

## LEA 2

# Neubearbeitung des Projektes "LEA - Emissionsfaktoren aus der Abfallverbrennung"

## Schlussbericht

Dokument Nr. 22550-110-B\_Schlussbericht LEA 2\_V4.0.docx  
Version 4.0

Zürich, 22. September 2015

**Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU**

*Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.*

## Änderungsnachweis

Version	Datum	Bezeichnung der Änderungen	Verteiler
1.0	02.03.2015	Entwurf Zwischenbericht	BAFU, VBSA, TBF
2.0	27.07.2015	Entwurf Schlussbericht	BAFU, TBF
3.0	24.08.2015	Schlussbericht	BAFU, TBF
4.0	22.09.2015	Endversion Schlussbericht	BAFU, TBF

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Ausgangslage und Auftrag	3
2. Grundlagen	4
2.1 Messberichte und Schadstoffkonzentrationen	4
2.2 Abgasvolumenströme	4
2.3 Verbrannte Abfallmenge	5
2.4 Betriebsstunden	5
2.5 Sonderzustände KVA	5
3. Methodik und Annahmen	6
3.1 Berechnung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb	6
3.2 Annahmen zu An- und Abfahrphasen von KVA	7
3.3 Verwendung von Umfahrungsleitungen bei KVA	8
3.4 Emissionsfaktoren nach LRV	10
3.5 Anlagentechnik	11
4. Resultate	13
4.1 Emissionsfaktoren KVA	13
4.2 Emissionsfaktoren SAVA	14
4.3 Plausibilität der Emissionsfaktoren	15
4.3.1 Messunsicherheiten	16
4.3.2 Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA	16
5. Zusammenfassung der Ergebnisse	18
5.1 Emissionsfaktoren KVA	18
5.2 Vergleich der Emissionsfaktoren von KVA aus dem Normalbetrieb	21
6. Beurteilung Messberichte und Empfehlungen	22

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

## Zusammenfassung

### Ausgangslage

Im Jahr 2004 wurde die TBF + Partner AG vom BAFU (ehemals BUWAL) mit der Abwicklung des Projektes "LEA Emissionsfaktoren aus der Abfallverbrennung" beauftragt. Resultate der Studie waren Emissionsfaktoren für das Basisjahr 2003 einerseits für den Normalbetrieb und andererseits für Sonderzustände (An- und Abfahrphase, Verwendung von Umfahungsleitungen) von Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA). Das BAFU sah nun Bedarf für eine Überprüfung dieser Studie. Es hat deshalb die TBF + Partner AG beauftragt, eine Aktualisierung der Studie von 2004 vorzunehmen. Gegenüber der Studie von 2004 wurden zusätzlich die Emissionen von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAVA) betrachtet.

### Datengrundlage

Als Grundlage wurden durch das BAFU verschiedene Berichte der Schweizer KVA und SAVA zur Verfügung gestellt (Messberichte nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV), Berichte kontinuierliche Messungen, Dioxin-Messungen, Klassenhäufigkeitsverteilungen, Firmenberichte, Zusammenstellungen der Kantone). Eine breite Datengrundlage lag nur in Form der LRV-Messberichte vor. Deshalb wurden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb in erster Linie die in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Schadstoffkonzentrationen herangezogen.

Für die Abschätzung der Emissionen während der An- und Abfahrphasen von KVA wurden die Emissionsmessungen während des An- und Abfahrens von zwei KVA herangezogen. Die Annahmen bezüglich der Verwendung von Umfahungsleitungen basieren auf Erfahrungswerten der TBF + Partner AG.

### Methodik

Die Berechnung der Emissionsfaktoren erfolgte anhand der Schadstoffkonzentrationen<sup>1</sup>, der Abgasvolumenströme (im Normzustand, trocken) und der jeweils verbrannten Abfallmenge.

$$\text{Emissionsfaktor} \left[ \frac{g}{t} \right] = \frac{\text{Schadstoffkonzentration} \left[ \frac{g}{m^3} \right] * \text{Abgasvolumenstrom} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{\text{Abfalldurchsatz} \left[ \frac{t}{h} \right]}$$

### Resultate

Zur Bestimmung der in der Tabelle 1 ausgewiesenen Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen gemittelt (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge). Die zusätzlichen Emissionsfaktoren, welche durch An- und Abfahrvorgänge sowie durch den Ausfall der Entstickung entstehen, sind ebenso in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die zusätzlichen Emissionen während den Sonderzuständen sind dabei auf die jährlich verbrannte Abfallmenge verteilt.

---

<sup>1</sup> normiert auf Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 % bzw. 3 % sowie trockenes Abgas im Normzustand (0 °C / 1013 mbar)

## Änderungsnachweis

Version	Datum	Bezeichnung der Änderungen	Verteiler
1.0	02.03.2015	Entwurf Zwischenbericht	BAFU, VBSA, TBF
2.0	27.07.2015	Entwurf Schlussbericht	BAFU, TBF
3.0	24.08.2015	Schlussbericht	BAFU, TBF
4.0	22.09.2015	Endversion Schlussbericht	BAFU, TBF

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Ausgangslage und Auftrag	3
2. Grundlagen	4
2.1 Messberichte und Schadstoffkonzentrationen	4
2.2 Abgasvolumenströme	4
2.3 Verbrannte Abfallmenge	5
2.4 Betriebsstunden	5
2.5 Sonderzustände KVA	5
3. Methodik und Annahmen	6
3.1 Berechnung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb	6
3.2 Annahmen zu An- und Abfahrphasen von KVA	7
3.3 Verwendung von Umfahrungsleitungen bei KVA	8
3.4 Emissionsfaktoren nach LRV	10
3.5 Anlagentechnik	11
4. Resultate	13
4.1 Emissionsfaktoren KVA	13
4.2 Emissionsfaktoren SAVA	14
4.3 Plausibilität der Emissionsfaktoren	15
4.3.1 Messunsicherheiten	16
4.3.2 Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA	16
5. Zusammenfassung der Ergebnisse	18
5.1 Emissionsfaktoren KVA	18
5.2 Vergleich der Emissionsfaktoren von KVA aus dem Normalbetrieb	21
6. Beurteilung Messberichte und Empfehlungen	22

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

## Zusammenfassung

### Ausgangslage

Im Jahr 2004 wurde die TBF + Partner AG vom BAFU (ehemals BUWAL) mit der Abwicklung des Projektes "LEA Emissionsfaktoren aus der Abfallverbrennung" beauftragt. Resultate der Studie waren Emissionsfaktoren für das Basisjahr 2003 einerseits für den Normalbetrieb und andererseits für Sonderzustände (An- und Abfahrphase, Verwendung von Umfahungsleitungen) von Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA). Das BAFU sah nun Bedarf für eine Überprüfung dieser Studie. Es hat deshalb die TBF + Partner AG beauftragt, eine Aktualisierung der Studie von 2004 vorzunehmen. Gegenüber der Studie von 2004 wurden zusätzlich die Emissionen von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAVA) betrachtet.

### Datengrundlage

Als Grundlage wurden durch das BAFU verschiedene Berichte der Schweizer KVA und SAVA zur Verfügung gestellt (Messberichte nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV), Berichte kontinuierliche Messungen, Dioxin-Messungen, Klassenhäufigkeitsverteilungen, Firmenberichte, Zusammenstellungen der Kantone). Eine breite Datengrundlage lag nur in Form der LRV-Messberichte vor. Deshalb wurden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb in erster Linie die in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Schadstoffkonzentrationen herangezogen.

Für die Abschätzung der Emissionen während der An- und Abfahrphasen von KVA wurden die Emissionsmessungen während des An- und Abfahrens von zwei KVA herangezogen. Die Annahmen bezüglich der Verwendung von Umfahungsleitungen basieren auf Erfahrungswerten der TBF + Partner AG.

### Methodik

Die Berechnung der Emissionsfaktoren erfolgte anhand der Schadstoffkonzentrationen<sup>1</sup>, der Abgasvolumenströme (im Normzustand, trocken) und der jeweils verbrannten Abfallmenge.

$$\text{Emissionsfaktor} \left[ \frac{g}{t} \right] = \frac{\text{Schadstoffkonzentration} \left[ \frac{g}{m^3} \right] * \text{Abgasvolumenstrom} \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{\text{Abfalldurchsatz} \left[ \frac{t}{h} \right]}$$

### Resultate

Zur Bestimmung der in der Tabelle 1 ausgewiesenen Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen gemittelt (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge). Die zusätzlichen Emissionsfaktoren, welche durch An- und Abfahrvorgänge sowie durch den Ausfall der Entstickung entstehen, sind ebenso in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die zusätzlichen Emissionen während den Sonderzuständen sind dabei auf die jährlich verbrannte Abfallmenge verteilt.

