bilden sich bei den vorherrschenden thermischen Prozessbedingungen aus den in den Einsatzstoffen vorhandenen bzw. im Prozess gebildeten Substanzen (z. B. Precursoren) in direkten oder heterogen katalysierten Reaktionen.

Das indirekt beheizte Glasschäumrohr erweist sich hinsichtlich der Emissionen an organischen Spurenschadstoffen (PAK, Indikator-PCB, dl-PCB und PCDD/F) als die deutlich bessere Technologie. Im Hinblick auf die dort erforderlichen Maßnahmen zur Minderung von Emissionen (Stickstoffoxide und ggf. Quecksilber) dürfte dies beim indirekt beheizten Glasschäumrohr mit wesentlich einfacheren Maßnahmen kostengünstiger zu erzielen sein. Prinzipiell funktioniert – wie der Betriebsversuch zeigt – das dort getestete Verfahren nach der SNCR-Technologie. Vor der endgültigen technischen Realisierung sind allerdings noch weitere Untersuchungen und Optimierungen (z. B. Minderung des Ammoniak schlupfs) notwendig.

Festzuhalten ist, dass hinsichtlich der Einhaltung der Emissionswerte der TA Luft [6] an den in der Glasschäumenanlage untersuchten drei Teilanlagen Glasbruchrockner, direkt beheiztes und indirekt beheiztes Glasschäumrohr ein individuell unterschiedlicher Handlungsbedarf zur Minderung Emissionen besteht. Zur Minderung der Schadstoffemissionen kommen an der Anlage folgenden primär- und sekundärseitige Maßnahmen in Betracht:

- Qualitätssicherung für die Einsatzstoffe zur Minderung des Eintrags an organischen und anorganischen Schadstoffen, wie PCB, Quecksilber etc., in das System,
- integrale bzw. nachgeschaltete Abgasreinigungsverfahren, wie SNCR-Verfahren zur Stickstoffoxidminderung und Adsorptionsverfahren, z. B. für Quecksilber und PCDD/F.

Zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen wird zwischen dem Betreiber der Glasschäumenanlage und der Genehmigungsbehörde ein öffentlich rechtlicher Vertrag geschlossen, in dem die zu treffenden Maßnahmen und die einzuhaltenden Emissionsbegrenzungen festgelegt sind.

3.6 Schuhproduktion

In der Produktion von Schwer- und Bergschuhen ist aus Sicherheitsaspekten auch künftig der Einsatz von Klebstoffen und Zubereitungen mit organischen Lösemitteln erforderlich. Diese verdampfen während des Herstellungsprozesses und bewirken über die Abluft Emissionen an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Ohne entsprechende Minderungseinrichtungen überschreiten die Anlagen den in Anhang III der 31. BImSchV [8] angegebenen Gesamtemissionswert von 25 g emittierter organischer Lösemittel je vollständiges Paar Schuhe. Nach [20] waren 2007 in Bayern vier Schuhproduktionen im lösemittelverarbeitenden Bereich tätig.

Die untersuchten Abgasreinigungsanlagen zweier Schuhproduzenten wurden zur Einhaltung des Emissionswerts der 31. BImSchV [8] im Jahr 2010 bzw. 2011 errichtet. Die Abb. 6 zeigt die Grundfließbilder beider Abgasreinigungseinrichtungen und Tab. 36, S. 61, eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

In den Anlagen K und L kommen im Bereich des Sohlen-, Bodenbaus, der Stepperei sowie den Reparaturwerkstätten Klebstoffe und Zubereitungen mit organischen Lösemitteln zum Einsatz. Die Lösemittel bzw. Klebstoffe werden in Fässern vorgehalten; sie werden mittels Dosiereinrichtungen oder Pinsel entnommen und auf die zu reinigenden bzw. zu klebenden Teile aufgetragen. Die organischen Lösemittel verdampfen und gelangen mit der Abluft über die Erfassungselemente und Absaugeinrichtungen an den einzelnen Arbeitsplätzen bzw. Aggregaten zu den Abgasreinigungseinrichtungen.

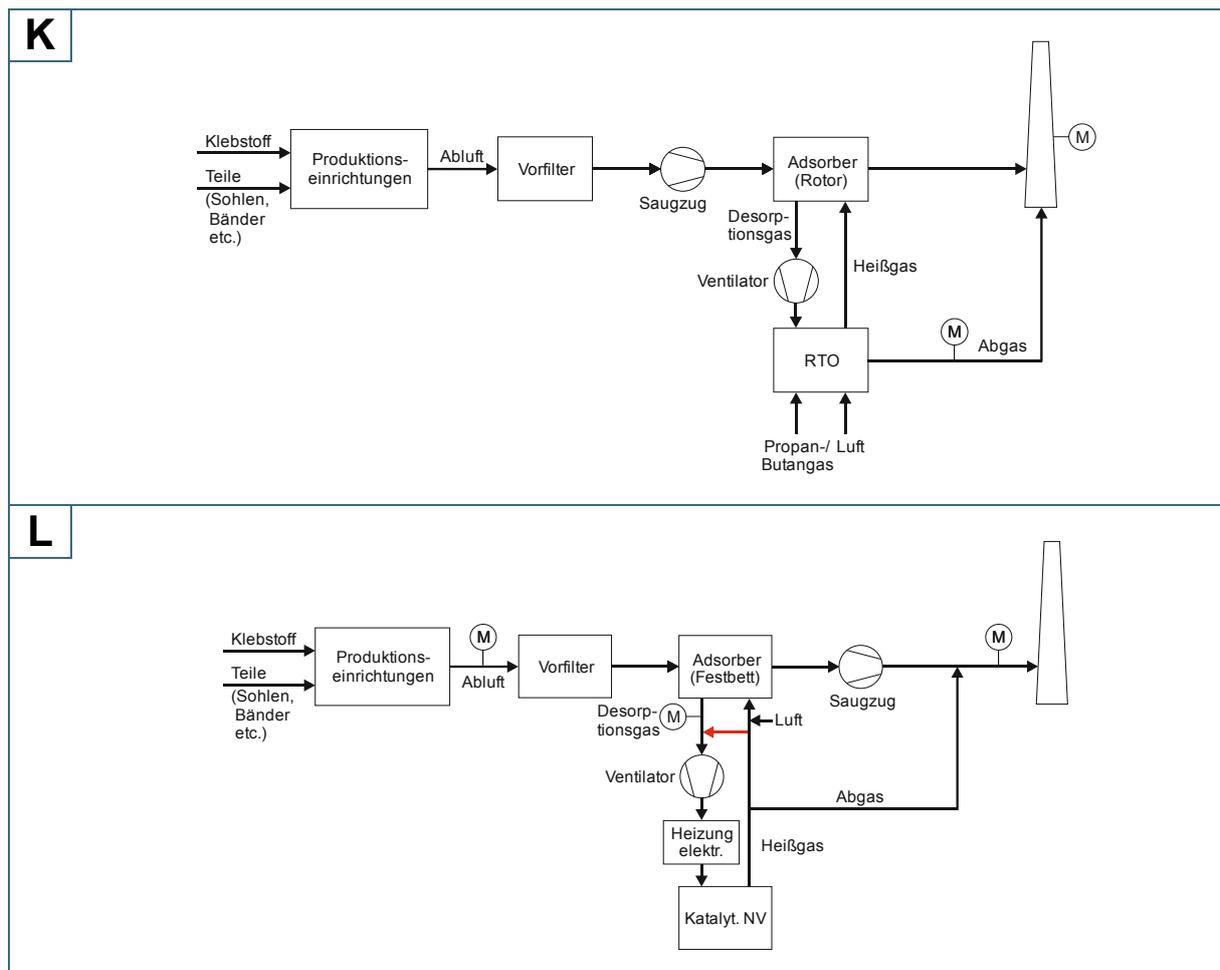


Abb. 6: Grundfließbilder der beiden Abgasreinigungseinrichtungen zweier Schuhproduktionen K und L mit Abgassmessstellen M.

Tab. 36: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Schuhproduktionen K und L.

Auslegungsdaten	Anlage K	Anlage L
Produktionsbereiche	Sohlen-, Bodenbau, Stepperei, Service, Werkstatt	Sohlen-, Bodenbau, Stepperei, Service, Werkstatt
Schuhmodelle	Trekking	Trekking
Leistung maximal	1.800 Paar Schuhe/Tag	1.300 Paar Schuhe/Tag
Leistung real	Ca. 1.250 Paar Schuhe/Tag	Ca. 800 Paar Schuhe/Tag
Emissionsrelevante Einsatzstoffe	Lösemittelhaltige Klebstoffe, Verdünner, Imprägniermittel	Lösemittelhaltige Klebstoffe, Verdünner, Imprägniermittel
Abluftvolumenstrom aus Produktion	Ca. 28.000 m ³ /h	Ca. 10.000 m ³ /h
Abgasreinigungseinrichtung	Vorabscheider (Einweggewebefilter), Adsorber (Zeolith-Rotor), regenerative thermische Oxidationsanlage (RTO)	Vorabscheider (Einweggewebefilter), Adsorber (zwei Zeolith-Festbetten), katalytische Nachverbrennung (KNV)
Abgasreinigungsbetrieb	Adsorption und Oxidation simultan während Produktion	Adsorption simultan während Produktion und Oxidation nach Produktion
Abgasreinigungsrückstand	Staub auf/in Filtermatten	Staub auf/in Filtermatten

Zur Minderung der VOC-Emissionen kommen bei den beiden untersuchten Schuhproduzenten z. T. unterschiedliche Abgasreinigungstechnologien (siehe Tab. 36) zum Einsatz. Bei der Anlage K werden die organischen Stoffe während der täglichen Produktion simultan an einem Adsorber (Adsorptionsrad, sog. Zeolith-Rotor) ad- und desorbiert und der mit organischen Stoffen beladene Desorptionsgasstrom in einer regenerativen thermischen Oxidationsanlage (RTO) behandelt. An der Anlage L erfolgen die Adsorption und Desorption/Oxidation zeitlich getrennt. Während der täglichen Produktion werden die organischen Stoffe im Adsorber (zwei Zeolith-Festbetten) abgeschieden und im Anschluss daran desorbiert. Das mit organischen Stoffen beladene Desorptionsgas wird in einer katalytischen Nachverbrennungseinheit (KNV) oxidiert. Bei beiden Abgasreinigungsverfahren fallen – abgesehen von bedarfsabhängig zu erneuernden Filtermatten der Staubvorabscheidung – keine festen Rückstände und Abgasreinigungsprodukte an. Untersuchungsschwerpunkte an beiden Abgasreinigungsanlagen waren jeweils die Emissionen an gasförmigen organischen Stoffen der Adsorptions- und Oxidationseinheiten.

Regelbetrieb

Die Untersuchungen erfolgten jeweils im Regelbetrieb der Produktions- und Abgasreinigungsanlagen. In den Tab. 37 und Tab. 38, S. 63 und 64, sind die in den Genehmigungsbescheiden bzw. der TA Luft [6] separat für die Adsorptions- bzw. Oxidationseinrichtungen festgelegten Emissionsbegrenzungen den realen Emissionswerten (Mittel- und Maximalwerte) gegenübergestellt. Die Emissionsbegrenzungen in den Genehmigungsbescheiden der Anlagen K und L orientieren sich bei den Adsorptionseinrichtungen an der TA Luft [6]. Bei den Oxidationseinrichtungen wurden z. T. niedrigere Grenzwerte festgelegt.

Für die Emissionen der Adsorptionseinrichtungen ergibt sich unter Berücksichtigung der Messmöglichkeiten¹ und -unsicherheiten Folgendes:

An der Anlage L liegen die Sauerstoff- bzw. Kohlenstoffdioxidgehalte mit Werten von 21,0 Vol.-% bzw. 0,1 Vol.-% sowie die Gehalte der anorganischen Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden mit Konzentrationen jeweils unter den Bestimmungsgrenzen der Messverfahren im

¹ An der Anlage K ist eine direkte Ermittlung der Emissionen an anorganischen und organischen Stoffen im Abgas der Adsorptionseinrichtung aufgrund des fehlenden Messplatzes (Grund: Platzverhältnisse nicht ausreichend) unmöglich. Lt. Genehmigungsbehörde sind die Emissionen der Adsorptionseinrichtung indirekt über eine Massen-/Volumenstrombilanz der Abgasströme des Mischabgases am Kamin (Reingase Adsorber und RTO-Anlage) sowie des Reingases der RTO-Anlage zu bestimmen.

Bereich von sauberer Umgebungsluft [21]. Die maximalen Emissionen an organischen Stoffen, angegeben als Gesamtkohlenstoff (C_{ges}), sind bei der Anlage K mit Werten von $13,0 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,343 \text{ kg/h}$ und bei der Anlage L mit Werten von $18,6 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,185 \text{ kg/h}$ stets unter den Grenzwerten der Genehmigungsbescheide von 50 mg/m^3 bzw. Emissionswerten der TA Luft [6] von $0,50 \text{ kg/h}$. Das Screening auf organische Einzelverbindungen an der RTO und KNV zeigt, dass die Gesamtkohlenstoffemissionen auch dort – wie an den Adsorbern – faktisch aus den in den Klebstoffen und Zubereitungen lt. Sicherheitsdatenblättern enthaltenen flüchtigen organischen Verbindungen Aceton, 2-Butanon und Ethylacetat resultieren. Das als Entfettungs- bzw. Reinigungsmittel in der Industrie gelegentlich noch verwendete organische Lösemittel Tetrachlorethen (Stoff der Klasse I nach Anhang 4 der TA Luft [6]) tritt im Abgas der RTO in sehr geringer Konzentration ($\text{max. } 0,01 \text{ mg/m}^3$) auf.

Hinsichtlich der Abgasemissionen der regenerativ thermischen Oxidationseinrichtung (RTO) der Anlage K und der katalytischen Oxidationseinrichtungen (KNV) der Anlage L ergeben sich prozesstechnisch und/oder reaktionstechnisch bedingte Unterschiede. Die RTO weist infolge der Verbrennung des Regelbrennstoffs Propan-/Butangasgemisch im nicht-autothermen Betrieb sowie der im Desorptionsgas enthaltenen organischen Stoffe im auto- bzw. nicht-autothermen Betrieb in der Brennkammer teilweise höhere Kohlenstoffmonoxid- und Stickstoffoxidwerte (bis zu $17,9 \text{ mg/m}^3$ bzw. $25,9 \text{ mg/m}^3$) als die KNV ($< 5,0 \text{ mg/m}^3$ bzw. bis zu $9,6 \text{ mg/m}^3$) auf. Dies ist auf die höheren Verbrennungstemperaturen von $\geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ mit Zuständen unvollständiger Oxidation bzw. thermischer Bildung von Stickstoffoxiden in der RTO zurückzuführen. Demgegenüber herrschen an der KNV bei der Oxidation der organischen Stoffe mit Katalysatortemperaturen im Bereich zwischen $250 \text{ }^\circ\text{C}$ und $450 \text{ }^\circ\text{C}$ andere Reaktionsbedingungen vor. Die Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide lt. Genehmigungsbescheiden von jeweils 100 mg/m^3 werden an beiden Anlagen sicher eingehalten.

Die durchschnittlichen Emissionskonzentrationen an organischen Stoffen, angegeben als Gesamtkohlenstoff, sind an Anlage K (RTO) und Anlage L (KNV) mit Werten von etwa 11 mg/m^3 in etwa gleich. Dagegen zeigt sich bei den maximalen Emissionskonzentrationen an der KNV mit $77,0 \text{ mg/m}^3$ ein hoher Halbstundenmittelwert (inkl. der Messunsicherheiten), der etwa dreifach über dem Maximalwert der RTO ($26,6 \text{ mg/m}^3$) liegt. Sowohl an der RTO als auch an der KNV werden die Grenzwerte für organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff, lt. Genehmigungsbescheiden von 20 mg/m^3 (RTO) bzw. 50 mg/m^3 (KNV) täglich mehr- bzw. einmal überschritten. Ursache hierfür sind laut Hersteller bei der RTO verschlissene Dichtungen im Bereich des Klappensystems und bei der KNV hohe Konzentrationen an organischen Stoffen zu Beginn der Desorptionsphase, die infolge der mit $250 \text{ }^\circ\text{C}$ noch niedrigen Katalysatortemperaturen nicht vollständig oxidativ umgesetzt werden. Trotz der einzelnen Überschreitungen der Konzentrationsgrenzwerte befinden sich die Massenströme mit maximal $0,044 \text{ kg/h}$ (RTO) bzw. $0,049 \text{ kg/h}$ (KNV) um den Faktor 10 unter dem in der TA Luft [6] angegebenen Emissionswert von $0,50 \text{ kg/h}$; sie sind daher von den Auswirkungen auf die Umwelt als nicht relevant zu bewerten.

Tab. 37: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Adsorptionseinrichtungen während der Untersuchungen an den Schuhproduktionsanlagen K und L.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert	Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$		
Volumenstrom	m ³ /h	27.014	27.735	30.509	–	–
		10.487	13.007	13.657	–	–
Temperatur	°C	–	–	–	–	–
		22,0	31,5	32,1	–	–
O ₂	Vol.-%	–	–	–	–	–
		21,0	21,1	22,2	–	–
CO ₂	Vol.-%	–	–	–	–	–
		0,1	0,1	0,1	–	–
CO	mg/m ³	–	–	–	–	–
		< 5,0	< 5,0	< 5,0	–	–
SO ₂	g/m ³	–	–	–	–	0,35 ^{1,2)}
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1,2)}
Σ NO, NO ₂	g/m ³	–	–	–	–	0,35 ^{1,3)}
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1,3)}
C _{ges}	mg/m ³	4,8	11,8	13,0	50 ^{1,4)}	50 ^{1,4)}
		5,7	17,7	18,6	50 ^{1,4)}	50 ^{1,4)}
	kg/h	0,134	0,327	0,343	–	0,50 ⁴⁾
		0,060	0,176	0,185	–	0,50 ⁴⁾
Aceton	mg/m ³	–	–	–	–	50 ^{1,4)}
		3,0	8,9	11,6	–	50 ^{1,4)}
2-Butanon	mg/m ³	–	–	–	–	50 ^{1,4)}
		0,051	0,12	0,16	–	50 ^{1,4)}
Ethylacetat	mg/m ³	–	–	–	–	50 ^{1,4)}
		0,15	0,35	0,46	–	50 ^{1,4)}
Tetrachlorethen	mg/m ³	–	–	–	–	20 ^{1,5)}
		< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	20 ^{1,5)}

Anlage K

Anlage L

- 1) Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
- 2) Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Schwefeloxide (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid), angegeben als Schwefeldioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
- 3) Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
- 4) Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])
- 5) Organische Stoffe der Klasse I (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])

Bewertung und Konsequenzen

Die Untersuchungen an den beiden lösemittelverarbeitenden Betrieben im Bereich Schuhproduktion belegen, dass die flüchtigen organischen Verbindungen in den Abgasströmen aus der Produktion durch

- Adsorption mit dem Adsorptionsmittel Zeolith effektiv abgeschlossen,
- Desorption in ein kleineres Gasvolumen verfahrenstechnisch aufkonzentriert,
- thermische bzw. katalytische Oxidation zu Kohlenstoffdioxid und Wasser eliminiert werden können.

Von den an beiden Anlagen vorhandenen Adsorptionseinrichtungen werden die Grenzwerte für organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) stets eingehalten.

Tab. 38: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Oxidationseinrichtungen während der Untersuchungen an den Schuhproduktionen K und L.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert	Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$		
Volumenstrom	m ³ /h	1.631	1.742	1.829	–	–
		835	5.200	5.460	–	–
Temperatur	°C	62,6	137	139	–	–
		59,2	235	239	–	–
O ₂	Vol.-%	20,5	21,0	22,1	–	–
		19,6	21,1	22,1	–	–
CO ₂	Vol.-%	0,5	0,8	0,9	–	–
		1,2	5,0	5,3	–	–
CO	mg/m ³	< 5,0	17,0	17,9	100 ¹⁾	–
		< 5,0	< 5,0	< 5,0	100 ¹⁾	–
SO ₂	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1, 2)}
		< 0,005	0,005	0,005	–	0,35 ^{1, 2)}
Σ NO, NO ₂	mg/m ³	< 5,0	24,7	25,9	100 ^{1, 3)}	350 ^{1, 3)}
		5,1	9,1	9,6	100 ^{1, 3)}	350 ^{1, 3)}
C _{ges}	mg/m ³	11,7	25,3	26,6	20 ^{1, 4)}	50 ^{1, 4)}
		11,2	73,3	77,0	50 ^{1, 4)}	50 ^{1, 4)}
	kg/h	0,019	0,042	0,044	–	0,50 ⁴⁾
		0,008	0,047	0,049	–	0,50 ⁴⁾
Aceton	mg/m ³	1,7	2,4	3,1	–	50 ^{1, 4)}
		9,6	13,0	16,9	–	50 ^{1, 4)}
2-Butanon	mg/m ³	2,4	3,4	4,4	–	50 ^{1, 4)}
		0,17	0,18	0,23	–	50 ^{1, 4)}
Ethylacetat	mg/m ³	2,2	2,8	3,6	–	50 ^{1, 4)}
		2,8	4,7	6,1	–	50 ^{1, 4)}
Tetrachlorethen	mg/m ³	0,01	0,01	0,01	–	20 ^{1, 5)}
		< 0,01	< 0,01	< 0,01	–	20 ^{1, 5)}

Anlage K	
Anlage L	

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

²⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Schwefeloxide (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid), angegeben als Schwefeldioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])

³⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])

⁴⁾ Organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])

⁵⁾ Organische Stoffe der Klasse I (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])

Bei den Oxidationseinrichtungen zeigt sich, dass die

- Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxid stets unterschritten werden
- Grenzwerteinhaltung für organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) an der RTO aufgrund von Undichtigkeiten im Klappensystem bzw. an der KNV aufgrund zu niedriger Voreinstellung der Katalysatortemperatur nicht immer gewährleistet war.

Abschließend ist festzuhalten, dass hinsichtlich der Grenzwerteinhaltung für organische Stoffe an den Oxidationseinrichtungen beider Anlagen zum Zeitpunkt der Messungen ein Handlungsbedarf zur Minderung der Gesamtkohlenstoffemissionen bestand. Als Maßnahme zur Verringerung wurden zwischen der Genehmigungsbehörde, dem Betreiber und dem Anlagenhersteller an der Anlage mit RTO eine Wartung des Klappensystems und an der Anlage mit KNV eine Temperaturerhöhung am Katalysator vereinbart. Trotz der Grenzwertüberschreitungen für organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff) gehen von beiden Anlagen – aufgrund der geringen Emissionsmassenströme deutlich unter 0,5 kg/h – keine umweltrelevanten Emissionen aus. Somit stellen beide Abgasreinigungsverfahren geeignete technologische Maßnahmen zur Minderung von Emission flüchtiger organischer Verbindungen bei der Schuhproduktion dar.

3.7 Elektrodenherstellung

Ein Ringofen dient dem energiesparenden, kontinuierlichen Trocknen und Brennen z. B. von Ton zu Ziegeln oder von Rohkörpern aus Koks zu Elektroden für Lichtbogenöfen etc. Diese Ofenbauform besteht aus mehreren, zu einem horizontalen Ring angeordneten Brennkammern. Zum Betrieb einer Brennkammer werden versetzbare Gasbrenner eingesetzt. Nicht befeuerte Kammern mit Rohware vor und mit fertig gebranntem Gut nach der befeuerten Brennkammer mit Brenngut werden zuluft- und abgasseitig zu einer funktionalen Einheit zusammengefasst. Dadurch wird die Energie der gebrannten Rohlinge für die Vorwärmung der Verbrennungsluft und die Energie des Abgases für die Vorwärmung/Trocknung der zu brennenden Rohlinge genutzt. Über die Betriebszeit „wandern“ die Feuer entlang des Ringofens von Brennkammer zu Brennkammer. Zur Entnahme der Fertigware wird die Brennkammer zuluftseitig abgekoppelt; die nächste Kammer wird mit frischer Rohware befüllt und zur Trocknung und Vorwärmung abgasseitig angekoppelt.

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um Ringöfen mit jeweils mehreren Kammern. In den Öfen werden Formlinge (Nadelkoks gebunden mit Pech) zu porösen Kohlenstoffkörpern für Graphitelektroden und -produkte gebrannt. Die Abb. 7 zeigt das Grundfließbild der Ringofenanlage und Tab. 39 eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

Im Jahr 2006 wurde zur Reinigung der Abluft aus dem Mischer und der Abgase aus den Ringöfen eine neue Abgasreinigungsanlage installiert. Sie besteht aus einem Vorfilter (Festbett) mit keramischen Schüttkörpern und einer regenerativen Nachverbrennungsanlage (RNV). Diese Anlage konnte die Emissionsbeschränkungen für das krebserzeugende Benzo(a)pyren ($0,05 \text{ mg/m}^3$) nicht einhalten. In einem Versuchsbetrieb sollte die emissionsmindernde Wirksamkeit einer weiteren, nachgeschalteten RNV (Test-Anlage des Lieferanten) überprüft werden.

Anhand der Ergebnisse des Versuchsbetriebs (s. u.) optimierte der Anlagenbetreiber die Abgasreinigungsanlage. Die wenig effizienten Vorfilter der RNV wurden durch einen bereits vorhandenen und ertüchtigten Elektrofilter ersetzt. Die veränderte Anlagenkonfiguration war Gegenstand der Zweituntersuchung. Sie umfasste den regulären Betrieb und den wiederkehrenden „Burn-Out“-Betrieb der RNV.

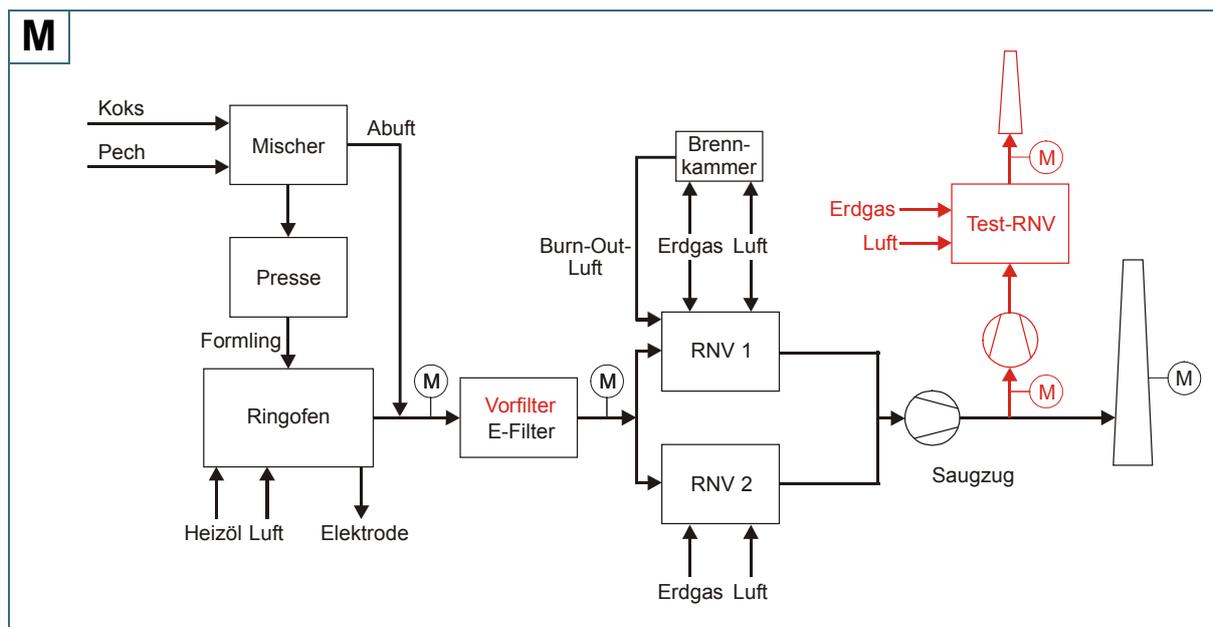


Abb. 7: Grundfließbild der Ringofenanlage M für untersuchte Varianten der Abgasreinigungsanlagen mit Abgasmessstellen M (rot: Versuchsbetrieb mit Vorfilter und Test-RNV; schwarz: Regelbetrieb nach Optimierung mit Elektrofilter ohne Test-RNV).

Tab. 39: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Ringofenanlage M.

Auslegungsdaten	Anlage M
Feuerungsanlage	Ringofen
Temperatur Brennkammer	1.000 °C (Hauptbrandzone)
Eingesetzte Rohstoffe	Petrolkoks-Kalzinat, Koks (Ruhr-, Hochofen-, Gießereikoks, Griefß), Steinkohleteerpech, Imprägnierpech
Eingesetzte Brennstoffe	Heizöl EL
Produkte	Elektrodenformlinge gebrannt
Abgasreinigungsanlage	Versuchsbetrieb: RNV mit Vorfilter (3 × Schüttgutfilter), Test-RNV (2-Turm-Anlage) Regelbetrieb: RNV mit Vorfilter (1 × Elektrofilter)
RNV	2 × 4-Turm-Anlage im Parallelbetrieb mit Burn-Out-Optionen
Max. Abgasdurchsatz	2 × 30.000 m ³ /h
Anzahl Brenner	2 × 2
Brennerleistung	2 × 500 kW
Eingesetzte Brennstoffe	Erdgas
Max. Brennstoffdurchsatz	4 × 54 m ³ /h
Betriebstemperatur	800 – 850 °C
Test-RNV	2-Turm-Anlage im Singlebetrieb ohne Burn-Out-Option
Max. Abgasdurchsatz	5.000 m ³ /h
Anzahl Brenner	1
Brennerleistung	150 kW
Eingesetzte Brennstoffe	Erdgas
Max. Brennstoffdurchsatz	16 m ³ /h
Betriebstemperatur	800 °C

Um bei den Untersuchungen Informationen über die Abgasreinigungsleistung der Vorabscheider, der RNV und der Test-RNV zu erhalten, wurden stets das Roh- bzw. das Abgas zwischen den Abgasreinigungsaggregaten („Zwischengas“) simultan auf die PAK-Gehalte beprobt. Des Weiteren waren die Emissionen an Kohlenstoffmonoxid, organischen Stoffen (C_{ges}) und Gesamtstaub von Interesse.

In Tab. 40, S. 67, sind die Emissionswerte für den Versuchsbetrieb im März 2009 sowie den Regelbetrieb im August 2011 (Regel- und Burn-Out-Betrieb) angegeben.

Versuchsbetrieb März 2009

Das Abgas vor der Test-RNV (entspricht Reingas der 2006 installierten Abgasreinigungsanlage; Ergebnisse in Tab. 40 nicht dargestellt) weist für die Halbstundenmittelwerte von Sauerstoff, Kohlenstoffdi-/monoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen (C_{ges}) jeweils konstante Niveaus in unterschiedlicher Höhe auf. Die Halbstundenmittelwerte für organische Stoffe befinden sich mit ca. 35 mg/m³ unter dem Grenzwert (50 mg/m³), überschreiten aber den angestrebten Zielwert von 20 mg/m³.

Für das Abgas nach der Test-RNV ergibt sich in Bezug auf die zeitliche Konstanz der Halbstundenmittelwerte ein identisches Bild. Im Vergleich zum Abgas vor der Test-RNV sind die Gehalte nach der Test-RNV bei Kohlenstoffmonoxid höher, bei Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid etwa gleich, bei Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen (C_{ges}) geringer. Die jeweiligen Grenz- und Zielwerte werden stets deutlich unterschritten.

Tab. 40: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Untersuchungen der Ringofenanlage M. BO: Burn-Out.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage M	
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert	Zielwert ¹⁾
Volumenstrom	m ³ /h	2.401 ^{**)}	2.756 ^{**)}	2.894 ^{**)}	–	–
		37.200	37.500	39.400	–	–
		–	36.900	38.700	–	–
Temperatur	°C	93	113	115	–	–
		114	124	126	–	–
		135	154	157	–	–
O ₂	Vol.-%	19,1	19,3	20,3	–	–
		18,3	18,8	19,7	–	–
		18,4	18,8	19,7	–	–
CO ₂	Vol.-%	1,7	1,9	2,0	–	–
		2,2	2,4	2,5	–	–
		2,1	2,3	2,4	–	–
CO	g/m ³	0,030	0,038	0,040	0,1 ¹⁾	–
		0,014	0,016	0,017	0,1 ¹⁾	–
		0,024	0,048	0,050	0,1 ¹⁾	–
SO ₂	g/m ³	0,037	0,041	0,043	0,3 ¹⁾	–
		0,055	0,080	0,084	0,3 ¹⁾	–
		0,154	0,332	0,349	0,3 ¹⁾	–
Σ SO ₂ , SO ₃	g/m ³	–	–	–	0,3 ¹⁾	–
		0,051	0,052	0,057	0,3 ¹⁾	–
		0,180	0,279	0,307	0,3 ¹⁾	–
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,036	0,037	0,039	0,3 ¹⁾	0,1 ¹⁾
		0,059	0,061	0,064	0,3 ¹⁾	0,1 ¹⁾
		0,070	0,085	0,089	0,3 ¹⁾	0,1 ¹⁾
Gesamtstaub	mg/m ³	0,4	0,5	0,05	20 ¹⁾	–
		1,5	1,6	1,9	20 ¹⁾	–
		14,1	21,8	25,1	20 ¹⁾	–
C _{ges}	mg/m ³	8,5	9,2	10,1	50 ¹⁾	20 ¹⁾
		22,4	29,9	31,4	50 ¹⁾	20 ¹⁾
		33,8	52,2	54,8	50 ¹⁾	20 ¹⁾
Benzol	mg/m ³	–	–	–	1 ¹⁾	–
		0,04	0,05	0,06	1 ¹⁾	–
		0,03	0,03	0,03	1 ¹⁾	–
Benzo(a)pyren	mg/m ³	0,024	0,041	0,061	0,05 ¹⁾	0,05 ¹⁾
		0,008	0,011	0,014	0,05 ¹⁾	0,05 ¹⁾
		0,065	0,160	0,210	0,05 ¹⁾	0,05 ¹⁾
PAK	mg/m ³	7,8	8,6	11,2	–	–
		10,0	11,6	15,1	–	–
		16,8	19,8	25,7	–	–

VB 03/2009
RB 08/2011
RB BO 08/2011

¹⁾ Stickoxide, organische Stoffe (C_{ges}): für Regelbetrieb; Benzo(a)pyren: für Burn-Out-Betrieb

^{**)} Test-RNV

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

Die maximalen Gesamtstaub-Gehalte betragen vor der Test-RNV 12,6 mg/m³ und danach 0,5 mg/m³. Der Grenzwert von 20 mg/m³ wird durch die bestehende RNV-Anlage sicher eingehalten und in Kombination mit der Test-RNV um eine Größenordnung unterschritten.

Entlang des Gaswegs (Rohgas, Zwischengas 1 nach Vorfilter und vor RNV 1/2, Zwischengas 2 nach RNV 1/2 und vor Test-RNV, Reingas nach Test-RNV; vgl. Abb. 7, S. 63) ist ein steter Rückgang der Konzentrationen für die Summenwerte der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe sowie der PAK-Einzelverbindung Benzo(a)pyren zu verzeichnen.

Der Benzo(a)pyren-Grenzwert von $0,05 \text{ mg/m}^3$ wird nach der bestehenden RNV-Anlage um mehr als den Faktor 10 überschritten; der staubgebundene Anteil trägt mindestens zu 65 % zur hohen Gesamtkonzentration an Benzo(a)pyren bei.

Über den gesamten Abgasweg betrachtet, liegen erst im Abgas nach der Test-RNV die Benzo(a)pyren-Gehalte teilweise unterhalb des Grenzwerts. In Anbetracht der Konzentrationsschwankungen, der Grenzwertüberschreitungen und des Teillastbetriebs der Ringofenanlage ist die Einhaltung des Benzo(a)pyren-Grenzwerts durch die zusätzliche, in Reihe geschaltete Test-RNV nicht völlig sichergestellt.

Regelbetrieb August 2011

Die Halbstundenmittelwerte von Sauerstoff, Kohlenstoffdi-, -monoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen (C_{ges}) weisen im Regelbetrieb der RNV zeitlich konstante Niveaus auf. Die jeweiligen Grenzwerte werden eingehalten. Im Vergleich zum Versuchsbetrieb vom März 2009 ergibt sich nach der RNV-Anlage bei einer um ca. 15 % höheren Auslastung des Ringofens mit maximal 30 mg/m^3 eine um 14 % geminderte Emission.

Der Gesamtstaub-Gehalt beträgt im Reingas maximal $1,6 \text{ mg/m}^3$ und ist im Vergleich zum Reingas nach der RNV im Versuchsbetrieb 2009 etwa um den Faktor 10 geringer.

Ebenfalls zeigen sich für die organischen Verbindungen Benzol und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe inkl. Benzo(a)pyren niedrigere Konzentrationswerte. Der Grenzwert von Benzol wird mit sehr großer, der von Benzo(a)pyren mit genügender Sicherheit eingehalten.

Regelbetrieb August 2011 – Burn-Out –

Während des Burn-Out-Betriebs einer der beiden im Parallelbetrieb befindlichen RNV sind bei den Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalten keine nennenswerten Konzentrationsänderungen zu verzeichnen. Dagegen zeichnen sich für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid und organische Stoffe (C_{ges}) veränderte und stets höhere Konzentrationen als im Regelbetrieb ab.

Die Gesamtstaubemissionen sind im Vergleich zum Regelbetrieb mit Werten zwischen $11,2 \text{ mg/m}^3$ und $21,8 \text{ mg/m}^3$ um etwa das Zehnfache erhöht.

Für Benzol ergeben sich im Burn-Out-Betrieb etwas niedrigere bzw. vergleichbare und für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe inkl. Benzo(a)pyren höhere Emissionen.

Bewertung und Konsequenzen

Der Versuchsbetrieb vom März 2009 mit Test-RNV belegt, dass die

- oxidative thermische Abgasnachbehandlung in der bestehenden RNV zu keiner ausreichenden Minderung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe führt und die Benzo(a)pyren-Gehalte den Emissionsgrenzwert um mindestens das Zehnfache überschreiten,
- Benzo(a)pyren-Gehalte im Abgas vor der Test-RNV zu mindestens 65 % aus staubgebundenen Anteilen bestehen,
- Nachverbrennung des Abgases in der Test-RNV zu einer merklichen Minderung der PAK- inklusive der Benzo(a)pyren-Emissionen führt,
- Einhaltung des Benzo(a)pyren-Grenzwerts durch die Test-RNV aufgrund der Konzentrationshöhe und der Teillast zum Zeitpunkt der Messung nicht sicher gewährleistet erscheint.

Somit stellt die Nachrüstung der bestehenden RNV-Anlage mit einer weiteren RNV-Anlage aufgrund der hohen Gesamtkosten (Investition, Betrieb) und der dadurch erzielbaren Emissionsminderung nicht die geeignete technologische Maßnahme dar.

Der Regelbetrieb vom August 2011 mit einer modifizierten Abgasreinigungsanlage, bestehend aus Elektrofilter zur Partikelabscheidung und regenerativer Nachverbrennung zur oxidativen thermischen Abgasbehandlung, zeigt, dass im

- üblichen Parallelbetrieb beider RNV-Anlagen die Emissionen von Gesamtstaub und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen inkl. Benzo(a)pyren auf das erforderliche Maß reduziert und zugleich die Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid und Benzol eingehalten werden,
- Burn-Out-Betrieb die
 - Emissionen an Gesamtstaub und organischen Stoffen (C_{ges} , polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe inkl. Benzo(a)pyren) höher als im Regelbetrieb der RNV-Anlage sind,
 - Grenz- bzw. Zielwerte für Gesamtstaub, C_{ges} , Schwefeldioxid und Benzo(a)pyren vereinzelt überschritten werden. Zur Einhaltung der Grenz- bzw. Zielwerte führt der Anlagenbetreiber auf Anordnung der Genehmigungsbehörde jetzt den Burn-Out-Betrieb in kürzeren Abständen durch. Damit reduzieren sich die kohlenstoffhaltigen Ablagerungen an den keramischen Füllkörpern der Nachverbrennungsanlage, so dass beim „Freibrennen“ der RNV-Anlage geringere Emissionen auftreten.

3.8 Zementwerk

In Zementwerken wird aus den Rohstoffen Kalk und Ton in Drehrohröfen Zementklinker erzeugt. Bayernweit waren im Jahr 2011 sechs Zementwerke mit Klinkerproduktion und einer Feuerungswärmeleistung von 790 MW in Betrieb. Die für den Kalzinierungs- und Sinterprozess benötigte Energie wird aus der Verbrennung primärer und sekundärer Brennstoffe (Steinkohle; produktionsspezifische Gewerbeabfälle, Rückstände aus Altölraffination, Papierfangstoffe, Altreifen etc.) gewonnen. Aus Kostengründen und um die Ressourcen zu schonen kommen zunehmend energiereiche Abfälle als Ersatzbrennstoffe zum Einsatz.

An der Anlage wurden die Emissionen bei der Mitverbrennung von Dachpappe im Verbundbetrieb im Vergleich zum regulären Anlagenbetrieb im Verbund- und Direktbetrieb untersucht. Laut Genehmigungsbescheid darf im Drehrohröfen neben den bislang verwendeten Sekundärbrennstoffen auch Dachpappe mit teerhaltigen Anteilen eingesetzt werden. Der Anteil Sekundärbrennstoffe ist auf maximal 90 %, der von Altreifen und Dachpappe auf maximal 20 % der Gesamtfeuerungsleistung von 162,5 MW begrenzt. Der Anteil teerhaltiger Dachpappe an der Gesamtmasse an Dachpappe (teer- und bitumenhaltig) darf 30 % nicht überschreiten.

Die Abb. 8 zeigt zum Zeitpunkt der Messungen im Jahr 2009¹ das Grundfließbild des Zementwerks sowie Tab. 41, S. 69, eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten und untersuchten Betriebszustände. Grundsätzlich wird die Anlage im Verbundbetrieb (mit Mahltrocknung) gefahren. Dabei wird ein Teil des heißen Abgasstroms nach dem Zyklonvorwärmer zur Trocknung und Sichtung des Rohmehls in die Rohmühle abgezweigt, bevor es über den Gewebefilter und den Kamin in die Umgebung tritt. Bei Stillstand der Rohmühle kann die Anlage temporär im Direktbetrieb gefahren werden. Bei dieser Betriebsweise geht der gesamte Abgasstrom nach Kühlung im Verdampfungskühler (Wassereindüsung) direkt über den Gewebefilter in den Kamin.

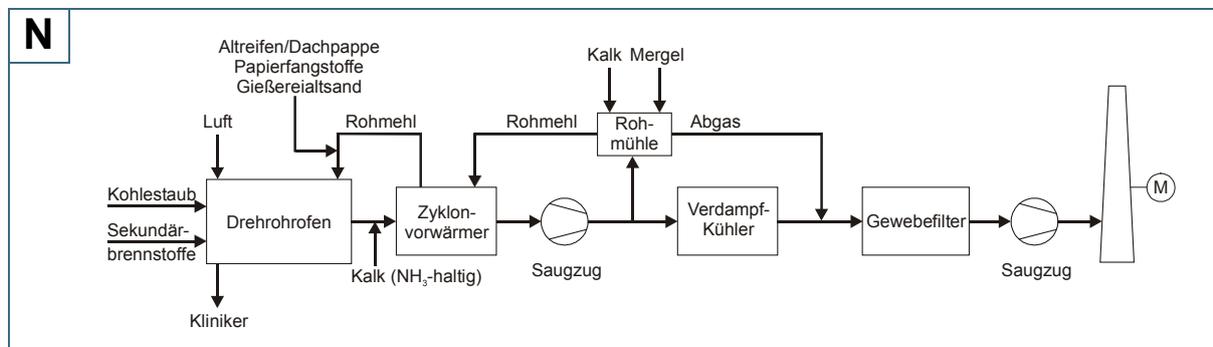


Abb. 8: Grundfließbild des Zementwerks N zum Zeitpunkt der Messungen im Jahr 2009 mit Abgasmessstelle M.

Zur Ermittlung des Emissionsverhaltens der Anlage fanden an drei aufeinanderfolgenden Tagen Reingasuntersuchungen bei verschiedenen Betriebsweisen (Variation Brennstoffmix und Betriebsart) statt.

Am ersten Messtag wurde die Anlage – abweichend von den Beschränkungen im Genehmigungsbescheid und mit Zustimmung der Genehmigungsbehörde – im Verbundbetrieb neben den anderen Brennstoffen versuchsweise mit teerhaltiger Dachpappe gefahren. Der Beitrag der Dachpappe an der Gesamtfeuerungsleistung belief sich auf 13,8 %. Bei dem zeitlich auf einen Tag begrenzten Versuch durfte die Dachpappe den im Genehmigungsbescheid für PAK festgelegten Grenzwert von

¹ Im Jahr 2011 wurde das Zementwerk mit einer SCR-Anlage und einem Wärmeverschiebesystem ausgestattet.

1.000 mg/kg_{mT} überschreiten. Die Analyse der am Versuchstag genommenen Dachpappeproben ergab keine Grenzwertüberschreitung (PAK-Gehalt Dachpappe: 2,2 mg/kg_{mT}).

Tab. 41: Übersicht über wesentliche Kenndaten und untersuchte Betriebsweisen des Zementwerks N.

Anlage N	Verbundbetrieb		Direktbetrieb
Auslegungsdaten	Versuchsbetrieb	Regelbetrieb	Regelbetrieb
Mahlrocknung	Ja		Nein
Produktionsleistung	3.500 Mg/d		
Feuerungsanlage	Drehrohrofen mit Mehrstoffbrenner und Satellitenkühler		
Feuerungswärmeleistung	162,5 MW		
Genehmigte Einsatzstoffe	Kalk-, Tonmergel, Kalkstein, Walzgrobzunder, Kiesabbrand, Gießereialtsande/-stäube, Spezialkalk (ammoniakhaltig), Papierfangstoffe, Flugasche		
Genehmigte Brennstoffe	Kohle (max. 2 Mass.-% S), Petrolkoks (max. 5 Mass.-% S), Altreifen/Dachpappe (max. 20 % der Gesamt-FWL; teerhaltige Dachpappe max. 30 % der Gesamt-Dachpappe), aufbereitete produktionsspezifische Gewerbeabfälle aus Produktionsprozessen (BPG), FK-Nebenstoffe (max. 65 % der Gesamt-FWL), flüssige Sekundärbrennstoffe (SBS; max. 30 % der Gesamt-FWL)		
Rohstoffein-, -durchsatz	204 Mg/h Rohmehl 8,2 Mg/h Spezialkalk 3,5 Mg/h Gießereialtsand	215 Mg/h Rohmehl 8,1 Mg/h Spezialkalk 2,8 Mg/h Gießereialtsand	200 Mg/h Rohmehl 8,1 Mg/h Spezialkalk 3,4 Mg/h Gießereialtsand
Brennstoffein-, -durchsatz	3,0 Mg/h Kohlestaub 1,5 Mg/h flüssige SBS 10,5 Mg/h BPG 2,6 Mg/h Dachpappe teerhaltig 5,0 Mg/h Papierfangstoffe	2,4 Mg/h Kohlestaub 1,3 Mg/h Heavy Fuel 1,4 Mg/h flüssige SBS 9,7 Mg/h BPG 2,4 Mg/h Altreifen/Dachpappe 1:1 5,0 Mg/h Papierfangstoffe	2,5 Mg/h Kohlestaub 1,2 Mg/h Heavy Fuel 1,4 Mg/h flüssige SBS 9,1 Mg/h BPG 2,4 Mg/h Altreifen/Dachpappe 1:1 5,0 Mg/h Papierfangstoffe
Abgasreinigungsanlage	Spezialkalk (ammoniakhaltig zur Entstickung) Gewebefilter		
Untersuchte Feststoffe	Dachpappe	Mischungsverhältnis Altreifen : Dachpappe = 1 : 1	

An den weiteren Tagen fanden zu Vergleichszwecken Untersuchungen im regulären Anlagenbetrieb während der Mitverbrennung eines Gemischs von Altreifen und Dachpappe (teer- und bitumenhaltig) im Massenverhältnis 1:1 – zuerst im Verbund-, dann Direktbetrieb – statt.

In Tab. 42, S. 73 und 74, sind die Messwerte für den Versuchs- sowie den Regelbetrieb dargestellt. Generell sind u. a. brennstoff- und rohstoffbedingt bei allen Parametern mehr oder minder große Schwankungen festzustellen.

Versuchs-/Verbundbetrieb

Die Gehalte an Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid befinden sich mit durchschnittlich 7,5 Vol.-% bzw. 18,5 Vol.-% in einem typischen Konzentrationsbereich für Drehrohrofen von Zementwerken [22]. Gleiches gilt für die Halbstundenmittelwerte von Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen (C_{ges}) mit durchschnittlich 692 mg/m³, 265 mg/m³ und 76 mg/m³. Sämtliche Halbstunden- bzw. Tagesmittelwerte an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid und organische Stoffe (C_{ges}) unterschreiten die Grenzwerte.

Die Emissionen an Schwefeldi-/trioxid, gasförmigen anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen, Quecksilber, weiteren Metallen und Gesamtstaub liegen bei niedrigen, z. T. sehr niedrigen Werten deutlich unter den Grenzwerten. Gleiches gilt für die organischen Schadstoffe Benzol bzw. polychlorierte Dibenzop-dioxine/-furane, die die Grenzwerte um etwa bzw. mehr als die Hälfte unterschreiten.

Die Ammoniakemissionen sind mit durchschnittlich 119 mg/m^3 relativ hoch. Im Vergleich zu anderen Zementwerken zeigen sich für die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ($562 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) und polychlorierten Biphenyle (Indikator-PCB: 169 ng/m^3 ; dl-PCB: $0,017 \text{ ng WHO-TEQ/m}^3$) höhere Emissionen.

Regel-/Verbundbetrieb

Im regulären Anlagenbetrieb mit Mahltrocknung (Verbund) ergeben sich gegenüber dem Versuchsbetrieb für Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe (C_{ges}), Ammoniak, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle und polychlorierte Dibenzop-dioxine/-furane niedrigere, für Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Quecksilber, weitere Metalle und Gesamtstaub etwa gleiche, sowie für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldi-/trioxid und Benzol höhere Emissionen.

Bis auf Benzol, bei dem die Messwerte am bzw. über dem Grenzwert liegen, werden sämtliche Emissionsbeschränkungen des Genehmigungsbescheids eingehalten.

Regel-/Direktbetrieb

Der Direktbetrieb des Zementwerks ist im Vergleich zum Verbundbetrieb durch geringere Sauerstoff- sowie höhere Kohlenstoffdioxidgehalte und Abgastemperaturen gekennzeichnet (durchschnittliches Delta: $-1,1 \text{ Vol.-%}$, $+1,6 \text{ Vol.-%}$ bzw. $+15 \text{ K}$). Für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, weitere Metalle und Gesamtstaub ergeben sich ähnliche Emissionen wie im Verbundbetrieb.

Da der Direktbetrieb zu höheren primärseitigen Stickstoffmon-/dioxid-Konzentrationen führt, war zum Messzeitpunkt eine höhere Dosierung an Reduktionsmittel (ammoniakhaltiger Spezialkalk) zur Entstickung notwendig. Dies bringt höhere Ammoniakemissionen (Schlupf) mit sich.

Gegenüber dem Verbundbetrieb sind im Direktbetrieb die Emissionen an Schwefeldi-/trioxid, Ammoniak, Quecksilber, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, polychlorierten Biphenylen (Indikator-, dl-PCB) sowie polychlorierten Dibenzop-dioxinen/-furanen höher. Sowohl der Benzol- als auch der PCDD/F-Grenzwert werden nicht eingehalten.

Tab. 42: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Untersuchungen des Zementwerks N (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage N
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert
Volumenstrom $\times 10^{-3}$	m ³ /h	–	234	246	–
		–	253	266	–
		–	255	268	–
Temperatur	°C	–	154	157	–
		151	152	155	–
		167	169	172	–
O ₂	Vol.-%	7,5	7,8	8,2	–
		7,7	8,1	8,5	–
		6,5	7,7	8,0	–
CO ₂	Vol.-%	18,5 ¹⁾	19,0 ¹⁾	19,9 ¹⁾	–
		18,7 ¹⁾	20,4 ¹⁾	21,4 ¹⁾	–
		20,2 ¹⁾	21,8 ¹⁾	22,9 ¹⁾	–
CO	mg/m ³	692	1160	1220	5000 ¹⁾ / 2500 ²⁾
		1070	3350	3520	5000 ¹⁾ / 2500 ²⁾
		752	1260	1320	5000 ¹⁾ / 2500 ²⁾
Σ SO ₂ , SO ₃	mg/m ³	20,1	23,6	26,0	400 ¹⁾ / 200 ²⁾
		34,1	38,8	42,8	400 ¹⁾ / 200 ²⁾
		38,5	43,6	48,0	400 ¹⁾ / 200 ²⁾
Σ NO, NO ₂	mg/m ³	265	318	334	700 ¹⁾ / 350 ²⁾
		240	424	445	700 ¹⁾ / 350 ²⁾
		268	334	351	700 ¹⁾ / 350 ²⁾
C _{ges}	mg/m ³	75,6	93,8	98,5	100 ²⁾
		62,8	129	138	100 ²⁾
		72,5	97,0	102	100 ²⁾
NH ₃	mg/m ³	119 ¹⁾	124 ¹⁾	136 ¹⁾	–
		91,2 ¹⁾	93,0 ¹⁾	102 ¹⁾	–
		143 ¹⁾	149 ¹⁾	164 ¹⁾	–
HCl	mg/m ³	< 0,9	< 1,4	< 1,6	60 ¹⁾ / 10 ²⁾
		< 0,1	< 0,1	< 0,2	60 ¹⁾ / 10 ²⁾
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	60 ¹⁾ / 10 ²⁾
HF	mg/m ³	< 0,5	< 0,7	< 0,8	4 ¹⁾ / 1 ²⁾
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	4 ¹⁾ / 1 ²⁾
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	4 ¹⁾ / 1 ²⁾

VB Verbund	
RB Verbund	
RB Direkt	

Tab. 42 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas während der Untersuchungen des Zementwerks N.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage N
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert
Hg	mg/m ³	0,009	0,011	0,014	0,05 ¹⁾ / 0,03 ²⁾
		0,009	0,009	0,011	0,05 ¹⁾ / 0,03 ²⁾
		0,018	0,018	0,022	0,05 ¹⁾ / 0,03 ²⁾
Σ Cd, Tl ^{***)}	mg/m ³	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,05 ^{3,4)}
		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,05 ^{3,4)}
		< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,05 ^{3,4)}
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn ^{**)}	mg/m ³	–	< 0,004	< 0,005	0,3 ^{3,4)}
		< 0,004	< 0,004	< 0,005	0,3 ^{3,4)}
		< 0,003	< 0,003	< 0,004	0,3 ^{3,4)}
Σ B(a)P, As, Cd, Co, Cr ^{**)}	mg/m ³	–	< 0,001	< 0,001	0,05 ^{3,4)}
		< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,05 ^{3,4)}
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05 ^{3,4)}
Benzol	mg/m ³	2,4	2,6	3,1	5 ⁵⁾
		5,1	5,3	6,4	5 ⁵⁾
		3,2	4,8	5,8	5 ⁵⁾
PAK ^{**)}	µg/m ³	–	562 ^{*)}	731 ^{*)}	–
		–	335 ^{*)}	436 ^{*)}	–
		–	665 ^{*)}	865 ^{*)}	–
Ind.-PCB ^{**)}	ng/m ³	–	169 ^{*)}	220 ^{*)}	–
		–	58,0 ^{*)}	75,4 ^{*)}	–
		–	314 ^{*)}	408 ^{*)}	–
dl-PCB ^{**)}	ng WHO-TEQ/m ³	–	0,017 ^{*)}	0,025 ^{*)}	–
		–	0,006 ^{*)}	0,009 ^{*)}	–
		–	0,081 ^{*)}	0,121 ^{*)}	–
PCDD/F ^{**)}	ng I-TEQ/m ³	–	0,0315	0,0473	0,1 ^{4,6)}
		–	0,0146	0,0219	0,1 ^{4,6)}
		–	0,78	1,16	0,1 ^{4,6)}
Gesamtstaub	mg/m ³	–	0,8	0,9	30 ^{1,4)}
		0,8	0,8	0,9	30 ^{1,4)}
		0,8	0,8	0,9	30 ^{1,4)}

VB Verbund

RB Verbund

RB Direkt

^{*)} Emissionswerte, nicht bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-%

^{**)} Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-%

²⁾ Tagesmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-%

³⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (≥ 0,5 h, ≤ 2 h)

⁴⁾ Umrechnung der Emissionswerte auf den Bezugssauerstoffgehalt nur für Zeiten, in denen der gemessene Sauerstoffgehalt über dem Bezugssauerstoffgehalt liegt

⁵⁾ Mittelwert über Probenahmedauer, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-%

⁶⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (> 6 h), bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa) und einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-%

Bewertung und Konsequenzen

Der Versuch „Mitverbrennung eines erhöhten Anteils an teerhaltiger Dachpappe“ im Verbundbetrieb der Drehrohrofenanlage des Zementwerks belegt, dass

- keine negativen Auswirkungen auf das Emissionsverhalten der Anlage bei anorganischen, organischen Schadstoffen und Gesamtstaub erkennbar sind,
- insbesondere keine signifikanten Erhöhungen der PAK-Emissionen auftreten.

Somit stellt der massenmäßig begrenzte Einsatz teerhaltiger Dachpappe in einer Drehrohrofenanlage eines Zementwerks ein probates Mittel zur umweltverträglichen Verwertung dieses Abfallstoffs dar. Gleichzeitig trägt dieser Verwertungsweg zum Klimaschutz sowie zur Betriebskostenreduktion bei.

