

*ENDBERICHT*

*EMISSIONSFAKTOREN FÜR  
FESTE BRENNSTOFFE*

*J. SPITZER, P. ENZINGER, G. FANKHAUSER, W. FRITZ,  
F. GOLJA, R. STIGLBRUNNER*

## ZUSAMMENFASSUNG

### Einleitung

Ziel des Projektes "Meßprogramm zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Schadstoffe SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, org-C und Staub bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im privaten Sektor" war die Ermittlung durchschnittlicher Emissionsfaktoren, welche für den österreichischen Anlagenbestand zum Zeitpunkt der Messungen (Heizperiode 1997/98) gültig sind. Dies sollte durch Messungen an Feuerungsanlagen die sich in praktischen Betrieb befinden ("Feldmessungen") erreicht werden.

Das Projekt wurde in zwei Phasen und in vier Arbeitsschritten durchgeführt. Die Arbeitsinhalte wurden wie folgt aufgeteilt:

#### Erste Projektphase:

Arbeitsschritt 1: Durchführung von Vorversuchen zur Entwicklung einzelner Meßmethoden

#### Zweite Projektphase:

Arbeitsschritt 2: Koordination und Organisation der Messungen

Arbeitsschritt 3: Durchführung der Messungen

Arbeitsschritt 4: Auswertung der Meßergebnisse und Ermittlung der Emissionsfaktoren sowie deren Vertrauensbereiche

Die Finanzierung des Projektes erfolgte im Rahmen der Bund/Bundesländer-Kooperation auf dem Gebiet der Rohstoff-, Energie- und Umweltforschung durch vier Bundesministerien (BMUJF, BMLF, BMWA, BMWV) und die neun Bundesländer unter Federführung des BMUJF. Von den vier Bundesministerien und den neun Bundesländern wurden je 50% der Kosten getragen, wobei die Anteile der einzelnen Bundesländer im Verhältnis der Bevölkerungszahlen festgelegt wurden. Zur Vorbereitung des Projektes wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes eine Vorstudie /A/ erstellt, in welcher grundsätzliche Überlegungen zu Durchführung

dieses Projektes angestellt wurden. Da die zur Erreichung der Ziele der in Projektphase 1 notwendigen Arbeiten über den ursprünglich vorgesehenen Umfang hinausgingen, hat das Umweltbundesamt zusätzliche Arbeiten und Meßgeräte finanziert.

## Erste Projektphase

### *Arbeitsschritt 1 - Durchführung von Vorversuchen zur Entwicklung einzelner Meßmethoden*

Es wurden Versuche zur

- Bestimmung des Verbrennungsgas-Volumenstromes und zur
  - Messung der org-C-Emissionen
- durchgeführt.

Ziel der Versuche war

- die Entwicklung einer Meßmethode zur Bestimmung des Verbrennungsgas-Volumenstromes bei den Feldmessungen und
- die Anpassung von konventionellen Meßmethoden (org-C-Messung) an die Anforderungen des Meßprogramms. Es sollte nachgewiesen werden, daß eine "kalte" FID-Messung (d.h. Meßgasförderung von der Entnahmestelle zum Analysator über Waschflaschen und unbeheizte Meßgasleitung) der org-C-Emissionen zu denselben Ergebnissen wie eine nach den entsprechenden Regeln der Technik durchgeführten org-C-Messung ("warme" FID-Messung nach VDI 3481/1, d.h. Verwendung beheizter Meßgasleitung) führt.

Um die Versuche zur Bestimmung des Verbrennungsgas-Volumenstromes durchführen zu können, wurde eine Versuchsstrecke errichtet und Versuche mit der SF<sub>6</sub>-Tracergas-Methode /A/, einem Thermischen Anemometer, der CO<sub>2</sub>-Tracergas-Methode (Vorschlag und Leitung der Versuche: DI R. Ellinger) und einem Flügelrad-Anemometer (Vorschlag und Leitung der Versuche: Prof. H. Braun) durchgeführt.

Für die Versuche zur org-C-Messung wurde ein Einzelofen mit Holz bzw. Kohle befeuert und die org-C-Emissionen nach beiden Meßverfahren ("kalte" und "warme" FID-Messung) gleichzeitig gemessen.

Die Versuche führten zu folgenden Ergebnissen:

- Bestimmung des Verbrennungsgas-Volumenstromes

Von den getesteten Verfahren sind nur die CO<sub>2</sub>-Tracergas-Methode und die Geschwindigkeitsmessung mit dem Flügelrad-Anemometer für die Feldmessungen geeignet. Bei den Feldmessungen wurden beide Verfahren gleichzeitig eingesetzt, um die jeweiligen Schwachstellen der beiden Meßverfahren auszugleichen.