<sup>1</sup> normiert auf Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 % bzw. 3 % sowie trockenes Abgas im Normzustand (0 °C / 1013 mbar)

KVA	Normalbetrieb	An- und Abfahren	Ausfall Entstickung	Total	LRV
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [g/t]	354	+ 3.6	+ 13.0	371	560
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> [g/t]	42	+ 0	+ 0	42	350
HCl [g/t]	6.5	+ 0	+ 0	6.5	140
HF [g/t]	1.0	+ 0	+ 0	1.0	14
NH <sub>3</sub> [g/t]	5.4	+ 0	+ 0	5.4	35
VOC als C [g/t]	8.2	+ 0.6	+ 0	8.8	140
CO [g/t]	76	+ 13.6	+ 0	90	350
Staub [g/t]	7.2	+ 0	+ 0	7.2	70
Σ Pb + Zn [mg/t]	961	+ 0	+ 0	961	7'000
Hg [mg/t]	63	+ 0	+ 0	63	700
Cd [mg/t]	27	+ 0	+ 0	27	700
PCDD/F [µg/t]	0.33	+ 0.031	+ 0.037	0.40	0.70

Tabelle 1: Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb, zusätzliche Emissionsfaktoren für An- und Abfahrphasen und den Ausfall der Entstickung sowie die Summe über alle Betriebszustände im Vergleich mit Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV

Die Summe der Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb und aus den Sonderzuständen liegt deutlich unter den auf Emissionsfaktoren umgerechneten Grenzwerten der LRV. Demzufolge sind bei dieser Betrachtungsweise die Schadstoffemissionen pro Tonne verbrannter Abfall in der Schweiz deutlich geringer als bei einer Berechnung der Schadstoffemissionen pro Tonne verbrannter Abfall mit den LRV-Grenzwerten.

In Tabelle 2 sind die Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb der SAVA aufgeführt (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge). Aus den LRV-Grenzwerten umgerechnete Emissionsfaktoren liessen sich aufgrund der stark schwankenden Abgasvolumenströme nicht definieren.

SAVA	Normalbetrieb SAVA	Normalbetrieb KVA
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [g/t]	735	354
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> [g/t]	85	42
HCl [g/t]	33	6.5
HF [g/t]	4	1.0
NH <sub>3</sub> [g/t]	12	5.4
VOC als C [g/t]	33	8.2
CO [g/t]	314	76
Staub [g/t]	28	7.2
Σ Pb + Zn [mg/t]	1'692	961
Hg [mg/t]	143	63
Cd [mg/t]	306	27
PCDD/F [µg/t]	0.84	0.33

Tabelle 2: Emissionsfaktoren von SAVA für den Normalbetrieb im Vergleich mit Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb

## 1. Ausgangslage und Auftrag

Im Jahr 2004 wurde die TBF + Partner AG vom BAFU (ehemals BUWAL) mit der Abwicklung des Projektes "LEA Emissionsfaktoren aus der Abfallverbrennung" beauftragt (Schlussbericht 22. August 2005). Ziel dieses Projektes war die Aktualisierung der gleichnamigen Datenbank, deren Datengrundlage auf dem Kenntnisstand von 1990 basierte. Dies vor dem Hintergrund, dass seitdem verschiedene KVA saniert sowie einige alte Linien stillgelegt oder teilweise durch modernere, emissionsärmere Linien ersetzt worden waren.

Resultate der Studie waren Emissionsfaktoren für das Basisjahr 2003 einerseits für den Normalbetrieb (Regelbetrieb) und andererseits für Sonderzustände (An- und Abfahrphase, Verwendung von Umfahungsleitungen → gestörter Regelbetrieb). Des Weiteren wurden Empfehlungen zur Verbesserung der Datenqualität, zur Standardisierung der Berichterstattung nach LRV sowie zu Anpassungen an den kontinuierlich arbeitenden Messsystemen erarbeitet.

Das BAFU sah nun Bedarf für eine Überprüfung der Emissionsfaktoren mit Basisjahr 2003 und für eine Aktualisierung des Berichtes "LEA Emissionsfaktoren aus der Abfallverbrennung". Es hat deshalb die TBF + Partner AG beauftragt, eine Aktualisierung der Studie von 2004 vorzunehmen. Gegenüber der Studie von 2004 wurden zusätzlich die Emissionen von Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAVA) betrachtet. Im Rahmen dieser Studie wurden deshalb auch Emissionsfaktoren für SAVA im Normalbetrieb ausgewiesen (keine Betrachtung von Sonderzuständen).

Zur Unterstützung der TBF + Partner AG bei der Datenerhebung und der Datenauswertung wurde durch das BAFU eine Begleitgruppe eingesetzt. Diese setzte sich aus den Herren Michael F. Hügi und Rainer Kegel vom BAFU sowie Herrn Robin Quartier vom VBSA zusammen.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Messberichte und Schadstoffkonzentrationen

Die Grundlagenbeschaffung erfolgte grösstenteils durch das BAFU, welches für die Berechnung der Emissionsfaktoren verschiedene Berichte der Schweizer KVA und SAVA zur Verfügung stellte:

- LRV-Messberichte
- Berichte kontinuierliche Messungen
- Dioxin-Messungen
- Klassenhäufigkeitsverteilungen
- Firmenberichte
- Zusammenstellungen der Kantone

Die Berichte zu den KVA stammten aus den Jahren 2007 bis 2014, wobei der grösste Teil Messungen zwischen 2010 und 2014 umfasste. Für die Bestimmung der Emissionsfaktoren der SAVA wurden nur Messberichte zwischen 2009 und 2014 berücksichtigt (ältere Messberichte wurden nach Absprache mit dem BAFU nicht in die Berechnung miteinbezogen).

Die Datengrundlage zu den verschiedenen KVA und SAVA war sehr unterschiedlich. Eine breite Datengrundlage über sämtliche KVA lag nur in Form der LRV-Messberichte der Kantone vor. Deshalb wurden zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb der KVA in erster Linie die in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Schadstoffkonzentrationen herangezogen (siehe auch Kapitel 3.1).

Für die Berechnung der Emissionsfaktoren der SAVA wurden ebenfalls die vorhandenen LRV-Messberichte verwendet. Es lagen aber deutlich weniger Berichte vor als bei den KVA. Die in diesem Bericht ausgewiesenen Emissionsfaktoren konnten deshalb nicht so breit abgestützt werden wie bei den KVA.

### 2.2 Abgasvolumenströme

Im Zuge der LRV-Messungen werden die Abgasvolumenströme gemessen. Diese wurden für die Ermittlung der Emissionsfaktoren benötigt, mussten aber noch entsprechend umgerechnet werden (siehe dazu Kapitel 3.1).

### **2.3 Verbrannte Abfallmenge**

Die in den KVA verbrannten Abfallmengen wurden der vom BAFU zur Verfügung gestellten Abfallstatistik (Durchsatz pro Anlage und Jahr) und den LRV-Messberichten (Durchsatz pro Stunde und Linie während der Messung) entnommen. Diese Werte wurden zudem mit den Angaben in veröffentlichten Dokumenten von Anlagenbetreibern (v. a. Geschäftsberichte) verglichen. Bei grossen Abweichungen wurde eine Mittelung der verschiedenen Werte vorgenommen.

Bei Anlagen mit Klärschlammverbrennung wurde die verbrannte Klärschlammmenge bei der Abfallmenge miteinberechnet, wobei nur die Trockensubstanz berücksichtigt wurde. Lagen keine Angaben zum Trockensubstanzgehalt des verbrannten Klärschlammes vor, so wurde von einem Anteil von 25 % Trockensubstanz ausgegangen.

Die in den SAVA verbrannten Sonderabfallmengen wurden, sofern ausgewiesen, aus den LRV-Messberichten entnommen (Durchsatz pro Stunde und Linie). Sofern Jahresberichte vorlagen, konnten zudem aus diesen Angaben zur verbrannten Sonderabfallmenge entnommen werden (Durchsatz pro Anlage und Jahr). Weitere Angaben zu den verbrannten Sonderabfallmengen wurden durch Anfragen bei den Betreibern beschafft.

### **2.4 Betriebsstunden**

Die jährlichen Betriebsstunden der einzelnen KVA für das Jahr 2013 wurden vom VBSA zur Verfügung gestellt.

Bei den SAVA wurden die jährlichen Betriebsstunden, sofern vorhanden, aus den Jahresberichten entnommen. Fehlende Werte wurden teilweise durch die Betreiber zur Verfügung gestellt. Bei Anlagen, für welche die jährlichen Betriebsstunden nicht ermittelt werden konnten, erfolgte eine Abschätzung (→ 7'200 h pro Jahr).

### **2.5 Sonderzustände KVA**

Für die Abschätzung der Emissionen während der An- und Abfahrphasen von KVA wurden die Emissionsmessungen während des An- und Abfahrens von zwei KVA herangezogen, die der TBF + Partner AG vorlagen. Die Messwerte stammen von den Betriebsmessgeräten für die kontinuierliche Emissionsüberwachung.

Die Annahmen bezüglich der Verwendung von Umfahrungsleitungen basieren auf Erfahrungswerten der TBF + Partner AG (siehe dazu Kapitel 3.3).

### 3. Methodik und Annahmen

#### 3.1 Berechnung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb

Die Bestimmung der Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb erfolgte soweit möglich über die in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Messwerte. Bei ungenügender Datengrundlage wurden zusätzlich Jahres-, Geschäfts- und Umweltberichte berücksichtigt. Teilweise mussten zudem die Anlagenbetreiber direkt angefragt werden, damit fehlende Daten beschafft werden konnten (siehe auch Kapitel 2).