Der Regelbetrieb mit bzw. ohne Mahltrocknung (Verbund- bzw. Direktbetrieb) zeigt, dass

- im Verbundbetrieb die/der
 - Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldi-/trioxid, Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}), gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Metalle und polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane eingehalten werden,
 - Ammoniakemission und -frachten verhältnismäßig hoch sind,
 - Grenzwert für Benzol teilweise überschritten wird,
- im Direktbetrieb die
 - Emissionen an Schwefeldi-/trioxid, Ammoniak, Quecksilber, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, polychlorierten Biphenylen (Indikator-, dl-PCB) sowie polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen/-furanen gegenüber dem Verbundbetrieb erhöht sind,
 - Grenzwerte für Schwefeldi-/trioxid und Quecksilber eingehalten und für Benzol geringfügig und für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane deutlich überschritten werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass hinsichtlich umweltrelevanter Emissionen an der Anlage zum Zeitpunkt der Messungen ein Handlungsbedarf zur Minderung der Ammoniak- und Benzolemissionen sowie im Direktbetrieb zur Minderung der PCDD/F-Emissionen bestand. Als Maßnahme zur Verringerung der PCDD/F-Emissionen im Direktbetrieb wurde zwischen der Genehmigungsbehörde und dem Betreiber eine weitere Temperaturabsenkung am Verdampfungskühler vereinbart. Zur weitergehenden Entstickung und zur Minderung des Ammoniak-Schlupfs der Abgase wurde Ende März 2011 eine SCR-Anlage in Betrieb genommen, die im Verbund- und Direktbetrieb auch die Emissionen an Benzol und PCDD/F mindert.

3.9 Eisengießerei

In der Eisengießerei wird in zwei baugleichen Kaltwind-Kupolöfen mit Obergichtabsaugung mit Schachtdurchmesser 0,80 m täglich alternierend aus Roheisen und Eisenschrott Gusseisen für Antriebs-, Motoren-, Pumpengehäuse, Lüfterhauben, Schaufellaufräder etc. erzeugt. Die Energie für den Schmelzprozess in einem Kupolofen stammt aus der Verbrennung von Koks, die in einem glühenden Koksbett durch Zufuhr von Luft (Wind) und reinem Sauerstoff (Direktinjektion mit Überschall über fünf Lanzen) freigesetzt wird.

Anlass der Untersuchung war es, Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlage im regulären Betrieb bei verschiedenen Phasen (Anfahren, Schmelzen, Niederschmelzen) zu gewinnen und die Einhaltung der von der Genehmigungsbehörde angeordneten Emissionsbegrenzungen – insbesondere des Grenzwerts für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane von $0,1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$ – zu prüfen. Weiter war in einem Versuchsbetrieb während des Schmelzbetriebs der Einfluss der Nachverbrennung des Gicht-/Abgases mit einem Propangas-Handbrenner an der Gattieröffnung auf die Abgasbeladung mit organischen (Spuren-)Schadstoffen zu ermitteln.

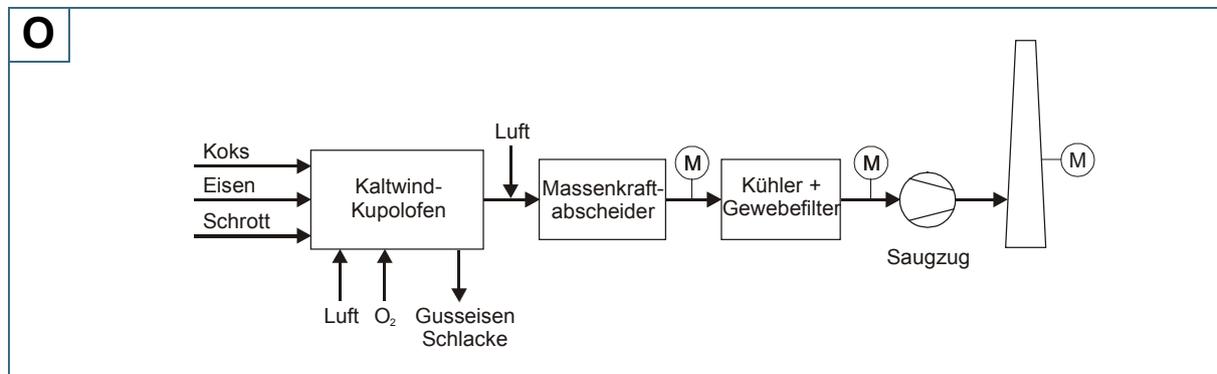


Abb. 9: Grundfließbild Kupolofenanlage O mit Abgasmessstellen M.

Die Abb. 9 stellt den Prozess als vereinfachtes Fließbild der Anlage dar. Die Tab. 43 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten und untersuchten Betriebszustände.

Tab. 43: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Kupolofenanlage O.

Anlage O	Regelbetrieb		Versuchsbetrieb
	Ofen 1	Ofen 2	Ofen 1
Auslegungsdaten			
Feuerungsanlage	Kaltwind-Kupolofen mit Obergichtabsaugung		
Ofenschmelzleistung max.	4,5 Mg/h		
Produktionskapazität max.	370 Mg (Gussteile pro Monat)		
Temperatur max.	1.600 °C		
Eingesetzte Rohstoffe	Hämatitroheisen, Gussbruch, Stahlschrott, Kalkstein, Ferromangan-Briketts		
Brennstoffe	Koks, Heizöl EL (nur Anfachen)		Propan (zur Gichtgasnachverbrennung)
Produkte	Gusseisen (flüssig)		
Produktionskapazität max.	10,2 Mg (Besatz)	9,3 Mg (Besatz)	9,0 Mg (Besatz)
Abgasreinigungsanlage	Fliehkraftabscheider, Gewebefilter		

Im täglichen Wechsel wird einer der beiden Schachtföfen angeheizt. Zuerst werden die Boden- und Deckenklappe geschlossen und der Saugzug der Abgasreinigungsanlage in Betrieb genommen. Durch die auf etwa halber Schachthöhe gelegene Gattieröffnung wird bis über die Einmündung der Winddüsen und Sauerstofflanzen Koks vorgelegt.

Mit einem Handbrenner mit Zweistoffdüse (Brennstoff: Heizöl EL; Zerstäubermedium: Druckluft) wird die Koksschüttung am Ofenboden entzündet. Nach Abschalten des Handbrenners wird die Koksschüttung für 50 Minuten mit Druckluft aus dem Handbrenner angefacht, um ein homogenes Glutbett zu erhalten. Anschließend wird der Handbrenner entnommen und die Glimmphase für 45 Minuten selbstgänglich fortgeführt.

Zur Temperatursteigerung wird vor der Aufgabe des ersten Materialsatzes (Materialsatz \triangleq Mischung aus Koks, Roheisen, Gussbruch, Stahlschrott und Ferromangan-Briketts; Masse ca. 300 kg) die Koksschüttung mehrere Minuten lang mit maximaler Kaltwindgebläseleistung angefacht. Nach Abschalten des Gebläses wird der Ofenschacht bis zur Gattieröffnung möglichst rasch mit o. g. Material befüllt. Etwa nach dem siebten Satz werden das Kaltwindgebläse und die Sauerstoffeindüsung mit jeweils Maximalleistung zur weiteren Temperatursteigerung in Betrieb genommen. Die ca. 1.600 °C heiße Schmelze sammelt sich am Ofenboden.

Der quasikontinuierliche Schmelzbetrieb beginnt nach dem Anstich des Ofens bei verminderter Wind- und Sauerstoffmenge. Die Schmelze fließt in einen Vorherd und trennt sich in einem Siphon in Flüssigeisen und Schlacke. Während des Schmelzbetriebs erfolgt ca. alle 5 Minuten die Aufgabe eines neuen Materialsatzes über die Gattieröffnung.

Nach der letzten Materialaufgabe beginnt das etwa 50 bis 55 Minuten dauernde Niederschmelzen des Ofeninhalts. Die Windmenge wird dazu gedrosselt und die Sauerstoffzufuhr abgeschaltet. Nach Abfluss des letzten Flüssigeisens aus dem Vorherd werden das Kaltwind- und das Saugzuggebläse abgeschaltet. Die im Schacht verbliebenen teils flüssigen, teils festen Schmelzreste werden durch Öffnen der Bodenklappe in einen Schlackekübel entleert. Zuletzt wird die Deckelklappe zum Auskühlen des Ofenschachts geöffnet.

Zur Kühlung und Reinigung der aus dem Kupolofen strömenden heißen und staubigen Gicht-/Abgase ist eine Abgasreinigungsanlage installiert. Diese besteht aus einem Massenkraftabscheider zur Grobentstaubung, einem Gaskühler/Gewebefilter zur Abgaskühlung/Feinentstaubung und einem Absaugventilator. Das gereinigte Abgas gelangt über den Kamin in die Umgebung.

Insgesamt fanden an drei aufeinanderfolgenden Tagen Abgasuntersuchungen statt. Zur Ermittlung des Betriebs-/Emissionsverhaltens beider Kupolöfen fanden am ersten Tag am Kupolofen II und am zweiten Tag am Kupolofen I Messungen im regulären Anlagenbetrieb statt. Am dritten Tag wurden am Kupolofen II die Auswirkungen der versuchsweisen Nachverbrennung des Gicht-/Abgases (s. o.) untersucht.

Die Messungen im Anfahr-, Schmelz- und Niederschmelzbetrieb erfolgten jeweils im Rohgas nach dem Massenkraftabscheider sowie im Reingas vor dem Saugzuggebläse und am Kamin. In Tabelle 44 sind die Emissionen für den Regelbetrieb der beiden Kupolöfen sowie den Versuchsbetrieb mit provisorischer Nachverbrennung mittels Propangas-Handbrenner am Kupolofen II angegeben.

Regelbetrieb Kupolofen I und II

Die beiden Kupolöfen weisen in Abhängigkeit der im Schachtofen stattfindenden Primärprozesse ein nahezu identisches Betriebs- und Emissionsverhalten auf. Roh- und Reingas (Rohgaswerte in Tab. 44 nicht dargestellt) zeigen jeweils charakteristische Tagesgänge und -verläufe für die Komponenten Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Stickoxide und Gesamtkohlenstoff.

Tab. 44: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Untersuchungen an der Kupolofenanlage O.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage O
		\bar{y} ¹⁾	y_{max}	$y_{max} + U_p$	Grenzwert
Volumenstrom	m³/h	18.000	21.700	22.800	–
		16.100	20.400	21.400	
		18.100	20.000	21.000	
Temperatur	°C	35	77	79	–
		32	89	91	
		32	74	75	
O ₂	Vol.-%	19,5	21,2	22,3	–
		19,4	21,1	22,2	
		19,7	21,0	22,1	
CO ₂	Vol.-%	1,7	3,6	3,8	–
		1,6	4,2	4,4	
		1,5	3,8	4,0	
CO	g/m ³	6,80	17,6	18,5	–
		6,55	23,3	24,5	
		4,00	14,8	15,5	
SO ₂	g/m ³	0,10	0,29	0,30	0,50 ^{2) 3)}
		0,07	0,22	0,23	
		0,08	0,23	0,24	
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,01	0,06	0,06	0,35 ²⁾
		0,01	0,03	0,03	
		0,01	0,03	0,03	
C _{ges}	mg/m ³	54,8	316	332	–
		80,5	432	454	
		98,8	519	544	
Benzol	mg/m ³	–	–	–	5 ²⁾
		–	–	–	
		11	41	53	
Ind.-PCB ¹⁾	ng/m ³	–	970	1260	–
		–	572	744	
		–	466	606	
dl-PCB ¹⁾	ng WHO-TEQ/m ³	–	0,105	0,158	–
		–	0,067	0,101	
		–	0,046	0,069	
PCDD/F ¹⁾	ng I-TEQ/m ³	–	0,118	0,177	0,1 ⁴⁾
		–	0,084	0,126	
		–	0,060	0,09	
Gesamtstaub	mg/m ³	4,8	10	12	20 ²⁾
		2,6	5,3	8,0	
		0,8	0,8	0,9	

RB Ofen II	
RB Ofen I	
VB Ofen II	

¹⁾ Einzelgehalte, -verbindungen und -kongenere unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt

¹⁾ über den gesamten Messzeitraum inkl. Anheiz- (Anfahren), Schmelz- und Niederschmelzphase gemittelt

²⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

³⁾ Grenzwert für Schwefeldioxid und -trioxid

⁴⁾ Mittelwert über Probenahmedauer (≥ 6 h), bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

Auffällig im Reingas sind die im Vergleich zum Rohgas unterschiedlichen und zu anderen Kaltwind-Kupolofenanlagen mit durchschnittlich 19,5 Vol.-% sehr hohen Sauerstoffgehalte. Diese deuten auf eine rund 50 %ige Verdünnung des Abgases mit Umgebungsluft hin, z. B. über die Sicherheitskühl-luftklappe und/oder Undichtigkeiten an der Gaskühler/Gewebefilter-Einheit. Die Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen sind mit Werten bis 23,3 g/m³ in einem für Kaltwind-Kupolöfen mit Obergichtabsaugung ohne Abgasnachverbrennung charakteristischen, sehr hohen Wertebereich.

Während des Anfahrens der Öfen zeigen sich im Handbrennerbetrieb hohe Gesamtkohlenstoff-, Schwefeldioxid- und während des Anfahrens der Koksschüttung beim Anfahren hohe Kohlenstoffmonoxid-, Schwefeldioxid- und Stickstoffmon-/dioxid-Konzentrationen. Der anschließende Schmelzbetrieb ist durch hohe Emissionen an Kohlenstoffmonoxid und organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff C_{ges}) gekennzeichnet. In der Niederschmelzphase tritt emissionsseitig das Kohlenstoffmonoxid – im Vergleich zu Schwefeldioxid und Stickstoffmon-/dioxid – in den Hintergrund.

Bei den diskontinuierlich bestimmten organischen Schadstoffen fallen die außergewöhnlich hohen Emissionen an polychlorierten Biphenylen (Indikator-PCB) mit Werten zwischen 570 und 970 ng/m³ auf. Diese sind vermutlich auf kontaminierten Eisen- bzw. Stahlschrott zurückzuführen (z. B. mit PCB-haltigen Wärmeträgerölen). Ebenso zeigen sich für die dioxinähnlichen polychlorierten Biphenyle und polychlorierten Dibenzo-p-dioxine/-furane hohe Emissionen im Bereich von 0,1 ng WHO-TEQ/m³ (dl-PCB) bzw. 0,1 ng I-TEQ/m³ (PCDD/F).

Von der Anlage werden die von der Genehmigungsbehörde angeordneten Emissionsbeschränkungen für Schwefeldioxid, Stickoxide stets und für Gesamtstaub und Benzol – abgesehen von jeweils einem Wert im Anfahrbetrieb – eingehalten. Der Grenzwert für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane wird unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und des Fremdluftanteils (gemäß Nr. 5.1.2 TA Luft [6]) überschritten.

Versuchsbetrieb Kupolofen II

Die Nachverbrennung der Gicht-/Abgase während der Schmelzphase ergibt keinen eindeutigen Befund für eine Emissionsminderung an organischen Schadstoffen. An diesem Tag waren die organischen Schadstoffkonzentrationen gegenüber den vorangegangenen Regelbetriebmessungen generell deutlich erhöht. Verantwortlich für die erhöhten Rohgasniveaus sind vermutlich Kontaminationen der Einsatzmaterialien.

Bewertung und Konsequenzen

Im Regelbetrieb der Kupolofenanlage werden die Grenzwerte für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane und Benzol nicht bzw. nicht sicher eingehalten. Des Weiteren zeigen sich für polychlorierte Biphenyle (Indikator und dioxinähnliche) hohe Emissionen.

Zur Minderung der Schadstoffemissionen kommen an der Anlage primär- und sekundärseitige Maßnahmen in Betracht:

- Qualitätssteigerung und -sicherung der Einsatzstoffe (keine Verwendung von Einsatzstoffen mit organischen bzw. leichtflüchtigen anorganischen Anhaftungen/Verunreinigungen),
- Sicherstellung der ordnungsgemäßen Funktion und des einwandfreien Betriebs der bestehenden Gaskühler-/Gewebefilteranlage (Beseitigung von Leckagestellen, Undichtigkeiten etc.),
- Umrüstung bzw. Neuaufbau der Abgasreinigungsanlage auf bzw. mit (Ab-/)Adsorptionsverfahren (z. B. Flugstromabsorber/-adsorber) zur Abscheidung von anorganischen und hochtoxischen organischen Spurenschadstoffen. Hinweis: Diese Verfahren werden an verschiedenen Kupolofenanlagen in Bayern zur Emissionsminderung eingesetzt und haben sich in der Betriebspraxis bewährt. Der Emissionswert von 0,1 ng I-TEQ/m³ gemäß Nr. 5.2.7.2. TA Luft [6] kann damit dauerhaft deutlich unterschritten werden.

Zusammenfassend stellte der vorgefundene Betrieb der Kupolofen-/Abgasreinigungsanlage einen Zustand dar, den es zu verbessern galt. Die Anlage wurde noch im Jahr der Emissionsmessung außer Betrieb genommen und seither nicht mehr betrieben. Das für den Guss benötigte Eisen wird jetzt in einem im Anlagenbestand vorhandenen elektrisch beheizten Tiegelofen geschmolzen.

3.10 Kaffeerösterei

In Kaffeeröstanlagen wird aus Rohkaffee(bohnen) durch Wärmebehandlung Röstkaffee erzeugt. Die Erwärmung erfolgt entweder über Kontakt und/oder Konvektion. Die auf dem Markt gängigen Anlagen gestatten einen diskontinuierlichen (z. B. Chargenröster mit Trommel, mit Schale, mit feststehendem Behälter bzw. Fließbett-Röster) oder kontinuierlichen (kontinuierlicher Röster) Röstbetrieb.

Bei der Anlage handelt es sich um einen Chargenröster mit Trommel. Ziel war es, die Anlage im regulären Betrieb bei unterschiedlichen Katalysator-Solltemperaturen zu untersuchen, um die optimale Einstellung (niedrige Schadstoffemissionen, geringer Brennstoffverbrauch) zu finden. Die Abbildung 10 zeigt das Grundfließbild der Röstanlage und die Tab. 45, S. 79, gibt einen Überblick über die wesentlichen Kenndaten und untersuchten Betriebsweisen.

Aus den Vorratssilos gelangen über die Dosierstation jeweils ca. 100 bis 240 kg Rohkaffee in die Rösttrommel. In der sich drehenden, mit Einbauten versehenen Trommel werden die Kaffeebohnen innerhalb von 15 bis 20 Minuten (Langzeitröstung) mit heißem Abgas aus einem Erdgasbrenner (drei-stufiger Flächenbrenner) erhitzt. Für ein homogeneres Röstergebnis können die Bohnen während des Röstprozesses mit Wasser bedüst werden. Die nach dem Rösten etwa 200 °C heißen Kaffeebohnen werden über eine Klappe an der Stirnseite auf das Kühlsieb (Ø 2,5 m mit Rührwerk) ausgetragen. Dort kühlen sie bei Raumluft ab, die durch die auf dem Siebboden liegenden Bohnen gesaugt wird. Um den Kühleffekt zu verstärken, wird Wasser auf die Bohnen gesprüht. Die Abluft aus dem Kühlsieb strömt über einen Kühlluftzyklon und den Kamin in die Umgebung. Die Bohnen werden anschließend pneumatisch über Entsteiner und Wägetrichter in die Röstkaffeecilos gefördert.

Ein Ventilator saugt das Abgas aus der Rösttrommel ab und fördert es in den Röstgaszyklon zur Abscheidung der Kaffeehäutchen, die sich während der Röstung durch die Volumenzunahme der Bohnen lösen. Danach folgt eine katalytische Nachverbrennungseinheit. Zunächst wird die Energie des Abgases mittels eines Erdgasbrenners (Gebläsebrenner) auf die erforderliche Anspring- bzw. Betriebstemperatur des Katalysators gebracht. Wenn diese Bedingung erreicht und der Katalysator nicht vergiftet ist, oxidieren die im Abgas enthaltenen organischen Kohlenstoffverbindungen an der Katalysatoroberfläche (exotherme heterogen katalytische Reaktion) zu den Hauptreaktionsprodukten Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Danach gelangt das Röstabgas über den Kamin in die Umgebung.

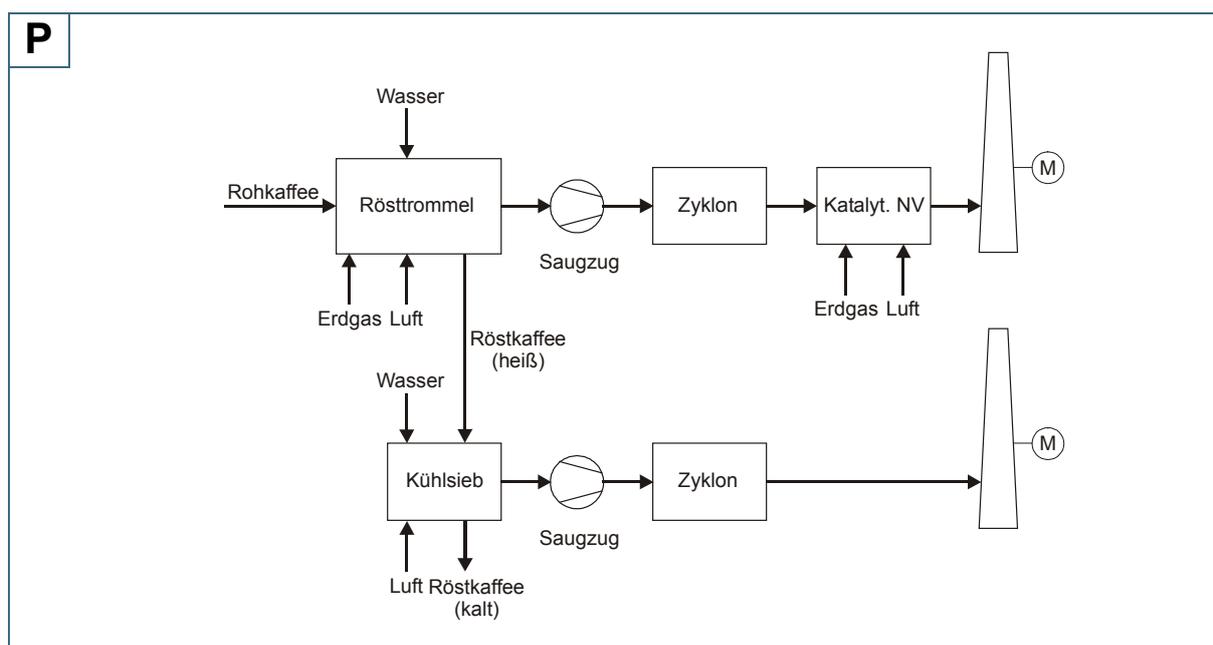


Abb. 10: Grundfließbild der Kaffeeröstanlage P mit den Abgasmessstellen M.

Tab. 45: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Kaffeerösterei P.

Anlage P	Regelbetrieb				
Auslegungsdaten					
Röstanlage	Chargenröster mit Rösttrommel				
Chargengröße	100–200 kg				
Dauer Röstzyklus	15–20 min				
Eingesetzte Rohstoffe	Kaffeebohnen (Rohkaffee)				
Brennstoffe	Erdgas				
Produkte	Kaffeebohnen (Röstkaffee)				
Röstkapazität max.	500 kg/h (Rohkaffee)				
Brennerleistung	0,467 MW				
Abgasreinigungsanlage	Zyklon, katalytische Nachverbrennung				
Brennerleistung katalytische Nachverbrennung	200 kW				
Mindesteintritttemperatur katalytische Nachverbrennung	450 °C				
Katalysator	Keramikwaben mit Platinbeschichtung				
Betriebsweise katalytische Nachverbrennung	I	II	III	IV	V
Solltemperatur Katalysator	450 °C	520 °C	500 °C	420 °C	450 °C

Bei der Regelbetriebsuntersuchung im Mai 2010 fanden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen Abgasmessungen bei verschiedenen Katalysator-Solltemperaturen ohne und bei zwei Chargen mit Wassereindüsung in die Rösttrommel statt. Am ersten Messtag war die Solltemperatur am Katalysator zunächst auf 450 °C eingestellt und wurde dann um 70 °C erhöht. Aufgrund der hohen Gesamt- und Methan-Kohlenstoff-Konzentrationen bei beiden Betriebsweisen stellte ein Techniker am Vormittag des zweiten Messtags die beiden Brenner neu ein. Anschließend wurden bei einer Katalysator-Solltemperatur von 500 °C Messungen im gereinigten Röstabgas sowie in der Abluft des Kühlsiebs (Prüfung Gesamtstaubgehalt) durchgeführt. Die ursprünglich in der Genehmigung festgesetzte Solltemperatur am Katalysator von 450 °C wurde schließlich durch einen Änderungsbescheid auf 500 °C festgelegt.

Basierend auf den Erkenntnissen der o. g. Untersuchung sowie im Hinblick auf die geänderten Auflagen im Genehmigungsbescheid (geringere Katalysator-Mindesttemperatur von 500 °C) wurden im Mai 2011 die Abgasmessungen wiederholt. Zunächst wurde der Katalysator bei einer Solltemperatur von 420 °C – die Temperatur, bei der der Betreiber die Anlage aus wirtschaftlichen Gründen i. d. R. fährt – betrieben, danach bei einer um 30 °C höheren Einstellung.

In Tab. 46, S. 81, sind die Emissionen für den Regelbetrieb der Kaffeerösterei im Mai 2010 und 2011 für die verschiedenen Katalysator-Solltemperatureinstellungen angegeben.

Regelbetrieb Mai 2010

Die exakten Betriebstemperaturen am Katalysator (Ein- und Austrittstemperatur) bei verschiedenen Sollwertvorgaben sind unbekannt, da vom Betreiber die im Genehmigungsbescheid geforderte kontinuierliche Temperaturmessung und -aufzeichnung nicht installiert worden ist. An der Messstelle für das Röstabgas liegt aufgrund des Chargenbetriebs ein charakteristischer, sägezahnartiger Temperaturverlauf vor. Während eines Röstzyklus tritt eine Temperaturerhöhung von rund 80 bis 100 °C auf.

Die Abgasgehalte an Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffmon-/dioxid befinden sich stets deutlich unter den zugehörigen Konzentrations- bzw. Massenstrom-Grenz-/Emissionswerten. Die gleiche Aussage trifft auf die gasförmigen anorganischen Chlor-/Fluorverbindungen, Formaldehyd, Ameisen- und Essigsäure zu.

Dagegen werden die Grenzwerte für organische Stoffe (C_{ges}) für die Massenkonzentration bei allen eingestellten Katalysator-Solltemperaturen überschritten; hinsichtlich des Massenstroms wird der Grenzwert bei Katalysator-Solltemperaturen von über 500 °C eingehalten. Die simultanen Methankohlenstoff-Messungen zeigen, dass die Gesamtkohlenstoffgehalte überwiegend aus unverbranntem Methan resultieren. Nach Neujustierung der Brenner sind die Emissionen organischer Stoffe bei einer Katalysator-Solltemperatur von 500 °C wesentlich geringer (mittlere Massenkonzentrationen an Gesamt- bzw. Methankohlenstoff 31 bzw. 19 mg/m³); der Massenstrom-Grenzwert für Gesamtkohlenstoff wird sicher eingehalten.

Tendenziell sind die Emissionen organischer Stoffe (Gesamt-, Methankohlenstoff, Formaldehyd, Ameisen-, Essigsäure) bei höheren Katalysator-Solltemperaturen geringer. Ein Einfluss der Wassereindüsung in der Rösttrommel auf das Emissionsverhalten der Anlage ist nicht erkennbar.

In der Abluft des Kühlsiebes liegen mit maximal 14,8 mg/m³ (Maximalwert zzgl. Messunsicherheit) stets Gesamtstaubgehalte unter dem Grenzwert des Genehmigungsbescheids vor.

Regelbetrieb Mai 2011

Die vom Betreiber nachgerüstete kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Katalysator-Ein- und Austrittstemperatur belegen, dass der Anstieg der Abgastemperatur nach dem Katalysator nicht – wie bei der Regelbetriebsuntersuchung im Mai 2010 vermutet – von den exothermen Oxidationsreaktionen an der Katalysatoroberfläche, sondern von der Abgastemperatur vor dem Katalysator bestimmt wird.

Die Stickstoffmon-/dioxid-Emissionen befinden sich stets deutlich unter dem betreffenden Konzentrations- bzw. Massenstrom-Grenz-/Emissionswert. Die Kohlenstoffmonoxid-, Gesamtkohlenstoff- und Methankohlenstoffwerte sind bei den niedrigeren Katalysator-Solltemperaturen von 420 und 450 °C im Vergleich zur Untersuchung im Mai 2010 auf einem wesentlich höheren Niveau und überschreiten zumeist die Grenzwerte des Genehmigungsbescheids bzw. die Emissionswerte der TA Luft [6]. Der Anteil von Methan- am Gesamtkohlenstoff beträgt durchschnittlich 60 %.

Für Formaldehyd werden die Emissionswerte der TA Luft [6] – abgesehen von einem Einzelwert mit 22,3 mg/m³ bei einer Katalysator-Solltemperatur von 450 °C – eingehalten.

