



Leuenberger Energie- und Umweltprojekte

Bundesamt für Umwelt BAFU, Sektion Luftreinhaltung und NIS

Entwicklung und Prognose der Emissionsfaktoren Feuerungen für den Zeitraum 1990 – 2035

Bericht

Januar 2012

leupro
Leuenberger
Energie- und Umweltprojekte
Quellenstrasse 31
8005 Zürich

Inhalt

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	AUSGANGSLAGE	4
3	MATERIAL UND METHODEN	4
3.1	DATENQUELLEN	4
3.2	METHODEN	5
3.2.1	<i>Parameter</i>	5
3.2.2	<i>Datengrundlage</i>	7
3.2.3	<i>Schätzung der Emissionsfaktoren 1990</i>	7
3.2.4	<i>Auswertung 2000</i>	7
3.2.5	<i>Auswertung 2010</i>	8
3.2.6	<i>Prognose 2020 und 2035</i>	8
3.2.7	<i>Weitere Auswertungen</i>	8
4	RESULTATE	9
4.1	KOHLENMONOXID (CO)	9
4.2	STICKOXIDE (NO _x)	9
5	DISKUSSION	10
5.1	KOHLENMONOXID (CO)	10
5.2	STICKOXIDE (NO _x)	11
6	FAZIT	13
7	LITERATUR	15
8	ANHANG	16
8.1	ANHANG 1	16
8.2	ANHANG 2	18
8.3	ANHANG 3	19
8.4	ANHANG 4	20
8.5	ANHANG 5	21
8.6	ANHANG 6	22
8.7	ANHANG 7	23
8.8	ANHANG 8	24
8.9	ANHANG 9	25
8.10	ANHANG 10	26
8.11	ANHANG 11	27
8.12	ANHANG 12	28
8.13	ANHANG 13	29

1 Zusammenfassung

Emissionsfaktoren beschreiben den spezifischen Schadstoffausstoss bezogen auf den Energiegehalt des Brennstoffs und eignen sich deshalb für den direkten Vergleich der Luftbelastung durch verschiedene Verbrennungstechnologien und Brennstoffe.

Die vorliegende Studie analysiert die Emissionsfaktoren für Kohlenmonoxid und Stickoxide von heizöl- bzw. erdgasbetriebenen Feuerungen und stationären Gasmotoren. Die Bestimmung der aktuellen Emissionsfaktoren erfolgt erstmals auf einer breiten Datenbasis von über 200'000 Messungen der Feuerungskontrolle aus acht Kantonen. Zusammen mit älteren Datensätzen aus den Jahren 2000–2004 der Stadt Zürich und des Kantons Bern konnte so die Entwicklung der Emissionsfaktoren für Feuerungen in verschiedenen Kategorien von 1990 bis 2010 berechnet und eine Prognose bis zum Jahr 2035 erstellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass in den letzten 20 Jahren bei allen Feuerungen erhebliche Fortschritte bei der Reduktion der Luftbelastung durch Kohlenmonoxid und Stickoxide erzielt wurden. Wobei der Rückgang der Emissionsfaktoren für Kohlenmonoxid im Durchschnitt leicht über dem für Stickoxide liegt, demgegenüber jedoch stärkere statistische Schwankungen aufweist.

Bezogen auf die Brennstoffe fallen die Emissionsreduktionen beider Schadstoffe beim Erdgas höher aus als beim Heizöl. Bezüglich der Kohlenmonoxid-Emissionen unterscheiden sich die Brennstoffe inzwischen nicht mehr, während heizölbetriebene Feuerungen im Durchschnitt höhere Stickoxid-Emissionen aufweisen als Gasfeuerungen.

Mit Ausnahme der Stickoxid-Emissionen bei Heizölfeuerungen liegen die aktuellen Emissionsfaktoren für die Feuerungen deutlich unter den LRV-Grenzwerten. Im Allgemeinen liegen die Emissionsfaktoren für Kohlenmonoxid weitaus tiefer unter den aktuellen Grenzwerten, als jene für Stickoxide.

Die Emissionsfaktoren der gasbetriebenen stationären Verbrennungsmotoren liegen beim Kohlenmonoxid deutlich unter den LRV-Grenzwerten. Demgegenüber unterschreiten bei den Stickoxiden nur die Klärgas- und Biogasmotoren den LRV-Grenzwert. Beim Kohlenmonoxid erzielen die Erdgasmotoren die tiefsten Durchschnittswerte, während die Klärgasmotoren bei den Stickoxiden die tiefsten Emissionsfaktoren aufweisen.

2 Ausgangslage

Emissionsfaktoren von Feuerungen und stationären Motoren beschreiben die spezifischen Schadstoff-Emissionen in Bezug auf den Energieinhalt des eingesetzten Brennstoffs.

Emissionsfaktoren werden zu folgenden Zwecken benötigt:

- Ökologisches Kriterium bei der Auswahl von Wärmeerzeugungssystemen (Heizungen)
- Grundlage für die Erstellung von Umweltverträglichkeitsberichten für grössere Projekte
- Grundlage für die Erstellung von Schadstoffinventaren und Immissionsbelastungskarten, welche als Grundlage für die Massnahmenplanung dienen.

Die Liste der Emissionsfaktoren wurde letztmals im Jahr 2005 aktualisiert. In der Zwischenzeit hat der Stand der Technik weitere Fortschritte gemacht. Eine erste Neuberechnung im Jahr 2009 mit den Daten der Stadt Zürich, der Kantone Bern, Basel Stadt und Landschaft (stationäre Motoren) hat gezeigt, dass die Auswertung bezüglich der Anlagenkategorien an den Stand der Technik angepasst werden muss. Eine Fortschreibung der Emissionsfaktoren in den bisher verwendeten Kategorien erschien nicht mehr sinnvoll.

Die aktuelle Neuberechnung erfolgte in enger Absprache mit dem Auftraggeber und dient vor allem der Aktualisierung des Luftschadstoffinventars der Schweiz (EMIS).

3 Material und Methoden

3.1 Datenquellen

Für die Auswertung der Emissionsdaten konnten aktuelle Daten der Feuerungskontrolle (Jahre 2009-2011) aus insgesamt acht Kantonen herangezogen werden. Damit liegt den berechneten Emissionsfaktoren erstmals eine breit gestreute Datenbasis aus rund 30 % der Schweizer Kantone zugrunde. Im Einzelnen wurde Datenmaterial folgender Institutionen verwendet:

Herkunft der Daten	Brennstoff/Technische Bauart	Anzahl Datensätze
Umwelt- und Gesundheitsschutz der Stadt Zürich (UGZ) Walchstrasse 31 Postfach 3251 8021 Zürich Abteilung Umwelt / Feuerungen Henry Kehrli Lukas Meier	Erdgas und Heizöl EL: <ul style="list-style-type: none"> • Gebläsebrenner • Atmosphärische Brenner • Verdampfungsbrenner Erdgas, Biogas und Heizöl EL: <ul style="list-style-type: none"> • Grossfeuerungen (Feuerungswärmeleistung $\geq 1\text{MW}$) • Motoren 	HEL: 19'562 Erdgas: 20'338 Motoren: 67
Kanton Bern, Beco Berner Wirtschaft Immissionsschutz Laupenstrasse 22 3011 Bern Jean-Jaques Hüsler	Erdgas und Heizöl EL <ul style="list-style-type: none"> • Gebläsebrenner • Atmosphärische Brenner • Verdampfungsbrenner 	HEL: 107'441 Erdgas: 24'986
Kanton Basel-Landschaft Bau- und Umweltschutzdirektion (BUD) Industrie und Gewerbe Cosimo Todaro	Erdgas, Biogas und Klärgas: <ul style="list-style-type: none"> • Motoren 	Motoren: 90

Herkunft der Daten	Brennstoff/Technische Bauart	Anzahl Datensätze
Basel-Stadt, Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt, Amt für Umwelt und Energie, Hochbergerstrasse 158, 4019 Basel Heizungs- und Tankanlagen Daniel Rentsch	Erdgas und Heizöl EL: <ul style="list-style-type: none"> • Gebläsebrenner • Atmosphärische Brenner • Verdampfungsbrenner 	HEL: 6'295 Erdgas: 5'179
Firma Kost + Partner AG Industriestrasse 14, CH-6210 Sursee Emissionskataster Kanton Luzern Roland Müller, Thekla Scherer	Erdgas und Heizöl EL: <ul style="list-style-type: none"> • Grossfeuerungen (Feuerungswärmeleistung $\geq 300\text{kW}$) • Motoren 	HEL: 315 Erdgas: 185 Motoren: 25
Geschäftsstelle Feuerungskontrolle Lindenhausstrasse 7, 6005 Luzern (Kantone LU, SZ, UR, ZG) Peter Marbacher	Erdgas und Heizöl EL: <ul style="list-style-type: none"> • Gebläsebrenner • Atmosphärische Brenner • Verdampfungsbrenner 	HEL: 19'900 Erdgas: 3'043
Kanton Zug, Baudirektion Amt für Umweltschutz Aabachstrasse 5, 6300 Zug Luftreinhaltung/Immissionen/Emissionen Gabriele Llopart	Erdgas, Biogas und Klärgas: <ul style="list-style-type: none"> • Motoren 	Motoren: 7
Summe der Datensätze:		207'433

Für die Bestimmung der Emissionsfaktoren von 1990 wurden zusätzlich bei leupro vorhandene Datensätze aus den Jahren 2000-2004 der Feuerungskontrolle des Kantons Bern (2004) und der Stadt Zürich (2000-2004) herangezogen.

3.2 Methoden

Nach der Bereitstellung der Emissionsdaten durch die genannten Institutionen wurden diese gesichtet, validiert, bereinigt und der Umfang der verwendbaren Datensätze festgestellt (siehe Tabelle oben).

Sofern entsprechende Angaben vorhanden waren, wurden diese nach Anhang 1 als einheitliche Variablen codiert.

Für die Datenauswertung erfolgte in Absprache mit dem BAFU eine Einteilung der Daten in Kategorien. Ziel war die Nutzung der Ergebnisse in der EMIS-Datenbank, sowie zur Aktualisierung des Arbeitsblatts Emissionsfaktoren Feuerungen. Die zur Aufteilung verwendeten Parameter werden im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert.

Die ermittelten Emissionsfaktoren ermöglichen Rückschlüsse auf den Stand der Verbrennungstechnologie in der angegebenen Kategorie und im betreffenden Zeitraum. Die Angabe der Standardabweichung bzw. des Standardfehlers in der Auswertung gibt Hinweise auf die Variation der Messwerte.

3.2.1 Parameter

Bei den **Feuerungen** (Heizkesseln) erfolgte die Auswertung nach Brennstoffen und technischer Bauart:

- **Erdgas:** Gebläsebrenner, atmosphärische Brenner
- **Heizöl EL:** Gebläsebrenner, Verdampfungsbrenner

Weiterhin wurde nach der Feuerungswärmeleistung (FWL) entsprechend folgender Tabelle unterschieden:

Feuerungswärmeleistung (FWL)	Kategorie entsprechend internationaler Bezeichnung
< 50 kW	Heizkessel Haushalte
50 – 350 kW	Heizkessel Landwirtschaft, Dienstleistungen, Gewerbe
> 350 kW	Heizkessel Industrie
> 50 kW	Heizkessel Fernwärme

Die Aufteilung der Heizkessel nach technischer Bauart des Brenners wurde vom Auftraggeber ausdrücklich gewünscht, um die Emissionsfaktoren für das Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen nutzen zu können. Für die EMIS-Datenbank ist diese Aufteilung hingegen ungeeignet, so dass jeweils das gewichtete Mittel berechnet wurde.