Die Schadstoffkonzentrationen waren in den Messberichten folgendermassen normiert (nach LRV Anhang 1 Ziffer 23):

- CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOC, HCl, HF, NH<sub>3</sub>, Staub, Schwermetalle: Konzentration in mg/m<sup>3</sup> (mg Schadstoff pro m<sup>3</sup> Abgas)
- Dioxine und Furane: Konzentration in ng I-TEQ/m<sup>3</sup> (ng PCDD/F pro m<sup>3</sup> Abgas)
- Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 % für feste, feste und flüssige oder feste und gasförmige Abfälle
- Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 3 % für flüssige, gasförmige oder flüssige und gasförmige Abfälle
- trockenes Abgas im Normzustand (0 °C / 1013 mbar)

Die in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Abgasvolumenströme (Normzustand, trocken) wurden auf einen Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 % bzw. 3 % umgerechnet.

Die Berechnung der Emissionsfaktoren erfolgte anhand der Schadstoffkonzentrationen, der Abgasvolumenströme (im Normzustand, trocken) und der jeweils verbrannten Abfallmenge.

$$\text{Emissionsfaktor} \left[ \frac{\text{g}}{\text{t}} \right] = \frac{\text{Schadstoffkonzentration} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] * \text{Abgasvolumenstrom} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{\text{Abfalldurchsatz} \left[ \frac{\text{t}}{\text{h}} \right]}$$

Für einen Grossteil der KVA und einen Teil der SAVA lagen mehrere LRV-Messberichte vor, welche aus verschiedenen Berichtsjahren stammten. Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren wurden nur jene KVA und SAVA berücksichtigt, die 2013 noch in Betrieb waren.

- Die Berechnung der Emissionsfaktoren erfolgte im ersten Schritt für die einzelnen Berichtsjahre und Ofenlinien der betrachteten Anlagen. Wurden mehrere Ofenlinien auf eine Rauchgasreinigungslinie oder einen Kamin zusammengeführt, so erfolgte die Auswertung für diesen summarischen Rauchgasstrom.
- Anschliessend erfolgte für jede Anlage eine Mittelwertbildung über sämtliche Linien und Messjahre. Dadurch resultierte für jede Anlage ein Emissionsfaktor für jeden Schadstoff.

- Durch eine mit der jährlich verbrannten Abfallmenge gewichtete Mittelung der Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen wurden dann die Emissionsfaktoren über sämtliche Anlagen berechnet.

### 3.2 Annahmen zu An- und Abfahrphasen von KVA

Die Dauer der An- und Abfahrphasen und die Schadstoffemissionen während dieser Zeit sind bei KVA sehr unterschiedlich. Für eine genaue Ermittlung der Emissionsfaktoren während der An- und Abfahrphasen müssten deshalb die Dauer dieser Phasen und die Schadstoffemissionen für die einzelnen KVA erhoben werden.

Die in der Tabelle 3 und der Tabelle 4 ausgewiesenen Werte (siehe Seite 8) beruhen auf den Emissions- und Abgasvolumenstrommessungen von zwei KVA während der An- und Abfahrphasen, die der TBF + Partner AG vorliegen (siehe auch Kapitel 2.5). Bei diesen zwei Anlagen waren sowohl die Emissionen als auch die Dauer der An- und Abfahrphasen sehr unterschiedlich. Deshalb mussten grobe Annahmen getroffen werden, was es bei der Betrachtung der Resultate (Kapitel 4.1) zu berücksichtigen gilt.

Bei den aufgeführten Emissionsanstiegen handelt es sich um über die gesamten An- bzw. Abfahrphasen gemittelte Werte. Bei der Ermittlung der CO- und VOC-Schadstoffkonzentrationen mussten Abschätzungen vorgenommen werden, da diese Konzentrationen während des An- und Abfahrens teilweise ausserhalb des Messbereichs der Betriebsmessgeräte lagen. Der Abgasvolumenstrom wurde ebenfalls über die gesamten An- bzw. Abfahrphasen gemittelt und lag bei rund 40 % des Volumenstroms im Normalbetrieb.

Die Angaben in der Tabelle 5 (Seite 9) zur Anzahl der An- und Abfahrphasen sowie zum Betriebszustand des Wäschers und der Entstickung (SCR oder SNCR<sup>2</sup>) sind Erfahrungswerte der Fachexperten der TBF + Partner AG. Auch bei diesen Angaben gilt es zu berücksichtigen, dass diese für die einzelnen KVA stark abweichen können.

Der Vergleich mit den im Projekt LEA 1 getroffenen Annahmen (Tabelle 6, Seite 9) zeigt, dass damals der Anstieg der CO-Emissionen unterschätzt wurde, während der Anstieg der VOC-Emissionen überschätzt wurde. Bezüglich Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen wurde im Projekt LEA 2 aufgrund der vorliegenden Emissionsmessungen zwischen den An- und Abfahrphasen unterschieden. Dies weil die vorliegenden Messungen zeigten, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen nur während der Anfahrphase ansteigen. Während der Abfahrphase wurden keine erhöhten NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen.

Aufgrund der vorliegenden Messungen und von Erfahrungswerten wurde von deutlich längeren An- und Abfahrphasen ausgegangen als beim Projekt LEA 1. Die Anzahl der An- und Abfahrvorgänge wurde gegenüber LEA 1 auf drei pro Jahr verringert, da die heutigen Anlagen längere Reisezeiten (Betriebszeit pro Jahr) aufweisen.

---

<sup>2</sup> Selective Catalytic Reduction bzw. Selective Non-Catalytic Reduction

Betriebsdaten	LEA 2		LEA 1	
	Anfahren	Abfahren	Anfahren	Abfahren
Dauer	8 h	6 h	zusammen 6 h	
Anzahl	3 x pro Jahr		4.5 x pro Jahr	
Elektrofilter	immer in Betrieb		immer in Betrieb	
Wäscher	immer in Betrieb		immer in Betrieb	
SCR	16 h ausser Betrieb	nicht relevant	12 h ausser Betrieb	
SNCR		nicht relevant	3 h ausser Betrieb	
Abgasvolumenstrom	40 % vom Normalbetrieb		85 % vom Normalbetrieb	

Tabelle 3: Betriebsdaten und Betriebszustände von KVA während den An- und Abfahrphasen, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2

Zusätzliche Emissionen <sup>3</sup>	LEA 2		LEA 1	
	Anfahren	Abfahren	Anfahren	Abfahren
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	+ 200 mg/m <sup>3</sup>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	+ 100 mg/m <sup>3</sup>	
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>		+ 0 mg/m <sup>3</sup>	
HCl	+ 0 mg/m <sup>3</sup>		+ 0 mg/m <sup>3</sup>	
HF	+ 0 mg/m <sup>3</sup>			
NH <sub>3</sub>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>			
VOC als C	+ 40 mg/m <sup>3</sup>		+ 300 mg/m <sup>3</sup>	
CO	+ 1300 mg/m <sup>3</sup>	+ 300 mg/m <sup>3</sup>	+ 80 mg/m <sup>3</sup>	
Staub	+ 0 mg/m <sup>3</sup>			
PCDD/F	+ 2 ng/m <sup>3</sup>		+ 1 bzw. 3 ng/m <sup>3</sup>	
Schwermetalle	+ 0 mg/m <sup>3</sup>			

Tabelle 4: Zusätzliche Emissionen von KVA während den An- und Abfahrphasen, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2

### 3.3 Verwendung von Umfahrungsleitungen bei KVA

In KVA wird der Wäscher heute kaum mehr mittels Bypass umfahren. Treten schwerwiegende Störungen auf, so wird die Anlage abgefahren. Deshalb wurde gegenüber dem Projekt LEA 1 angenommen, dass der Wäscher immer in Betrieb ist, wenn Abfall verbrannt wird.

Störungen können vor allem beim SCR auftreten (z. B. Verstopfung der Katalysator-Elemente). Ist dies der Fall, kann der SCR umfahren werden und die Katalysator-Elemente können im laufenden Betrieb gereinigt werden. Probleme können bei SCR und SNCR zudem

<sup>3</sup> Angaben beziehen sich auf trockenes Rauchgas im Normzustand (siehe auch Kapitel 3.1)

bei der Zufuhr und Eindüsung des Ammoniaks auftreten, was ebenfalls zu einem Ausfall der Entstickung führt. Je nach verwendetem Verfahren (siehe auch Kapitel 3.5) wird zudem der Abbau der Dioxine und Furane (PCDD/F) eingeschränkt oder findet nicht mehr statt.

Die restlichen Schadstoffe steigen beim Ausfall der Entstickung nicht an, da der Elektrofilter und der Wäscher in Betrieb sind und die Verbrennung nicht beeinträchtigt wird.

Aufgrund der immer zuverlässigeren Anlagentechnik wurde gegenüber dem Projekt LEA 1 angenommen, dass die Entstickung nur noch während 50 h pro Jahr ausfällt. Diese 50 h wurden in 20 h Bypassbetrieb (Umfahrung SCR → kein Abbau von PCDD/F) und 30 h mit Ausfall der NH<sub>3</sub>-Eindüsung (keine Umfahrung des SCR) unterteilt.