Tab. 46: Abgaskonzentrationen und -frachten während der Untersuchungen an der Kaffeerösterei P (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Abgas Rösttrommel			Anlage P	
		\bar{y}	y_{max}	$y_{max} + U_p$	Grenzwert	Emissionswert [6]
O ₂	Vol.-%	16,7	17,4	18,3	-	-
		16,1	16,4	17,2		
		16,3	18,5	19,4		
		16,4	16,6	17,4		
		16,2	16,8	17,6		
CO ₂	Vol.-%	2,7	2,9	3,0	-	-
		3,1	3,2	3,4		
		3,1	3,8	4,0		
		2,8	2,9	3,0		
		2,9	3,0	3,2		
CO	g/m ³	0,057	0,067	0,070	-	0,10
		0,061	0,070	0,073		
		0,047	0,066	0,069		
		0,114	0,136	0,143		
		0,119	0,136	0,143		
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,117	0,154	0,162	0,35	0,35 ¹⁾
		0,126	0,162	0,170		
		0,117	0,165	0,173		
		0,141	0,189	0,198		
		0,142	0,186	0,195		
	kg/h	0,50 ²⁾	0,66 ²⁾	0,70 ²⁾	1,8	1,8
		0,54 ²⁾	0,70 ²⁾	0,73 ²⁾		
		0,50 ²⁾	0,71 ²⁾	0,74 ²⁾		
		-	-	-		
		0,415	0,56	0,614		
C _{ges}	mg/m ³	154	176	185	50	50
		88	103	108		
		31,3	65,9	69,2		
		227	239	251		
		244	302	317		
	kg/h	0,66 ²⁾	0,76 ²⁾	0,79 ²⁾	0,5	0,5
		0,38 ²⁾	0,44 ²⁾	0,47 ²⁾		
		0,13 ²⁾	0,28 ²⁾	0,30 ²⁾		
		-	-	-		
		0,688	0,84	0,929		
C _{CH₄}	mg/m ³	111	126	139	-	-
		64,7	78,2	86,0		
		18,8	42,3	46,5		
		136	148	163		
		169	217	239		
HCl	mg/m ³	0,32	0,38	0,42	-	30
		0,20	0,23	0,25		
		-	-	-		
		-	-	-		
		-	-	-		
	kg/h	0,001 ²⁾	0,002 ²⁾	0,002 ²⁾	-	0,15
		0,001 ²⁾	0,001 ²⁾	0,001 ²⁾		
		-	-	-		
		-	-	-		
		-	-	-		

05/2010, T_{Kat.}: 450 °C

05/2010, T_{Kat.}: 520 °C

05/2010, T_{Kat.}: 500 °C

05/2011, T_{Kat.}: 420 °C

05/2011, T_{Kat.}: 450 °C

**)
**)

Tab. 46 (Forts.): Abgaskonzentrationen und -frachten während der Untersuchungen an der Kaffeerösterei P.

Parameter	Einheit	Abgas Rösttrommel			Anlage P		
		\bar{y}	y_{max}	$y_{max} + U_p$	Grenzwert	Emissionswert [6]	
HF	mg/m ³	< 0,15	< 0,4	< 0,4	-	3 ¹⁾	
		< 0,2	< 0,3	< 0,3			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
	g/h	< 0,6 ¹⁾	< 1,7 ¹⁾	< 1,7 ¹⁾		-	15
		< 0,9 ¹⁾	< 1,3 ¹⁾	< 1,3 ¹⁾			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
Formaldehyd	mg/m ³	6,1	7,1	8,5	-	20 ¹⁾	
		5,5	6,1	7,3			
		-	-	-			
		9,9	18,6	22,3			
		10,9	11,3	13,6			
	kg/h	0,026 ¹⁾	0,031 ¹⁾	0,037 ¹⁾		-	0,10
		0,024 ¹⁾	0,026 ¹⁾	0,031 ¹⁾			
		-	-	-			
		-	-	-			
		0,031	0,033	0,036			
Ameisensäure	mg/m ³	5,8	7,7	9,2	-	20 ¹⁾	
		4,1	5,3	6,4			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
	kg/h	0,025 ¹⁾	0,033 ¹⁾	0,040 ¹⁾		-	0,10
		0,018 ¹⁾	0,023 ¹⁾	0,028 ¹⁾			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
Essigsäure	g/m ³	0,0195	0,0226	0,0271	-	0,10 ¹⁾	
		0,0147	0,017	0,0206			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
	kg/h	0,084 ¹⁾	0,097 ¹⁾	0,117 ¹⁾		-	0,50
		0,063 ¹⁾	0,073 ¹⁾	0,089 ¹⁾			
		-	-	-			
		-	-	-			
		-	-	-			
Gesamtstaub (Abluft Kühl- sieb)	mg/m ³	-	-	-	20	20 ¹⁾	
		-	-	-			
		7,4	12,9	14,8			
		-	-	-			
		-	-	-			
	kg/h	-	-	-		-	0,20
		-	-	-			
		0,032 ¹⁾	0,055 ¹⁾	0,064 ¹⁾			
		-	-	-			
		-	-	-			

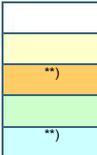
05/2010, T_{Kat}: 450 °C

05/2010, T_{Kat}: 520 °C

05/2010, T_{Kat}: 500 °C

05/2011, T_{Kat}: 420 °C

05/2011, T_{Kat}: 450 °C



¹⁾ Frachtberechnung mit Nennvolumenstrom Katalysator (4.300 m³/h)

²⁾ nach Brenneroptimierung

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

Bewertung und Konsequenzen

Vom Betreiber der Kaffeerösterei wurden bei beiden Regelbetriebsuntersuchungen Auflagen des Genehmigungsbescheids nicht beachtet (kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Katalysator-Ein-/Austrittstemperatur, Katalysator-Mindesttemperatur von 500 °C).

Die Emissionsbeschränkungen für organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff) konnten nur bei optimaler Einstellung beider Brenner und bei Katalysator-Betriebstemperaturen von bzw. über 500 °C eingehalten werden. Der hohe Anteil von Methankohlenstoff (60 bis 70 %) an den Gesamtkohlenstoffemissionen ist ein Indiz für eine nicht optimale Verbrennung des Erdgases (Methan-Schlupf) in beiden Brennern (Röstittrommel bzw. Brenner, der der katalytischen Nachverbrennung vorgeschaltet ist).

Aus fachlicher Sicht ist unter diesen Gegebenheiten ein Betrieb der Anlage mit einer Katalysatortemperatur unterhalb von 500 °C nicht zu befürworten.

Zur nachhaltigen Minderung der Schadstoffemissionen und zur Senkung des Primärenergiebedarfs wurde dem Anlagenbetreiber empfohlen, die Anlage von Sachverständigen auf ordnungsgemäßen Betrieb und einwandfreie Funktion des Katalysators unter Beachtung der strömungstechnischen und thermischen Belange prüfen zu lassen. In Folge dessen wurde vom Betreiber in Zusammenarbeit mit dem Hersteller die Anlage umgebaut. Der Katalysator wurde entfernt und durch einen Erdgasbrenner als thermische Abgasreinigungseinrichtung ersetzt. Damit werden alle Grenzwerte bei einer Solltemperatur von 450 °C eingehalten. Der Genehmigungsbescheid wurde angepasst.

3.11 Räucherei

In Räucheranlagen werden Lebensmittel, wie z. B. Fleisch, Fleischwaren, Fisch etc., mit Rauch zur Änderung der sensorischen Eigenschaften (Geschmack, Geruch, Aussehen) und längerer Haltbarkeit behandelt. Der Rauch stellt ein Gemisch aus Gasen und Aerosolen unvollständig verbrannter oder pyrolytisch zersetzter Räuchermittel (Holz oder andere Pflanzenteile) dar. Unterschiedliche Anlagentypen gestatten während oder nach dem Räuchern weitere Produktbehandlungen (z. B. Erwärmen, Brühen, Duschen, Befeuchten, Trocknen und Kühlen). Im einfachsten Fall besteht eine Räucheranlage aus Raucherzeuger, Räucherkammer, Verbindungs- und Abgaskanälen und einer Abgasreinigungsanlage.

An der Räucheranlage wurde die Emissionssituation für die laut Genehmigungsbescheid beschränkten und andere fachlich interessante Stoffe untersucht. Die Abb. 11 zeigt das Grundfließbild der Räucheranlage und Tab. 47, S. 87, gibt eine Übersicht über die wesentlichen Kenndaten.

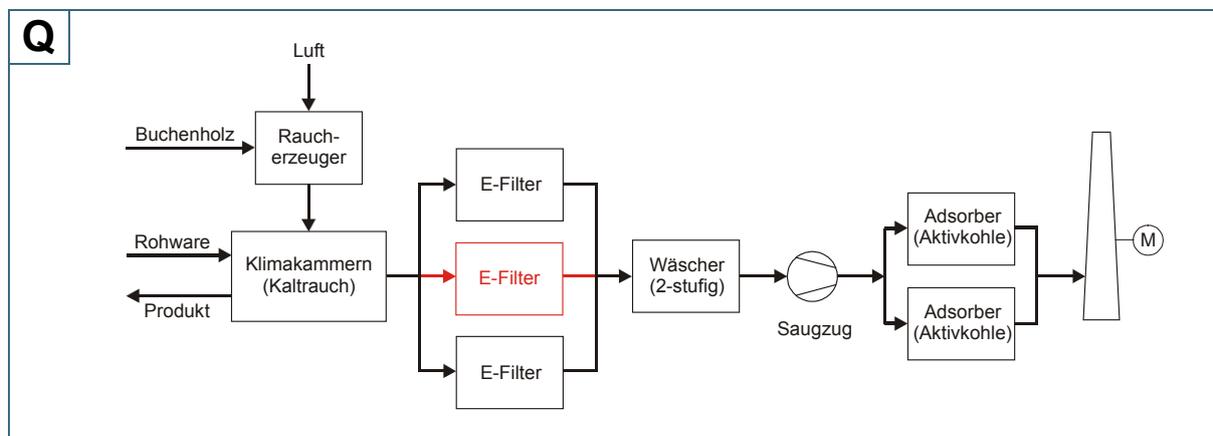


Abb. 11: Grundfließbild der Räucheranlage Q {Anlage I: 22 Klimakammern, angeschlossen an Abgasreinigungsanlage I (zwei Elektrofilter); Anlage II: 39 Klimakammern, angeschlossen an Abgasreinigungsanlage II (drei Elektrofilter)} mit Abgasmessstelle M.

Als Rohware kommen in den Kaltrauch-Klimakammern Würste (in Kunstdarm gefülltes Brät) zum Einsatz, die an den Quergestängen von Rollwägen hängen. Insgesamt sind 61 Kaltrauch-Klimakammern unterschiedlicher Größe vorhanden (Fassungsvermögen durchschnittlich 27 Rollwägen), in denen die Ware fünf bis sieben Tage verbleibt. Am ersten Tag findet keine Behandlung statt (Zeit zur Umrötung der Wurst und mikrobiologische Säuerung mittels Bakterien), an den weiteren Tagen jeweils ein Zyklus bestehend aus Räuchern, Nachräuchern und Trocknen.

Beim Räuchern wird die Ware etwa 30 bis 60 Minuten lang frischem, kaltem Rauch aus einem Glimm-Raucherzeuger (Verschwelung von Buchenholzspänen auf einer elektrischen Heizplatte) ausgesetzt. Eine dem Frischrauchvolumen entsprechende Abgasmenge wird über den Rauchabzug der Klimakammer abgesaugt und der Abgasbehandlungsanlage zugeführt. Nach Umschalten des Raucherzeugers auf die nächste Klimakammer wird das Gasvolumen der zuvor beaufschlagten Kammer für ca. 30 Minuten mittels Ventilator bei offenem Rauchzug umgewälzt (sog. Nachräuchern zur Anlagerung der Rauchbestandteile auf die Ware). An den täglich wiederkehrenden Räucher-/Nachräucherzyklus schließt sich jeweils die Trocknung der Ware mit Frischluft bei geschlossenem Rauchabzug an (Abluft geht über eine Klappe in einen Sammelkanal und von dort unbehandelt an die Umgebung).

Der Reinigung des rauchhaltigen Abgases aus den Klimakammern dienen zwei Behandlungsanlagen, die jeweils mit Elektrofiltern, alkalischem Wäscher und Aktivkohleadsorbern zur Abscheidung von Aerosolen und organischen Stoffen (u. a. Geruchsstoffen) ausgestattet sind.

Tab. 47: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Räucheranlage Q.

Anlage Q	Regelbetrieb	
Auslegungsdaten	Anlage I	Anlage II
Räucheranlage	Kaltrauchklimakammer	
Anzahl Klimakammern	22	39
Anzahl Raucherzeuger	4	5
Raucherzeugertyp	Glimmraucherzeuger	
Räuchermittel	Buchenholzspäne	
Temperatur Klimakammer	20–25 °C	
Dauer Rauchaufgabe	30–60 min (produktabhängig)	
Dauer Nachräuchern	30 min	
Einsatzstoffe	Fleischwaren (Rohware)	
Produkte	Fleischwaren (Räucherware)	
Räucherkapazität max.	50 Mg/d	
Abgasreinigungsanlage	Elektrofilter (parallel 2 ×), Wäscher (Reihe 2 ×), Adsorber (parallel 2 ×)	Elektrofilter (parallel 3 ×), Wäscher (Reihe 2 ×), Adsorber (parallel 2 ×)
Wäschertyp	Füllkörperkolonne, Gegenstromprinzip	
Absorptionsmittel	Natronlauge	
Adsorbentyp	Festbett	
Adsorptionsmittel	Aktivkohle	
Reststoffe	Teer (flüssig)	

An die Abgasreinigungsanlage I mit zwei Elektrofiltern sind 22 Klimakammern und an die größer dimensionierte, mit drei Elektrofiltern ausgestattete Anlage II 39 Klimakammern angeschlossen. Das gereinigte Abgas gelangt über Kamine an die Umgebung. Die Elektrofilter und Adsorber beider Anlagen werden täglich nach dem Produktionsende mit Dampf gereinigt bzw. regeneriert.

Am Vormittag des ersten Messtags fand im Regelbetrieb der Räucheranlage für das Abgas der Reinigungsanlage I – neben der Bestimmung der Sauerstoff-, Kohlenstoffmon-/dioxid-, Stickoxid- und Gesamtkohlenstoffgehalte – die im Genehmigungsbescheid mittels Kieselgel-Verfahren [23] geforderte Bestimmung der organischen Stoffe (Gesamtkohlenstoff) statt. Am Nachmittag des ersten und an den beiden folgenden Tagen wurde das Abgas der Anlage II untersucht, wobei zusätzlich die Parameter Form-, Acet-, Crotonaldehyd, Benzol, Phenol, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Gesamt- und Feinstaub (PM_{2,5}/PM₁₀) bestimmt wurden.

In Tab. 48, S. 89 und 90, sind die Emissionen der Räucheranlage für beide Abgasreinigungsanlagen dargestellt.

Regelbetrieb – Abgasreinigungsanlage I

Im Tagesverlauf ist eine stete Zunahme der Emissionen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen festzustellen. Für Kohlenstoffmonoxid bzw. organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff mittels FID) zeigen sich mit Halbstundenmittelwerten von durchschnittlich 666 bzw. 182 mg/m³ relativ hohe Niveaus. Die Bestimmungen der organischen Stoffe nach dem Kieselgel-Verfahren liefern deutlich niedrigere Emissionen für Gesamtkohlenstoff als das FID-Verfahren. Da laut Genehmigungsbescheid für die Beurteilung der Emissionen an organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff) das Kieselgel-Verfahren anzuwenden ist, wird der Grenzwert für den Massenstrom sicher eingehalten.

Regelbetrieb – Abgasreinigungsanlage II

Analog zur Abgasreinigungsanlage I zeigt sich im Tagesverlauf eine ansteigende Tendenz für die Höhe der Emissionen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen. Für Kohlenstoffmonoxid bzw. organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff FID) liegen die durchschnittlichen Halbstundenmittelwerte stets unter den an der Abgasreinigungsanlage I festgestellten Werten. Das Kieselgel-Verfahren liefert im Vergleich zum FID-Verfahren erneut deutlich niedrigere Messwerte für die Emissionen organischer Stoffe (Gesamtkohlenstoff). Durch Messung mit dem Kieselgel-Verfahren werden sowohl der Massenkonzentrations- als auch der Massenstrom-Grenzwert eingehalten.

Im Abgas ist Formaldehyd nicht, Crotonaldehyd in geringer (maximal 1,3 mg/m³) und Acetaldehyd in etwas höherer Konzentration (max. 18,8 mg/m³) vorzufinden. Für Benzol und Phenol ergeben sich mit Maximalgehalten von 0,11 bzw. 0,013 mg/m³ niedrige Werte. Die Benzol- bzw. Phenolemissionen unterschreiten die in der TA Luft [6] für krebserzeugende Stoffe der Klasse III bzw. organische Stoffe der Klasse I angegebenen Werte für den Massenstrom bzw. die Massenkonzentration.

Die Ergebnisse der Gesamt- und Feinstaub-Bestimmungen zeigen, dass die partikelförmigen Emissionen überwiegend aus Bestandteilen bestehen, die bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C flüchtig sind. Unabhängig von der Trockenbehandlung der Filtermedien bei Raumtemperatur bzw. 105 °C ergeben sich niedrige Gesamtstaubgehalte unterhalb von 20 mg/m³. Die von der Anlage emittierte Staubmasse besteht überwiegend aus Feinstaubpartikeln kleiner PM_{2,5}.

Bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen zeigen sich im Abgas Summenwerte bis zu 113 µg/m³. Das darin enthaltene Benzo(a)pyren liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze des Analyseverfahrens. Die im Genehmigungsbescheid für krebserzeugende Stoffe der Klasse I [6] auf 0,05 µg/m³ bzw. 0,15 g/h festgesetzten Grenzwerte werden weit unterschritten.

Bewertung und Konsequenzen

Die Abgasbehandlung von mit Glimmrauch beaufschlagten Kaltrauch-Klimakammern in kombinierten Abgasbehandlungsanlagen, bestehend aus Elektrofilter, Wäscher und Aktivkohleadsorber, stellt eine adäquate Methode zur Minderung staubförmiger und organischer Stoffemissionen dar. Dazu tragen auch die geringen Abgasvolumenströme bei, die i. d. R. geringe Massenströme zur Folge haben. Vom Betrieb der Räucheranlage gehen keine umweltrelevanten Emissionen aus, so dass aus den Messergebnissen keine betrieblichen oder technischen Konsequenzen zu ziehen waren.

Tab. 48: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Untersuchungen an der Räucheranlage Q (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Regelbetrieb			Anlage Q
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert
Volumenstrom	m ³ /h	1.500	1.700	1.800	–
		2.000	3.200	3.400	
Temperatur	°C	20,1	23,7	23,9	–
		20,7	22,6	23,1	
O ₂	Vol.-%	21,0	21,0	22,0	–
		21,0	21,0	22,0	
CO ₂	Vol.-%	0,15	0,18	0,19	–
		0,12	0,16	0,17	
CO	mg/m ³	666	873	917	–
		437	757	795	
Σ NO, NO ₂	mg/m ³	13,6	18,0	18,9	–
		10,5	17,3	18,2	
C _{ges} (FID)	mg/m ³	182	244	256	–
		134	216	227	
C _{ges} (Kieselgel)	mg/m ³	45,6	65,1	71,6	20 ¹⁾
		35,2	44,7	49,2	
	kg/h	0,078	0,100	0,110	0,50
		0,097	0,116	0,128	
Formaldehyd	mg/m ³	–	–	–	20 ¹⁾²⁾
		< 0,1	< 0,1	< 0,1	
	kg/m ³	–	–	–	0,10 ²⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	
Acetaldehyd	mg/m ³	–	–	–	20 ¹⁾²⁾
		10,5	17,5	21,0	
	kg/m ³	–	–	–	0,10 ²⁾
		0,024	0,038	0,046	
Crotonaldehyd	mg/m ³	–	–	–	20 ¹⁾²⁾
		0,7	1,3	1,6	
	kg/m ³	–	–	–	0,10 ²⁾
		0,002	0,003	0,004	
Σ Aldehyde ¹⁾	mg/m ³	–	–	–	20 ¹⁾²⁾
		11,3	18,8	22,6	
	kg/h	–	–	–	0,10 ²⁾
		0,024	0,040	0,048	

Anlage I
Anlage II

Tab. 48 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen während der Untersuchungen an der Räucheranlage Q.

Parameter	Einheit	Regelbetrieb			Anlage Q Grenzwert
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	
Benzol	mg/m ³	–	–	–	1 ¹⁾³⁾
		0,029	0,11	0,13	
	g/h	–	–	–	2,5 ³⁾
		0,06	0,25	0,36	
Phenol	mg/m ³	–	–	–	20 ¹⁾²⁾
		0,006	0,013	0,016	
	kg/h	–	–	–	0,10 ²⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	
B(a)P	mg/m ³	–	–	–	0,05 ¹⁾⁴⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	
	g/h	–	–	–	0,15 ⁴⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,001	
PAK ^{*)}	µg/m ³	–	–	–	–
		91,6	113	147	
	g/h	–	–	–	–
		0,208	0,266	0,346	
Gesamtstaub (22 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		10,5	13,3	15,3	
	kg/m ³	–	–	–	–
		0,02	0,03	0,03	
Gesamtstaub (105 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		5,3	6,6	7,6	
	kg/m ³	–	–	–	–
		0,01	0,02	0,02	
PM _{2,5} (22 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		6,8	7,9	9,1	
PM _{2,5} (105 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		0,35	0,37	0,43	
PM ₁₀ (22 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		10,8	12,4	15,5	
PM ₁₀ (22 °C)	mg/m ³	–	–	–	–
		0,54	0,55	0,69	

Anlage I	
Anlage II	

*) Einzelgehalte, -verbindungen unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen bei Mittel- und Summenwertbildung unberücksichtigt
 1) Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
 2) Summe organische Stoffe der Klasse I (Nr. 5.2.5 TA Luft [6])
 3) Krebserzeugende Stoffe der Klasse III (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])
 4) Krebserzeugende Stoffe der Klasse I (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

3.12 Quarzsandwerke

In den Quarzsandwerken wird ein quarzsandhaltiges Rohstoffgemisch verarbeitet, das im Tagebau per Trockenverfahren aus angrenzenden bzw. in der Umgebung gelegenen Gruben abgebaut wird. In Vorsortier- und Aufbereitungsanlagen wird das Gemisch von Verunreinigungen, Stör- und ggf. Wertstoffen befreit und in nachgeschalteten Klassier- bzw. thermischen Behandlungsanlagen Quarzsandprodukte unterschiedlicher Art und Spezifikation (Quarzsand in bestimmten Kornklassen bzw. Sand mit bestimmter Farbe) hergestellt. Die Produkte kommen u. a. in der Baustoffindustrie direkt als Werkstoff bzw. als Zuschlagstoff für andere Bauprodukte sowie in vielen anderen Industriebereichen, z. B. in Gießereien im Gussformenbau, zum Einsatz.

Bei den Quarzsandwerken wurden zwei Sandtrockner, eine Farbsandofenanlage sowie eine Sandklassier- und -sichteranlage untersucht, deren Drehrohtrockner, Förder- bzw. Klassiereinrichtungen mit Einrichtungen zur Erfassung und Minderung der Staubemissionen über Gewebefilter ausgerüstet sind. Ziel war es, im regulären Anlagenbetrieb Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlagen in Bezug auf Quarzfeinstaub PM_4 zu erhalten. Quarzfeinstaub PM_4 ist kanzerogen [24] und gemäß Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6] den krebserzeugenden Stoffen der Klasse III zuzuordnen, die mit Emissionsgrenzwerten von 1 mg/m^3 bzw. $2,5 \text{ g/h}$ belegt sind. Neben den Emissionen an Quarzfeinstaub PM_4 wurden die Gesamt- und Feinstaubemissionen PM_{10}/PM_4 zu Vergleichs- und Prüfzwecken (Plausibilität) ermittelt. Die Abbildung 12 zeigt die Grundfließbilder und die Tab. 49, S. 93, und Tab. 50, S. 93, geben einen Überblick über die wesentlichen Kenndaten der quarzsandverarbeitenden Anlagen.

Bei den Anlagen R und S handelt es sich um Trocknungsanlagen, in denen feuchter Quarzsand für die direkte Verwendung bzw. weitere Verarbeitungs- und Veredelungsschritte getrocknet wird. Die feuchten Sande werden über Beschickungssysteme in die Trockner aufgegeben. Die Trockner sind als Drehrohre, die mit Erdgas betriebenen Gebläsebrennern beheizt werden, ausgeführt. Die trockenen Sande und die mit Partikeln beladenen Abgase verlassen die Drehrohre über Austragsgehäuse. Die getrockneten Sande sammeln sich unten in den Austragsgehäusen und werden über Fördereinrichtungen auf Trockengutsilos verteilt.

In der Anlage T wird Quarzsand mit Hilfe von Bindemittel und Farbpigmenten über ein Brennverfahren in Drehrohröfen gefärbt. Die für den Prozess benötigten Rohstoffe werden in Silos bzw. in Säcken vorgehalten und in Mischern hergestellt. Diese gelangen über Fördereinrichtungen in die mit Erdgas befeuerten Drehrohröfen, wo sie auf Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius erhitzt werden. Der Farbsand fällt am Ende der Ofentrommel in einen Materialkühler, auf dessen Düsenboden der Sand mit Umgebungsluft abgekühlt wird. Anschließend wird das Produkt jeweils über Fördereinrichtungen den Lagern für die verschiedenen Farbsandsorten zugeführt.

Die Anlage U dient zur Reinigung und Klassierung von trockenem Quarzsand. Vom Silo wird das zu klassierende Sandgemisch über ein Becherwerk zur ersten Vibrationssiebmaschine transportiert, in dem die zu großen Sandkörner (sog. Riesel) entfernt werden. Der Siebdurchgang passiert nachfolgend einen Magnetabscheider zur Abtrennung ferromagnetischer Verunreinigungen und zwei parallel arbeitende Windsichter zur Abtrennung weiterer Störstoffe (z. B. Holzfasern). Über ein zweites Becherwerk wird das gereinigte Material zwei in Reihe geschalteten Rüttelsiebmaschinen zur Trennung in verschiedene Korngrößenfraktionen zugeführt. Das gereinigte und klassierte Material wird in mehreren Produktsilos für die Verladung auf Silofahrzeuge bzw. Abpackung in Big-Bags oder Säcke vorgehalten.

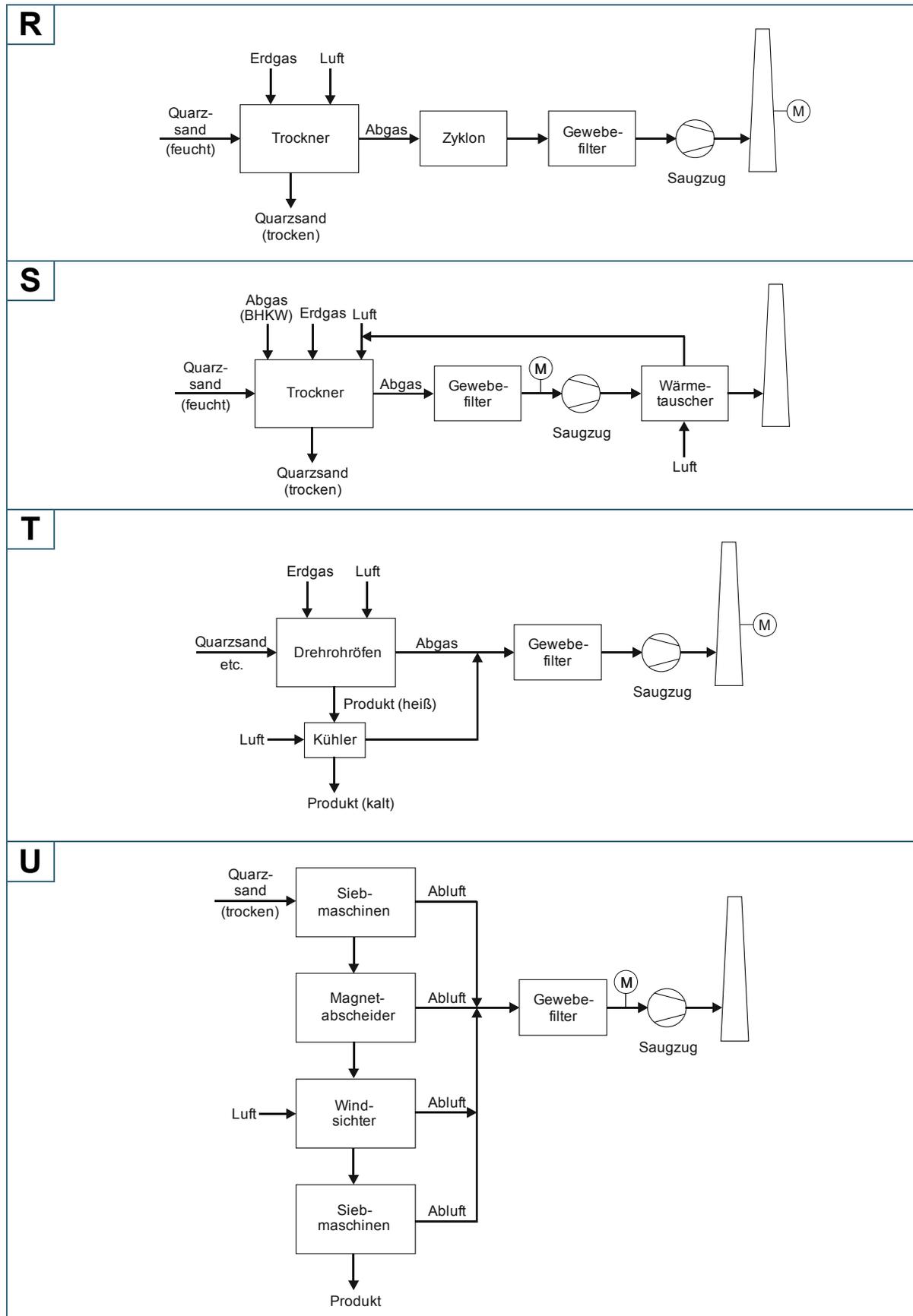


Abb. 12: Grundfließbilder der Sandtrockner (R, S), der Farbsandofenanlage (T) sowie der Sandklassier- und -sichtieranlage (U) an den Quarzsandwerken mit Abgasmessstellen M.