Bei den **Motoren** wurde aufgrund des geringen Datenumfanges lediglich nach Brennstoffen (Erdgas, Biogas, Klärgas) unterschieden.

Die statistischen Auswertungen erfolgten für die gemessenen Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und den Abgasverlust. Dabei wurden jeweils das arithmetische Mittel, die Standardabweichung und der Standardfehler¹ bestimmt.

Die Stickoxid-Emissionen im Abgas bestehen aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Die Stickoxide wurden als NO gemessen und als Stickstoffdioxid angegeben (siehe Luftreinhalteverordnung 2009 und BUWAL 2001).

Der durchschnittliche Abgasverlust wurde nur bei den Feuerungen bestimmt und nicht mehr weiter ausgewertet, da im Verlauf des Auftrags die Ermittlung von Emissionsfaktoren für die EMIS-Datenbank im Vordergrund stand.

Für die statistische Datenanalyse wurden die einzelnen Datensätze in das Statistikprogramm IBM SPSS² importiert und zu einer Datei zusammengefügt. Für die Analysen wurden aus diesem Datensatz die Daten entsprechend der beschriebenen Kategorien gefiltert. Die Auswertung erfolgte getrennt für Erdgas, Heizöl EL und Motoren.

Die Ergebnisse in mg/m³ Abgas wurden anschliessend auf den Energiegehalt des Brennstoffs (Heizwert H_u) bezogen und in mg/MJ umgerechnet. Dies geschah basierend auf einem trockenen Abgasvolumen V_{Atr} mit einem Bezugssauerstoffgehalt entsprechend der Luftreinhalteverordnung (LRV) von 3% bei Feuerungen und 5% bei Motoren. Nachfolgende Tabelle fasst die grundlegenden Faktoren der Berechnung zusammen.

¹ Standardfehler (mittlerer Fehler, Standard Error, SE):

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

s = Standardabweichung
n = Stichprobenumfang

² IBM SPSS Statistics Version 19 (Release 19.0.0)

Umrechnungsfaktoren EF bezogen auf Energiegehalt

	Bauart	Heizwert H_u MJ/kg	V_{Atr} 1) m ³ /kg	Faktor mg/m ³ ↓ mg/MJ
Erdgas	Heizkessel	36.3 ^a	10.2 ^b	0.282 ³⁾
Heizöl EL	Heizkessel	42.6	12.4	0.291 ⁴⁾
Motoren	Erdgasmotoren	36.3 ^a	11.6 ^b	0.320 ⁵⁾
	Biogasmotoren ²⁾	24.0 ^a	8.04 ^b	0.335 ⁶⁾

a) MJ/m³

b) m³/m³

1) Trockenes Abgasvolumen V_{Atr} bei Bezugssauerstoffgehalt nach LRV (3% O₂ bei Feuerungen, 5% O₂ bei Motoren)

2) einschliesslich Klärgasmotoren

3) Quelle: BUWAL 2005. Umrechnungsfaktoren Erdgas (siehe Anhang)

4) Quelle: BUWAL 2005. Umrechnungsfaktoren Heizöl „Extra leicht“ (siehe Anhang)

5) Quelle: BUWAL 2005. Arbeitsblatt Emissionsfaktoren (siehe Anhang)

6) Quelle: Interner Bericht AWEL

3.2.2 Datengrundlage

Basis für die Prognose der Emissionsfaktoren für die Jahre 2020 und 2035 bildete Entwicklung der EF zwischen 2000/04 und 2010/11, da für diese Zeiträume folgende Datensätze zur Verfügung standen:

- (1) Messdaten der Feuerungskontrolle 2010/11 Schweiz (BE, BL, BS, LU, SZ, UR, ZG, Stadt Zürich)
- (2) Messdaten der Feuerungskontrolle 2000-2004 (BE 2004, Stadt Zürich 2000-2004)

3.2.3 Schätzung der Emissionsfaktoren 1990

Zur nachträglichen Schätzung der Emissionsfaktoren (EF) für das Jahr 1990 wurde der Datensatz (2) herangezogen, da er zeitlich näher liegt und somit genauere Werte liefert. Erkennbar ist dies auch daran, dass eine analoge Auswertung mit dem Datensatz (1) von 2010/11 in allen Kategorien zu deutlich niedrigeren EF führt als die Berechnungen mit den Daten (2) von Anfang 2000.

Zur Bestimmung der EF 1990 wurden alle Messdaten von Feuerungsanlagen mit dem Baujahr 1990 und älter herangezogen.

Da man aber weiterhin davon ausgehen muss, dass auch die rückblickende Bestimmung eines EF für 1990 mit einem Datensatz aus den Jahren 2000/2004 die Emissionen unterschätzt, wurden die EF 1990 jeweils um den Standardfehler erhöht.

3.2.4 Auswertung 2000

Die Berechnung der EF für 2000 erfolgte analog zur Auswertung 1990 ebenfalls mit dem Datensatz (2) jedoch ohne eine Erhöhung der EF um den Standardfehler, da die Messdaten maximal 4 Jahre vom Betrachtungsjahr abweichen.

3.2.5 Auswertung 2010

Die EF 2010 wurden analog der vorangegangenen Auswertungen mit dem Datensatz (1) 2010/11 bestimmt.

3.2.6 Prognose 2020 und 2035

Die Voraussage für das Jahr 2020 basiert auf der Entwicklung der EF zwischen 2000 und 2010. Die vorherigen Jahre wurden in die Analyse nicht einbezogen, da sie aufgrund des Alters und der kleineren Stichprobe, verbunden mit z. T. erheblichen Standardabweichungen, zu grosse Ungenauigkeiten aufwiesen.

Der Basiswert für die prognostizierte Entwicklung der EF nach 2010 spiegelt somit die Abnahme der EF zwischen 2000 und 2010 in den jeweiligen Kategorien wider. Da die Bestimmung der betrachteten EF jeweils auch alle älteren Feuerungsanlagen (Baujahr vor dem Messjahr) beinhaltet, schliesst der entsprechende Basiswert neben dem technischen Fortschritt im Anlagenbau auch die Erneuerungsrate der Geräte ein.

Eine Abnahme der EF in gleich bleibendem Tempo (gleiche bleibende Reduktion der Emissionen und Erneuerungsrate) erschien jedoch aus verschiedenen Gründen, die nachfolgend diskutiert werden, in Zukunft unwahrscheinlich, weshalb die Entwicklung mit Hilfe eines Korrekturfaktors um 25 % gebremst wurde.

Die Bestimmung des EF für 2035 erfolgte analog zur Prognose für 2020. Die Fortschreibung der Entwicklung basiert somit auf dem gleichen Basiswert. Da wir jedoch die technischen Möglichkeiten zur weiteren Emissionsreduktion als abnehmend betrachten und auch von einer abnehmenden Erneuerungsrate ausgehen, wurde der Basiswert der Entwicklung für den Zeitraum 2020-2035 um 50% reduziert.

Die mit dieser Methode errechneten Prognosewerte für die Jahre 2020 und 2035 wurden anschliessend mit aktuellen Emissionswerten der Hersteller verglichen und plausibilisiert. In einem nächsten Schritt erfolgte eine teilweise Anpassung der berechneten Prognosewerte auf der Basis von Expertenmeinungen, einer separaten Betrachtung der Gesamtentwicklung (1990-2035) in den einzelnen Kategorien, im Vergleich mit BAFU-internen Daten und in Diskussion mit dem Auftraggeber.

3.2.7 Weitere Auswertungen

Neben den bereits beschriebenen Analysen wurden die aktuellen Datensätze der Feuerungskontrolle aus den Jahren 2010 und 2011 auch in Bezug auf das Alter der Feuerungsanlage ausgewertet.

Hierzu wurden die Datensätze vor der Analyse nach Jahrgängen gefiltert:

(1) \leq 1990, 2000, 2010 (Feuerungsanlagen des jeweiligen Jahrgangs und älter)

(2) = 1990, 2000, 2010 (Feuerungsanlagen des jeweiligen Jahrgangs)

Während (1) quasi einen Rückblick auf die Emissionssituation aller Feuerungsanlagen (die heute noch existieren) in den gewählten Jahren ermöglichte, zeigte (2) den jeweiligen Stand der Technik in Bezug auf die betrachteten Emissionen im jeweiligen Jahr.

4 Resultate

Insgesamt lässt sich bei allen Emissionsfaktoren ein abnehmender Trend erkennen. In den letzten 20 Jahren nehmen die Kohlenmonoxid-Emissionen (–61%) im Gesamtdurchschnitt etwas stärker ab als die Stickoxid-Emissionen (–55%). Dabei weisen die CO-Emissionen im Durchschnitt verglichen mit den Stickoxidemissionen deutlich grössere statistische Schwankungen auf, wie sich an den höheren Standardabweichungen erkennen lässt.

Alle Ergebnisse bezüglich der Feuerungen sind in den Anhängen 2 - 9 tabellarisch zusammengefasst und im Vergleich zu bestehenden EMIS-Daten bzw. den LRV-Grenzwerten graphisch dargestellt.

Bei den **Motoren** zeigt sich bezüglich der Messwertschwankungen ein interessanter Unterschied zwischen den Brennstoffen. Während die Erdgasmotoren eine extrem hohe Standardabweichung bei Kohlenmonoxid und Stickoxiden aufweisen, fällt diese bei Biogas und Klärgas geringer aus. Dennoch liegen die Standardabweichungen und damit die Varianz der Messwerte bezüglich des Kohlenmonoxids deutlich über denen der Stickoxide.

Die Emissionsfaktoren der Motoren zeigen die Tabellen im Anhang 10.

4.1 Kohlenmonoxid (CO)

Feuerungen

Die Kohlenmonoxid-Emissionen folgen grundsätzlich einem abnehmenden Trend. Bei den Heizkesseln schwankt dieser im betrachteten Zeitraum (1990-2035) je nach Anlagenkategorie und Brennstoff zwischen 50% und 80% Reduktion. Dabei weisen grössere Feuerungsanlagen (>50 kW) grundsätzlich niedrigere CO-Emissionen auf als Heizkessel in Haushalten. Im Vergleich der Brennstoffe Heizöl und Erdgas lässt sich eine Abnahme der Unterschiede bezüglich der Kohlenmonoxid-Emissionen erkennen. Während um 1990 alle Gas-Heizkessel noch einen deutlich höheren CO-Ausstoss erkennen lassen, hat sich dieser in den Jahren 2000 und 2010 bereits deutlich reduziert und wird in Zukunft wahrscheinlich nicht mehr von Bedeutung sein. Insgesamt fallen die CO-Emissionsreduktionen beim Heizöl geringer aus als beim Erdgas. Während beim Erdgas zwischen 1990 und 2035 mit einer Reduktion der Kohlenmonoxidemissionen von durchschnittlich 77% ausgegangen werden kann, liegt diese beim Heizöl bei 70%.

Motoren

Die CO-Emissionsfaktoren der Erdgasmotoren liegen um rund 60% niedriger als die der Klärgas- und Biogasmotoren. Wobei die Biogasmotoren nochmals schlechter abschneiden als die Klärgasmotoren. Somit erzeugen Biogasmotoren durchschnittlich rund 50% und Klärgasmotoren rund 70% mehr Kohlenmonoxid als Erdgasmotoren.

Im Gegensatz dazu ist die Varianz der Messwerte bei den mit Klärgas und Biogas betriebenen Motoren niedriger als bei jenen die mit Erdgas betrieben werden. Die Standardabweichung der CO-Messwerte fällt bei Klärgas- und Biogasmotoren um rund 60% geringer aus als bei Erdgasmotoren.

4.2 Stickoxide (NO_x)

Feuerungen

Auch bei den Stickoxiden lässt sich im Bereich der Heizkessel eine deutliche Emissionsreduktion im betrachteten Zeitraum (1990-2035) erkennen. Die Abnahme schwankt ebenfalls je nach Anlagenkategorie zwischen 50% und 80%. Insgesamt fällt die Emissionsreduktion im betrachteten Zeitraum (1990-2035) beim Erdgas (–75%) wieder deutlicher aus als beim Heizöl (–51%). Allein im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 wo Messwerte zur Verfügung standen, haben sich die Stickoxid-Emissionen beim Erdgas mit 40% doppelt so stark reduziert wie beim Heizöl mit 20%. Bezüglich der Stickoxide schneidet Erdgas heute im Durchschnitt besser ab als Heizöl.

Wie bereits erwähnt fallen die Schwankungen der Messwerte im Vergleich zu den Kohlenmonoxid-Emissionen geringer aus, wie sich an den kleineren Standardabweichungen erkennen lässt.

Für die Stickoxidemissionen ebenfalls Bedeutung ist der Stickstoffgehalt des Brennstoffs (siehe Diskussion). Dieser hat sich beim Heizöl EL (Euro-Qualität) zwischen 2003 und 2009 nach Laboranalysen der Intertek Caleb Brett³ kaum verändert und schwankt relativ stark um den Mittelwert von rund 3 mg/MJ (± 1.7 mg/MJ). Demgegenüber hat Öko-Heizöl schwefelarm laut Schweizer Norm für Mineralölprodukte (SN 181160-2:2009) einen maximalen Stickstoffgehalt von rund 2.3 mg/MJ, während für Heizöl EL (Euro-Qualität) kein Grenzwert besteht.

Beim Erdgas enthält der Brennstoff (Methan) selbst keinen chemisch gebundenen Stickstoff. Als Verunreinigung weist das in der Schweiz vertriebene Erdgas laut Swissgas⁴ lediglich einen Stickstoffgehalt von rund 2.5 Vol.-% auf, was im Vergleich zum Stickstoffgehalt der Verbrennungsluft vernachlässigbar gering ist.

Motoren

Im Gegensatz zum Kohlenmonoxid schneiden die Biogas- und Klärgasmotoren bezüglich der Stickoxidemissionen besser ab als die erdgasbetriebenen Motoren. Während die Biogasmotoren durchschnittlich 3% geringere NO_x-Emissionen aufweisen, erreichen die Klärgasmotoren sogar einen rund 45% niedrigeren Stickoxidausstoss.

Die Variation der Messwerte und damit die Standardabweichung liegt bei Klärgas- und Biogasmotoren um rund 80% unter jener der Erdgasmotoren.

5 Diskussion

Bei den ermittelten Emissionsfaktoren für CO und NO_x handelt es sich um Mittelwerte (arithmetisches Mittel) der im Rahmen der Feuerungskontrolle im Abgas der Feuerungsanlagen gemessenen Schadstoffkonzentrationen (mg/m³ Abgas). Da diese Messwerte in der Regel eine relativ starke Streuung aufweisen, ist dies mit entsprechend hohen Standardabweichungen (bzw. Standardfehlern) der Mittelwerte verbunden. In diesen Fällen lässt sich auf eine hohe Abhängigkeit der Emissionen von den individuellen Feuerungsanlagen schliessen, während der Feuerungswärmeleistung (Kategorie) eine geringere Bedeutung zukommt.

Aber auch der Brennstoff und der gemessene Schadstoff kann bei der Streuung der Messwerte eine Rolle spielen. So lassen sich die geringen Schwankungen bei den Stickoxid-Emissionen im Vergleich zu den Kohlenmonoxid-Emissionen dadurch erklären, dass die bei der Verbrennung entstehenden Stickoxide im Wesentlichen von der Bauart des Brenners abhängig sind (z.B. Low-NO_x-Technologie). Demgegenüber lässt sich die Entstehung von Kohlenmonoxid in weiten Bereichen durch Einstellungen am Brenner regulieren (Luftzufuhr). Diese Zusammenhänge wurden in der vorliegenden Studie jedoch nicht näher untersucht.

Obwohl der insgesamt grosse Stichprobenumfang der Datensätze generell zuverlässige Mittelwerte liefern sollte, bleiben vor allem bei Kategorien mit weniger Datensätzen (Messungen) gewisse Unsicherheiten über die Bedeutung des Mittelwerts bestehen. Ob sich errechnete Mittelwerte und somit die dazugehörigen Anlagenkategorien bezüglich ihrer Emissionen tatsächlich unterscheiden, kann nur durch statistische Methoden (t-Test) ermittelt werden. Dies war nicht Bestandteil des vorliegenden Auftrags.

5.1 Kohlenmonoxid (CO)

Feuerungen

Die generell höheren Kohlenmonoxid-Emissionen bei kleinen Heizungsanlagen (< 50 kW) lassen sich damit erklären, dass bei grösseren Anlagen durch bessere Wartung eine höhere

³ Siehe www.intertek.ch

⁴ Siehe www.swissgas.ch

Ausbrandqualität erzielt wird. Auch lässt sich die Ausbrandqualität durch automatische Regulierung der Luftzufuhr erhöhen, was bei modernen Anlagen geschieht.

Die ermittelten Emissionsfaktoren liegen bei Erdgas und Heizöl seit dem Jahr 2000 deutlich unter dem LRV-Grenzwert (siehe Abbildungen Anhang 3 und 7). Während beim Heizöl die Emissionsfaktoren aller Kategorien den strengsten Grenzwert von 80 mg/m^3 (Gebläsebrenner) schon seit 1990 unterschreiten, liegen die CO-Emissionen beim Erdgas 1990 noch bei fast allen Kategorien deutlich über dem LRV-Grenzwert von 100 mg/m^3 . Eine Ausnahme bilden hier nur die Gaskessel der Industrie, die schon seit 1990 den Emissionsgrenzwert deutlich unterschreiten.

Beim Heizöl scheint somit bezüglich des Grenzwerts eine Unterscheidung zwischen Gebläsebrennern (80 mg/m^3) und Verdampfungsbrennern (150 mg/m^3) zumindest in den untersuchten Kategorien nicht mehr sinnvoll. Auch bei der schlechtesten Kategorie, den Haushalten, liegt der CO-Emissionsfaktor 2010 für beide Brennertypen um fast die Hälfte unter dem Grenzwert für Gebläsebrenner.

Der etwas höhere LRV-Grenzwert beim Erdgas wird ebenfalls deutlich unterschritten. Hier liegen die CO-Emissionsfaktoren heute je nach Kategorie um mehr als die Hälfte (Heizkessel Haushalte) bis über 60% (Heizkessel Industrie) unter dem Grenzwert.

In Zukunft sind zwar weitere Verbesserungen zu erwarten, diese werden jedoch geringer ausfallen, da keine neue Verbrennungstechnologie vor der Markteinführung steht. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass CO als Luftschadstoff nicht mehr im Zentrum der Bemühungen zur Luftreinhaltung steht. Dies ist vor allem von Bedeutung, da für die Bildung von CO bei der Verbrennung in gewissem Mass ein gegenläufiger Zusammenhang mit der Entstehung von Stickoxid-Emissionen besteht, deren Reduktion weiterhin aus lufthygienischer Sicht wünschenswert erscheint.

Motoren

Der erwähnte Zusammenhang zwischen Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen tritt besonders deutlich bei den Motoren hervor. Während die Kohlenmonoxidemissionen bei Biogas und Klärgas als Brennstoff deutlich höher liegen, werden bei den Stickoxiden vor allem bei den Klärgasmotoren deutlich niedrigere Emissionswerte erreicht.

Dennoch liegen auch ohne Berücksichtigung der Motorleistung alle untersuchten Motorenkategorien deutlich unter dem LRV-Grenzwert für stationäre Verbrennungsmotoren über 100 kW Leistung von 650 mg/m^3 CO im Abgas. Die Erdgasmotoren erreichen mit rund 348 mg/m^3 CO-Emissionen sogar fast die Hälfte des LRV-Grenzwerts.

5.2 Stickoxide (NO_x)

Feuerungen

Stickoxide können bei der Verbrennung grundsätzlich aus zwei Quellen entstehen: Einerseits aus dem Brennstoff und andererseits aus dem Luftstickstoff. Während die Bildung von Stickoxiden aus dem Brennstoff durch Verringerung des chemisch gebunden Stickstoffgehalts relativ leicht zu beeinflussen ist, lässt sich die Oxidation des in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoffs zu Stickoxiden nur durch bautechnische Massnahmen am Brenner reduzieren (Low-NO_x-Technologie).

Beim Erdgas kann der Stickstoffgehalt vernachlässigt werden, während er beim Heizöl durchaus eine Rolle spielt, da er im Brennstoff molekular gebunden ist (siehe 4.2). Dies erklärt, weshalb die Emissionsfaktoren für Stickoxide beim Heizöl generell höher liegen, als beim Gas. Mit dem Öko-Heizöl schwefelarm findet sich aber bereits eine schwefel- und stickstoffarme Variante auf dem Brennstoffmarkt, die das Potenzial besitzt in Zukunft zum Standard zu werden. Schon heute empfehlen Heizungsbauer die Verwendung von Öko-Heizöl schwefelarm, um bei kondensierenden Heizungen der Entstehung von korrosiven Kondensaten vorzubeugen.

Die hohen Reduktionsraten der Stickoxidemissionen bei den Gasheizungen im Vergleich zu den Ölheizungen im vergangenen Jahrzehnt weisen jedoch darauf hin, dass bei den Ölheizungen noch Potenzial besteht die Stickoxidemissionen über die Brennstoffqualität zu verringern.

Auch bezüglich der LRV-Grenzwerte schneiden die aktuellen Emissionsfaktoren (2010) der Stickoxide vor allem beim Heizöl schlecht ab. Der niedrigste LRV-Grenzwert für Heizkessel von 120 mg/m^3 wird nur im Bereich der Kategorie Industrie knapp unterschritten. Alle anderen Kategorien liegen leicht darüber. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Heizölf Feuerungen dieser Kategorien nicht gesetzeskonform betrieben werden. Beim Emissionsfaktor handelt es sich lediglich um einen Mittelwert der Emissionen aller gemessenen Heizungsanlagen. Hohe Grenzwertüberschreitungen einzelner Anlagen (Ausreisser) verursachen eine Verschiebung des Mittelwerts nach oben. Somit kann der Mittelwert über dem LRV-Grenzwert liegen, obwohl, die Mehrzahl der Feuerungsanlagen diesen eigentlich unterschreitet. Auch finden die Sanktionsmassnahmen der Feuerungskontrolle bei Grenzwertüberschreitungen keinen direkten Niederschlag in den Messdaten, da sich die Wiederholungsmessung nach der Sanierung der Anlage nicht unbedingt im gleichen Datensatz wieder findet bzw. den beanstandeten Emissionswert ersetzt. Dies ist aber gewollt, da sich nur so eine Momentaufnahme der tatsächlichen Emissionsbelastung durch die gemessenen Schadstoffe in der Schweiz erstellen lässt.

Eine telefonische Abklärung bei vier grösseren schweizerischen Lieferanten von Brennern und Heizkesseln ergab, dass die Reduktion von NO_x deutlich unter die Emissionsgrenzwerte kein Thema ist. Die niedrigsten Messwerte für Stickoxide bei Heizkesseln liegen momentan ca. $1/3$ unter dem Grenzwert. Systematische Abklärungen zum Potenzial der NO_x -Reduktion bei Feuerungsanlagen müssten bei den Entwicklungsabteilungen erfolgen, welche sich jedoch hauptsächlich im Ausland befinden.

Bei den Gasheizungen sieht das Bild etwas besser aus als bei den mit Heizöl betriebenen Anlagen. Hier wird seit 2010 der niedrigste LRV-Grenzwert von 80 mg/m^3 (Heizungsanlagen $> 12 \text{ kW}$ und $\leq 110^\circ\text{C}$ Heizmediumtemperatur) bei allen Kategorien knapp unterschritten.

Gleichzeitig wird an der Entwicklung der Stickoxidemissionen bei den Gasheizungen deutlich, dass durch feuerungstechnische Massnahmen erhebliche Emissionsreduktionen möglich sind (durchschnittlich 40% allein in den letzten zehn Jahren). Diese scheinen nun zumindest bei den Gasheizungen weitgehend ausgereizt zu sein und werden sich nun am Markt etablieren. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 20 Jahren sollte bis 2035 ein Grossteil der Heizungsanlagen erneuert worden sein.

Motoren

Wie bereits erwähnt, lassen sich niedrige Stickoxidemissionen bei den Motoren durch eine Verbrennung mit hohem Luftüberschuss (Magermotor) erzielen. Weshalb dies bei den mit Klärgas betriebenen Motoren deutlich besser funktioniert, als bei jenen, die Erdgas als Brennstoff nutzen, lässt sich nicht ohne weitere Recherche erkennen. Auch der ebenfalls deutliche Unterschied zwischen Biogas und Klärgas erscheint unklar. Hier könnte jedoch die längere Erfahrung mit Klärgasmotoren eine Rolle spielen.

Im Vergleich mit dem LRV-Grenzwert für stationäre Verbrennungsmotoren über 100 kW Leistung unterschreiten alle untersuchten Motorenkategorien den Wert von $400 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ für Biogas- und Klärgasmotoren deutlich (ohne Berücksichtigung der Motorleistung). Die Klärgasmotoren erreichen mit durchschnittlich $146 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ im Abgas sogar eine Emissionskonzentration, die fast ein Drittel unter dem Grenzwert liegt. Demgegenüber überschreitet die durchschnittliche Emissionskonzentration an Stickoxiden bei den Erdgasmotoren den entsprechenden LRV-Grenzwert (über 100 kW Leistung) von $250 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ (ohne Berücksichtigung der Motorleistung). Es stellt sich somit die Frage, ob ein höherer NO_x -Grenzwert für Biogas- und Klärgasmotoren heute noch gerechtfertigt ist.

Ebenfalls deutlich überschritten werden die NO_x -Grenzwerte für stationäre Motoren, die verschiedene Kantone und grössere Städte in ihren Massnahmenplänen zur Luftreinhaltung festgeschrieben haben. So schreiben die Kantone Basel Landschaft und Basel Stadt im

Massnahmenplangebiet einen NO_x -Grenzwert von 70 mg/m^3 vor, während die Stadt Zürich sogar einen Grenzwert von $50 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ in ihrem Massnahmenplan festgeschrieben hat (vgl. Anhang 11). Auch wenn die Mehrzahl der untersuchten Motoren in den genannten Städten und Gemeinden mit Massnahmenplan stehen, bedeutet das noch nicht, dass diese auch mehrheitlich die dort bestehenden strengeren Grenzwerte überschreiten. Es gilt die gleiche Einschränkung, die bei den Feuerungen bezüglich der Emissionsfaktoren über dem NO_x -Grenzwert bereits erwähnt wurde.

6 Fazit

Die Emissionsfaktoren für Kohlenmonoxid und Stickoxide zeigen in allen Bereichen der Öl- und Gasfeuerungen einen deutlichen Rückgang in den letzten 20 Jahren. Mit Ausnahme der Stickoxid-Emissionen bei Heizölfeuerungen werden die LRV-Grenzwerte meist deutlich unterschritten. Im Allgemeinen liegen die Emissionsfaktoren für Kohlenmonoxid weitaus tiefer unter den aktuellen Grenzwerten, als jene für Stickoxide. Es drängt sich somit die Frage nach einer Anpassung der Emissionsgrenzwerte der LRV (Anhang 3 und 4) an den Stand der Technik auf, wobei im Anhang 4 auch die europäische Normierung betroffen wäre.

Bei den Kohlenmonoxid-Emissionen für Heizölfeuerungen erscheint eine Unterscheidung der LRV-Grenzwerte bezüglich Gebläse- und Verdampfungsbrenner nicht mehr zeitgemäss, da beide Brennerarten auch im Leistungsbereich unter 50 kW den Grenzwert deutlich unterschreiten. Auch ist die Verbreitung der Verdampfungsbrenner in den letzten Jahren stark rückläufig und spielt mittlerweile kaum noch eine Rolle.

Ebenfalls nicht mehr notwendig scheint die Unterscheidung zwischen Öl- und Gasfeuerungen bezüglich des LRV-Grenzwerts für Kohlenmonoxid-Emissionen, da die Emissionsfaktoren beider Brennstoffe inzwischen im Bereich von $7 \text{ g/GJ} - 14 \text{ g/GJ}$ (dies entspricht $25 \text{ mg/m}^3 - 48 \text{ mg/m}^3 \text{ CO}$ im Abgas) liegen. Dies gilt jedoch nur sofern die Problematik unverbrannter Ölbestandteile im Abgas von Heizölfeuerungen inzwischen gelöst ist.

Im Gegensatz dazu sind unterschiedliche Grenzwerte für Heizöl und Erdgas betriebene Feuerungen in Bezug auf die Stickoxid-Emissionen weiterhin sinnvoll. Auch eine Senkung der Stickoxid-Grenzwerte erscheint zurzeit nicht angebracht, da die betreffenden Emissionsfaktoren momentan erst im Bereich des Grenzwerts liegen. Lediglich die etwas höheren Grenzwerte für Kleinf Feuerungen ($\leq 12 \text{ kW}$ atmosphärische Brenner Erdgas) und im Bereich der Prozesswärme ($> 350 \text{ kW}$ und Heizmediumtemperatur $> 110^\circ\text{C}$ bei Heizöl und Erdgas) werden inzwischen deutlich unterschritten und könnten deshalb fallen gelassen werden.

Grundsätzlich sollte in einer weiteren Untersuchung die statistische Signifikanz der Mittelwerte wie bereits beschrieben getestet werden. Auch erscheint es sinnvoll den Einfluss von Extremwerten (Ausreisser) bzw. einer hohen Streuung der Daten (hohe Standardabweichung) auf den Mittelwert zu testen, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu untermauern. Ergänzend wäre zu prüfen, ob in Einzelfällen nicht andere Lageparameter (z.B. Median, Modalwert) die zentrale Tendenz der Datensätze nicht besser beschreiben, als das arithmetische Mittel.

Darüber hinaus, könnte mit einer gezielten Auswertung getestet werden, in welchem Umfang existierende Feuerungsanlagen von einer allfälligen Verschärfung der LRV-Grenzwerte betroffen wären.

Motoren

Auch die gasbetriebenen stationären Verbrennungsmotoren unterschreiten die LRV-Grenzwerte beim Kohlenmonoxid mittlerweile deutlich, während bei den Stickoxiden nur die Klärgas- und Biogasmotoren unter den LRV-Grenzwert liegen. Eine entsprechende Anpassung der Grenzwerte wäre somit hier ebenfalls denkbar.

Die grundsätzlichen Bemerkungen zur statistischen Signifikanz der Ergebnisse und den Möglichkeiten einer weiteren Datenanalyse gelten selbstverständlich auch für die Motoren.

Zürich, Januar 2012



Christian Leuenberger
Dr. phil. II, Dipl. Chem., Energieingenieur NDS



Martin Schmitz
Dr. sc. nat., Dipl. Biol., Umweltwissenschaftler

7 Literatur

Amt für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich ATAL, Amt für Gesundheit und Umwelt der Stadt Zürich und Gesundheitsamt der Stadt Winterthur (Hrsg.) 1997. Stichprobenmessungen an Low-NOx-Feuerungen bis 350 kW. Version für den internen Gebrauch der Verbände und Behörden.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (Hrsg.) 2001. EMPFEHLUNGEN über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen Emissions-Messempfehlungen vom 25. Januar 1996. Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt EMPA im Auftrag des BUWAL. Reihe Vollzug Umwelt (Stand: Mai 2001)

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (Hrsg.) 2005. Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen (Stand Oktober 05). www.bafu.admin.ch/luft/.

8 Anhang

8.1 Anhang 1

Definition Variablen Emissionsfaktoren Feuerungen

Variable	Klartext	Einheit	Ausprägung / Definition
ID	Identifikationsnummer		Eindeutige Zuordnung der Anlage
bstoff	Brennstoff		1 = HEL 2 = Erdgas 3 = HEL/Erdgas (Zweistoffbrenner) 4 = Klärgas 5 = Biogas
zwstoff	Zweistoffbrenner		0 = nein 1 = Zweistoffbrenner
brart	Brennerart		1 = Gebläsebrenner 2 = Verdampfungsbrenner 3 = atmosphärischer Brenner
lastb	Lastbereich		1 = einstufig 2 = mehrstufig (2-stufig) 3 = modulierend
Stufe	Brennerstufe		1 = Grundlast 2 = Vollast
FWL	Feuerungswärmeleistung Nennleistung	kW	Feuerungswärmeleistung: Einer Anlage zugeführte Wärmeenergie pro Zeiteinheit (H_u des Brennstoffs multipliziert mit dem Verbrauch) oder: Nennleistung / Kesselleistung
bjahr	Baujahr Feuerungsanlage		Jahr
brjahr	Brennerjahr		Baujahr des Brenners
warmw	Warmwasseraufbereitung / Heizung		0 = nur Heizung (ohne WW) 1 = Heizung + WW 2 = nur Heizung (ohne WW) 3 = Sommer mit WW; Winter ohne WW 4 = Winterbetrieb (Heizung + WW) 5 = nur Heizung (ohne WW) 9 = unbekannt

spez	Spezialzweck (Funktion)		0 = Heizkessel / Boiler / Raumheizung 1 = Dampfwärmeerzeuger 2 = Warmluftzeuger 3 = Thermoölwärmeerzeuger 4 = andere Wärmeerzeuger 5 = Prozessenergie 9 = unbekannt
gebart	Gebäudeart		1 = EFH 2 = MFH 3 = Wohnhaus mit Gewerbe 4 = Industrie / Gewerbe 5 = öffentliche Gebäude (Schulen, Spitäler, Verwaltungen) 9 = unbekannt
hmt	Temperatur Heizmedium	°C	Heizmediumtemperatur (gemessen) bzw. ≤110°C = 109.9 > 110°C = 110.1
At	Abgastemperatur	°C	Abgastemperatur (gemessen)
Rt	Raumtemperatur	°C	Verbrennungslufttemperatur (gemessen)
qA	Abgasverlust	%	Abgasverlust (berechnet nach Messempfehlung BAFU)
O2	Sauerstoffgehalt	mg/m ³	Sauerstoff im Abgas (gemessen)
CO	Kohlenmonoxidgehalt	mg/m ³	Kohlenmonoxid im Abgas (gemessen)
NO2	Stickstoffdioxid	mg/m ³	Stickoxide im Abgas angegeben als Stickstoffdioxid (gemessen/berechnet)
rz	Russzahl		Skala von 0 – 10 (nur bei HEL gemessen)
oel	Ölderivate		unvollständig verbrannten Ölanteile im Abgas 0 = nein 1 = ja (nur bei HEL gemessen)
kondens	kondensierende Kessel		WAHR / FALSCH
LowNox	LowNOx-Brenner		WAHR / FALSCH
Quelle	Datenquelle		Herkunft der Daten / Standort der Feuerungsanlagen: 1 = UGZ / Stadt Zürich 2 = beco / Kanton Bern 3 = Gesch-feuko / Zentralschweiz 4 = BS / Stadt Basel 5 = Kost & Partner / Kanton Luzern 6 = BL / Kanton Basel Landschaft

