



## Jahresbericht 2000

Über die Arbeiten gemäss Verfügung: 77463

**Titel des Projekts: Praxiserhebung über Partikel- und Stickoxidemissionen automatischer Holzfeuerungen**

### **Zusammenfassung:**

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erhebung der Partikel- und Stickoxidemissionen von automatischen Holzfeuerungen sowie eine statistische Auswertung dieser Daten zur Bestimmung von Emissionsfaktoren und soweit möglich zur Beschreibung der wichtigsten Einflussfaktoren. Dazu erfolgte eine Datenerhebung bei Umweltämtern und Feuerungsherstellern. Die Messungen ermöglichten eine Datenbank von über 250 Holzfeuerungen mit mehr als 1000 Einzelmessungen und deren Auswertung zeigt folgende Resultate:

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitteln liegen die mittleren NO<sub>x</sub>-Emissionen bei rund 220 mg/Nm<sup>3</sup> (bei 11 Vol.-% O<sub>2</sub>). Die Altholzverbrennung führt im Mittel zu höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen als diejenige von naturbelassenem Holz, die am stärksten variierenden und höchsten NO<sub>x</sub>-Emissionen wird bei Restholz beobachtet. Einige Feuerungen zeigen eine klare Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emissionen von der Kessellast und der Luftüberschusszahl. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind stark abhängig vom Brennstoff sowie vom Anlagentyp und der Betriebsweise.

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holz- und Restholzschnitteln liegen die mittleren Staubgehalte im Abgas im Bereich von 120 mg/Nm<sup>3</sup> (bei 11% O<sub>2</sub>). Die Partikelemissionen sind in deutlich geringerem Ausmass vom Anlagentyp, Anlagenbetrieb oder Brennstoff abhängig als die NO<sub>x</sub>-Emissionen. Die deutlichsten Unterschiede zeigt der Vergleich zwischen Prüfstands- und Feldmessungen, wobei auf dem Prüfstand tiefere Staubgehalte als bei Feldmessungen ausgewiesen wurden.

**Dauer des Projekts:** 1.6.00 bis 31.12.00

**Beitragsempfänger:** Verenum und Ardens GmbH  
**Berichtersteller:** Dr. Philipp Hasler, PD Dr. Thomas Nussbaumer  
**Adresse:** Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich  
Telefon 01' 364 14 12, Fax 01' 364 14 12  
email: verenum@access.ch

# 1 Zielsetzung

Holzfeuerungen weisen gegenüber Öl- und Gasfeuerungen mehrfach höhere Stickoxid- und Partikelemissionen pro Nutzwärme auf. Beim Vergleich der gesamten Umweltauswirkungen tragen vor allem diese beiden Luftfremdstoffe zum Schädigungspotenzial der Holzfeuerungen bei, so dass eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Holzfeuerungen prioritär durch eine Reduktion der Partikel- und die Stickoxidemissionen zu erreichen ist.

Die vorliegende Studie soll den Stand der Technik von automatischen Holzfeuerungen in Bezug auf Stickoxid- und Partikelemissionen anhand von Abnahme- und Kontrollmessungen sowie von dokumentierten Messungen im praxisnahen Betrieb aufzeigen. Im weiteren sollen nach Möglichkeit die wichtigsten Einflussparameter auf die beiden Schadstoffkomponenten aufgezeigt werden.

## 2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### 2.1 Durchgeführte Arbeiten

#### 2.1.1 Datenerhebung

Basis für die Datenauswertung bilden die bei kantonalen Umweltämtern und bei Feuerungsherstellern während der letzten Jahre dokumentierten Abnahme- und Kontrollmessungen von in der Schweiz installierten Holzfeuerungen. Die Datenerhebung erfolgte durch eine Anfrage des BUWAL oder des BFE um Zustellung der Messberichte über Holzfeuerungen mit Stickoxid- und Staubmessungen an die entsprechenden Stellen zur anonymen Datenauswertung.

Insgesamt stellten Umweltämter aus 15 Kantonen und 5 Holzfeuerungsfirmen zum Teil umfangreiches Informationsmaterial zur Verfügung. Als Ergänzung dazu wurden dokumentierte Messungen von Holzfeuerungen verwendet, welche in den vergangenen Jahren im Rahmen von Forschungs- und Untersuchungsprojekten sowie bei Prüfstandsmessungen (BLT Wieselburg) durchgeführt wurden.