Betriebsdaten	LEA 2	LEA 1
	Ausfall Entstickung	Umfahrung SCR und Wäscher
Elektrofilter	immer in Betrieb	immer in Betrieb
Wäscher	immer in Betrieb	20 h pro Jahr ausser Betrieb
SCR	20 h pro Jahr Bypassbetrieb 30 h pro Jahr keine NH <sub>3</sub> -Eindüsung	100 h pro Jahr ausser Betrieb
SNCR	30 h pro Jahr keine NH <sub>3</sub> -Eindüsung	20 h pro Jahr ausser Betrieb
Abgasvolumenstrom	100 % (Normalbetrieb)	100 % (Normalbetrieb)

Tabelle 5: Betriebsdaten und Betriebszustände von KVA bei einem Ausfall der Entstickung bzw. bei der Umfahrung von SCR und Wäscher, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2

Zusätzliche Emissionen <sup>3</sup>	LEA 2	LEA 1
	Ausfall Entstickung	Umfahrung SCR und Wäscher
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	+ 280 mg/m <sup>3</sup>	+ 280 mg/m <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	+ 250 mg/m <sup>3</sup>
HCl	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	+ 800 mg/m <sup>3</sup>
HF	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	
NH <sub>3</sub>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	
VOC als C	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>
CO	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	+ 0 mg/m <sup>3</sup>
Staub	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	
PCDD/F	+ 2 ng/m <sup>3</sup>	+ 1 bzw. 3 ng/m <sup>3</sup>
Schwermetalle	+ 0 mg/m <sup>3</sup>	

Tabelle 6: Zusätzliche Emissionen von KVA bei einem Ausfall der Entstickung bzw. bei der Umfahrung von SCR und Wäscher, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2

### 3.4 Emissionsfaktoren nach LRV

Damit die für die KVA ermittelten Emissionsfaktoren mit den LRV-Grenzwerten verglichen werden konnten, wurde folgende Berechnung durchgeführt:

$$EM \text{ nach LRV } \left[ \frac{g}{t} \right] = \text{max. Schadstoffkonz. nach LRV} \left[ \frac{g}{m^3} \right] * \text{Abgasvolumenstrom} \left[ \frac{m^3}{t} \right]$$

- Die maximalen Schadstoffkonzentrationen wurden der LRV (Anhang 2, Ziffer 714) entnommen (siehe auch Tabelle 7).
- Der Abgasvolumenstrom<sup>3</sup> pro verbrannte Tonne Abfall wurde für KVA auf 7000 m<sup>3</sup>/t geschätzt (Abschätzung anhand der in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Abgasvolumenströme sowie der jeweils verbrannten Abfallmenge).

Durch diese Berechnung wurde ermittelt, wie hoch die Emissionsfaktoren einer KVA wären, wenn bei der Verbrennung von 1 Tonne Abfall die Schadstoffkonzentrationen im Rauchgas den Grenzwerten der LRV entsprechen würden.

Die Auswertung der LRV-Messberichte der SAVA hat gezeigt, dass deren Abgasvolumenströme sehr unterschiedlich sind. Die Definition eines durchschnittlichen Abgasvolumenstroms für SAVA war demzufolge nicht möglich. Deshalb konnte kein Emissionsfaktor gemäss LRV-Grenzwerten für SAVA ermittelt werden.

<b>Emissionsgrenzwerte nach LRV (Anhang 2, Ziffer 714)</b>	
Staub	10 mg/m <sup>3</sup>
Blei und Zink sowie deren Verbindungen, angegeben als Metalle, als Summe	1 mg/m <sup>3</sup>
Quecksilber und Cadmium und deren Verbindungen, angegeben als Metalle, je	0.1 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeloxide, angegeben als Schwefeldioxid	50 mg/m <sup>3</sup>
Stickoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid), angegeben als Stickstoffdioxid, bei einem Massenstrom von 2.5 kg/h und mehr	80 mg/m <sup>3</sup>
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff	20 mg/m <sup>3</sup>
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen, angegeben als Fluorwasserstoff	2 mg/m <sup>3</sup>
Ammoniak und Ammoniumverbindungen, angegeben als Ammoniak	5 mg/m <sup>3</sup>
Gasförmige organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff	20 mg/m <sup>3</sup>
Kohlenmonoxid	50 mg/m <sup>3</sup>
Dioxine und Furane, angegeben als Summenwert der Toxizitätsäquivalente nach EN 1948-1	0.1 ng/m <sup>3</sup>

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte nach LRV (Anhang 2, Ziffer 714)

### 3.5 Anlagentechnik

In den Schweizer KVA werden verschiedene Technologien für die Entstaubung, die Entstickung und die Rauchgasreinigung eingesetzt. Diese können folgendermassen unterteilt werden:

#### Entstaubung

- Elektrofilter
- Gewebefilter

#### Entstickung / DeNO<sub>x</sub>

- Rohgasschaltung: SCR vor Rauchgasreinigung
- Reingasschaltung: SCR nach Rauchgasreinigung
- SNCR: überstöchiometrische NH<sub>3</sub>-Eindüsung in den Brennraum mit NH<sub>3</sub>-Rückgewinnung im Wäscher

#### Rauchgasreinigung

- Nassverfahren
- Quasi-Trockenverfahren
- Trockenverfahren

#### Weitere Massnahmen zur Rauchgasreinigung

- PCDD/F- und Schwermetallabscheidung durch Aktivkohle- oder Herdofenkoks-Dosierung im Wäscher
- PCDD/F-Abbau im SCR-Katalysator (SCR-Katalysator muss entsprechend dimensioniert werden)
- Nachgeschalteter Gewebe- oder Schlauchfilter (Polizeifilter) zur zusätzlichen Schwermetall- und PCDD/F-Abscheidung

Die verschiedenen Verfahren zur Entstaubung, Entstickung und Rauchgasreinigung können in unterschiedlicher Reihenfolge angeordnet werden; es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Schaltungen in den Schweizer KVA. Es ist deshalb nicht möglich, die Schweizer KVA in eine sinnvolle Anzahl Kategorien bezüglich Anordnung und Art der eingesetzten Verfahren einzuteilen. Folgende Zusammenfassung kann aber bezüglich der eingesetzten Verfahren gemacht werden:

#### Entstickung / DeNO<sub>x</sub>

- SCR-Reingasschaltung: 17 KVA
- SCR-Rohgasschaltung: 7 KVA
- SNCR-Verfahren: 6 KVA

## **Rauchgasreinigung**

- Nassverfahren: 28 KVA
- Quasi-Trockenverfahren: 1 KVA
- Trockenverfahren: 1 KVA

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass für die Entstickung zurzeit meist das SCR-Verfahren eingesetzt wird (24 KVA). Die Rauchgasreinigung erfolgt meist mit dem Nassverfahren (28 KVA). Eine Kombination von SCR (Roh- oder Reingasschaltung) und Nassverfahren kommt bei 22 der 30 betrachteten Schweizer KVA zum Einsatz.

Die Analyse der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA zeigte, dass grosse Streubreiten vorliegen (siehe auch Kapitel 4.3.2). Ein signifikanter Einfluss der angewendeten Verfahren für die Entstickung und die Rauchgasreinigung auf die Emissionsfaktoren konnte nicht festgestellt werden. Deshalb konnten keine Emissionsfaktoren für die verschiedenen Verfahren und deren Kombinationen ausgewiesen werden. Die geltenden LRV-Grenzwerte können mit allen Verfahren sicher eingehalten werden. Es spielt demzufolge keine Rolle, welche Verfahren in welcher Kombination angewendet werden.

Die starke Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA ist in erster Linie auf die Abfallzusammensetzung, die Dimensionierung der Komponenten der Rauchgasreinigung und der Entstickung sowie auf die Betriebsbedingungen während den Emissionsmessungen zurückzuführen.

## 4. Resultate

### 4.1 Emissionsfaktoren KVA

Die Streubreiten der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA sind sehr hoch (siehe dazu Kapitel 4.3.2). Zur Bestimmung der in der nachfolgenden Tabelle ausgewiesenen, gesamtschweizerischen Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen gemittelt (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge, siehe dazu auch Kapitel 3.1). Diese Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb sind deutlich tiefer als die Emissionsfaktoren aufgrund der LRV-Grenzwerte (Berechnung Kapitel 3.4). Die Emissionsfaktoren für die NO<sub>x</sub> und PCDD/F liegen dabei am nächsten bei den Emissionsfaktoren nach LRV (ca. 60 % des LRV-Emissionsfaktors).

Die zusätzlichen Emissionsfaktoren, welche durch An- und Abfahrvorgänge sowie durch den Ausfall der Entstickung entstehen (siehe dazu Kapitel 3.2 und 3.3), wurden ebenso in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die zusätzlichen Emissionen während den Sonderzuständen wurden dabei auf die jährlich verbrannte Abfallmenge verteilt.

KVA	Normalbetrieb	An- und Abfahren	Ausfall Entstickung	Total	LRV
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [g/t]	354	+ 3.6	+ 13.0	371	560
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> [g/t]	42	+ 0	+ 0	42	350
HCl [g/t]	6.5	+ 0	+ 0	6.5	140
HF [g/t]	1.0	+ 0	+ 0	1.0	14
NH <sub>3</sub> [g/t]	5.4	+ 0	+ 0	5.4	35
VOC als C [g/t]	8.2	+ 0.6	+ 0	8.8	140
CO [g/t]	76	+ 13.6	+ 0	90	350
Staub [g/t]	7.2	+ 0	+ 0	7.2	70
Σ Pb + Zn [mg/t]	961	+ 0	+ 0	961	7'000
Hg [mg/t]	63	+ 0	+ 0	63	700
Cd [mg/t]	27	+ 0	+ 0	27	700
PCDD/F [µg/t]	0.33	+ 0.031	+ 0.037	0.40	0.70

Tabelle 8: Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb, zusätzliche Emissionsfaktoren für An- und Abfahrvorgänge und den Ausfall der Entstickung sowie die Summe über alle Betriebszustände im Vergleich mit Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV

Auch wenn die Schadstoffkonzentrationen für NO<sub>x</sub>, CO, VOC und PCDD/F während den Sonderzuständen stark ansteigen, so ist der Einfluss auf die Emissionsfaktoren gering. Dies liegt an der relativ geringen Anzahl Stunden im Sonderbetrieb gegenüber der Anzahl Stunden im Normalbetrieb und am geringen Rauchgasvolumenstrom während den An- und Abfahrphasen (siehe Kapitel 3.2 und 3.3). Hinzu kommt, dass die Emissionsfrachten aus den Sonderzuständen auf die jährlich verbrannte Abfallmenge verteilt wurden.

Die Summe der Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb und aus den Sonderzuständen liegt deutlich unter den Emissionsfaktoren nach LRV. Demzufolge sind bei dieser Betrachtungsweise die Schadstoffemissionen pro Tonne verbannter Abfall in der Schweiz deutlich geringer als bei einer Berechnung der Schadstoffemissionen pro Tonne verbannter Abfall mit den LRV-Grenzwerten. Dies gilt aber explizit nur für die durchgeführte Berechnung, d. h. wenn die Emissionen aus den Sonderständen auf die gesamte verbrannte Abfallmenge verteilt werden. Werden die Schadstoffkonzentrationen im Rauchgas während den Sonderzuständen betrachtet, so liegen diese für NO<sub>x</sub>, CO, VOC und PCDD/F deutlich über den LRV-Grenzwerten.

#### **4.2 Emissionsfaktoren SAVA**

Die Abgasvolumenströme pro verbrannter Tonne Sonderabfall (→ SAVA) sind meist deutlich höher als pro Tonne Abfall (→ KVA). Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass sowohl feste aber vor allem auch flüssige und gasförmige Abfallstoffe verbrannt werden. Wird z. B. eine grosse Gasmenge (→ kontaminierte Abluft) verbrannt, so führt dies zu einem hohen Abgasvolumenstrom. Gleichzeitig hat der gasförmige Abfallstoff gegenüber einem festen Abfallstoff nur eine geringe Masse (bei gleichem Volumen). Dies kann auch bei flüssigen Abfallstoffen, wie z. B. kontaminiertem Abwasser, der Fall sein (geringe Schadstoffkonzentration in grosser Abwassermenge → grosser Abgasvolumenstrom durch entstehenden Wasserdampf). Da für SAVA dieselben LRV-Grenzwerte gelten wie für KVA (→ mg Schadstoff pro m<sup>3</sup> Abgas), führen die höheren Abgasvolumenströme bei den SAVA zu entsprechend höheren Emissionsfaktoren (siehe auch Formel im Kapitel 3.1).

Des Weiteren ist die Zusammensetzung der Sonderabfälle meist sehr inhomogen (sowohl über einen Tag als auch über ein Jahr betrachtet), gerade auch weil sowohl feste als auch flüssige und gasförmige Abfallstoffe verbrannt werden. Entsprechend stark streuen die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen. Hinzu kommt, dass bei vier der neun betrachteten Anlagen nur ein LRV-Messbericht vorlag.

Zur Bestimmung der in der Tabelle 9 ausgewiesenen Emissionsfaktoren für den Normalbetrieb wurden die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen gemittelt (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge, siehe dazu auch Kapitel 3.1). Ein Emissionsfaktor aufgrund der LRV-Grenzwerte (siehe dazu Kapitel 3.4) liess sich infolge der stark schwankenden Abgasvolumenströme nicht definieren.

<b>SAVA</b>	<b>Normalbe- trieb SAVA</b>	Normalbe- trieb KVA
<b>NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>735</b>	354
<b>SO<sub>x</sub> als SO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>85</b>	42
<b>HCl</b> [g/t]	<b>33</b>	6.5
<b>HF</b> [g/t]	<b>3.7</b>	1.0
<b>NH<sub>3</sub></b> [g/t]	<b>12</b>	5.4
<b>VOC als C</b> [g/t]	<b>33</b>	8.2
<b>CO</b> [g/t]	<b>314</b>	76
<b>Staub</b> [g/t]	<b>28</b>	7.2
<b>Σ Pb + Zn</b> [mg/t]	<b>1'692</b>	961
<b>Hg</b> [mg/t]	<b>143</b>	63
<b>Cd</b> [mg/t]	<b>306</b>	27
<b>PCDD/F</b> [µg/t]	<b>0.84</b>	0.33

*Tabelle 9: Emissionsfaktoren von SAVA für den Normalbetrieb im Vergleich mit Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb*

#### 4.3 Plausibilität der Emissionsfaktoren

Die vorgängig ausgewiesenen Emissionsfaktoren weisen Ungenauigkeiten auf. Dies ist einerseits auf die Messungenauigkeit der für die LRV-Messungen eingesetzten Messgeräte zurückzuführen (siehe Kapitel 4.3.1). Hinzu kommt, dass die LRV-Messungen nur eine Momentaufnahme sind (Messung über 4 – 6 Stunden). Die Abfallzusammensetzung kann stark variieren, was sich entsprechend auf die Schadstoffemissionen auswirken kann. Dies hat auch die grosse Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen gezeigt (siehe Kapitel 4.3.2).

Da bei den KVA eine grosse Anzahl Messberichte von 30 Anlagen aus verschiedenen Berichtsperioden (zwischen 2007 und 2014) vorlagen, erfolgte die Mittelwertbildung über eine Vielzahl Messwerte. Dementsprechend kann den für die KVA ausgewiesenen Emissionsfaktoren, unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit, eine hohe Plausibilität bescheinigt werden.

Bei den SAVA erfolgte die Mittelwertbildung für die neun in der Schweiz bestehenden Anlagen. Bei vier der neun betrachteten Anlagen lag nur ein LRV-Messbericht vor. Deshalb ist die Unsicherheit bzw. Ungenauigkeit bei den für die SAVA ausgewiesenen Emissionsfaktoren grösser als bei den KVA.

#### 4.3.1 Messunsicherheiten

In der Tabelle 10 wurden die relativen Messunsicherheiten der verschiedenen Messgrössen aufgeführt. Diese beruhen auf den Angaben zur Messunsicherheit in den verschiedenen LRV-Messberichten (95 %-Vertrauensgrenzen gemäss VDI Richtlinien und der BAFU-Messempfehlungen). Die Tabelle ist als Übersicht zu betrachten, einzelne Messgeräte können grössere oder kleinere Messunsicherheiten aufweisen.

Messgrösse	Relative Messunsicherheit
O <sub>2</sub>	±5 %
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	±10 %
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	±10 %
HCl	±15 %
HF	±20 %
NH <sub>3</sub>	±15 %
VOC als C	±20 %
CO	±10 %
Staub	±15 %
Σ Pb + Zn	±20 %
Hg	±25 %
Cd	±25 %
PCDD/F	±25 %
Volumenstrom	±10 %
Feuchte	±12 %
Abgastemperatur	±3 %

*Tabelle 10: Messunsicherheit der Messwerte in den LRV-Messberichten und demzufolge Messunsicherheit der ausgewiesenen Emissionsfaktoren*

Die für die Berechnung der Emissionsfaktoren eingesetzten Messwerte unterliegen den in der Tabelle 10 aufgeführten Messunsicherheiten. Die aus diesen Messwerten berechneten Emissionsfaktoren sind demzufolge mit denselben Unsicherheiten behaftet. Es kann vermutet werden, dass sich gewisse Unsicherheiten durch die Mittelwertbildung verringern. Dies ist aber eine reine Hypothese, welche keine statistische Grundlage hat.

#### 4.3.2 Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA

Die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen weisen eine grosse Streuung auf. In der Tabelle 11 sind verschiedene Quantile zu den über alle KVA gemittelten Emissionsfaktoren der einzelnen KVA aufgeführt.