8.2 Anhang 2

Emissionsfaktoren Kohlenmonoxid (CO) Erdgas

Erdgas	EF CO	1990			2000			2010			2020			2035		
		mg/m ³														
Daten:		Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 1990 + SE			Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 2000			Messwerte 2010/11 / Jg. ≤ 2010/11			Prognose			Prognose		
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO		EF CO			EF CO	
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	6'572	72.1908	467.745412	15'705	60.666	387.199942	32'056	47.93	327.826055		38.38			28.83	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	1'396	47.5908	246.289973	3'727	44.271	289.202083	16'302	37.75	358.270175		32.86			27.96	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	35	21.8156	30.9801434	364	50.4	387.202014	2'141	36.48	354.283932		26.04			15.60	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	1'366	48.2121	248.334155	3'898	46.196	306.207382	17'765	37.57	351.649814		31.09			24.62	
Umrechnung in mg/MJ		1 mg/m ³ =		0.282 mg/MJ												
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO		EF CO			EF CO	
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	6'572	20.36	131.904206	15'705	17.11	109.190384	32'056	13.52	92.4469476		10.82			8.13	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	1'396	13.42	69.4537724	3'727	12.48	81.5549875	16'302	10.64	101.032189		9.27			7.88	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	35	6.15	8.73640044	364	14.21	109.190968	2'141	10.29	99.9080689		7.34			4.40	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	1'366	13.60	70.0302316	3'898	13.03	86.3504817	17'765	10.59	99.1652477		8.77			6.94	

Rundung und Anpassung der berechneten EF auf Basis von Expertenmeinungen

EMIS-Aktivität	FWL	EF CO	mg/MJ	mg/m ³												
Heizkessel Haushalte	< 50 kW		50	177		17	60		14	50		12	43		10	35
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW		35	124		13	46		11	39		9	32		8	28
Heizkessel Industrie	> 350 kW		20	71		14	50		10	35		7	25		5	18
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW		35	124		13	46		11	39		9	32		8	28
Mittelwert			35	124		14	51		12	41		9	33		8	27

Legende:

FWL: Feuerungswärmeleistung in kW

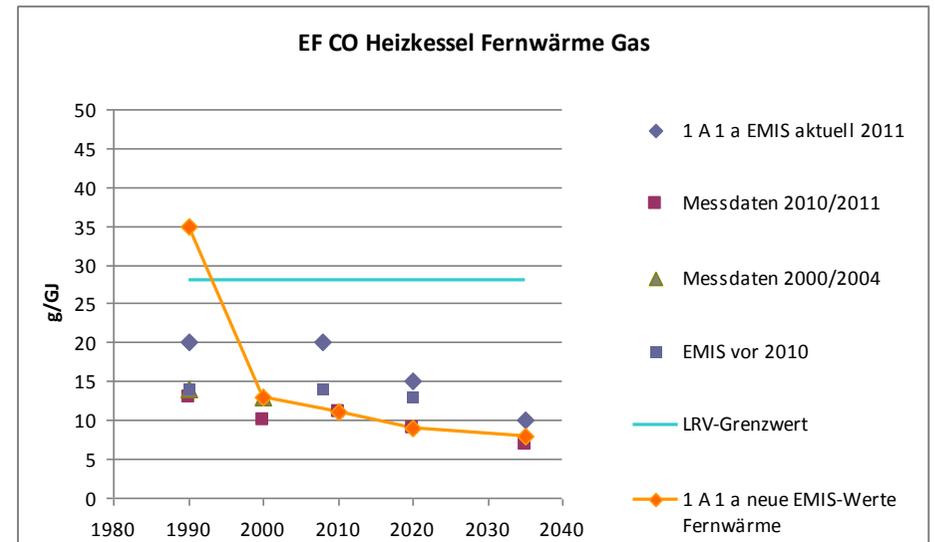
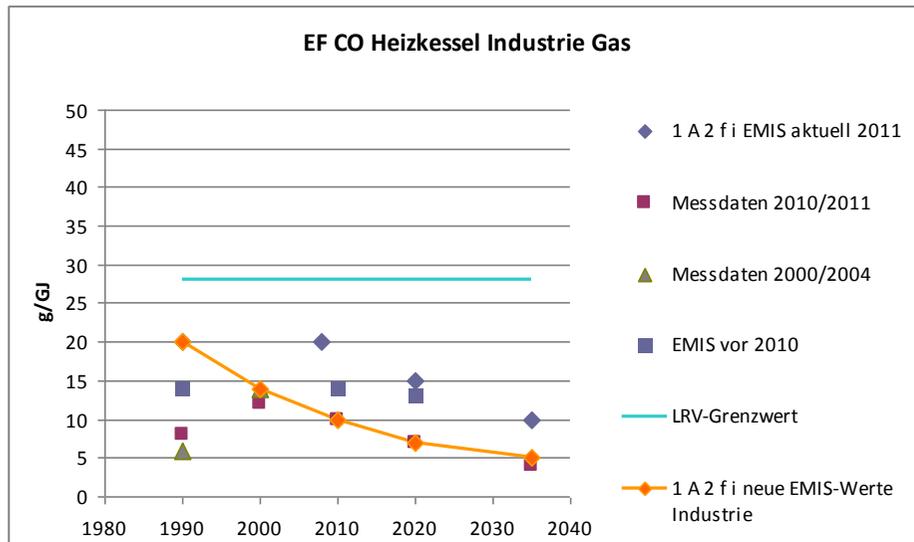
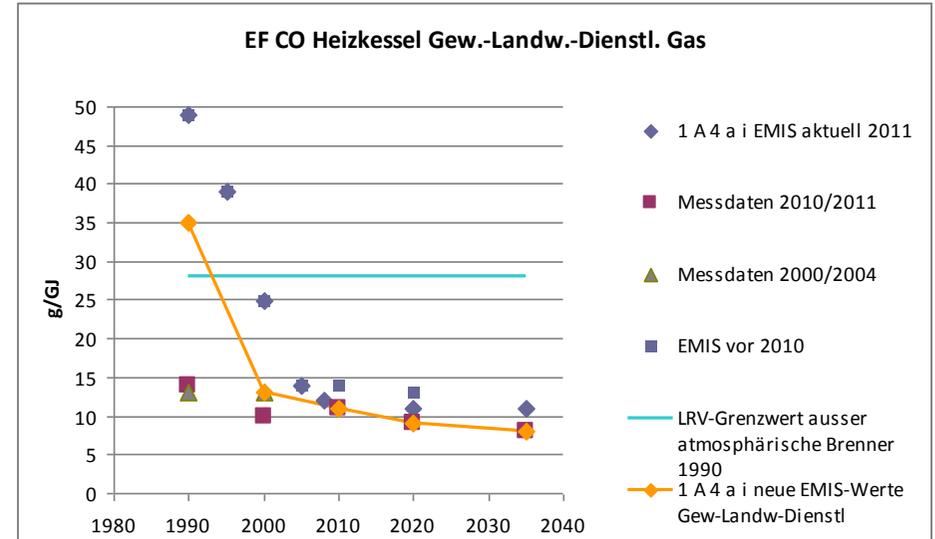
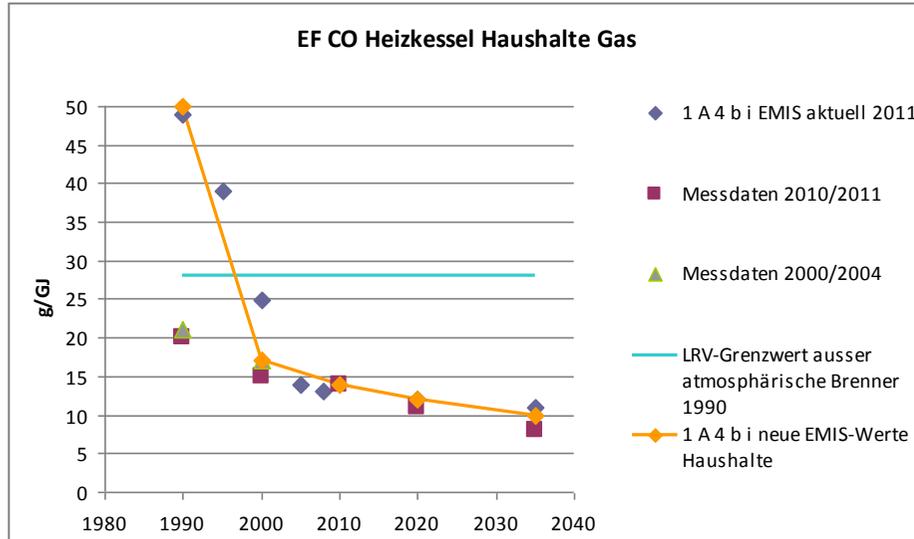
EF CO: Emissionsfaktor Kohlenmonoxid (arithmetisches Mittel der Kohlenmonoxidemissionen) in mg/m³ oder mg/MJ

SD: Standardabweichung

n: Anzahl Messungen

8.3 Anhang 3

Neue Emissionsfaktoren Kohlenmonoxid für Erdgasfeuerungen verschiedener Kategorien im Vergleich zu bestehenden Daten und zum LRV-Grenzwert



8.4 Anhang 4

Emissionsfaktoren Stickoxide (NO₂) Erdgas

Erdgas	EF NO ₂ mg/m ³	1990			2000			2010			2020			2035		
		Daten:	Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 1990 + SE	Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 2000	Messwerte 2010/11 / Jg. ≤ 2010/11	Prognose	Prognose									
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂		EF NO ₂			EF NO ₂	
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	5'973	203.6994	59.5405074	14'063	118.6009	94.17035	31'877	64.7957885	73.2412396		53.61			36.84	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	1'259	231.9772	94.2838067	3'356	127.607	106.106408	16'283	66.1715618	59.1309067		56.04			40.84	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	34	173.7885	89.875377	356	72.867	45.0623543	2'141	68.1616254	20.2920013		66.14			64.13	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW ?	1'243	229.4223	94.9555373	3'551	122.68	102.870679	17'746	66.5289474	56.0639696		57.72			44.51	

Umrechnung in mg/MJ 1 mg/m³ = 0.282 mg/MJ

EMIS-Aktivität	FWL	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂		EF NO ₂			EF NO ₂
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	5'973	57.44	16.7904231	14'063	33.45	26.5560387	31'877	18.27	20.6540296		15.12			10.39
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	1'259	65.42	26.5880335	3'356	35.99	29.9220069	16'283	18.66	16.6749157		15.80			11.52
Heizkessel Industrie	> 350 kW	34	49.01	25.3448563	356	20.55	12.7075839	2'141	19.22	5.72234437		18.65			18.08
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW ?	1'243	64.70	26.7774615	3'551	34.60	29.0095315	17'746	18.76	15.8100394		16.28			12.55

Rundung und Anpassung der berechneten EF auf Basis von Expertenmeinungen

EMIS-Aktivität	FWL	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³
Heizkessel Haushalte	< 50 kW		60	213		33	117		18	64		15	53		12	43
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW		65	230		36	128		19	67		16	57		14	50
Heizkessel Industrie	> 350 kW		50	177		21	74		19	67		18.5	66		18	64
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW		65	230		35	124		19	67		17	60		16	57
Mittelwert			60	213		31	111		19	66		17	59		15	53

Legende:

FWL: Feuerungswärmeleistung in kW

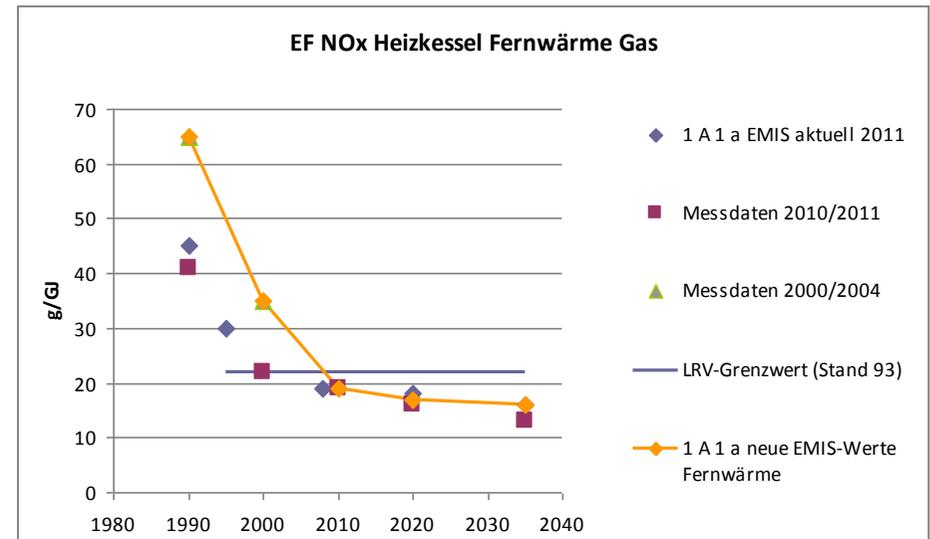
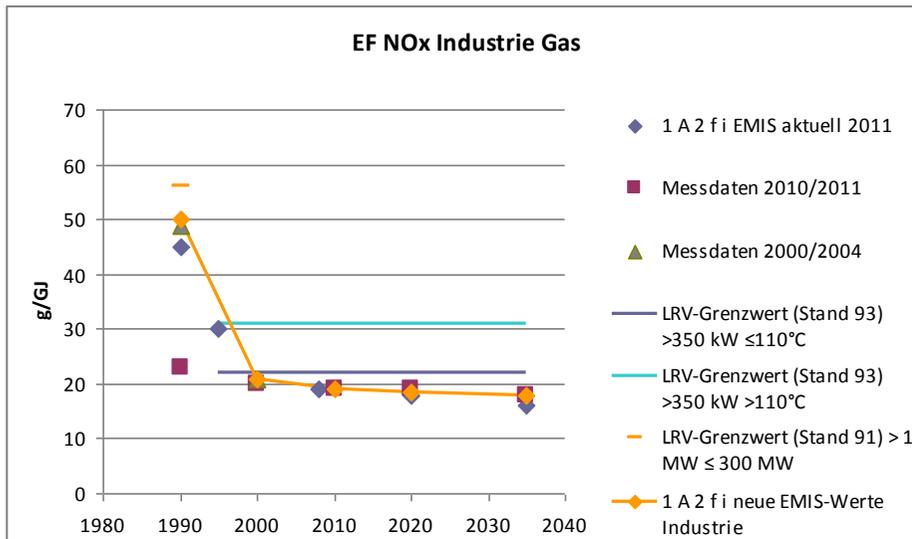
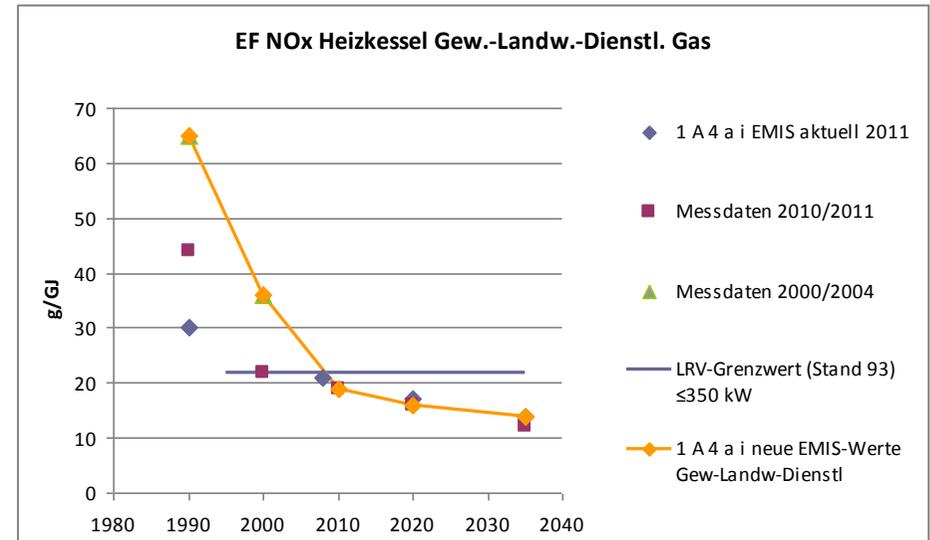
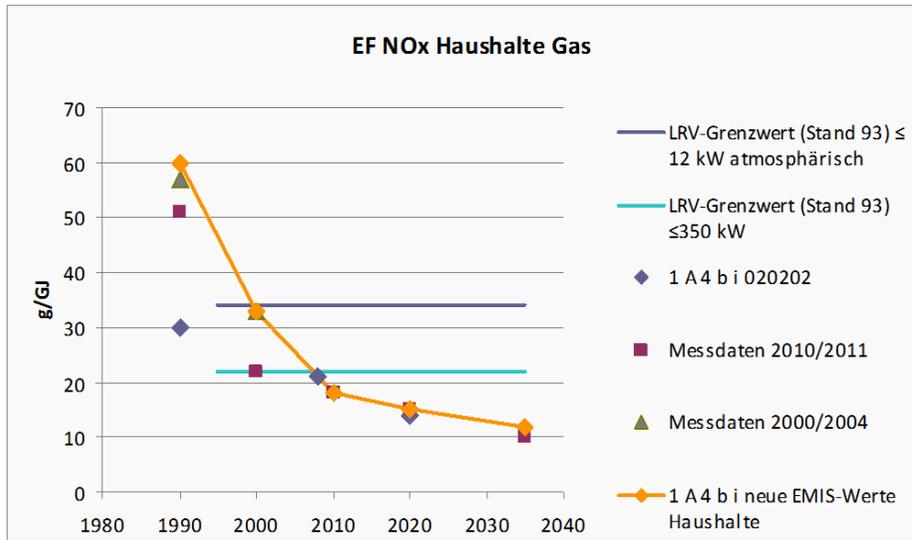
EF NO₂: Emissionsfaktor Stickoxide NO_x (arithmetisches Mittel der Stickoxidemissionen angegeben als NO₂) in mg/m³ oder mg/MJ

SD: Standardabweichung

n: Anzahl Messungen

8.5 Anhang 5

Neue Emissionsfaktoren Stickoxide für Erdgasfeuerungen verschiedener Kategorien im Vergleich zu bestehenden Daten und zum LRV-Grenzwert



8.6 Anhang 6

Emissionsfaktoren Kohlenmonoxid (CO) Heizöl EL

HEL	EF CO	mg/m ³	1990		2000		2010		2020		2035		
	Daten:	Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 1990 + SE	Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 2000		Messwerte 2010/11 / Jg. ≤ 2010/11		Prognose		Prognose				
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	EF CO	SD CO	
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	31'113	59.0018	234.561793	71'512	54.58	256.399685	90'934	45.94	298.537122	39.46	32.98	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	9'896	42.0983	184.164808	18'594	35.311	192.226436	40'099	25.70	202.249821	18.49	11.28	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	462	64.8638	472.502376	771	34.143	372.842649	1'914	28.43	292.245229	24.15	19.86	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	10'028	41.5115	199.628895	18'597	34.711	198.719556	40'643	24.97	199.58508	17.66	10.36	
Umrechnung in mg/MJ		1 mg/m ³ =		0.291 mg/MJ									
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	n	EF CO	SD CO	EF CO	SD CO	
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	31'113	17.17	68.2574818	71'512	15.88	74.6123084	90'934	13.37	86.8743026	11.48	9.60	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	9'896	12.25	53.5919591	18'594	10.28	55.9378928	40'099	7.48	58.8546978	5.38	3.28	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	462	18.88	137.498191	771	9.94	108.497211	1'914	8.27	85.0433615	7.03	5.78	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	10'028	12.08	58.0920084	18'597	10.10	57.8273908	40'643	7.27	58.0792584	5.14	3.01	
Rundung und Anpassung der berechneten EF auf Basis von Expertenmeinungen		mg/MJ											
EMIS-Aktivität	FWL	EF CO	mg/MJ	mg/m ³	EF CO	mg/MJ	mg/m ³	EF CO	mg/MJ	mg/m ³	EF CO	mg/MJ	mg/m ³
Heizkessel Haushalte	< 50 kW		20	69		16	55		13	45		11	38
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW		20	69		10	34		7	24		6	21
Heizkessel Industrie	> 350 kW		20	69		10	34		8	27		6	21
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW		20	69		10	34		7	24		6	21
Mittelwert			20	69		12	40		9	30		7	25

Legende:

FWL: Feuerungswärmeleistung in kW

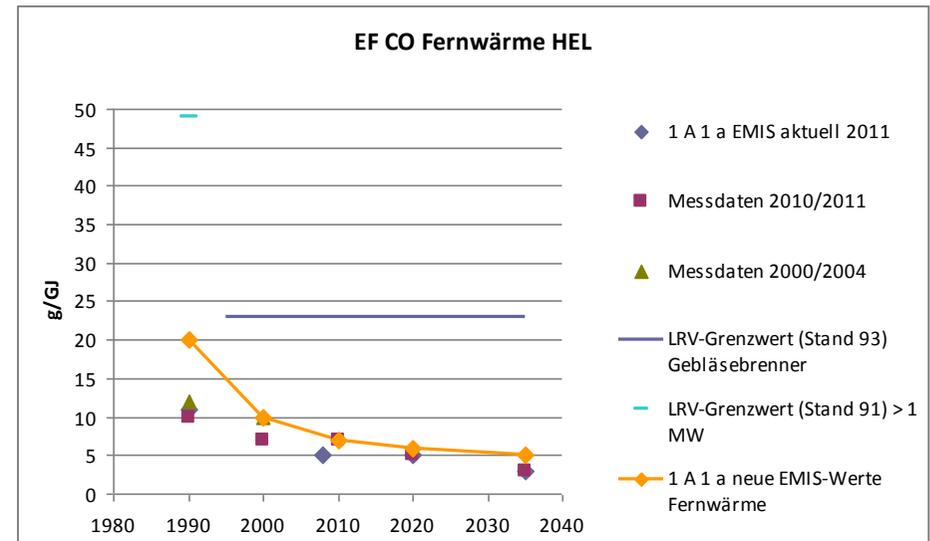
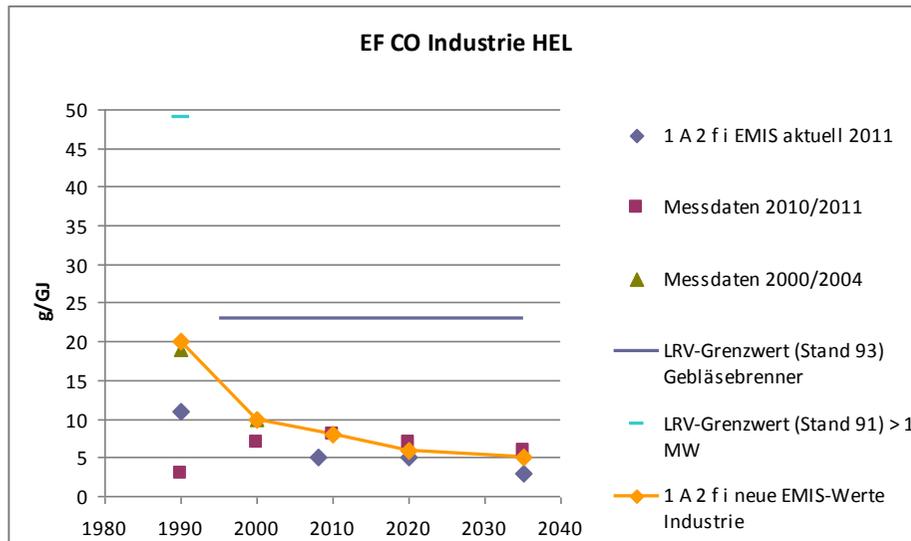
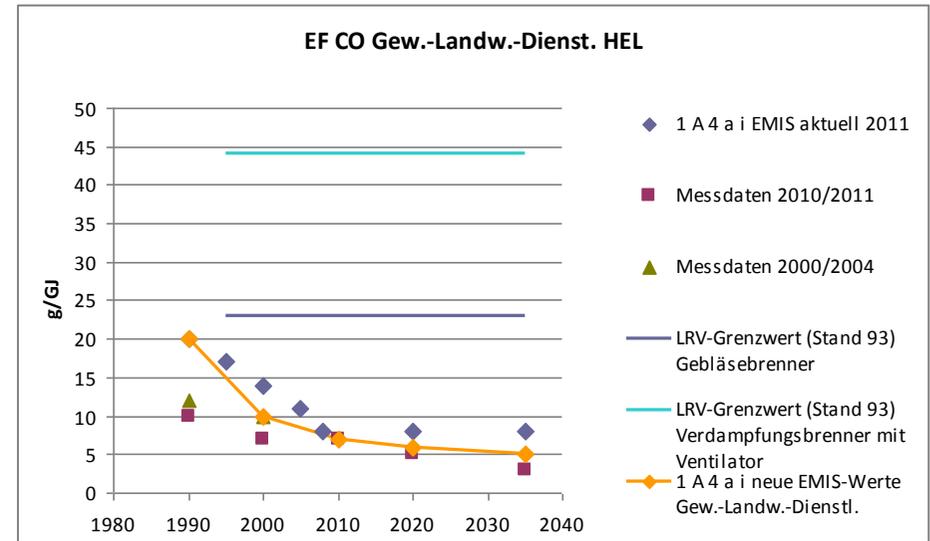
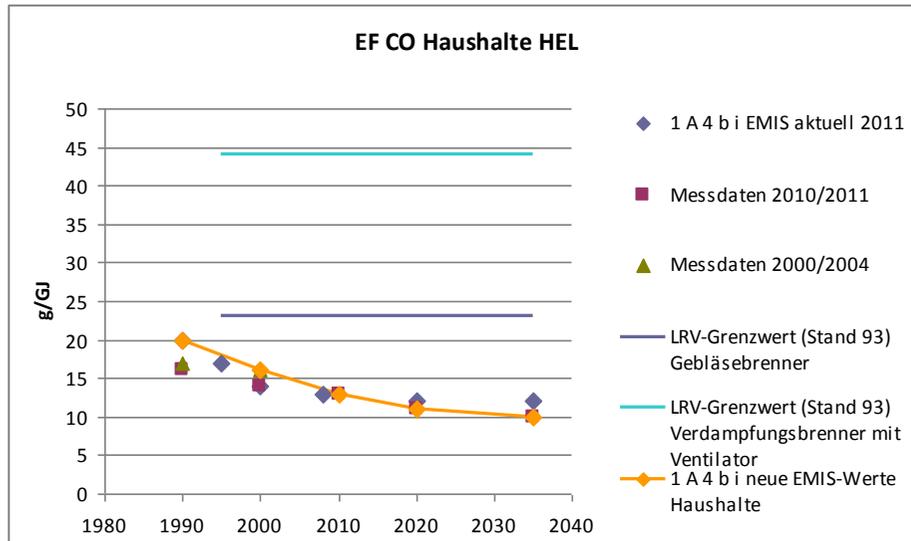
EF CO: Emissionsfaktor Kohlenmonoxid (arithmetisches Mittel der Kohlenmonoxidemissionen) in mg/m³ oder mg/MJ

SD: Standardabweichung

n: Anzahl Messungen

8.7 Anhang 7

Neue Emissionsfaktoren Kohlenmonoxid für Heizölf Feuerungen verschiedener Kategorien im Vergleich zu bestehenden Daten und zum LRV-Grenzwert



8.8 Anhang 8

Emissionsfaktoren Stickoxide (NO₂) Heizöl EL

HEL	EF NO ₂ mg/m ³	1990			2000			2010			2020		2035	
	Daten:	Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 1990 + SE			Messwerte 2000-2004 / Jg. ≤ 2000			Messwerte 2010/11 / Jg. ≤ 2010/11			Prognose		Prognose	
EMIS-Aktivität	FWL	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	EF NO ₂	cv	EF NO ₂	cv
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	24'860	186.6594	54.4594054	60'653	149.017	53.1468567	90'441	128.90	52.6016036	113.81		103.75	
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	7'873	176.3137	35.9977315	15'753	147.394	43.602506	39'926	125.17	35.1310212	108.50		97.38	
Heizkessel Industrie	> 350 kW	385	183.2829	39.260493	677	154.831	72.4219071	1'908	115.02	25.5968664	85.16		65.26	
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	7'989	176.6931	36.1189454	15'764	147.925	45.3378271	40'471	124.65	34.7592439	107.19		95.55	

Umrechnung in mg/MJ 1 mg/m³ = 0.291 mg/MJ

EMIS-Aktivität	FWL	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	n	EF NO ₂	SD NO ₂	EF NO ₂	EF NO ₂	EF NO ₂
Heizkessel Haushalte	< 50 kW	24'860	54.32	15.847687	60'653	43.36	15.4657353	90'441	37.51	15.3070666	33.12		30.19
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW	7'873	51.31	10.4753399	15'753	42.89	12.6883292	39'926	36.42	10.2231272	31.57		28.34
Heizkessel Industrie	> 350 kW	385	53.34	11.4248035	677	45.06	21.074775	1'908	33.47	7.44868811	24.78		18.99
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW	7'989	51.42	10.5106131	15'764	43.05	13.1933077	40'471	36.27	10.11494	31.19		27.81

Rundung und Anpassung der berechneten EF auf Basis von Expertenmeinungen

EMIS-Aktivität	FWL	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³	EF NO ₂	mg/MJ	mg/m ³
Heizkessel Haushalte	< 50 kW		60	206		43	148		38	131		33	113		30	103
Heizkessel Gew-Landw-Dienstl	50 - 350 kW		60	206		43	148		36	124		32	110		30	103
Heizkessel Industrie	> 350 kW		65	223		45	155		33	113		31	107		30	103
Heizkessel Fernwärme	> 50 kW		60	206		43	148		36	124		32	110		30	103
Mittelwert			61	210		44	149		36	123		32	110		30	103

Legende:

FWL: Feuerungswärmeleistung in kW

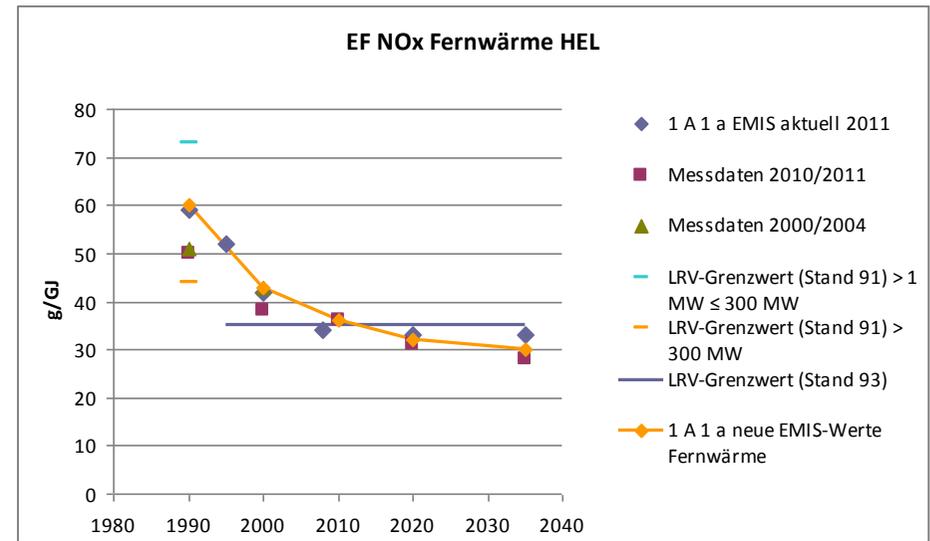
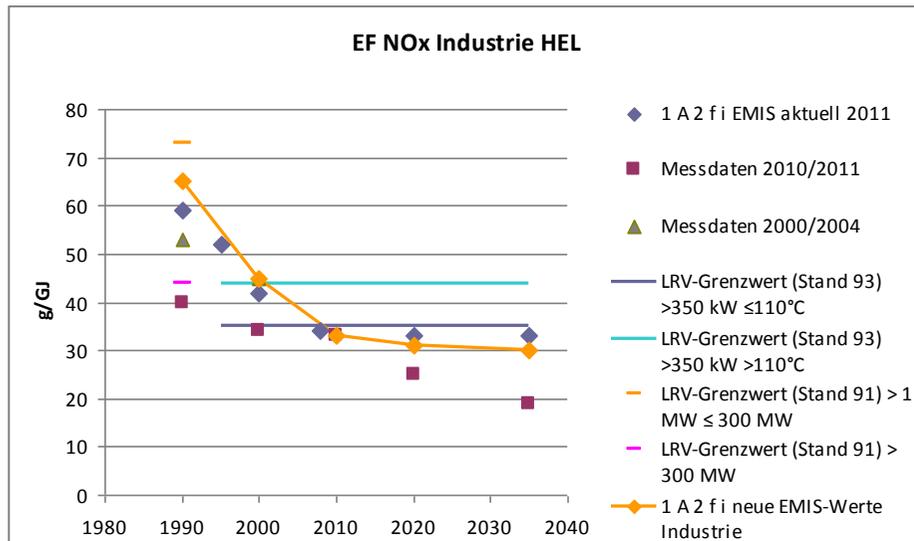
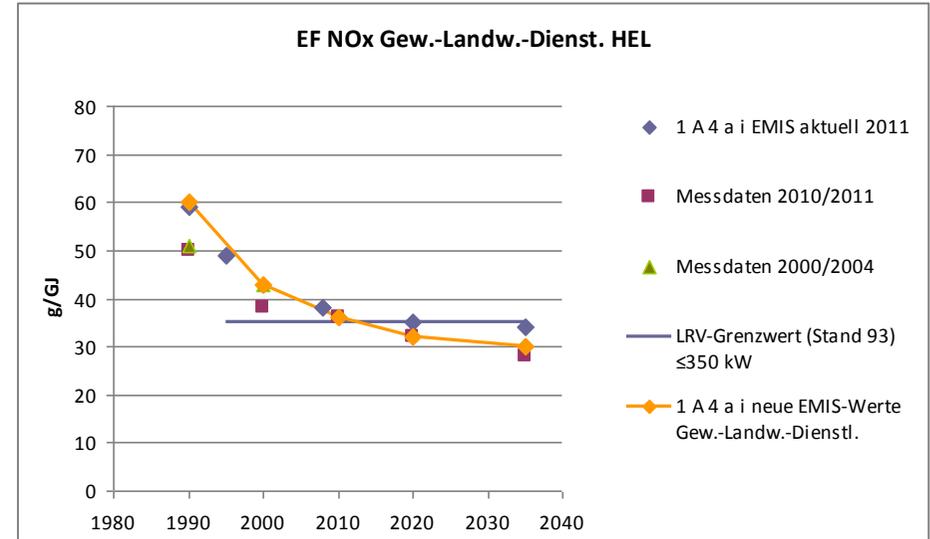
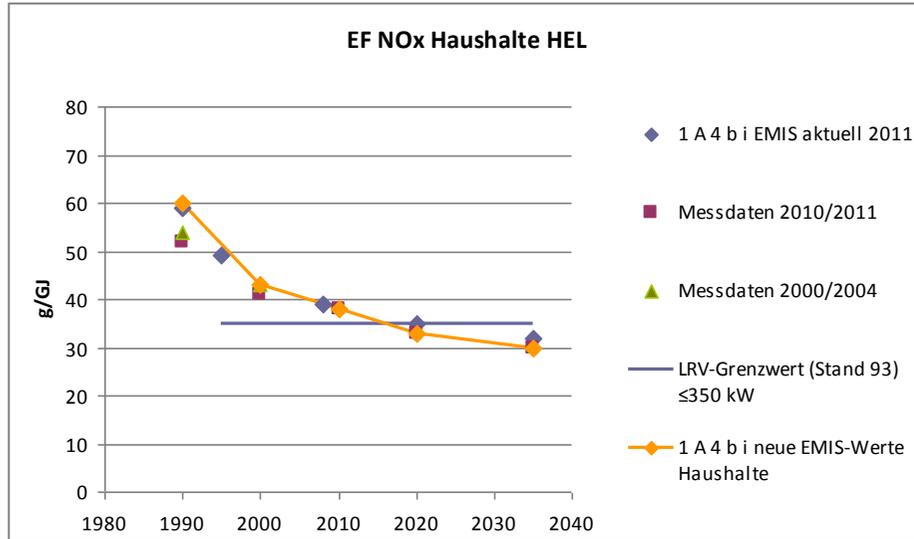
EF NO₂: Emissionsfaktor Stickoxide NO_x (arithmetisches Mittel der Stickoxidemissionen angegeben als NO₂) in mg/m³ oder mg/MJ

SD: Standardabweichung

n: Anzahl Messungen

8.9 Anhang 9

Neue Emissionsfaktoren Stickoxide für Heizölf Feuerungen verschiedener Kategorien im Vergleich zu bestehenden Daten und zum LRV-Grenzwert



8.10 Anhang 10

Emissionsfaktoren Kohlenmonoxid bei Erdgasmotoren

Kategorie			CO [mg/MJ]					Anzahl n
Brennstoff	Brennerart	Baujahr	Mittel	SD	SE	Min	Max	
2 Erdgas	Gasmotor	alle	111.19	262.93	20.29	0	1961	168
4 Klärgas	Gasmotor	alle	164.72	108.90	23.22	19	407	22
5 Biogas	Gasmotor	alle	190.33	105.47	23.58	16	382	20
4/5 Biogas	Gasmotor	alle	176.91	106.75	16.47	16	407	42

Kategorie			CO [mg/m ³]					Anzahl n
Brennstoff	Brennerart	Baujahr	Mittel	SD	SE	Min	Max	
2 Erdgas	Gasmotor	alle	347.95	822.80	63.48	1	6138	168
4 Klärgas	Gasmotor	alle	492.00	325.26	69.35	56	1215	22
5 Biogas	Gasmotor	alle	568.50	315.03	70.44	47	1141	20
4/5 Biogas	Gasmotor	alle	528.43	318.87	49.20	47	1215	42

Emissionsfaktoren Stickoxide bei Erdgasmotoren

Kategorie			NO ₂ [mg/MJ]					Anzahl n
Brennstoff	Brennerart	Baujahr	Mittel	SD	SE	Min	Max	
2 Erdgas	Gasmotor	alle	88.79	265.17	20.46	0.32	1329.69	168
4 Klärgas	Gasmotor	alle	48.94	41.42	8.83	7	29	22
5 Biogas	Gasmotor	alle	86.16	51.41	11.50	3	146	20
4/5 Biogas	Gasmotor	alle	66.66	49.57	7.65	3	146	42

Kategorie			NO ₂ [mg/m ³]					Anzahl n
Brennstoff	Brennerart	Baujahr	Mittel	SD	SE	Min	Max	
2 Erdgas	Gasmotor	alle	277.84	829.79	64.02	1	4161	168
4 Klärgas	Gasmotor	alle	146.19	123.71	26.38	20	88	22
5 Biogas	Gasmotor	alle	257.35	153.55	34.34	10	437	20
4/5 Biogas	Gasmotor	alle	199.12	148.06	22.85	10	437	42

8.11 Anhang 11

Gegenüber der LRV verschärfte Emissionsgrenzwerte in der Stadt Zürich und den Kantonen Basel Landschaft und Basel Stadt



Emissionsgrenzwerte		
Stationäre Verbrennungsmotoren		
Die Begrenzungen gelten nicht für Notstromaggregate (Laufzeit <25 Stunden)		
Bezugsgrösse O ₂	% Vol	5
Kohlenmonoxid	mg/m ³	650
Stickoxide	mg/m ³	50
Feststoff	mg/m ³	5
Ammoniak (*)	mg/m ³	30

(*) stationäre Verbrennungsmotoren mit Entstickungsanlage

Quelle: Gesundheits- und Umweltdepartement UGZ, Fachbereich Luftreinhaltung, Stand: Juli 2009

Grenzwerte für stationäre Motoren (exklusive Notstromdiesel)

Anhang 2 Ziffer 82, Anhang 1 Ziffer 82 LRV und § 10 VVESA

Parameter	Brennstoff	
	Gas	Diesel
Gesamtstaub		50 mg/m ³
Dieseleruss bei einem Massenstrom > 25g/h		5 mg/m ³ ①
Kohlenmonoxid (CO) FWL > 100 kW	650 mg/m ³	650 mg/m ³
Stickoxide (NO_x), angegeben als NO₂		
• Massnahmenplan-Gebiet ②	70 mg/m ³	110 mg/m ³
• übriges Kantonsgebiet FWL > 100 kW	250 mg/m ³	250 mg/m ³
• Biogas, Klärgas, Deponiegas FWL > 100 kW (gemäss Anh. 5 Ziff. 41 Bst. d+e LRV)	400 mg/m ³	
Sauerstoff-Bezugswert im Abgas	5 % O ₂	

① Der Dieseleruss-Grenzwert gilt als erfüllt, wenn der Motor mit einem Dieseleruss-Partikelfilter - gemäss BAFU-Partikelfilterliste - ausgerüstet ist und der Partikelfilter ordnungsgemäss gewartet wird.

② Das Massnahmenplan-Gebiet umfasst folgende Gemeinden:

Aesch, Allschwil, Arlesheim, Augst, Binningen, Birsfelden, Bottmingen, Ettingen, Frenkendorf, Füllinsdorf, Itingen, Lausen, Liestal, Münchenstein, Muttenz, Oberwil, Pfeffingen, Pratteln, Reinach, Sissach, Therwil.

Quelle: Lufthygieneamt beider Basel, Liestal

8.12 Anhang 12

Umrechnungsfaktoren Heizöl "Extra leicht"

Quelle: BUWAL
08.2005

		ppm	mg/m ³	mg/MJ	mg/kWh	mg/kg
<u>SO₂</u>	1 ppm	1	2.928	0.853	3.069	36.318
	1 mg/m ³	0.341	1	0.291	1.048	12.402
	1 mg/MJ	1.173	3.435	1	3.600	42.600
	1 mg/kWh	0.326	0.954	0.278	1	11.833
	1 mg/kg	0.028	0.081	0.023	0.085	1
<u>NO₂</u>	1 ppm	1	2.054	0.598	2.152	25.469
	1 mg/m ³	0.487	1	0.291	1.048	12.402
	1 mg/MJ	1.673	3.435	1	3.600	42.600
	1 mg/kWh	0.465	0.954	0.278	1	11.833
	1 mg/kg	0.039	0.081	0.023	0.085	1
<u>CO</u>	1 ppm	1	1.250	0.364	1.310	15.503
	1 mg/m ³	0.800	1	0.291	1.048	12.402
	1 mg/MJ	2.748	3.435	1	3.600	42.600
	1 mg/kWh	0.763	0.954	0.278	1	11.833
	1 mg/kg	0.065	0.081	0.023	0.085	1

Annahmen

Umrechnungsformel: $\text{Konz. [mg/m}^3\text{]} = \text{Konz. [ppm]} \cdot \text{Molmasse [g/mol]} / \text{Molvolumen [l/mol]}$

Konz: Abgaskonzentration in mg/m³ bzw. in ppm

Molmassen:	SO ₂	64.10	g/mol
	NO ₂	46.00	g/mol
	C	12.00	g/mol
	CO	28.00	g/mol

Molvolumen:	SO ₂	21.89	l/mol
	übrige Gase	22.40	l/mol

Heizwert Hu 42.60 MJ/kg EMPA, BFE

Spez. Abgasmenge 12.40 m³/kg siehe unten

c (Gehalt C):	0.8590	(EMPA)	Lmin:	11.3031	(Berechnung
h (Gehalt H):	0.1390	(EMPA)	V _{atr} (3% O ₂):	12.4024	spez. Abgasmenge, nach Recknagel)

Alle Umrechnungen gelten für das trockene Abgas im Normzustand (0°C, 1013 mbar).

8.13 Anhang 13

Umrechnungsfaktoren Erdgas

Quelle: BUWAL
08.2005

		ppm	mg/m ^{3 1)}	mg/MJ	mg/kWh	mg/m ^{3 2)}
<u>SO₂</u>	1 ppm	1	2.928	0.825	2.969	29.934
	1 mg/m ^{3 1)}	0.341	1	0.282	1.014	10.222
	1 mg/MJ	1.213	3.551	1	3.600	36.300
	1 mg/kWh	0.337	0.986	0.278	1	10.083
	1 mg/m ^{3 2)}	0.033	0.098	0.028	0.099	1
<u>NO₂</u>	1 ppm	1	2.054	0.578	2.082	20.992
	1 mg/m ^{3 1)}	0.487	1	0.282	1.014	10.222
	1 mg/MJ	1.729	3.551	1	3.600	36.300
	1 mg/kWh	0.480	0.986	0.278	1	10.083
	1 mg/m ^{3 2)}	0.048	0.098	0.028	0.099	1
<u>CO</u>	1 ppm	1	1.250	0.352	1.267	12.778
	1 mg/m ^{3 1)}	0.800	1	0.282	1.014	10.222
	1 mg/MJ	2.841	3.551	1	3.600	36.300
	1 mg/kWh	0.789	0.986	0.278	1	10.083
	1 mg/m ^{3 2)}	0.078	0.098	0.028	0.099	1
		ppm	mg/m ^{3 1)}	mg/MJ	mg/kWh	mg/m ^{3 2)}

1) pro m³ Abgas2) pro m³ ErdgasAnnahmenUmrechnungsformel: Konz. [mg/m³] = Konz.[ppm] · Molmasse[g/mol] /
Molvolumen[l/mol]Konz: Abgaskonzentration in mg/m³ bzw. in ppm

Molmassen:	SO ₂	64.10	g/mol
	NO ₂	46.00	g/mol
	C	12.00	g/mol
	CO	28.00	g/mol

Molvolumen:	SO ₂	21.89	l/mol
	übrige Gase	22.40	l/mol

Heizwert Hu 36.30 MJ/kg BFE

Spez. Abgasmenge	10.22	m ³ /kg	siehe unten
CH ₄	0.9250 (SVGW)	Lmin:	9.6121 (Berechnung)
C ₂ H ₆	0.0350 (SVGW)	V _{af} (3% O ₂):	12.2141 spez. Abgasmenge, nach
C ₃ H ₈	0.0090 (SVGW)	V _{atr} (3% O ₂):	10.2223 Recknagel)
C ₄ H ₁₀	0.0002 (SVGW)		

Alle Umrechnungen gelten für das trockene Abgas im Normzustand (0°C, 1013 mbar).