Das grosse Interesse der angefragten Institutionen und Firmen sowie deren Unterstützung bei der Datenerhebung hat eine umfangreiche Datenbank ergeben, die eine statistische Auswertung erlaubt und ein repräsentatives Bild der in der Schweiz installierten automatischen Holzfeuerungen wiedergeben dürfte. Die Datenbank umfasst über 1000 Einzelmessungen von mehr als 250 in der Schweiz installierten Holzfeuerungen beim Betrieb mit naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kategorie b), Restholz (LRV Kat. c) und Altholz. Von Stückholzfeuerungen (LRV Kat. a) liegen zu Vergleichszwecken einige wenige Messwerte vor.

#### 2.1.2 Auswertung

Aus den Rohdaten wurde eine Datenbank erstellt. Wo nötig erfolgten Umrechnungen, um vergleichbare Zahlenwerte zu erhalten (z.B. eine Normierung auf einen einheitlichen Sauerstoffgehalt) oder um nicht dokumentierte Werte zu berechnen (z.B. Abschätzung der Feuerraumbelastung aus Leistung und Volumen). Nebst einer numerischen Auswertung der Daten erfolgte eine grafische Visualisierung. Im weiteren wurden nebst der effektiven Emissionssituation sowohl für die Stickoxid- als auch für die Partikelemissionen die wichtigsten Einflussfaktoren ermittelt, soweit dies anhand der vorliegenden Daten möglich war.

## 2.2 Ergebnisse

### 2.2.1 Übersicht

Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der untersuchten Kesselnennleistungen von Feuerungsanlagen für die Brennstoffe der LRV Kategorie b und c sowie von Altholz.

Rund 60% aller Holzfeuerungen für naturbelassene Brennstoffe weisen Nennleistungen unter 500 kW und weniger als 5% der Anlagen solche über 2000 kW auf. Die Verteilung der Leistungen der Restholzfeuerungen ist ähnlich, wobei 60% aller Anlagen im Bereich <500 kW liegen und <10% der Anlagen Leistungen über 2000 kW aufweisen. Die Altholzfeuerungen weisen Nennleistungen zwischen 750 kW und 5000 kW auf.

Abbildung 2.2 zeigt die Verteilungen der Emissionen von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Staub und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) sowie die Verteilung der Luftüberschusszahlen  $\lambda$  über alle untersuchten Feuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln.

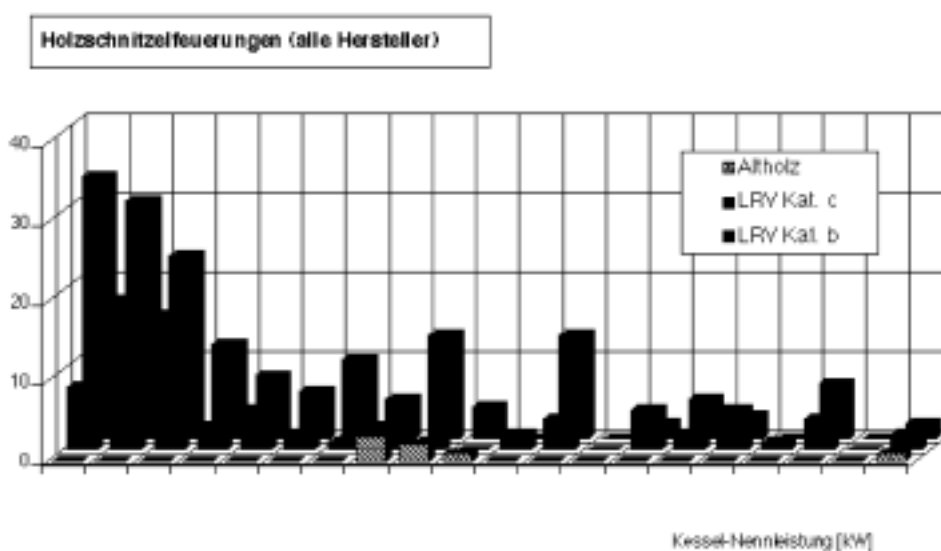


Abbildung 2.1: Verteilung der untersuchten Anlageleistungen im Bereich von <100 kW bis 2000 kW für Holzbrennstoffe LRV Kat. b und c sowie für Altholz

Bemerkungen: Die Ermittlung der Anzahl installierter Anlagen erfolgt aus der Anzahl Messpunkte und der Gesamtanzahl installierter Anlagen in der jeweiligen Brennstoffklasse

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln wird annähernd eine Normalverteilung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen beobachtet, wobei die mittleren  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Bereich von  $220 \text{ mg/Nm}^3$  (bei 11%  $\text{O}_2$ ) liegen. Die über sämtliche Hersteller kumulierten Häufigkeitsverteilungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (naturbelassene Holzschnitzel) verlaufen im Konzentrationsbereich von 100 bis  $300 \text{ mg/Nm}^3$  relativ flach und zeigen geringe Unterschiede zwischen Unterschub- und Rostfeuerungen. Von sämt-

lichen untersuchten Feuerungstypen und Herstellern gibt es  $\text{NO}_x$ -Messwerte, die unter  $200 \text{ mg/Nm}^3$  liegen. Selbst bei der Rindenverbrennung sind Werte deutlich unter  $200 \text{ mg/Nm}^3$  möglich.

Die Verteilung der Partikelemissionen ist bei naturbelassenen Holzschnitzeln etwas breiter als diejenige der  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Die mittleren Staubgehalte im Abgas liegen im Bereich von  $120 \text{ mg/Nm}^3$  (bei 11%  $\text{O}_2$ ).

Die CO-Emissionen der meisten untersuchten Holzschnitzelfeuerungen sind gering. Rund 2/3 der Messwerte liegen unter  $250 \text{ mg/Nm}^3$  (bei 11%  $\text{O}_2$ ). CO-Emissionen von mehr als  $1000 \text{ mg/Nm}^3$  werden nur bei Anlagen mit weniger als 500 kW Kesselnennleistung beobachtet.

Die Luftüberschusszahlen variieren in einem grossen Bereich von  $1,2 < \lambda < 5$ . Die häufigsten Werte sind im Bereich von 1,8 bis 2,4 anzutreffen und knapp 30% der untersuchten Anlagen weisen Luftüberschusszahlen von  $\lambda > 2,4$  auf. Die Luftüberschusszahl sollte aus energetischen, wirtschaftlichen und lufthygienischen Gründen so tief wie möglich sein.

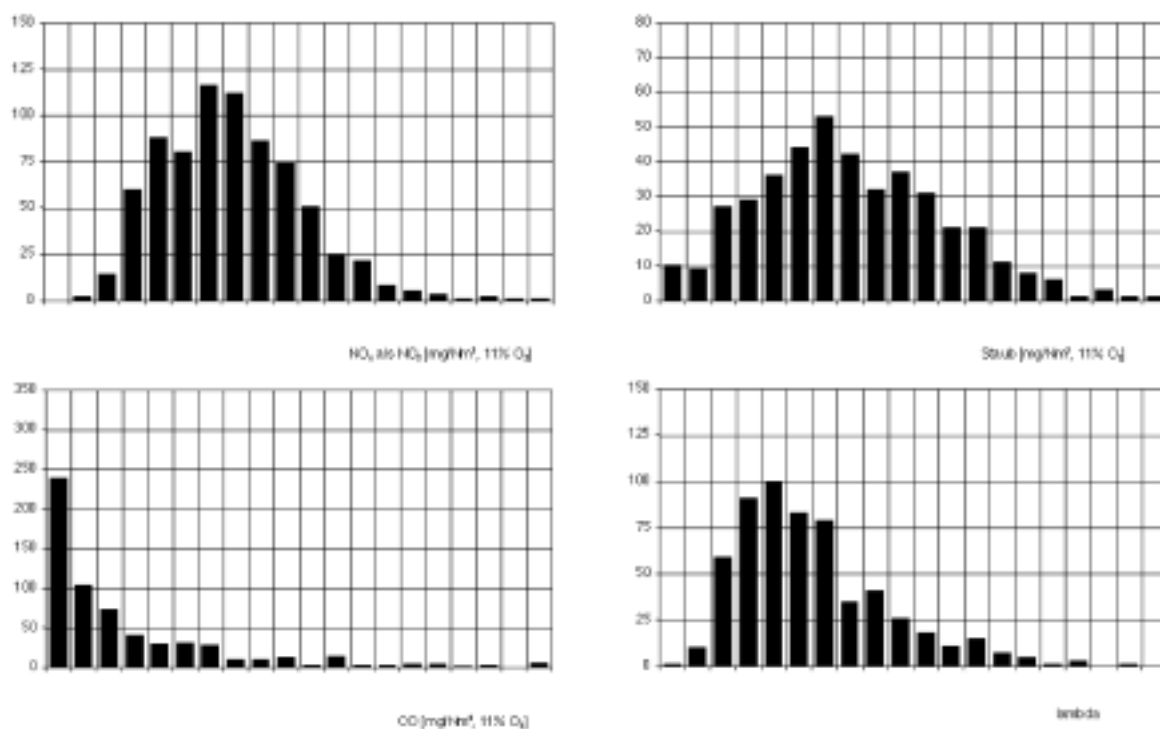


Abbildung 2.2: Verteilungen der Emissionen von  $\text{NO}_x$ , Staub und CO sowie der Luftüberschusszahlen  $\lambda$  für alle untersuchten Holzschnitzelfeuerungen der LRV Kat. b

Lesebeispiel (1. Grafik oben links): Die erste Wertebereichsklasse (1. Feld links auf der X-Achse) beinhaltet die  $\text{NO}_x$ -Messwerte im Bereich von 0 ..  $30 \text{ mg/Nm}^3$

Bemerkungen: Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen; Emissionswerte mit  $\text{O}_2$ -Bezug auf 11 Vol.-%.

## 2.2.2 Stickoxidemissionen

Die Verbrennung von Altholz führt im Mittel zu höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen als diejenige von naturbelassenem Holz. Altholzfeuerungen können allerdings auch vergleichbare NO<sub>x</sub>-Messwerte aufweisen wie Holzfeuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln. Die am stärksten variierenden und die höchsten NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigen Restholzfeuerungen. Die grosse Schwankungsbreite ist durch die Stickstoffgehalte der entsprechenden Brennstoffsortimente zu erklären, da Restholz gemäss LRV sowohl Brennstoffe mit tiefen N-Gehalten (z.B. Massivholzschnitzel von Schreinereien) als auch mit hohem N-Gehalt (z.B. Spanplattenschnitzel aus der Möbelfabrikation) beinhalten kann.

In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren Emissionsfaktoren für Stickoxide mit Bezug auf die abgegebene Nutzwärme für verschiedene Holzbrennstoffe und für Altholz zusammengestellt. Die abgegebene Nutzwärme basiert auf einer jährlich abgegebenen Nutzenergie und sämtliche Emissionsmesswerte stammen aus Feldmessungen.

Brennstoff	Emissionsfaktor für Stickoxide [ mg NO <sub>2</sub> / MJ ]
Stückholz (LRV Kat. a)	102
naturbelassene Holzschnitzel (LRV Kat. b)	163
Restholz (LRV Kat. c)	289
Altholz gemäss LRV	211

Einige Rostfeuerungen zeigen eine klare Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emissionen von der Kessellast, indem bei sinkender Last geringere NO<sub>x</sub>-Emissionen auftreten. Unterschubfeuerungen zeigen diese Tendenz dagegen kaum oder deutlich schwächer.

Obwohl der Gesamtluftüberschuss nicht zwingend einen Einfluss auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen hat, wird bei einzelnen Anlagentypen ein NO<sub>x</sub>-Minderungseffekt mit sinkendem Luftüberschuss festgestellt, was durch NO<sub>x</sub>-reduzierende Effekte in einer untersöchiometrischen Zone erklärt wird. Die Stickoxidemissionen können allerdings auch bei tiefer Luftüberschusszahl hoch sein, wenn z.B. die Temperatur zu tief oder die Verweilzeit in der Reduktionszone zu kurz ist für eine signifikante NO<sub>x</sub>-Reduktion. Anhand einer über einen Zeitraum von mehreren Jahren ausgemessenen Anlage konnte gezeigt werden, dass bei gleichem Brennstoff auf derselben Anlage allein durch die Einstellung der Verbrennungsluftmengen eine signifikante NO<sub>x</sub>-Minderung möglich ist. Die dort erzielte Reduktion ist nahe dem maximalen Wert, welcher in einer Laborfeuerung bei optimaler zweistufiger Verbrennung und einem Brennstoff mit vergleichbarem Stickstoffgehalt ermittelt wurde.

### 2.2.3 Partikelemissionen

Die Partikelemissionen der untersuchten Restholzfeuerungen zeigen keine signifikanten Unterschiede zu denjenigen aus Holzfeuerungen für naturbelassenes Holz. Beim Vergleich mit Altholz ist zu beachten, dass für Altholz strengere Grenzwerte gelten und zu deren Einhaltung Gewebe- oder Elektrofilter zum Einsatz kommen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren Emissionsfaktoren für Partikel mit Bezug auf die abgegebene Nutzwärme für verschiedene Holzbrennstoffe und für Altholz zusammengestellt.

Brennstoff	Emissionsfaktor für Partikel [mg/MJ]
Stückholz (LRV Kat. a)	45
naturbelassene Holzschnitzel (LRV Kat. b)	90
Restholz (LRV Kat. c)	93
Altholz gemäss LRV	2

Bei den Partikelemissionen wird eine deutlich geringere Abhängigkeit vom Anlagentyp, vom Anlagenbetrieb und vom Brennstoff beobachtet als bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen. Tendenziell weisen Unterschubfeuerungen tiefere Partikelemissionen auf als Rostfeuerungen. Innerhalb desselben Feuerungstyps sind jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellern erkennbar. Die Luftüberschusszahl scheint nur einen geringen Einfluss auf die Partikelemissionen zu haben. Zudem sind die Partikelemissionen deutlich schwächer vom Brennstoff abhängig als die NO<sub>x</sub>-Emissionen. Die deutlichsten Unterschiede in den Partikelemissionen zeigt der Vergleich zwischen Prüfstands- und Feldmessungen, wobei auf dem Prüfstand tiefere Staubgehalte resultierten als bei Feldmessungen.

#### 2.2.4 Schlussfolgerungen

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigen eine breite Streuung auf und werden von drei teilweise unabhängigen Faktoren beeinflusst, nämlich dem Brennstoff (insbesondere dem Stickstoffgehalt), der Feuerungstechnik und der Betriebsweise. Für die Beurteilung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Holzfeuerungen muss dies berücksichtigt werden, da wegen dieser drei Faktoren zum Beispiel keine abschliessende Beurteilung der Feuerungstechnik in Bezug auf NO<sub>x</sub>-Emissionen allein auf Grund von Abnahme- und Kontrollmessungen ohne Kenntnis des Stickstoffgehalts möglich ist. Ein Anlagenvergleich würde zusätzlich systematische Untersuchungen der NO<sub>x</sub>-Kennfelder für verschiedene Brennstoffe erfordern und eine Anlagenbeurteilung im Hinblick auf das NO<sub>x</sub>-Minderungspotenzials zudem die Variation der Betriebseinstellungen. Die gleiche Problematik stellt sich grundsätzlich auch bei den Partikelemissionen, wobei im Vergleich zu den Stickoxidemissionen eine weniger klare Abhängigkeit von Brennstoff, Konstruktion und Anlagenbetrieb vorhanden ist.

### **3 Zusammenarbeit**

Die Auswertung und Interpretation der Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit einem Teil der involvierten Feuerungsherstellern sowie dem Bundesamt für Energie und dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

### **4 Transfer von Ergebnissen in die Praxis**

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen der Stickoxidemissionen wurden am 6. Holzenergie-Symposium vom 20. Oktober 2000 an der ETH Zürich vorgestellt. Der Schlussbericht wird Ende 2000 in gedruckter Form vorliegen und allen beteiligten Umweltämtern und Feuerungsherstellern zugestellt. Die Erfahrungen betreffend Stickoxidemissionen sollen als Basis dienen für eine systematische Folgeuntersuchung, während die Auswertung der Partikelemissionen die laufenden Untersuchungen zur Aerosolbildung in automatischen Holzfeuerungen ergänzen. Nebst der Verwertung für weitere Entwicklungsanstrengungen dienen die Daten dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft zur Bestimmung von Emissionsfaktoren für zukünftige Erhebungen.

### **5 Publikationen**

Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th; Jenni, A.: *Praxiserhebung über Stickoxidemissionen automatischer Holzfeuerungen*, 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 69-90

Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th; Jenni, A.: *Stickoxid- und Partikelemissionen von automatischen Holzfeuerungen – Erhebung und Auswertung von Emissionsdaten*, Schlussbericht, Bundesamt für Energie und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000 (im Druck)