Schadstoff	Mittelwert	Minimum	25 %-Quantil	Median	75 %-Quantil	Maximum
<b>NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>354</b>	196	284	341	431	570
<b>SO<sub>x</sub> als SO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>42</b>	0.6	7.1	25	55	223
<b>HCl</b> [g/t]	<b>6.5</b>	0.3	2.4	5.5	10.2	33.0
<b>HF</b> [g/t]	<b>1.0</b>	0.1	0.4	0.9	1.5	4.5
<b>NH<sub>3</sub></b> [g/t]	<b>5.4</b>	0.3	1.0	2.4	6.7	66.7
<b>VOC als C</b> [g/t]	<b>8.2</b>	1.3	2.6	5.4	19.1	28.1
<b>CO</b> [g/t]	<b>76</b>	17	50	70	91	249
<b>Staub</b> [g/t]	<b>7.2</b>	0.8	3.7	5.9	8.8	26.1
<b>Σ Pb + Zn</b> [mg/t]	<b>961</b>	92	486	790	1332	4621
<b>Hg</b> [mg/t]	<b>63</b>	3.3	23.0	41.8	85.0	260.9
<b>Cd</b> [mg/t]	<b>27</b>	2.3	7.0	15.6	67.9	79.8
<b>PCDD/F</b> [µg/t]	<b>0.33</b>	0.003	0.060	0.176	0.317	5.034

*Tabelle 11: Quantile der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA aus dem Normalbetrieb sowie Mittelwert über alle KVA für den Normalbetrieb (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge)*

Bei den Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, CO und Staub sind die Streuungen am geringsten. Sehr grosse Streuungen liegen bei Cadmium, Ammoniak, SO<sub>x</sub>, PCDD/F und VOC vor.

Die starke Streuung der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA ist in erster Linie auf die Abfallzusammensetzung, die Dimensionierung der Komponenten der Rauchgasreinigung und der Entstickung sowie auf die Betriebsbedingungen während den Emissionsmessungen zurückzuführen.

## 5. Zusammenfassung der Ergebnisse

### 5.1 Emissionsfaktoren KVA

In der Tabelle 12 sind die Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb und der Summe aus Normalbetrieb und Sonderzuständen der KVA aufgeführt. Diese wurden den Emissionsfaktoren nach LRV und den Emissionsfaktoren aus dem Projekt LEA 1 gegenübergestellt.

Vergleich der Emissionsfaktoren	LEA 2		Emissionsfaktoren nach LRV	LEA 1	
	Normalbetrieb	Normalbetrieb + Sonderzustände		Normalbetrieb	Normalbetrieb + Sonderzustände
NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [g/t]	354	371	560	379	404
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> [g/t]	42	42	350	58	62
HCl [g/t]	6.5	6.5	140	15	29
HF [g/t]	1.0	1.0	14	1.9	3.6
NH <sub>3</sub> [g/t]	5.4	5.4	35	6.0	6.0
VOC als C [g/t]	8.2	8.8	140	12.4	18.3
CO [g/t]	76	90	350	120	121
Staub [g/t]	7.2	7.2	70	8.9	8.9
Σ Pb + Zn [mg/t]	961	961	7'000	1'640	1'640
Hg [mg/t]	63	63	700	95	95
Cd [mg/t]	27	27	700	32	32
PCDD/F [µg/t]	0.334	0.402	0.70	1.40	1.50 1.70

Tabelle 12: Vergleich der Emissionsfaktoren aus den Projekten LEA 1, LEA 2 sowie den Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV

- Die Emissionsfaktoren der Schweizer KVA liegen deutlich unter den Emissionsfaktoren, welche anhand der LRV-Grenzwerte berechnet wurden. Dies ist auch aus den LRV-Messberichten ersichtlich, in welchen die effektiven Schadstoffkonzentrationen im Rauchgas bis auf wenige Ausnahmen (v. a. infolge Betriebsstörungen während der Messungen) unterhalb der LRV-Grenzwerte lagen.
- Der Vergleich mit den Emissionsfaktoren aus dem Projekt LEA 1 (2004) zeigt, dass die Emissionsfaktoren in den letzten 10 Jahren gesunken sind.
- Der Rückgang der Emissionsfaktoren ist auf die Stilllegung alter Linien und Anlagen bzw. deren Ersatz durch modernere, emissionsärmere Linien und Anlagen zurückzuführen.

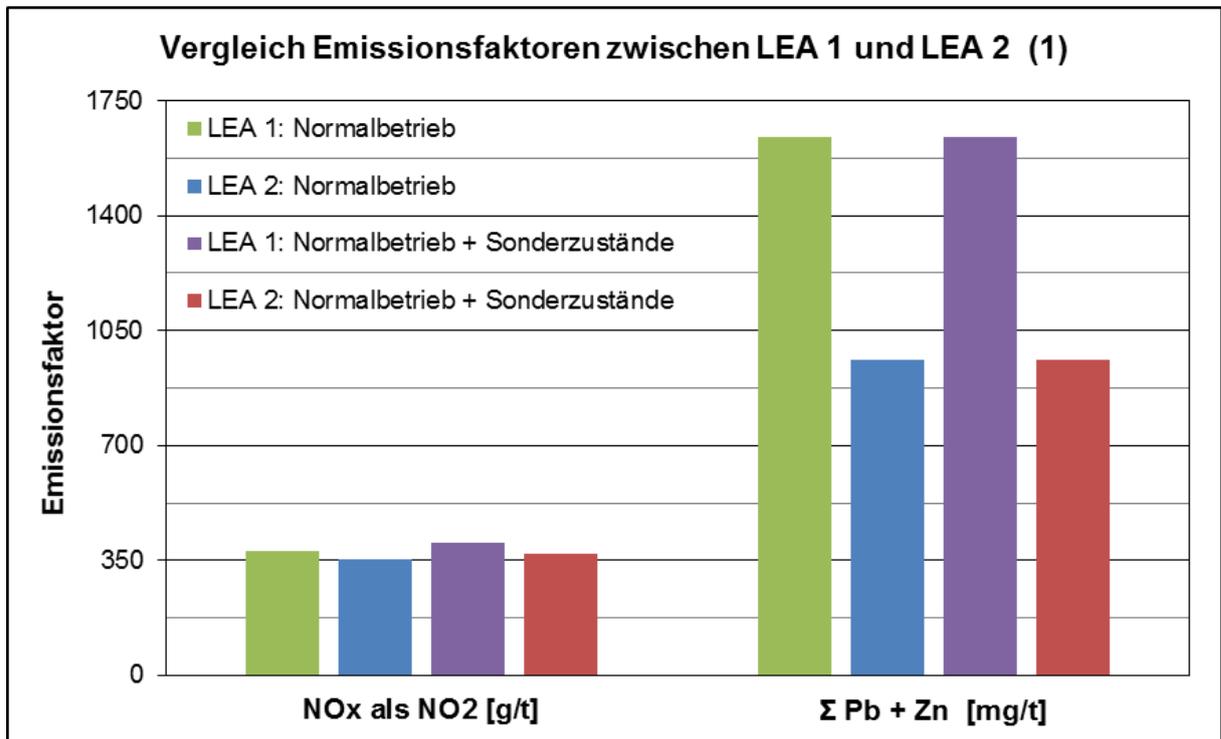


Abbildung 1: Vergleich der Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub> und Σ Pb + Zn aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen

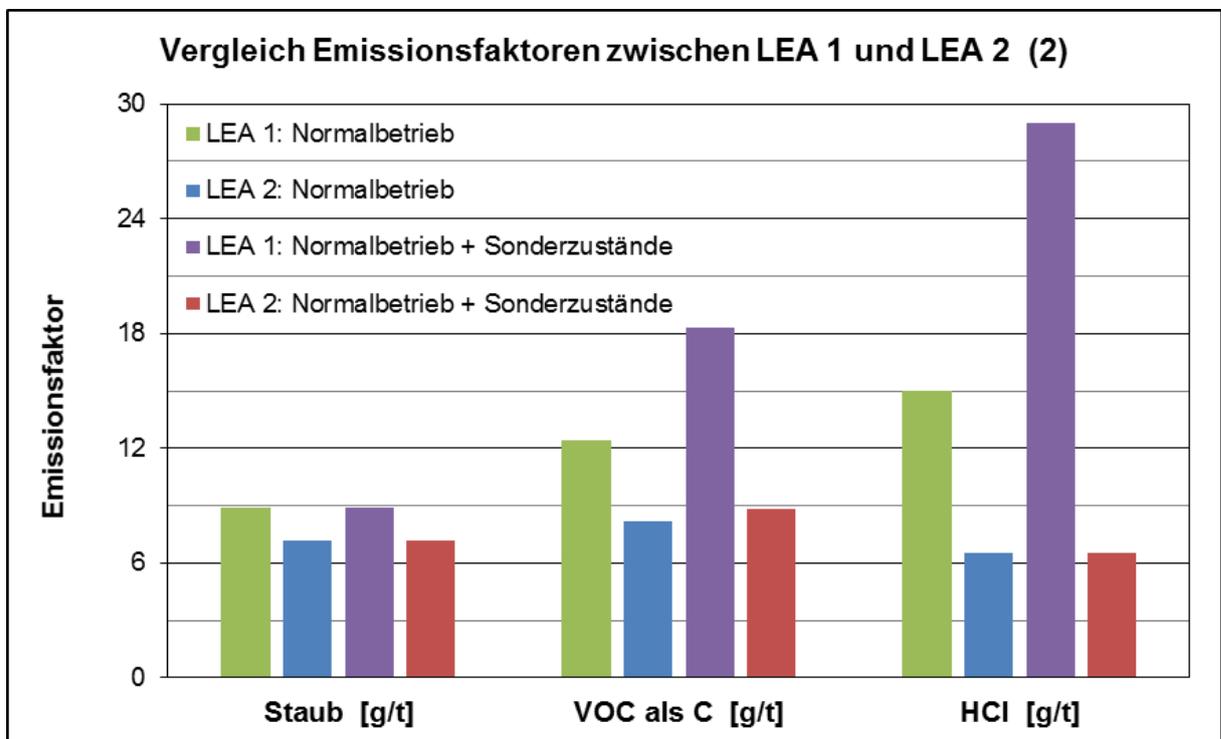


Abbildung 2: Vergleich der Emissionsfaktoren für Staub, VOC und HCl aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen

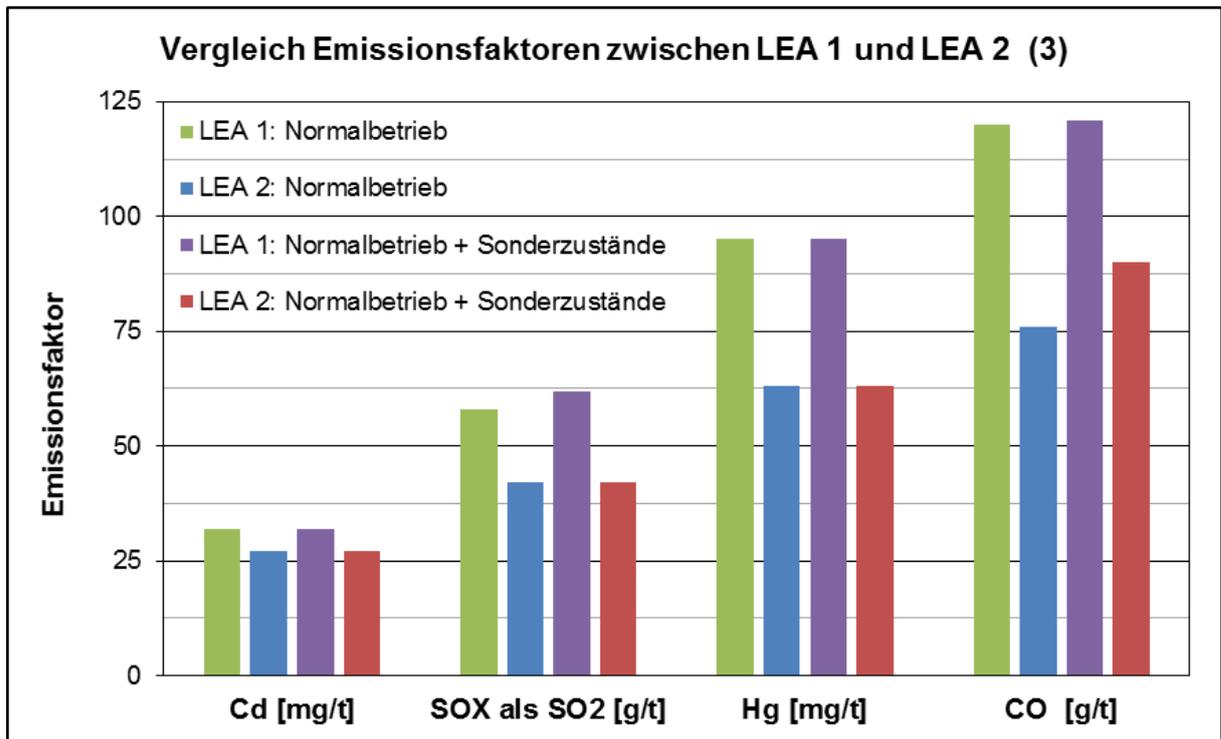


Abbildung 3: Vergleich der Emissionsfaktoren für Cd, SO<sub>x</sub>, Hg und CO aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen

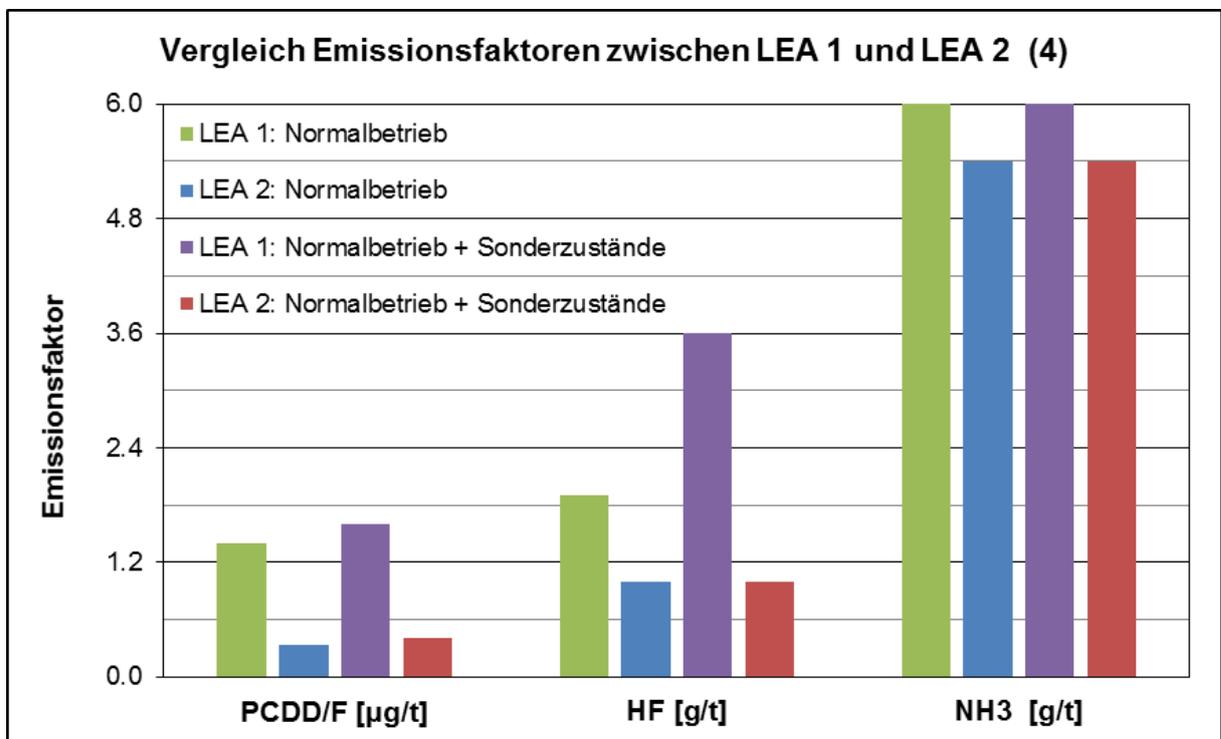


Abbildung 4: Vergleich der Emissionsfaktoren für PCDD/F, HF und NH<sub>3</sub> aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen

## 5.2 Vergleich der Emissionsfaktoren von KVA aus dem Normalbetrieb

Werden die Emissionsfaktoren der Schweizer KVA mit den Emissionsfaktoren von anderen Emissionsquellen verglichen, so ist zu berücksichtigen, dass sich diese meist nur auf den Normalbetrieb beziehen (keine Berücksichtigung von Sonderzuständen). Deshalb wurden in der nachfolgenden Tabelle nur die Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb aufgeführt.

Schadstoff	LEA 2	LEA 1	EMEP/EEA
<b>NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>354</b>	379	1'071
<b>SO<sub>x</sub> als SO<sub>2</sub></b> [g/t]	<b>42</b>	58	87
<b>HCl</b> [g/t]	<b>6.5</b>	14.9	k. A.
<b>HF</b> [g/t]	<b>1.0</b>	1.89	k. A.
<b>NH<sub>3</sub></b> [g/t]	<b>5.4</b>	6.0	3.0
<b>VOC als C</b> [g/t]	<b>8.2</b>	12.4	5.9
<b>CO</b> [g/t]	<b>76</b>	120	41
<b>Staub</b> [g/t]	<b>7.2</b>	8.9	3.0
<b>Σ Pb + Zn</b> [mg/t]	<b>961</b>	1'640	82.5
<b>Hg</b> [mg/t]	<b>63</b>	95	18.8
<b>Cd</b> [mg/t]	<b>27</b>	32	4.6
<b>PCDD/F</b> [µg/t]	<b>0.334</b>	1.4	0.053

Tabelle 13: Vergleich der Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb aus LEA 1 und LEA 2 mit dem Emissionsfaktoren aus dem EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013<sup>4</sup>

Die Emissionsfaktoren aus dem EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013<sup>4</sup> für die Verbrennung von Siedlungsabfällen basieren auf Messungen aus Dänemark (Nielsen et al., 2010). Die Messungen wurden im Anschluss an die Umsetzung der EU-Abfallverbrennungsrichtlinien durchgeführt. Die Emissionsfaktoren sind repräsentativ für KVA, welche mit modernster Rauchgasreinigungs-Technik ausgerüstet sind (Entschwefelung und Entstickung, Nasswäscher, Gewebe- oder Elektrofilter sowie Aktivkohledosierung).