Die CO<sub>2</sub>-Tracergas-Methode besteht darin, dem Verbrennungsgas unmittelbar nach der Feuerungsanlage definierte Mengen CO<sub>2</sub> gepulst (Einspeisedauer 1 Minute, Pausendauer 3 Minuten) beizumengen. Dieser CO<sub>2</sub>-Puls bewirkt nach entsprechender Durchmischung mit dem Verbrennungsgas eine zeitlich begrenzte Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Verbrennungsgas, welche mit einem üblichen CO<sub>2</sub>-Analysator gemessen wird. Aus der Kenntnis der eingespeisten CO<sub>2</sub>-Menge und der kurzzeitigen Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Verbrennungsgas kann der Verbrennungsgas-Volumenstrom berechnet werden.

- Org-C-Messung

Der Nachweis der "Gleichwertigkeit" der beiden Methoden konnte mit den durchgeführten Versuchen nicht eindeutig erbracht werden. Für die Feldmessungen wurde daher die "warme" FID-Messung (beheizte Meßgasleitung entsprechend VDI 3481/1) eingesetzt.

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurde ein Pflichtenheft erstellt, welches Grundlage für die Ausschreibung der Feldmessungen war. Damit war die erste Projektphase abgeschlossen. Die Ergebnisse sind im Detail im Endbericht über die erste Projektphase /B/ dokumentiert.

## Zweite Projektphase

### *Arbeitsschritt 2 - Koordination und Organisation der Messungen*

Die zu diesem Arbeitsschritt durchgeführten Arbeiten betrafen folgende Schwerpunkte:

- Auswahl der Anlagen zur Durchführung der Feldmessungen

Der erste Schritt zur Auswahl der Anlagen zur Durchführung der Feldmessungen war die Modifikation eines bereits im Vorprojekt /A/ erstellten Statistikkonzeptes. Ursprünglich war die Durchführung von 210 Feldmessungen (unterteilt in sechs Gruppen zu je 35 Messungen) vorgesehen. Während der Projektbearbeitung wurde festgestellt, daß eine Unterteilung in vier Gruppen (Einzelofen-Holz, EO-H; Einzelofen-Kohle, EO-K; Zentralheizung-Holz, ZH-H; Zentralheizung-Kohle, ZH-K) ausreichend ist, wodurch die Anzahl der Feldmessungen auf 180 reduziert werden konnte: je 35 für EO-H und EO-K und je 55 für ZH-H und ZH-K. Diesen Gruppen wurden dann einzelne Gemeinden zugeordnet. Im nächsten Schritt wurden über die Landesinnungen der Rauchfangkehrer die für diese Gemeinden "zuständigen" Rauchfangkehrer ermittelt, und um die Übermittlung von jeweils drei Adressen von Feuerungsanlagenbetreibern der entsprechenden Gruppe zur Durchführung einer Feldmessung mittels Erhebungsbogen ersucht. Inklusiv abermaliger Aussendung und telefonischer Kontaktaufnahme mit den Rauchfangkehrern konnten auf diese Weise ca. 60% der erforderlichen Adressen ermittelt werden. Die restlichen Adressen wurden durch die Meßteams vor Ort und über persönliche Kontakte ermittelt.

- Festlegung und Beauftragung der Meßteams

Die zur Durchführung der Feldmessungen eingesetzten Meßteams wurden mit Hilfe einer öffentlichen Interessentensuche (Anzeige im Amtsblatt der Wiener Zeitung vom 15. September 1995) und der Kontaktaufnahme mit bekannten Firmen ermittelt. Die an der Durchführung von Feldmessungen interessierten Firmen wurden mittels Ausschreibung vom 11. 11. 1996 zur Abgabe eines Angebotes auf der Basis des in der ersten Projektphase erstellten Pflichtenheftes

(Ausschreibung nach ÖNORM A2050 - Verhandlungsverfahren) eingeladen. Aus den neun eingelangten Anboten sind nach einer Anbotsbewertung sechs Meßteams in die engere Wahl gekommen.

- Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Zur Sicherstellung der erforderlichen Qualität der Feldmessungen wurden mehrere Maßnahmen ergriffen. Es wurden von jedem Meßteam Vergleichsmessungen an einer Versuchsanlage (Einzelofen) sowie Staubvergleichsmessungen und Vergleichsmessungen betreffend die CO<sub>2</sub>-Tracergas-Methode durchgeführt. Die Bewertung der Vergleichsmessungen erfolgten gemeinsam mit einem nicht der JOANNEUM RESEARCH angehörenden Experten. Aufgrund der Ergebnisse der Vergleichsmessungen wurden fünf Meßteams mittels Werkvertrag mit der Durchführung von Feldmessungen beauftragt. Für diese Meßteams wurde eine "Anleitung" zur Durchführung der Feldmessungen erstellt. Der geplante zeitliche Ablauf der Durchführung der Feldmessungen durch die jeweiligen Meßteams wurde im voraus der Projektleitung bekanntgegeben. Die von den Meßteams vorausgewerteten Daten wurden auf Diskette oder per e-mail übermittelt und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen.