Tab. 49: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Quarzsandtrockner R, S und der Farbsandofenanlage T an den Quarzsandwerken.

Auslegungsdaten	Anlage R	Anlage S	Anlage T
Anlagenart	Trockner	Trockner	Ofen
Bauart	Drehrohr, dreizügig	Drehrohr, einzügig	Drehrohr, einzügig
Anzahl	1	1	3
Betriebsweise	kontinuierlich	Gleichstrom, kontinuierlich	kontinuierlich
Einsatzstoffe	Quarzsand (feucht)	Quarzsand (feucht)	Quarzsand, Bindemittel, Farbpigmente
Produkte	Quarzsand (trocken)	Quarzsand (trocken)	Farbsand (trocken)
Durchsatzleistung	> 5 Mg/h	50 Mg/h	> 5 Mg/h (gesamt)
Art der Beheizung	Direkt, Brennkammer vorgeschaltet	Direkt, Brennkammer vorgeschaltet	Direkt
Brennstoffe, Heizgase	Erdgas	Erdgas, Abgas BHKW	Erdgas
Feuerungswärmeleistung maximal	> 1,0 MW	5,05 MW	> 1,0 MW (gesamt)
Prozesstemperatur	> 90 °C (Material)	85 °C (Material)	Mehrere hundert Grad Celsius (Material)
Abgasvolumenstrom	Ca. 16.500 m ³ /h	Ca. 18.500 m ³ /h	Ca. 26.500 m ³ /h
Abgasreinigungseinrichtung	Gewebefilter (Flachschlauchfilter)	Gewebefilter (Flachschlauchfilter)	Gewebefilter (Flachschlauchfilter)
Abgasreinigungsrückstand	Gewebefilterstaub	Gewebefilterstaub	Gewebefilterstaub

Tab. 50: Übersicht über wesentliche Kenndaten der Sandklassier- und -sichteranlage U am Quarzsandwerk.

Auslegungsdaten	Anlage U
Anlagenart	Klassier-, -sichteranlage
Bauart	Betriebsnebengebäude mit Aggregaten, geschlossen
Betriebsweise	Kontinuierlich
Einsatzstoffe	Quarzsand, trocken
Produkte	Quarzsand, trocken (Korn-Ø 0,09 mm bis 0,21 mm)
Durchsatzleistung max.	Ca. 7 Mg/h
Anzahl und Art der Klassiereinrichtungen	3 × Siebmaschine, 2 x Windsichter
Anzahl und Art der Fördereinrichtungen	1 × Becherwerk
Abgasvolumenstrom	Ca. 4.000 m ³ /h
Abgasreinigungseinrichtung	Gewebefilter (Rundschlauch-, Reihenfilter)
Abgasreinigungsrückstand	Gewebefilterstaub

Die staubbeladenen Abgase aus den Anlagen R, S, T und U werden über Zyklone und/oder Gewebefilter mit Saugzuggebläsen erfasst und die gereinigten Abgase über Stahlrohrkammine ins Freie geleitet. Spülluftgebläse oder Druckluftimpulse reinigen die Filterschläuche periodisch ab. Die Gewebefilterstäube werden in Auffangtrichtern unter den Filtermedien gesammelt und über Schnecken bzw. Fallrohre den Sammel- bzw. Reststoffbehältern zugeführt.

Die Tab. 51, S. 95 und 96, gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Staubuntersuchungen an den Quarzsandtrocknern R und S, die an jeder Anlage einmal im Jahr 2012 und Jahr 2013 jeweils im Regelbetrieb unter Vollast durchgeführt wurden. In Tab. 52, S. 97, sind entsprechend für die Farbsandofen- sowie Sandklassier-/sichteranlage die Untersuchungsergebnisse aus dem Jahr 2012 dargestellt.

Regelbetrieb Quarzsandtrockner R und S (2012)

Mit Maximalkonzentrationen für Gesamtstaub von 155 mg/m³ bzw. 130 mg/m³, Feinstaub PM₁₀ von 135 mg/m³ bzw. 13,7 mg/m³, Feinstaub PM₄ von 122 mg/m³ bzw. 10,1 mg/m³ und Quarzfeinstaub PM₄ von 6,1 mg/m³ bzw. 0,11 mg/m³ zeigen sich an beiden Trocknern gegenüber den Emissionswerten der TA Luft [6] bzw. im Vergleich zu anderen quarzverarbeitenden Anlagen mit gut funktionierenden Staubabscheideeinrichtungen zu hohe Gehalte. Entsprechendes trifft damit auch auf die Emissionsmassenströme zu.

Als Ursache für die zu hohen Staubemissionen wurden von den Betreibern jeweils Mängel an der Filteranlage (schadhafte Dichtungen und gerissene Filterschläuche, undichte Absperrklappen) infolge Abrasion, Alterung, Korrosion und/oder Verschleiß ermittelt. Nach Reparatur der Filteranlagen durch die Betreiber erfolgten im Jahr 2013 die Untersuchungen im Regelbetrieb mit funktionierenden Abgasreinigungseinrichtungen.

Ergänzend zu den Staubgehalten wurden als umweltrelevante Abgaskomponenten die Gehalte an Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden im Reingas durch kontinuierliche Messungen bestimmt. Bei der Anlage S sind aufgrund des höheren Wärmebedarfs der Gesamtanlage für die Trocknung mit den dafür ausgelegten Aggregaten sowie der zusätzlichen Verwendung von heißem Abgas aus einem Blockheizkraftwerk höhere Kohlenstoffmonoxid- und Stickstoffoxid-Konzentrationen als bei der Anlage R festzustellen. Die Stickstoffoxid-Konzentrationen liegen an beiden Anlagen immer deutlich unter dem Emissionswert von 0,35 g/m³ der TA Luft Nr. 5.2.4 [6] und schöpfen diesen im Mittel zu 8 % (Anlage R) bzw. zu 52 % (Anlage S) aus. Die Emissionswerte von SO₂ befinden sich an beiden Anlagen brennstoffbedingt stets unter der Bestimmungsgrenze von 5 mg/m³ und somit deutlich unter dem Emissionswert von 0,35 g/m³ gemäß TA Luft [6].

Regelbetrieb Quarzsandtrockner R und S (2013)

Die Gesamtstaubgehalte liegen unter 10 mg/m³, der Emissionswert der TA Luft [6] von 20 mg/m³ wird stets unterschritten. Die Emissionswerte für Feinstaub PM₁₀/PM₄ bewegen sich ebenfalls auf einem niedrigen, in der Regel unter 1 mg/m³ gelegenen Niveau. Für die krebserzeugenden Stoffe der Klasse III (Quarzfeinstaub PM₄) zeigen sich mit Maximalkonzentrationen von 0,03 mg/m³ und 0,05 mg/m³ bzw. maximalen Massenströmen von 0,4 g/h und 0,9 g/h um mindestens den Faktor 20 bzw. 2 niedrigere Werte als die Emissionswerte für die krebserzeugenden Stoffe der Klasse III der TA Luft [6].

Bezüglich des Emissionsverhaltens für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden zeigen sich im Vergleich zu den Vorjahresmessungen bei der Anlage R nahezu keine und bei der Anlage S (siehe oben) nur bei Stickstoffoxiden signifikante Unterschiede. Die Stickstoffoxid-Konzentrationen sind an der Anlage S um durchschnittlich 0,127 g/m³ bzw. mehr als die Hälfte niedriger als im Vorjahr, was vermutlich in der unterschiedlichen Brennerleistung im Zusammenhang mit Sandsorten anderer Körnung bzw. anderen Wassergehalten begründet ist.

Regelbetrieb Farbsandofenanlage T und Sandklassier-/sichteranlage U

Sämtliche Gesamtstaubgehalte liegen unter 0,5 mg/m³, der Emissionswert der TA Luft [6] wird jeweils zu weniger als 2,5 % ausgeschöpft. Die Emissionswerte für Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ befinden sich an beiden Anlagen ebenfalls auf sehr niedrigen, unter 0,2 mg/m³ bzw. unter den Nachweisgrenzen von 0,05 mg/m³ bzw. 0,01 mg/m³ gelegenen Niveaus. Die Emissionswerte der TA Luft [6] für Gesamtstaub und Feinstaub PM₁₀/PM₄ von 20 mg/m³ sowie für krebserzeugende Stoffe der Klasse III (hier: Quarzfeinstaub PM₄) von 1 mg/m³ werden sehr weit unterschritten.

An der Farbsandofenanlage ergeben sich für Schwefeldioxid und Stickstoffoxide Konzentrationswerte jeweils unter den Bestimmungsgrenze des Messverfahrens von 5 mg/m³, die deutlich unter den in der TA Luft [6] angegebenen Emissionswerten von mit 0,35 g/m³ liegen.

Tab. 51: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Sandrockner R und S an den Quarzsandwerken während der Erst- und Zweitmessung (Forts. nächste Seite).

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert	Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$		
Volumenstrom	m ³ /h	16.701	16.914	17.760	–	–
		16.670	16.804	17.644	–	–
		17.728	18.027	18.928	–	–
		18.850	19.642	20.624	–	–
Temperatur	°C	81,8	83,5	85,2	–	–
		81,2	84,0	85,9	–	–
		85,5	86,0	87,7	–	–
		82,0	86,5	88,2	–	–
O ₂	Vol.-%	19,5	19,7	20,7	–	–
		19,4	19,9	20,9	–	–
		17,7	19,7	20,7	–	–
		17,6	19,7	20,7	–	–
CO ₂	Vol.-%	1,3	1,4	1,5	–	–
		0,9	1,2	1,3	–	–
		1,8	2,6	2,7	–	–
		1,9	2,7	2,8	–	–
CO	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	–
		< 0,005	0,006	0,006	–	–
		0,144	0,183	0,192	–	–
		0,136	0,161	0,169	–	–
SO ₂	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1,2)}
		< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1,2)}
		0,006	0,009	0,009	–	0,35 ^{1,2)}
		< 0,005	0,008	0,008	–	0,35 ^{1,2)}
Σ NO, NO ₂	g/m ³	0,028	0,031	0,033	–	0,35 ^{1,3)}
		0,015	0,026	0,027	–	0,35 ^{1,3)}
		0,181	0,216	0,227	–	0,35 ^{1,3)}
		0,054	0,094	0,099	–	0,35 ^{1,3)}

Anlage R 10/2012	
Anlage R 03/2013	
Anlage S 12/2012	
Anlage S 04/2013	

Tab. 51 (Forts.): Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Sandtrockner R und S an den Quarzsandwerken während der Erst- und Zweitmessung.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert	Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{max}	$y_{max} + U_p$		
Gesamtstaub	mg/m ³	110 ¹⁾	135 ¹⁾	155 ¹⁾	–	20 ^{1,4)}
		4,3	7,5	8,6	–	20 ^{1,4)}
		49,6 ²⁾	113 ²⁾	130 ²⁾	–	20 ^{1,4)}
		1,1	1,4	1,7	–	20 ^{1,4)}
	kg/h	1,86 ²⁾	2,28 ²⁾	2,62 ²⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,070	0,123	0,141	–	0,20 ⁴⁾
		0,868 ²⁾	1,98 ²⁾	2,27 ²⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,021	0,026	0,030	–	0,20 ⁴⁾
Feinstaub PM ₁₀	mg/m ³	72,5 ¹⁾³⁾	108 ¹⁾³⁾	135 ¹⁾³⁾	–	20 ^{1,4)}
		0,63 ³⁾	0,69 ³⁾	0,86 ³⁾	–	20 ^{1,4)}
		5,2 ¹⁾³⁾	10,9 ¹⁾³⁾	13,7 ¹⁾³⁾	–	20 ^{1,4)}
		0,85 ³⁾	1,04 ³⁾	1,30 ³⁾	–	20 ^{1,4)}
	kg/h	1,22 ¹⁾³⁾	1,83 ¹⁾³⁾	2,28 ¹⁾³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,010 ³⁾	0,011 ³⁾	0,014 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,092 ¹⁾³⁾	0,190 ¹⁾³⁾	0,238 ¹⁾³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,016 ³⁾	0,020 ³⁾	0,026 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
Feinstaub PM ₄	mg/m ³	62,8 ¹⁾³⁾	97,2 ¹⁾³⁾	122 ¹⁾³⁾	–	20 ^{1,4)}
		0,49 ³⁾	0,55 ³⁾	0,69 ³⁾	–	20 ^{1,4)}
		2,8 ¹⁾³⁾	8,1 ¹⁾³⁾	10,1 ¹⁾³⁾	–	20 ^{1,4)}
		0,49 ³⁾	0,65 ³⁾	0,81 ³⁾	–	20 ^{1,4)}
	kg/h	1,06 ¹⁾³⁾	1,65 ¹⁾³⁾	2,06 ¹⁾³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,008 ³⁾	0,009 ³⁾	0,011 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,050 ¹⁾³⁾	0,140 ¹⁾³⁾	0,175 ¹⁾³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		0,009 ³⁾	0,013 ³⁾	0,016 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
Quarzfeinstaub PM ₄	mg/m ³	2,9 ¹⁾³⁾	4,9 ¹⁾³⁾	6,1 ¹⁾³⁾	–	1 ^{1,5)}
		0,02 ³⁾	0,02 ³⁾	0,03 ³⁾	–	1 ^{1,5)}
		0,07 ¹⁾³⁾	0,09 ¹⁾³⁾	0,11 ¹⁾³⁾	–	1 ^{1,5)}
		0,03 ³⁾	0,04 ³⁾	0,05 ³⁾	–	1 ^{1,5)}
	g/h	49,3 ¹⁾³⁾	82,9 ¹⁾³⁾	104 ¹⁾³⁾	–	2,5 ⁵⁾
		0,31 ³⁾	0,33 ³⁾	0,41 ³⁾	–	2,5 ⁵⁾
		1,2 ¹⁾³⁾	1,6 ¹⁾³⁾	2,0 ¹⁾³⁾	–	2,5 ⁵⁾
		0,6 ³⁾	0,7 ³⁾	0,9 ³⁾	–	2,5 ⁵⁾

Anlage R 10/2012	
Anlage R 03/2013	
Anlage S 12/2012	
Anlage S 04/2013	

¹⁾ Emissionswerte basieren auf Messungen außerhalb der Spezifikation des Messverfahrens (Gesamtstaub max. 50 mg/m³)
²⁾ Mittelwert über Probenahmedauer, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
³⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
⁴⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Schwefeloxide (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid), angegeben als Schwefeldioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
⁵⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
⁶⁾ Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub (Nr. 5.2.1 TA Luft [6])
⁷⁾ Krebs erzeugende Stoffe der Klasse III (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

Tab. 52: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Farb-sandofenanlage T und die Sandklassier- und -sicheranlage U an den Quarzsandwerken.

Parameter	Einheit	Messwert			Grenzwert	Emissionswert [6]
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$		
Volumenstrom	m ³ /h	26.533	28.097	29.502	–	–
		3.916	3.993	4.193	–	–
Temperatur	°C	75,4	101	103	–	–
		8,3	10,9	11,1	–	–
O ₂	Vol.-%	20,4	20,9	21,9	–	–
		–	–	–	–	–
CO ₂	Vol.-%	0,3	0,6	0,6	–	–
		–	–	–	–	–
CO	g/m ³	0,080	0,586	0,615	–	–
		–	–	–	–	–
SO ₂	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1, 2)}
		–	–	–	–	0,35 ^{1, 2)}
Σ NO, NO ₂	g/m ³	< 0,005	< 0,005	< 0,005	–	0,35 ^{1, 3)}
		–	–	–	–	0,35 ^{1, 3)}
Gesamtstaub	mg/m ³	< 0,3	0,3	0,4	–	20 ^{1, 4)}
		< 0,3	< 0,3	< 0,3	–	20 ^{1, 4)}
	kg/h	0,006	0,008	0,009	–	0,20 ³⁾
		0,001	0,001	0,001	–	0,20 ⁴⁾
Feinstaub PM ₁₀	mg/m ³	0,09 ³⁾	0,13 ³⁾	0,16 ³⁾	–	20 ^{1, 4)}
		< 0,04 ³⁾	< 0,04 ³⁾	< 0,05 ³⁾	–	20 ^{1, 4)}
	kg/h	0,002 ³⁾	0,003 ³⁾	0,004 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		< 0,001 ³⁾	< 0,001 ³⁾	< 0,001 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
Feinstaub PM ₄	mg/m ³	0,05 ³⁾	0,07 ³⁾	0,09 ³⁾	–	20 ^{1, 4)}
		< 0,02 ³⁾	< 0,02 ³⁾	< 0,03 ³⁾	–	20 ^{1, 4)}
	kg/h	0,001 ³⁾	0,002 ³⁾	0,003 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
		< 0,001 ³⁾	< 0,001 ³⁾	< 0,001 ³⁾	–	0,20 ⁴⁾
Quarzfeinstaub PM ₄	mg/m ³	< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	–	1 ^{1, 5)}
		< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	–	1 ^{1, 5)}
	g/h	< 0,1 ³⁾	0,1 ³⁾	0,1 ³⁾	–	2,5 ⁵⁾
		< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	< 0,01 ³⁾	–	2,5 ⁵⁾

Anlage T	
Anlage U	

- ¹⁾ Mittelwert über Probenahmedauer, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)
²⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Schwefeloxide (Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid), angegeben als Schwefeldioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
³⁾ Gasförmige anorganische Stoffe der Klasse IV, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid (Nr. 5.2.4 TA Luft [6])
⁴⁾ Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub (Nr. 5.2.1 TA Luft [6])
⁵⁾ Krebs erzeugende Stoffe der Klasse III (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

Bewertung

Die Regelbetriebsuntersuchungen an den Quarzsandwerken ergeben, dass die

- Quarzsandtrockner
 - bei der Erstmessung infolge Mängeln an den Abgasreinigungseinrichtungen zu hohe Gesamtstaub-, Feinstaub(PM₁₀/PM₄)- und Quarzfeinstaub(PM₄)-Emissionen aufweisen,
 - bei der Zweitmessung mit vorschriftsgemäß gewarteten Abgasreinigungseinrichtungen sämtliche der zuvor genannten Parameter, inkl. der gasförmigen Schadstoffe Schwefeldioxid und Stickstoffoxide, die Emissionswerte der TA Luft [6] sicher einhalten,
- Farbsandofenanlage und Sandklassier- und -sichteranlage
 - infolge effektiver Abscheidung der freigesetzten Stäube in den vorhandenen Abgasreinigungseinrichtungen niedrige Emissionswerte für Stäube, einschließlich Quarzfeinstaub PM₄ vorliegen.

Aufgrund der abrasiven Eigenschaften der Stäube in der quarzsandverarbeitenden Industrie unterliegen die Abgasreinigungseinrichtungen einem erhöhten Verschleiß, der einer regelmäßigen Kontrolle und Wartung der Anlagen durch den Anlagenbetreiber und/oder beauftragte Dritte bedarf. Zusätzlich kann eine qualitative Staubmesseinrichtung zur Filterfunktionsüberwachung oder Staubkonzentrationsmessung – an keiner der gemessenen Anlagen installiert – frühzeitig Hinweise auf eine Verschlechterung der Abscheideleistung bzw. Störung der Abgasreinigungseinrichtung liefern, wodurch erhöhte Schadstoffemissionen künftig vermieden werden könnten.

Bei ordnungsgemäßer Funktion und Betriebsweise der Abgasreinigungseinrichtungen sind von den o. g. geführten Emissionsquellen der Anlagen im Bereich der Quarzsandwerke keine umwelt- und gesundheitsrelevante Emissionen und Gefahren für die Nachbarschaft zu erwarten.

3.13 Kieswerk

Im Kieswerk wird ein kies-, sand- und lehmhaltiges Rohstoffgemisch mit quarzhaltigen Gesteinen, das im Tagebau per Trockenverfahren aus einer angrenzenden Grube gewonnen wird, in einer Vorsortier- und Waschanlage von Störstoffen und Verunreinigungen befreit und daraus in einer Kiesklassier- und -brechanlage durch Sieben und/oder Brechen Mineralstoffprodukte unterschiedlicher Art und Spezifikation (Grubenkies, Rundkies, Splitt, Natursand, Brechsand, Füller etc. in unterschiedlichen Korngrößenklassen) erzeugt. Die Produkte kommen als Bodenersatzmaterial im Erd- und Straßenbau oder als Zuschlagstoff bei der Produktion von Beton, Asphalt und anderen Bau-/Werkstoffen zum Einsatz.

Am Kieswerk wurde die eingehauste trockene Kiesklassier- und -brechanlage untersucht, deren Siebmaschinen, Brecher, Becherwerke und Förderbänder mit Einrichtungen zur Erfassung sowie einem Gewebefilter zur Minderung der Staubemissionen ausgerüstet sind. Ziel war es, im regulären Anlagenbetrieb Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlage in Bezug auf Quarzfeinstaub PM_4 zu gewinnen. Quarzfeinstaub PM_4 ist kanzerogen [24] und gemäß Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6] den krebs-erzeugenden Stoffen der Klasse III zugeordnet. Diese sind mit Emissionsgrenzwerten von 1 mg/m^3 bzw. $2,5 \text{ g/h}$ belegt. Daneben wurden die Gesamt- und Feinstaubemissionen PM_{10}/PM_4 zu Erkenntnis- und Vergleichszwecken (Anteile der verschiedenen Staubfraktionen am Gesamtstaub, Plausibilitätsprüfung) ermittelt. In Abb. 13 sind das Grundfließbild und in Tab. 53 die wesentlichen Kenndaten der untersuchten Kiesklassier- und -brechanlage dargestellt.

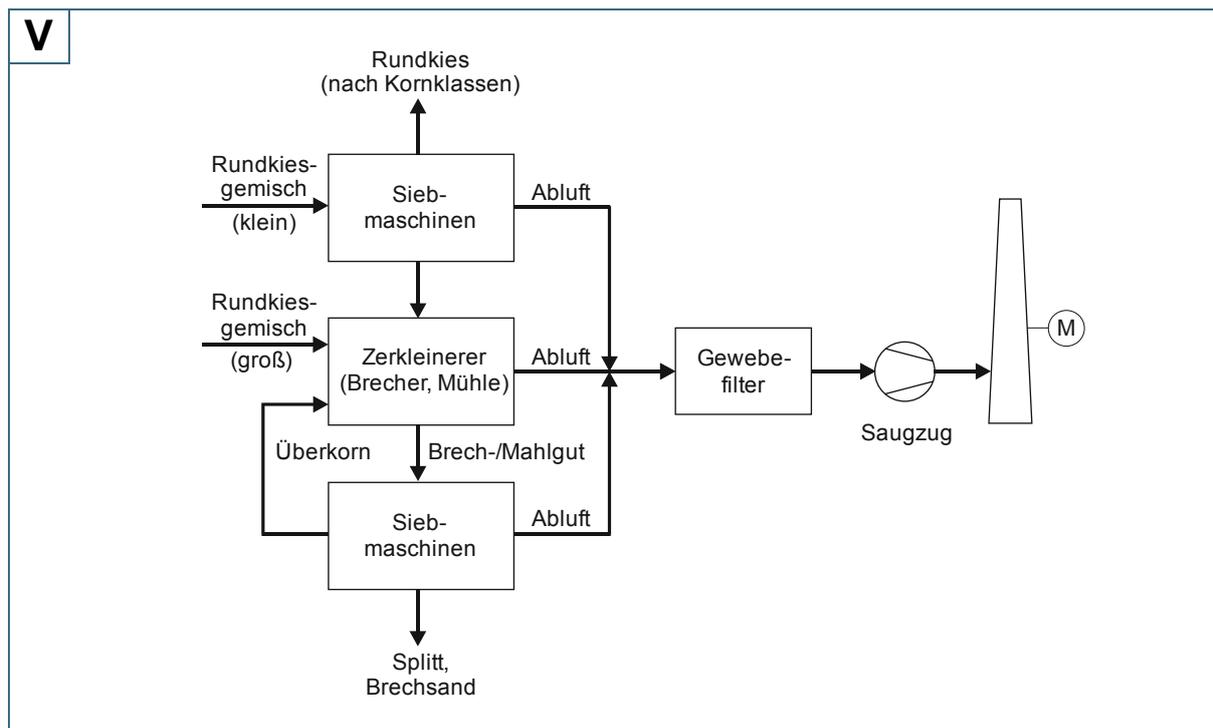


Abb. 13: Grundfließbild der Kiesklassier- und -brechanlage V mit Abgasmessstelle M.

Der Abbau des Rohstoffs in der Grube erfolgt mit Baggern und Radladern, die Transporte in der Grube per Lkw und aus der Grube zur Vorsortier- und Waschanlage mit Förderbändern. Mit Hilfe der Vorsortier- und Waschanlage wird der Kies von anhaftenden Stör- und Fremdstoffen (z. B. Wurzeln, Sand, Lehm) gereinigt und über Siebmaschinen durch Nassklassierung in mehrere Korngrößenfraktionen getrennt. Anschließend werden die Fraktionen auf der Rohkieshalde in Haufen oder in Silos für die direkte Verwendung oder Weiterverarbeitung in der Kiesklassier- und -brechanlage zwischengelagert.

Tab. 53: Übersicht über wesentliche Kenndaten des Kiesklassier- und -brechanlage V.

Auslegungsdaten	Anlage V
Bauart	Eingehaustes Betriebsgebäude mit Aufbereitungsaggregaten
Betriebsweise	Kontinuierlich
Einsatzstoffe	Quarzgesteinhaltiger Kies, gereinigt
Produkte	Rundkies, Kiesbruch, Splitt, Brechsand, Gesteinsmehl (Füller)
Durchsatzleistung max.	Rundkiesanlage: Ca. 450 Mg/h bzw. 4.600 Mg/d Kiesklassier-/brechanlage: Ca. 17 Mg/h bzw. 120 Mg/d
Anzahl und Art der Zerkleinerungsaggregate	1 × Vertikalprallbrecher 1 × Rotorschleuderbrecher 1 × Prallmühle
Anzahl und Art der Klassiereinrichtungen	6 × Siebmaschine
Anzahl und Art der Fördereinrichtungen	Diverse Becherwerke, Förderbänder, Rutschen
Abgasvolumenstrom	Ca. 22.000 m ³ /h
Abgasreinigungseinrichtung	Gewebefilter (Rundschlauch- /Reihenfilter)
Abgasreinigungsrückstand	Gewebefilterstaub

Ein Radlader transportiert die für die Produktion von Splitt und Brechsand benötigten Rohkiese von den Halden zur Kiesklassier- und -brechanlage und beschickt dort einen Aufgabetrichter. Über Förderbänder gelangt der Kies vom Aufgabetrichter bzw. über Rutschen von den Silos zu einem der drei an der Anlage vorhandenen Zerkleinerungsaggregaten (zwei Brecher, eine Prallmühle). In Abhängigkeit von der Kieselgröße und dem benötigtem Endprodukt kommen der Brecher und/oder die Prallmühlen zum Einsatz. Der gebrochene bzw. gemahlene Kies wird über Becherwerke und/oder Förderbänder mehreren Siebmaschinen zugeführt und dort in Fraktionen unterschiedlicher Kornklassen aufgetrennt. Die Produkte (Splitt, Brechsand) werden in Lagerboxen verfrachtet, das Überkorn ggf. erneut den Brech- und Mahlaggregaten zur Zerkleinerung zugeführt.

Die im Gebäude befindlichen Förder-, Sieb- und Zerkleinerungsaggregate stellen eine Vielzahl von Quellen für lokale und/oder diffuse Staubemissionen dar. Diese werden über ein Rohrleitungsnetz abgesaugt und anschließend dem Gewebefilter zur Minderung zugeführt. Für den nötigen Unterdruck zur Absaugung, zur Filtration bzw. Überdruck zur Abführung der im Filter gereinigten Abgase über den Kamin ins Freie sorgt der Saugzug. Der an den Schläuchen abgeschiedene Staub wird periodisch mit Hilfe von Druckluftimpulsen abgelöst, in den Auffangtrichtern unterhalb der Filterkammern gesammelt und über ein Fallrohr dem Produkt Brechsand zugeschlagen.

Die Tab. 54, S. 101, gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Staub- und Quarzfeinstaubuntersuchungen, die bei zwei Messkampagnen im Mai und September 2012 im Regelbetrieb der Kiesklassier- und -brechanlage unter Volllast ermittelt wurden.