Da die Grenzwerte für Quecksilber in der EU deutlich tiefer sind, führen die für die Einhaltung dieser Grenzwerte ergriffen Massnahmen zu deutlich tieferen Schwermetall- und PCDD/F-Emissionen als in der Schweiz. Die höheren Emissionsfaktoren für Stickstoffoxide sind wohl auf die höheren Grenzwerte in der EU zurückzuführen. So gilt z. B. in Deutschland für Abfallverbrennungsanlagen ein Tagesmittelwert von 200 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> (17. BImSchV). In der Schweiz ist in der LRV ein Grenzwert von 80 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> festgeschrieben (Mittelung der Messwerte über eine Betriebsperiode von mehreren Stunden). Dadurch sind wohl die Emissionsfaktoren für Ammoniak in der EU tiefer als in der Schweiz (geringere Ammoniakzugabe zur Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte notwendig).

<sup>4</sup> Quelle: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013, 5.C.1.a Municipal waste incineration, Table 3-1 : Tier 1 emission factors for source category

## 6. Beurteilung Messberichte und Empfehlungen

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Vielzahl an Messberichten ausgewertet. Je nach Messinstitut unterschieden sich die Berichte bezüglich Qualität, Struktur, Inhalt, Umfang sowie Vollständigkeit. Eine einheitliche Gestaltung zwischen den verschiedenen Messinstituten war nicht erkennbar.

Der Grossteil der Berichte war vollständig und wies eine ansprechende Qualität auf. In einigen Berichten fehlten aber wesentliche Abgaben (z. B. Abfalldurchsatz während der Messung). Zudem war die Struktur der Berichte teilweise mangelhaft, das Herausfiltern der notwendigen Informationen war dadurch mit erheblichem Aufwand verbunden. Dies auch, weil die Berichte oftmals sehr umfangreich waren (z. B. detaillierte Angaben zur Messmethodik).

Damit die Auswertung der Berichte zur Berechnung von Emissionsfaktoren zukünftig vereinfacht und effizienter gestaltet werden kann, könnte durch die Messinstitute oder den Betreiber ein zusätzliches Formular (z. B. in Form einer Tabelle) ausgefüllt werden. Dieses sollte dann nur die notwendigen Angaben für die Berechnung der Emissionsfaktoren enthalten. Dieses Formular kann dann gleich als Zusammenfassung der LRV-Messberichte vorgegeben werden. Dabei müssten folgende Angaben gemacht werden, damit anschliessend eine effiziente Berechnung der Emissionsfaktoren erfolgen kann:

- Abfalldurchsatz während der Messung in t/h (falls möglich zusätzlich eine Angabe zu Abfallzusammensetzung)
- Angabe, ob Klärschlamm verbrannt wird und falls ja, in welchen Mengen
- Jährlich verbrannte Abfallmenge in t/a (dadurch lässt sich z. B. abschätzen, ob die Anlage während den Messungen einen durchschnittlichen Abfalldurchsatz aufwies)
- Produzierte Dampfmenge während der Messung in t/h (falls keine Angabe zur verbrannten Abfallmenge vorliegt, kann anhand der Dampfmenge auf die Abfallmenge geschlossen werden)
- Heizwert (Energieinhalt des Abfalls)
- Jährliche Anzahl Betriebsstunden (dadurch lässt sich z. B. anhand des Abfalldurchsatzes die jährlich verbrannte Abfallmenge abschätzen, falls diese nicht vorliegt)
- Anzahl und Schaltungen der Ofen- und Rauchgasreinigungslinien sowie der Kamine (es muss klar erkenntlich sein, wo die Schadstoffkonzentrationen gemessen wurden und ob mehrere Ofenlinien auf eine Rauchgasreinigungslinie oder einen Kamin geführt werden)
- Schadstoffkonzentrationen nach LRV Anhang 1 Ziffer 23 (trockenes Abgas im Normzustand, Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 %)
- Sauerstoffgehalt im trockenen Abgas (Umrechnung von Messwerten auf Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt)

- Abgasvolumenstrom, -feuchte und -temperatur (idealerweise Angabe des normierten, trockenen Abgasvolumenstroms bei einem Bezugs-O<sub>2</sub>-Gehalt von 11 %)
- Angaben zu Anzahl und Dauer von Sonderzuständen (An- und Abfahrvorgängen sowie Betriebsstörungen und deren Auswirkungen → z. B. Umfahrung des SCR)

Die Messberichte zu den Emissionen der KVA werden zu Händen der Kantone verfasst, welche die Einhaltung der LRV-Grenzwerte überwachen. Für das BAFU ist es dann jeweils aufwendig, die notwendigen Daten zur Berechnung der Emissionsfaktoren zu beschaffen (zwecks Aktualisierung der Emissionsinventare für die Schweiz). Deshalb wäre es wünschenswert, dass sämtliche oben aufgeführten Angaben dem BAFU unaufgefordert und in kompakter Form zur Verfügung gestellt werden (→ vorgegebenes Formular).

Diese Studie basiert grösstenteils auf den in den LRV-Messberichten ausgewiesenen Schadstoffkonzentrationen (Messungen durch Messinstitute mit eigenen Messgeräten). Dabei handelt es sich um 4- und 6-Stundenmittelwerte, welche meist alle zwei Jahre erhoben werden. Damit die Emissionsfaktoren auf eine noch breitere Datenbasis abgestützt werden können und die Plausibilität weiter erhöht werden kann, könnten auch die Monatsberichte herangezogen werden. Diese werden von den Anlagebetreibern ebenfalls zu Händen der Kantone verfasst und enthalten normalerweise Tages- und Monatsmittelwerte der kontinuierlichen Betriebsmessungen (keine Schwermetall- und PCDD/F-Messungen). Sofern diese Daten sauber aufbereitet ans BAFU weitergeleitet werden, können diese mit vertretbarem Aufwand zur ständigen Aktualisierung der jeweiligen Emissionsfaktoren verwendet werden (Schwermetall- und PCDD/F-Messungen müssten jeweils nachgereicht werden). Dies bedingt allerdings, dass auf den Anlagen eine Volumenstrommessung vorhanden ist, deren Messdaten ebenfalls übermittelt werden. Zudem müssen die Betriebsmessgeräte jeweils im Rahmen der LRV-Messungen überprüft und gegebenenfalls kalibriert werden. Wünschenswert wäre zudem, dass die kontinuierlichen Betriebsmessgeräte einen grösseren Messbereich aufweisen, damit die Emissionen auch während Sonderzuständen gemessen werden können.

TBF + Partner AG  
Planer und Ingenieure

Projektleitung: Trimurti Irzan, Markus Wieduwilt  
Projektingenieur: Niklaus Bergamin

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb, zusätzliche Emissionsfaktoren für An- und Abfahrphasen und den Ausfall der Entstickung sowie die Summe über alle Betriebszustände im Vergleich mit Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV	2
Tabelle 2: Emissionsfaktoren von SAVA für den Normalbetrieb im Vergleich mit Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb	2
Tabelle 3: Betriebsdaten und Betriebszustände von KVA während den An- und Abfahrphasen, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2	8
Tabelle 4: Zusätzliche Emissionen von KVA während den An- und Abfahrphasen, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2	8
Tabelle 5: Betriebsdaten und Betriebszustände von KVA bei einem Ausfall der Entstickung bzw. bei der Umfahrung von SCR und Wäscher, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2	9
Tabelle 6: Zusätzliche Emissionen von KVA bei einem Ausfall der Entstickung bzw. bei der Umfahrung von SCR und Wäscher, Vergleich der Annahmen für die Projekte LEA 1 und LEA 2	9
<i>Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte nach LRV (Anhang 2, Ziffer 714)</i>	10
Tabelle 8: Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb, zusätzliche Emissionsfaktoren für An- und Abfahrvorgänge und den Ausfall der Entstickung sowie die Summe über alle Betriebszustände im Vergleich mit Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV	13
Tabelle 9: Emissionsfaktoren von SAVA für den Normalbetrieb im Vergleich mit Emissionsfaktoren von KVA für den Normalbetrieb	15
Tabelle 10: Messunsicherheit der Messwerte in den LRV-Messberichten und demzufolge Messunsicherheit der ausgewiesenen Emissionsfaktoren	16
Tabelle 11: Quantile der Emissionsfaktoren der einzelnen KVA aus dem Normalbetrieb sowie Mittelwert über alle KVA für den Normalbetrieb (gewichtete Mittelung mit der jährlich verbrannten Abfallmenge)	17
Tabelle 12: Vergleich der Emissionsfaktoren aus den Projekten LEA 1, LEA 2 sowie den Emissionsfaktoren berechnet mit den Emissionsgrenzwerten der LRV	18
Tabelle 13: Vergleich der Emissionsfaktoren aus dem Normalbetrieb aus LEA 1 und LEA 2 mit dem Emissionsfaktoren aus dem EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013	21

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Emissionsfaktoren für NO <sub>x</sub> und Σ Pb + Zn aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen	19
Abbildung 2: Vergleich der Emissionsfaktoren für Staub, VOC und HCl aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen	19
Abbildung 3: Vergleich der Emissionsfaktoren für Cd, SO <sub>x</sub> , Hg und CO aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen	20
Abbildung 4: Vergleich der Emissionsfaktoren für PCDD/F, HF und NH <sub>3</sub> aus den Projekten LEA 1 und LEA 2 mit und ohne Berücksichtigung von Sonderzuständen	20