



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm Biomasse

EF Nr. 200139

Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen

Erhebung und Auswertung von Emissionsdaten

ausgearbeitet durch

Philipp Hasler, Verenum, Zürich

Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

Andres Jenni, Ardens GmbH, Liestal

im Auftrag von
Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Dezember 2000

Schlussbericht

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft entstanden. Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

Bezugsquelle

ENET, Egnacherstrasse 69, CH - 9320 Arbon

Telefon: 0041 (0)71 440 02 55, Fax: 0041 (0)71 440 02 56

email: enet@temas.ch



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Programm Biomasse

Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen

Erhebung und Auswertung von Emissionsdaten

ausgearbeitet durch

Dr. Philipp Hasler, Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich

PD Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich

Andres Jenni, Ardens GmbH, Grammetstrasse 14, 4410 Liestal

im Auftrag von

Bundesamt für Energie

Bundesamt für Umwelt, Land und Landschaft

Dezember 2000

Schlussbericht

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	7
2	Zusammenfassung	9
3	Ausgangslage und Zielsetzung	13
4	Grundlagen der Stickoxidbildung	15
5	Grundlagen der Partikelbildung	19
6	Vorgehen	21
7	Stickoxidemissionen	23
7.1	Bemerkungen zu den Stickoxidaten.....	23
7.2	Überblick.....	24
7.3	Vergleich zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen.....	28
7.4	Brennstoffbedingte Stickoxidemissionen.....	29
7.5	Betriebliche Einflüsse auf die Stickoxidemissionen.....	30
7.5.1	Lastabhängigkeit der Stickoxidemissionen.....	30
7.5.2	Einfluss der Luftüberschusszahl auf die Stickoxidemissionen.....	33
7.5.3	Konstruktive Einflüsse auf die Stickoxidemissionen.....	35
7.6	Emissionsfaktoren für Stickoxide.....	39
8	Partikelemissionen	41
8.1	Bemerkungen zu den Staubdaten.....	41
8.2	Überblick.....	41
8.3	Vergleich zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen.....	47
8.4	Brennstoffbedingte Partikelemissionen.....	48
8.5	Konstruktive Einflüsse auf die Partikelemissionen.....	49
8.6	Betriebliche Einflüsse auf die Partikelemissionen.....	50
8.7	Emissionsfaktoren für Partikel.....	51
9	Schlussfolgerungen	53
10	Verdankung	55

1 1	Anhang.....	5 7
11.1	Tabellarische Anzahlverteilung der untersuchten Kessel-Nennleistungen.....	57
11.2	Tabellarische Zusammenstellungen von statistischen NO _x -Kenndaten.....	59
11.3	Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der NO _x -Emissionen (LRV Kat. b).....	63
11.4	NO _x -Emissionen in Abhängigkeit des Baujahres (LRV Kat. b).....	64
11.5	NO _x -Emissionen in Abhängigkeit der Nennleistung (LRV Kat. b).....	65
11.6	Zusammenstellung NO _x (Rostfeuerung Hersteller A).....	66
11.7	Zusammenstellung NO _x (Rostfeuerung Hersteller B).....	67
11.8	Zusammenstellung NO _x (Rostfeuerung Hersteller C).....	68
11.9	Zusammenstellung NO _x (Unterschubfeuerung Hersteller A).....	69
11.10	Zusammenstellung NO _x (Unterschubfeuerung Hersteller B).....	70
11.11	Zusammenstellung NO _x (Unterschubfeuerung Hersteller C).....	71
11.12	Tabellarische Zusammenstellung von statistischen Partikelemissions-Kenndaten.....	72
11.13	Zusammenstellung Staub (Rostfeuerung Hersteller A).....	75
11.14	Zusammenstellung Partikel (Rostfeuerung Hersteller B).....	76
11.15	Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller A).....	77
11.16	Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller B).....	78
11.17	Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller C).....	79
1 2	Literatur.....	8 1

1 Abstract

Nitrogen oxide and particle emissions from automatic wood furnaces

Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer, Andres Jenni

This report summarizes the emission of nitrogen oxides and particles from wood fired boilers in Switzerland under actual operating conditions. A data base of more than 1000 individual data points was collected from more than 250 automatic wood furnaces which use either native wood chips, residual wood chips from the wood manufacturing and processing industry as well as urban waste wood chips (Altholz) as fuel. Additionally, some manually fed log wood boilers were also considered. For these various wood fuels, mean emission factors based on the net annual heat generated are calculated.

Fuel nitrogen content, furnace design and operating conditions are the main parameters influencing the nitrogen emission of wood boilers. Some furnace types exhibit a distinct dependence of the nitrogen oxide emission from the plant load or the excess air ratio.

The particle emissions show no clear dependence from the fuel and the plant operation. Significant differences were found between measurements under actual operating conditions and measurements under controlled conditions on a test bench. Furthermore, log wood boilers show lower particle emissions than wood chip boilers.

The evaluation shows that a comparison and an assessment of various furnace types and design requires a systematic investigation of the plant behaviour with respect to operation and emission. Test reports from the plant implementation phase or regular control measurements are not sufficient for this purpose.

2 Zusammenfassung

Holzfeuerungen weisen gegenüber Öl- und Gasfeuerungen mehrfach höhere Stickoxid- und Partikelemissionen pro Nutzwärmeeinheit auf. Beim Vergleich der gesamten Umweltauswirkungen tragen deshalb vor allem diese beiden Luftfremdstoffe zum Schädigungspotenzial der Holzfeuerungen bei. Eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Holzfeuerungen ist somit vor allem durch eine Reduktion der Partikel und der Stickoxide zu erreichen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erhebung der Partikel- und Stickoxidemissionen von automatischen Holzfeuerungen anhand von Abnahme- und Kontrollmessungen 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 Datenbank umfasst über 1000 Einzelmesswerte 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 einzelne Messwerte vor.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der untersuchten, installierten Nennleistungen von Feuerungsanlagen für die Brennstoffe der LRV Kategorie b und c sowie von Altholz.

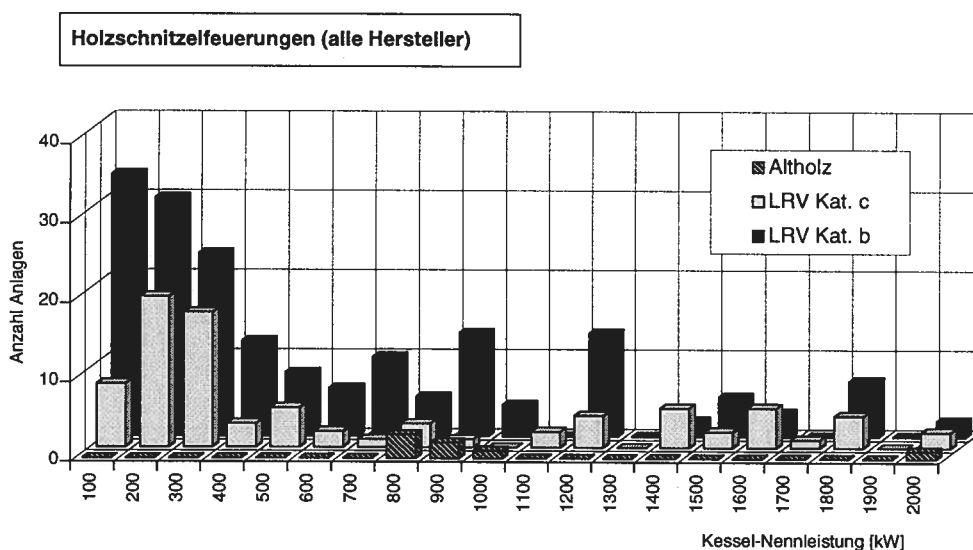


Abbildung 2.1: Verteilung der untersuchten Anlageleistungen im Bereich von <100 kW bis 2000 kW für Holzbrennstoffe LRV Kat. b und c sowie für Altholz

Bemerkungen: Die Ermittlung der Anzahl installierter Anlagen erfolgt aus der Anzahl Messpunkte und der Gesamtanzahl installierter Anlagen in der jeweiligen Brennstoffklasse; Tabellarische Zusammenstellung im Anhang 11.1 (Tabelle 11.2)

Rund 60% aller Feuerungen für naturbelassene Holzbrennstoffe weisen Nennleistungen unter 500 kW und weniger als 5% der Anlagen weisen eine solche über 2000 kW auf. Die Verteilung der Nennleistungen für Restholzfeuerungen ist derjenigen von naturbelassenen Holzschnitzeln ähnlich, wobei 60% aller (untersuchten) Anlagen im Bereich unter 500 kW liegen und weniger als 10% der Anlagen Leistungen über 2000 kW aufweisen.

Die (untersuchten) Altholzfeuerungen weisen Nennleistungen zwischen 750 kW und 5000 kW auf.

Die Abbildung 2.2 zeigt die Verteilungen der Emissionen von Stickoxid (NO_x), (Gesamt-) Staub und Kohlenmonoxid (CO) sowie die Verteilung der Luftüberschusszahlen λ über alle untersuchten Feuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln.

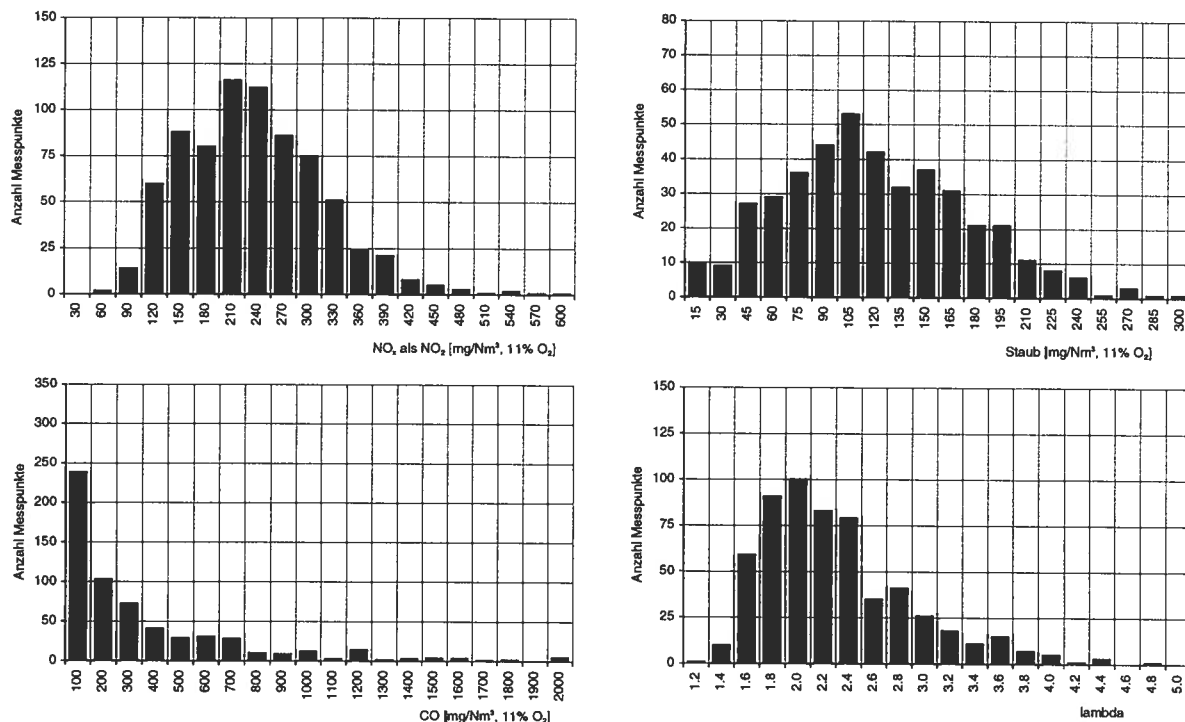


Abbildung 2.2: Verteilungen der Emissionen von NO_x , Staub und CO sowie der Luftüberschusszahlen λ für alle untersuchten Holzschnitzelfeuerungen der LRV Kat. b

Lesebeispiel (1. Grafik oben inks): Die erste Wertebereichsklasse (1. Feld links auf der X-Achse) beinhaltet die NO_x -Messwerte im Bereich von 0 .. 30 mg/Nm^3

Bemerkungen: Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen; Emissionswerte mit O_2 -Bezug auf 11 Vol.-%.

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln wird annähernd eine Normalverteilung der NO_x -Emissionen beobachtet, wobei die mittleren NO_x -Emissionen im Bereich von 220 mg/Nm^3 (bei 11% O_2) liegen. Die über sämtliche Hersteller kumulierten Häufigkeitsverteilungen der NO_x -Emissionen (naturbelassene Holzschnitzel) verlaufen im Konzentrationsbereich von 100 bis 300 mg/Nm^3 relativ flach und zeigen geringe Unterschiede zwischen Unterschub- und Rostfeuerungen. Von sämtlichen untersuchten Feuerungstypen und Herstellern gibt es NO_x -Messwerte, die unter 200 mg/Nm^3 liegen. Selbst bei der Rindenverbrennung sind Werte deutlich unter 200 mg/Nm^3 möglich.

Die Verteilung der Partikelemissionen ist bei naturbelassenen Holzschnitzeln etwas breiter als diejenige der NO_x -Emissionen. Die mittleren Staubgehalte im Abgas liegen im Bereich von 120 mg/Nm^3 (bei 11% O_2).

Die CO -Emissionen der meisten untersuchten Holzschnitzelfeuerungen sind gering. Rund 2/3 der Messwerte liegen unter 250 mg/Nm^3 (bei 11% O_2). CO -Emissionen von mehr als 1000 mg/Nm^3 werden nur bei Anlagen mit weniger als 500 kW Nennleistung 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 >2.4 auf.

Die Verbrennung von Altholz führt im Mittel zu höheren NO_x -Emissionen als diejenige von naturbelassenem Holz. Altholzfeuerungen können allerdings auch vergleichbare NO_x -Messwerte aufweisen wie Holzfeuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln. Ein Vergleich der Partikelemissionen zwischen Altholz und Holzbrennstoffen der Kategorie b oder c ist nicht sinnvoll, da für die jeweiligen Brennstoffe andere Grenzwerte gelten.

Die am stärksten variierenden und die höchsten NO_x -Emissionen zeigen Restholzfeuerungen. Die Hauptursache für die grosse Schwankungsbreite ist der Stickstoffgehalt der entsprechenden Brennstoffsportimente, da Restholz gemäss LRV sowohl Brennstoffe mit tiefen N-Gehalten (z.B. Massivholzschnitzel von Schreinereien) als auch solche mit hohem N-Gehalt (z.B. Spanplattenschnitzel aus der Möbelfabrikation) beinhalten kann. Die Partikelemissionen der untersuchten Restholzfeuerungen zeigen keine signifikanten Unterschiede zu denjenigen aus Holzfeuerungen für naturbelassenes Holz.

In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren Emissionsfaktoren für Stickoxide und Partikel mit Bezug auf die jährlich abgegebene Nutzenergie für verschiedene Holzbrennstoffe und für Altholz zusammengestellt. Sämtliche Emissionsmesswerte stammen aus Feldmessungen.

Brennstoff	Emissionsfaktor für Stickoxide mg NO_2 /MJ	Emissionsfaktor für Partikel mg/MJ
Stückholz (LRV Kat. a)	102	45
naturbelassene Holzschnitzel (LRV Kat. b)	163	90
Restholz (LRV Kat. c)	289	93
Altholz gemäss LRV	211	2

Die NO_x - und Partikelemissionen von Holzfeuerungen sind in verschiedenem Masse von der Feuerungskonstruktion und vom Anlagenbetrieb abhängig.

Einige Rostfeuerungen zeigen eine klare Abhängigkeit der NO_x -Emissionen von der Kessellast, indem bei sinkender Last geringere NO_x -Emissionen auftreten. Unterschubfeuerungen zeigen diese Tendenz dagegen kaum oder deutlich schwächer.

Obwohl der Gesamtluftüberschuss nicht zwingend einen Einfluss auf die NO_x -Emissionen hat, wird bei einzelnen Anlagentypen ein NO_x -Minderungseffekt mit sinkendem Luftüberschuss festgestellt. 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. Anhand einer über einen Zeitraum von mehreren Jahren ausgemessenen Anlage konnte gezeigt werden, dass bei gleichem Brennstoff auf derselben Anlage alleine durch die Einstellung der Verbrennungsluftmengen eine signifikante NO_x -Minderung möglich ist, die nahe dem maximalen Wert liegt, welcher in einer Labor-

feuerung bei optimaler zweistufiger Verbrennung und einem Brennstoff mit vergleichbarem Stickstoffgehalt ermittelt wurde.

Bei den Partikelemissionen wird in deutlich geringerem Ausmass als bei den NO_x-Emissionen eine Abhängigkeit vom Anlagentyp, vom Anlagenbetrieb und vom Brennstoff beobachtet. Tendenziell weisen Unterschubfeuerungen geringere 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 auszuüben. Zudem sind die Partikelemissionen deutlich schwächer vom Brennstoff abhängig als die NO_x-Emissionen.

Die deutlichsten Unterschiede in den Partikelemissionen zeigt der Vergleich zwischen Prüfstands- und Feldmessungen, wobei auf dem Prüfstand immer tiefere Staubgehalte resultieren als bei Feldmessungen.

Die Auswertungen zeigen, dass ein Vergleich oder eine Beurteilung zumindest der NO_x-Emissionen von verschiedenen Holzfeuerungen nicht allein anhand von Abnahme- und Kontrollmessungen möglich ist, sondern dass ein *Anlagenvergleich* systematische Untersuchungen zur Ermittlung der NO_x-Kennfelder und eine *Anlagenbeurteilung* im Hinblick auf das NO_x-Minderungspotenzials zusätzlich weitere Kenndaten erfordert.

3 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Stickoxidemissionen in der Schweiz stammen zu einem Anteil von rund 59% aus dem Verkehr (BUWAL 1995, Stand 2000). Industrie und Gewerbe tragen rund 26%, Land- und Forstwirtschaft 9% und die Haushalte 6% zu den gesamten Stickoxidemissionen bei. Die Emissionen der Feuerungsanlagen für Holz und fossile Brennstoffe sind ihrerseits Teil der Emissionen aus Industrie und Gewerbe (z.B. Holzfeuerungen in der Holzverarbeitenden Industrie) und der Haushalte (Heizungen). Der Beitrag der Holzfeuerungen zu den Gesamtemissionen an Stickoxiden in der Schweiz beträgt rund 2% [Jansen 2000].

Für Holzfeuerungen ist in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) ein vorsorglicher NO_x -Grenzwert von 250 mg/Nm^3 festgelegt, der bei Überschreiten eines Massenstromes von $2,5 \text{ kg/h}$ zur Anwendung gelangt. Für Öl- und Gasheizungen haben die heutigen Vorschriften den Einsatz von Low- NO_x -Techniken zur Konsequenz. Für Ölkessel bis 350 kW werden die Vorschriften mittels Typenprüfung und Begrenzung des zulässigen Stickstoffgehalt im Heizöl vollzogen.

Die Partikelemissionen in der Schweiz stammen mit einem Anteil von rund 43% aus dem Verkehr. Industrie und Gewerbe tragen rund 31%, Land- und Forstwirtschaft 21% und die Haushalte 4% zu den gesamten Partikelemissionen bei [Jansen 2000]. Der Beitrag der Holzfeuerungen beträgt rund 4%.

Die LRV begrenzt die Partikelemissionen von Holzfeuerungen anhand des Staubgehaltes im Abgas (gravimetrisch auf einem beheizten Feinfilter abgeschiedene Gesamtstaubmasse). Von 70 kW bis 1 MW gilt ein Grenzwert von 150 mg/Nm^3 bei 13 Vol.-% O_2 , von 1 MW bis 5 MW von 150 mg/Nm^3 bei 11 Vol.-% O_2 und ab 5 MW von 50 mg/Nm^3 bei 11 Vol.-% O_2 . Bei der Verbrennung naturbelassener Holzbrennstoffe werden die Grenzwerte in der Regel mit Einsatz von Trägheitsentstaubern, welche vor allem eine Abscheidewirkung für Partikel grösser $2 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ aufweisen, eingehalten.

Holzfeuerungen weisen um ein Vielfaches höhere Emissionen von Stickoxiden und Partikel auf als Öl- und Gasfeuerungen. Beim Vergleich der gesamten Umweltauswirkungen tragen deshalb vor allem die Stickoxid- und Partikelemissionen zum Schädigungspotenzial der Holzfeuerungen bei: Nach der Methode der ökologischen Knappheit tragen die Stickoxide $38,6\%$ und die Partikel $36,5\%$ zur Umweltbelastung einer automatischen Holzfeuerung bei, während alle anderen Faktoren zusammen knapp 25% ausmachen [BUWAL 2000]. Bei der totalen Umweltbelastung schneidet Holz im Vergleich zu Heizöl besser ab, im Vergleich zu Erdgas schlechter (im Verhältnis Erdgas : Holz : Heizöl von $1 : 1,32 : 1,72$). Bei einer Bewertung des Bedarfs an nicht erneuerbarer Energie schneidet Holz dagegen um rund einen Faktor 15 besser ab als Heizöl und Erdgas.

Eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Holzfeuerungen ist somit vor allem durch eine Reduktion der Partikel- und die Stickoxidemissionen zu erzielen. Da der Bund den Einsatz automatischer Holzfeuerungen ab 100 kW zur Stabilisierung der CO_2 -Emissionen fördert, sollten die Minderungsmaßnahmen jedoch nicht zu prohibitiven Kosten führen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erhebung der Partikel- und Stickoxidemissionen von automatischen Holzfeuerungen anhand von Abnahme- und Kontrollmessungen im praxisnahen Anlagenbetrieb sowie eine statistische Auswertung dieser Daten zur Bestimmung von Emissionsfaktoren und soweit möglich zur Beschreibung der wichtigsten Einflussfaktoren. Dazu erfolgt eine Datenerhebung bei Umweltämtern und Feuerungsherstellern.

4 Grundlagen der Stickoxidbildung

Stickoxide NO_x (NO und NO_2) stammen hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen und tragen zur Bildung von bodennahem Ozon und sauren Niederschlägen bei. Quelle dieser Stickoxidemissionen sind der Luftstickstoff sowie im Brennstoff gebundener Stickstoff. Die wichtigsten Bildungswege sind [Leuckel et al. 1979, Kolar 1990]:

1. *Thermische Stickoxide* entstehen bei hohen Temperaturen aus molekularem Stickstoff und Sauerstoff der Verbrennungsluft.
2. *Prompt-Stickoxide* werden bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoff-Radikalen ebenfalls aus Luftstickstoff und Luftsauerstoff gebildet.
3. *Brennstoffstickoxide* entstehen beim Abbau stickstoffhaltiger Brennstoffe aus chemisch gebundenem Stickstoff.

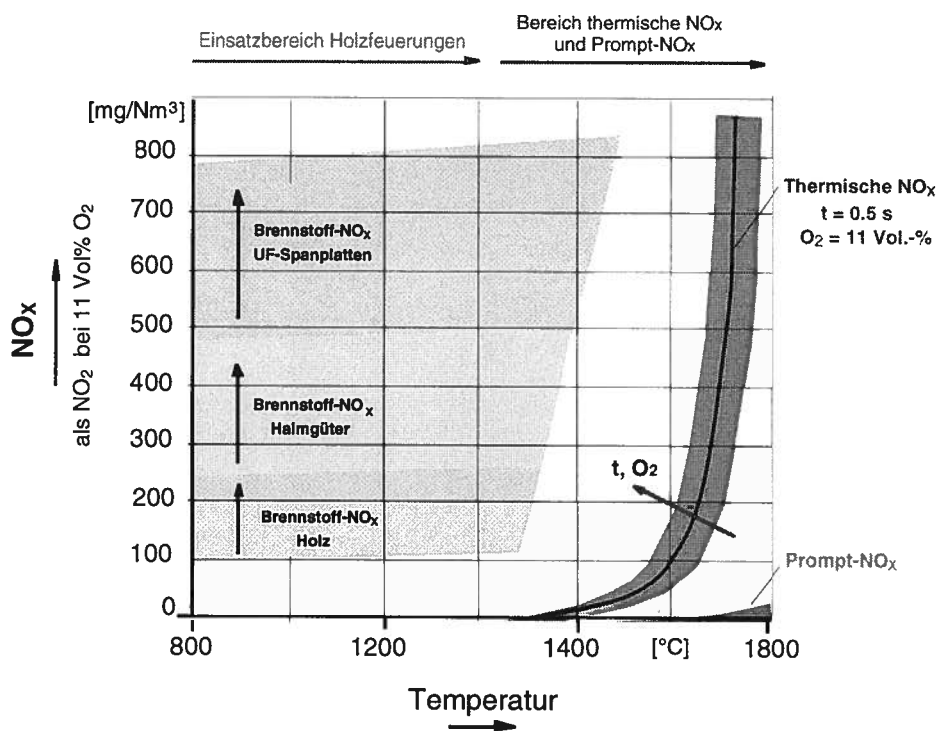


Abbildung 4.1: Brennstoffstickoxide, thermische Stickoxide und Prompt-Stickoxide in Funktion der Feuer- raumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richt- werte). Bei üblichen Betriebsbedingungen in Holzfeuerungen (Temperaturen $< 1400^{\circ}\text{C}$) sind praktisch ausschliesslich die Brennstoffstickoxide von Bedeutung [Nussbaumer 1997].

Abbildung 4.1 zeigt die aus den drei Bildungsmechanismen zu erwartenden Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der Temperatur. Für die bei Holzfeuerungen typischen Temperaturen sind die thermi- schen Stickoxide und Prompt-Stickoxide nur von untergeordneter Bedeutung [Nussbaumer 1989]. Quelle für die Stickoxidemissionen bei Holzfeuerungen ist demnach der **Stickstoffgehalt im Brennstoff**.

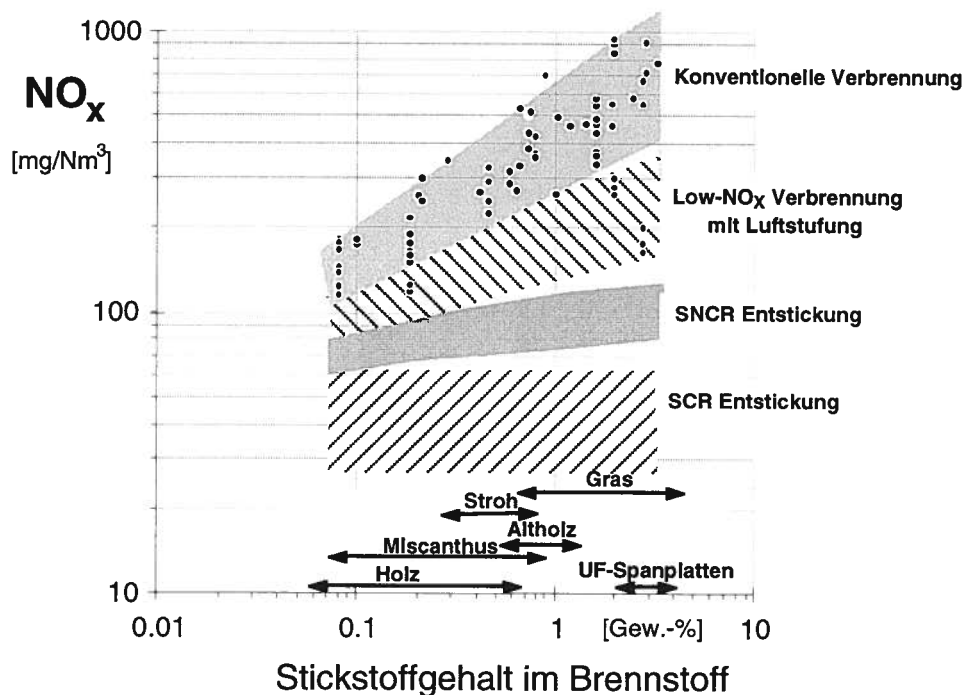


Abbildung 4.2: Bereiche der Stickoxidemissionen von automatischen Holzfeuerungen in Funktion des Brennstoffstickstoffgehalts für konventionelle Verbrennung und Low-NO_x-Verbrennung mit Luftstufung sowie erzielbare Werte mit Abgasentstickung durch SNCR und SCR.

Brennstoffe: Holz, UF-Spanplatten, Gras, Stroh, Miscanthus. Zusammenstellung von rund 70 verschiedenen Messungen nach [Nussbaumer 1997] und [Biollaz et al. 1996].

Allerdings sind die Stickoxidemissionen nicht nur vom Brennstoff abhängig, wie die Abbildung 4.2 zeigt. Bei gleichem N-Gehalt von z.B. 0.1 Gew.-% werden Stickoxidemissionen zwischen 80 mg/Nm³ (Minimum bei Low-NO_x Verbrennung mit Luftstufung) und 200 mg/Nm³ (Maximum bei konventioneller Verbrennung) beobachtet.

Die eingesetzte **Verbrennungstechnologie** spielt daher ebenfalls eine bedeutende Rolle, da sie die technischen Voraussetzungen für eine Stickoxidminderung schafft.

Zur NO_x-Minderung kommen sowohl Primärmaßnahmen ohne Verwendung von Zusatzstoffen als auch Sekundärmaßnahmen mit Einsatz eines Reduktionsmittels zum Einsatz. Die wichtigsten Primärmaßnahmen sind Luftstufung und Brennstoffstufung. Luftstufung kommt vor allem für Brennstoffe ohne ausgeprägte Verschlackungsneigung und für Anlagen ab etwa 100 kW zum Einsatz, während die Brennstoffstufung erst an einer Laboranlage untersucht wurde und in der Praxis bisher nicht zur Anwendung gelangte. Bei der Luft- und Brennstoffstufung erfolgt die Umwandlung des Brennstoffstickstoffs zu molekularem Stickstoff (N₂) in einer unter Sauerstoffmangel betriebenen Reduktionszone, in welcher die stickstoffhaltigen Zwischenprodukte reagieren können [Nussbaumer 1997].

Eine NO_x-Minderung setzt die Einhaltung einer unterstöchiometrischen Zugabe von Primärluft und einer guten Vermischung der Gase in der Reduktionszone voraus. Bei der Luftstufung ist für eine massgebliche Stickoxidminderung zudem eine Temperatur von rund 1'100°C und eine Verweilzeit von rund 0.5 Sekunden in der Reduktionszone erforderlich [Keller 1994].

Das Ausmass der Stickoxidminderung mittels primären Massnahmen hängt demnach nebst der Feuerungskonstruktion auch vom **Betrieb** ab.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass die Stickoxidemissionen von Holzfeuerungen von mehreren Faktoren bestimmt werden, die zum Teil voneinander abhängig sind und zum Teil unabhängig sind, und die im wesentlichen folgenden Hauptfaktoren zugeordnet werden können:

- 1. Brennstoff**
- 2. Feuerungstechnik**
- 3. Betrieb.**

Eine zentrale Grösse beim Brennstoff ist der Stickstoffgehalt. Daneben können weitere Faktoren direkt oder indirekt eine Rolle spielen, wie zum Beispiel der Wassergehalt, welche die Verbrennungstemperatur und die Zusammensetzung der Flamme beeinflusst.

Bei der Feuerungstechnik ist von Bedeutung, ob eine Reduktionszone vorhanden ist. Daneben können zahlreiche Faktoren eine Rolle spielen wie zum Beispiel Rostbelegung, Rostkühlung, Strömungsführung, Unterschub-/Rostprinzip, Einsatz von Abgasrezirkulation usw., deren Einfluss nicht sicher bekannt ist.

Beim Betrieb ist davon auszugehen, dass die oben erwähnten Parameter wie Luftüberschuss und Temperatur eine Rolle spielen, im weiteren allenfalls der Lastzustand, die Betriebsweise (stationär, Ein/Aus) und weitere.

Einige der Faktoren hängen von verschiedenen Parametern ab, so zum Beispiel die Temperatur, welche eine Folge ist vom Wassergehalt im Brennstoff, der die durch die Feuerungstechnik bestimmten Wärmeabfuhr im Feuerraum, sowie dem durch den Betrieb bestimmten Luftüberschuss.

5 Grundlagen der Partikelbildung

Die vorliegende Studie beinhaltet nebst den Stickoxidemissionen auch die Emissionen von Partikeln aus automatischen Holzfeuerungen. Die Gesamtmasse an festen Partikeln bzw. Aerosolen, die bei der Verbrennung in das Abgas gelangen, werden als Staub bezeichnet. Die Messung der Staubgehalte im Abgas erfolgt mittels gravimetrischen Methoden [EMPA 1996].

Über die Mechanismen zur Freisetzung von festen Aerosolen bei der Biomasseverbrennung liegen keine Grundlagenuntersuchungen vor. Dieses Kapitel fasst den bisherigen Wissenstand im Überblick zusammen (aus [Hasler et al. 1998]). Aerosole aus Verbrennungsprozessen entstehen als Produkte aus der unvollständigen und der vollständigen Verbrennung:

a) Aerosole aus unvollständiger Verbrennung:

C-haltige feste oder flüssige Zersetzungsprodukte aus dem Brennstoff

- in Form von unverbrannten Holzbestandteilen
- in Form von Holzkohle
- in Form von organischen Verbindungen, welche aus der thermischen Zersetzung des Brennstoffs als Pyrolyseprodukte entstehen

C-haltige kondensierte Syntheseprodukte

- in Form von Russ
- in Form von organischer Verbindungen (z.B. polyaromatische Kohlenwasserstoffe PAK), welche durch Synthese von Zersetzungsprodukten entstehen

b) Aerosole aus vollständiger Verbrennung:

- Schwerflüchtige, mineralische Holzaschebestandteile wie CaO , Al_2O_3 , SiO_2 etc.
- Holzascheverbindungen, die durch Verdampfung/Kondensation oder Neubildung entstehen, z.B. KCl , K_2SO_4 und Nitrate, soweit diese bereits in der Feuerung und nicht erst in der Atmosphäre gebildet werden
- Schwerflüchtige Verunreinigungen im Holz wie Sand und Erde
- Schwermetalle aus Verunreinigungen z.B. aus Farben, Beschichtungen

Entsprechend der Aufteilung zwischen Aerosolen aus unverbranntem Kohlenstoff und solchen aus Aschebestandteilen muss auch die Aerosolbildung unterschieden werden.

Aerosole aus der unvollständigen Verbrennung beinhalten hauptsächlich elementaren Kohlenstoff und Russ. Die Partikel aus unverbrannter Holzbestandteile oder Holzkohle sind relativ gross und bewegen sich im Bereich von 5 bis 100 μm , während Russpartikel z.B. aus Dieselmotoren Durchmesser im Bereich von 0.01 bis 0.1 μm aufweisen.

Die Produkte der vollständigen Verbrennung entstehen aus den mineralischen Bestandteilen des Brennstoffs (=Asche) und beinhalten demnach anorganische Mineralstoffe, Salze und Metalle. Die wichtigsten Ascheumformungsprozesse, welche zur Bildung von Flugstaub führt, wurden insbesondere für die Kohleverbrennung untersucht (Abbildung 5.1). Sie gelten im Grundsatz auch für die Biomasseverbrennung, wobei die relative Bedeutung der einzelnen Pfade bei der Holz- und Kohleverbrennung unterschiedlich sein können.

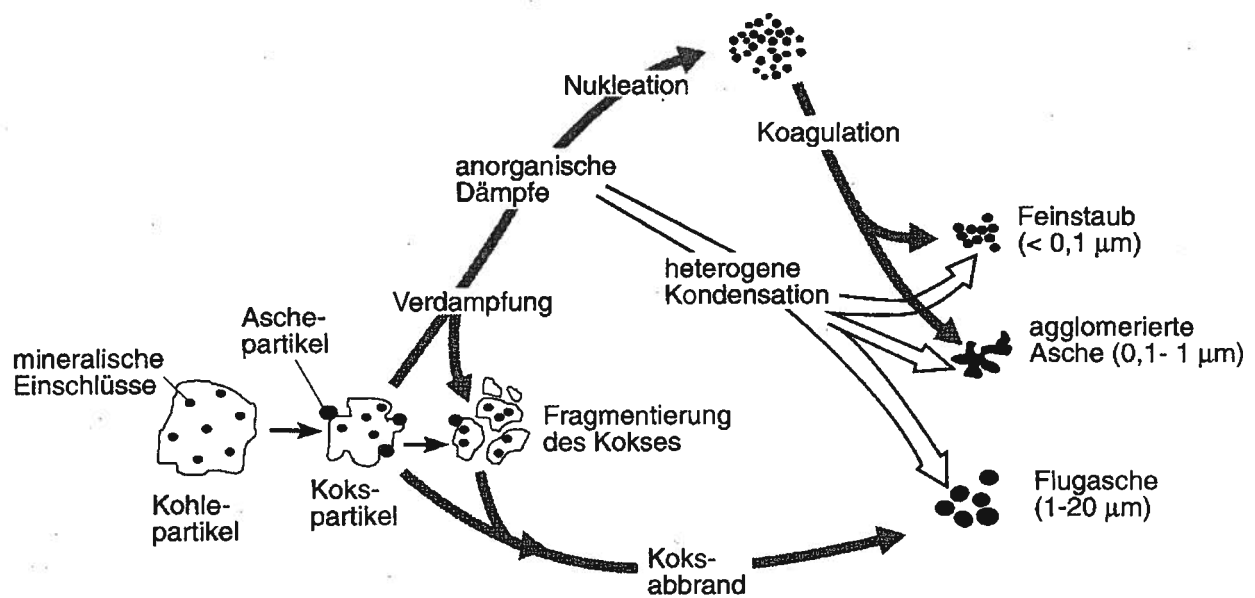


Abbildung 5.1: Ascheumformungsprozesse bei der Kohleverbrennung nach [Kauppinen et al. 1990] (Grafik aus [Baumbach 1994]).

Einen Beitrag zur Klärung der Partikelfreisetzung aus Holzfeuerungen und deren Bildungsmechanismen ist nach Abschluss einer laufenden Studie „Grundlagen der Partikelbildung in Holzfeuerungen“ zu erwarten. Die ersten Resultate an einer modernen 120 kW Unterschubfeuerung zeigen folgende Erkenntnisse [Oser et al. 2000]:

- Der Anteil von unverbrannten Partikeln an der Gesamtmasse beträgt <math>< 5 \text{ Gew.}\%</math> (als organischer Kohlenstoffgehalt bestimmt)
- >75 Gew.-% der Partikel weisen einen aerodynamischen Durchmesser von <math>< 1 \mu\text{m}</math> auf
- Bisher konnte bei der Variation der Gesamtluftüberschusszahl und des Feianteils im Brennstoff kein signifikanter Effekt auf den Partikelaustritt beobachtet werden

Die Ergebnisse stimmen mehrheitlich mit anderen Untersuchungen an verschiedenen Holzfeuerungstypen überein [Gaegauf 2000].

Bei Abnahmemessungen oder Prüfstandsmessungen an Holzfeuerungen werden nur Messungen der emittierten Gesamtstaubmasse durchgeführt. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung erfordert andere Messverfahren als die gravimetrische Staubmengenmessung und führt zu einem deutlich höheren messtechnischen Aufwand. Die Größenverteilung der emittierten Partikel sind üblicherweise nicht Gegenstand von Abnahmemessungen oder Prüfstandsmessungen.

6 Vorgehen

Die Datenerhebung erfolgte durch ein Schreiben des BUWAL oder des BFE an die entsprechenden Amtsstellen, welche um Zustellung der Abnahmeprotokolle über Holzfeuerungen mit Stickoxid- und Gesamtstaubmessungen zur anonymen Datenauswertung.

Als Ergänzung dazu werden dokumentierte Messungen von Holzfeuerungen verwendet, welche in den vergangenen Jahren im Rahmen von Forschungs- und Untersuchungsprojekten sowie bei Prüfstandsmessungen (BLT Wieselburg) durchgeführt wurden. Bei der Datenauswertung wird in geeigneter Form unterschieden zwischen Abnahmemessungen und Resultaten von Prüfstandsmessungen oder Laborversuchsreihen.

Zur Auswertung wird eine Datenbank mit Rohdaten erstellt. Wo nötig erfolgen Umrechnungen, um vergleichbare Zahlenwerte zu erhalten (z.B. eine Normierung auf einen einheitlichen Sauerstoffgehalt) oder wo möglich nicht dokumentierte Werte zu berechnen (z.B. Abschätzung der Feuerraumbelastung aus Leistung und Volumen). Nebst einer numerischen Auswertung der Daten erfolgt eine grafische Visualisierung in geeigneter Form.

Die wichtigsten Einflussfaktoren, welche in der vorliegenden Studie untersucht werden sollen, umfassen folgende Grössen, die – wo bekannt und gemessen – ausgewertet werden sollen:

Brennstoff:

- Stickstoffgehalt
- Wassergehalt
- Stückgrösse

Betrieb:

- Last der Anlage (bzw. Feuerraumbelastung)
- Betriebsweise (stationär, EIN/AUS)
- Gesamtluftüberschuss, Primärluftzahl
- Glutbett-Temperatur
- Glutbetthöhe bzw. Schichtdicke des Brennstoffbetts (bei Unterschub- und Rostfeuerungen)
- mit/ohne Abgasrezirkulation
- bei Rostfeuerungen zudem Rostbedeckung

Feuerungstechnik:

- Mit/ohne Luftstufung (späte Sekundärluftzufuhr)
- Mit/ohne (Wasser-) Kühlung im Feuerraum
- Unterschub-/Vorschubrostfeuerung
- bei Rostfeuerungen zudem Strömungsführung (Gleich-/Gegenstrom)

Wo die entsprechenden Einflussfaktoren nicht bekannt oder gegenseitig voneinander abhängig sind, sollen die Werte wo möglich abgeschätzt oder eine geeignete Kategorisierung vorgenommen werden. Bei den Brennstoffen umfasst dies zum Beispiel folgende Klassen, denen ein unterschiedlicher Bereich des Stickstoffgehalts zugeordnet werden kann wie z.B. naturbelassene Waldhackschnitzel, naturbelassene Waldhackschnitzel mit erhöhtem Rindenanteil, Buche, Rinde, Spanplatten, Schreinereirestholz mit Spanplatten, Altholz.

7 Stickoxidemissionen

7.1 Bemerkungen zu den Stickoxidaten

Bei (Feld-) Emissionsmessungen ist eine detaillierte technische Beschreibung der Anlagen und des Anlagenbetriebes in den meisten Fällen nicht Teil des Messauftrages und demnach nicht in den Berichten enthalten. Ebenso sind in der Regel ausser der Brennstoffkategorie gemäss LRV keine weiteren Brennstoffangaben vorgeschrieben. Die entsprechenden Messberichte enthalten demnach in den meisten Fällen keine Angaben zur Holzart, zum Stickstoffgehalt oder zum Feuchtegehalt des Brennstoffes. In vereinzelt Fällen sind immerhin die Holzart (z.B. Rinde, vorwiegend Buche, Kompostholz) oder die Brennstofffeuchte angegeben. Da die NO_x -Emissionen auch vom Brennstoff abhängen, ist eine detaillierte Untersuchung und Beurteilung der in Kapitel 6 aufgeführten Einflussfaktoren auf die NO_x -Emissionen daher nicht möglich.

Die am besten dokumentierten Berichte stammen von Prüfstandsmessungen, die mindestens den Brennstoff und den Anlagenbetrieb ausreichend beschreiben. Prüfstandsmessungen stammen aus Messreihen mit naturbelassenen Holzschnitteln oder Pellets (LRV Kat. b) an kleinen und mittleren Anlageleistungen (z.B. 15 kW bis 300 kW). Die hier verwendeten Prüfstandsergebnisse stammen zudem aus Versuchen bei Vollastbetrieb. In vielen Fällen enthalten die Prüfstandberichte detaillierte technische Angaben zur Feuerungskonstruktion. Die vorliegende Untersuchung stützt sich jedoch hauptsächlich auf betriebliche Anlagen ab, so dass Ergebnisse von Prüfstandsmessungen punktuell verwendet werden. Die Abnahme- und Kontrollmessungen an betrieblichen Holzfeuerungsanlagen sind in den folgenden Kapiteln als Feldmessungen bezeichnet.

Sämtliche Emissionsmessdaten beziehen sich auf folgende Grössen:

Sauerstoff-Bezugsgrösse: 11 Vol.-% O_2

Stickoxide NO_x : gemessen als NO , berechnet als NO_2

Die Brennstoffklassierung erfolgt gemäss der Schweizer Luftreinhalteverordnung LRV (Stand 12.10.1999), Anhang 5, Absatz 3 (Holzbrennstoffe).

Für die NO_x -Emissionen von Holzfeuerungen gilt gemäss der LRV ein vorsorglicher Grenzwert von 250 mg/Nm^3 , welcher bei Überschreiten eines Massenstromes von $2,5 \text{ kg/h}$ zur Anwendung gelangt. Bei naturbelassenen Holzschnitteln ist dieser Grenzwert für Kesselleistungen ab ca. 4 MW von Bedeutung.

Als Orientierungspunkt für den Vergleich der Emissionsmesswerte sind in der Tabelle 7.1 die theoretisch maximal möglichen NO_x -Emissionen bei verschiedenen Brennstoff-Stickstoffgehalten aufgeführt. Die Angaben basieren auf den Annahmen, dass der gesamte Stickstoff im Brennstoff in Stickoxid (gerechnet als NO_2) übergeht und dass keine thermische NO -Bildung stattfindet.

N-Gehalt im Brennstoff	Theor. Maximalemission von NO_x im Abgas bei	
	11% O_2	13% O_2
0.1 Gew.-% (typischer Wert für Nadelholz)	340	270
0.2 Gew.-% (typischer Wert für Laubholz)	690	550
3.0 Gew.-% (typischer Wert für Spanplatten)	10290	8230

Tabelle 7.1: Maximal mögliche NO_x -Emissionen bei verschiedenen Stickstoffgehalten im Holz

Annahmen: 1) Der gesamte Stickstoff im Brennstoff geht in Stickoxid (gerechnet als NO_2) über; 2) keine thermische NO -Bildung

Die in den folgenden Kapiteln diskutierten Vergleiche erfordern im Idealfall entweder identische Brennstoffe (d.h. gleiche Holzart, Charge, Feuchte etc.) und/oder die gleichen Feuerungstypen. Diese Anforderungen sind trotz der umfangreichen Datenbank von mehr als 1000 Einzelmesswerten aus über 250 in der Schweiz installierten Holzfeuerungen nur in Ausnahmefällen erfüllt, so dass die Vergleiche mehrheitlich bei möglichst vergleichbaren Parametern (z.B. Buche als Brennstoff) erfolgen.

Die Herstellernamen sind durch Buchstaben A, B, C etc. anonymisiert. Die Benennung erfolgt jeweils für jede Grafik neu und in zufälliger Reihenfolge, so dass derselbe Herstellername in den verschiedenen Abbildungen durch verschiedene Buchstaben bezeichnet sein kann oder derselbe Buchstabe für verschiedene Herstellernamen verwendet wird.

7.2 Überblick

Die Abbildung 7.1 zeigt die über sämtliche Feuerungstypen ermittelte Verteilung und die Vertrauensbereiche der gemessenen NO_x -Gehalte im Abgas bei der Verbrennung verschiedener Holzbrennstoffe sowie von Altholz gemäss LRV.

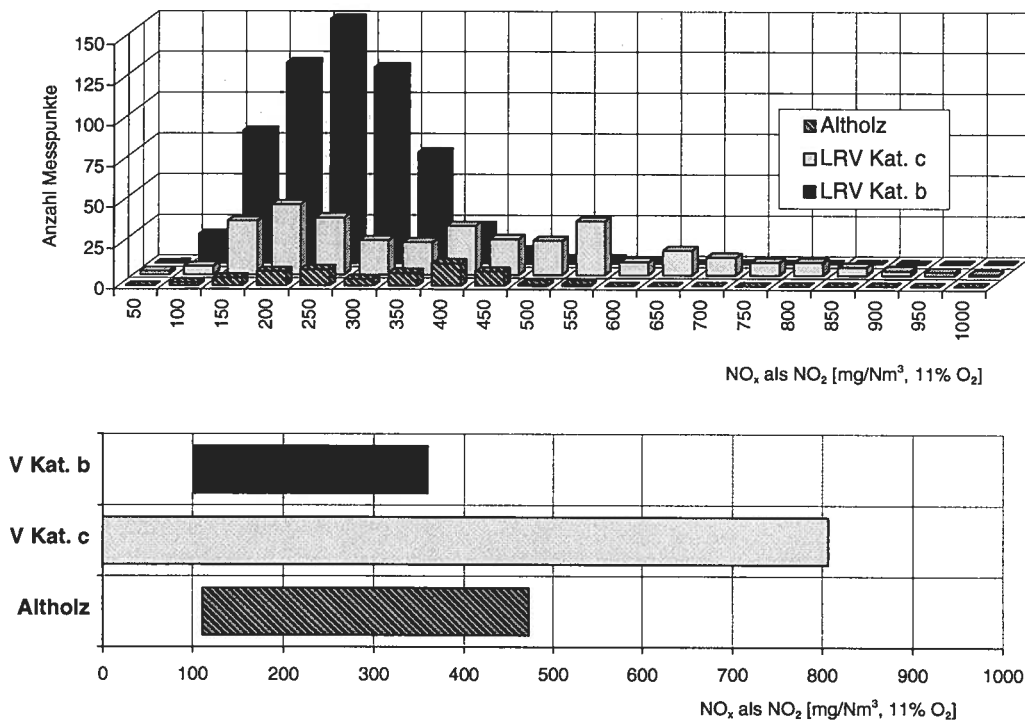


Abbildung 7.1: Verteilung der NO_x -Emissionsmesswerte und die Vertrauensbereiche der Mittelwerte bei der Verbrennung verschiedener Holzbrennstoffe und Altholz gemäss LRV

Lesebeispiel für obere Grafik: Die erste Wertebereichsklasse (1. Feld links auf der X-Achse) beinhaltet die NO_x -Messwerte im Bereich von 0 .. 50 mg/Nm^3

Bemerkungen: Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen; LRV Kat. b (750 Messpunkte; 183 Anlagen), LRV Kat. c (337 Messpunkte; 88 Anlagen), Altholz (48 Messpunkte; 12 Anlagen); Die Ermittlung der Vertrauensbereiche (unteres Bild) basiert auf einer statistischen Datenauswertung (Vertrauensbereich = Mittelwert +/- Konfidenzintervall; 90% Niveau) und gilt streng genommen nur für normalverteilte Daten; Der Vertrauensbereich kann vom effektiven Messbereich abweichen; Eine Zusammenstellung von weiteren statistischen Daten befindet sich im Anhang 11.2.

Die Ermittlung der Verteilungen erfolgt dabei unabhängig des eingesetzten Feuerungstyps (Rost- oder Unterschubfeuerung), der Anlagengrösse oder –baujahr, des Anlagenbetriebes (Teil-/Vollast; Luftüberschusszahl λ etc.) oder der Holzart (z.B. bei naturbelassenem Holz: Fichte, Buche, Rinde). Keine der untersuchten Anlagen weist sekundäre Massnahmen zur Stickoxidminderung (SNCR oder SCR) auf.

Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b) wird dabei eine annähernde Normalverteilung der NO_x -Emissionen beobachtet.

Die Verbrennung von Altholz führt im Mittel zu höheren NO_x -Emissionen als diejenige von naturbelassenem Holz. Allerdings können Altholzfeuerungen (ohne Sekundärmassnahmen) durchaus vergleichbare NO_x -Emissionen aufweisen wie Holzfeuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln.

Erwartungsgemäss zeigen Restholzfeuerungen die am stärksten verschiedenen und die höchsten NO_x -Emissionen. Die Hauptursache für die grosse Schwankungsbreite bei Restholzfeuerungen ist in den Stickstoffgehalten der entsprechenden Brennstoffsportimente zu finden. Restholz gemäss LRV kann z.B. Massivholzschnitzel von Schreinereien (tiefe N-Gehalte von z.B. 0.2 Gew.-%) oder Spanplattenschnitzel aus der Möbelfabrikation (hohe N-Gehalte von z.B. >2 Gew.-%) umfassen. Emissionsmessungen von Restholzfeuerungen sind aus diesem Grunde für den Vergleich von anlagen- oder betriebsspezifischen Einflussfaktoren ungeeignet.

Der am besten definierte Holzbrennstoff sind naturbelassene Holzschnitzel, obwohl auch diese Kategorie unterschiedliche Holzarten wie Fichte, Buche oder Rinde mit entsprechend verschiedenen Stickstoff-Gehalten beinhaltet. Das Schwergewicht der Auswertung in den folgenden Kapiteln erfolgt mit Daten aus Emissionsmessungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b).

Die Abbildung 7.2 zeigt eine Zusammenstellung der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in Unterschub- und Rostfeuerungen verschiedener Hersteller unabhängig von der Anlagengrösse, des Baujahres, dem Anlagenbetrieb und der Holzart.

7 Stickoxidemissionen

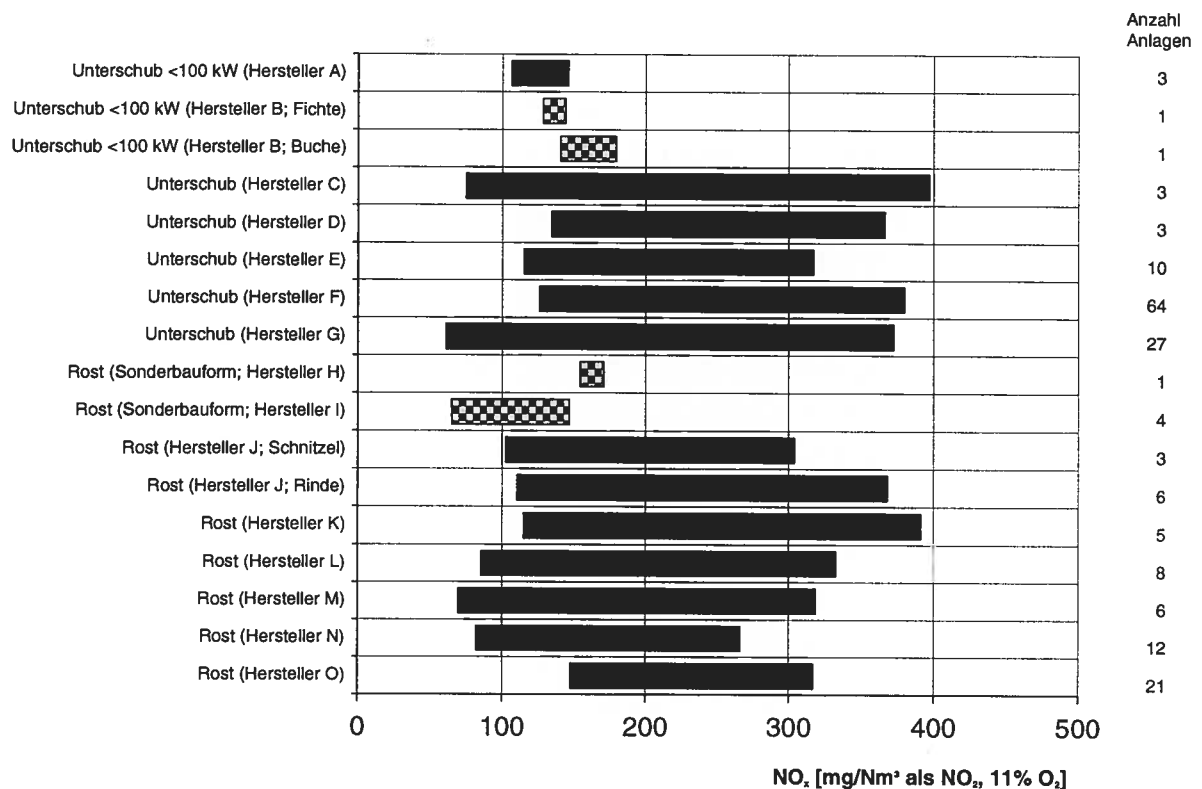


Abbildung 7.2: Vertrauensbereiche der NO_x -Emissionen von Unterschub- und Rostfeuerungen verschiedener Hersteller für den LRV Brennstoffkategorie b (naturbelassene Holzsnitzel)
 Bemerkungen: Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Die Stichproben der einzelnen Datengruppen weisen verschiedene Umfänge auf; Eine tabellarische Zusammenstellung von Kenndaten dieser Abbildung befindet sich im Anhang 11.1; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche s.a. Bemerkungen in Abbildung 7.1.

Dabei zeigt sich, dass Rost- und Unterschubfeuerungen keine signifikanten Unterschiede in den NO_x -Emissionen aufweisen. Von sämtlichen untersuchten Feuerungstypen und Herstellern gibt es NO_x -Messwerte, die unter 200 mg/Nm^3 liegen. Von rund 1/3 der Hersteller gibt es dokumentierte NO_x -Gehalte $<100 \text{ mg/Nm}^3$ und von 5 der insgesamt 17 untersuchten Anlagegruppen liegen sämtliche NO_x -Messwerte unter 200 mg/Nm^3 .

Die Vertrauensbereiche der NO_x -Emissionen streuen teilweise beträchtlich, was auch auf die verschiedenen Stickstoffgehalte in den Brennstoffen (z.B. Buche, Rinde etc.) und Betriebsbedingungen (Kessellast, Luftüberschuss) zurückzuführen ist.

Die NO_x -Emissionen scheinen sowohl für Unterschub- wie auch für Rostfeuerungen keine Abhängigkeit von der Nennleistung oder des Anlagebaujahres aufzuweisen (Anhang 11.4 und 11.5). Das Bild ist uneinheitlich und liegt vermutlich darin begründet, dass sowohl die eingesetzten Brennstoffe als auch der Anlagenbetrieb (Last; Luftüberschusszahl etc) grossen Variationen unterliegen.

Die Abbildung 7.3 zeigt die Verteilungen der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Rostfeuerungen zweier Hersteller. Während die NO_x -Werte aus Rostfeuerungen von Hersteller A annähernd eine Normalverteilung ergeben mit einem ausgeprägten Maximum bei rund 240 mg/Nm^3 , ist die Verteilung der NO_x -Messwerte die Rostfeuerungen von Hersteller B etwas breiter und weist einen tieferen mittleren NO_x -Wert auf. Gleichartige Brennstoffe vorausgesetzt, gelingt es demnach Hersteller B durch konstruktive und/oder betriebliche Massnahmen die NO_x -Emissionen zu beeinflussen.

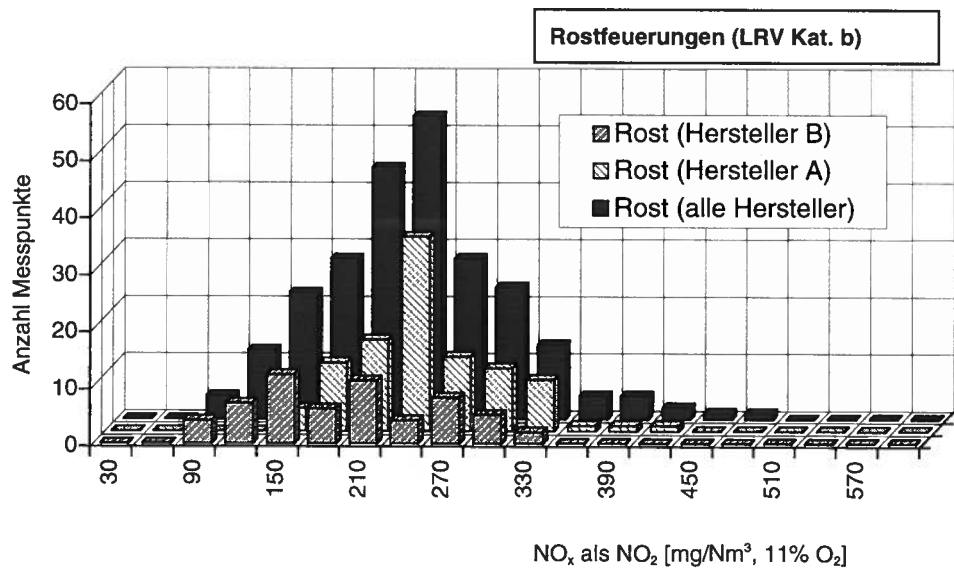


Abbildung 7.3: Statistische Verteilung der NO_x -Messwerte von (Vorschub-) Rostfeuerungen zweier Hersteller für die LRV Brennstoffkategorie b

Bemerkungen: Anzahl Anlagen: 61 (alle Hersteller), 21 (Hersteller A), 18 (Hersteller B); Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen.

Die Unterschubfeuerungen zweier Hersteller zeigen vergleichbare Effekte wie die Rostfeuerungen (Abbildung 7.4).

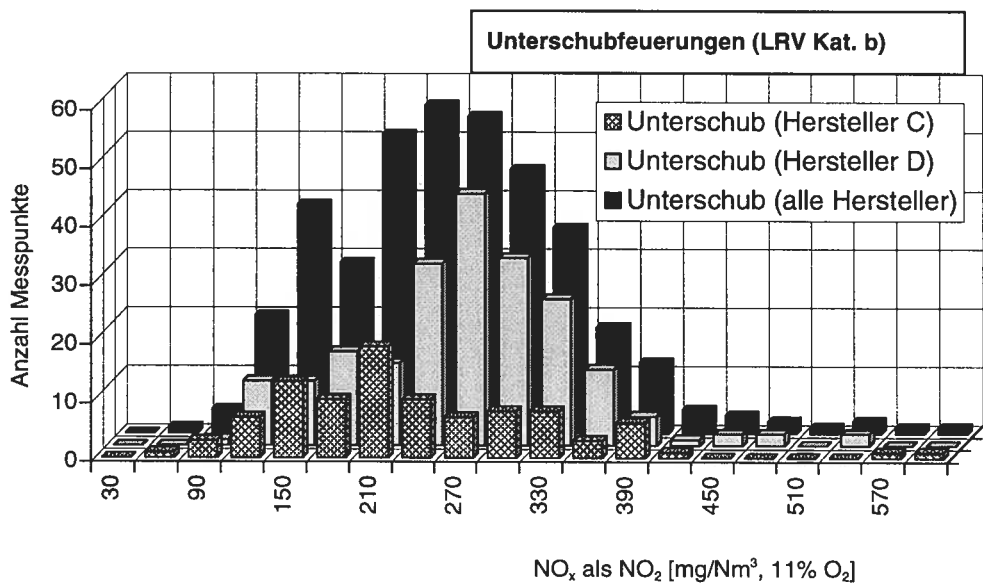


Abbildung 7.4: Statistische Verteilung der NO_x -Messwerte von Unterschubfeuerungen zweier Hersteller für die LRV Brennstoffkategorie b

Bemerkungen: Alle Hersteller (456 Messpunkte; 108 Anlagen), Hersteller C (104 Messpunkte; 27 Anlagen), Hersteller D (206 Messpunkte; 64 Anlagen); Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen.

Die über sämtliche Hersteller kumulierte Häufigkeitsverteilung der NO_x -Emissionen aus Rost- und Unterschubfeuerungen zeigt Abbildung 7.5. Die Verteilungen zwischen den beiden Feuerungstypen unterscheiden sich dabei nicht wesentlich. Zwischen einzelnen Herstellern bestehen allerdings teilweise deutliche Unterschiede (siehe Anhang 11.3).

Im Konzentrationsbereich zwischen 100 mg/Nm^3 und 300 mg/Nm^3 verlaufen die über alle Hersteller kumulierten Verteilungen relativ flach, wobei rund 90% aller (untersuchten) Rostfeuerungen Stickoxidemissionen $<300 \text{ mg/Nm}^3$ (bei 11% O_2) und nur noch gut 15% der Anlagen Werte $<150 \text{ mg/Nm}^3$ aufweisen. Somit bewegen sich 75% der Messwerte innerhalb eines engen Wertebereichs von 150 bis 300 mg/Nm^3 .

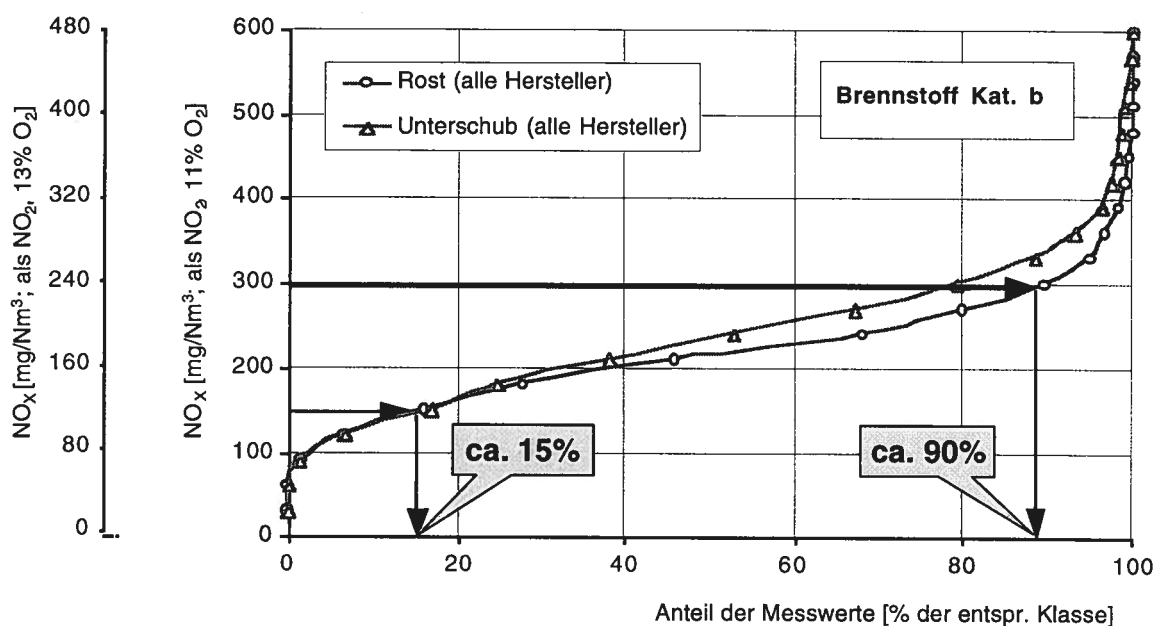


Abbildung 7.5: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der NO_x -Emissionen als prozentuale Anteile in der Grundgesamtheit von Rost- oder Unterschubfeuerungen. Bemerkung: Sämtliche Messwerte stammen aus Feldmessungen.

7.3 Vergleich zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen

Buchenholz ist ein Brennstoff, welcher bei Prüfstandsmessungen häufig und bei Feldmessungen gelegentlich z.B. als Referenzbrennstoff eingesetzt wird. Ein exakter Vergleich der NO_x -Emissionen zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen würde allerdings Messwerte aus Versuchen mit identischen Feuerungsmodellen und identischen Brennstoffen (gleiche Charge) erfordern. Derartige Ergebnisse liegen allerdings nicht vor, so dass der Vergleich anhand einer Zusammenstellung aller vorhandenen Messwerte mit vergleichbarem Brennstoff in den verschiedensten Feuerungstypen erfolgt. Für Buchenholz ist die entsprechende Abbildung in Kapitel 7.5.3 dargestellt (Abbildung 7.11). Dabei lässt sich kein signifikanter Unterschied in den NO_x -Emissionen zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen ableiten. Bei Pellets können die Unterschiede zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen jedoch beträchtlich sein, wobei die erhöhten NO_x -Emissionen bei den Feldmessungen vermutlich auf erhöhte Stickstoffgehalte im Brennstoff zurückzuführen sind (siehe Kapitel 7.5.3; Abbildung 7.13).

7.4 Brennstoffbedingte Stickoxidemissionen

Die Variation der NO_x -Gehalte beim Einsatz verschiedener Brennstoffe der LRV Kategorie b zeigt Abbildung 7.6. Für diesen Vergleich wird keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Feuerungstypen und –grösse sowie dem Anlagenbetrieb vorgenommen.

Einen unerwartet breiten Bereich der NO_x -Emissionen wird bei der Verbrennung von Pellets beobachtet, insbesondere bei den Ergebnissen aus Feldmessungen. Die NO_x -Gehalte schwanken bei Feldmessungen von 80 mg/Nm^3 bis 420 mg/Nm^3 , während die Werte auf dem Prüfstand im Bereich zwischen 90 mg/Nm^3 und 170 mg/Nm^3 liegen. Eine eingehendere Diskussion der Messwerte aus den Pelletfeuerungen erfolgt in Kapitel 7.5.3.

Der NO_x -Vertrauensbereich bei der Rindenverbrennung bewegt sich im Bereich von 120 mg/Nm^3 bis 410 mg/Nm^3 . Die Ergebnisse stammen aus Anlagen von drei verschiedenen Herstellern (s.a. Kapitel 7.5.3). Auch bei der Verbrennung von Rinde sind demnach NO_x -Emissionen $<200 \text{ mg/Nm}^3$ nicht unüblich.

Die im Mittel höchsten NO_x -Messwerte werden bei der Verbrennung von Gemischen von Rinden mit Kompostholz beobachtet. Aufgrund der vorliegenden Daten sind die erhöhten Werte bei diesen Gemischen vermutlich auf erhöhte Stickstoffgehalte im Brennstoff zurückzuführen.

Erwartungsgemäss weisen Messungen mit Fichten- oder Buchenholz geringere NO_x -Emissionen auf als Rinde oder Gemische aus Rinde und Kompostholz.

Die Verbrennung von Fichtenschnitzeln auf dem Prüfstand führt (bei vergleichbaren Luftüberschusszahlen und Lastpunkten) zu rund 40 mg/Nm^3 geringeren NO_x -Gehalten als die von Buchenschnitzeln. Der rund 30% geringere Mittelwert bei der Verbrennung von Fichte entspricht ziemlich genau dem 30%–40% geringeren Stickstoffgehalt im Brennstoff.

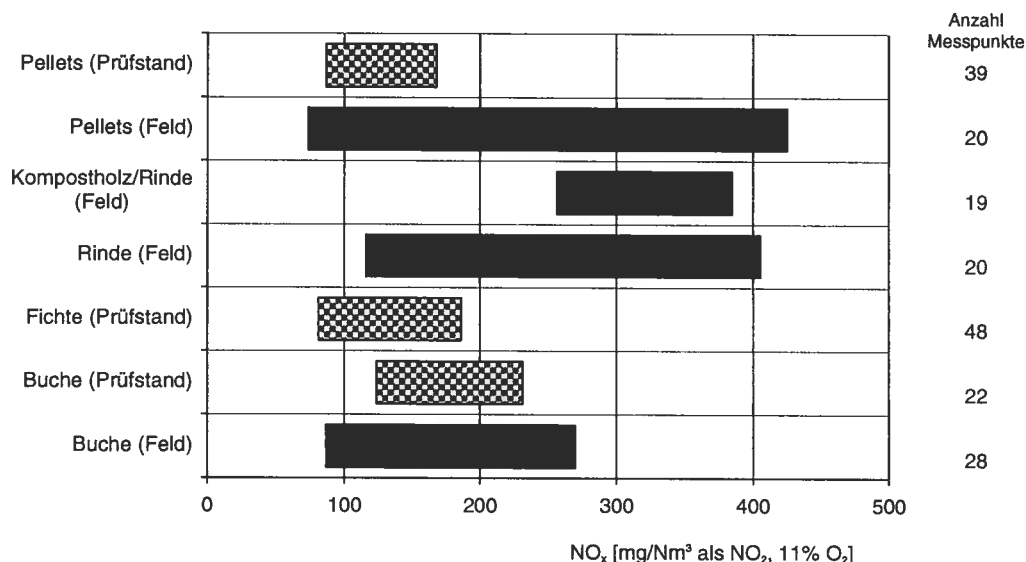


Abbildung 7.6: Vertrauensbereiche der NO_x -Emissionen beim Einsatz von verschiedenen naturbelassenen Holzbrennstoffen (LRV Kat. b) in automatischen Feuerungen

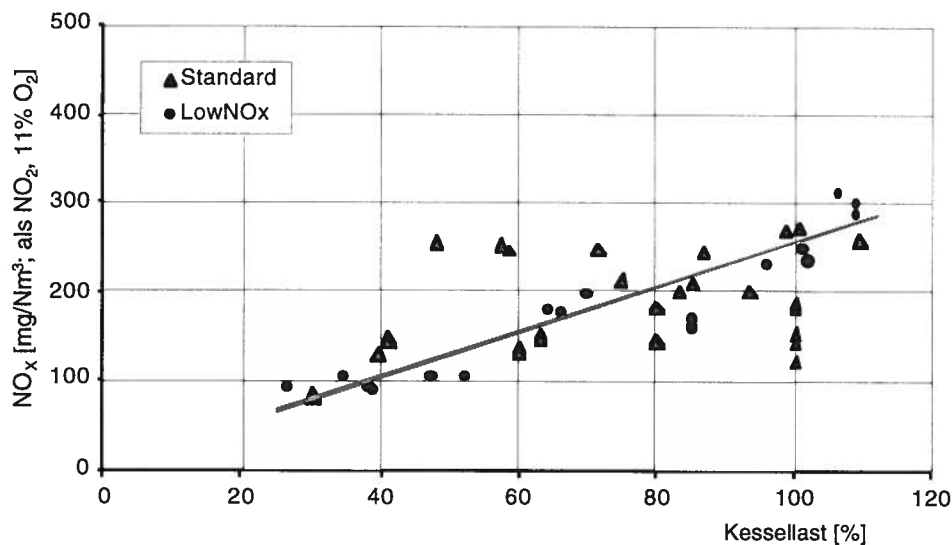
Bemerkung: Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1.

7.5 Betriebliche Einflüsse auf die Stickoxidemissionen

7.5.1 Lastabhängigkeit der Stickoxidemissionen

Die Abhängigkeit der NO_x -Emissionen von der Kessellast ist für Rostfeuerungen zweier Hersteller in Abbildung 7.7 dargestellt. Die NO_x -Emissionen der Rostfeuerungen von Hersteller A zeigen eine klare Abhängigkeit von der Kessellast, indem bei sinkender Last geringere NO_x -Emissionen auftreten. Ein analoges Verhalten wird auch bei Rostfeuerungen eines anderen Herstellers beobachtet (siehe Anhang 11.8). Die Feuerungen von Hersteller B zeigen hingegen bei variabler Kessellast keinen Trend zu veränderten NO_x -Emissionen.

Rostfeuerung Hersteller A



Rostfeuerung Hersteller B

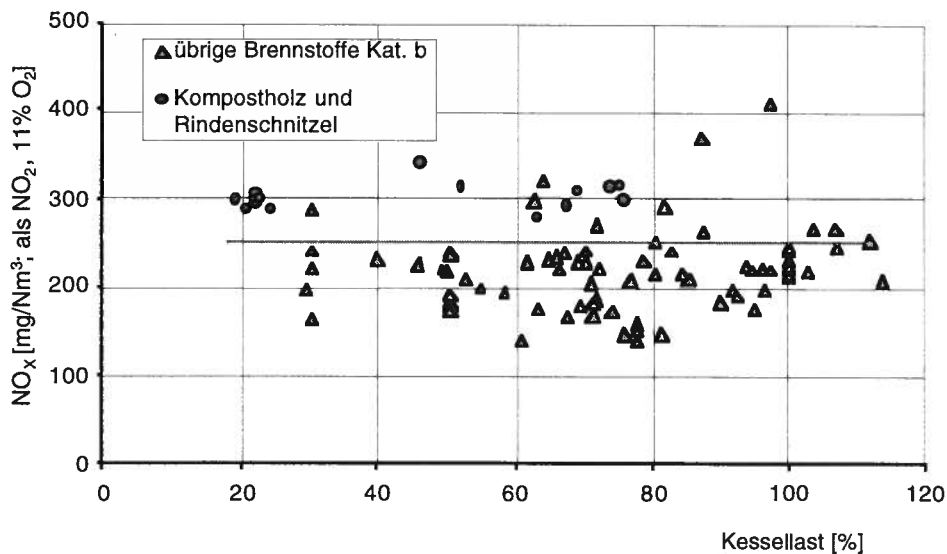


Abbildung 7.7: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Kessellast von Rostfeuerungen zweier Hersteller beim Einsatz von naturbelassenen Holzsnitzeln (LRV Kat. b)

Bemerkungen: Weitere Darstellungen befinden sich im Anhang 11.1 und 11.7; Für analoge Grafiken von Rostfeuerungen des Herstellers C siehe Anhang 11.8.

Die NO_x -Minderung bei sinkender Last an Rostfeuerungen von Hersteller A sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine günstige Stöchiometrie ($\lambda < 1$ in Reduktionszone) und eine ausreichend hohe Verweilzeit der Verbrennungsgase in der Primärzone bzw. in der Reduktionszone zurückzuführen. Beim Hersteller B ist entweder die Luftüberschusszahl bereits in der Reduktionszone $\lambda > 1$ oder die Verweilzeit auch bei Teillast zu kurz, so dass keine NO -Minderung auftritt.

Hersteller A verbreitet neben Standardmodellen auch Rostfeuerungen mit der Bezeichnung LowNO_x . Die NO_x -Emissionen des LowNO_x -Modells sind allerdings nicht tiefer als dasjenige des Standardmodells. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Erkenntnis, dass die Luftüberschusszahl/Last-Charakteristiken der beiden Modelltypen verschieden sind (Abbildung 7.8).

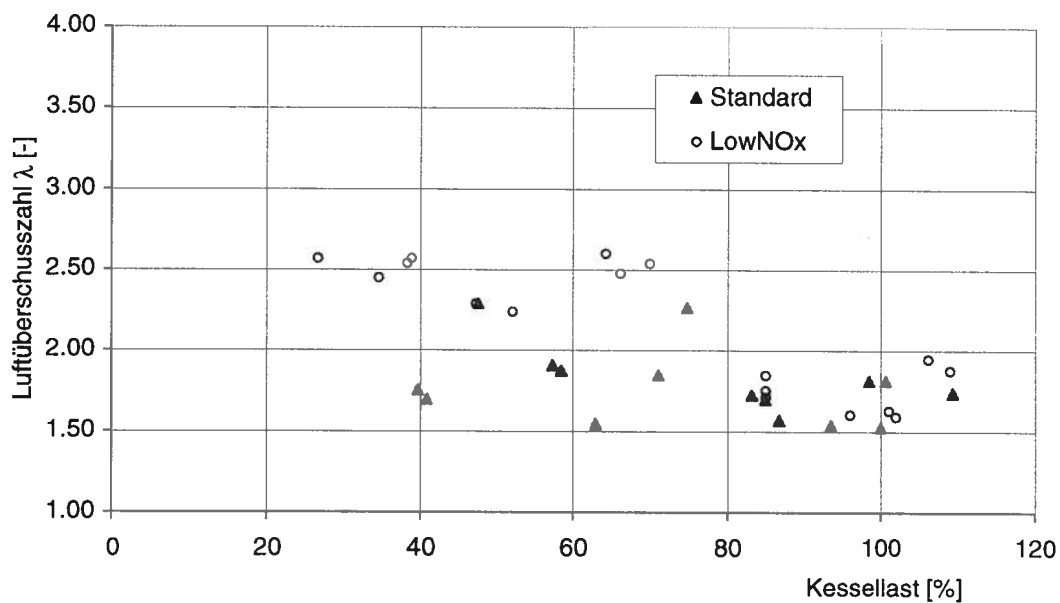


Abbildung 7.8: Charakteristik zwischen der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast für zwei Vorschubrostfeuerungstypen von Hersteller A

Das Standardmodell weist über den gesamten Lastbereich eine gleichmässig tiefe Luftüberschusszahl λ auf, während das LowNO_x -Modell mit sinkender Last höhere λ -Werte hervorruft. Dadurch können konstruktive NO -Minderungsmaßnahmen wie z.B. grössere Volumina oder tiefere λ -Werte in den Reduktionszonen beim LowNO_x -Modell nicht optimal ausgeschöpft werden. Eine noch höhere NO_x -Minderung bei Teillast ist bei den LowNO_x -Rostfeuerungen des Herstellers A demnach dann zu erwarten, wenn die Luftüberschusszahl in der Primärzone auch bei Teillast tief gehalten werden kann. Im Gegensatz zu einigen Rostfeuerungskonstruktionen zeigen die NO_x -Emissionen von Unterschubfeuerungen keine (oder zumindest eine deutlich schwächere) Lastabhängigkeit (siehe Anhang 11.9 bis 11.11).

7.5.2 Einfluss der Luftüberschusszahl auf die Stickoxidemissionen

Die NO_x -Emissionen einer Holzfeuerung sind in jedem Falle vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (siehe Abbildung 4.2) beeinflusst und können zudem von der Kessellast abhängen (Abbildung 7.7). Zur Ermittlung der NO_x -/ λ -Charakteristik eignen sich demnach vor allem Messdaten von Untersuchungen mit gleichem Brennstoff und vergleichbarer Last.

Das Verhalten der NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ ist in Abbildung 7.9 für Buchenschnitzel bei Kessellasten zwischen 70% und Vollast dargestellt. Die Messdaten stammen aus Unterschub- und Rostfeuerungen verschiedener Hersteller und Nennleistungen.

Obwohl der Gesamtluftüberschuss nicht zwingend einen Einfluss auf die NO_x -Emissionen hat, lässt die Darstellung einen NO_x -Minderungseffekt mit sinkendem λ -Wert vermuten, wobei NO_x -Emissionen von $<200 \text{ mg/Nm}^3$ erst bei λ -Werten <1.7 beobachtet werden. Die Ursache liegt vermutlich darin, dass Feuerungen mit tiefem Gesamtluftüberschuss eine konsequent gestufte Verbrennungsführung mit einer Reduktionszone erfordern, während Feuerungen mit hohem Gesamtluftüberschuss entweder keine Reduktionszone oder bereits in der Reduktionszone λ_{prim} -Werte >1 aufweisen.

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.

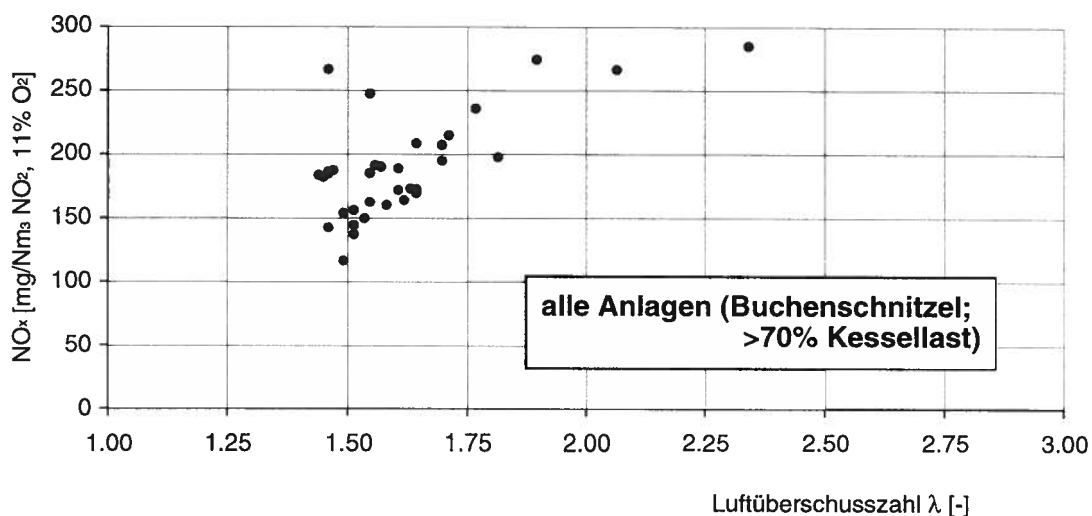


Abbildung 7.9. NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ bei Kessellast von $>70\%$ in verschiedenen Holzfeuerungen mit Buchenschnitzeln als Brennstoff

Bemerkungen: Die Messdaten stammen von Unterschubfeuerungen (4 Hersteller; Feld- und Prüfstandsmessungen und Rostfeuerungen (2 Hersteller; Feld- und Prüfstandsmessungen); Die gemessenen CO-Gehalte in den Abgasen betragen zwischen 4 mg/Nm^3 und 330 mg/Nm^3 (Mittelwert: 90 mg/Nm^3)

Die Abbildung 7.10 zeigt die NO_x -/ λ -Charakteristik einer Unterschubfeuerung, die über einen Zeitraum von mehreren Jahren bei gleichen Lastpunkten untersucht wurde. Die NO_x -Emissionen nehmen wie im vorangegangenen Fall mit sinkendem (Gesamt-) λ ab, wobei NO_x -Emissionen $<200 \text{ mg/Nm}^3$ wiederum λ -Werte von <1.7 verlangen. Bei einer Luftüberschusszahl $\lambda=1.5$ ist gegenüber λ -Werten >2 eine NO-Minderung von rund 55% möglich (Messwert bei $\lambda=1.45$ mit $270 \text{ mg/Nm}^3 \text{ NO}_x$ nicht berücksichtigt). Dieser Wert liegt ziemlich nahe dem maximalen Wert von rund 60%, welcher in einer

Unterschub-Laborfeuerung bei optimaler zweistufiger Verbrennung und einem Brennstoff mit vergleichbarem Stickstoffgehalt ermittelt wurde [Keller 1994]. Die untersuchte Unterschubfeuerung zeigt im übrigen keine Lastabhängigkeit der NO_x -Emissionen.

Die untersuchte Unterschubfeuerung zeigt im übrigen keine Lastabhängigkeit der NO_x -Emissionen.

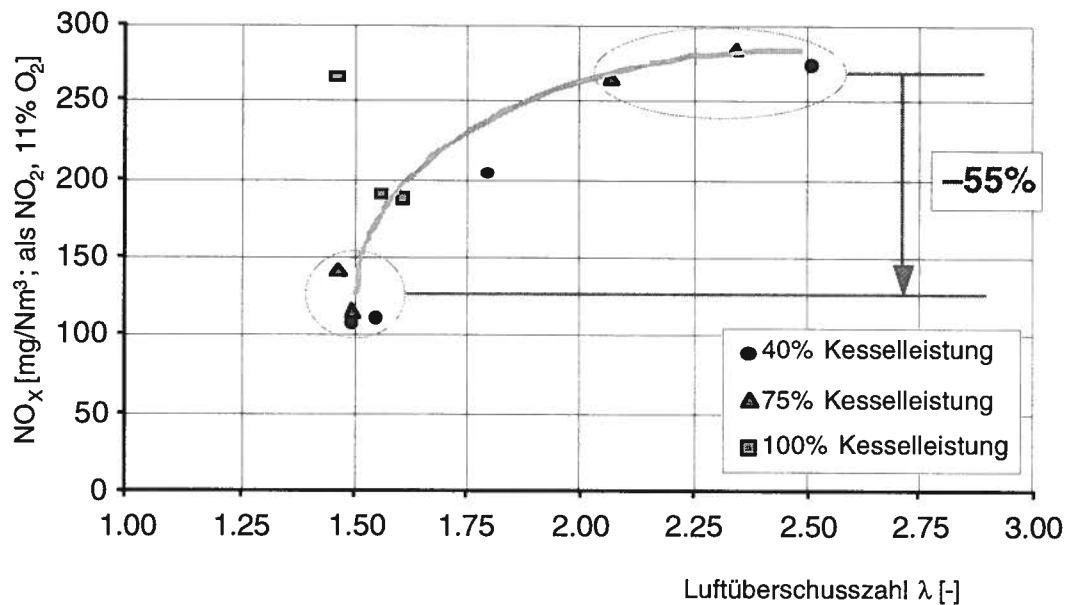


Abbildung 7.10: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ in einer 650 kW Unterschubfeuerung

Bemerkung: Der Brennstoff besteht mehrheitlich aus Buchenschnitzeln

Das Beispiel in Abbildung 7.10 zeigt deutlich, dass es bei gleichem Brennstoff auf derselben Anlage alleine durch die Einstellung der Verbrennungsluftmengen möglich ist, eine signifikante NO_x -Minderung zu erzielen.

Der Vergleich von Messwerten mit Rinde als Brennstoff lassen für einige Feuerungstypen ebenfalls die Luftüberschusszahl λ als wichtigen Einflussfaktor von NO_x -Emissionen vermuten (siehe Kapitel 7.5.3). Ob es sich dabei um ein generelles oder anlagenspezifisches Phänomen handelt, lässt sich aufgrund der vorhandenen Daten nicht abschliessend beurteilen.

Die Ausführungen zeigen aber auch deutlich die Problematik eines Anlagenvergleichs verschiedener Feuerungskonstruktionen selbst bei bekanntem Brennstoff.

7.5.3 Konstruktive Einflüsse auf die Stickoxidemissionen

Anhand der vorliegenden Datenunterlagen lassen sich keine detaillierten Unterschiede in den Feuerungskonstruktionen ableiten, da entweder die entsprechenden Angaben nicht zugänglich sind oder die Messungen mit verschiedenen Brennstoffen und/oder Betriebszuständen durchgeführt wurden. Trotzdem lassen sich aus einigen Messdaten Aussagen über das Vorhandensein und/oder das Ausmass von Stickoxid mindernden Massnahmen ableiten.

In der Abbildung 7.11 sind die Versuchsergebnisse aus Messungen mit Buchenholz als Brennstoff in verschiedenen Feuerungstypen zusammengefasst. Die mittleren NO_x -Konzentration bewegen sich mit Ausnahme der Messungen mit rindenfreiem Brennstoff im Bereich von rund 160 mg/Nm^3 (Stückholz Hersteller B) bis rund 200 mg/Nm^3 (Retorte Hersteller H). Da Rinde einen höheren Stickstoffgehalt im Brennstoff aufweist als Buchenschnitzel, sind die tieferen NO_x -Emissionswerte bei der Verbrennung von rindenfreien Buchenschnitzeln plausibel. Bei vergleichbarem Brennstoff zeigen demnach sämtliche der untersuchten Feuerungskonstruktionen ähnliche NO_x -Emissionen.

Die untersuchten Mittelwerte bei der Verbrennung von Buchenschnitzeln sind im weiteren nicht signifikant tiefer oder höher als die übrigen NO_x -Emissionen aus naturbelassenem Holz und selbst bei Rinde sind vergleichbar tiefe NO_x -Messwerte möglich (siehe Abbildung 7.14).

Die geringsten als auch die höchsten NO_x -Messwerte stammen aus Feldmessungen an derselben Unterschubfeuerung (Hersteller E; 1 Modelltyp). Das Verhalten dieser Feuerung wird in Kapitel 7.5.2 (Abbildung 7.10) eingehender diskutiert.

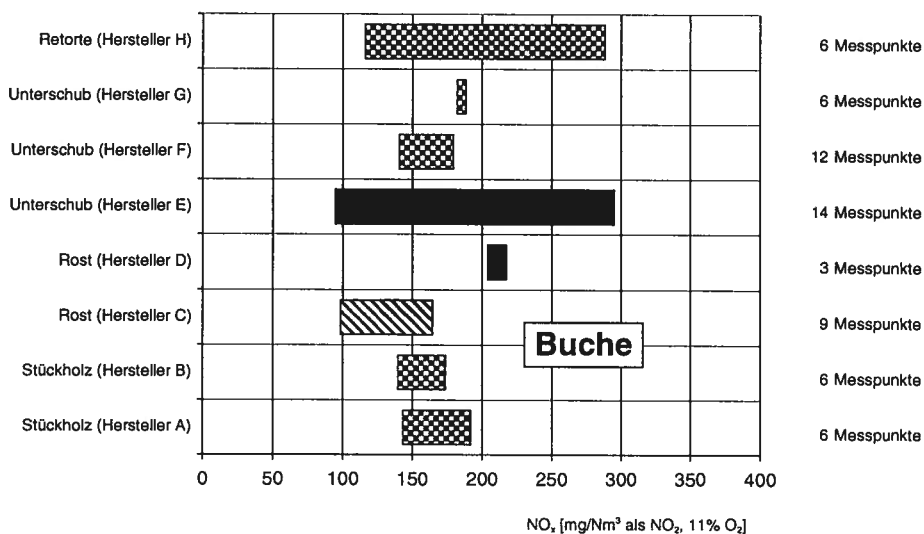


Abbildung 7.11: Vertrauensbereiche der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung von Buche in verschiedenen Feuerungstypen

Bemerkungen: Die Messpunkte stammen von Einzelanlagen; Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Der Betrieb der Rostfeuerung von Hersteller C (schraffierte Fläche) erfolgt mit rindenfreien Buchenschnitzeln; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1; Datentabelle im Anhang 11.2, Tabelle 11.6.

Im Gegensatz zu Buchenholz zeigen Prüfstandsergebnisse aus Versuchen mit Fichte Unterschiede in den NO_x -Emissionen (Abbildung 7.10). Die deutlich geringsten Messwerte zeigt eine kombinierte

Stückholz-/Schnitzel-Feuerung (Hersteller A). Interessant ist zudem, dass eine Stückholzfeuerung desselben Herstellers eher hohe NO_x -Messwerte aufweist. Offenbar hat der Hersteller die NO -mindernden Massnahmen bei der kombinierten Stückholz-/Schnitzel-Feuerung erfolgreich umgesetzt. Die übrigen Hersteller weisen bei Fichtenbrennstoff mehrheitlich vergleichbare NO_x -Messwerte auf.

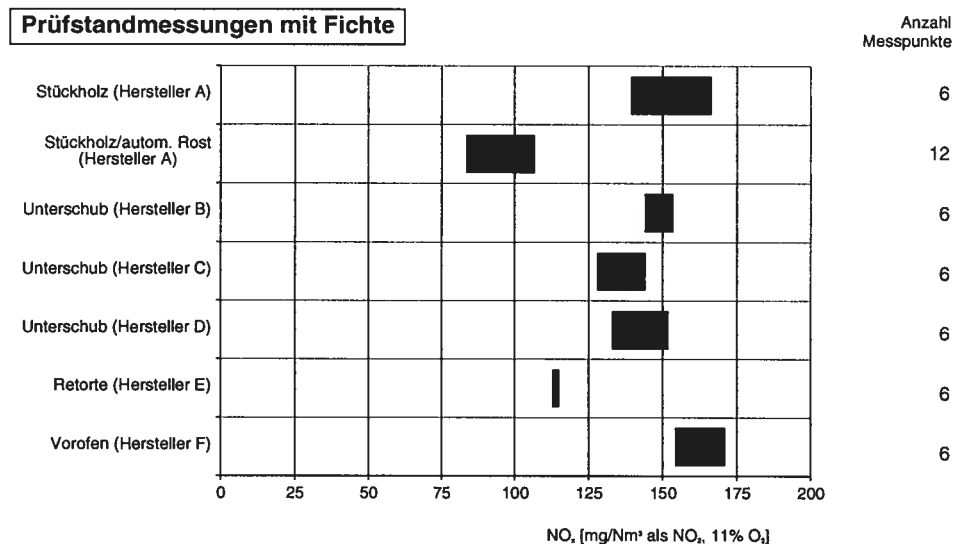


Abbildung 7.12: Vertrauensbereiche der NO_x -Emissionen bei der Verbrennung von Fichte in verschiedenen Feuerungstypen auf dem Prüfstand

Bemerkungen: Die Messpunkte stammen von Einzelanlagen; Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet;); Die CO -Gehalte im Abgas bewegen sich bei Schnitzel Feuerungen zwischen 30 mg/Nm^3 und 340 mg/Nm^3 , bei Stückholzfeuerungen zwischen 70 mg/Nm^3 und 90 mg/Nm^3 ; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1; Datentabelle im Anhang 11.2, Tabelle 11.7

Die Ergebnisse aus Feld- und Prüfstandsmessungen an Pelletfeuerungen zeigen ein uneinheitliches Bild (Abbildung 7.13). Während die vorliegenden Prüfstandsmessungen durchwegs vergleichbare und geringe NO_x -Emissionen aufweisen, können bei Feldmessungen NO_x -Gehalte von bis zu 450 mg/Nm^3 auftreten. Sämtliche dieser erhöhten Messwerte stammen aus Versuchen mit Pellets desselben Lieferanten, so dass vermutlich die Pellets Ursache für die erhöhten Emissionen sind, indem der Brennstoff höhere Stickstoffgehalte aufweist.

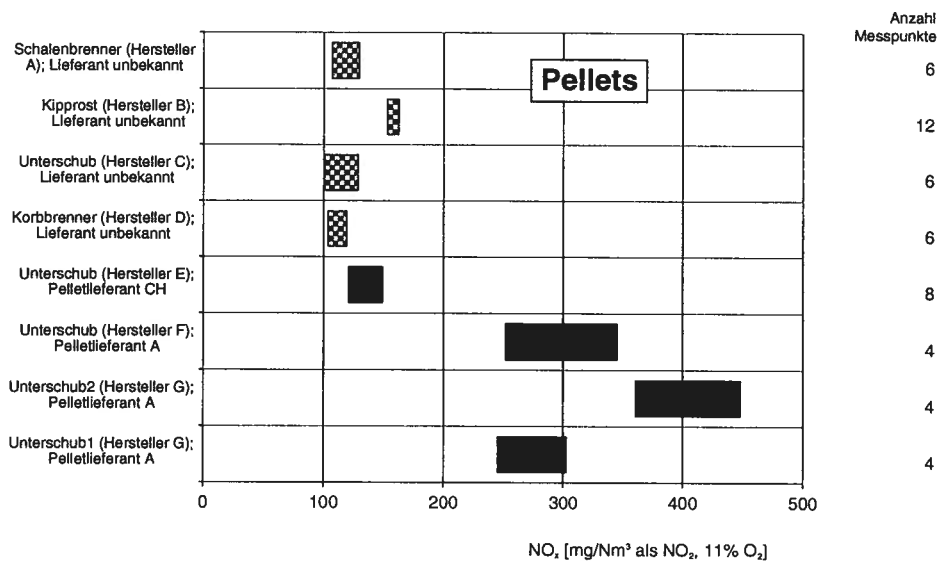


Abbildung 7.13: Vertrauensbereiche der NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Pellets in verschiedenen Feuerungstypen

Bemerkung: Die Messpunkte stammen von Einzelanlagen; Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Die CO-Gehalte im Abgas bewegen sich zwischen 5 mg/Nm³ und 1100 mg/Nm³; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1; Datentabelle im Anhang 11.2, Tabelle 11.8

Das Verhalten der NO_x-Emissionen bei der Rindenverbrennung zeigt Abbildung 7.14 für Feuerungen von drei verschiedenen Herstellern. NO_x-Emissionen im Bereich von 200 mg/Nm³ weisen die beiden Rostfeuerungen auf (Hersteller A und B), während die untersuchte Unterschubfeuerungen, Werte über 300 mg/Nm³ aufweist, obwohl der Anlagenbetrieb bei geringer Last und moderaten Luftüberschusszahlen erfolgte.

Die Rostfeuerung1 von Hersteller A, welche im Vergleich zu den übrigen eigenen Feuerungen bei Vollast betrieben wurde, weist deutlich höhere NO_x-Werte auf. Die Ursachen hierfür sind entweder die höheren Luftüberschusszahlen, die vermutlich auch höhere Primärluftüberschusszahlen zur Folge haben, oder die verminderte Verweilzeit in der Reduktionszone bei Vollast gegenüber der Teillast.

Die Unterschubfeuerungen von Hersteller C schneiden bei Rinde deutlich schlechter ab als die übrigen untersuchten Feuerungstypen. Trotz geringer Laststufen sind die NO_x-Werte verhältnismässig hoch. Die Abbildung 7.14 zeigt analog zu den Ergebnissen mit Buchenschnitzeln, dass nicht alleine die Konstruktion, sondern die Luftüberschusszahl λ die NO_x-Gehalte im Abgas mitbestimmt. Bei Luftüberschusszahlen <1.8 bewegen sich die NO_x-Gehalte im unteren Bereich von Rinde, während bei höheren λ -Werten die NO_x-Emissionen höher sein können.

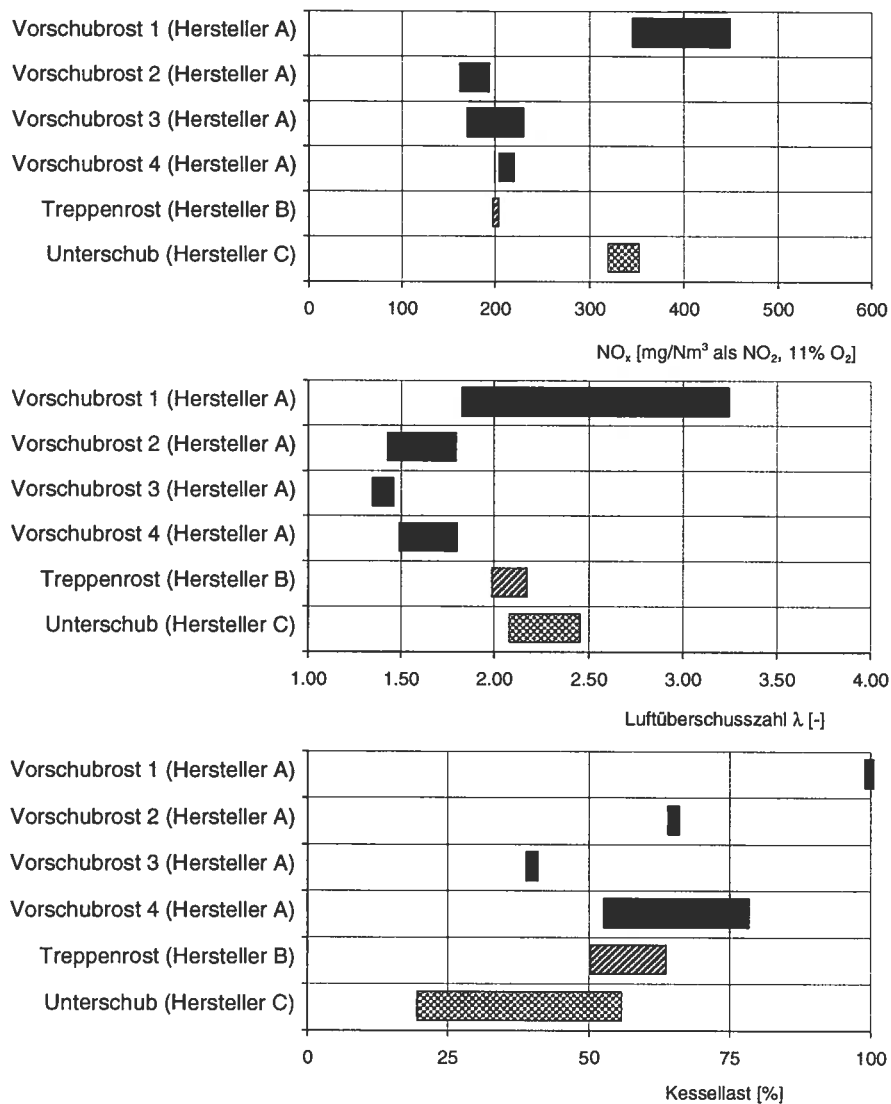


Abbildung 7.14: Bereiche von NO_x-Messwerten, Luftüberschusszahlen und Kessellasten bei der Verbrennung von Rinde in Feuerungen dreier verschiedener Hersteller

Bemerkung: Die Darstellungsform der Messwerte als Mittelwert \pm Standardabweichung widerspiegelt hier die effektiv gemessenen Bereiche besser als die Form mit Vertrauensintervallen (jeweils 3 bis max. 5 Messwerte pro Anlage); Die CO-Gehalte im Abgas bewegen sich im Bereich zwischen 14 mg/Nm³ und 270 mg/Nm³.

7.6 Emissionsfaktoren für Stickoxide

Emissionsfaktoren von Luftfremdstoffen werden häufig in Ökobilanzierungen verwendet und dienen z.B. dem Vergleich von verschiedenen Brennstoffen [BUWAL 2000]. Die Emissionsfaktoren geben die spezifische Menge eines Luftfremdstoffs in Bezug auf eine Energiemenge wieder. Im vorliegenden Fall werden die Emissionsfaktoren analog der BUWAL-Studie [BUWAL 2000] auf die jährliche abgegebene Nutzenergie bezogen:

$$\text{Emissionsfaktor} = \frac{(\text{Emission}) \cdot (\text{spez. Abgasvolumen})}{(\text{Jahresnutzungsgrad}) \cdot (\text{Heizwert des Brennstoffs})}$$

wobei

Emissionsfaktor	=	auf Nutzwärme bezogene Emissionsgrösse in mg/MJ
Emission	=	(hier:) NO _x -Emission (Mittelwert; als NO ₂ , bei 11 % O ₂) in mg/Nm ³
spez. Abgasvolumen	=	Abgasvolumen pro kg atro Holz bei 11% O ₂ (=9.62 Nm ³ /kg atro)
Jahresnutzungsgrad	=	Verhältnis von abgegebener Nutzwärme zu zugeführter Energie (75%)
Heizwert des Brennstoffs	=	Heizwert des Brennstoffs in MJ/kg atro (H _u * = 18.3 – 2.44 u)
Feuchtegehalt u	=	Wasseranteil im trockenen Brennstoff (u = 15% für LRV Kat. a; u = 40% für LRV Kat. b; u = 20% für LRV Kat. c und Altholz)

Die Stickoxid-Emissionen und die daraus abgeleiteten Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen der LRV Kategorien a, b und c sowie für Altholz sind in der Tabelle 7.2 zusammengestellt, diejenigen für verschiedene Brennstoffarten innerhalb der LRV Kategorie b in der Tabelle 7.3.

Die geringsten Stickoxid-Emissionsfaktoren resultieren für Stückholzfeuerungen, die höchsten für Restholzfeuerungen. Die Unterschiede zwischen (Vorschub-) Rost- und Unterschubfeuerungen innerhalb derselben Brennstoffkategorie sind gering. Die Stickoxid-Emissionsfaktoren von Altholzfeuerungen liegen zwischen den Werten aus Feuerungen mit naturbelassenen Holzschnitzeln und Restholz. Sämtliche Stickoxid-Emissionsfaktoren weisen einen breiten Vertrauensbereich auf.

Die Stickoxid-Emissionsfaktoren zeigen auch innerhalb der Brennstoffkategorie b (naturbelassene Holzschnitzel) signifikante Unterschiede. Der (mittlere) Emissionsfaktor bei der Verbrennung von Fichte ist um einen Faktor 2 geringer als derjenige bei der Rindenverbrennung.

Brennstoff	Anlagentyp	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum mg/Nm ³	Maximum mg/Nm ³	Mittelwert mg/Nm ³	Median mg/Nm ³	Standardabweichung mg/Nm ³	Vertrauensintervall (90 % Niveau) mg/Nm ³	Mittlerer Emissionsfaktor mg/MJ	Vertrauensintervall (90% Niveau) mg/MJ
LRV Kat. a	alle Stückholzkessel	Feld	7	30	59	380	143	135	60	98	102	70
LRV Kat. b	alle Anlagen	Feld	183	750	58	574	220	214	81	133	163	99
LRV Kat. b	Rostfeuerungen	Feld	61	239	82	457	217	215	67	110	161	81
LRV Kat. b	Unterschubfeuerungen	Feld	108	378	58	574	238	236	84	138	176	102
LRV Kat. c	alle Anlagen	Feld	88	337	21	1458	402	360	245	403	289	290
LRV Kat. c	Unterschubfeuerungen	Feld	63	232	21	1106	426	379	241	397	306	286
LRV Kat. c	Rostfeuerungen	Feld	13	67	114	730	302	249	175	288	217	207
Altholz	Rostfeuerungen	Feld	12	48	96	452	293	340	117	193	211	139

Tabelle 7.2: Stickoxid-Emissionen und -Emissionsfaktoren für Holzbrennstoffe der LRV Kategorie a, b und c sowie für Altholz

Brennstoff (LRV Kat. b)	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum mg/Nm ³	Maximum mg/Nm ³	Mittelwert mg/Nm ³	Median mg/Nm ³	Standardabweichung mg/Nm ³	Vertrauensintervall (90 % Niveau) mg/Nm ³	Mittlerer Emissionsfaktor mg/MJ	Vertrauensintervall (90% Niveau) mg/MJ
Buche	Feld + Prüfstand	8	50	107	285	178	173	47	77	132	57
Fichte	Prüfstand	9	48	87	236	134	138	32	53	99	39
Rinde	Feld	6	20	168	457	260	213	88	145	193	107
Kompostholz/Rinde	Feld	2	19	280	424	320	306	39	64	237	47

Tabelle 7.3: Stickoxid-Emissionen und -Emissionsfaktoren für verschiedene Holzbrennstoffe der LRV Kategorie b

8 Partikelemissionen

8.1 Bemerkungen zu den Staubdaten

Zur Beschreibung der Emissionsdaten von Partikeln gelten im wesentlichen dieselben Bemerkungen wie für die Stickoxidemissionen gemäss Kapitel 7.1. Die Partikelemissionen beziehen sich demnach auf folgende Grössen:

Sauerstoff-Bezugsgrösse: 11 Vol.-% O₂

Partikel: gemessen als gravimetrische Gesamtstaubmasse

Sämtliche der untersuchten Feuerungsanlagen mit den Brennstoffen der Kategorie b und c nach LRV weisen zur Abgasreinigung nur einen Multizyklon auf. Anlagen mit weitergehender Abgasreinigung wie z.B. Elektrofilter oder Abgaskondensationsanlagen sind in der Auswertung für diese Brennstoffe nicht enthalten.

Die korrekte Messung des Staubgehaltes im Abgas einer Feuerungsanlage setzt eine isokinetische Absaugung des Probegases voraus. Isokinetisch heisst, dass die Probegas an der Spitze der Probenahmesonde mit derselben Geschwindigkeit abgesaugt wird wie das Abgas den Strömungskanal an der Messstelle durchströmt. Zur Durchführung von isokinetischen Staubmessungen sind eine Reihe von Massnahmen zu treffen (siehe [EMPA 1996]). Zumindest bei den Prüfstandsmessungen ist davon auszugehen, dass die Probegasabsaugung bei isokinetischen Bedingungen erfolgt. Bei Feldmessungen ist eine Beurteilung der Absaugebedingungen nicht möglich, da die Messberichte keine Angaben zur Sicherstellung einer isokinetischen Staubprobenahme enthalten.

Für Staubemissionen von Holzfeuerungen schreibt die LRV Grenzwerte vor, die vom Brennstoff und von der Anlagengrösse abhängig sind. Für die Holzbrennstoffe der Kategorie b (naturbelassenes Holz) und Kategorie c (Restholz) gelten dieselben Staubgrenzwerte:

Feuerungswärmeleistung O ₂ -Bezugsgrösse	<70 kW	70 – 1000 kW 13%	1 – 5 MW 11%	> 5 MW 11%
LRV Kat. b und c	–	150	150	50
<i>umgerechnet auf 11% O₂</i>	–	187	150	50

Altholz darf erst in Anlagen mit einer Leistung >350 kW eingesetzt werden. Der Staubgrenzwert für Altholz beträgt für alle Anlagengrösse 50 mg/Nm³ bei einem O₂-Bezugswert von 11%.

8.2 Überblick

Die Abbildung 8.1 zeigt die über sämtliche Feuerungstypen in Feldmessungen ermittelten Verteilungen der Staubgehalte im Abgas bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen der Kategorien a, b und c gemäss LRV. Die Bestimmung der Verteilungen erfolgt dabei unabhängig des eingesetzten Feuerungstyps (Rost- oder Unterschubfeuerung), der Anlagengrösse oder –baujahr, des Anlagenbetriebes (Teil-/Vollast; Luftüberschusszahl λ etc.) oder der Holzart (z.B. bei naturbelassenem Holz: Fichte, Buche, Rinde).

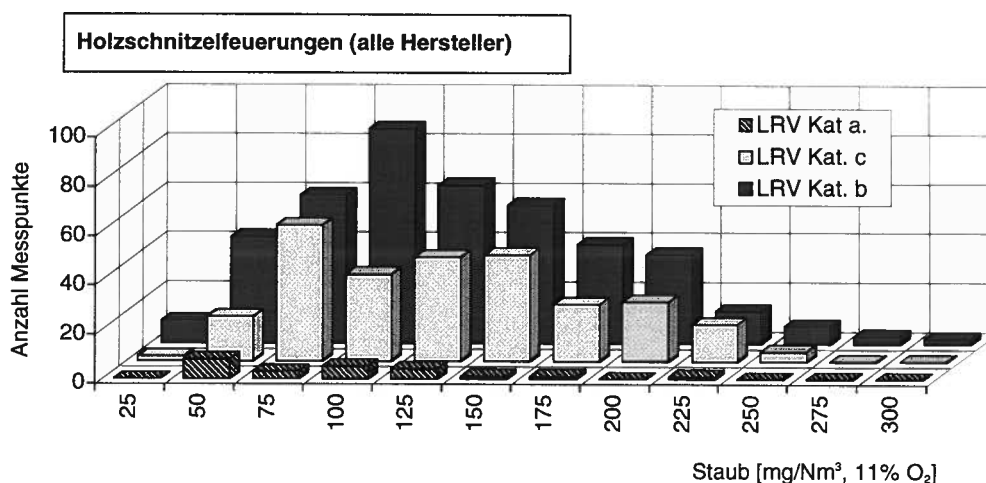


Abbildung 8.1: Verteilung der Staub-Emissionsmesswerte bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen der Kategorie a, b und c nach LRV

Lesebeispiel für Grafik: Die erste Wertebereichsklasse (1. Feld links auf der X-Achse) beinhaltet die Staub-Messwerte im Bereich von 0 .. 25 mg/Nm³

Bemerkungen: Sämtliche Messdaten stammen aus **Feldmessungen** in Rost- und Unterschubfeuerungen verschiedener Hersteller; LRV Kat. a (24 Messpunkte; 6 Anlagen), LRV Kat. b (426 Messpunkte; 44 Anlagen), LRV Kat. c (267 Messpunkte; 88 Anlagen); Die Daten der nach installierter Nennleistung gruppierten Anlagenzahl befindet sich im Anhang 11.1.

Bei der Stückholzverbrennung (LRV Kat. a) liegen sämtliche ausgewerteten Messwerte unterhalb von 150 mg/Nm³, die häufigsten Staubgehalte sind im Bereich zwischen 25 und 50 mg/Nm³ anzutreffen (jeweils bei 11% O₂).

Die Restholzverbrennung (LRV Kat. c) führt zu einer Verteilung der Staubmesswerte, die sich nicht signifikant von derjenigen bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b) unterscheidet. Die mittleren Partikelemissionen liegen je im Bereich zwischen 100 und 150 mg/Nm³.

Die Verteilung der Staubmesswerte bei der Aitholzverbrennung zeigt Abbildung 2.2. Alle Anlagen, die entweder mit einem Elektro- oder Gewebefilter ausgerüstet sind, weisen Partikelemissionen <25 mg/Nm³ auf (bei 11 % O₂). Die Nennleistungen dieser Anlagen bewegen sich im Bereich von 800 kW bis 4400 kW. Die übrigen Anlagen (Kesselleistungsbereich zwischen 800 kW und 5000 kW) verfügen nur über einen Zyklon und weisen Staubemissionen deutlich über dem maximal zulässigen Grenzwert auf. Diese Anlagen sind daher nicht LRV-konform.

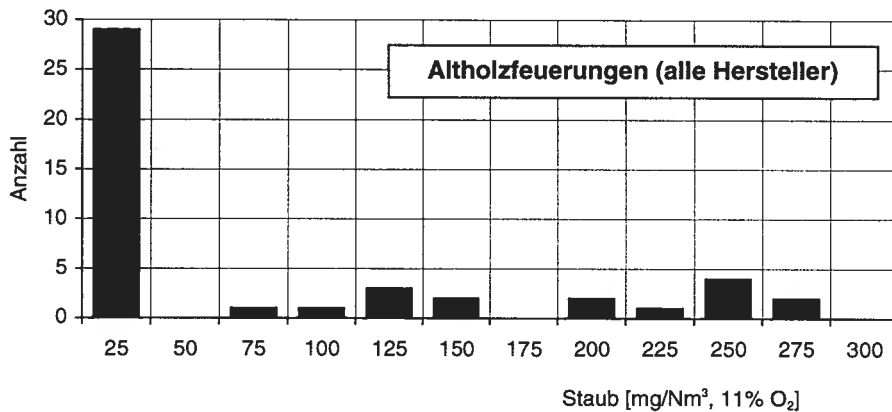


Abbildung 8.2: Verteilung der Staub-Emissionsmesswerte bei der Altholzverbrennung

Bemerkungen: Sämtliche Messdaten stammen aus **Feldmessungen**; 45 Messpunkte aus verschiedenen 11 Anlagen, wovon insgesamt 5 Anlagen entweder mit einem Elektro- oder Gewebefilter ausgerüstet sind (die übrigen Anlagen verfügen nur über einen Zyklon).

Die Abbildung 8.3 zeigt die über Rostfeuerungen kumulierten Verteilungen der Partikelemissionen innerhalb der LRV Kategorie b aus Feldmessungen. Die Verteilungen werden unabhängig der Anlagengröße, des Baujahrs und des Anlagenbetriebes ermittelt.

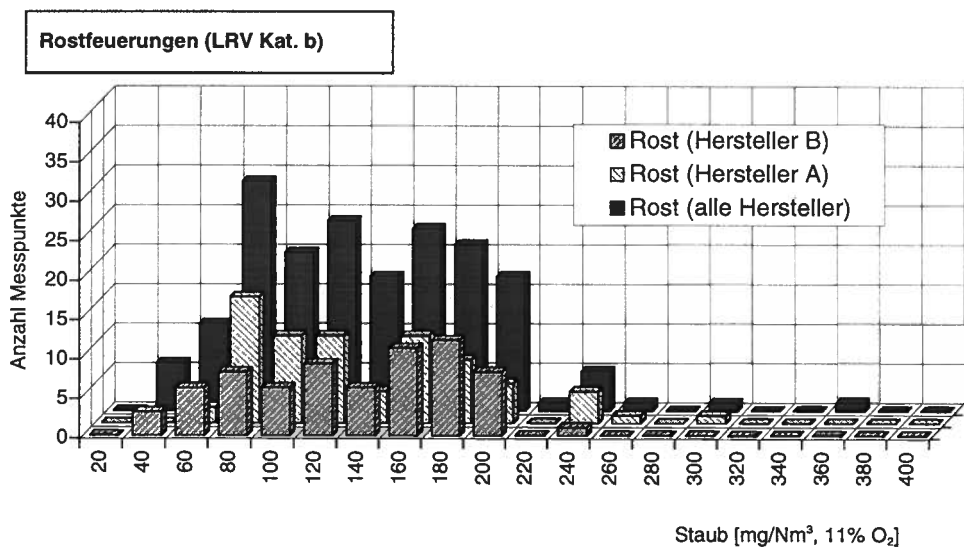


Abbildung 8.3: Verteilung der Staubgehalte bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitteln (LRV Kat. b) in (Vorschub-) Rostfeuerungen

Bemerkungen: Sämtliche Messdaten stammen aus **Feldmessungen**; Alle Hersteller (179 Messpunkte; 43 Anlagen), Hersteller A (76 Messpunkte; 18 Anlagen), Hersteller B (70 Messpunkte; 12 Anlagen).

Die Häufigkeit der Staubmesswerte innerhalb des Bereiches von 80 mg/Nm³ bis 200 mg/Nm³ unterscheiden sich nicht wesentlich. Die häufigsten Messwerte liegen zwischen 60 und 80 mg/Nm³. Zwischen Rostfeuerungsanlagen von Hersteller A und B sind keine signifikanten Unterschiede in den Partikelemissionen festzustellen.

Die über sämtliche Hersteller von Unterschubfeuerungen kumulierten Partikelemissionen zeigen eine etwas ausgeprägtere Verteilung als diejenige bei Rostfeuerungen, indem die häufigsten Werte im Bereich von 100 bis 120 mg/Nm³ liegen und die Verteilungen beidseitig dieses Bereiches mehrheit-

lich gleichmässig abfallen. Die Anlagen von Hersteller D unterscheiden sich von denjenigen von Hersteller C dadurch, dass bei Feuerungen von Hersteller D nur wenige Staubmesswerte <100 mg/Nm³ vorliegen.

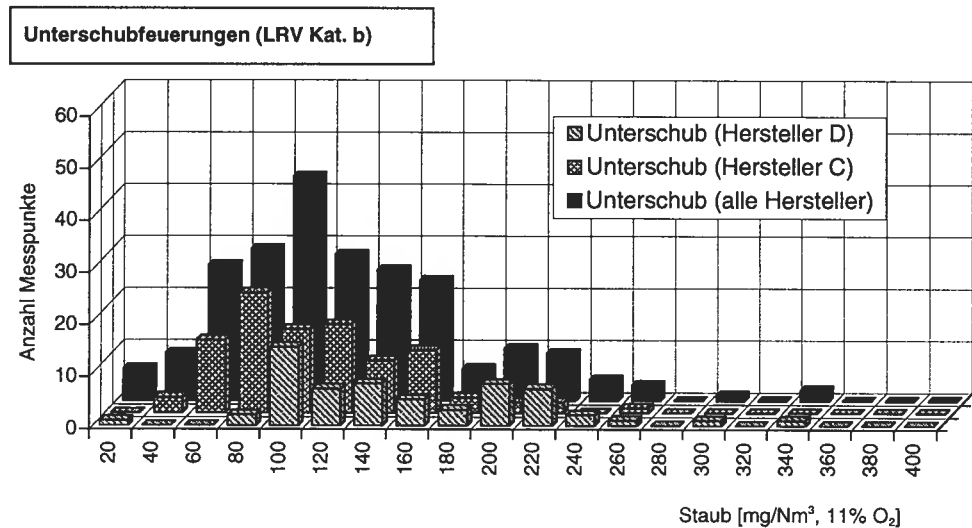


Abbildung 8.4: Verteilung der Staubmesswerte bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b) in Unterschubfeuerungen

Bemerkungen: Sämtliche Messdaten stammen aus **Feldmessungen**; Alle Hersteller (225 Messpunkte; 61 Anlagen), Hersteller C (103 Messpunkte; 28 Anlagen), Hersteller D (62 Messpunkte; 18 Anlagen);

Die Abbildung 8.5 zeigt eine Zusammenstellung der Partikelemissionen bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln in Unterschub- und Rostfeuerungen verschiedener Hersteller unabhängig von der Anlagengrösse, des Baujahres, dem Anlagenbetrieb und der Holzart innerhalb der LRV Kategorie b.

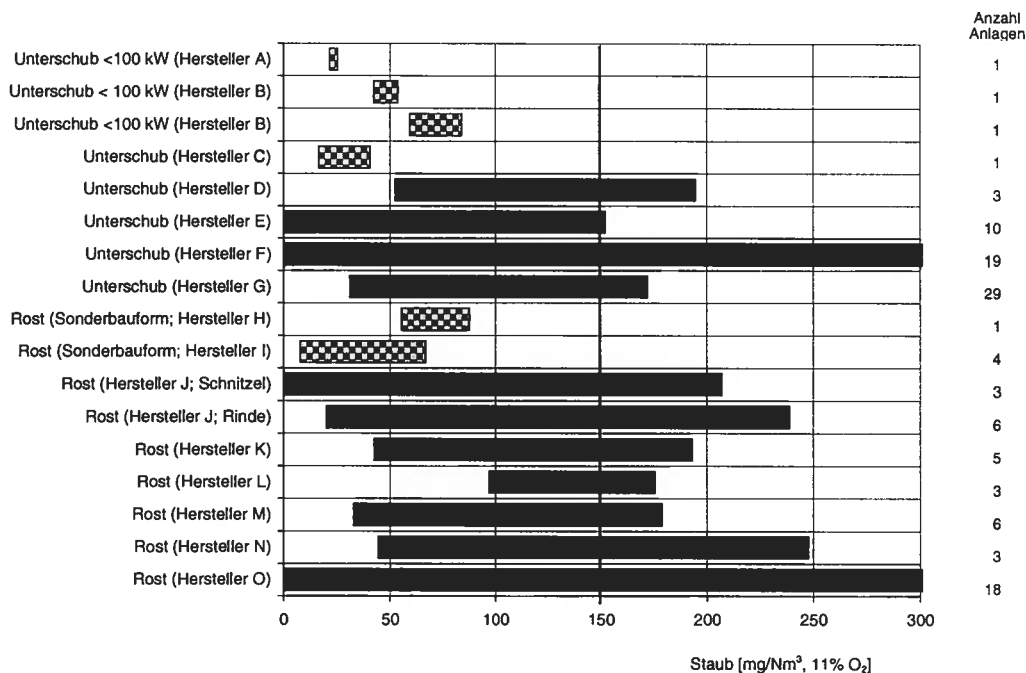


Abbildung 8.5: Vertrauensbereiche der Staubmesswerte bei der Verbrennung von naturbelassenen Holz-schnitzeln (LRV Kat. b) in verschiedenen Holzfeuerungen

Bemerkung: Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1.

Bei Prüfstandsmessungen werden dabei deutlich geringere mittlere Partikelemissionen beobachtet als bei Feldmessungen. Auf die Unterschiede zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen geht das Kapitel 8.3 ein.

Innerhalb der Messwerte aus Feldmessungen gibt es keinen Feuerungstyp oder keinen Hersteller, welche signifikant höhere oder tiefere mittlere Partikelemissionen aufweist. Immerhin sind die mittleren Emissionen bei Unterschubfeuerungen tendenziell etwas tiefer als bei Rostfeuerungen. Mit einer Ausnahme (Rostfeuerung von Hersteller L) sind die Verteilungen breit und variieren typischerweise $\pm 100 \text{ mg/Nm}^3$ um den Mittelwert.

Die über sämtlichen Hersteller kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Partikelemissionen aus Rost- und Unterschubfeuerungen zeigt Abbildung 8.6. Im Gegensatz zu den NO_x -Emissionen unterscheiden sich die kumulierten Verteilungen zwischen den beiden Feuerungstypen leicht.

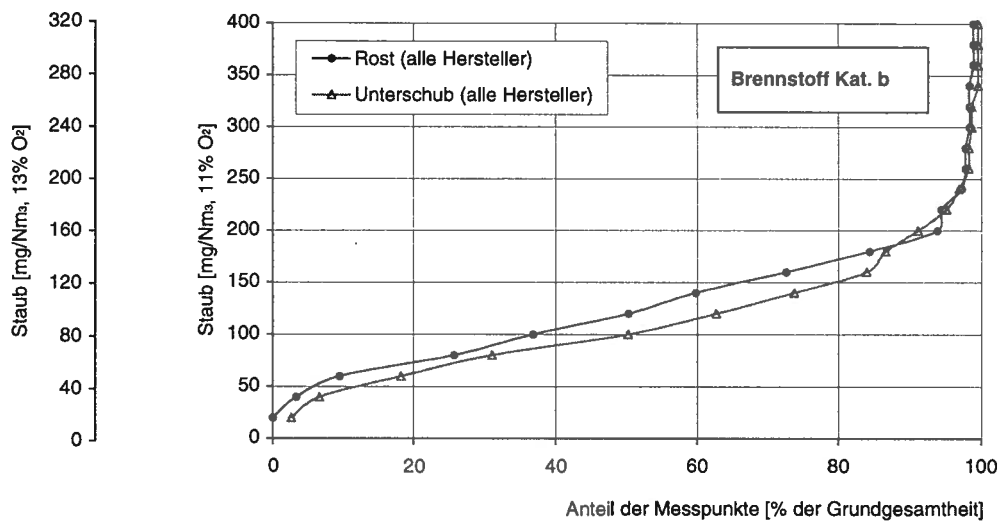


Abbildung 8.6: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Partikelemissionen als prozentuale Anteile in der Grundgesamtheit von Rost- oder Unterschubfeuerungen

Bemerkung: Sämtliche Messdaten stammen aus **Feldmessungen**; Staubgrenzwerte siehe Einleitung zu Kapitel 8.1

Im Konzentrationsbereich zwischen 50 mg/Nm³ und 200 mg/Nm³ verlaufen die kumulierten Verteilungen relativ flach, wobei rund 90% aller untersuchten Rost- und Unterschubfeuerungen Partikelemissionen <200 mg/Nm³ (bei 11% O₂) aufweisen. Rund 50% der Unterschubfeuerungen weisen Staubgehalte <100 mg/Nm³ auf, während noch rund 35% der Rostfeuerungen unterhalb dieses Wertes liegen.

8.3 Vergleich zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen

Ein exakter Vergleich zwischen Feld- und Prüfstandsmessungen erfordert Messwerte aus Versuchen mit identischen Feuerungsmodellen und identischen Brennstoffen (gleiche Charge). Derartige Ergebnisse liegen nicht vor, so dass der Vergleich mit Messwerten bei vergleichbarem Brennstoff in verschiedenen Feuerungstypen erfolgt (Abbildung 8.7).

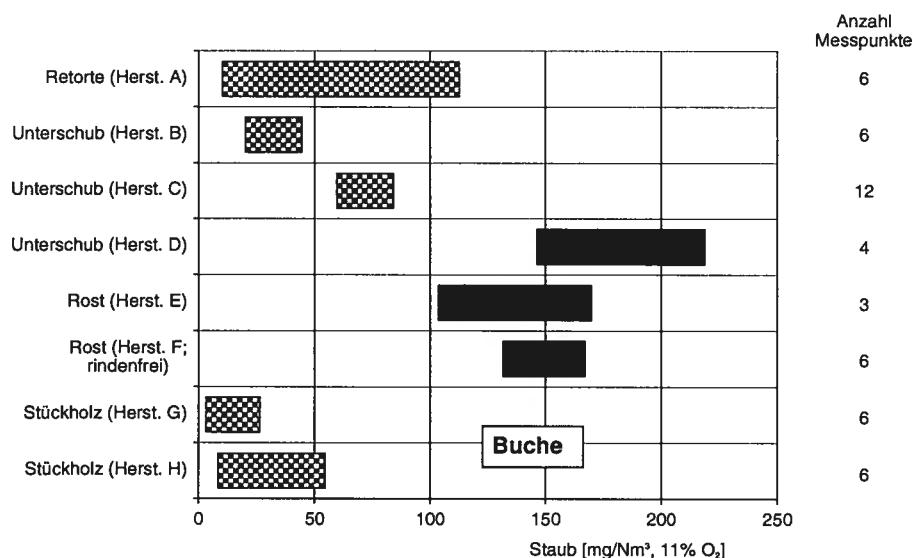


Abbildung 8.7: Vertrauensbereiche der Staubemissionen bei der Verbrennung von Buchenholz in verschiedenen Feuerungen im Feld und auf dem Prüfstand

Bemerkung: Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen sind als karierte Balken gekennzeichnet; Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in Abbildung 7.1; Tabellarische Werte in Anhang 11.12.

Bei Buche als Brennstoff werden dabei bei Prüfstandsmessungen signifikant tiefere Staubmesswerte beobachtet als bei Feldmessungen. Auf dem Prüfstand liegen die mittleren Werte rund 100 mg/Nm^3 unter den Werten aus Feldmessungen. Als mögliche Ursachen für die geringeren Messwerte bei Prüfstandsmessungen kommen in Frage:

- Der Prüfstand-Brennstoff enthält geringere Anteile von mineralischen Stoffen (z.B. Gestein, Erde, Asche), die als Partikel in das Abgas transferiert werden können.
- Prüfstandsmessungen erfolgen bei optimalen Anlageeinstellungen (z.B. tiefe Luftüberschusszahl und dadurch geringe Strömungsgeschwindigkeiten)
- Prüfstandsmessungen erfolgen bei definierten (z.B. isokinetische Probenahme) und stationären Versuchsbedingungen (z.B. konstante Abgasgeschwindigkeit, keine Strähnen). Bei Feldmessungen sind die Versuchsbedingungen während den Messungen unbekannt.

Die geringsten Partikelemissionen weisen Stückholzfeuerungen auf, wobei die mittleren Staubgehalte bei Buche und bei Prüfstandsmessungen $<50 \text{ mg/Nm}^3$ (bei $11\% \text{ O}_2$) liegen. Bei Feldmessungen können allerdings auch Stückholzkessel Partikelemissionen $>100 \text{ mg/Nm}^3$ aufweisen (Abbildung 8.8).

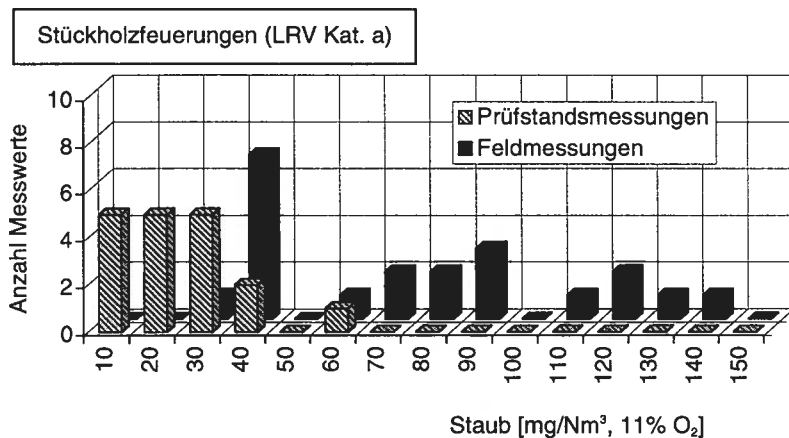


Abbildung 8.8: Vergleich von Staubmesswerten in Stückholzkesseln bei Feld- und Prüfstandsmessungen

Bemerkungen: Prüfstandsmessungen (3 Anlagen; 2 Hersteller; Fichte und Buche als Brennstoff); Feldmessungen (6 Anlagen; 5 Hersteller; Brennstoff unbekannt)

Aufgrund der deutlichen Unterschiede in den Partikelemissionen zwischen Prüfstand und Feldmessungen erfolgen die nachfolgenden Vergleiche hauptsächlich anhand von Ergebnissen aus Prüfstandsmessungen.

8.4 Brennstoffbedingte Partikelemissionen

Die Vertrauensbereiche der Staubmesswerte bei verschiedenen naturbelassenen Brennstoffen auf dem Prüfstandsmessungen an automatischen Holzfeuerungen zeigt Abbildung 8.9.

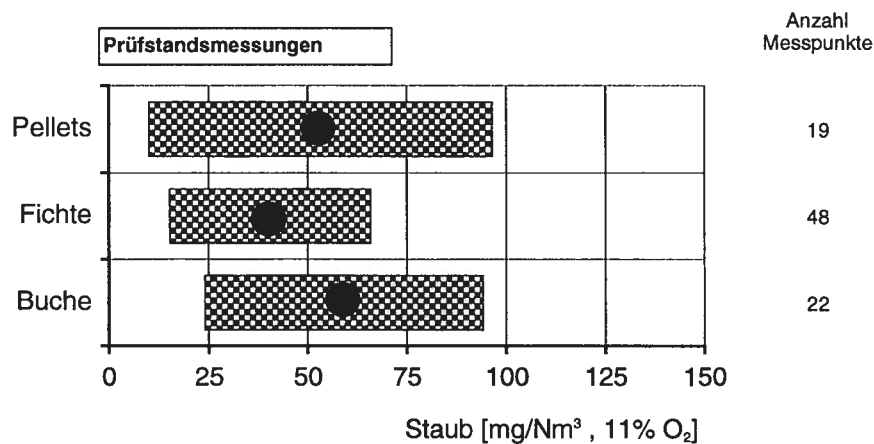


Abbildung 8.9: Vertrauensbereiche der Staubmesswerte bei der Verbrennung verschiedener naturbelassener Holzbrennstoffe auf dem Prüfstand

Bemerkungen: Die Abbildung enthält nur Messungen von Schnitzelfeuerungen; Jeder Brennstoff wurde in je 4 verschiedenen Konstruktionstypen eingesetzt; Nennleistungen: 40-150 kW (Buche), 40-300 kW (Fichte), 14-40 kW (Pellets)

Innerhalb der drei untersuchten Brennstoffarten Pellets, Fichte und Buche werden keine Unterschiede in den Partikelemissionen beobachtet.

8.5 Konstruktive Einflüsse auf die Partikelemissionen

Mit Fichte als Brennstoff liegen eine Reihe von Prüfstandsmessungen an verschiedenen Feuerungstypen vor (Abbildung 8.10). Die Staubgehalte sind bei allen untersuchten Feuerungen gering und liegen deutlich unterhalb von 150 mg/Nm^3 . Alle ausgewerteten Messwerte von Prüfstandsmessungen sind geringer als die üblichen Messwerte von Feldmessungen. Die geringsten Staubmesswerte werden in einer Stückholzfeuerung, die höchsten in einer Vorofenfeuerung beobachtet. Zumindest bei Luftüberschusszahlen <2 sind die Partikelemissionen nicht vom Luftüberschuss abhängig (siehe Abbildung 8.11).

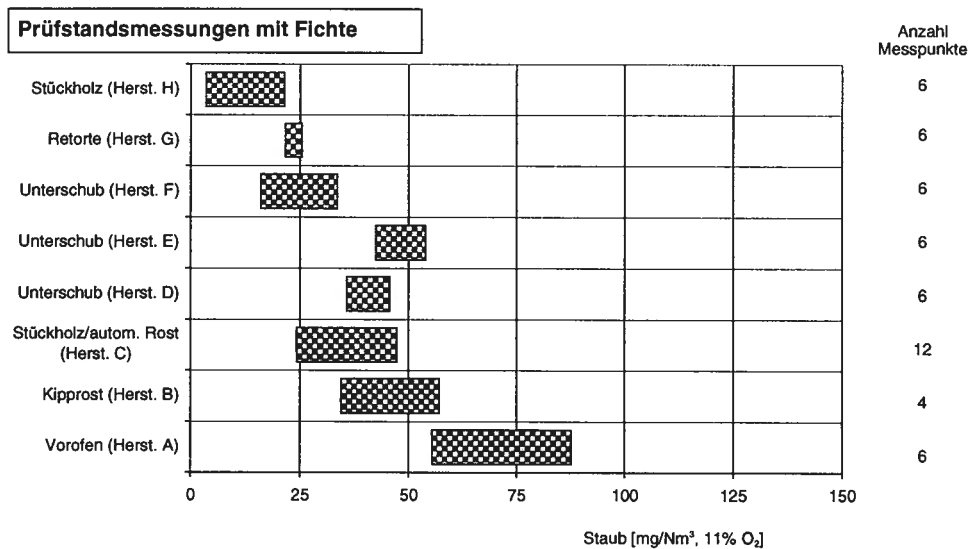


Abbildung 8.10: Vertrauensbereiche der mittleren Staubmesswerte bei der Verbrennung von Fichtenholz in verschiedenen Feuerungstypen auf dem Prüfstand bei Nennleistung

Bemerkung: Betreff. Ermittlung der Vertrauensbereiche siehe Bemerkungen in xxx; die kombinierte Stückholz/Rostfeuerung wurde mit Fichtenschnitzeln betrieben.

Die Feuerungstyp hat demnach einen Einfluss auf die Partikelemissionen. Nach Abbildung 8.10 nehmen die Emissionen in folgender Reihenfolge zu:

Stückholz > Retorte > Unterschub > Rost > Vorofen

8.6 Betriebliche Einflüsse auf die Partikelemissionen

Die Abbildung 8.11 zeigt die Partikelemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ bei der Verbrennung von Fichte auf dem Prüfstand in verschiedenen Feuerungstypen.

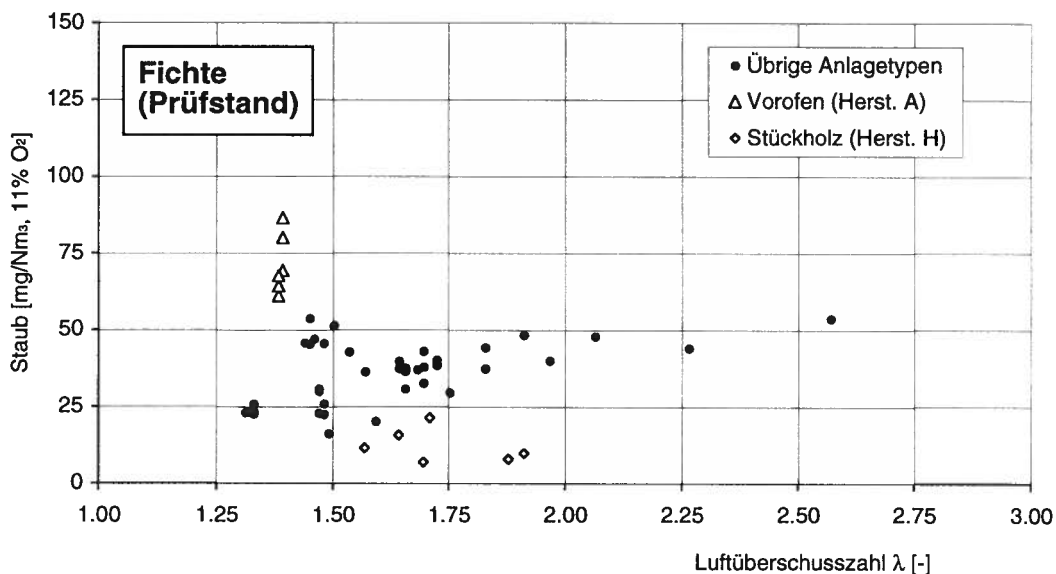


Abbildung 8.11: Partikelemissionen in Abhängigkeit von λ in verschiedenen Holzfeuerungen

Bemerkungen: Sämtliche Messungen wurden auf dem Prüfstand bei Nennleistung durchgeführt; Insgesamt 9 Anlagen (7 Hersteller) im Leistungsbereich zwischen 40 kW und 300 kW; s.a. Abbildung 8.10.

Die Stückholzfeuerung weist bei vergleichbarem λ tiefere Partikelemissionen auf als die Schnitzelfeuerungen. Ursache für die geringeren Messwerte könnten neben konstruktiven Gründen auch der geringere Anteil von mineralischen Fremdstoffen im Stückholz sein im Vergleich zu Schnitzeln.

Die Vorofenfeuerung weist trotz tiefen Luftüberschusszahlen von rund $\lambda = 1.35$ höhere Partikelemissionen auf als die übrigen Feuerungstypen.

Die Staubemissionen sind sowohl bei Rost- als auch bei Unterschubfeuerungen nicht signifikant von der Kessellast abhängig (siehe Anhang 11.13 bis 11.17).

8.7 Emissionsfaktoren für Partikel

Die Ermittlung der Emissionsfaktoren für Partikel erfolgt unter denselben Annahmen und Randbedingungen wie diejenigen für die Stickoxide (Kapitel 7.6).

Die Partikel-Emissionsfaktoren für Brennstoffe der Kategorien a, b und c sowie für Altholz gemäss LRV sind in der Tabelle 8.1 zusammengestellt. Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren bei Altholzfeuerungen werden nur die Messwerte von LRV-konformen Anlagen verwendet.

Brennstoff	Anlagentyp	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum mg/Nm ³	Maximum mg/Nm ³	Mittelwert mg/Nm ³	Median mg/Nm ³	Standardabweichung mg/Nm ³	Vertrauensintervall (90%-Niveau) mg/Nm ³	Mittlerer Emissionsfaktor mg/MJ	Vertrauensintervall (90% Niveau) mg/MJ
LRV Kat a.	alle Anlagen	Feld	6	18	26	566	63	93	125	206	45	152
LRV Kat. b	alle Anlagen	Feld	111	426	3	1416	121	106	110	180	90	134
LRV Kat. b	Unterschubfeuerungen	Feld	61	225	3	854	115	99	75	124	85	92
LRV Kat. b	Rostfeuerungen	Feld	46	201	4	1416	128	114	138	227	95	168
LRV Kat. c	alle Anlagen	Feld	88	267	11	1245	126	111	99	162	93	120
LRV Kat. c	Unterschubfeuerungen	Feld	64	171	24	1245	140	118	116	192	103	142
LRV Kat. c	Rostfeuerungen	Feld	12	56	28	200	102	95	44	72	76	53
Altholz	Rostfeuerungen	Feld	7	24	1	5	2	2	1	2	2	2

Tabelle 8.1: Partikel-Emissionen und –Emissionsfaktoren für Holzbrennstoffe der LRV Kategorie a, b und c sowie für Altholz

Bemerkungen: Für Altholz werden nur die Messwerte von LRV-konformen Anlagen verwendet, d.h. Anlagen mit Staubmesswerten < 50 mg/Nm³ (=Grenzwert gemäss LRV); In der LRV-Kategorie b sind die Messwerte aus Pelletfeuerungen nicht enthalten.

Die geringsten Emissionsfaktoren für Partikel stammen aus (LRV-konformen) Altholzfeuerungen, da diese Anlagen über eine weitergehende Abgasreinigung wie Elektro- oder Gewebefilter verfügen. Die Emissionsfaktoren aus Stückholzfeuerungen sind etwa halb so gross wie diejenigen aus Feuerungen mit naturbelassenen Holzsnitzeln, jedoch um mehr als eine Grössenordnung höher als diejenigen aus (LRV-konformen) Altholzfeuerungen. Die Emissionsfaktoren für Partikel aus Restholzfeuerungen sind mit denjenigen aus Feuerungen mit naturbelassenen Holzsnitzeln vergleichbar.

9 Schlussfolgerungen

Der Umfang der Datenbank, welcher Messwerte von mehr als 250 Holzfeuerungen umfasst, dürfte ein repräsentatives Abbild der in der Schweiz installierten Holzfeuerungen wiedergeben.

Stickoxidemissionen

Die Auswertungen zeigen, dass Restholzfeuerungen deutlich stärker variierende und höhere mittlere NO_x-Emissionen aufweisen als Feuerungen für naturbelassenes Holz, was auf den Brennstoffstickstoff zurückgeführt wird. Die Verbrennung von Altholz führt im Mittel zu leicht höheren NO_x-Emissionen als diejenige von naturbelassenem Holz, wobei Altholzfeuerungen jedoch auch vergleichbare NO_x-Emissionen wie Feuerungen mit naturbelassenem Holz aufweisen können.

Die über sämtliche Hersteller kumulierten Häufigkeitsverteilungen der NO_x-Emissionen für naturbelassenes Holz (LRV Kat. b) verlaufen relativ flach und zeigen nur geringe Unterschiede zwischen Unterschub- und Rostfeuerungen. Rund 80 % bis 90 % aller (untersuchten) Feuerungen weisen NO_x-Emissionen < 300 mg/Nm³ (bei 11% O₂) auf, unter 150 mg/Nm³ sind es nur noch gut 10%.

Einige Rostfeuerungstypen zeigen eine klare Abhängigkeit der NO_x-Emissionen von der Kessellast, indem bei sinkender Last geringere NO_x-Emissionen auftreten. Unterschubfeuerungen zeigen diese Tendenz kaum oder zumindest deutlich schwächer.

Die Gesamtluftüberschusszahl λ kann einen grossen Einfluss auf die NO_x-Emissionen haben, indem einige Anlagentypen bei tieferen λ -Werten (zwischen 1,5 und 1,7) deutlich geringere NO_x-Emissionen zeigen.

Es gibt Holzfeuerungen, die ein hohes NO_x-Minderungspotenzial aufweisen. Im vorliegenden Datenumfang wurden signifikante Low-NO_x Effekte bei vereinzelt Feuerungen mit Fichten- und Buchenschnitzeln sowie bei vereinzelt Rindenfeuerungen beobachtet. Die Nutzung dieses Potenzials erfordert jedoch eine konsequente Optimierung des Anlagenbetriebs und zwar prioritär auf möglichst tiefe λ -Werte. Anhand der vorhandenen Daten kann das Potenzial zur gesamtschweizerischen NO_x-Emissionsminderung durch Anlagenoptimierung nicht sicher abgeschätzt werden, da die Verteilung der installierten Feuerungstypen nicht genau bekannt ist.

Aufgrund der vorangehend genannten Effekte ist ein Vergleich und eine Beurteilung von Holzfeuerungen verschiedener Hersteller und/oder Modelle nicht möglich allein anhand von Abnahme- und Kontrollmessungen. Ein *Anlagenvergleich* erfordert systematische Untersuchungen bei identischem oder genau definiertem Brennstoff zur Ermittlung der NO_x-Kennfelder (z.B. NO_x in Abhängigkeit von Luftüberschusszahl, Last, usw.). Eine *Anlagenbeurteilung* im Hinblick auf das NO_x-Minderungspotenzial erfordert zusätzlich eine Reihe von weiteren Kenndaten.

Die Festlegung von NO_x-Grenzwerten für Holzfeuerungen ist mit dem Problem verbunden, dass die NO_x-Emissionen von zahlreichen teilweise unabhängigen Faktoren abhängen, die den Hauptinflussgrössen *Brennstoff, Feuerungstechnik und Betrieb* zugeordnet werden können, und dass eine klare Zuordnung der NO_x-Emissionen zu diesen Einflussgrössen nicht generell möglich ist.

Partikelemissionen

Im Vergleich zu den Stickoxidemissionen zeigen die Partikelemissionen ein uneinheitlicheres Bild. Die Messwerte aus Feldmessungen zeigen eine breite Verteilung.

Die Verteilung der Staubmesswerte bei der Verbrennung von Restholz unterscheidet sich signifikant von derjenigen bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln.

Die über sämtliche Hersteller kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Partikelemissionen für naturbelassenes Holz (LRV Kat. b) verlaufen relativ flach und zeigen Unterschiede zwischen Unterschub- und Rostfeuerungen. Rund 90 % aller (untersuchten) Rost- und Unterschubfeuerungen weisen Staubgehalte $<200 \text{ mg/Nm}^3$ (bei 11% O_2) auf, während noch knapp 40 % der Rostfeuerungen und 50% der Unterschubfeuerungen Staubgehalte $<100 \text{ mg/Nm}^3$ aufweisen. Unterschubfeuerungen weisen demnach tendenziell geringere Partikelemissionen auf als Rostfeuerungen. Innerhalb desselben Feuerungstyps sind jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellern erkennbar.

Deutliche Unterschiede in den Partikelemissionen bestehen vor allem zwischen Prüfstands- und Feldmessungen, wobei auf dem Prüfstand immer tiefere Staubgehalte resultieren.

10 Verdankung

Die vorliegende Untersuchung wurde unterstützt vom Bundesamt für Energie und vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

Das grosse Interesse der angefragten Institutionen und Firmen sowie deren Unterstützung bei der Datenerhebung hat wesentlich zum Gelingen der Untersuchung beigetragen. Die Unterlagen ermöglichten eine umfangreiche Datenbank, die eine statistische Auswertung erlaubt und ein repräsentatives Bild der Stickoxidemissionen der in der Schweiz installierten automatischen Holzfeuerungen wiedergeben dürfte.

Folgende Institutionen und Firmen haben Messberichte zur Verfügung gestellt, was an dieser Stelle verdankt wird:

Amtliche Stellen (in alphabetischer Reihenfolge)

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zurich, 8090 Zürich

Amt für Gesundheit und Umwelt (AGU), Stadt Zürich, 8035 Zürich

Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit, 6431 Schwyz

Amt für Umwelt, Kanton Graubünden, 7001 Chur

Amt für Umwelt, Kanton Thurgau, 8510 Frauenfeld

Amt für Umwelt, Kanton Zug, 6301 Zug

Amt für Umwelt, Luftreinhaltung und Bodenschutz, Kanton AR, 9102 Herisau

Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle, Luftemissionen, 3000 Bern 7

Amt für Umweltschutz, Kanton Nidwalden, 6371 Stans

Amt für Umweltschutz, Kanton Luzern, 6002 Luzern

Amt für Umweltschutz, Kanton St. Gallen, St. Gallen

Bundesanstalt für Landtechnik (BLT) Wieselburg, A-3250 Wieselburg

Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, Service de la protection de l'environnement, Canton du Valais, 1951 Sion

Kantonales Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit (KIGA), Kanton Bern, 3011 Bern

Lufthygieneamt beider Basel, 4410 Liestal

Service de l'environnement et de l'énergie SEVEN, 1066 Epalinges

Stadt St. Gallen, Umweltfachstelle Feuerungsanlagen, 9001 St. Gallen

Ufficio della protezione dell'aria, Repubblica e cantone Ticino, 6501 Bellinzona

Firmen (in alphabetischer Reihenfolge)

Gebrüder Tobler AG, Haustechniksysteme, 9001 St. Gallen

Köb Wärmetechnik AG, 6010 Kriens

Lorenz Wärmetechnik AG, 8450 Andelfingen

Schmid AG, 8360 Eschlikon

Tiba-Müller AG, 4710 Balsthal

11 Anhang

11.1 Tabellarische Anzahlverteilung der untersuchten Kessel-Nennleistungen

Kessel-Nennleistung [kW]		ca. Anzahl Anlagen (alle Hersteller)		
von	bis	LRV Kat. b	LRV Kat. c	Altholz
0	250	73	38	0
250	500	33	13	0
500	750	16	3	0
750	1000	21	3	6
1000	1250	13	6	0
1250	1500	6	7	0
1500	1750	3	6	0
1750	2000	9	5	1
2000	2250	0	2	0
2250	2500	1	3	3
2500	2750	0	0	0
2750	3000	4	1	0
3000	3250	1	0	0
3250	3500	0	0	0
3500	3750	0	0	0
3750	4000	0	0	1
4000	4250	0	0	0
4250	4500	0	0	1
4500	4750	0	0	0
4750	5000	0	1	1

Tabelle 11.1. Grobverteilung der untersuchten Anlageleistungen für Holzbrennstoffe LRV Kat. b und c sowie für Altholz

Bemerkungen: Die Ermittlung der Anzahl installierter Anlagen wird aus der Verteilung der Anzahl Messpunkte in Funktion der Nennleistung-Klassen abgeleitet (z.B. LRV Kat. b: 750 Messpunkte und 183 Anlagen, entsprechend 4.1 Messpunkte pro Anlage)

Kessel-Nennleistung [kW]		ca. Anzahl Anlagen (alle Hersteller)		
von	bis	LRV Kat. b	LRV Kat. c	Altholz
0	100	33	8	0
100	200	30	19	0
200	300	23	17	0
300	400	12	3	0
400	500	8	5	0
500	600	6	2	0
600	700	10	1	0
700	800	5	3	3
800	900	13	1	2
900	1000	4	0	1
1000	1100	0	2	0
1100	1200	13	4	0
1200	1300	0	0	0
1300	1400	2	5	0
1400	1500	5	2	0
1500	1600	3	5	0
1600	1700	0	1	0
1700	1800	7	4	0
1800	1900	0	0	0
1900	2000	2	2	1

Tabelle 11.2. Feinverteilung der untersuchten Anlageleistungen (bis 2000 kW) für Holzbrennstoffe LRV Kat. b und c sowie für Altholz

Bemerkungen: siehe Tabelle 11.1

11.2 Tabellarische Zusammenstellungen von statistischen NO_x-Kenndaten

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Brennstoffe LRV Kat. b									
Anlagentyp (Hersteller)	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90 % Niveau)
Rost (Hersteller O)	Feld	21	102	141	410	232	224	51	85
Rost (Hersteller N)	Feld	12	38	82	273	174	169	56	92
Rost (Hersteller M)	Feld	6	21	91	313	194	180	76	125
Rost (Hersteller L)	Feld	8	25	107	354	209	215	75	124
Rost (Hersteller K)	Feld	5	17	97	424	253	222	84	138
Rost (Hersteller J; Rinde)	Feld	6	19	168	457	239	218	78	129
Rost (Hersteller J; Schnitzel)	Feld	3	17	129	339	203	182	61	101
Rost (Sonderbauform; Hersteller I)	Prüfstand	4	18	79	173	106	100	25	41
Rost (Sonderbauform; Hersteller H; Fichte)	Prüfstand	1	6	158	171	163	162	5	8
Unterschub (Hersteller G)	Feld	27	104	58	574	217	198	95	156
Unterschub (Hersteller F)	Feld	64	206	61	524	253	258	77	127
Unterschub (Hersteller E)	Feld	10	34	118	343	216	217	61	101
Unterschub (Hersteller D)	Feld	3	13	199	391	250	210	71	116
Unterschub (Hersteller C)	Feld und Prüfstand	3	20	145	437	236	186	98	161
Unterschub <100 kW (Hersteller B; Buche)	Prüfstand	1	12	137	173	160	162	12	19
Unterschub <100 kW (Hersteller B; Fichte)	Prüfstand	1	6	129	144	136	136	5	8
Unterschub <100 kW (Hersteller A)	Feld und Prüfstand	3	14	113	145	126	126	12	20
alle Anlagen		183	750	58	574	220	214	81	133
Rost (alle)	Feld und Prüfstand	66	261	79	457	211	210	72	118
Unterschub (alle)	Feld und Prüfstand	112	456	58	574	227	220	86	141

Tabelle 11.3: Zusammenstellung der NO_x-Daten für Rost- und Unterschubfeuerungen verschiedener Hersteller und Brennstoffe der LRV Kat. b

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Brennstoffe LRV Kat. b									
Brennstoff	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90 % Niveau)
Buche	Feld + Prüfstand	8	50	107	285	178	173	47	77
Buche	Feld	5	28	107	285	178	187	56	92
Buche	Prüfstand	3	22	137	275	178	173	33	54
Fichte	Prüfstand	9	48	87	236	134	138	32	53
Rinde	Feld	6	20	168	457	260	213	88	145
Kompostholz/Rinde	Feld	2	19	280	424	320	306	39	64
Pellets	Feld + Prüfstand	12	59	60	437	169	138	87	143
Pellets	Feld	5	20	125	437	249	270	107	176
Pellets	Prüfstand	7	39	60	162	127	119	25	41
Alle Brennstoffe LRV Kat. b		183	750	58	574	220	214	81	133

Tabelle 11.4: Zusammenstellung der NO_x-Daten für verschiedene Brennstoffe der LRV Kat. b

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Brennstoffe LRV Kat. c und Altholz									
LRV	Feuerungstyp	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90%-Niveau)
Kat.c	Unterschub (Hersteller A)	9	43	56	1106	515	472	306	503
Kat.c	Unterschub (Hersteller B)	23	66	169	1090	472	421	232	381
Kat.c	Unterschub (Hersteller C)	14	53	80	805	355	297	198	326
Kat.c	Unterschub (alle Hersteller)	63	232	21	1106	426	379	241	397
Kat.c	Rost (alle Hersteller)	13	67	114	730	302	249	175	288
Kat.c	alle Anlagen	88	337	21	1458	402	360	245	403
Altholz	Rost (alle Hersteller)	12	48	96	452	293	340	117	193

Tabelle 11.5: Zusammenstellung der NO_x-Daten in verschiedenen Feuerungstypen für die Brennstoffe der LRV Kat. c (Restholz) und für Altholz

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Buche als Brennstoff									
Anlage	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90 % Niveau)
Stückholz (Hersteller A)	Prüfstand	1	6	151	186	167	165	15	24
Stückholz (Hersteller B)	Prüfstand	1	6	141	169	157	158	10	17
Rost (Hersteller C)	Feld	1	9	107	158	131	128	20	33
Rost (Hersteller D)	Feld	1	3	208	215	211	209	4	7
Unterschub (Hersteller E)	Feld	1	14	109	285	195	191	61	100
Unterschub (Hersteller F)	Prüfstand	1	12	137	173	160	162	12	19
Unterschub (Hersteller G)	Prüfstand	1	6	182	188	185	185	2	3
Retorte (Hersteller H)	Prüfstand	1	6	141	275	202	201	52	86

Tabelle 11.6: Zusammenstellung von NO_x-Kenndaten bei der Buchenverbrennung in Einzelanlagen

Bemerkung: Grafische Darstellung der Vertrauensbereiche in Abbildung 7.11.

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Fichte als Brennstoff									
Anlage	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90 % Niveau)
Vorofen (Hersteller F)	Prüfstand	1	6	158	171	163	162	5	8
Retorte (Hersteller E)	Prüfstand	1	6	113	114	114	114	1	1
Unterschub (Hersteller D)	Prüfstand	1	6	138	151	142	140	6	9
Unterschub (Hersteller C)	Prüfstand	1	6	129	144	136	136	5	8
Unterschub (Hersteller B)	Prüfstand	1	6	145	152	149	148	3	5
Stückholz/autom. Rost (Hersteller A)	Prüfstand	1	12	87	104	95	96	7	11
Stückholz (Hersteller A)	Prüfstand	1	6	145	168	153	151	8	13

Tabelle 11.7: Zusammenstellung von NO_x-Kenndaten bei der Verbrennung von Fichte in Einzelanlagen
 Bemerkung: Grafische Darstellung der Vertrauensbereiche in Abbildung 7.12

NO _x -Werte in mg/Nm ³ (als NO ₂ , bei 11% O ₂) für Pelletbrennstoffe									
Anlage	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90 % Niveau)
Unterschub1 (Hersteller G); Pelletlieferant A	Feld	1	4	258	292	274	273	15	29
Unterschub2 (Hersteller G); Pelletlieferant A	Feld	1	4	387	437	404	397	22	44
Unterschub (Hersteller F); Pelletlieferant A	Feld	1	4	273	320	299	300	24	46
Unterschub (Hersteller E); Pelletlieferant CH	Feld	1	8	125	145	135	135	7	14
Korbbrenner (Hersteller D); Lieferant unbekannt	Prüfstand	1	6	107	118	111	110	4	8
Unterschub (Hersteller C); Lieferant unbekannt	Prüfstand	1	6	108	126	115	114	7	14
Kipprost (Hersteller B); Lieferant unbekannt	Prüfstand	1	12	154	162	158	158	2	5
Schalenbrenner (Hersteller A); Lieferant unbekannt	Prüfstand	1	6	112	128	118	117	6	11

Tabelle 11.8: Zusammenstellung von NO_x-Kenndaten bei der Verbrennung von Pellets in Einzelanlagen
 Bemerkung: Grafische Darstellung der Vertrauensbereiche in Abbildung 7.13

11.3 Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der NO_x -Emissionen (LRV Kat. b)

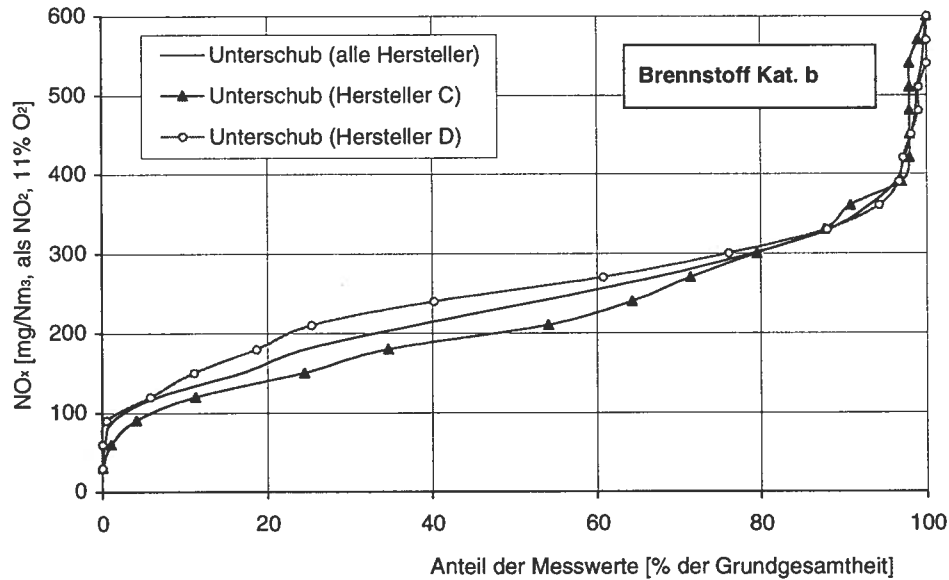


Abbildung 11.1: NO_x -Emissionsmesswerte als prozentuale Anteile in der Grundgesamtheit von Unterschub-Feuerungen zweier Hersteller

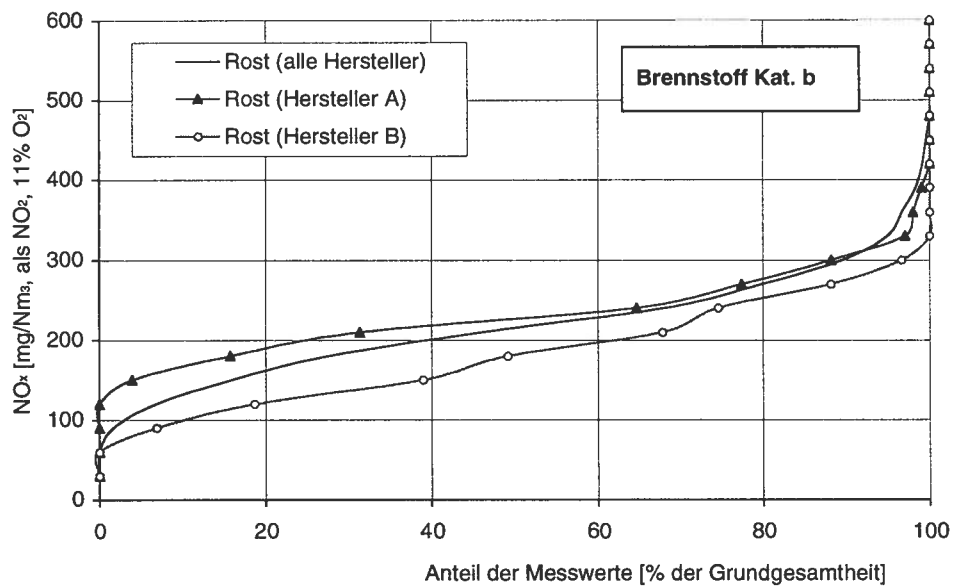


Abbildung 11.2: NO_x -Emissionsmesswerte als prozentuale Anteile in der Grundgesamtheit von Rostfeuerungen zweier Hersteller

11.4 NO_x-Emissionen in Abhängigkeit des Baujahres (LRV Kat. b)

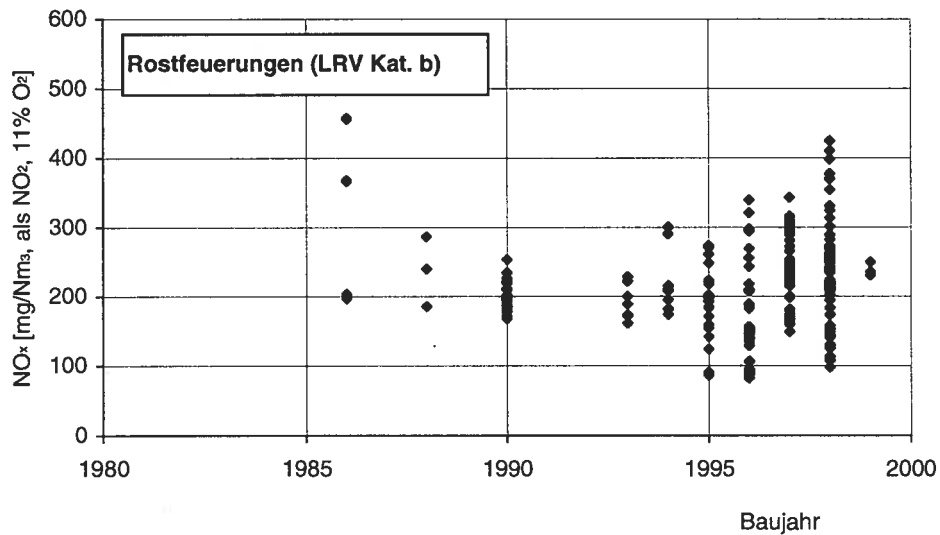


Abbildung 11.3: NO_x-Emissionen von (Vorschub-) Rostfeuerungen in Abhängigkeit des Anlagenbaujahrs
Bemerkungen: Brennstoffe gemäss LRV Kategorie b; Sämtliche Messpunkte stammen aus Feldmessungen; 61 Anlagen von 5 verschiedenen Herstellern

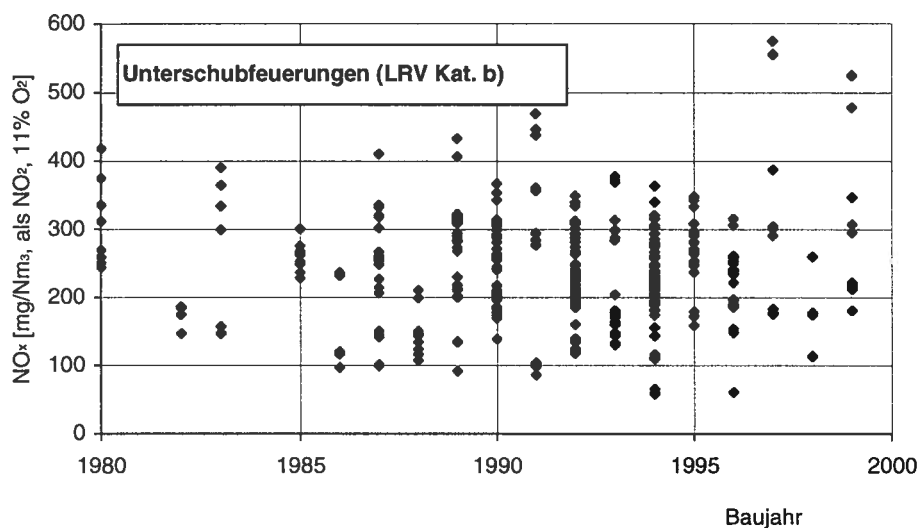


Abbildung 11.4: NO_x-Emissionen von Unterschubfeuerungen in Abhängigkeit des Anlagenbaujahrs
Bemerkungen: Brennstoffe gemäss LRV Kategorie b; Sämtliche Messpunkte stammen aus Feldmessungen; 108 Anlagen von 9 verschiedenen Herstellern

11.5 NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Nennleistung (LRV Kat. b)

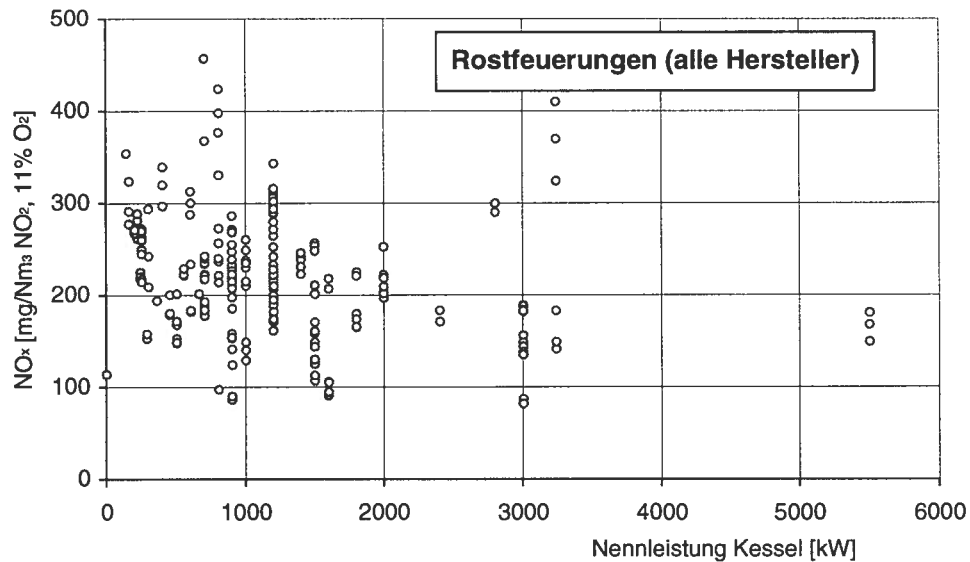


Abbildung 11.5: NO_x-Emissionen von (Vorschub-) Rostfeuerungen in Abhängigkeit des Nennleistung

Bemerkungen: Brennstoffe gemäss LRV Kategorie b; Sämtliche Messpunkte stammen aus Feldmessungen; 61 Anlagen von 5 verschiedenen Herstellern

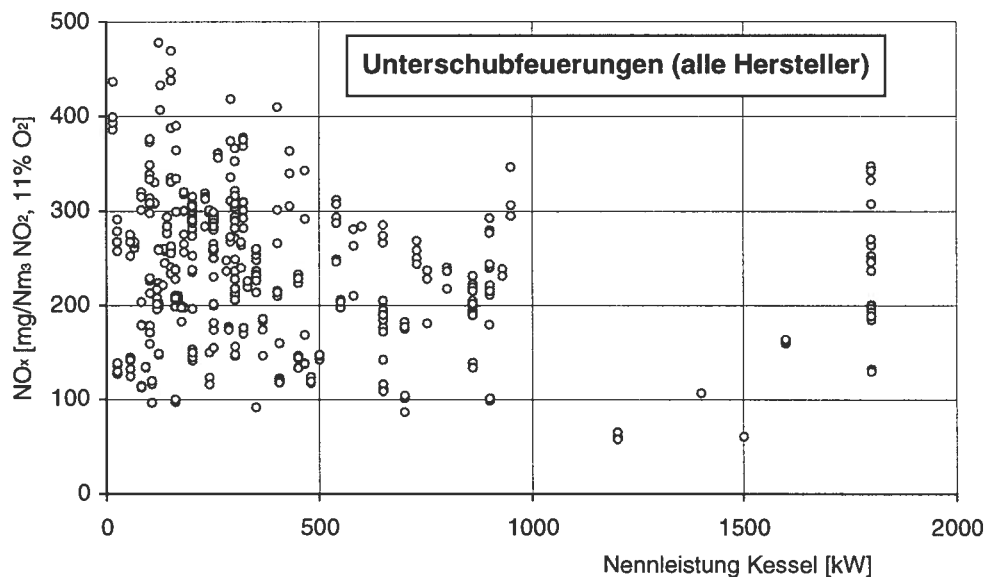


Abbildung 11.6: NO_x-Emissionen von Unterschubfeuerungen in Abhängigkeit des Nennleistung

Bemerkungen: Brennstoffe gemäss LRV Kategorie b; Sämtliche Messpunkte stammen aus Feldmessungen; 108 Anlagen von 9 verschiedenen Herstellern

11.6 Zusammenstellung NO_x (Rostfeuerung Hersteller A)

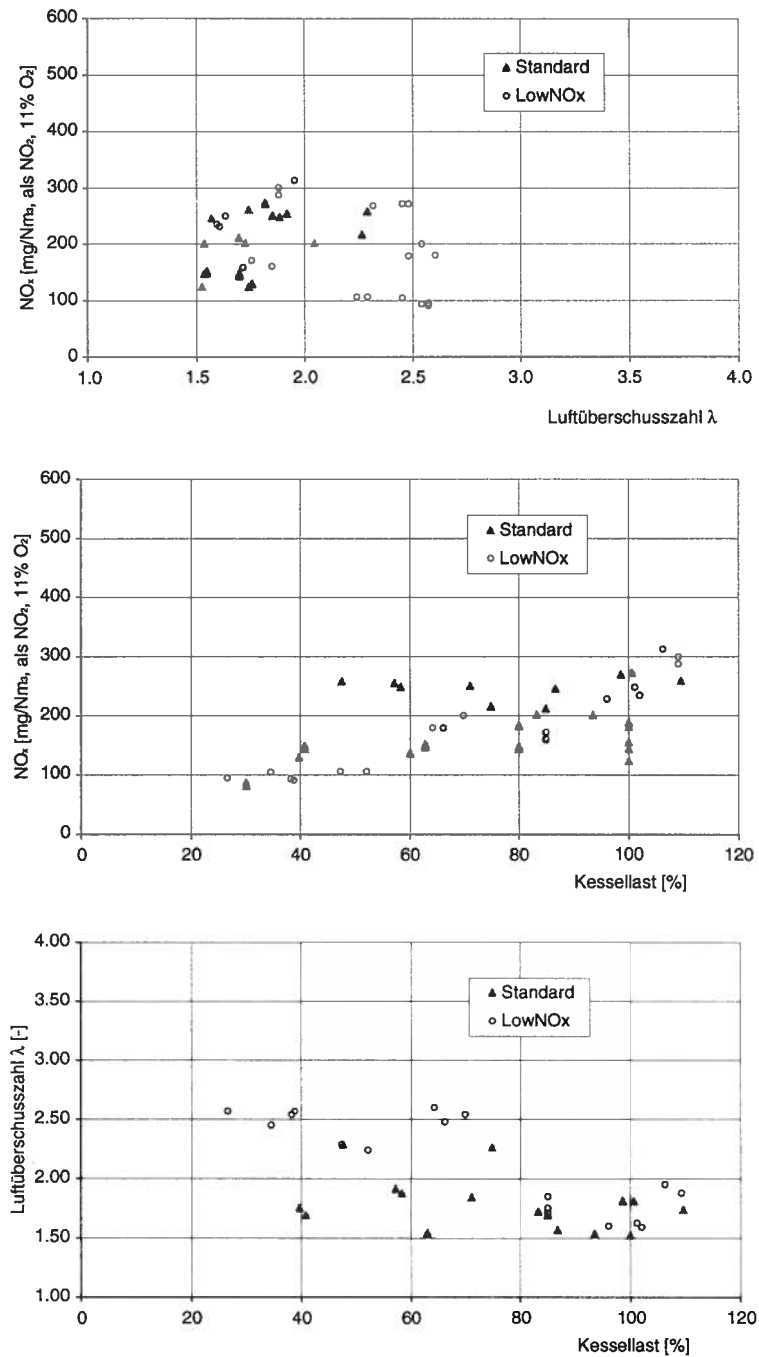


Abbildung 11.7: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für zwei Rostfeuerungstypen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

Bemerkungen: Die mittlere Grafik enthält mehr Messpunkte als die anderen beiden, da von einigen Messreihen die λ -Werte nicht bekannt sind.

11.7 Zusammenstellung NO_x (Rostfeuerung Hersteller B)

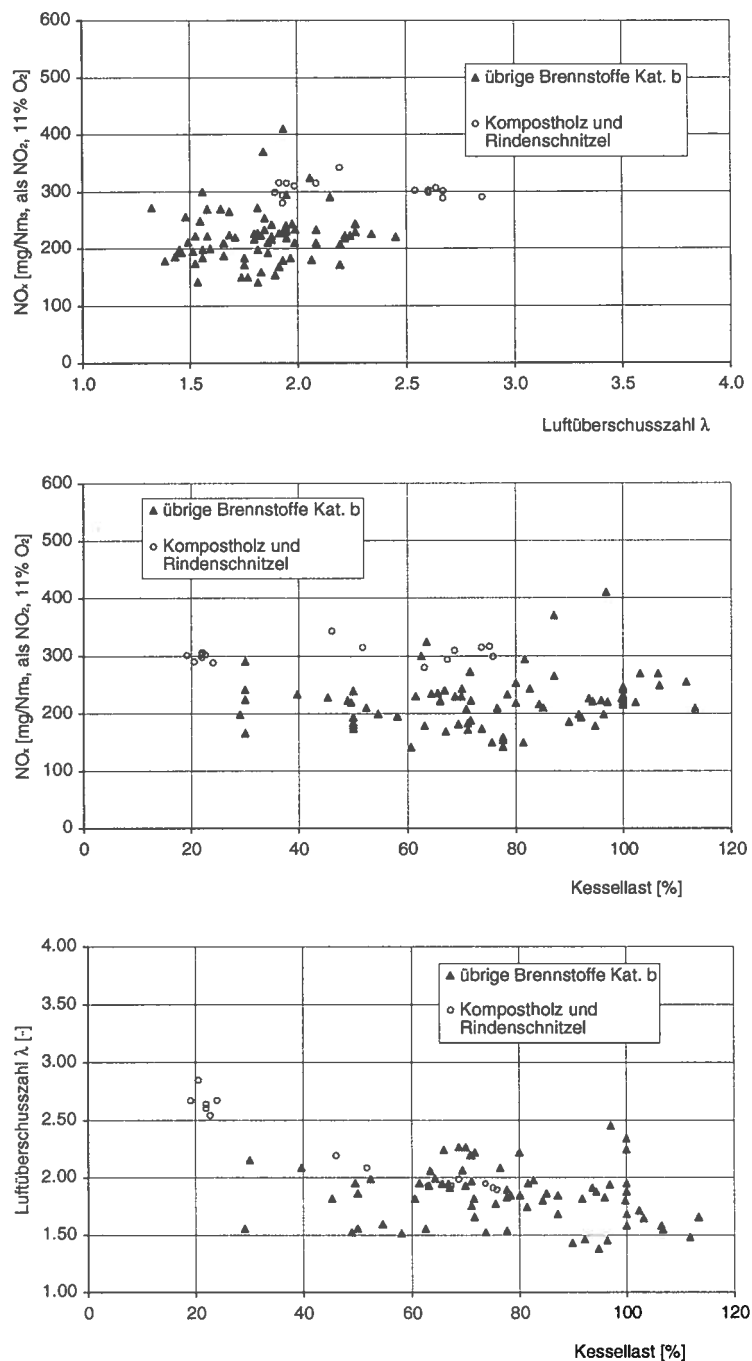


Abbildung 11.8: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Rostfeuerungen von Hersteller B beim Einsatz von naturbelassenen Holzsnitzeln (LRV Kat. b)

11.8 Zusammenstellung NO_x (Rostfeuerung Hersteller C)

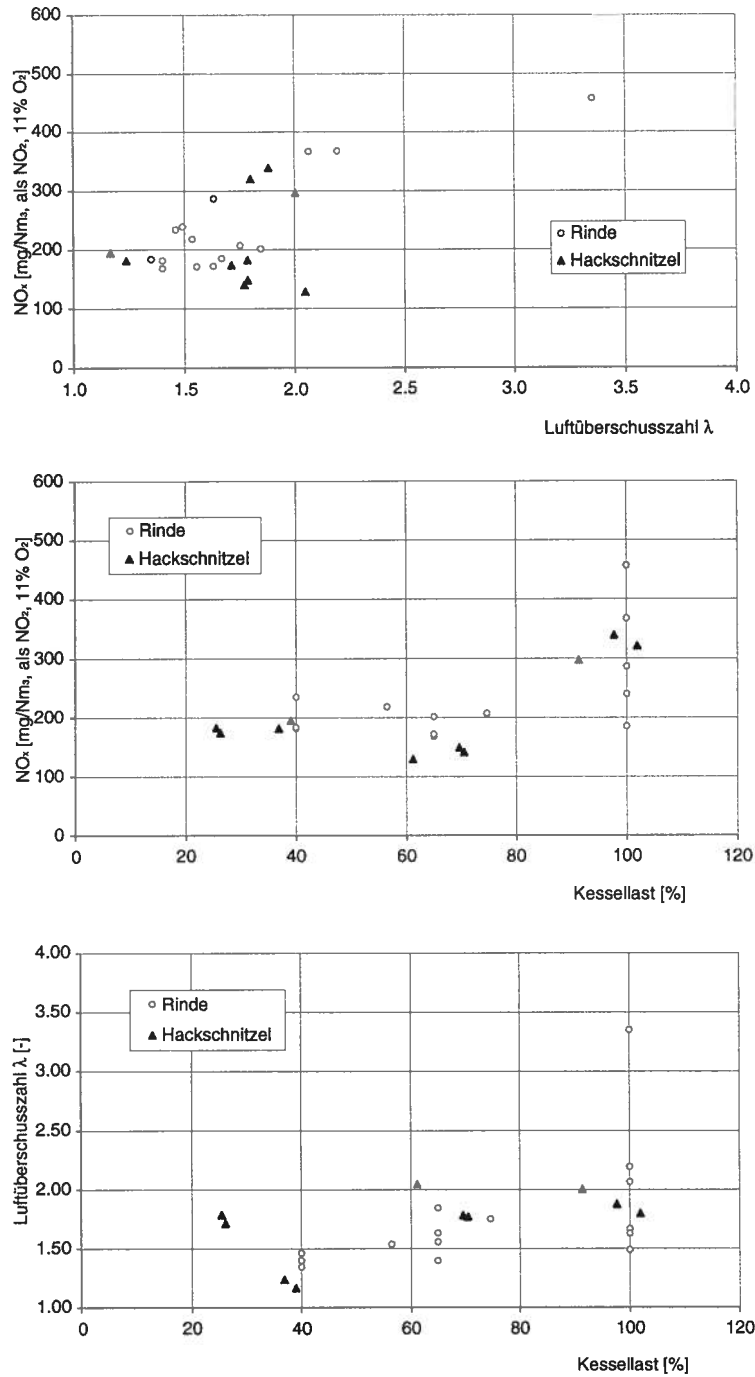


Abbildung 11.9: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Rostfeuerungen von Hersteller C beim Einsatz von naturbelassenen Holzsnitzeln (LRV Kat. b)

11.9 Zusammenstellung NO_x (Unterschubfeuerung Hersteller A)

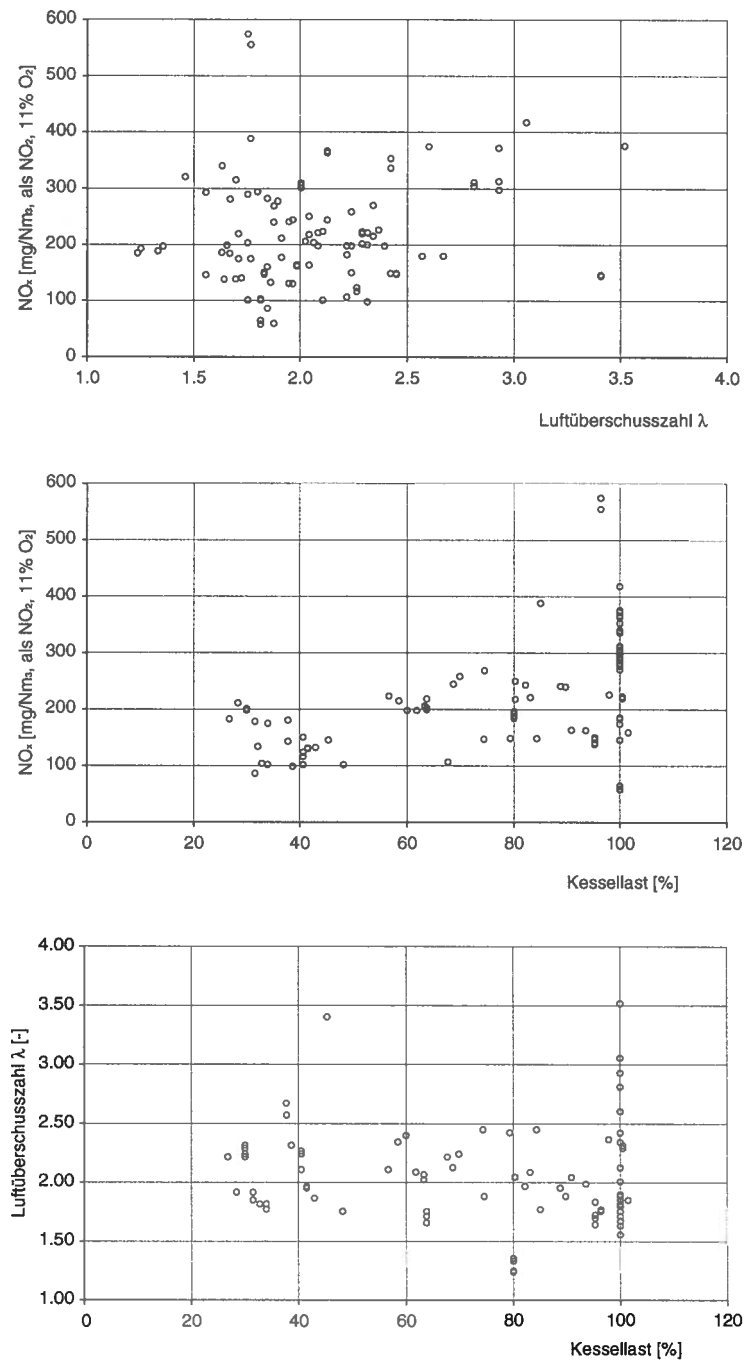


Abbildung 11.10: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

Bemerkung: 100%-Kessellastangaben z.T. als mündliche Angaben von Messfirmen mitgeteilt

11.10 Zusammenstellung NO_x (Unterschubfeuerung Hersteller B)

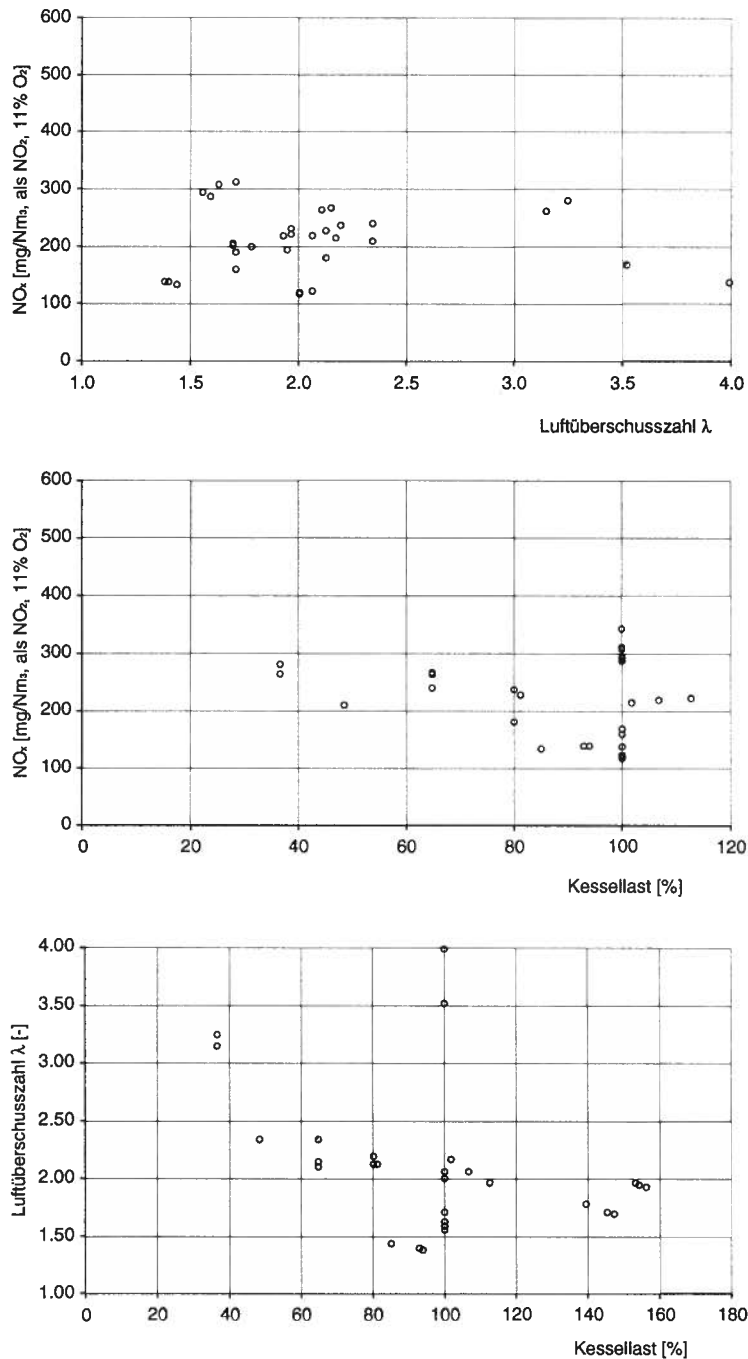


Abbildung 11.11: NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller B beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

Bemerkung: 100%-Kessellastangaben z.T. als mündliche Angaben von Messfirmen mitgeteilt

11.11 Zusammenstellung NO_x (Unterschubfeuerung Hersteller C)

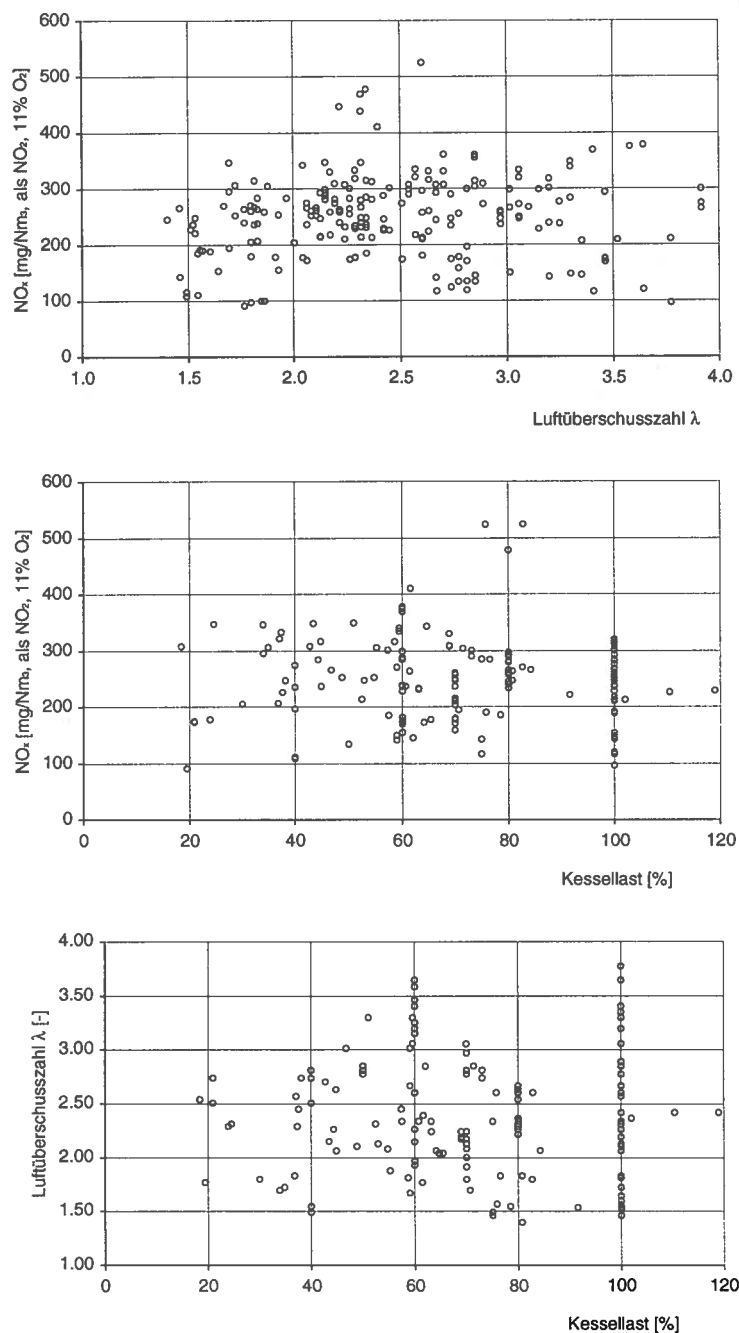


Abbildung 11.12: NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller C beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitteln (LRV Kat. b)

11.12 Tabellarische Zusammenstellung von statistischen Partikelemissions-Kenndaten

Staubgehalte in mg/Nm ³ (bei 11% O ₂) für Brennstoffe LRV Kat. b									
Anlagentyp (Hersteller)	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90%-Niveau)
Rost (Hersteller O)	Feld	18	76	43	1416	159	117	209	343
Rost (Hersteller N)	Feld	3	20	33	228	146	169	62	102
Rost (Hersteller M)	Feld	6	21	46	192	106	101	44	73
Rost (Hersteller L)	Feld	3	13	94	164	136	146	24	39
Rost (Hersteller K)	Feld	5	16	35	196	118	116	46	75
Rost (Hersteller J; Rinde)	Feld	6	19	52	357	129	122	67	109
Rost (Hersteller J; Schnitzel)	Feld	3	14	34	195	98	69	63	104
Rost (Sonderbauform; Hersteller I)	Prüfstand	4	18	4	97	37	37	18	30
Rost (Sonderbauform; Hersteller H)	Prüfstand	1	6	61	87	72	69	10	16
Unterschub (Hersteller G)	Feld	29	103	37	256	102	91	43	70
Unterschub (Hersteller F)	Feld	19	62	18	854	158	134	107	175
Unterschub (Hersteller E)	Feld	10	31	3	154	72	56	46	76
Unterschub (Hersteller D)	Feld	3	10	91	231	124	106	43	71
Unterschub (Hersteller C)	Prüfstand	1	12	16	41	29	28	7	12
Unterschub <100 kW (Hersteller B)	Prüfstand	1	12	60	81	72	76	7	12
Unterschub < 100 kW (Hersteller B)	Prüfstand	1	6	45	54	48	46	3	6
Unterschub <100 kW (Hersteller A)	Prüfstand	1	6	23	26	24	23	1	2
alle Anlagen		126	519	3	1416	110	95	106	174
Rost (alle)	Feld und Prüfstand	50	201	4	1416	128	114	138	227
Unterschub (alle)	Feld und Prüfstand	67	285	3	854	99	89	74	122

Tabelle 11.9: Zusammenstellung von statistischen Partikelemission-Kennwerten für Rost- und Unterschubfeuerungen verschiedener Hersteller

Staubgehalte in mg/Nm ³ (bei 11% O ₂) für LRV Kat. a, b und c (Feldmessungen)									
Anlagentyp	Brennstoff	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensintervall (90%-Niveau)
alle Anlagen	LRV Kat a.	6	18	26	566	63	93	125	206
alle Anlagen	LRV Kat. b	111	426	3	1416	121	106	110	180
Unterschubfeuerungen	LRV Kat. b	61	225	3	854	115	99	75	124
Rostfeuerungen	LRV Kat. b	46	201	4	1416	128	114	138	227
alle Anlagen	LRV Kat. c	88	267	11	1245	126	111	99	162
Unterschubfeuerungen	LRV Kat. c	64	171	24	1245	140	118	116	192
Rostfeuerungen	LRV Kat. c	12	56	28	200	102	95	44	72

Tabelle 11.10: Zusammenstellung von statistischen Partikelemission-Kennwerten für die LRV Brennstoffe a (Stückholz), b (naturbelassene Holzschnitzel) und c (Restholz)

Staubgehalte in mg/Nm ³ (bei 11% O ₂) bei Fichte									
Anlage	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensbereich (90 % Niveau)
Vorofen (Herst. A)	Prüfstand	1	6	61	87	72	69	10	16
Kipprost (Herst. B)	Prüfstand	1	4	37	54	46	46	7	11
Stückholz/autom. Rost (Herst. C)	Prüfstand	1	12	20	48	36	37	7	12
Unterschub (Herst. D)	Prüfstand	1	6	37	44	41	40	3	5
Unterschub (Herst. E)	Prüfstand	1	6	45	54	48	46	3	6
Unterschub (Herst. F)	Prüfstand	1	6	16	31	25	25	5	9
Retorte (Herst. G)	Prüfstand	1	6	23	26	24	23	1	2
Stückholz (Herst. H)	Prüfstand	1	6	7	22	12	11	5	9

Tabelle 11.11: Zusammenstellung von Staubemissions-Kennwerten in verschiedenen Feuerungen bei der Verbrennung von Fichte

Staubgehalte in mg/Nm ³ (bei 11% O ₂) bei Buche									
Anlage	Messplatz	Anzahl Anlagen	Anzahl Messpunkte	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Vertrauensbereich (% Niveau)
Retorte (Herst. A)	Prüfstand	1	6	27	97	61	64	31	51
Unterschub (Herst. B)	Prüfstand	1	6	24	41	32	32	7	24
Unterschub (Herst. C)	Prüfstand	1	12	60	81	72	76	7	12
Stückholz (Herst. G)	Prüfstand	1	6	7	24	15	12	7	12
Stückholz (Herst. H)	Prüfstand	1	6	19	56	31	26	14	23
Unterschub (Herst. D)	Feldmessung	1	4	150	198	183	191	22	36
Rost (Herst. E)	Feldmessung	1	3	118	158	137	135	20	33
Rost (Herst. F; rindenfrei)	Feldmessung	1	6	132	164	150	150	11	18

Tabelle 11.12: Zusammenstellung von Staubemissions-Kennwerten in verschiedenen Feuerungen bei der Verbrennung von Buche

11.13 Zusammenstellung Staub (Rostfeuerung Hersteller A)

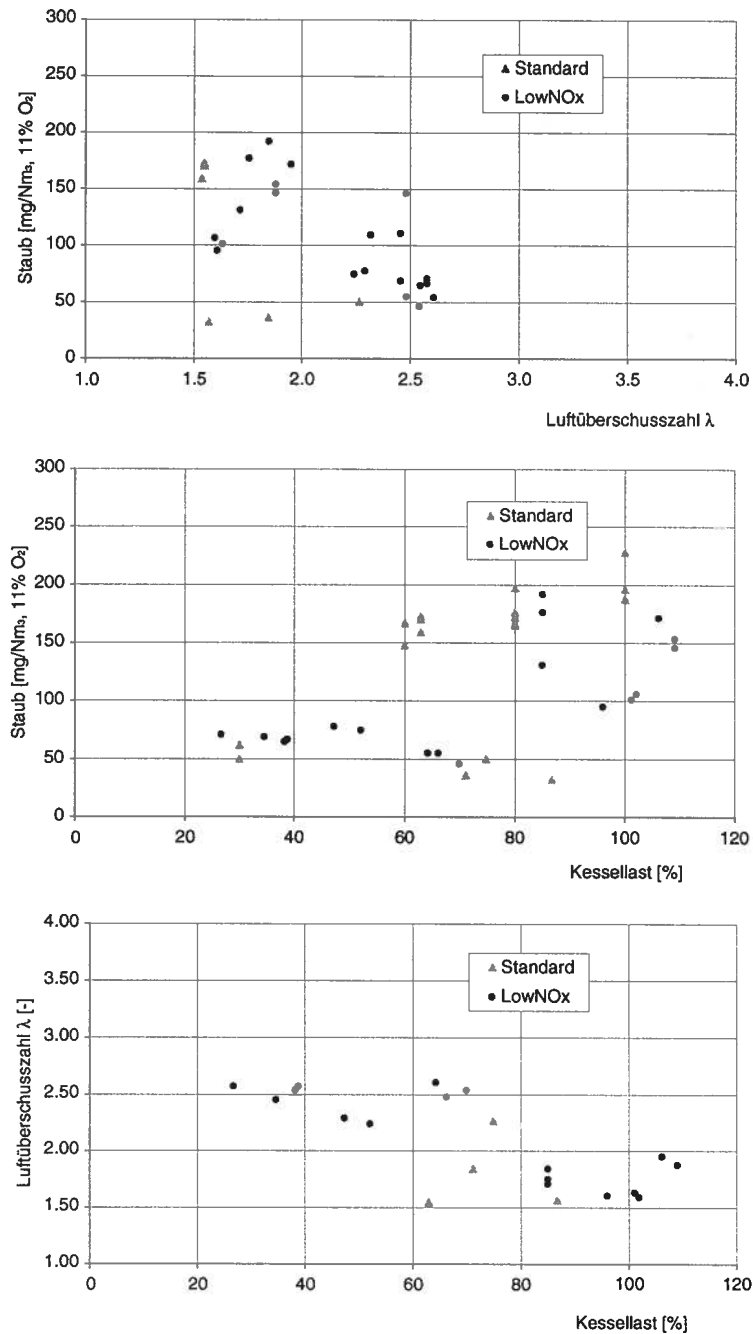


Abbildung 11.13: Staubemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Vorschubrostfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

11.14 Zusammenstellung Partikel (Rostfeuerung Hersteller B)

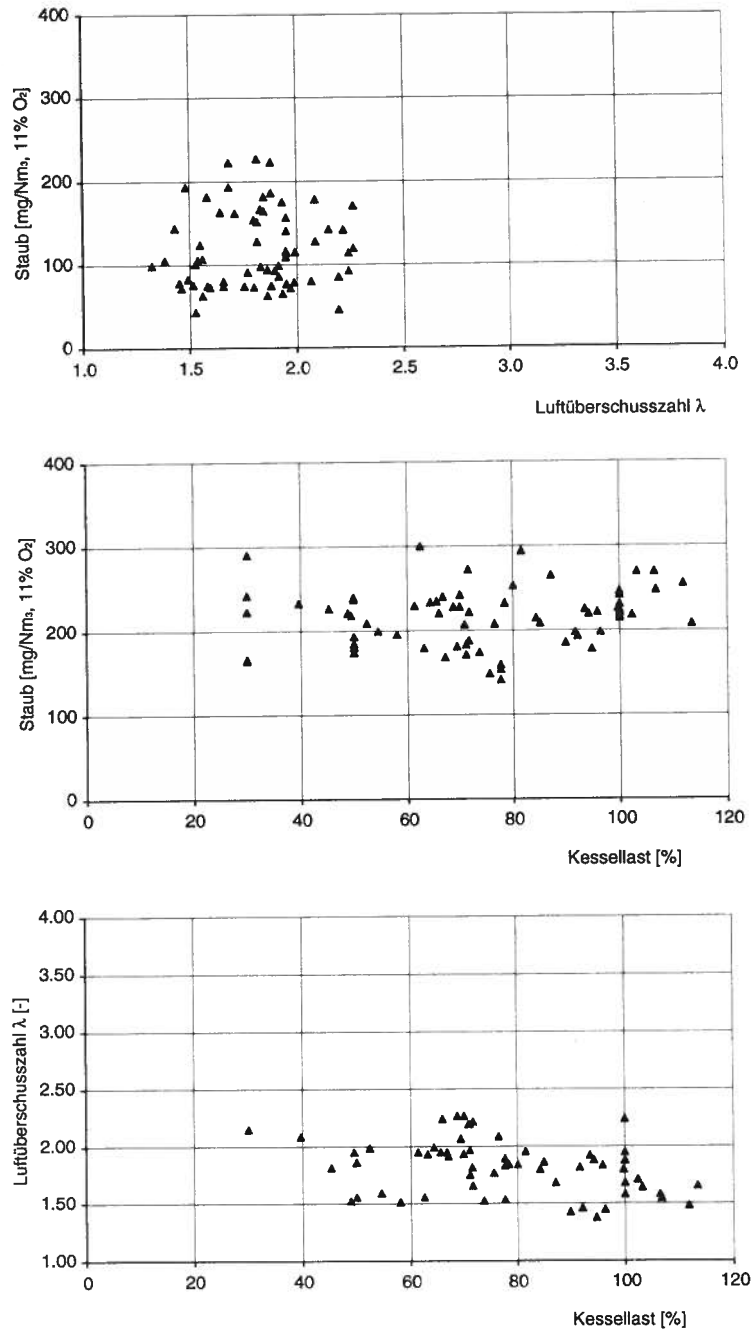


Abbildung 11.14: Staubemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Vorschubrostfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

11.15 Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller A)

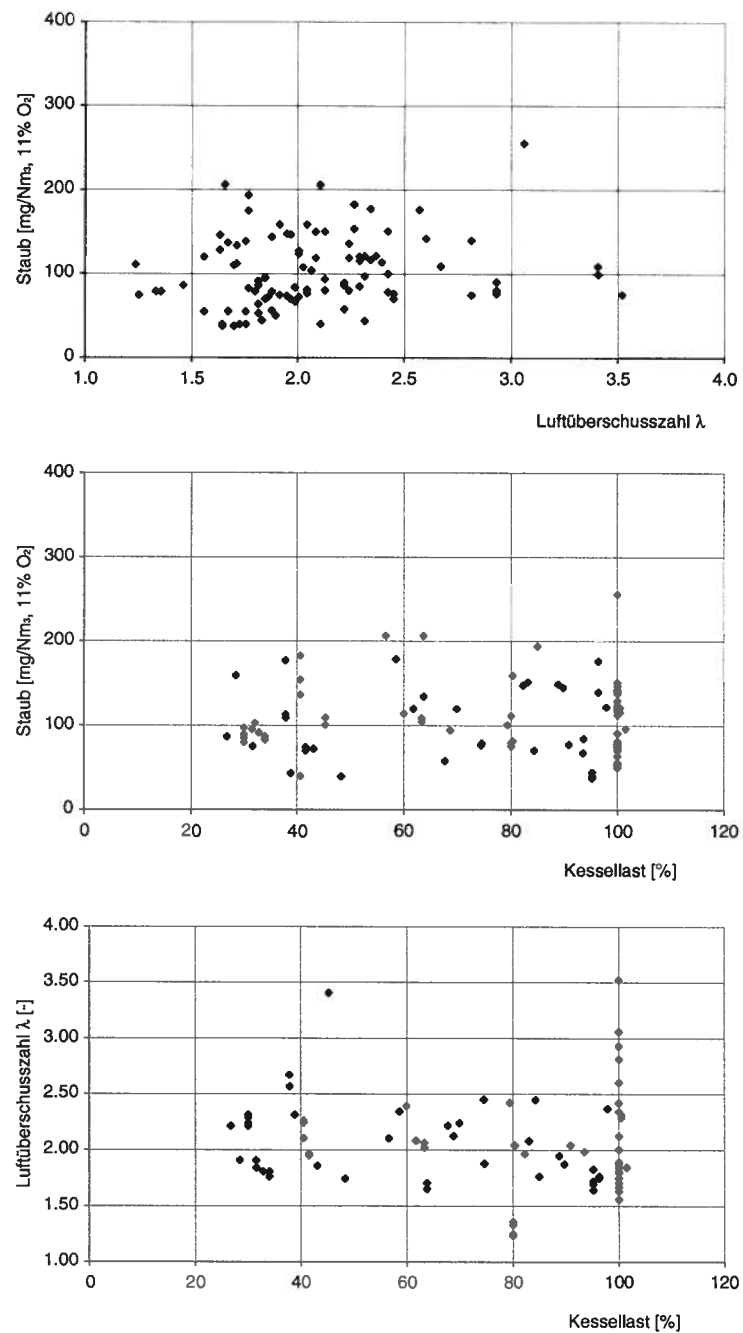


Abbildung 11.15: Staubemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

11.16 Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller B)

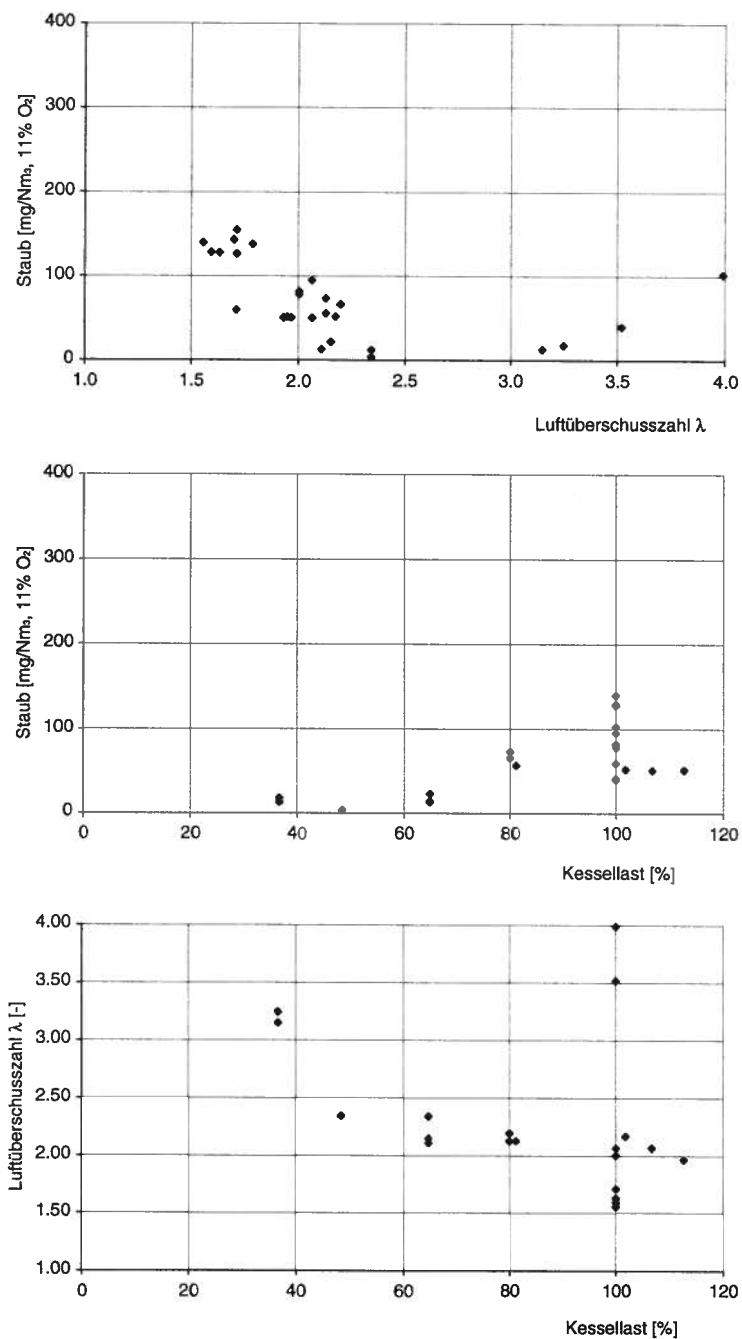


Abbildung 11.16: Staubemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

11.17 Zusammenstellung Partikel (Unterschubfeuerung Hersteller C)

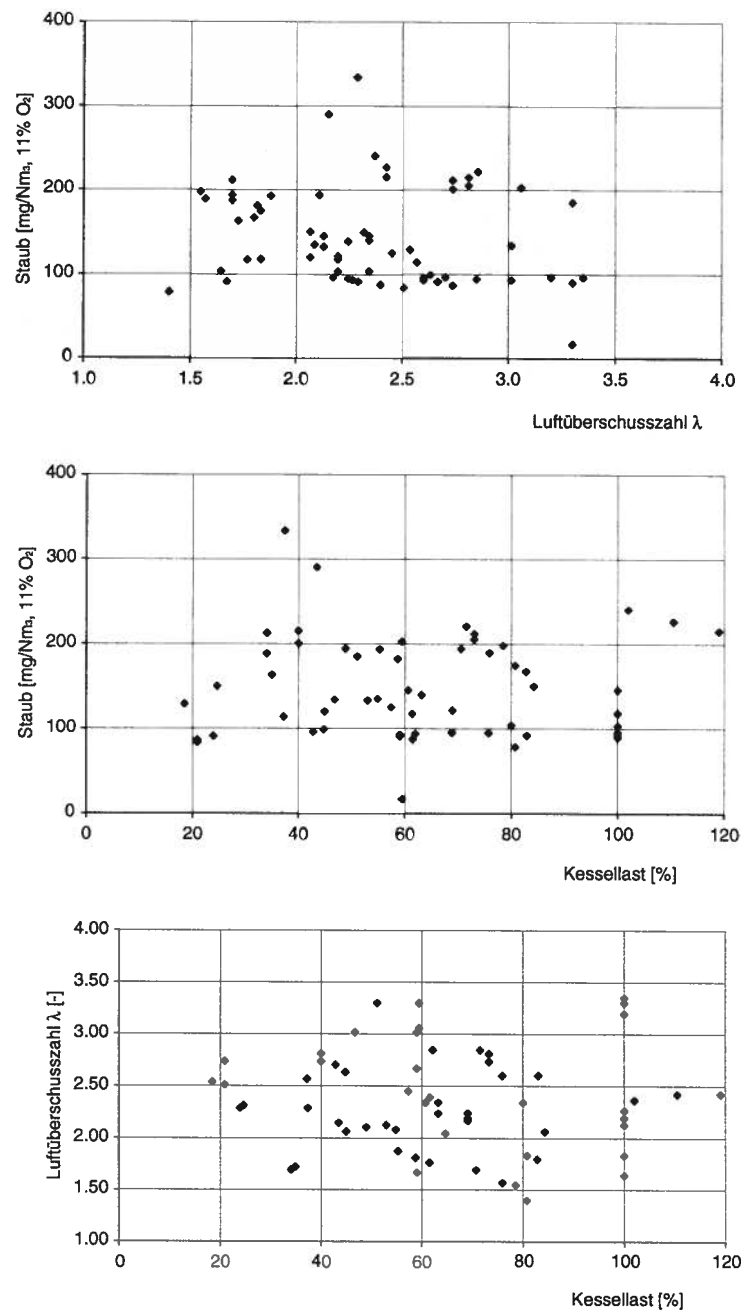


Abbildung 11.17: Staubemissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ und der Kessellast sowie Verlauf von λ in Funktion der Kessellast für Unterschubfeuerungen von Hersteller A beim Einsatz von naturbelassenen Holzschnitzeln (LRV Kat. b)

12 Literatur

- Baumbach, G.: *Luftreinhaltung*, Springer Verlag, Berlin, 1994
- Biollaz, S.; Nussbaumer, Th.: *Einsatz von Rostfeuerungen für Holz und Halmgüter*, 4. Holzenergie-Symposium, 18.10.1996, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 1996, 9–41
- BUWAL 1995: *Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 256, BUWAL, Bern 1995
- BUWAL 2000: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas und Holz*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, BUWAL, erarbeitet durch F. Kessler und R. Frischknecht, Bern 2000
- EMPA 1996: *Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen (Emissions-Messempfehlungen)*, Vollzug Umwelt, BUWAL, Bern 1996, Stand 25. Januar 1996
- Gaegauf, Chr.: *Partikelemissionen verschiedener Holzfeuerungen*, 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 31-50
- Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th.: *Aerosole aus Biomassefeuerungen – Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung*, 5. Holzenergie-Symposium, 16.10.1998, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 1998, 45-74
- Jansen, U.: *Bedeutung der Partikel- und Stickoxidemissionen aus Holzfeuerungen und Massnahmen zur Luftreinhaltung*, 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 9–30
- Nussbaumer, Th.: *Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidsminderung bei Holzfeuerungen, Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen*, Springer-VDI, Düsseldorf 1997, 279–308
- Kauppinen, E.I.; Pakkanen, T.A.: *Coal Combustion Aerosols: A Field Study*. Environ. Sci. Technology, 1990
- Keller, R.: *Primärmassnahmen zur NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung*, Diss ETH Nr. 10514, Zürich 1994
- Kolar, J.: *Stickstoffoxide und Luftreinhaltung*, Springer 1990, ISBN 3-540-50935-6
- Leuckel, W.; Römer, R.: *Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen*, VDI-Bericht Nr. 346 (1979)
- Nussbaumer, Th.: *Stickoxide bei der Holzverbrennung*, Heizung Klima, 12 1988, 51–62
- Nussbaumer, Th.: *Primär- und Sekundärmassnahmen zur NO_x-Minderung bei Biomassefeuerungen*, VDI-Tagung Thermische Biomassenutzung, Salzburg, 23. und 24. April 1997, VDI Bericht 1319, 141–166
- Oser, M.; Nussbaumer, Th.; Schweizer, B.; Mohr, M.; Figi, R.: *Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung*, 6. Holzenergie-Symposium, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 51-68