Tab. 54: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Kiesklassier- und -brechanlage V am Kieswerk während der Erst- und Zweitmessung.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage V	
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert	Emissionswert [6]
Volumenstrom	m ³ /h	–	21.228	22.289	–	–
		21.404	23.141	24.298	–	–
Temperatur	°C	–	23,0	23,5	–	–
		21,9	26,0	26,5	–	–
Gesamtstaub	mg/m ³	470 ¹⁾ ^{**)}	486 ¹⁾ ^{**)}	559 ¹⁾ ^{**)}	20 ¹⁾	20 ^{1, 2)}
		< 0,3	0,4	0,5	20 ¹⁾	20 ^{1, 2)}
	kg/h	10,0 ¹⁾ ^{**)}	10,3 ¹⁾ ^{**)}	11,9 ¹⁾ ^{**)}	–	0,20 ²⁾
		< 0,007	0,008	0,010	–	0,20 ²⁾
Feinstaub PM ₁₀	mg/m ³	148 ¹⁾ ^{**)}	171 ¹⁾ ^{**)}	214 ¹⁾ ^{**)}	–	20 ^{1, 2)}
		< 0,06 ^{**)}	< 0,06 ^{**)}	< 0,08 ^{**)}	–	20 ^{1, 2)}
	kg/h	3,1 ¹⁾ ^{**)}	3,4 ¹⁾ ^{**)}	4,3 ¹⁾ ^{**)}	–	0,20 ²⁾
		< 0,001 ^{**)}	< 0,001 ^{**)}	< 0,002 ^{**)}	–	0,20 ²⁾
Feinstaub PM ₄	mg/m ³	95,1 ¹⁾ ^{**)}	120 ¹⁾ ^{**)}	150 ¹⁾ ^{**)}	–	20 ^{1, 2)}
		< 0,04 ^{**)}	< 0,04 ^{**)}	< 0,05 ^{**)}	–	20 ^{1, 2)}
	kg/h	2,0 ¹⁾ ^{**)}	2,5 ¹⁾ ^{**)}	3,2 ¹⁾ ^{**)}	–	0,20 ²⁾
		< 0,001	< 0,001	< 0,002	–	0,20 ²⁾
Quarzfeinstaub PM ₄	mg/m ³	18,8 ¹⁾ ^{**)}	51,3 ¹⁾ ^{**)}	64,1 ¹⁾ ^{**)}	–	1 ^{1, 3)}
		< 0,04 ^{**)}	< 0,04 ^{**)}	< 0,05 ^{**)}	–	1 ^{1, 3)}
	g/h	398 ¹⁾ ^{**)}	1089 ¹⁾ ^{**)}	1361 ¹⁾ ^{**)}	–	2,5 ³⁾
		< 1,0 ^{**)}	< 1,0 ^{**)}	< 1,3 ^{**)}	–	2,5 ³⁾

05/2012	
09/2012	

¹⁾ Emissionswerte basieren auf Messungen außerhalb der Spezifikation des Messverfahrens (Gesamtstaub max. 50 mg/m³)

^{**)} Mittelwert über Probenahmedauer, bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

¹⁾ Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

²⁾ Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub (Nr. 5.2.1 TA Luft [6])

³⁾ Krebs erzeugende Stoffe der Klasse III (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

Regelbetrieb Mai 2012

Die Maximalkonzentrationen für Gesamtstaub von 559 mg/m³, Feinstaub PM₁₀ von 214 mg/m³, Feinstaub PM₄ von 150 mg/m³ und Quarzfeinstaub PM₄ von 64,1 mg/m³ stellen gegenüber dem Grenzwert von 20 mg/m³ (Gesamtstaub) sowie den Emissionswerten der TA Luft [6] von 20 mg/m³ (Feinstaub PM₁₀/PM₄) bzw. von 1 mg/m³ (Quarzfeinstaub PM₄) eine massive Grenzwertüberschreitung dar. Entsprechende Aussagen gelten auch für die Emissionsmassenströme. Als Ursache für die zu hohen Staubemissionen wurden vom Betreiber defekte Stützkörbe und verschlissene Gewebefilterschläuche festgestellt. Nach dem Tausch bzw. der Reparatur der defekten Komponenten sowie der Inbetriebnahmephase (Einfahren) wurde im September 2012 die Untersuchung wiederholt.

Regelbetrieb September 2012

Sämtliche Gesamtstaubgehalte liegen unter 0,5 mg/m³, der Grenzwert wird zu weniger als 2,5 % ausgeschöpft. Die Emissionswerte für Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ befinden sich unter den Nachweisgrenzen von maximal 0,06 mg/m³ und damit auf sehr niedrig gelegenen Niveaus. Der Grenzwert für Gesamtstaub von 20 mg/m³ wird deutlich unterschritten, der Emissionswert der TA Luft [6] für krebserzeugende Stoffe der Klasse III von 1 mg/m³ wird ebenfalls deutlich unterschritten.

Bewertung

Die Regelbetriebsuntersuchungen an der Kiesklassier- und -brechanlage ergeben, dass die

- Anlage bei der Erstmessung nicht den genehmigten und immissionsschutzrechtlichen Anforderungen entsprach,
- Emissionen bei ordnungsgemäßigem Wartungszustand und Betrieb des Staubabscheiders an
 - Gesamtstaub den im Genehmigungsbescheid vorgegebenen Grenzwert deutlich unterschreitet,
 - Feinstaub PM_{10}/PM_4 sehr gering sind und den Emissionswert der TA Luft [6] von 20 mg/m^3 zu maximal 0,25 % ausschöpfen,
 - Quarzfeinstaub PM_4 den Emissionswert der TA Luft [6] für krebserzeugende Stoffe der Klasse III von 1 mg/m^3 um mehr als den Faktor 20 unterschreitet.

Von der Anlage gehen bei ordnungsgemäßer Funktion und Betrieb der Abgasreinigungseinrichtung, für die der Anlagenbetreiber verantwortlich ist, über die vorgenannte Emissionsquelle keine umwelt- und gesundheitsrelevante Emissionen und Gefahren aus.

Aufgrund der abrasiven Eigenschaften der Stäube, insbesondere bei quarzhaltigem Gestein, unterliegen die Abgasreinigungseinrichtungen generell einem erhöhten Verschleiß, der einer regelmäßigen Kontrolle und Wartung der Anlagen durch den Anlagenbetreiber und/oder beauftragte Dritte bedarf. Zusätzlich können eine qualitative Staubmesseinrichtung zur Filterfunktionsüberwachung oder eine kontinuierliche Staubkonzentrationsmessung frühzeitig Hinweise auf eine Verschlechterung der Abscheideleistung bzw. Störung der Abgasreinigungseinrichtung liefern, wodurch erhöhte Schadstoffemissionen künftig vermieden werden könnten.

3.14 Granitwerk

Im Granitwerk werden aus einem granithaltigen Mineralgestein, das im Tagebau in einem angrenzenden Steinbruch gewonnen wird, in einer Klassier- und Brechanlage durch Sieben und/oder Brechen Mineralstoffprodukte mit unterschiedlichen Spezifikationen (Gesteinskörnungen und -mehle in bestimmten Kornklassen) erzeugt. Die Produkte kommen in der Baustoffindustrie als Baumaterial im Bahn-, Straßen- und Wasserwegebau oder als Zuschlagsstoffe in der Asphalt-, Beton- und Ziegelindustrie zum Einsatz.

Am Granitwerk wurden die Emissionen der Granitklassier- und -brechanlage untersucht, deren Siebmaschinen, Brecher und Förderaggregate mit Einrichtungen zur Erfassung sowie einem Gewebefilter zur Minderung der Staubemissionen ausgerüstet sind. Ziel war es, im regulären Anlagenbetrieb Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Anlage in Bezug auf Quarzfeinstaub PM_4 zu erhalten. Quarzfeinstaub PM_4 ist kanzerogen [24] und gemäß Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6] den krebserzeugenden Stoffen der Klasse III zuzuordnen, die mit Emissionsgrenzwerten von 1 mg/m^3 bzw. $2,5 \text{ g/h}$ belegt sind. Neben den Emissionen an Quarzfeinstaub PM_4 wurden die Gesamt- und Feinstaubemissionen PM_{10}/PM_4 zu Vergleichs- und Prüfzwecken (Plausibilität) ermittelt. Die Abb. 14 zeigt das Grundfließbild und die Tab. 55 gibt einen Überblick über die wesentlichen Kenndaten der Granitklassier- und -brechanlage.

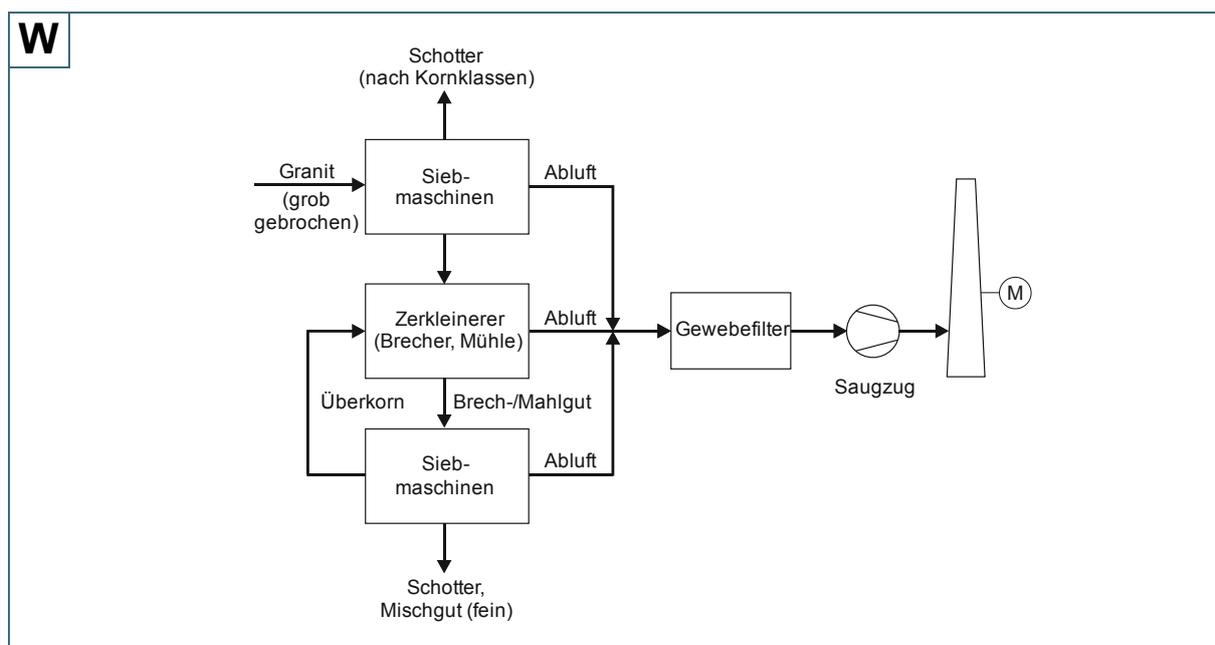


Abb. 14: Grundfließbild der Granitklassier- und -brechanlage W mit Abgasmessstelle M.

Das Granitgestein wird im Steinbruch aus dem Fels gesprengt, mit Baggern und Radladern auf Muldenkipper verladen und am sog. „Sturzbunker“ abgekippt. Nach der Grobzerkleinerung mit einem Kegelsplittbrecher gelangt er über Förderbänder in ein Silo, das als Materialpuffer dient, und nachfolgend zur eingehausten Granitklassier- und -brechanlage. In der Granitklassier- und -brechanlage wird das grob gebrochene Material zunächst klassiert, die Siebfraktionen zur weiteren Zerkleinerung Kegelsplittbrechern und das gebrochene Material diversen Siebmaschinen zur Trennung in verschiedene Korngrößenfraktionen aufgegeben. Die Produkte (Schotter, Edelsplitt) werden im Gebäude der Granitklassier- und -brechanlage in Silos bzw. auf dem Anlagengelände zu Haufwerken aufgeschüttet für die weitere Verarbeitung bzw. die Verladung auf Lkw vorgehalten. Das Überkorn wird erneut den Brechern zur Zerkleinerung zurückgeführt. Etwa 20 % des in die Aufbereitungsanlage gelangenden Materials fallen als Nebenprodukt (Gesteinsmehl mit einer Körngröße kleiner 2 mm) an.

Tab. 55: Übersicht über wesentliche Kenndaten des Granitbrech- und -klassieranlage W.

Auslegungsdaten	Anlage W
Bauart	Eingehautes Betriebsgebäude mit Aggregaten
Betriebsweise	Kontinuierlich
Einsatzstoffe	Granit, Granodiorit und Diorit (Quarzgehalt ca. 26 Mass.-%)
Produkte	Schotter, Edelsplitt, Gesteinsmehl (Füller)
Durchsatzleistung max.	Granitklassier-/brechanlage: Ca. 240 Mg/h bzw. 3.300 Mg/d
Anzahl und Art der Zerkleinerungsaggregate	5 × Kegelmühle
Anzahl und Art der Klassiereinrichtungen	4 × Siebmaschine
Anzahl und Art der Fördereinrichtungen	Diverse Becherwerke und Förderbänder
Abgasvolumenstrom	Ca. 11.000 m ³ /h
Abgasreinigungseinrichtung	Gewebefilter (Schlauchfilter)
Abgasreinigungsrückstand	Gewebefilterstaub

Die im Betriebsgebäude befindlichen Förder-, Sieb- und Zerkleinerungsaggregate stellen eine Vielzahl von Quellen für lokale und/oder diffuse Staubemissionen dar. Diese werden erfasst und anschließend einem Gewebefilter zur Staubabscheidung zugeführt. Einige Siebmaschinen sind mit Einrichtungen zur Befeuchtung des Klassierguts ausgestattet. Über den Saugzug und einen Schalldämpfer gelangt die gereinigte Abluft ins Freie. Der im Gewebefilter auf den Filterschläuchen als Filterkuchen abgeschiedene Staub wird periodisch mit Hilfe von Druckluft von den Schläuchen gelöst und unter der Filterkammer aufgefangen. Über eine Transportschnecke wird er als Nebenprodukt dem Gesteinsmehl zugeschlagen.

Die Tab. 56, S. 105, gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Staub- und Quarzfeinstaubuntersuchungen, die bei drei Messkampagnen im Oktober und November 2012 sowie im Mai 2013 im Regelbetrieb der Granitklassier- und -brechanlage unter Volllast ermittelt wurden.

Regelbetrieb Oktober und November 2012

Mit Maximalkonzentrationen für Gesamtstaub von 76,9 mg/m³ bzw. 69,3 mg/m³, Feinstaub PM₁₀ von 86,6 mg/m³ bzw. 40,6 mg/m³, Feinstaub PM₄ von 75,9 mg/m³ bzw. 37,5 mg/m³ und Quarzfeinstaub PM₄ von 5,4 mg/m³ bzw. 4,6 mg/m³ zeigen sich bei beiden Untersuchungen im Vergleich zu Emissionswerten der TA Luft [6] von 20 mg/m³ (Gesamtstaub, Feinstaub PM₁₀/PM₄) bzw. von 1 mg/m³ (Quarzfeinstaub PM₄) deutlich höhere Gehalte. Entsprechendes gilt für die Emissionsmassenströme. Als Ursache für die jeweils zu hohen Messwerte wurden vom Hersteller des Staubabscheiders verschiedene Mängel am Staubabscheider (schadhafte Dichtungen, roh-/reingasseitiger Kurzschlüsse, gerissene Förderschnecke etc.) infolge unsachgemäßer Montage oder falscher Auslegung ermittelt. Nach kompletter Zerlegung, Reparatur, Zusammenbau, Prüfung und Neujustierung der Filteranlage durch den Hersteller erfolgte im Mai 2013 die Untersuchung der Abgasreinigungseinrichtung im funktionstüchtigen Zustand.

Regelbetrieb Mai 2013

Alle Gesamtstaubgehalte liegen unter 5 mg/m³, der Emissionswert der TA Luft [6] von 20 mg/m³ wird eingehalten. Die Emissionswerte für Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ befinden sich ebenfalls auf einem niedrigen, unter 1 mg/m³ gelegenen Konzentrationsniveau. Die Emissionswerte der TA Luft [6] für krebserzeugende Stoffe der Klasse III von 1 mg/m³ bzw. 2,5 g/h werden mit Maximalkonzentrationen von 0,01 mg/m³ bzw. 0,3 g/h deutlich – um den Faktor 100 bzw. 10 – unterschritten.

Tab. 56: Mittel- und Maximalwerte der Abgasrandparameter und -konzentrationen im Reingas für die Granitklassier- und -brechanlage W am Granitwerk während der Erst-, Zweit- und Drittmessung.

Parameter	Einheit	Messwert			Anlage W	
		\bar{y}	y_{\max}	$y_{\max} + U_p$	Grenzwert	Emissionswert [6]
Volumenstrom	m ³ /h	11.684	12.106	12.711	–	–
		10.396	11.220	11.781	–	–
		15.501	15.665	16.448	–	–
Temperatur	°C	6,6	8,0	8,2	–	–
		8,8	10,0	10,2	–	–
		17,4	18,6	19,0	–	–
Gesamtstaub	mg/m ³	62,5 ^{*)}	66,9 ^{*)}	76,9 ^{*)}	–	20 ^{1,2)}
		36,4 ^{*)}	60,3 ^{*)}	69,3 ^{*)}	–	20 ^{1,2)}
		1,3	4,0	4,6	–	20 ^{1,2)}
	kg/h	0,730 ^{*)}	0,799 ^{*)}	0,919 ^{*)}	–	0,20 ²⁾
		0,379 ^{*)}	0,676 ^{*)}	0,777 ^{*)}	–	0,20 ²⁾
		0,020	0,061	0,070	–	0,20 ²⁾
Feinstaub PM ₁₀	mg/m ³	55,0 ^{*)**)}	68,8 ^{*)**)}	86,6 ^{*)**)}	–	20 ^{1,2)}
		23,1 ^{*)**)}	32,5 ^{*)**)}	40,6 ^{*)**)}	–	20 ^{1,2)}
		0,37	0,60	0,75	–	20 ^{1,2)}
	kg/h	0,639 ^{*)**)}	0,775 ^{*)**)}	0,969 ^{*)**)}	–	0,20 ²⁾
		0,232 ^{*)**)}	0,364 ^{*)**)}	0,455 ^{*)**)}	–	0,20 ²⁾
		0,006	0,009	0,012	–	0,20 ²⁾
Feinstaub PM ₄	mg/m ³	48,5 ^{*)**)}	60,7 ^{*)**)}	75,9 ^{*)**)}	–	20 ^{1,2)}
		20,6 ^{*)**)}	30,0 ^{*)**)}	37,5 ^{*)**)}	–	20 ^{1,2)}
		0,17	0,21	0,26	–	20 ^{1,2)}
	kg/h	0,563 ^{*)**)}	0,684 ^{*)**)}	0,855 ^{*)**)}	–	0,20 ²⁾
		0,206 ^{*)**)}	0,318 ^{*)**)}	0,398 ^{*)**)}	–	0,20 ²⁾
		0,003	0,003	0,004	–	0,20 ²⁾
Quarzfeinstaub PM ₄	mg/m ³	3,5 ^{*)**)}	4,3 ^{*)**)}	5,4 ^{*)**)}	–	1 ^{1,3)}
		1,7 ^{*)**)}	3,7 ^{*)**)}	4,6 ^{*)**)}	–	1 ^{1,3)}
		0,01	0,01	0,01	–	1 ^{1,3)}
	g/h	41,1 ^{*)**)}	48,4 ^{*)**)}	60,5 ^{*)**)}	–	2,5 ³⁾
		17,2 ^{*)**)}	41,6 ^{*)**)}	52,0 ^{*)**)}	–	2,5 ³⁾
		0,1	0,2	0,3	–	2,5 ³⁾

10/2012	
11/2012	
05/2013	

*) Emissionswerte basieren auf Messungen außerhalb der Spezifikation des Messverfahrens (Gesamtstaub max. 50 mg/m³)

**) Mittelwert über Probenahmedauer (3 h), bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

1) Halbstundenmittelwert, bezogen auf trockenes Abgasvolumen im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa)

2) Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub (Nr. 5.2.1 TA Luft [6])

3) Krebs erzeugende Stoffe der Klasse III (Nr. 5.2.7.1.1 TA Luft [6])

Bewertung

Die Regelbetriebsuntersuchungen der Granitklassier- und -brechanlage ergeben, dass die Anlage bei

- der Erst- und Zweitmessung diverse Mängel infolge unsachgerechter Installation der Abgasreinigungseinrichtung aufwies, woraus zu hohe Gesamtstaub-, Feinstaub(PM₁₀/PM₄)- und Quarzfeinstaub(PM₄)-Emissionen resultierten,
- ordnungsgemäßer Funktion und Betrieb nach Sanierung der Abgasreinigungseinrichtung für Gesamtstaub, Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ niedrige Konzentrationen unter den in der TA Luft [6] angegebenen Emissionswerten aufweist.

Von der hier untersuchten, geführten Emissionsquelle der Anlage sind bei ordnungsgemäßigem Zustand und Betrieb der Abgasreinigungseinrichtung, die in der Verantwortung des Betreibers liegen, keine umwelt- und gesundheitsrelevante Emissionen und Gefahren für die Nachbarschaft zu erwarten.

Aufgrund der abrasiven Eigenschaften der Stäube, insbesondere bei quarzhaltigem Gestein, unterliegen die Abgasreinigungseinrichtungen generell einem erhöhten Verschleiß, der einer regelmäßigen Kontrolle und Wartung der Anlagen durch den Anlagenbetreiber und/oder beauftragte Dritte bedarf. Zusätzlich können eine qualitative Staubmesseinrichtung zur Filterfunktionsüberwachung oder eine kontinuierliche Staubkonzentrationsmessung frühzeitig Hinweise auf eine Verschlechterung der Abscheideleistung bzw. Störung der Abgasreinigungseinrichtung liefern, wodurch erhöhte Schadstoffemissionen künftig vermieden werden könnten.

4 Zusammenfassung

Das vom Bayerischen Umweltministerium geförderte Forschungsvorhaben „Abgasemissionen umwelt-relevanter Anlagen“ hatte zum Ziel, an ausgewählten Anlagen die Emissionen bei unterschiedlichen Betriebszuständen (Anfahr-, Regel- und/oder Versuchsbetrieb) zu erfassen, zu bewerten und gegebenenfalls zu verringern.

Im Berichtszeitraum vom 01.01.2009 bis 31.03.2014 fanden bei 19 Betreibern, die in den Wirtschaftszweigen Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren, Energieversorgung bzw. Abfallentsorgung tätig sind, an insgesamt 23 Einzel-/Teilanlagen mehrtägige bzw. -wöchige Untersuchungen statt:

• drei Biomasseheiz(kraft)werke	3 × Anfahr- und 3 × Regelbetrieb
• eine Bioabfallvergärung	1 × Versuchsbetrieb
• eine Holzvergasung	2 × Regelbetrieb
• zwei Klärschlammverbrennungen	3 × Anfahr- und 2 × Regelbetrieb
• eine Blähglasherstellung	3 × Regelbetrieb und 1 × Versuchsbetrieb
• zwei Schuhproduktionen	2 × Regelbetrieb
• eine Elektrodenherstellung	1 × Versuchs- und 2 × Regelbetrieb
• ein Zementwerk	1 × Versuchs- und 2 × Regelbetrieb
• eine Eisengießerei	1 × Versuchs- und 2 × Regelbetrieb
• eine Kaffeerösterei	2 × Regelbetrieb
• eine Räucherei	2 × Regelbetrieb
• zwei Quarzsandwerke	6 × Regelbetrieb
• ein Kieswerk	2 × Regelbetrieb
• ein Granitwerk	3 × Regelbetrieb

Kennzeichnend für die meisten Anlagen war eine thermische Prozessstufe mit unterschiedlichen Brenn-/Einsatzstoffen (Abfälle, Erd-/Bio-/Holzgas, Heizöl, Holz, Kohle, Koks etc.), von der über den Gaspfad potenziell Beeinträchtigungen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit ausgehen können. Die Abgasemissionen stammen aus verschiedenen Prozessen; hierbei sind vor allem die eigentliche Verbrennung (Oxidation) des Brennstoffs mit Luftsauerstoff, welche – zum Teil prozesstechnisch bedingt – nicht immer optimal bzw. vollständig abläuft, sowie die entlang des Abgaswegs ablaufenden Reaktionen und Mobilisierungen zu nennen. An den nichtthermischen Anlagen stellten mechanische Prozessstufen die Quelle für Abgasemissionen mit staubförmigen bzw. staubgebundenen (Schad-)Stoffen dar.

Die Messumfänge für die Abgasemissionen orientierten sich an den in den Genehmigungsbescheiden genannten Grenzwerten bzw. in der TA Luft [6] aufgeführten Emissionsgrenzwerten. In das Untersuchungsprogramm wurden weitere (i) Probenahmestellen (z. B. Roh-, Zwischengas, Einsatz- und Reststoffe) sowie (ii) Stoffe und Parameter mit hoher Umwelt-/Gesundheitsrelevanz (z. B. kanzerogene bzw. persistente organische Schadstoffe, wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle, polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/-furane) aufgenommen. Diese Zusatzinformationen liefern weitere Details über das System- und Schadstoffverhalten und tragen zu einem besseren Prozessverständnis bei. Für die einzelnen Anlagentypen lassen sich basierend auf den Untersuchungsergebnissen folgende Aussagen treffen:

Biomasseheiz(kraft)werke

Diese dienen der Wärmeerzeugung bzw. Stromversorgung öffentlicher und/oder privater Einrichtungen. Als Brennstoffe kommen naturbelassene bzw. Althölzer zum Einsatz.

Entsprechend dem Schadstoffgehalt der Einsatzstoffe sind die Abgasreinigungssysteme konzipiert. Im einfachsten Fall (Verbrennung naturbelassener Hölzer) ist eine Entstaubungseinrichtung, im komplexesten Fall (Mitverbrennung von Althölzern der Kategorie IV) ein mehrstufiges Abgasreinigungssystem (Staubabscheider, Absorber/Adsorber, Entstickungsanlage) installiert.

Die Anlagen werden mindestens zweimal pro Jahr ab- und nach zwei bis vier Wochen Revisionsdauer wieder angefahren. Das Aufheizen erfolgt bei Anlagen, die ausschließlich naturbelassene bzw. Althölzer niedriger Schadstoffkategorie einsetzen, mit dem Brennstoff Holz. Bei Anlagen, in denen Althölzer höherer Schadstoffkategorie verbrannt werden, wird der Feuerraum mit Heizöl EL bzw. Erdgas auf die Mindestfeuerraumtemperatur aufgeheizt, die Abgasreinigungseinrichtungen sukzessive in Betrieb genommen und unmittelbar danach mit der Holzaufgabe begonnen. Mit dem Erreichen (quasi-)stationärer Betriebszustände sind die Anfahrvorgänge abgeschlossen und die Anlagen befinden sich im Regelbetrieb.

Die Ergebnisse zeigen bei den Anfahrvorgängen im Vergleich zum Regelbetrieb insbesondere bei Kohlenstoffmonoxid, Gesamtstaub und organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), polychlorierten Biphenylen (Indikator-, dl-PCB) sowie polychlorierten Dibenzop-dioxinen/-furanen (PCDD/F) teilweise höhere Emissionen. Ursachen dafür sind unvollständige Verbrennungszustände der Brennstoff/Luft-Gemische in den Feuerräumen, die Bildung von „kaltem“ Kohlenstoffmonoxid, mit „Organik“ belasteter Primärluft aus dem Müllbunker (betrifft eine Anlage) und Korrosion bzw. Staubablagerungen an bzw. in den Abgaskanälen bzw. Abgasreinigungsaggregaten.

Im Regelbetrieb halten die Anlagen die dafür geltenden Grenzwerte bei Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff), Gesamtstaub, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Quecksilber, Schwefeldioxid und -trioxid, PCDD/F und Benzo(a)pyren sowie die Summen „Cadmium, Thallium“ und „Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Cobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn“ stets ein. Bei betriebstechnischen Störungen kam es im Regelbetrieb an einer Anlage zu Grenzwertüberschreitungen bei Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenstoff (Ursache: Ausfall der Dampfmengenmessung). Nach Behebung der Störung traten keine Grenzwertüberschreitungen mehr auf. Die Emissionen der kanzerogenen bzw. schwer abbaubaren PAK bzw. PCB und PCDD/F sind im Regelbetrieb stets als sehr gering einzustufen.

Bioabfallvergärung

Zur Stromerzeugung sind Biogasanlagen mit Generatoren ausgestattet, die von Motoren nach dem Otto- (Gasmotor) bzw. Diesel-Prinzip (Zündstrahlmotor) angetrieben werden. Die motorische Verbrennung von Biogas hat aufgrund von Brennstoffschlupf (Ventilüberschneidung) und Teiloxidation (Toträume, Ablagerungen etc.) stets Methan- und Formaldehydemissionen zur Folge.

Die mit einem Gas-Otto-Motor ausgestattete Anlage konnte den Formaldehyd-Grenzwert von 60 mg/m^3 trotz Ausschöpfung aller primärseitigen Maßnahmen (Motorwartung, optimierte Motoreinstellung wie Zündzeitpunkt, λ -Wert) nicht einhalten. Anhand der zur Reinigung des Motorabgases installierten thermischen regenerativen Nachverbrennungsanlage (RNV) sollte die Wirksamkeit und Effizienz dieser Minderungstechnik überprüft werden.

Die Abgasemissionen der Verbrennungsmotorenanlage sind nach der RNV im Vergleich zum Betrieb ohne RNV bei Kohlenstoffmonoxid um etwa den Faktor 10 und bei Gesamt-, Methankohlenstoff, Formaldehyd (unter 3 mg/m^3) um etwa den Faktor 100 geringer, bei Schwefeldioxid/-trioxid und Stickstoffmon-/dioxid hingegen in etwa gleich. Für alle o. g. Stoffe ist nach der RNV die Einhaltung der Grenzwerte gesichert. Daneben führt die Verminderung des Methanschlupfes unter Berücksichtigung der zusätzlichen CO_2 -Fracht durch die Methanoxidation zu einer Einsparung von ca. 50,0 kg/h an

CO₂-Äquivalenten. Bei 8.000 Betriebsstunden pro Jahr resultiert daraus für den Motor eine Einsparung von rund 312 Mg an CO₂-Äquivalenten.

Holzvergasung

In Holzvergasern wird aus naturbelassenem Holz ein brennbares Gasgemisch (Hauptbestandteile: Stickstoff, Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Methan) erzeugt. Dieses wird in Verbrennungsmotoren (Gas-Otto- oder Dieselmotoren im Zündstrahlbetrieb) zur Energieerzeugung (Strom, Wärme; Kraft-Wärme-Kopplung) genutzt. Verfahrensbedingt enthält das Abgas nach der motorischen Verbrennung aufgrund von sog. Gasschlupf noch Holzgasbestandteile (v. a. Methan, Benzol, Kohlenstoffmonoxid, etc.) bzw. Reaktionsprodukte (z. B. Formaldehyd).

Bei dem Holzvergaser handelte es sich um einen Gleichstromvergaser. Das erzeugte Holzgas wird in mehreren Stufen (Heißgasfilter, Zyklon, Kühler, Holzwollefilter) gereinigt und in einem Gas-Otto-Motor verbrannt. Zur Minderung der Kohlenstoffmonoxidemissionen ist dem Motor ein Oxidations-Katalysator und zur Abwärmenutzung ein Abgaswärmetauscher nachgeschaltet.

An der Anlage lagen niedrige Abgasemissionen für Schwefeldi-/trioxid, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Gesamtstaub und Formaldehyd vor. Dagegen wurden bei allen Betriebseinstellungen bei Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, organischen Stoffen (Gesamtkohlenstoff) und Benzol die im Genehmigungsbescheid bzw. in der TA Luft [6] vorgegebenen Auflagen bzw. -kriterien nicht eingehalten bzw. die Grenzwerte überschritten. Die Anlage genügte hinsichtlich der Vergasungs-, Motor-, Sicherheits- und Abgasreinigungstechnik nicht dem Stand der Technik und wurde daher außer Betrieb genommen.

Klärschlammverbrennungen

In Klärschlammverbrennungsanlagen werden Schlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen in Öfen mit Wirbelschicht- oder Rostfeuerung verbrannt. Aus der frei werdenden Energie wird in Kesselanlagen Wärme gewonnen, die als Prozesswärme oder zur Stromerzeugung genutzt wird. In den untersuchten Anlagen kommen ausschließlich Schlämme aus kommunalen bzw. industriellen Abwasserbehandlungsanlagen zum Einsatz. Neben dem Regelbetrieb wurden an der Rostfeuerungsanlage ein (Kaltstart) und an der Wirbelschichtanlage zwei Anfahrvorgänge (Warm-/Kaltstart) untersucht.

Im Regelbetrieb werden bei Stickstoffmon-/dioxid, organischen Stoffen (C_{ges}), Ammoniak, Gesamtstaub, Summe „Benzo(a)pyren, Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom“, Schwefeldi-/trioxid, gasförmigen anorganischen Chlor-/Fluorverbindungen, Quecksilber, Nickel, Vanadium, Summe „Cadmium, Thallium“, Summe „Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Cobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn“, Benzo(a)pyren und PCDD/F die jeweiligen Grenzwerte sicher eingehalten. Die Emissionen an PAK und PCB sind sehr gering. Mit durchschnittlich jeweils mehr als 400 mg/m³ zeigen sich für Distickstoffmonoxid hohe Emissionswerte. Bezüglich der Klimarelevanz führen diese gegenüber der reinen Betrachtung von Kohlenstoffdioxid fast zu einer Verdoppelung der CO₂-äquivalenten Fracht.

Bei den Anfahrvorgängen, für die die Genehmigungsbescheide keine Grenzwerte enthalten, treten im Vergleich zum Regelbetrieb beim Warmstart keine und bei den Kaltstartvorgängen zum Teil höhere Emissionen an Gesamtstaub, Quecksilber und PCDD/F auf. Gleiches gilt bei allen Anfahrvorgängen für organische Stoffe (C_{ges}), bei denen jeweils zur Klärschlammaufgabe bzw. bei Sauerstoffmangel (infolge Brennerstörungen, Überdruck im Feuerraum etc.) Konzentrationsspitzen festzustellen sind.

Für Gesamtstaub und PCDD/F waren die erhöhten Emissionen auf eine mit falscher Drehrichtung laufende Förderschnecke (Staubaustrag Gewebefilter) zurückzuführen, die im Zuge der Revision des Gewebefilters elektrisch verkehrt angeschlossen worden war.

Zur Minderung der Quecksilberemissionen aus dem Abgaswäscher im Anfahrvorgang wurden die stromaufwärts gelegenen Abscheidestufen größer dimensioniert und dadurch deren Abscheideleistung optimiert.

Blähglasherstellung

In der Glasschäumenanlage wird aus Altglas, das in einem Glasbruchrockner getrocknet, nachfolgend von Störstoffen befreit, gemahlen, mit Binde-/Blähmittel versetzt und granuliert wird, in direkt bzw. indirekt beheizten Öfen (sog. Glasschäumrohren) ein rundkörniges, geschlossenporiges Produkt mit geringer Dichte (sog. Blähglasgranulat) erzeugt. Als inertes, isolierendes, schallabsorbierendes und witterungsbeständiges Material findet es in der Baustoffindustrie vielfach Anwendung. An der Glasschäumenanlage wurden die Emissionen der Teilanlagen Glasbruchrockner, direkt und indirekt beheiztes Glasschäumrohr untersucht.

Am Glasbruchrockner zeigen sich für Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Distickstoffmonoxid, Gesamtstaub, Metalle (Quecksilber, Thallium; Blei, Cobalt, Nickel, Selen, Tellur; Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom), Benzo(a)pyren, dl-PCB und PCDD/F niedrige Emissionen. Für Ammoniak, organische Stoffe (C_{ges}) liegen erkennbare, für andere PAK etwas höhere sowie für die Indikator-PCB hohe Emissionswerte vor. Diese sind auf mikrobiologische Abbauprozesse während der mehrmonatigen Lagerung (Ammoniak) sowie Verunreinigungen und Kontaminationen des Altglases mit organischen Stoffen zurückzuführen.

Bei dem direkt beheizten Glasschäumrohr ergeben sich niedrige Emissionswerte für Schwefeldioxid, Ammoniak, Distickstoffmonoxid, Gesamtstaub, Metalle (Thallium; Blei, Cobalt, Nickel, Selen, Tellur; Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom), Benzo(a)pyren und dl-PCB. Für Stickstoffmon-/dioxid, Quecksilber, organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff C_{ges}), andere PAK und Indikator-PCB hingegen sind höhere sowie für die PCDD/F erhöhte Emissionswerte festzustellen. Der PCDD/F-Emissionswert der TA Luft [6] für die Massenkonzentration wird – ohne Berücksichtigung eines kühltechnisch bedingten Fremdluftanteils – um mehr als das Doppelte, der Massenstrom, ab dem dieser Konzentrationswert gilt, um den Faktor 25 überschritten. Die PCDD/F bilden sich bei den vorherrschenden thermischen Prozessbedingungen aus den in den Einsatzstoffen vorhandenen bzw. im Prozess gebildeten Substanzen (z. B. Precursoren) in direkten oder heterogen katalysierten Reaktionen.

Am indirekt beheizten ergeben sich im Vergleich zum direkt beheizten Glasschäumrohr im Regelbetrieb aufgrund der anderen Technik signifikante Unterschiede. Die Abgasgehalte an Ammoniak, Metallen (Thallium; Blei, Cobalt, Nickel, Selen, Tellur; Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom), organischen Stoffen (C_{ges} , PAK, Indikator-PCB, dl-PCB und PCDD/F) sind z. T. – insbesondere bei organischen Stoffen – erheblich niedriger. Für Stickstoffoxide und Quecksilber liegen erhöhte Emissionswerte vor. Der einständige Versuchsbetrieb zur Erprobung der Wirksamkeit des Stickstoffoxid-Minderungsverfahrens mit der SNCR-Technologie zeigt, dass dieses Verfahren am indirekt beheizten Glasschäumrohr prinzipiell zur Reduzierung der Stickstoffoxidemissionen geeignet ist.

Zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen wird zwischen dem Betreiber der Glasschäumenanlage und der Genehmigungsbehörde ein öffentlich rechtlicher Vertrag mit emissionsbegrenzenden Anforderungen geschlossen.

Schuhproduktion

Die Hersteller von Schwer- und Bergschuhen setzen aus sicherheitstechnischen Aspekten (Produkthaftung) Klebstoffe und Zubereitungen mit organischen Lösemitteln ein, die während des Herstellungsprozesses verdampfen und in der Abluft bzw. im Abgas Emissionen an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) verursachen.

Zur Minderung der VOC-Emissionen kommen seit 2010 an den beiden Anlagen unterschiedliche Abgasreinigungstechnologien und -konzepte zum Einsatz (Zeolith-Adsorber in Kombination mit regenerativen thermischer bzw. bzw. katalytischer Oxidationseinheit; simultane bzw. zeitlich getrennte Adsorption/Oxidation). Die Wirksamkeit und Effizienz dieser Einrichtungen wurde geprüft.

Hinsichtlich der Abgasemissionen ergeben sich zwischen der Anlage mit regenerativ thermischer (RTO) und der Anlage mit katalytischer Oxidationseinrichtung (KNV) prozesstechnisch und/oder reaktionstechnisch bedingte Unterschiede. Die Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide werden an beiden Anlagen sicher eingehalten, wobei die RTO bedingt durch die höhere Verbrennungstemperatur bzw. durch Zustände unvollständiger Oxidation teilweise höhere Emissionen aufweist. Die durchschnittlichen Emissionskonzentrationen an organischen Stoffen (C_{ges}) sind an beiden Einrichtungen vergleichbar niedrig. Sowohl an der RTO als auch an der KNV werden die Grenzwerte für C_{ges} bei Halbstundenmittelwerten einmal bzw. mehrmals überschritten. Ursachen sind bei der RTO verschlissene Dichtungen im Bereich des Klappensystems und bei der KNV hohe Konzentrationen an organischen Stoffen zu Beginn der Desorption, die infolge einer noch zu niedrigen Katalysatortemperatur nicht vollständig oxidiert werden. Trotz der Konzentrationsüberschreitungen wird der in der TA Luft [6] angegebene Emissionswert für den Massenstrom um den Faktor 10 unterschritten.

Das Screening auf organische Einzelverbindungen an der RTO und KNV zeigt, dass die Abgasgehalte an C_{ges} von den in den Klebstoffen und Zubereitungen enthaltenen flüchtigen organischen Verbindungen Aceton, 2-Butanon und Ethylacetat bestimmt bzw. dominiert werden.

Zur Einhaltung der C_{ges} -Grenzwerte für alle Halbstundenmittelwerte wurde von den Betreibern gefordert, an der RTO-Anlage eine Wartung des Klappensystems und an der KNV-Anlage eine Temperaturerhöhung am Katalysator durchzuführen sowie den Erfolg der Maßnahmen überprüfen zu lassen.

Elektrodenherstellung

Im Ringofen werden Formlinge aus Nadelkoks (Bindemittel: Pech) zu porösen Kohlenstoffkörpern für die Herstellung von Graphitelektroden und -produkten gebrannt. Zur Abgasreinigung ist eine Anlage, bestehend aus einem Vorfilter mit keramischen Schüttkörpern und einer regenerativer Nachverbrennungsanlage (RNV, bestehend aus zwei parallel betriebenen Teilanlagen), installiert. Da die Abgasreinigungsanlage den Grenzwert für das krebserzeugende Benzo(a)pyren ($0,05 \text{ mg/m}^3$) nicht einhielt, wurde in einem Versuchsbetrieb eine zusätzliche Test-RNV nachgeschaltet. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde überprüft.

Die Untersuchungen ergeben, dass in der üblichen Anlagenkonfiguration (ohne Test-RNV) die Benzo(a)pyren-Werte den Grenzwert um mehr als das Zehnfache überschreiten. Das an Staub gebundene Benzo(a)pyren trägt zu über $\frac{2}{3}$ zur Gesamtkonzentration bei. Nach der Test-RNV liegen immer noch Konzentrationen im Bereich des Grenzwerts vor. In Anbetracht des Anlagenbetriebs in Teillast, der Konzentrationsschwankungen und der partiellen Grenzwertüberschreitungen war die Einhaltung des Benzo(a)pyren-Grenzwerts durch die nachgeschaltete Test-RNV nicht gesichert.

Die Erkenntnisse der Untersuchung nutzte der Anlagenbetreiber zur Überprüfung des Abgasreinigungskonzepts. Als Ergebnis wurden die ineffizienten Vorfilter vor der RNV durch einen vorhandenen Elektrofilter ersetzt und die Test-RNV deinstalliert. Die neue Anlagenkonfiguration war Gegenstand einer weiteren Untersuchung, die im Regelbetrieb sowie im „Burn-Out-Betrieb“ einer RNV (oxidative Abreinigung der RNV durch Temperaturerhöhung) erfolgte.

Im Regelbetrieb sind die Gesamtstaub-Emissionen im Vergleich zum Versuchsbetrieb mit der Test-RNV um etwa den Faktor 10 geringer. Für Stickstoffmon-/dioxid und organische Stoffe (C_{ges}) werden die Grenzwerte eingehalten.

Ebenfalls zeigen sich für die organischen Verbindungen Benzol, Benzo(a)pyren und die weiteren PAK geringere Konzentrationen. Der Grenzwert von Benzol wird mit sehr großer und von Benzo(a)pyren mit ausreichender Sicherheit eingehalten.

Beim Burn-Out der RNV sind die Emissionen an Gesamtstaub, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-/dioxid, organischen Stoffen (C_{ges}), Benzo(a)pyren und PAK deutlich höher.

Im Hinblick auf die Einhaltung der Zielwerte beim Burn-Out-Betrieb wurde der Betreiber dazu verpflichtet, diesen Vorgang in kürzeren Zeitintervallen durchzuführen. Dadurch verringern sich die Ablagerungen an den keramischen Schüttkörpern des Wärmetauschers und die Emissionen beim oxidativen, thermischen Ausbrand (Burn-Out).

Zementwerk

In Zementwerken wird aus den Rohstoffen Kalk und Ton in Drehrohröfen Zementklinker erzeugt. Die für den Kalzinierungs- und Sinterprozess benötigte Energie wird vermehrt aus der Verbrennung von Sekundärbrennstoffen gewonnen. An der untersuchten Anlage wurden die Emissionen bei der Mitverbrennung von teerhaltiger Dachpappe im Verbundbetrieb im Vergleich zum regulären Anlagenbetrieb im Verbund- und Direktbetrieb untersucht.

Im Verbundbetrieb ergeben sich bei Einsatz mit gegenüber dem Betrieb ohne teerhaltige Dachpappe für Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe (C_{ges}), Ammoniak, PAK, PCB und PCDD/F höhere, für Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Quecksilber, weitere Metalle, Gesamtstaub etwa gleiche und für Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldi-/trioxid und Benzol niedrigere Emissionswerte. In beiden Betriebsweisen werden – bis auf Benzol im Verbundbetrieb ohne Dachpappeinsatz – sämtliche Grenzwerte des Genehmigungsbescheids eingehalten. Ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit gilt dies auch für Benzol.

Der Direktbetrieb des Zementwerks ist gegenüber dem Verbundbetrieb ohne Einsatz der teerhaltigen Dachpappe durch geringere Sauerstoffgehalte sowie höhere Kohlenstoffmonoxidgehalte und Abgastemperaturen gekennzeichnet. Für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid, organische Stoffe, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, weitere Metalle und Gesamtstaub ergeben sich ähnliche Emissionswerte wie im Verbundbetrieb bei Einsatz teerhaltiger Dachpappe.

Gegenüber den beiden Verbundbetriebsweisen sind im Direktbetrieb die Emissionen an Schwefeldi-/trioxid, Ammoniak, Quecksilber, PAK, Indikator-PCB, dl-PCB sowie PCDD/F höher. Benzol- und PCDD/F-Grenzwert werden nicht eingehalten.

Da die Benzol- und PCDD/F-Emissionen aus dem Rohgesteinsmehl stammen bzw. bei dessen Erhitzung freigesetzt/gebildet werden, hat der Betreiber die Abgastemperatur am Verdampfungskühler abgesenkt, um die Grenzwerte sicher einzuhalten. Des Weiteren wurde zwischenzeitlich eine SCR-Anlage zur Minderung der Stickstoffmon-/dioxid und des Ammoniak-Schlupfs als Ersatz für die während der Untersuchungen noch betriebene SNCR-Anlage installiert.

Eisengießerei

In der Eisengießerei wird in zwei Kaltwind-Kupolöfen mit Obergichtabsaugung aus Roheisen und Eisenschrott Gusseisen erzeugt. Die Energie für den Schmelzprozess stammt aus der Verbrennung von Koks, der dem Ofen zusammen mit dem Eisenschrott zugeführt wird.

Im regulären Betrieb wurden Erkenntnisse über das Emissionsverhalten der Kupolofenanlage bei verschiedenen Phasen (Anfahren, Schmelzen, Niederschmelzen) gewonnen und die Einhaltung des Grenzwerts für PCDD/F ($0,1 \text{ ng I-TEQ/m}^3$) überprüft.

Zusätzlich fand ein Betriebsversuch während der Schmelzphase statt, bei dem der Einfluss der Nachverbrennung des Gicht-/Abgases mit einem provisorisch installierten Propangas-Handbrenner an der Gattieröffnung auf die Beladung des Abgases mit organischen (Spuren)-Schadstoffen zu ermitteln war.

Beide Kupolöfen weisen ein nahezu identisches Betriebs- und Emissionsverhalten auf. Die Komponenten Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Stickoxide und Gesamtkohlenstoff zeigen im Tagesgang charakteristische Konzentrationsverläufe. Hohe Sauerstoffgehalte im gereinigten Abgas sind ein Beleg für Undichtheiten (Sicherheitskühlluftklappe und/oder Gaskühler/Gewebefiltereinheit); sie bewirken eine rund 50 %ige Verdünnung des Ofenabgases mit Umgebungsluft. Von der Anlage werden die Emissionsbeschränkungen für Schwefeldioxid, Stickoxide stets und für Gesamtstaub und Benzol – abgesehen von je einem Wert – eingehalten. Der Grenzwert für PCDD/F wird unter Berücksichtigung der Messunsicherheit (d. h. Addition des Messfehlers) überschritten.

Die Nachverbrennung der Gicht-/Abgase mit einem provisorisch angebrachten Propangasbrenner während des Betriebsversuchs ergibt in der Schmelzphase keinen eindeutigen Beleg für eine Minderung der Emissionen an organischen Schadstoffen.

Beide Kupolöfen wurden (nach Abschluss der Untersuchungen) außer Betrieb genommen. Das für den Guss benötigte Eisen wird jetzt in einem im Anlagenbestand vorhandenen elektrisch beheizten Tiegelofen geschmolzen.

Kaffeerösterei

Röstkaffee wird aus rohen Kaffeebohnen durch Wärmebehandlung erzeugt. Die Erwärmung erfolgt über Kontakt und/oder Konvektion in den Röstanlagen. Zur Behandlung der mit Staub und organischen Stoffen beladenen Abgase kommen Filter oder Massenkraftabscheider und Nachverbrennungsanlagen (thermische oder katalytische Verfahren) zum Einsatz.

An einem mit Erdgas betriebenen Chargenröster mit Trommel und katalytischer Nachverbrennung sollte im regulären Betrieb bei unterschiedlichen Katalysatortemperaturen die optimale Einstellung für niedrige Schadstoffemissionen und geringen Brennstoffverbrauch ermittelt werden.

Die Emissionen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid, gasförmigen anorganischen Chlor-/Fluorverbindungen, Formaldehyd, Ameisen- und Essigsäure befinden sich unterhalb der betreffenden Konzentrations- bzw. Massenstrombegrenzungen. Bei den organischen Stoffen (C_{ges}) wird der Grenzwert hinsichtlich der Massenkonzentration bei allen voreingestellten Katalysator-Solltemperaturen nicht, hinsichtlich des Massenstroms nur bei Katalysator-Solltemperaturen über 500 °C eingehalten. Die Gesamtkohlenstoffgehalte bestehen überwiegend aus Methan. Eine Neujustierung der Brenner und der Betrieb bei der Katalysator-Solltemperatur von 500 °C ergab für Gesamtkohlenstoff eine sichere Einhaltung der Massenstrom-Grenzwerte.

Bei niedrigen Katalysator-Solltemperaturen von 420 °C und 450 °C liegen Kohlenstoffmonoxid, Gesamtkohlenstoff und Methankohlenstoff auf einem wesentlich höheren Niveau und überschreiten zu meist die Grenzwerte des Genehmigungsbescheids bzw. die Emissionsbegrenzungen der TA Luft [6]. Für Formaldehyd werden die Emissionsbegrenzungen der TA Luft – abgesehen von einem Einzelwert mit 22,3 mg/m³ bei einer Katalysator-Solltemperatur von 450 °C – eingehalten.

Die unzureichend funktionierende katalytische Nachverbrennungsanlage wurde durch eine nichtkatalytische Nachverbrennungsanlage (Rohrreaktor mit neuem Erdgasbrenner) ersetzt. Damit ist auch bei einer Temperatur von 450 °C und geringerem Gasverbrauch die Einhaltung des Grenzwerts für C_{ges} gesichert.

Räucherei

Lebensmittel wie z. B. Fleisch, Wurstwaren, Fisch etc. können durch Räuchern in der Haltbarkeit und in den sensorischen Eigenschaften (Geschmack, Geruch, Aussehen) verbessert werden. Als Räuchermittel kommen Holz oder Pflanzenteile zum Einsatz, aus denen in Raucherzeugern durch Pyrolyse oder unvollständige Verbrennung ein Gas-/Aerosolgemisch erzeugt wird. Die zu behandelnde Rohware wird in Kammern geräuchert.

An der untersuchten Anlage wird in Kunstdarm abgefülltes Brät (Würste) in 61 Kaltrauch-Klimakammern mehrmals jeweils etwa 30 bis 60 Minuten lang mit Buchenholzrauch aus Glimm-Raucherzeugern aktiv geräuchert. Die Reinigung der rauchhaltigen Abgase erfolgt in zwei weitgehend identischen Abgasreinigungsanlagen (Elektrofilter, alkalische Wäscher, Aktivkohleadsorber). An der Reinigungsanlage I sind 22, an der Reinigungsanlage II 39 Klimakammern angeschlossen. Ziel der Untersuchung war es, die Emissionssituation der Räucheranlage für die laut Genehmigungsbescheid beschränkten und andere fachlich interessierende Stoffe festzustellen.

An beiden Abgasreinigungsanlagen liegt im Tagesverlauf eine stete Zunahme der Emissionen an Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffmon-/dioxid und organischen Stoffen vor. Die organischen Stoffe, die laut Genehmigungsbescheid nach dem Kieselgel-Verfahren zu bestimmen sind, halten an beiden Abgasreinigungsanlagen die Grenzwerte sicher ein.

Formaldehyd ist im Abgas nicht, Benzol, Phenol und Crotonaldehyd in geringer und Acetaldehyd in höherer Konzentration (max. $18,8 \text{ mg/m}^3$) vorzufinden. Die Benzol- bzw. Phenolemissionen unterschreiten die in der TA Luft [6] für krebserzeugende Stoffe der Klasse III bzw. organische Stoffe der Klasse I angegebenen Begrenzungen für den Massenstrom bzw. die Massenkonzentration. Bei den PAK zeigen sich im Abgas Summenwerte bis maximal $0,113 \text{ mg/m}^3$; die Benzo(a)pyren-Gehalte liegen unter der Bestimmungsgrenze. Die im Genehmigungsbescheid für krebserzeugende Stoffe der Klasse I auf $0,05 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,15 \text{ g/h}$ festgesetzten Grenzwerte werden weit unterschritten.

Quarzsandwerke

Bei den Quarzsandwerken wird ein quarzsandhaltiges Rohstoffgemisch, das in Vorsortier- und Aufbereitungsanlagen von Verunreinigungen, Stör- und ggf. Wertstoffen befreit und in nachgeschalteten Klassier- bzw. thermischen Behandlungsanlagen Quarzsandprodukte unterschiedlicher Art und Spezifikation (Quarzsand in bestimmten Kornklassen bzw. Sand mit bestimmter Farbe) hergestellt. Die Produkte kommen u. a. in der Baustoffindustrie direkt als Werkstoff bzw. als Zuschlagstoff für andere Bauprodukte sowie in vielen anderen Industriebereichen, z. B. in Gießereien im Gussformenbau, zum Einsatz.

Insgesamt wurden zwei Trocknungsanlagen zur Quarzsandtrocknung, eine Ofenanlage zur Quarzsandfärbung sowie eine Klassier-/sichteranlage zur Quarzsandreinigung/-trennung von zwei Betreibern untersucht. Die dort installierten Anlagenkomponenten (Drehrohre, Förder- bzw. Klassiereinrichtungen etc.) sind mit Einrichtungen zur Erfassung und Minderung der Staubemissionen (Zyklone, Gewebefilter) ausgestattet.

Beide Quarzsandtrockner genügten bei den Erstuntersuchungen aufgrund von Mängeln an der Abgasreinigungseinrichtung (schadhafte Dichtungen und gerissene Filterschläuche, undichte Absperrklappen) infolge Abrasion, Alterung, Korrosion und/oder Verschleiß nicht den genehmigten und immissionsschutzrechtlichen Anforderungen und weisen hohe Gesamt-, Feinstaub $\text{PM}_{10}/\text{PM}_4$ - und Quarzfeinstaub PM_4 -Emissionen auf. Bei der Nachuntersuchung im reparierten Zustand liegen sämtliche der zuvor genannten Parameter unter den Emissionswerten der TA Luft [6]. Das Gleiche trifft für Schwefeldioxid und Stickstoffoxide bei beiden Untersuchungen zu.

Die Ofenanlage zur Quarzsandfärbung und die Klassier-/sichteranlage zur Quarzsandreinigung/-trennung schöpfen den Gesamtstaub-Emissionswert der TA Luft [6] zu weniger als 2,5 % aus. Ebenso befinden sich die Emissionswerte für Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ an beiden Anlagen stets auf sehr niedrig gelegenen Niveaus. Die Emissionswerte der TA Luft [6] für Gesamtstaub und Feinstaub PM₁₀/PM₄ sowie für Quarzfeinstaub PM₄ (krebserzeugender Stoff der Klasse III) werden deutlich unterschritten. Des Weiteren ergeben sich an der Farbsandanlage für Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden jeweils sehr niedrige Emissionswerte unter den Bestimmungsgrenze des Messverfahrens von 5 mg/m³.

Kieswerk

Am Kieswerk wird aus einem kies-, sand- und lehmhaltigen Rohstoffgemisch Rohkies (quarzhaltig) gewonnen, aus dem in einer Kiesklassier- und -brechanlage durch Sieben und/oder Brechen Mineralstoffprodukte unterschiedlicher Art und Spezifikation erzeugt werden. Die Produkte kommen als Bodenersatzmaterial im Erd- und Straßenbau oder als Zuschlagstoff bei der Produktion von Beton, Asphalt und anderen Bau-/Werkstoffen zum Einsatz.

Am Kieswerk wurde das Emissionsverhalten der Kiesklassier- und -brechanlage für Gesamt-, Feinstaub PM₁₀/PM₄ und den kanzerogen eingestuft Quarzfeinstaub PM₄ ermittelt. Zur Minderung der Staubemissionen sind alle im Bereich der Transport-, Klassier- und Zerkleinerungseinrichtungen (Förderbänder, Becherwerke, Siebmaschinen, Brecher) liegenden Staubquellen an einem Gewebefilter angeschlossen.

Die Anlage genügte bei der ersten Untersuchung aufgrund von Defekten (defekte Stützkörbe und verschlissene Gewebefilterschläuche) nicht den immissionsschutzrechtlich genehmigten Anforderungen. Im ordnungsgemäßen Zustand nach der Reparatur liegt im regulären Anlagenbetrieb eine effektive Staubabscheidung mit sehr niedrigen Gehalten für Gesamtstaub, Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ unter den Grenzwerten bzw. dem Emissionswert der TA Luft [6] vor.

Granitwerk

Am Granitwerk werden aus einem quarzhaltigen Rohstoffgemisch, das im Tagebau in einem Steinbruch gewonnen wird, in einer Klassier- und Brechanlage durch Sieben und/oder Brechen Mineralstoffprodukte erzeugt. Die Produkte kommen in der Baustoffindustrie als Baumaterial im Bahn-, Straßen- und Wasserwegebau oder als Zuschlagsstoffe in der Asphalt-, Beton- und Ziegelindustrie zum Einsatz.

Am Granitwerk wurden die Gesamt-, Feinstaub PM₁₀/PM₄- und Quarzfeinstaub PM₄-Emissionen der Granitklassier- und -brechanlage untersucht, deren Siebmaschinen, Brecher und Förderaggregate mit Einrichtungen und einem Rohrleitungssystem zur Erfassung sowie einem Gewebefilter zur Minderung der Staubemissionen ausgerüstet sind.

Die Anlage erfüllte bei den ersten beiden Untersuchungen aufgrund von Defekten (schadhafte Dichtungen, roh-/reingasseitige Kurzschlüsse, gerissene Förderschnecke etc.) nicht die immissionsschutzrechtlich genehmigten Anforderungen. Im ordnungsgemäßen Zustand nach der Reparatur liegt im regulären Anlagenbetrieb eine effektive Staubabscheidung mit niedrigen Gehalten für Gesamtstaub, Feinstaub PM₁₀/PM₄ und Quarzfeinstaub PM₄ unter den Grenzwerten bzw. den Emissionswerten der TA Luft [6] vor.

Fazit

Die an diversen thermischen und nichtthermischen Anlagen bei unterschiedlichen Betriebszuständen durchgeführten Emissionsmessungen belegen, dass vereinzelt ein akuter Handlungsbedarf zur Minderung von Emissionen für bestimmte Schadstoffe festzustellen und an der Mehrzahl der Anlagen durchaus ein gewisses Optimierungspotenzial gegeben war. Für einen ordnungsgemäßen, störungsfreien und emissionsarmen Anlagenbetrieb ist u. E. Folgendes erforderlich:

- geeignete technische Ausstattung und Verfahrenstechnik der Anlage,
- guter Gesamt- und Wartungszustand der Anlage,
- regelmäßige fachmännische Anlagenkontrolle und -wartung,
- ordnungsgemäße Betriebsweise,
- auf den jeweiligen Anlagentyp angepasste Emissionsüberwachung (Zeitintervall für wiederkehrende Einzelmessung bzw. kontinuierliche Überwachungs- und ggf. Messeinrichtungen),
- detaillierte Betriebsanweisung(en) für einen ordnungsgemäßen emissionsarmen Anlagenbetrieb,
- verantwortungsbewusstes Führen der Betriebs- und Wartungsbücher,
- klare und verbindliche Regelungen der Zuständigkeiten,
- verantwortliches, entsprechend fachlich geschultes Personal, das an der Anlage tätig ist,
- regelmäßige Mitarbeiterunterweisung und -schulung.

Weiterhin hilfreich dabei können sein:

- enge Zusammenarbeit mit der zuständigen Aufsichts- und Genehmigungsbehörde,
- Qualitätssicherungs- und Umweltmanagementsystem (ggf. Zertifizierung),
- ausführliche Dokumentation der installierten Verfahrenstechnik sowie der Betriebsweise.

Hinsichtlich einiger der letzten o. g. Punkte schnitten die größeren bzw. großtechnischen Anlagen gegenüber den kleineren und mittleren Anlagen häufig wegen der größeren Ressourcen (Fachpersonal, Finanzmittel, Qualitätsmanagement etc.) besser ab. Bei den meisten Anlagen handelt es sich um verfahrenstechnische Unikate, deren Weiterentwicklung im Rahmen des technischen Fortschritts oder genehmigungsrechtlicher Auflagen es zu dokumentieren gilt.

Ein Manko im Zusammenhang mit der Durchführung von Emissions- und Abgasmessungen mit hoher Qualität bzw. geringer Messunsicherheit ist, dass oftmals richtlinienkonforme Probenahmestellen und geeignete Messplätze für das Rein- und Rohgas fehlen. Diese lassen sich später aufgrund der örtlichen Gegebenheiten meist nicht richtlinienkonform nachrüsten. Somit können Defizite bei den primären und sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen messtechnisch mitunter nicht eindeutig lokalisiert, beurteilt und somit die Anlagen nicht immer gezielt optimiert werden.

Die in ausführlichen Berichten dargestellten Untersuchungsergebnisse wurden mit den Anlagenbetreibern und den Überwachungsbehörden diskutiert. Soweit an den Anlagen ein Handlungsbedarf gegeben war, wurde dieser durch Reparatur-, Primär- und/oder Sekundärmaßnahmen umgesetzt bzw. in Angriff genommen. Damit trug das Vorhaben vielfach zur Erkennung von Schwachstellen in Anlagentechnik und Betrieb sowie zur Verbesserung der (lokalen) Immissionssituation bei.

Anhang

Abkürzungen, chemische Formelzeichen, ...

AB	Anfahrbetrieb	F ⁻	Fluorid
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene	FID	Flammenionisationsdetektor
AR	Altreifen	FWL	Feuerungswärmeleistung
As	Arsen	GS	Gewebefilterstaub
B(a)P	Benzo(a)pyren	GV	Glühverlust
BO	Burn-Out	H, H ₂	Wasserstoff
BPG	Brennstoff aus produktions-spezifischen Abfällen	H ₂ O	Wasser
C	Kohlenstoff	H _u	Heizwert [J/kg]
C _{CH₄}	Methan-Kohlenstoff	H _o	Brennwert [J/kg]
C _{ges}	Gesamtkohlenstoff	HA	Holzasche
Ca	Calcium	HCl	Chlorwasserstoff
CaCO ₃	Calciumcarbonat	γ-HCH	Lindan
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid	HCHO	Formaldehyd
Cd	Cadmium	HD	Hochdruck
CH ₄	Methan	HF	Fluorwasserstoff
Cl	Chlor	Hg	Quecksilber
Cl ⁻	Chlorid	HO	Holz
CN ⁻	Cyanid	Ind.-PCB	Indikator polychlorierte Biphenyle
CO	Kohlenstoffmonoxid	K	Kalium
Co	Cobalt	KA	Kesselasche
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	KNV	Katalytische Nachverbrennung
Cr	Chrom	KS	Klärschlamm
Cr (VI)	Chrom (sechswertig)	M	Messstelle
Cu	Kupfer	Mg	Magnesium
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff	Mn	Mangan
DP	Dachpappe	N	Stickstoff
dV/dt	Volumenstrom [m ³ /s]	NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
dl-PCB	Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle	NH ₃	Ammoniak
EA	Eco-Asche	Ni	Nickel
E-Filter	Elektrofilter	NV	Nachverbrennung
ES	Elektrofilterstaub	NO	Stickstoffmonoxid
		NO ₂	Stickstoffdioxid
		NO _x	Stickoxide

N ₂ O	Distickstoffmonoxid	SBS	Sekundärbrennstoff
O-x	Ofen x	Sn	Zinn
O ₂	Sauerstoff	SO ₂	Schwefeldioxid
P	Phosphor	SO ₄ ²⁻	Sulfat
P	Probenahmestelle	SO _x	Schwefeloxide
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	T	Temperatur [°C]
Pb	Blei	TIC	Gesamter anorganischer Kohlenstoff
PCB	Polychlorierte Biphenyle	TI	Thallium
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzop-dioxine/-furane	TNV	Thermische Nachverbrennung
PCP	Pentachlorphenol	TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
PFT	Perfluorierte Tenside	TS	Trockensubstanz
pH	ph-Wert	t	Zeit [s]
PM _x	Particulate matter (Partikelgröße), aerodynamischer Durchmesser < x [µm]	V	Vanadium
RA	Rostasche	V	Volumen [m ³]
RB	Regelbetrieb	VB	Versuchsbetrieb
RE	Reingas	VDK	Verdampfungskühler-Rückstand
RNV	Regenerative Nachverbrennung	VOC	Flüchtige organische Verbindungen
RO	Rohgas	W	Warmstart
RTO	Regenerative thermische Oxidation	W _{el}	Elektrische Energie
S	Schwefel	Z	Zwischengas
Sb	Antimon	Zn	Zink
		ZS	Zyklonstaub

Tab. A-1: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (HA: Holzasche, HO: Holz, EA/ZS: Eco-Asche/Zyklonstaub, GS: Gewebefilterstaub) am Biomasseheizkraftwerk A – Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])										A								
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizkraftwerk, Nr. 8.2, Spalte 2, Anhang 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.2.2, Spalte c V, Anhang 2, 4. BImSchV (2013) [5]																		
Behandlungsprozess: Holz-/Altholzverbrennung (Rostfeuerung)																		
Betriebsweise	AB				RB					Betriebsweise	AB				RB			
Monat/Jahr	März 2010				April 2010					Monat/Jahr	März 2010				April 2010			
Feststoff Parameter	HO	HA	EA/Z S	GS	HO	HA	EA/Z S	GS		Eluat Parameter	HO	HA	EA/Z S	GS	HO	HA	EA/Z S	GS
TS	x	x			x	x				Abdampffrückst.		x	x	x		x	x	x
GV	x	x	x	x	x	x				pH		x	x	x		x	x	x
TOC/TIC	x	x	x	x	x	x				LF								
H ₂ /H ₀	x				x					Cl ⁻		x	x	x		x	x	x
C	x	x	x	x	x	x				SO ₄ ²⁻		x	x	x		x	x	x
H	x	x	x	x	x	x				CN ⁻ _{gesamt}								
N	x	x	x	x	x	x				CN ⁻ _{leicht freisetzbar}		x	x	x		x	x	x
P	x	x	x	x	x	x	x	x		F ⁻		x	x	x		x	x	x
S	x				x					As		x	x	x		x	x	x
As	x	x	x	x	x	x	x	x		Ca								
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x		Cd		x	x	x		x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	x	x		Co								
Cl	x	x	x	x	x	x	x	x		Cr		x	x	x		x	x	x
CN ⁻ _{gesamt}										Cr(VI)		x	x	x		x	x	x
Co										Cu		x	x	x		x	x	x
Cr	x	x	x	x	x	x	x	x		Hg		x	x	x		x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	x	x		Mn								
Hg	x	x	x	x	x	x	x	x		Ni		x	x	x		x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x		Pb		x	x	x		x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x		Sb								
Mn										Sn								
Ni	x	x	x	x	x	x	x	x		Tl		x	x	x		x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	x	x		V								
Sb										Zn		x	x	x		x	x	x
Sn										DOC		x	x	x		x	x	x
Tl	x	x	x	x	x	x	x	x		Phenol-Index		x	x	x		x	x	x
V																		
Zn	x	x	x	x	x	x	x	x										
AOX																		
PAK	x	x	x	x	x	x	x	x										
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x										
dl-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x										
PCDD/F	x	x	x	x	x	x	x	x										
PCP																		
PFT	x	x	x	x	x	x	x	x										
γ-HCH (Lindan)																		

Tab. A-2: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (HA: Holzasche, HO: Holz, ES: Elektrofilterstaub, ZS: Zyklonstaub, ZS/ES: Zyklon-/Elektrofilterstaub) am Biomasseheizwerk B – Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Wärme- und Kälteversorgung (D35.11.3 [1])											B										
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizwerk, Nr. 1.2, Spalte 2 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr.1.2.1, Spalte c V 4. BImSchV (2013) [5]																					
Behandlungsprozess: Holzverbrennung (Rostfeuerung)																					
Betriebsweise	AB					RB					Betriebsweise	AB					RB				
Monat/Jahr	April 2011					April 2011					Monat/Jahr	April 2011					April 2011				
Feststoff Parameter	HO	HA	ZS	ES	ZS/ ES	HO	HA	ZS	ES	ZS/ ES	Eluat Parameter	HO	HA	ZS	ES	ZS/ ES	HO	HA	ZS	ES	ZS/ ES
TS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Abdampfprückst.		x	x	x	x		x	x	x	x
GV	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	pH		x	x	x	x		x	x	x	x
TOC/TIC	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	LF		x	x	x	x		x	x	x	x
H _u /H _o	x										Cl ⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	SO ₄ ²⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
H	x										CN ⁻ _{gesamt}		x	x	x	x		x	x	x	x
N	x										CN ⁻ _{leicht freisetzbar}		x	x	x	x		x	x	x	x
P	x										F ⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	As		x	x	x	x		x	x	x	x
As	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Ca				x						x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Cd		x	x	x	x		x	x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Co		x	x	x	x		x	x	x	x
Cl	x										Cr		x	x	x	x		x	x	x	x
CN ⁻ _{gesamt}		x	x	x	x		x	x	x	x	Cr(VI)		x	x	x	x		x	x	x	x
Co											Cu		x	x	x	x		x	x	x	x
Cr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Hg		x	x	x	x		x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Mn		x	x	x	x		x	x	x	x
Hg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Ni		x	x	x	x		x	x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Pb		x	x	x	x		x	x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Sb		x	x	x	x		x	x	x	x
Mn											Sn		x	x	x	x		x	x	x	x
Ni	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Tl		x	x	x	x		x	x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	V		x	x	x	x		x	x	x	x
Sb											Zn		x	x	x	x		x	x	x	x
Sn											DOC		x	x	x	x		x	x	x	x
Tl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Phenol-Index		x	x	x	x		x	x	x	x
V																					
Zn	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
AOX																					
PAK	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
di-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
PCDD/F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
PCP																					
PFT																					
y-HCH (Lindan)																					

Tab. A-3: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (HO: Holz, GS: Gewebefilterstaub, KA: Kesselasche, RA: Rostasche, VDK: Verdampfungskühler-Rückstand) am Biomasseheizkraftwerk C – Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung und -beseitigung, gefährliche Abfälle (E38.22.0 [1])																					
Anlagentyp, -genehmigung: Biomasseheizkraftwerk, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.1, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]																					
Behandlungsprozess: Holz-/Altholzverbrennung (Rostfeuerung)																					
Betriebsweise	AB					RB					Betriebsweise	AB					RB				
Monat/Jahr	Juli 2010					August 2010					Monat/Jahr	Juli 2010					August 2010				
Feststoff Parameter	HO	RA	KA	VDK	GS	HO	RA	KA	VDK	GS	Eluat Parameter	HO	RA	KA	VDK	GS	HO	RA	KA	VDK	GS
TS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Abdampfrückst.		x	x	x	x		x	x	x	x
GV	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	pH		x	x	x	x		x	x	x	x
TOC/TIC	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	LF		x	x	x	x		x	x	x	x
H ₂ O	x					x					Cl ⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	SO ₄ ²⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
H	x					x					CN ⁻ _{gesamt}		x	x	x	x		x	x	x	x
N	x					x					CN ⁻ _{leicht freisetzbar}		x								
P											F ⁻		x	x	x	x		x	x	x	x
S	x					x					As		x	x	x	x		x	x	x	x
As	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Ca										
Ca											Cd		x	x	x	x		x	x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Co		x								
Cl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Cr		x								
CN ⁻ _{gesamt}											Cr(VI)		x	x	x	x		x	x	x	x
Co	x										Cu		x	x	x	x		x	x	x	x
Cr	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Hg		x	x	x	x		x	x	x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Mn		x								
Hg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Ni		x	x	x	x		x	x	x	x
K											Pb		x	x	x	x		x	x	x	x
Mg	x										Sb		x								
Mn											Sn		x								
Ni	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Tl		x	x	x	x		x	x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	V		x								
Sb	x										Zn		x	x	x	x		x	x	x	x
Sn	x										DOC		x	x	x	x		x	x	x	x
Tl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Phenol-Index		x	x	x	x		x	x	x	x
V	x																				
Zn	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
AOX																					
PAK	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
dl-PCB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
PCDD/F	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x											
PCP	x					x															
PFT																					
γ-HCH (Lindan)	x					x															

Tab. A-4: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (GS: Gewebefilterstaub, KA/ES: Kesselsche/Elektrofilterstaub, KS: Klärschlamm) an der Klärschlammverbrennung F – Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])							F						
Anlagentyp, -genehmigung: Klärschlammverbrennung, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.3, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]													
Behandlungsprozess: Klärschlammverbrennung (Wirbelschichtofen)													
Betriebsweise	AB			RB			Betriebsweise	AB			RB		
Monat/Jahr	März 2011						Monat/Jahr	März 2011					
Parameter	Feststoff			Eluat			Parameter	Feststoff			Eluat		
	KS	KA/ES	GS	KS	KA/ES	GS		KS	KA/ES	GS	KS	KA/ES	GS
TS	x	x	x	x	x	x	Abdampfrückst.		x	x		x	x
GV	x	x	x	x	x	x	pH		x	x		x	x
TOC/TIC	x	x	x	x	x	x	LF		x	x		x	x
H _u /H _o	x			x			Cl ⁻		x	x		x	x
C	x	x	x	x	x	x	SO ₄ ²⁻		x	x		x	x
H	x			x			CN ⁻ _{gesamt}		x	x		x	x
N	x			x			CN ⁻ _{leicht freisetzbar}						
P							F ⁻		x	x		x	x
S	x			x			As		x	x		x	x
As	x	x	x	x	x	x	Ca						
Ca							Cd		x	x		x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	Co						
Cl	x	x	x	x	x	x	Cr		x	x		x	x
CN ⁻ _{gesamt}		x	x		x	x	Cr(VI)		x	x		x	x
Co							Cu		x	x		x	x
Cr	x	x	x	x	x	x	Hg		x	x		x	x
Cu	x	x	x	x	x	x	Mn						
Hg	x	x	x	x	x	x	Ni		x	x		x	x
K							Pb		x	x		x	x
Mg							Sb						
Mn							Sn						
Ni	x	x	x	x	x	x	Tl		x	x		x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	V						
Sb							Zn		x	x		x	x
Sn							AOX		x			x	
Tl	x	x	x	x	x	x	PAK		x	x		x	x
V							Ind.-PCB		x	x		x	x
Zn	x	x	x	x	x	x	dl-PCB		x	x		x	x
AOX	x			x			PCDD/F		x	x		x	x
PAK	x	x	x	x	x	x	PCP						
Ind.-PCB	x	x	x	x	x	x	PFT						
dl-PCB	x	x	x	x	x	x	y-HCH (Lindan)						
PCDD/F	x	x	x	x	x	x							
PCP													
PFT													
y-HCH (Lindan)													

Tab. A-5: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (KS: Klärschlamm, RA/ZS: Rostasche/Zyklonstaub) an der Klärschlammverbrennung G – Betriebsweisen (AB: Anfahr-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Abfallbehandlung- und -beseitigung, nicht gefährliche Abfälle (E38.21.0 [1])									
Anlagentyp, -genehmigung: Klärschlammverbrennung, Nr. 8.1, Spalte 1 a) 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 8.1.1.3, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013), [5], 17. BImSchV (2003) [7]									
Behandlungsprozess: Klärschlammverbrennung (Rostofen)									
Betriebsweise	RB		AB		Betriebsweise	RB		AB	
Monat/Jahr	Sept. 2011		Okt. 2011		Monat/Jahr	Sept. 2011		Okt. 2011	
Feststoff	KS	RA/ZS	KS	RA/ZS	Eluat	KS	RA/ZS	KS	RA/ZS
Parameter					Parameter				
TS	x	x	x	x	Abdampfrückst.				
GV	x	x	x	x	pH				
TOC/TIC					LF				
H _u /H _o	x	x	x	x	Cl ⁻				
C	x	x	x	x	SO ₄ ²⁻				
H	x	x	x	x	CN ⁻ gesamt				
N	x	x	x	x	CN ⁻ leicht freisetzbar				
P	x	x	x	x	F ⁻				
S	x	x	x	x	As				
As	x	x	x	x	Ca				
Ca					Cd				
Cd	x	x	x	x	Co				
Cl	x	x	x	x	Cr				
CN ⁻ gesamt					Cr(VI)				
Co	x	x	x	x	Cu				
Cr	x	x	x	x	Hg				
Cu	x	x	x	x	Mn				
Hg	x	x	x	x	Ni				
K					Pb				
Mg					Sb				
Mn					Sn				
Ni	x	x	x	x	Tl				
Pb	x	x	x	x	V				
Sb	x	x	x	x	Zn				
Sn	x	x	x	x	DOC				
Tl	x	x	x	x	Phenol-Index				
V	x	x	x	x					
Zn	x	x	x	x					
AOX									
PAK									
Ind.-PCB	x	x	x	x					
dl-PCB	x	x	x	x					
PCDD/F	x	x	x	x					
PCP	x	x	x	x					
PFT	x	x	x	x					
γ-HCH (Lindan)									

Tab. A-6: Liste der Feststoff- und Eluatuntersuchungen (DP: Dachpappe, DP/AR: Dachpappe/Altreifen) an dem Zementwerk N – Betriebsweisen (VB: Versuchs-, RB: Regelbetrieb).

Wirtschaftszweig: Zementherstellung (C23.51.0 [1])				N			
Anlagentyp, -genehmigung: Zementwerk, Nr. 2.3, Spalte 1 4. BImSchV (1997) [4] entsprechend Nr. 2.3.1, Spalte c G, Spalte d E 4. BImSchV (2013) [5], 17. BImSchV (2003) [7]							
Behandlungsprozess: Abfallmitverbrennung (Drehrohrofen)							
Betriebsweise	VB	RB1	RB2	Betriebsweise	VB	RB1	RB2
Monat/Jahr	August 2009			Monat/Jahr	August 2009		
Feststoff	DP	DP/AR	DP/AR	Eluat	DP	DP/AR	DP/AR
Parameter				Parameter			
TS	x	x	x	Abdampfrückst.			
GV	x	x	x	pH			
TOC/TIC				LF			
H ₂ O/H ₀	x	x	x	Cl ⁻			
C	x	x	x	SO ₄ ²⁻			
H	x	x	x	CN ⁻ _{gesamt}			
N	x	x	x	CN ⁻ _{leicht freisetzbar}			
P				F ⁻			
S	x	x	x	As			
As	x	x	x	Ca			
Ca				Cd			
Cd	x	x	x	Co			
Cl	x	x	x	Cr			
CN ⁻ _{gesamt}				Cr(VI)			
Co	x	x	x	Cu			
Cr	x	x	x	Hg			
Cu	x	x	x	Mn			
Hg	x	x	x	Ni			
K				Pb			
Mg				Sb			
Mn	x	x	x	Sn			
Ni	x	x	x	Tl			
Pb	x	x	x	V			
Sb	x	x	x	Zn			
Sn	x	x	x	DOC			
Tl	x	x	x	Phenol-Index			
V	x	x	x				
Zn	x	x	x				
AOX							
PAK	x	x	x				
Ind.-PCB	x	x	x				
dl-PCB	x	x	x				
PCDD/F	x	x	x				
PCP							
PFT							
y-HCH (Lindan)							

Literatur

- [1] STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.):
Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen.
Wiesbaden 2008, 828 S.
https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 14.08.2014)
- [2] ANONYM:
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG).
In der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013.
BGBl. I (2013) 25, S. 1274–1311.
Zuletzt geändert durch Art. 1 Elfte Gesetz zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 2. Juli 2013.
BGBl. I (2013) 34, S. 1943, ber. BGBl. I (2013) 60, S. 3753.
- [3] LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LAU):
LAI-Muster-Emissionsmessbericht. Stand: 17.01.2011.
<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Messbericht-11-01.doc> (abgerufen am 07.10.2014).
- [4] ANONYM:
Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV).
Neugefasst durch Bekanntmachung vom 14. März 1997.
BGBl. I (1997) 17, S. 504–522.
Zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 2 der Verordnung zur Neufassung der Gefahrstoffverordnung und zur Änderung sprengstoffrechtlicher Verordnungen vom 26. November 2010.
BGBl. I (2010) 59, S. 1643–1692.
- [5] ANONYM:
Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV). Vom 2. Mai 2013.
BGBl. I (2013) 21, S. 973–1020, ber. BGBl. I (2013) 60, S. 3756–3757.
- [6] ANONYM:
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). Vom 24. Juli 2002.
GMBI. (2002) 25–29, S. 511–605.
- [7] ANONYM:
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV). Vom 14. August 2003.
BGBl. I (2003) 41, S. 1633–1651.
Geändert durch Art. 2 der Verordnung zur Absicherung von Luftqualitätsanforderungen in der Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen und der Verordnung über die Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen vom 27. Januar 2009.
BGBl. I (2009) 5, S. 129–132.

- [8] ANONYM:
Einunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen – 31. BImSchV). Vom 21. August 2001.
BGBl. I (2001) 44, S. 2180–2213.
Zuletzt geändert durch Art. 7 der Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin sowie zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen. Vom 2. Mai 2013.
BGBl. I (2013) 21, S. 1021–1051, ber. BGBl. I (2013) 60, S. 3754–3755.
- [9] DIN 1333:
Zahlenangaben.
Beuth-Verlag, Berlin, Februar 1992, 20 S.
- [10] DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM GEMEINNÜTZIGE GMBH (DBFZ):
Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Kurztitel: Stromerzeugung aus Biomasse (FZK: 03MAP138). Endbericht zur EEG-Periode 2009 bis 2011. In Kooperation mit Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter der Projekträgerschaft Forschungszentrum Jülich GmbH, Geschäftsbereich Umwelt (UMW). Stand: 30.03.2012.
Leipzig 2012, 120 S.
- [11] ANONYM:
Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz. AltholzV – Altholzverordnung. Vom 15. August 2002.
BGBl. I (2002) 59, S. 3302–3317.
Zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 26 des Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts vom 24. Februar 2012.
BGBl. I (2012) 10, S. 212–264.
- [12] ÖNORM M 7133:
Holzhackgut für energetische Zwecke – Anforderungen und Prüfbestimmungen.
Austrian Standards Institute, Wien, Februar 1998, 7 S.
- [13] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY:
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Method 610.
Federal Register, 44 (1979) 233, S. 69514–69517.
- [14] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:
Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kapitel 1.1–1.5. Stand Juli 2007.
Augsburg 2007, 90 S.
- [15] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT:
Datenbankauszug aus der Biogas-Betreiber-Datenbank Bayern (BBD). Biogas in Zahlen – Bayern zum 31.12.2013 – Stichtag: 31.12.2013 (Stand: 28.02.2014).
München 2014, 3 S.
http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iba/dateien/bbd_biogasinzahlen_bayern_20131231_stat.pdf
(abgerufen am 07.10.2014)

- [16] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC):
Climate Change 2007: The Physical Science Base. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hrsg. von S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M.M.B. Tignor, H.L. Miller Jr. und Z. Chen.
Cambridge University Press, Cambridge, UK, und New York, NY, USA, 2007, 996 S.
- [17] ANONYM:
Artikel 1 des Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften. Vom 25. Oktober 2008.
Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG).
BGBl. I (2008) 49, S. 2074–2100.
Zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes zur Änderung des Rechtsrahmens für Strom aus solarer Strahlungsenergie und zu weiteren Änderungen im Recht der erneuerbaren Energien vom 17. August 2012.
BGBl. I (2012) 38, S. 1754–1764.
- [18] BRÄKOW, D.:
Stand der thermochemischen Vergasung von Biomasse in Deutschland 2012, Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V., Vortrag auf der 8. Fachtagung kleine und mittlere Holzvergasungs-KWK-Anlagen, Renexpo[®], 13. Internationale Energiemesse und Kongress, 27. – 30.09.2012, Augsburg.
Augsburg, 29.09.2012.
- [19] ANONYM:
Verordnung zur Umsetzung des Europäischen Abfallverzeichnisses. Artikel 1: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV). Vom 10. Dezember 2001.
BGBl. (2001) 65, S. 3379–3412.
Zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 22 des Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts vom 24. Februar 2012.
BGBl. I (2012) 10, S. 212–264.
- [20] EWEN, A.:
Forschungsprojekt: Reduzierung der Lösemittellemissionen bei der Bergschuhherstellung durch Abluftbehandlung und Einsatz von Dispersionsklebstoffen bei der Bandagenverklebung sowie Datenerhebungen zur möglichen Änderung der Bezugsgröße für den Grenzwert der VOC-Emission. Hrsg. vom Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens, Az. 3621b-IBS/a-9634/06-IGF-0511-0002.
Pirmasens, 07.05.2007, 62 S.
- [21] HOLLEMAN, A.:
Lehrbuch der anorganischen Chemie. Holleman-Wiberg.
De Gruyter, Berlin, New York 1985, S. 12.
- [22] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben EULV24 Schadstoffemissionen während des An-/Abfahrens (groß)technischer thermischer Anlagen (EU Ziel-2 Programm Bayern: Phasing-Out-Gebiete). Abschlussbericht zum 31.01.2008.
Augsburg, März 2008, 62 S.

- [23] ANONYM:
VDI 3481 Blatt 2 – Messen gasförmiger Emissionen – Bestimmung des durch Adsorption an Kieselgel erfassbaren organisch gebundenen Kohlenstoffs in Abgasen.
Beuth Verlag, Berlin, September 1998, 14 S.
- [24] ANONYM:
Beschluss II. 32/3b1 des Ausschusses für Gefahrstoffe (AGS).
Beschlüsse des AGS zu Quarzfeinstaub vom 7. Mai 2002.
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Mai 2002, 26 S.
<http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/665416/publicationFile/48109/906-quarzfeinstaub.pdf>
(abgerufen am 24.01.2013)