### *Arbeitsschritt 3 - Durchführung der Feldmessungen*

Im Zeitraum vom 20. Juni 1997 bis 25. Juni 1998 wurden 180 Feldmessungen (29 EO-H, 22 EO-K, 79 ZH-H, 50 ZH-K) durchgeführt. Die Abweichung der jeweiligen Anzahl von der geplanten Anzahl ergab sich zum Teil aus Problemen bei der Anlagenauswahl und zum Teil aus falschen Angaben der Anlagenart und des verwendeten Brennstoffes, d.h. das Meßteam hat eine andere Anlagen/Brennstoffkombination als angegeben vorgefunden.

Die Feldmessungen erstreckten sich in der Regel über eine gesamte Ofenreise d.h. vom Einheizen bis zum Erlöschen des Feuers. Dabei wurden folgende Größen in Abständen von 6 Sekunden gemessen und in einem Datenfile aufgezeichnet:

Sauerstoff-, Kohlendioxid-, Kohlenmonoxid-, Stickstoffoxid- und org-C-Konzentration im Verbrennungsgas sowie die Temperatur und die Geschwindigkeit des Verbrennungsgases an der Meßstelle. Die Staubmessung (Gravimetrisches Verfahren) wurde in Halbstundenintervallen durchgeführt. Die Meßstelle lag so nahe an der Feuerungsanlage, wie dies aus technischen und praktischen Gründen möglich war. Die während der Messung verfeuerte Brennstoffmenge wurde gewogen und es wurden Proben zur Ermittlung der Wassergehalt nach der Trockenschrankmethode gezogen. Zusätzlich zu den Meßdaten wurden vor Ort Daten, betreffend den durchschnittlichen jährlichen Brennstoffeinsatz, die technischen Daten der Feuerungsanlage, des Kamins (Fang) und des Gebäudes erhoben und in einem Erhebungsblatt dokumentiert.

#### *Arbeitsschritt 4 - Auswertung der Meßergebnisse und Ermittlung der Emissionsfaktoren sowie deren Vertrauensbereiche*

Die Daten der Feldmessungen wurden von den Meßteams der Projektleitung per e-mail oder auf Disketten übermittelt. Anschließend wurden alle Meßergebnisse auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Aus den vorliegenden Meßergebnissen wurden die spezifischen Emissionswerte für jede Feldmessung ermittelt. Da eine direkte SO<sub>2</sub>-Messung, aufgrund der bekannten Querempfindlichkeiten der übliche Analysatoren, nicht möglich war, wurden die SO<sub>2</sub>-Emission aufgrund von in der Literatur /C/ angegebenen Schwefelgehalte der verfeuerten Brennstoffe errechnet. Dabei wurde angenommen, daß der gesamte Schwefel als SO<sub>2</sub> emittiert wird.

Die spezifischen Emissionswerte einer Feldmessung wurden wie folgt berechnet:

$$SE^k = \frac{\sum_{l=1}^L c_l^k \cdot V_l^{VG} \cdot \Delta t_l}{m_{Br} \cdot Hu}$$

Abkürzungen:

SE... spezifische Emissionswerte [mg/MJ]  
 c..... Konzentration [mg/m<sup>3</sup>]  
 V..... Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]  
 m..... Masse [kg]  
 Hu... Heizwert [MJ/kg]  
 Δt..... Zeitintervall [6 Sekunden]

Indizes:

k..... Schadstoffkomponente  
 1 bis 4 (CO, NO<sub>x</sub>, org-C, Staub)  
 l..... Summenindex 1 bis L  
 L..... Anzahl der Meßwerte  
 Br... Brennstoff  
 VG... Verbrennungsgas

Diese spezifischen Emissionswerte wurden zusammen mit dem durchschnittlichen jährlichen Brennstoff- bzw. Endenergieeinsatz, zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für jede der vier Gruppen herangezogen. Der Emissionsfaktor wurde entsprechend nachstehender Formel berechnet.

$$EF_j^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} SE_{j,i}^k \cdot EE_{j,i}}{\sum_{i=1}^{n_j} EE_{j,i}}$$

Abkürzungen:

EF... Emissionsfaktor [mg/MJ]  
 SE... spezifische Emissionswerte [mg/MJ]  
 EE... Endenergieeinsatz  
 pro Jahr [MJ/a]

Indizes:

k..... Schadstoffkomponente  
 1 bis 4 (CO, NO<sub>x</sub>, org-C, Staub)  
 j..... Gruppe von Feuerungsanlagen  
 1 bis 4 (EO-H, EO-K, ZH-H, ZH-K)  
 i..... Einzelmessungen an Feuerungen  
 1 bis n<sub>j</sub>  
 n<sub>j</sub>..... Anzahl der Messungen pro Gruppe

Da es sich hier um einen aus einer Stichprobe ermittelten Wert handelt, ist es notwendig für den ermittelten, durchschnittlichen Emissionsfaktor einen Vertrauensbereich anzugeben, in dem der in der Realität tatsächlich vorhandene Wert mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% liegt (95%-Vertrauensbereich).

Der Vertrauensbereich wird unter Anwendung des zentralen Grenzwertsatzes für Mittelwerte unter einer Normalverteilungsannahme berechnet /D/.

### Ergebnisse

Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren wurden die Ergebnisse von 173 Feldmessungen herangezogen. Sieben Feldmessungen konnten nicht verwertet werden. Der Grund dafür lag in der nicht möglichen Bestimmung des zeitlichen Verlaufes des Volumenstromes und dem Fehlen von Meßwerten in wichtigen Emissionsphasen.

Die in der folgenden Tabelle angeführten Emissionsfaktoren (mg/MJ) gelten für die derzeit (1997/98) vorhandene Anlagenverteilung im Sektor Kleinverbrauch in Österreich und stellen die durchschnittlichen Schadstoffemissionen (mg) bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie (MJ) im Jahresmittel dar.

Tabelle: Durchschnittliche Emissionsfaktoren (mg/MJ) österreichischer Festbrennstoff-Feuerungsanlagen im Sektor Kleinverbrauch für den Anlagenbestand 1997/98

Gruppe Schadstoff	Einzelofen Holz		Einzelofen Kohle		Zentralheizung Holz		Zentralheizung Kohle	
	CO	4.463		3.705		4.303		4.206
95%-Vertrauensbereich	2.916	6.010	2.120	5.290	3.519	5.088	3.311	5.100
	± 35%		± 43%		± 18%		± 21%	
NO <sub>x</sub>	106		132		107		78	
95%-Vertrauensbereich	70	140	78	185	79	136	61	94
	± 34%		± 41%		± 26%		± 22%	
org-C	664		341		448		288	
95%-Vertrauensbereich	255	1.073	184	497	338	559	143	432
	± 62%		± 46%		± 25%		± 50%	
Staub	148		153		90		94	
95%-Vertrauensbereich	80	217	76	230	67	112	43	145
	± 46%		± 50%		± 26%		± 54%	
SO <sub>2</sub> <sup>*)</sup>	11		340		11		543	
95%-Vertrauensbereich	-	-	207	472	-	-	471	615
	-		± 39%		-		± 13%	
95%-Vertrauensbereich (absolut und relativ): Bereich, in dem der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt *) Holz: Wert berechnet mit einem Schwefelgehalt aus der Literatur - daher kein Vertrauensbereich; Kohle: Wert berechnet mit den Schwefelgehalten verschiedener Kohlen aus der Literatur und dem Schwefelgehalt des bei den Feldmessungen zugefeuerten Holzes.								

Die angeführten Emissionsfaktoren sind für Berechnung der gegenwärtigen Gesamtemissionen von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe für Österreich geeignet. Sie dürfen nicht für die Charakterisierung einzelner Anlagen herangezogen werden und geben auch keine Auskunft über den derzeitigen Stand der Technik bei neuen Festbrennstofffeuerungen.

## Literatur

- /A/ Stiglbrunner R., Golja F., Gölles J., Spitzer J.: "Vorprojekt für ein Meßprogramm zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Schadstoffe SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, org-C und Staub bei Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im privaten Sektor", JOANNEUM RESEARCH, Graz, Dezember 1994
- /B/ Stiglbrunner R., Golja F., Spitzer J.: "Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe: Erste Phase - Durchführung von Vorversuchen zur Entwicklung einzelner Meßmethoden", Endbericht; JOANNEUM RESEARCH, Graz, Oktober 1996
- /C/ Geißler S., Bertsch E.: "GEMIS-Österreich-Anpassung: Primärenergie und Graue Energie", Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, November 1996
- /D/ Hartung J.: "Statistik", Oldenbourg Verlag München Wien, 1989
- /E/ Energiebericht 1996 der österreichischen Bundesregierung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten